

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA PARA EL ENFRIAMIENTO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 43 W Y ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE CONVERSIÓN FOTOELÉCTRICA”**

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

**ANA DEL PILAR VILLENA IGUAGO  
PAÚL ALEJANDRO QUISPE MALDONADO**

**DIRECTOR: ING. JOSE GUASUMBA**

**CODIRECTOR: ING. ERNERTO SORIA**

**Sangolquí, Marzo del 2006**

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

**El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA PARA EL ENFRIAMIENTO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE 43 W Y ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE CONVERSIÓN FOTOELÉCTRICA” fue realizado en su totalidad por Ana del Pilar Villena Iguago y Paúl Alejandro Quispe Maldonado, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.**

---

**Ing. José Guasumba**  
**DIRECTOR**

---

**Ing. Ernesto Soria**  
**CODIRECTOR**

**Sangolquí, Marzo del 2006**

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE  
ENERGÍA TÉRMICA PARA EL ENFRIAMIENTO DE UN PANEL  
FOTOVOLTAICO DE 43 W Y ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE LA  
EFICIENCIA DE CONVERSIÓN FOTOELÉCTRICA”**

**ELABORADO POR:**

---

**Ana Villena Iguago**

---

**Paúl Quispe Maldonado**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

***EL DECANO***

**Sangolquí, Marzo del 2006**

## **DEDICATORIA**

*Este proyecto va dedicado de todo corazón a Dios que ha sido la luz que ilumina mi camino y el soporte en los momentos más difíciles de mi vida.*

*A mis Abuelitos Betito, Limpa y Jonny, que desde el cielo sé que me estarán cuidando siempre.*

*A mis Papis, quienes son luz de mi vida y razón de ser quien soy, a ellos, que les debo tanto por brindarme su amor y comprensión.*

*A mis Hermanos Marthi, Eddy y Diany que han sido un gran apoyo durante todo este tiempo.*

*Y a toda mi familia en general que siempre han estado muy pendientes de mí y mi bienestar.*

*Gracias a todos por ser como son!*

*ANNIE*

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo:*

*A mis padres y a mi hermano  
por su respaldo y colaboración.*

*A Juanito, el angelito de la guarda que camina  
conmigo y en todo momento cuida mis pasos.*

*Paúl*

## **AGRADECIMIENTO**

*Un agradecimiento inmenso,*

*A mis Papis, pilar fundamental e indispensable de mi formación*

*A mis Hermanos Eddy, Marthy y Caro por el apoyo incondicional*

*brindado a lo largo de estos años.*

*A mis angelitos de la guarda que desde el cielo me han sabido guiar*

*con todo su amor, gracias PAPITOS!*

*A mi familia por su preocupación constante.*

*A mi Facultad, por la formación profesional adquirida.*

*A los Directores de Tesis, por su guía para la pronta*

*culminación de este trabajo.*

*Y a todos los buenos amigos que encontré en las aulas*

*durante todos estos años.*

*ANNIE*

## **AGRADECIMIENTO**

*El presente Proyecto va dirigido con expresión de gratitud:*

*A Dios, la Virgen Dolorosa y San Francisco de Asís  
por darme la posibilidad de día a día seguir mi vida por el sendero  
del bien.*

*A mis padres, que por su apoyo incondicional, afán y sacrificio  
hicieron posible la culminación de esta etapa.*

*A Juanito, por dejarme la herencia más valiosa: los valores  
morales*

*A mi querida Facultad, por los valiosos conocimientos académicos  
impartidos.*

*Y, a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron  
en la culminación del este trabajo.*

*Paúl*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |     |
|--|-----|
| CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO | ii  |
| LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO                    | iii |
| DEDICATORIA                                  | iv  |
| AGRADECIMIENTO                               | v   |
| INDICE DE CONTENIDOS                         | vi  |
| RESUMEN                                      | xxi |

## CAPÍTULO 1

### GENERALIDADES

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1.1. ANTECEDENTES                | 1 |
| 1.2. DEFINICION DEL PROBLEMA     | 3 |
| 1.3. OBJETIVOS                   | 4 |
| 1.3.1 GENERAL                    | 4 |
| 1.3.2 ESPECIFICOS                | 4 |
| 1.4. ALCANCE                     | 4 |
| 1.5. JUSTIFICACION E IMPORTANCIA | 5 |

## CAPÍTULO 2

### ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

|  |    |
|--|----|
| 2.1 ENERGÍA SOLAR  | 7  |
| 2.1.1. FUNDAMENTOS                                       | 7  |
| 2.1.2. RADIACIÓN Y CONSTANTE SOLAR                       | 8  |
| 2.1.2.1. Tipos de Radiación Solar                        | 9  |
| 2.1.2.2. Características Generales de la Radiación Solar | 10 |
| 2.1.2.3. Factores que Afectan la Radiación Solar         | 10 |
| 2.1.3 VENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR                       | 11 |



|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.1.4    | APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR   | 11 |
| 2.1.5    | APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR  | 12 |
| 2.2.     | ENERGÍA FOTOVOLTAICA  | 12 |
| 2.2.1    | ANTECEDENTES  | 12 |
| 2.2.2    | FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA  | 13 |
| 2.2.3    | CÉLULAS FOTOVOLTAICAS   | 14 |
| 2.2.3.1. | Fabricación   | 14 |
| 2.2.3.2. | Funcionamiento  | 16 |
| 2.2.3.3. | Tipos de Células Fotovoltaicas  | 18 |
| 2.2.4    | MÓDULOS O PANELES FOTOVOLTAICOS   | 23 |
| 2.2.4.1  | Características Eléctricas de los Módulos<br>Fotovoltaicos                          | 25 |
| 2.2.4.2  | Influencia de la Temperatura en los Parámetros<br>Básicos de un Módulo Fotovoltaico | 28 |
| 2.2.5    | SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  | 28 |
| 2.2.6    | CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE<br>LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS                       | 30 |
| 2.2.7    | EFICIENCIA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS   | 31 |
| 2.2.8    | APLICACIONES  | 32 |
| 2.2.9    | VENTAJAS DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA   | 39 |

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE CALOR**

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.1     | TRANSFERENCIA DE CALOR                              | 41 |
| 3.1.1   | DEFINICIONES  | 41 |
| 3.1.2   | TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN                 | 42 |
| 3.1.3   | TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN                 | 44 |
| 3.1.4   | TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN                  | 47 |
| 3.1.5   | ABSORCIÓN, REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN<br>SUPERFICIALES | 49 |
| 3.1.5.1 | Absortividad  | 49 |

|   |    |
|---|----|
| 3.1.5.2 Reflectividad                       | 50 |
| 3.1.5.3 Transmisividad                      | 50 |
| 3.1.6 RADIACIÓN AMBIENTAL                   | 51 |
| 3.1.7 DISEÑO DEL SISTEMA EXTRACTOR DE CALOR | 55 |
| 3.1.7.1 Efecto Fototérmico                  | 55 |
| 3.1.7.2 Diseño del Modelo Térmico           | 57 |

## **CAPÍTULO 4**

### **CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA**

|  |    |
|--|----|
| 4.1 CONSTRUCCIÓN   | 69 |
| 4.1.1. CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE EXTRACCION DE CALOR   | 72 |
| 4.1.2. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO         | 76 |
| 4.2 IMPLEMENTACIÓN                                       | 78 |
| 4.2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE CALOR | 78 |
| 4.2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO        | 80 |

## **CAPÍTULO 5**

### **PRUEBAS EN EL SISTEMA**

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 5.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS        | 83 |
| 5.1.1 DESCRIPCIÓN                | 85 |
| 5.2. NORMATIVAS                  | 87 |
| 5.2.1. ANTECEDENTES              | 87 |
| 5.2.2. OBJETO                    | 87 |
| 5.2.3. DEFINICIONES Y SIMBOLOGÍA | 87 |
| 5.2.4. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS    | 88 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2.5. REQUISITOS   | 89 |
| 5.2.6. INSPECCIÓN   | 90 |
| 5.2.7. MÉTODO DE ENSAYO                                       | 90 |
| 5.2.8. CÁLCULOS   | 91 |
| 5.2.9. INFORME DE RESULTADOS                                  | 92 |
| 5.3. PÉRDIDA DE RENDIMIENTO                                   | 92 |
| 5.3.1 POSIBILIDAD DE MEJORAMIENTO DE<br>CONVERSIÓN DE ENERGÍA | 93 |
| 5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS                       | 94 |

## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISIS ECONOMICO FINANCIERO**

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO                | 99  |
| 6.1.1 COSTO DE INVERSIÓN DEL PROYECTO | 99  |
| 6.2 ANÁLISIS FINANCIERO               | 105 |
| 6.2.1. INDICES FINANCIEROS            | 106 |

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 7.1 CONCLUSIONES    | 107 |
| 7.2 RECOMENDACIONES | 108 |

## TABLAS

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Tabla 2.1</b>  | Condiciones Estándar de Medida de Características de Módulos Fotovoltaicos  | 25 |
| <b>Tabla 2.2</b>  | Condiciones de Medida de Características de Módulos Fotovoltaicos   | 28 |
| <b>Tabla 2.3</b>  | Eficiencias proyectadas hasta el 2010   | 31 |
| <b>Tabla 3.1</b>  | Conductividad térmica de ciertos materiales   | 44 |
| <b>Tabla 3.2</b>  | Absortividad solar y emisividad de algunas superficies  | 55 |
| <b>Tabla 3.3</b>  | Datos necesarios para el análisis energético del Panel Fotovoltaico   | 57 |
| <b>Tabla 3.4</b>  | Datos necesarios para el cálculo de calor transferido   | 60 |
| <b>Tabla 3.5</b>  | Datos necesarios para el cálculo de la eficiencia del panel   | 64 |
| <b>Tabla 4.1</b>  | Lista de materiales adquiridos en el mercado  | 69 |
| <b>Tabla 4.2</b>  | Lista de herramientas empleadas   | 70 |
| <b>Tabla 4.3</b>  | Lista de maquinaria y equipos utilizados para la fabricación  | 71 |
| <b>Tabla 5.1</b>  | Descripción del código para cada ensayo   | 85 |
| <b>Tabla 5.2</b>  | Primer ensayo para el panel fotovoltaico con rotación en un eje con seguidor solar  | 85 |
| <b>Tabla 5.3</b>  | Segundo ensayo para el panel fotovoltaico con rotación en un eje con seguidor solar   | 86 |
| <b>Tabla 5.4</b>  | Ensayo adicional para el túnel de viento previo al montaje en el panel fotovoltaico con rotación en un eje con seguidor solar | 86 |
| <b>Tabla 5.5</b>  | Simbología y unidades de parámetros a utilizar  | 87 |
| <b>Tabla 5.6</b>  | Descripción y unidades de medida de equipos a utilizar  | 88 |
| <b>Tabla 5.7</b>  | Especificaciones Técnicas del Anemómetro  | 88 |
| <b>Tabla 5.8</b>  | Especificaciones Técnicas del Panel Fotovoltaico  | 88 |
| <b>Tabla 5.9</b>  | Especificaciones Técnicas de la Pistola Láser   | 89 |
| <b>Tabla 5.10</b> | Especificaciones Técnicas del Termómetro Digital  | 89 |
| <b>Tabla 5.11</b> | Especificaciones Técnicas del Multímetro Digital  | 89 |
| <b>Tabla 5.12</b> | Cuadro Resumen de Datos antes de Instalar el Sistema de Extracción de Calor   |    |

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| <b>Tabla 5.13</b> | Cuadro Resumen de Datos después de Instalar el Sistema de Extracción de Calor |     |
| <b>Tabla 5.14</b> | Porcentaje de Variación de Resultados   |     |
| <b>Tabla 6.1</b>  | Cuadro Resumen de los Costos del Proyecto                                     | 100 |
| <b>Tabla 6.2</b>  | Costo de materiales directos  | 101 |
| <b>Tabla 6.3</b>  | Costo de la Mano de Obra Directa  | 102 |
| <b>Tabla 6.4</b>  | Costo Indirectos (Personal Intelectual)                                       | 103 |
| <b>Tabla 6.5</b>  | Costos Indirectos (materiales)  | 104 |
| <b>Tabla 6.6</b>  | Gastos Administrativos  | 105 |

## FIGURAS

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Figura 2.1</b>  | Tipos de Radiación  | 10 |
| <b>Figura 2.2</b>  | Efecto Fotovoltaico   | 14 |
| <b>Figura 2.3</b>  | Silicio dopado con Antimonio  | 16 |
| <b>Figura 2.4</b>  | Silicio dopado con Aluminio   | 16 |
| <b>Figura 2.5</b>  | Generación de corriente mediante placas de silicio                                  | 17 |
| <b>Figura 2.6</b>  | Células Monocristalinas   | 18 |
| <b>Figura 2.7</b>  | Células Policristalinas   | 19 |
| <b>Figura 2.8</b>  | Células Amorfas   | 20 |
| <b>Figura 2.9</b>  | Células Policristalinas de Lámina Delgada   | 21 |
| <b>Figura 2.10</b> | Células Esférica  | 21 |
| <b>Figura 2.11</b> | Células Flexibles   | 23 |
| <b>Figura 2.12</b> | Elementos de un Panel Fotovoltaico  | 24 |
| <b>Figura 2.13</b> | Curvas características $I$ - $V$ y $P$ - $V$ de un panel fotovoltaico               | 26 |
| <b>Figura 2.14</b> | Influencia de la irradiación, $G$ , en las características de un panel fotovoltaico | 27 |
| <b>Figura 2.15</b> | Sistema Fotovoltaico conectado a la Red   | 32 |
| <b>Figura 2.16</b> | Esquema de una Instalación Fotovoltaica   | 33 |
| <b>Figura 2.17</b> | Instalación Fotovoltaica para vivienda rural  | 33 |
| <b>Figura 2.18</b> | Farolas Fotovoltaicas   | 34 |
| <b>Figura 2.19</b> | Vallas Publicitarias iluminadas con Farolas Fotovoltaicas                           | 34 |
| <b>Figura 2.20</b> | Autos Solares   | 35 |
| <b>Figura 2.21</b> | Esquema de un Sistema de Bombeo   | 35 |
| <b>Figura 2.22</b> | Sistema de Bombeo de Agua   | 36 |
| <b>Figura 2.23</b> | Sistema de Riego  | 36 |
| <b>Figura 2.24</b> | Telecomunicaciones Satelitales  | 37 |
| <b>Figura 2.25</b> | Repetidores de TV, radio y telefonía móvil  | 37 |
| <b>Figura 2.26</b> | Radioteléfonos  | 37 |
| <b>Figura 2.27</b> | Faro Accionado con Paneles Fotovoltaicos  | 38 |
| <b>Figura 2.28</b> | Cargador  | 38 |
| <b>Figura 2.29</b> | Equipo de Refrigeración móvil para el Transporte de vacunas en el Desierto          | 39 |
| <b>Figura 3.1</b>  | Transmisión del calor   | 43 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 3.2</b>  | Procesos de absorción, reflexión y transmisión asociados con un medio semitransparente | 49 |
| <b>Figura 3.3</b>  | Dependencia espectral de absortancia y transmitancia espectrales.                      | 50 |
| <b>Figura 3.4</b>  | Irradiancia y horas solares pico   | 53 |
| <b>Figura 3.5</b>  | Distribución espectral de la radiación solar   | 54 |
| <b>Figura 3.6</b>  | Balance Energético de la Cara Superior del Panel                                       | 57 |
| <b>Figura 3.7</b>  | Balance Energético de la Cara Inferior del Panel                                       | 59 |
| <b>Figura 3.8</b>  | Cálculo del Calor Total  | 60 |
| <b>Figura 3.9</b>  | Resistencias Eléctricas  | 61 |
| <b>Figura 3.10</b> | Dimensiones Exteriores de la Cámara de Secado  | 66 |
| <b>Figura 3.11</b> | Dimensiones Interiores de la Cámara de Secado  | 66 |
| <b>Figura 4.1</b>  | Construcción de la unidad de control eléctrico   | 72 |
| <b>Figura 4.2</b>  | Construcción del marco estructural de aluminio apoya-coraza                            | 72 |
| <b>Figura 4.3</b>  | Construcción y armado de corazas superior e inferior                                   | 73 |
| <b>Figura 4.4</b>  | Colocación de ventiladores en las corazas superior e Inferior                          | 73 |
| <b>Figura 4.5</b>  | Refuerzo total de uniones y juntas en las corazas superior e inferior                  | 74 |
| <b>Figura 4.6</b>  | Construcción y evaluación de viento en prototipo de Pruebas                            | 74 |
| <b>Figura 4.7</b>  | Construcción de los alerones de direccionamiento de aire                               | 75 |
| <b>Figura 4.8</b>  | Elaboración del ducto de salida de aire  | 75 |
| <b>Figura 4.9</b>  | Corte de chapa de acero inoxidable según medidas                                       | 76 |
| <b>Figura 4.10</b> | Doblado de elementos constitutivos de la cámara de secado                              | 77 |
| <b>Figura 4.11</b> | Soldadura y armado de la cámara de secado  | 77 |
| <b>Figura 4.12</b> | Pulido y revisión final de fugas de aire   | 78 |
| <b>Figura 4.13</b> | Implementación de corazas y conexiones eléctricas                                      | 79 |
| <b>Figura 4.14</b> | Implementación del ducto de salida de aire   | 79 |
| <b>Figura 4.15</b> | Implementación y verificación de fugas de aire finales                                 | 80 |
| <b>Figura 4.16</b> | Colocación de lana de vidrio alrededor del ducto de aluminio                           | 80 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 4.17</b> | Implementación del ducto de aluminio en la boca de ingreso de aire       | 81 |
| <b>Figura 4.18</b> | Implementación del conjunto a la boca de salida de aire (panel solar)    | 81 |
| <b>Figura 4.19</b> | Verificación final del sistema completo                                  | 82 |
| <b>Figura 5.1</b>  | Panel Fotovoltaico sin Sistema de Extracción                             | 84 |
| <b>Figura 5.2</b>  | Panel Fotovoltaico con Sistema de Extracción                             | 84 |
| <b>Figura 5.3</b>  | Túnel de Viento enfriado por ventilador accionado por Panel Fotovoltaico | 85 |
| <b>Figura 5.4</b>  | Irradiación vs. Voltaje  | 94 |
| <b>Figura 5.5</b>  | Temperatura del Panel vs. Días de Prueba                                 | 87 |
| <b>Figura 5.6</b>  | Potencia del Panel vs. Días de Prueba                                    | 88 |
| <b>Figura 5.7</b>  | Amperaje vs. Radiación Incidente   | 89 |
| <b>Figura 5.8</b>  | Eficiencia vs. Días de Prueba  | 90 |



## NOMENCLATURA

**Tabla A.** Simbología, descripción y unidades de parámetros utilizados

| Símbolo         | Descripción  | Unidades              |
|-----------------|--|-----------------------|
| $\Delta T$      | Delta de temperatura                                     | [°K]                  |
| A               | Ancho del panel fotovoltaico                             | [m]                   |
| A               | Área del panel fotovoltaico                              | [m <sup>2</sup> ]     |
| Ab              | Área de la boca de salida de aire                        | [m <sup>2</sup> ]     |
| Ac              | Ancho de la coraza de vidrio                             | [mm]                  |
| Acam            | Ancho de la cámara de secado                             | [cm]                  |
| Alc             | Alto de la coraza de vidrio                              | [mm]                  |
| Am              | Amperaje promedio del panel fotovoltaico                 | [A]                   |
| Ap              | Ancho del prototipo de pruebas                           | [m]                   |
| B               | Ancho de la coraza de vidrio                             | [m]                   |
| Ddc             | Diámetro del ducto                                       | [m]                   |
| De              | Diámetro equivalente                                     | [m]                   |
| E               | Intensidad de radiación                                  | [W/m <sup>2</sup> ]   |
| Et              | Intensidad de radiación ideal                            | [W/m <sup>2</sup> ]   |
| FF              | Factor de Forma  | [adim]                |
| H               | Altura de la coraza de vidrio                            | [m]                   |
| Ho              | Coefficiente de convección                               | [W/m <sup>2</sup> °C] |
| I <sub>M</sub>  | Intensidad Máxima  | [A]                   |
| I <sub>sc</sub> | Corriente de corto circuito                              | [A]                   |
| K               | Coefficiente de conductividad térmica                    | [W/m °K]              |
| k al            | Coefficiente de conductividad térmica del aluminio       | [W/m °K]              |
| k si            | Coefficiente de conductividad térmica del silicio        | [W/m °K]              |
| k vid           | Coefficiente de conductividad térmica del vidrio         | [W/m °K]              |
| ki, kf          | Coefficiente de conductividad térmica para interpolación | [W/m °K]              |
| L               | Longitud del panel fotovoltaico                          | [m]                   |
| Lal             | Espesor de la placa de aluminio                          | [m]                   |
| Lc              | Longitud de la coraza de vidrio                          | [mm]                  |
| Lcam            | Longitud de la cámara de secado                          | [cm]                  |
| Lp              | Longitud del prototipo de pruebas                        | [m]                   |
| Lsi             | Espesor de la placa de silicio                           | [m]                   |
| Lvid            | Espesor de la placa de vidrio                            | [m]                   |
| Pcam            | Profundidad de la cámara de secado                       | [cm]                  |
| Pcnp            | Potencia en condiciones normales del prueba              | [W]                   |
| Pdfr            | Pérdidas en el ducto por fricción                        | [Pa]                  |
| Pexp            | Potencia experimental del sistema                        | [W]                   |
| Pfr             | Pérdidas por fricción                                    | [Pa]                  |
| Pfrd            | Pérdidas por fricción                                    | [Pa]                  |
| Ppfr            | Pérdidas del panel por fricción                          | [Pa]                  |
| Pr              | Número de Prant  | [adim]                |
| PT              | Pérdidas totales en el sistema por fricción              | [Pa]                  |

**Tabla A.** Simbología, descripción y unidades de parámetros utilizados (Continuación)

| <b>Símbolo</b>  | <b>Descripción</b>                                       | <b>Unidades</b>                      |
|-----------------|--|--------------------------------------|
| $\tau$          | Transmisividad del Silicio                               | [adim]                               |
| Un              | Número de Nusselt  | [adim]                               |
| Pnom            | Potencia del fabricante                                  | [Wp]                                 |
| Pri, Prf        | Número de Prant inicial y final para interpolación       | [adim]                               |
| Pteórica        | Potencia teórica del sistema                             | [W]                                  |
| Q               | Transferencia de calor total                             | [W]                                  |
| Qa              | Caudal de salida de aire                                 | [m <sup>3</sup> /min]                |
| Qaire           | Caudal de aire en el panel                               | [m <sup>3</sup> /s]                  |
| Qdc             | Caudal en el ducto                                       | [m <sup>3</sup> /s]                  |
| Qref            | Transferencia de calor total                             | [Kcal]                               |
| Qt              | Transferencia de calor en prototipo                      | [W]                                  |
| R1, R2, R3      | Resistencias eléctricas                                  | [°K/W]                               |
| Re              | Número de Reynolds                                       | [adim]                               |
| RT, Rt          | Resistencia Total  | [°K/W]                               |
| T <sub>∞</sub>  | Temperatura ambiente                                     | [°K]                                 |
| T inf           | Temperatura de la cara inferior del panel                | [°K]                                 |
| T placa         | Temperatura de la placa negra                            | [°K]                                 |
| T sup           | Temperatura de la cara superior del panel                | [°K]                                 |
| Ta              | Temperatura ambiente (cálculos)                          | [°K]                                 |
| Tcel            | Temperatura de la célula fotovoltaica                    | [°K]                                 |
| Tcnp            | Temperatura en condiciones normales de prueba            | [°C]                                 |
| Tflujo          | Temperatura de flujo de aire                             | [°K]                                 |
| Ti, Tf          | Temperatura inicial y final para interpolación           | [°K]                                 |
| Tpanel          | Temperatura promedio del panel                           | [°C]                                 |
| Tplp            | Temperatura de la placa en prototipo                     | [°K]                                 |
| Tprom           | Temperatura promedio                                     | [°K]                                 |
| Tsky            | Temperatura de Sky                                       | [°K]                                 |
| U               | Coefficiente lineal de conducción/convección             | [W/m <sup>2</sup> .°K]               |
| Uf              | Viscosidad cinemática                                    | [m <sup>2</sup> /s]                  |
| Ufi, Uff        | Viscosidad cinemática inicial y final para interpolación | [m <sup>2</sup> /s]                  |
| Vc              | Volumen de la cámara de secado                           | [m <sup>3</sup> ]                    |
| $\tau$ vid      | Transmisividad del vidrio                                | [adim]                               |
| Vm              | Voltaje promedio del panel fotovoltaico                  | [V]                                  |
| V <sub>M</sub>  | Voltaje Máximo   | [V]                                  |
| V <sub>OC</sub> | Voltaje de circuito abierto                              | [V]                                  |
| Vpord           | Volumen del producto a secar                             | [m <sup>3</sup> ]                    |
| Vs              | Velocidad de salida de aire                              | [m/min]                              |
| Vv              | Velocidad del viento                                     | [m/s]                                |
| W               | Velocidad de flujo incidente                             | [m/s]                                |
| Wdc             | Velocidad en el ducto de aluminio                        | [m/s]                                |
| Aal             | Absortividad del Aluminio                                | [adim]                               |
| Asi             | Absortividad del Silicio                                 | [adim]                               |
| P               | Reflectancia del sistema                                 | [adim]                               |
| $\Sigma$        | Constante de Stefan-Boltzmann                            | [W/m <sup>2</sup> . K <sup>4</sup> ] |

**Tabla A.** Simbología, descripción y unidades de parámetros utilizados (Continuación)

| <b>Símbolo</b> | <b>Descripción</b>                       | <b>Unidades</b> |
|----------------|--|-----------------|
| Avid           | Absortividad del Vidrio                  | [adim]          |
| Eal            | Emisividad del Aluminio                  | [adim]          |
| Ecel           | Emisividad de la célula fotovoltaica     | [adim]          |
| Esi            | Emisividad del Silicio                   | [adim]          |
| Esky           | Emisividad Sky                           | [adim]          |
| Evid           | Emisividad del vidrio                    | [adim]          |
| $\eta_n$       | Rendimiento ideal del panel fotovoltaico | [%]             |
| Hr             | Rendimiento real del panel fotovoltaico  | [%]             |

## **ANEXOS**

|                |   |
|----------------|---|
| <b>Anexo A</b> | Teoría Fotovoltaica   |
| <b>Anexo B</b> | Tablas de Datos   |
|                | B.1. Cálculo de calor para distintas velocidades de viento      |
|                | B.2. Datos Previos al Diseño del Sistema de Extracción de Calor |
|                | B.3. Datos del Prototipo de Pruebas                             |
|                | B.4. Datos con Sistema de Extracción de Calor Implementado      |
|                | B.5. Resultados   |
| <b>Anexo C</b> | Especificaciones Generales de Paneles Fotovoltaicos             |
| <b>Anexo D</b> | Propiedades Termofísicas y Solares Radiativas de la Materia     |
| <b>Anexo E</b> | Cálculos del Diseño del Equipo de Extracción de Calor           |
| <b>Anexo F</b> | Diagrama de Pérdidas por fricción en ductos                     |
| <b>Anexo G</b> | Normas INEN   |
| <b>Anexo H</b> | Diagramas de Procesos   |
| <b>Anexo I</b> | Planos  |
| <b>Anexo J</b> | Información FAO   |
| <b>Anexo K</b> | Guía de Práctica de Laboratorio                                 |
| <b>Anexo L</b> | Carta de Satisfacción   |

## RESUMEN

Sin lugar a duda, las Energías no Convencionales cada vez ganan más importancia en el desarrollo de nuevas formas de generación energética, ya que el uso indiscriminado de las fuentes actuales ha llevado al deterioro del medio ambiente y al posible agotamiento de las mismas. Bajo esta realidad la energía fotovoltaica se muestra como una gran alternativa, pero para lograr aprovechar su máxima capacidad es necesario mejorar muchos aspectos que hacen que todavía sean sistemas ineficientes.

Es por ello que a través del presente Proyecto Investigativo se logró mejorar la eficiencia de conversión de energía de un panel fotovoltaico mediante el diseño, construcción e implementación de un sistema de extracción del calor acumulado en las células fotovoltaicas que es la principal causa de bajo rendimiento a altas temperaturas.

Las células fotovoltaicas son las receptoras de la energía solar, gracias a estar formadas por materiales semiconductores como son el silicio y el galio, el fenómeno se produce al impactar un fotón (partícula de luz) con un electrón, el fotón transfiere la energía al electrón, estos electrones con mayor energía se desplazan hacia niveles cuánticos superiores del átomo, convirtiéndose en un electrón libre. La suma total de electrones libres dirigidos en una misma dirección por un campo eléctrico constituye la energía eléctrica resultante. Pero lamentablemente no todos los fotones se emplean para la generación de energía eléctrica por diversos motivos y algunos terminan convirtiéndose en calor, lo que afecta directamente al rendimiento del panel.

Los módulos fotovoltaicos funcionan mejor en climas fríos, esto se debe a que las celdas son dispositivos electrónicos reales y generan electricidad partiendo de luz y no del calor y como la mayoría de los dispositivos electrónicos, las celdas fotovoltaicas funcionan con mayor eficiencia a temperaturas frías.

Para comprobar el principio fotovoltaico y verificar las condiciones iniciales de operación de un panel de 43 W, se realizó mediciones de voltaje, amperaje,

temperatura del panel y del medio ambiente durante nueve días en intervalos de cinco minutos en horas de radiación solar en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica ubicada en Sangolquí. Con los datos obtenidos se realizaron los cálculos de radiación, potencia y eficiencia del mismo, donde se verificó que la eficiencia era baja debido a la elevada temperatura del panel que se encontraba alrededor de los 51 °C.

Con este dato principalmente se empezó con el diseño del sistema de extracción de calor que finalmente consistió en una coraza de vidrio adaptada con 6 ventiladores accionados por la misma energía emitida por el panel.

Luego de implementar el sistema diseñado se procedió a tomar mediciones de todos los parámetros anteriormente citados durante seis días en los que se observó que el aire caliente que se desalojaba estaba desperdiciándose, por lo que para ampliar el campo de estudio se diseñó un sistema de secado de productos que aprovecha este aire, y se procedió a verificar el funcionamiento del sistema durante tres días mas en el mismo lugar de las pruebas iniciales.

Con los nuevos datos adquiridos se procedió nuevamente a analizarlos y compararlos con los iniciales, dando como resultado lo siguiente:

- Decrecimiento de la temperatura del panel en un 49.80%
- Incremento de la irradiación incidente en un 7.13%
- Incremento de la potencia de salida en un 7.63%
- Incremento de la eficiencia en un 7.61%
- Secado de medio kilo de producto (plátano verde) en 8 horas

Con estos resultados se comprobó que los objetivos planteados al inicio de este Proyecto se cumplieron en su totalidad, dando así un verdadero significado de las energías renovables como fuente de aprovechamiento de energía, conservando el principio de las energías alternativas limpias para empezar a tomar acciones para disminuir al mínimo el efecto invernadero que sufre nuestro planeta.

Gracias al apoyo institucional del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Ejército (CICTE) de la ESPE los directos beneficiados de este proyecto son los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica ya que cuentan con un elemento más en donde comprobar el real comportamiento de los sistemas fotovoltaicos y la incidencia que tiene la temperatura sobre ellos.

Además, en el presente proyecto se innovó un nuevo sistema de secado más eficiente que proyectos afines porque a más de incrementar la potencia del panel, el calor extraído de este es aprovechado útilmente.

## BIBLIOGRAFÍA

- **FAIRES, V. y SIMMANG, C.** Termodinámica Traducido del inglés por José Escobar. Primera ed. México, UTEHA, 1991 pp. 566-579
- **IRVING GRANET, P.E.** Termodinámica. Traducido del inglés por Luis Cacheux. 3ra ed. México, Prentice Hall, 1993 pp. 599-660
- **WARK, K. y RICHARDS, D.** Termodinámica. Traducido del inglés por Pablo de Assas Martínez Leo-Pérez. 6ta ed. España, MacGraw Hill, 2001 p. 931
- **CENGEL, Y. y BOLES, M.** Termodinámica. Traducido del inglés por Nagore Gabriel. 2da ed. México, MacGraw Hill, 1996 pp. A34-A35
- **ZEMANSKY, M. y DITTMAN, R.** Calor y Termodinámica. Traducido del inglés por Juan Masarnau. 6da ed. México, MacGraw Hill, 1990 pp. 94-101
- **KERN, D.** Procesos de transferencia de calor. Traducido del inglés por Nicolás Marino. Primera ed. México, CECSA, 1991 pp. 86-109
- **MILLS, A.F.** Transferencia de Calor. Traducido del inglés por Sergio de Régules Ruiz-Funez. Primera ed. España, MacGraw Hill, 1994 pp. 253-606.
- **WELTY, J.R.** Transferencia de calor aplicada a la ingeniería. Traducido del inglés por Sergio Fernández. Primera ed. México, Limusa, 1994 pp. 307-393
- **KREITH, F. y BOHN, M.** Principios de Transferencia de Calor. Traducido del inglés por Rodolfo Navarro. 6ta ed. México, Thomson Learning, 2001 pp. 421-437
- **HOLMAN, J.P.** Transferencia de calor. Traducido del inglés por Raúl Valenzuela. Primera ed. México, CECSA, 1992 pp. 299-437
- **WILSON, J.I.B.** Energía Solar. Traducido del inglés por J. Aguilar. Primera ed. España, Alhambra, 1982 pp. 44-184



- **MONTGOMERY, R.H.** Energía Solar. Traducido del inglés por Ricardo Calvet. Primera ed. México, Limusa, 1986 pp. 4.1-5.18
- **INCROPERA, F. y DE WITT, D.** Fundamentos de Transferencia de Calor. Traducido del inglés por Ricardo Ruiz. 4ta ed. México, Prentice Hall, 1999 pp. 284-333.
- **CASTRO, M. y CARPIO, J.** Energía Solar Fotovoltaica. Primera ed. España, PROGENSA, 2000 pp 5-67.
- **MOTT, R.** Mecánica de Fluidos Aplicada. Traducido del inglés por Carlos Cordero. 4ta ed. México, Pearson Educación, 1996 pp. 517-533.
- Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación al Desarrollo. 2da ed. IEPALA, 1999 pp 27-124.
- [http://www.fao.org/UNFAO/about/es/index\\_es.html](http://www.fao.org/UNFAO/about/es/index_es.html),
- <http://instech.tusd.k12.az.us/environment/info.htm>
- [http://www.eere.energy.gov/RE/solar\\_photovoltaics.html](http://www.eere.energy.gov/RE/solar_photovoltaics.html)
- <http://www.nrel.gov/ncpv/>
- [http://www.ncsc.ncsu.edu/energy\\_primer/solar\\_energy.cfm](http://www.ncsc.ncsu.edu/energy_primer/solar_energy.cfm)
- [www.acapomil.cl/investigacion/boletines/boletin\\_2004/articulos/solar.htm](http://www.acapomil.cl/investigacion/boletines/boletin_2004/articulos/solar.htm)
- [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/arauca/87061/docs\\_curso/contenido.html](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/arauca/87061/docs_curso/contenido.html)
- [http://www.pv.unsw.edu.au/Research/fi\\_research\\_labs.asp](http://www.pv.unsw.edu.au/Research/fi_research_labs.asp)

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

La edad de piedra no acabó por falta de piedras, y la era de los combustibles fósiles tampoco terminará por el agotamiento del petróleo, el gas natural y el carbón.

Actualmente existen problemas ambientales como el cambio climático, los residuos radiactivos, las lluvias ácidas y la contaminación atmosférica provocados por el uso excesivo de la energía fósil, por lo tanto las energías renovables solucionarán muchos de éstos problemas. Cada año el consumo mundial de energía aumenta llegando a cantidades muy altas. Por lo tanto se está obligando a acometer una nueva política energética.

A corto plazo la prioridad es incrementar la eficiencia energética, pero ésta tiene unos límites económicos y termodinámicos, por lo que a más largo plazo sólo el desarrollo de las energías renovables permitirá resolver los grandes retos del futuro. Las energías renovables son la única solución sostenible.

Con la excepción de la geotermia, la totalidad de las energías renovables derivan directa o indirectamente de la energía solar. Directamente en el caso de la luz y el calor producidos por la radiación solar, e indirectamente en el caso de las energías eólica, hidráulica, biomasa, entre otras. Las energías renovables, a lo largo de la historia, han cubierto prácticamente la totalidad de las necesidades energéticas del hombre.

La energía solar absorbida por la Tierra en un año es equivalente a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles en el mundo y diez mil veces superior al consumo actual. El sol es la única fuente de materia orgánica y de energía vital de la Tierra, y aunque a veces pasa desapercibido,

ya hoy se esta utilizando masivamente la energía solar en forma de alimentos, leña o energía hidroeléctrica. Los mismos combustibles fósiles, cuya quema está en el origen del deterioro ambiental, no son otra cosa que energía solar almacenada a lo largo de millones de años.

El Sol sale para todos cada día y seguirá enviándonos asombrosas cantidades de calor y de energía, ajeno al aprovechamiento que podamos hacer de ella. Su mayor virtud es también su mayor defecto, al tratarse de una forma de energía difusa y poco concentrada, y de ahí las dificultades que entraña el aprovechamiento directo de la radiación solar.

La distribución de la radiación solar registra grandes variaciones geográficas a nivel mundial. Igualmente importantes son las variaciones diarias y estacionales de la radiación solar, y sus dos componentes: la radiación directa, recibida del sol cuando el cielo está despejado, y la radiación difusa, que resulta de reflejarse en la atmósfera y las nubes.

El aprovechamiento de la energía solar puede ser indirecto, a través del viento (eólica) y la evaporación del agua (hidráulica), entre otras formas, o directo, mediante la captación térmica activa o pasiva y merced a la captación fotónica. Ejemplo de esta última es la captación fotoquímica que realizan las plantas, y el efecto fotoeléctrico, origen de las actuales células fotovoltaicas. Es por esto que se dice que la energía solar fotovoltaica es la energía del futuro. Su despegue se produjo en el contexto de programas espaciales, en los cuales se ha permitido hacer funcionar satélites artificiales por energía solar, aprovechando directamente la radiación del Sol.

La energía solar fotovoltaica tiene la particularidad de ser la única fuente de energía renovable que puede instalarse de forma masiva en el centro de zonas urbanas, proporcionando energía eléctrica de manera segura, ecológica y autónoma.

Ecuador no está ausente de esta realidad. Ya existen proyectos en algunos sitios, especialmente en los valles aledaños a Quito o las zonas de la

Amazonía alejadas de las zonas pobladas, donde se han instalado paneles solares para obtener electricidad y así dar el servicio en pequeños poblados y centros de salud, en Galápagos o en las zonas donde corre con mucha fuerza el viento. Varios de esos proyectos son por iniciativa privada, pese a que en la década de los 90 la Comunidad Europea apoyó a Ecuador para que desarrolle energías alternativas. Al pasar del tiempo, el proyecto quedó en nada y el apoyo de la Comunidad Europea se perdió.

Todos estos antecedentes, conllevan en contribuir mediante esta investigación a diseñar e implementar un sistema de extracción de energía térmica que permita analizar y alcanzar el mejoramiento de la eficiencia de conversión fotoeléctrica de los paneles fotovoltaicos y de esta forma aprovechar de mejor manera este recurso en bien de la sociedad.

## **1.2. DEFINICION DEL PROBLEMA**

La generación de electricidad se está convirtiendo en un problema a medida que los requerimientos de la población aumentan y las formas de generación siguen siendo las mismas. Bajo este punto de vista es necesario tomar conciencia de la forma indiscrimina con la que se están terminando con los recursos energéticos tradicionales y buscar alternativas que sean factibles, rentables y sobre todo eficientes de generación eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos, es aquí, donde se presentan como una gran opción, gracias al continuo estudio y desarrollo de nuevas técnicas que han permitido mejorarlos a través de los años. Pero aún así existen ciertas limitaciones en las que se necesitan ser investigadas aún más.

A pesar de lo que mucha gente cree los paneles fotovoltaicos funcionan mejor en climas fríos generando más potencia a menores temperaturas. Esto es debido a que las celdas son dispositivos electrónicos reales que generan electricidad partiendo de la luz y no de calor.

En condiciones normales de trabajo son muchos los factores que influyen en la disminución de la eficiencia de estos sistemas, incluidos la temperatura de operación a la cual están expuestos, siendo esta una de las razones por la cual no entregan la potencia para la cual fueron diseñados. Los parámetros eléctricos se ven afectados enormemente y sufren una disminución considerable, ejemplo de esto es el voltaje de circuito abierto que disminuye aproximadamente  $2.3 \text{ mV/ } ^\circ\text{C}$ . Esta es la razón principal por la que se pretende adaptar un sistema que permita la evacuación del calor generado en los paneles y con esto elevar la eficiencia de funcionamiento de los mismos.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. GENERAL**

El objetivo general que se pretende alcanzar del proyecto es mejorar la eficiencia de conversión de energía de un panel fotovoltaico con la adaptación de un sistema de transferencia de calor que permita extraer el mismo, mediante el uso de un fluido, reduciendo las pérdidas de energía que se produzcan en el sistema.

#### **1.3.2. ESPECIFICOS**

- Diseñar un modelo eficiente para la extracción de calor acumulado en las células fotovoltaicas que es la principal causa de bajo rendimiento a altas temperaturas.
- Construir el sistema de extracción de calor, adaptarlo al panel fotovoltaico y realizar las respectivas pruebas de comprobación del funcionamiento del sistema.

### **1.4. ALCANCE**

En la actualidad, la Energía se ha convertido en uno de los bienes más preciados, de tal forma que, en cierto modo, buena parte de las relaciones internacionales está regida por el dominio de las fuentes energéticas y de los

procesos de aprovechamiento de las mismas. Si en algún momento fue éste un objetivo único y primordial, sin tener en cuenta las consecuencias de una utilización excesiva e irracional de dichas fuentes, en el presente, el impacto ambiental que conlleva su uso es motivo de reflexión y preocupación creciente.

Por otra parte, la relación entre la ciencia, la tecnología y la sociedad resulta cada vez más patente. Basta echar una mirada a nuestro alrededor para darnos cuenta de que no existe ninguna parcela en nuestra vida diaria que no esté directa o indirectamente influida por la ciencia y la tecnología, en general, y por el uso de la energía, en particular. Desde este punto de vista, esta investigación trata de integrar perspectivas que procedan de la ciencia, la tecnología y la sociedad, de modo que se comprendan y valoren la relación que debe existir entre progreso tecnológico, calidad de vida y respeto por la naturaleza.

El desarrollo de esta investigación plantea alcanzar las siguientes capacidades:

- Relacionar el uso de las fuentes de energía con el progreso social y analizar la influencia de los factores ecológicos, sociales, políticos y éticos en el avance científico y sus aplicaciones.
- Utilizar los conocimientos adquiridos para aplicar técnicas de aprovechamiento de la energía en la construcción de pequeños instrumentos de uso doméstico.
- Conocer técnicas de transformación de energías renovables, así como su relación con nuevas profesiones (técnicos en paneles solares, montadores de plantas de reciclaje de residuos, entre otros).

## **1.5 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA**

Sin lugar a duda, las Energías no Convencionales a futuro serán de gran importancia no solo para el Ecuador sino para el mundo, ya que como es sabido, debido al mal uso de las energías fósiles actualmente utilizadas, éstas se están agotando. Ante esta realidad se vuelve imprescindible por una parte buscar nuevos y mejores métodos de generación de energía, encaminados a

abastecer el requerimiento de consumo y por otra preservar el medio ambiente. Es así como la energía fotovoltaica se vuelve en una gran alternativa, sin embargo para que su aprovechamiento sea máximo es necesario buscar nuevas alternativas que permita elevar la eficiencia de conversión en estos equipos actualmente empleados.

Es por esta razón que el presente Proyecto de investigación trata por una parte, de estudiar el verdadero significado de las energías renovables como fuente de aprovechamiento; y por otra, analizar las causas de pérdida de rendimiento de la misma y su neutralización, mediante el diseño de un dispositivo que permita alcanzar dicho objetivo, conservando el principio de las energías alternativas limpias para empezar a tomar acciones para disminuir al mínimo el efecto invernadero que sufre nuestro planeta.

Así, básicamente se logra vincular las prioridades institucionales que tiene la Escuela Politécnica del Ejército a través del CICTE y de la Facultad de Ingeniería Mecánica de mejorar los niveles académicos mediante el desarrollo de Ciencia y Tecnología.

## **CAPITULO 2**

### **ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

#### **2.1. ENERGÍA SOLAR**

##### **2.1.1. ANTECEDENTES**

Se puede afirmar sin lugar a duda que el hombre ha podido desarrollarse gracias a la utilización de las diferentes formas de energía de acuerdo a sus necesidades y de la disponibilidad que se ha presentando en cada lugar y tiempo de la historia.

Desde siempre y en alguna medida se ha venido utilizando las energías renovables como la biomasa, el viento, el agua y por su puesto el sol. Sin embargo, a raíz de la aparición de los recursos energéticos fósiles el uso de la energía se convirtió en algo fácil, eficiente y barato, razón por la cual se la emplea en forma indiscrimina.

Muchos países han tomado conciencia de que es necesario buscar otras formas de energía alternativa que permita sustentar las necesidades que se presentarán a futuro ante el posible agotamiento de los recursos fósiles y de los problemas medio ambientales que se están presentando. Es entonces donde la energía solar se muestra como una gran alternativa.

El sol es una estrella, en donde se producen continuamente reacciones de fusión nuclear, a una escala gigantesca, a causa de lo cual se liberan inmensas cantidades de energía, la misma que es transmitida a la Tierra en porciones de energía llamadas fotones, que interactúan con la atmósfera de la Tierra. A la superficie terrestre llegan diariamente una cantidad similar al total de energía que los habitantes consumirían en aproximadamente 30 años, y esto tan solo representa unas 2 billonésimas partes del total de energía liberada por el sol, pero, aunque parezca muy poca, a ella se pueden atribuir casi la totalidad de



los procesos meteorológicos y biológicos desarrollados. Del aprovechamiento de esta energía, inagotable en la escala terrestre del tiempo, como fuente luz y calor dependerán muchos de los proyectos de energía alternativa más prometedores que permitirán enfrentar los desafíos del nuevo milenio, por otra parte se debe concienciar que este tipo de energía podría solucionar muchos de los problemas ambientales, como el cambio climático, los residuos radiactivos, las lluvias ácidas y la contaminación atmosférica.

El sol es la fuente primordial de la energía que nuestro planeta ha recibido en el pasado, recibe en el presente y recibirá en el futuro, responsable de casi todas las demás fuentes de energía.

La radiación solar provoca la circulación atmosférica a gran escala; los vientos, el petróleo, el carbón y el gas natural se generaron por residuos de plantas y animales que, originalmente, obtuvieron la energía necesaria del Sol y de la radiación solar para su desarrollo pleno. La evaporación, el ciclo de las aguas, que posibilita su almacenamiento y la consecuente generación de electricidad (hidroeléctricas) son también gracias a la energía solar. Es entonces, que su estudio y aplicación práctica son fundamentales para el futuro.

### **2.1.2. RADIACIÓN Y CONSTANTE SOLAR**

La mayor parte de la energía que llega a nuestro planeta procede del Sol y lo hace en forma de radiación electromagnética. La radiación solar se genera por la superficie incandescente del Sol<sup>1</sup>, este flujo de energía solar que llega al exterior de la atmósfera en una cantidad fija, llamada constante solar<sup>2</sup>, siendo su valor alrededor de  $1400 \text{ W/m}^2$ .

Pero debido a la absorción y reflexión de la atmósfera, y a la inclinación de los rayos solares, la radiación solar que llega a la superficie de la tierra no suele

---

<sup>1</sup> La capa exterior visible del Sol llamada fotosfera, donde la temperatura fluctúa entre  $5800$  y  $6300^\circ\text{C}$ , mientras que en el centro del sol, la temperatura llega hasta unos  $15 \times 10^6^\circ\text{C}$ .

<sup>2</sup> El valor de la constante solar fuera de la atmósfera varía entre  $1300$  a  $1400 \text{ W/m}^2$ , de acuerdo a cada autor.

superar los 1000 W/m<sup>2</sup>, aunque en zonas desérticas puede alcanzar valores de 2000 a 2500 W/m<sup>2</sup>. Entonces se dice que “la constante solar representa la cantidad mayor de calor teóricamente aprovechable por unidad de área y por unidad de tiempo dado, medida fuera de la atmósfera terrestre”.

A la parte alta de la atmósfera, la energía que llega es una mezcla de radiaciones de distintas longitudes de onda, entre las que se distinguen: radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja.

En un día claro y con los rayos del sol cayendo casi perpendiculares, apenas las tres cuartas partes de la energía que llega del exterior alcanzan la superficie, la mayor parte de la radiación ultravioleta e infrarroja es absorbida por el ozono y otros gases en la zona alta de la atmósfera. El vapor de agua y otros componentes atmosféricos se encargan de absorber en mayor o menor medida la luz visible e infrarroja.

Para el caso de un día nublado el porcentaje absorbido especialmente en la zona del infrarrojo es mucho mayor.

#### **2.1.2.1. Tipos de Radiación Solar**

Existen varios tipos de radiación solar, la clasificación más general incluye tres diferentes tipos que son:

- a) Directa
- b) Difusa
- c) Reflejada o Albedo

##### **a) Directa**

Es toda aquella radiación que llega en línea recta desde la fuente (sol). Se caracteriza porque se forman sombras fuertes y bien delimitadas. Un día claro con sombra fuerte tiene radiación directa de valor entre 80 y 85%; un día con sombras difusas tiene radiación directa de 80% o menos; y en días de sombra inapreciable, la radiación directa se puede considerar nula.

##### **b) Difusa**

Es toda aquella radiación que no procede directamente de la fuente, porque ha sufrido refracciones en nubes, polvo, entre otros o reflexiones en objetos distantes. No produce sombra y parece provenir de todo el cielo.

En días claros, se puede considerar que un 20% de la radiación solar total es difusa, y que en días sin sombras, la radiación solar es totalmente difusa (100%).

### c) Reflejada o Albedo

Es toda aquella radiación que llega reflejada por superficies de cuerpos sólidos cercanos como edificios, rótulos, entre otros o por superficie terrestre como nieve, asfalto, lagos.

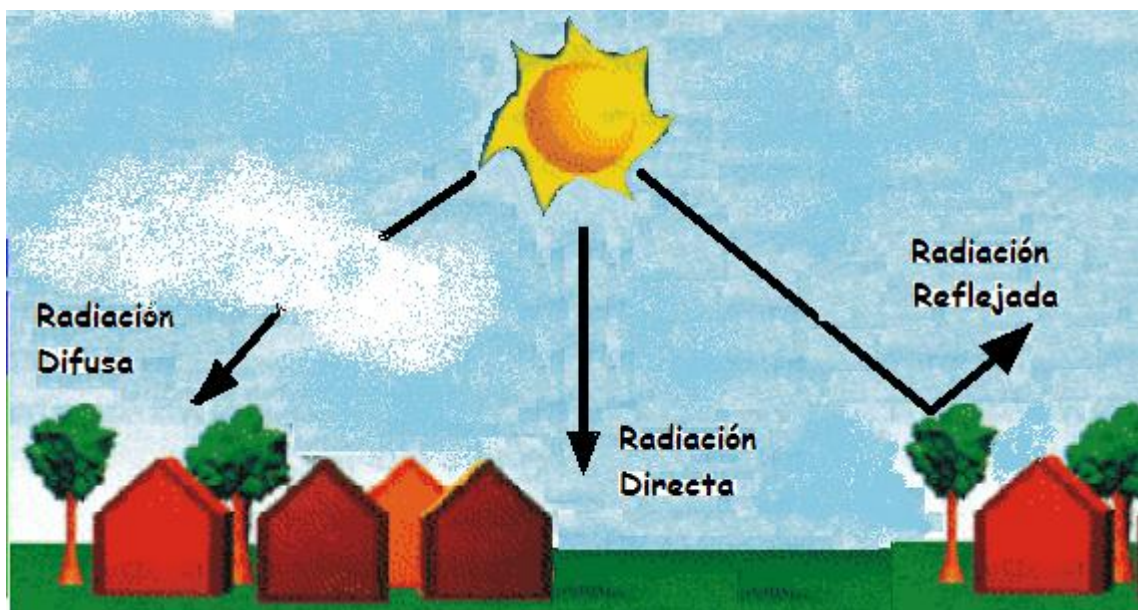


Figura 2.1 Tipos de Radiación

#### 2.1.2.2. Características Generales de la Radiación Solar

- Es una forma de energía de baja intensidad, por lo que, para captarla, se requieren superficies relativamente extensas.
- Su intensidad es variable. Aunque predecibles dentro de ciertos límites, las variaciones de la insolación no son controlables.

- Es intermitente. Sólo está disponible en horas del día, y debe contarse con algún sistema de almacenamiento, si se desea aprovecharla en horas de la noche o en días muy nublados.

### **2.1.2.3. Factores que Afectan la Radiación Solar**

En general, hay dos que se consideran fundamentales:

- **Número de horas sol:** Tiempo de duración de la iluminación solar, expresado en horas.
- **Ángulo de incidencia:** La insolación óptima es aquella que es perpendicular a la superficie considerada. Asociado con este ángulo de incidencia está el grado de atenuación que depende de la longitud de la trayectoria recorrida por la radiación dentro de la atmósfera; cuanto más oblicua es la trayectoria, mayor es la distancia recorrida y más grande la atenuación.

Cada uno de los factores depende directa o indirectamente de condiciones tales como: latitud, configuración orográfica, época del año, nubosidad, altitud, contaminación atmosférica y otros.

### **2.1.3. VENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR**

- Es la más "limpia" de todas las formas aprovechables de energía: no produce ningún tipo de contaminación.
- Es abundante y está disponible en casi todo el mundo. Además, no puede ser sometida a restricciones de origen humano.
- Es gratuita.

#### **2.1.4. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR**

Con un adecuado método de recolección de la radiación del sol, se puede obtener calor y electricidad. Estos dos procedimientos no están relacionados entre sí, ni en cuanto a su tecnología ni en su aplicación.

El calor se lo obtiene a través de captadores o colectores térmicos. En estos sistemas el calor recogido en los colectores solares se puede utilizar para distintas aplicaciones como: calentamiento del agua para uso doméstico o industrial, calefacción, climatización de piscinas, aplicaciones agrícolas como invernaderos solares, secadores agrícolas, plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible, además de la refrigeración solar en épocas cálidas, entre otras.

La electricidad por su parte se la obtiene a través de paneles fotovoltaicos, que están formados por varias células solares, convirtiéndose actualmente en una solución al problema de electrificación rural por ejemplo, aunque son muchas otras las aplicaciones.

#### **2.1.5. APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR**

Actualmente y gracias a las nuevas tecnologías de recolección y transformación de la energía solar son muchísimas las aplicaciones que tiene, por ejemplo:

- Calefacción doméstica.
- Refrigeración
- Calentamiento de agua
- Destilación
- Fotosíntesis
- Generación de energía eléctrica
- Hornos solares
- Cocinas Solares
- Evaporación
- Acondicionamiento de aire
- Control de heladas

- Secado

## **2.2. ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

### **2.2.1. ANTECEDENTES**

La radiación electromagnética solar visible, está constituida por una enorme cantidad de entes físicos, llamados cuantos de luz (fotones), portadores de una importante carga energética, que al atravesar la superficie de materiales como los semiconductores que poseen determinadas características, éstos interactúan con los electrones, generando dos tipos de efectos:

- El Fotoeléctrico externo
- El Fotovoltaico

Edmond Becquerel, en 1830, empezó con el estudio del efecto fotovoltaico es decir investigó acerca de la forma de como transformar de la luz en electricidad, buscó para esto una estructura semiconductor producida por la absorción de la luz. Luego fue Einstein, en 1905 quien realizó varias investigaciones y logró explicar el fenómeno fotoeléctrico que se produce a nivel cuántico, pero no fue hasta 1954 que se logró fabricar una célula solar<sup>3</sup> en Bell Laboratory de los Estados Unidos.

El desarrollo tecnológico de la energía fotovoltaica se apoyó en compañías de telecomunicaciones que buscaban fuentes de energía para sus sistemas instalados en lugares remotos, así mismo gracias al desarrollo de la era espacial, que sirvió de gran empuje, la célula solar se convirtió en la mejor opción debido al precio y al peso, ya que es capaz de suministrar la cantidad de energía necesaria para los períodos largos en el espacio, y se los puede emplear en los satélites.

---

<sup>3</sup> El costo de las primeras células fotovoltaicas era extremadamente altos, razón por la cual eran muy poco rentables, actualmente con el desarrollo de nuevas tecnologías se encuentran bajando los costos de fabricación.

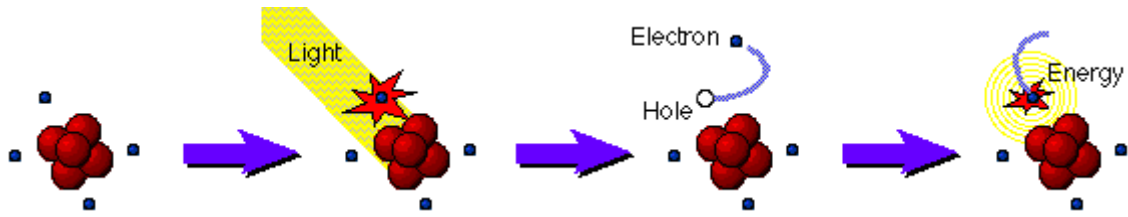
En 1973, Estados Unidos sufrió una crisis energética razón por la cual se vio en la necesidad de buscar nuevas aplicaciones de la energía fotovoltaica. Sin embargo, para ser económicamente posible este tipo de conversión, era necesario reducir 100 veces el precio de producción de las células solares respecto al de las células usadas en las exploraciones espaciales. En 1993, la producción de células fotovoltaicas alcanzó la marca de 60 MWh, siendo el Silicón el material más utilizado, actualmente células se fabrican de distintos materiales.

### **2.2.2. FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

Einstein logró describir el principio fotoeléctrico bajo el cual se fundamenta la energía fotovoltaica, este proceso consiste en la conversión de la energía electromagnética proveniente de una fuente de luz como el sol en energía eléctrica representada por un flujo de electrones.

A nivel cuántico, el fenómeno se produce al impactar un fotón (partícula de luz) con un electrón, el fotón transfiere la energía al electrón, estos electrones con mayor energía se desplazan hacia niveles cuánticos superiores del átomo, convirtiéndose en un electrón libre. La suma total de electrones libres dirigidos en una misma dirección por un campo eléctrico constituye la energía eléctrica resultante.

En los paneles solares son las células que lo componen las que absorben los fotones y dan inicio al proceso de liberación de un electrón. Los dos lados de una célula solar están eléctricamente conectados por un cable, por lo tanto por ella fluirá una corriente en el instante en que el fotón sea absorbido, produciendo electricidad que puede ser utilizada inmediatamente o almacenada en una batería.



**Figura 2.2** Efecto Fotovoltaico

Durante el tiempo que las células solares permanezcan expuestas a la luz, el proceso de liberación de electrones será continuo, y por lo tanto la generación de electricidad. Los semiconductores son los materiales capaces de generar este efecto fotovoltaico.

## 2.2.3. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

### 2.2.3.1. Fabricación

Los diversos estudios y avances científicos, se han centrado en el desarrollo de distintos materiales y tecnologías de fabricación que permitan obtener niveles crecientes de potencia y eficiencia a partir del tratamiento de materiales semiconductores, principalmente el silicio, con el objeto de conseguir la explotación industrial y comercial de la energía fotovoltaica.

El sílice es la materia prima que se extrae mediante reducción, obteniendo silicio metalúrgico 98% puro, bajo otro procedimiento se lo purifica nuevamente hasta lograr silicio en grado semiconductor 99,999% puro. Este silicio se introduce en un crisol con distintas impurezas entre ellas boro, donde forma una masa fundida que alcanza una temperatura de 1440 °C.

Con una varilla en cuyo extremo se sitúa un germen de silicio se logra que comience el proceso de solidificación al ponerse en contacto con la masa. El silicio se introduce en hornos especiales que alcanzan entre 800 y 1000 °C y que contienen una atmósfera rica en fósforo.



Ahí, el fósforo se va difundiendo en la cara que se quiere dopar y forma así el semiconductor, que consta de una parte que contiene exceso de electrones, y uno que es eléctricamente deficiente.

Con este procedimiento hemos formado los Semiconductores Extrínsecos, es decir son aquellos a los que se les ha añadido impurezas para aumentar el valor de los electrones libres, éstos semiconductores son muy importantes en la energía solar fotovoltaica.

- **Semiconductores Extrínsecos Tipo N:** Son aquellos en los que el número de portadores eléctricos negativos es mucho mayor que el de los positivos. Un ejemplo de esta unión se presenta en la estructura cristalina del Silicio (Si) dopado con Antimonio (Sb).

El antimonio cumple con los cuatro enlaces, pero además le sobra un electrón, que tiende a salirse de su órbita para que quede estable el átomo de Sb.

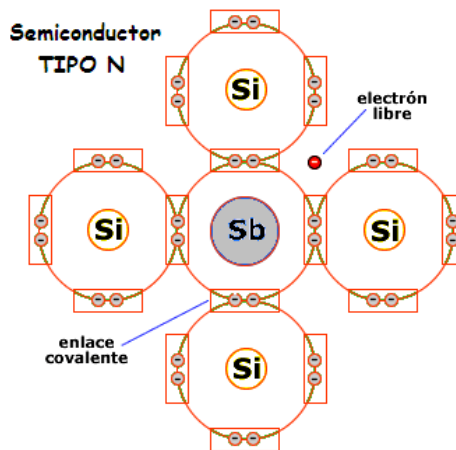


Figura 2.3 Silicio dopado con Antimonio

- **Semiconductores Extrínsecos Tipo P:** Son aquellos en los que existen mayor número de cargas positivas o huecos. Un ejemplo de esta unión se presenta la estructura cristalina del Silicio (Si) dopado con Aluminio (Al). Por cada átomo de impurezas trivalente añadido aparece en la estructura un hueco que representa la falta de un electrón.

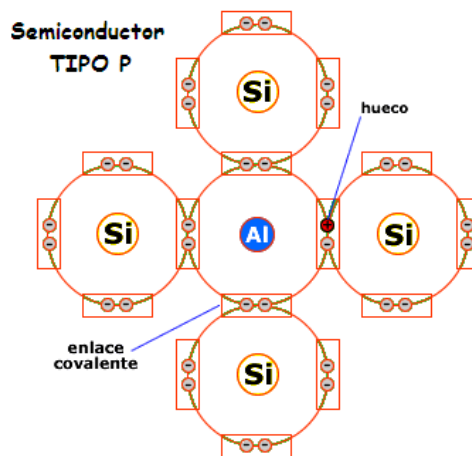
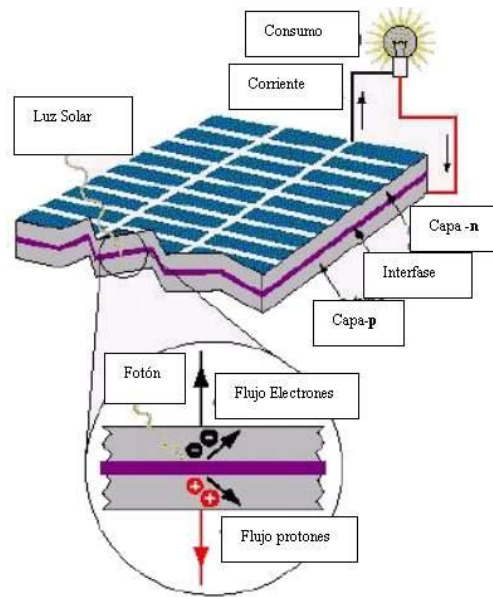


Figura 2.4 Silicio dopado con Aluminio

### 2.2.3.2. Funcionamiento

Las células fotovoltaicas son las receptoras de la energía solar, el cristal semiconductor de silicio formado por una región tipo P y otra tipo N, logra que exista una diferencia de potencial que hace que los electrones tengan menos energía en la zona N que en la P, esta diferencia eléctrica entre las dos capas es gracias al tratamiento químico al que fue expuesto el silicio. Debido a esto los electrones son enviados a la zona N y los huecos a la zona P. Al ponerse en contacto ambos tipos, se produce una interfase, la llamada Unión P-N, que posee, entre otras características especiales, la de generar un campo eléctrico, de aproximadamente 0.2 voltios, que es el que moviliza los pares electrón-hueco, creado por el efecto fotovoltaico que luego son recogidos por un conductor.

Existen ocasiones en que la energía de los fotones incidentes no es suficiente para romper un enlace covalente y crear un par electrón-hueco, y otras, el fotón tiene demasiada energía, lo cual se disipa en forma de calor.



**Figura 2.5** Generación de corriente mediante placas de silicio

Se debe tomar en cuenta que no necesariamente todos los fotones se emplearán para la generación de energía eléctrica por diversos motivos:

- Los fotones que tienen energía inferior a la del semiconductor atraviesan éste sin ceder su energía para crear pares electrón-hueco.
- A pesar de que los fotones tengan mayor o igual energía que el semiconductor podrían no ser aprovechados debido a que la célula no está en capacidad de absorber todos los fotones.
- Finalmente también existe la posibilidad de que los fotones sean reflejados en la superficie de la célula.

### 2.2.3.3. Tipos de Células Fotovoltaicas

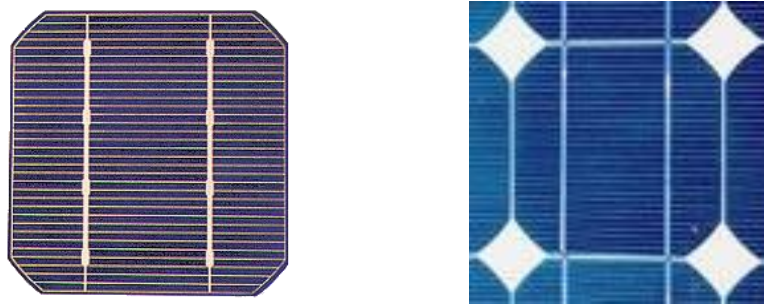
Actualmente existen varios tipos de paneles fotovoltaicos, que se diferencian bien por su tecnología de fabricación de células o por su aplicación.

- a) Silicio Monocristalino
- b) Silicio Policristalino
- c) Silicio Amorfo
- d) Policristalinos de Lámina Delgada
- e) Células de Multiconexión
- f) Células Esféricas

- g) Células de otros metales
- h) Células fotovoltaicas flexibles
- i) Células solares hechas de nanocristales
- j) Células bifaciales

#### a) Silicio Monocristalino

Estas células se obtienen a partir de barras cilíndricas de silicio Monocristalino producidas en hornos especiales. Las celdas se obtienen por cortado de las barras en forma de obleas cuadradas delgadas (0,4-0,5 mm de espesor). Fue el material pionero para las aplicaciones fotovoltaicas y la industria de los semiconductores. Es el material fotovoltaico más conocido y todavía permite grandes avances.



**Figura 2.6** Células Monocristalinas

Recientemente se han alcanzado eficiencias en células en torno al 22% bajo incidencia normal de la luz solar y 28% de eficiencia bajo concentración. En módulos, la eficiencia está entre 12-15%. Esto significa doblar la eficiencia conseguida 12 años atrás<sup>4</sup>.

La fiabilidad de módulos de silicio monocristalino ha realizado también un progreso impresionante. La máxima degradación durante el período de vida es inferior al 10%. Hace doce años, estos módulos duraban cinco años.

Sin embargo hoy a estos módulos se les prevé una duración cercana a los treinta años. Sin embargo, los dispositivos de silicio monocristalino tienen sus

---

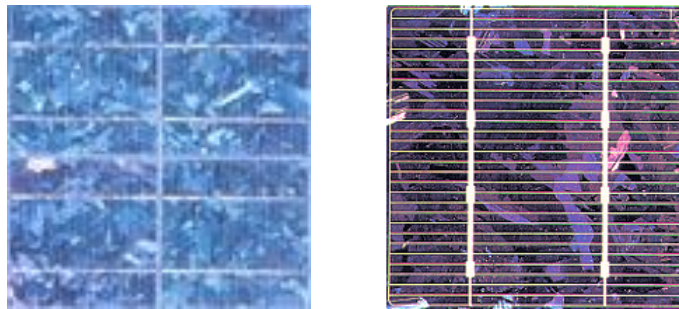
<sup>4</sup> Las celdas solares de silicio monocristalino se fabricaron por primera vez en 1954, con una eficiencia del 6 %.

desventajas: requieren una gran cantidad de material, una gran cantidad de energía para producir este material y las técnicas de producción en serie no son fáciles de adaptar.

### **b) Silicio Policristalino**

Estas células se obtienen a partir de bloques de silicio resultado de la fusión de trozos de silicio puro en moldes especiales. En los moldes, el silicio se enfría lentamente, solidificándose. En este proceso, los átomos no se organizan en un único cristal. Se forma una estructura policristalina con superficies de separación entre los cristales.

Su eficiencia en conversión de luz solar en electricidad es algo menor a las de silicio Monocristalino, pero son mucho más baratas para fabricar.



**Figura 2.7** Células Policristalinas

### **c) Silicio Amorfo**

Estas celdas se obtienen mediante la deposición de capas muy delgadas de silicio sobre superficies de vidrio o metal, este material ha encontrado casi el mismo amplio uso en fotovoltaica que el silicio monocristalino. La tecnología y los procesos industriales se están implantando a gran escala aunque el mercado se ha centrado en el uso para equipos electrónicos de consumo.

La mayor ventaja del silicio amorfo es el poder depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico de muy bajo coste. Esto permite su abaratamiento y la posibilidad de técnicas de producción en serie,

ya que grandes módulos se pueden depositar en un único proceso. Desde su descubrimiento hace una década como material fotovoltaico, la eficiencia de los dispositivos de silicio amorfo ha crecido drásticamente.

Los rendimientos en dispositivos de pequeñas áreas han alcanzado hasta el 13%, mientras que los módulos han alcanzado un 10% ambos en laboratorio. A pesar de las ventajas, su baja eficiencia es una de las mayores limitaciones, ya que a pesar de haberse alcanzado eficiencias de un 10%, la mayoría de los módulos comerciales andan actualmente en el entorno del 5 al 6%.

Además, los dispositivos de silicio amorfo se degradan cuando se exponen a la luz solar y por otra parte, no ha sido demostrado su comportamiento a largo plazo.



**Figura 2.8** Células Amorfas

#### **d) Policristalinos de Lámina Delgada**

Las células fotovoltaicas de lámina delgada se fabrican de silicio pero utilizan una técnica de fabricación avanzada. Estas células utilizan menos silicio que las células convencionales, pero son menos eficientes y cuestan más.



**Figura 2.9** Células Policristalinas de Lámina Delgada

#### e) Células de multiconexión

Este tipo de células emplean capas múltiples de materiales semiconductores para crear dos o más uniones. Las diversas capas en la célula absorben diversas partes del espectro solar, logrando que la eficacia total de la célula sea alta.

#### f) Células Esféricas

Las células esféricas se encuentran en desarrollo a través de ciertas compañías de electricidad, estas células esféricas operan igual que una célula solar convencional, la diferencia radica en su geometría. Las células esféricas consisten en muchas esferas minúsculas de silicio cubiertas con el papel de aluminio para proporcionar contactos eléctricos. La ventaja está en su proceso de fabricación que es simple, y su bajo costo.

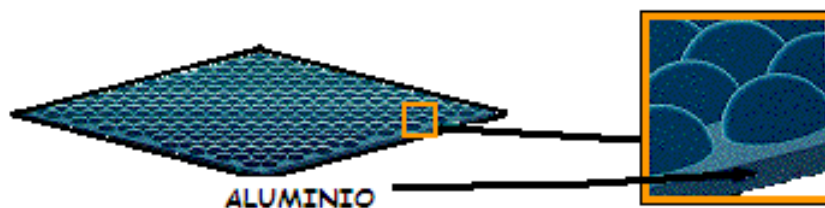


Figura 2.10 Células Esférica

#### g) Células de otros metales

Algunos otros metales se pueden transformar en los semiconductores y utilizar en las células fotovoltaicas. Algunos de ellos ya están construyendo, mientras otros están en período experimental o de diseño. Entre algunos de estos metales están el Sulfuro de cadmio, sulfuro de cobre, Teluro de cadmio, Seleniuro de cobre e indio, Arseniuro de galio. Mientras algunos muestran eficiencias altas, otros pueden tener limitaciones en su funcionamiento debido a factores como durabilidad, costo, y disponibilidad de materias primas.

El seleniuro de cobre-indio y telurio de cadmio tienen muchas ventajas, están creciendo y mejorando rápidamente. Uno de los más interesantes y recientes descubrimientos fue el diseleniuro de cobre-indio ( $\text{CuInSe}_2$ ) que con aproximadamente  $25 \text{ cm}^2$  de superficie ha alcanzado una eficiencia de 15%. Este material además parece ser fotoestable. Sin embargo, este material, todavía es relativamente nuevo y no está establecido ningún proceso industrial para esta tecnología.

El arseniuro de galio y otros materiales que pertenecen al grupo III y V de la tabla periódica y sus aleaciones, tales como el arseniuro de galio y aluminio son ampliamente utilizados o en investigación. Algunos de estos materiales como el arseniuro de galio (GaAs), tienen una amplia historia, ciencia y tecnología detrás. Su atracción especial es su alta eficiencia. Se ha alcanzado recientemente un 24% de eficiencia en sistemas sin concentración y un 31% de eficiencia bajo concentración.

#### **h) Células flexibles**

Este tipo de células son adecuadas para aplicaciones al aire libre, incorpora tecnologías desarrolladas por la industria aeroespacial y militar, son células extremadamente flexibles, resistentes, prácticamente irrompibles, son muy estables, duraderas, incluso cuando están sujetas a los rigores de las radiaciones extremas en el espacio.

Se las puede instalar casi en cualquier sitio, tienen mayor eficiencia que las células basadas en silicio amorfo. Su construcción versátil.





**Figura 2.11** Células Flexibles

**i) Células solares hechas de nanocristales**

Nuevas investigaciones han logrado fabricar una célula solar que está hecha con nanocristales inorgánicos solamente. Aunque el proceso de fabricación es económico, el primer prototipo tiene una eficiencia del 3%, aunque está lejos del 10% requerido para que sea comercial, las ventajas que podrían presentar serán muy buenas. Este diseño está basado en nanocristales de seleniuro de cadmio (CdSe) y telurio de cadmio (CdTe).

**j) Células bifaciales**

Las células bifaciales se han desarrollado bajo una nueva tecnología que consiste en crear una doble unión de tal manera que las pueda activar tanto por la cara frontal como por la posterior. Gracias a este procedimiento se logra captar también la radiación reflejada en el suelo, es por esto que su costo de producción es mayor al igual que su rendimiento.

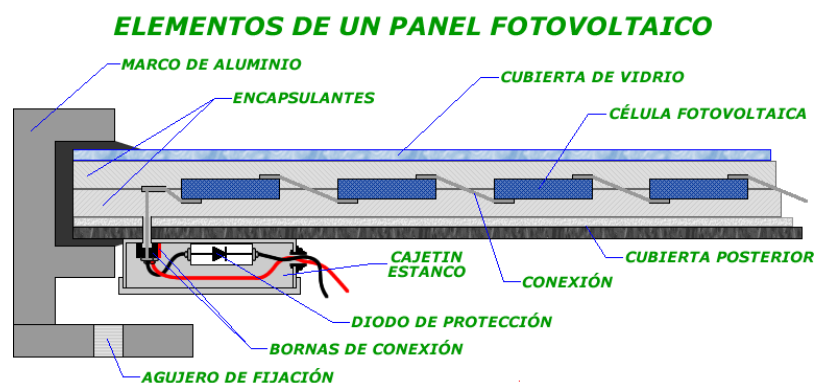
**2.2.4. MÓDULOS O PANELES FOTOVOLTAICOS**

Una única célula es capaz de proporcionar una tensión de algunas décimas de voltio, aproximadamente 0,5 V para células de Silicio y una potencia máxima de 1 ó 2 W. Para su empleo práctico, las células solares se conectan eléctricamente dando lugar al panel o módulo fotovoltaico, generalmente en asociaciones serie-paralelo. Pero además de contar con las células los paneles fotovoltaicos están formados por otros elementos que protegen el conjunto de agentes externos, además de que brindan rigidez, ayudan a la sujeción a las estructuras que lo soportan y permiten la conexión eléctrica. Y estos elementos son:

- **Cubierta exterior de cara al Sol:** La cubierta debe garantizar la transmisión de la radiación solar, por ello se emplea vidrio que se

caracteriza por su resistencia mecánica, alta transmisividad y bajo contenido en hierro.

- **Encapsulante:** Sirve de protección, generalmente se emplea etilen-vinil-acetato (EVA) o silicona. Es muy importante que no afecte su transparencia por lo que se debe buscar que tenga un índice de refracción similar al del vidrio protector para no alterar las condiciones de la radiación incidente.
- **Protección posterior:** Brinda rigidez y protección frente a los agentes atmosféricos. Usualmente se utiliza láminas formadas por distintas capas de materiales que tengan distintas características.
- **Marco metálico:** Asegura rigidez y estanqueidad, además que incorpora los elementos de sujeción a la estructura exterior del panel. Para garantizar la unión entre el marco metálico de aluminio y los elementos que forman el panel, se realiza distintos tipos de sistemas resistentes a las condiciones de trabajo del panel.
- **Cableado y bornas de conexión:** Necesarios para realizar las instalaciones eléctricas, generalmente se encuentran protegidos de la intemperie por medio de cajas estancas.
- **Diodo de protección:** Protege al panel de sobrecargas o alguna otra alteración en su funcionamiento.



**Figura 2.12** Elementos de un Panel Fotovoltaico

Son muy variadas las dimensiones de los paneles solares, están constituidos entre 28 y 40 células, aunque lo más típico es que tengan 36. Su superficie puede oscilar entre 0.1 y 0.5m<sup>2</sup>, presenta dos bornes de salida, positiva y negativa, las mismas que a veces cuentan con una borne intermedio para colocar los diodos de protección.

#### 2.2.4.1. Características Eléctricas de los Módulos Fotovoltaicos

Es muy importante conocer la característica V-I de un módulo fotovoltaico para su utilización y diseño de generadores fotovoltaicos, esta característica está determinada mediante algunos parámetros, obtenidos a raíz de la información característica suministrada por el fabricante.

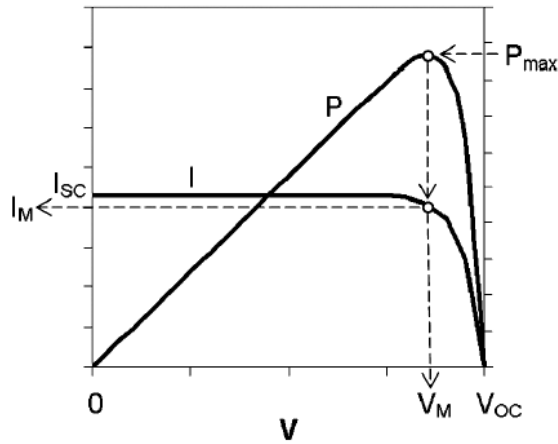
Generalmente se presenta bajo algunas condiciones estándares de medida, que son:

**Tabla 2.1** Condiciones Estándar de Medida de Características de Módulos Fotovoltaicos

|                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| Irradiación              | 1000 W / m <sup>2</sup> |
| Distribución espectral   | AM 1,5                  |
| Incidencia               | Normal                  |
| Temperatura de la célula | 25°C                    |

Bajo estas condiciones se puede medir los valores característicos del panel que son:

- a) Potencia máxima ( $P_{MAX}$ )
- b) Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ )
- c) Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), y
- d) Factor de forma (FF)



**Figura 2. 13** Curvas características I-V y P-V de un panel fotovoltaico

**a) Potencia Máxima ( $P_{Max}$ )**

La potencia máxima es el producto del valor de voltaje máximo ( $V_M$ ) e intensidad máxima ( $I_M$ ) que entrega el panel.

**b) Voltaje de Circuito Abierto ( $V_{oc}$ )**

Es el máximo valor de voltaje en los extremos del panel y se toma cuando no está conectada a ninguna carga, es decir cuando los terminales están en circuito abierto ( $I=0$ ).

**c) Corriente de Cortocircuito ( $I_{sc}$ )**

Es el máximo valor de corriente que circula por el panel fotovoltaico y se mide cuando la célula está en cortocircuito ( $V=0$ ).

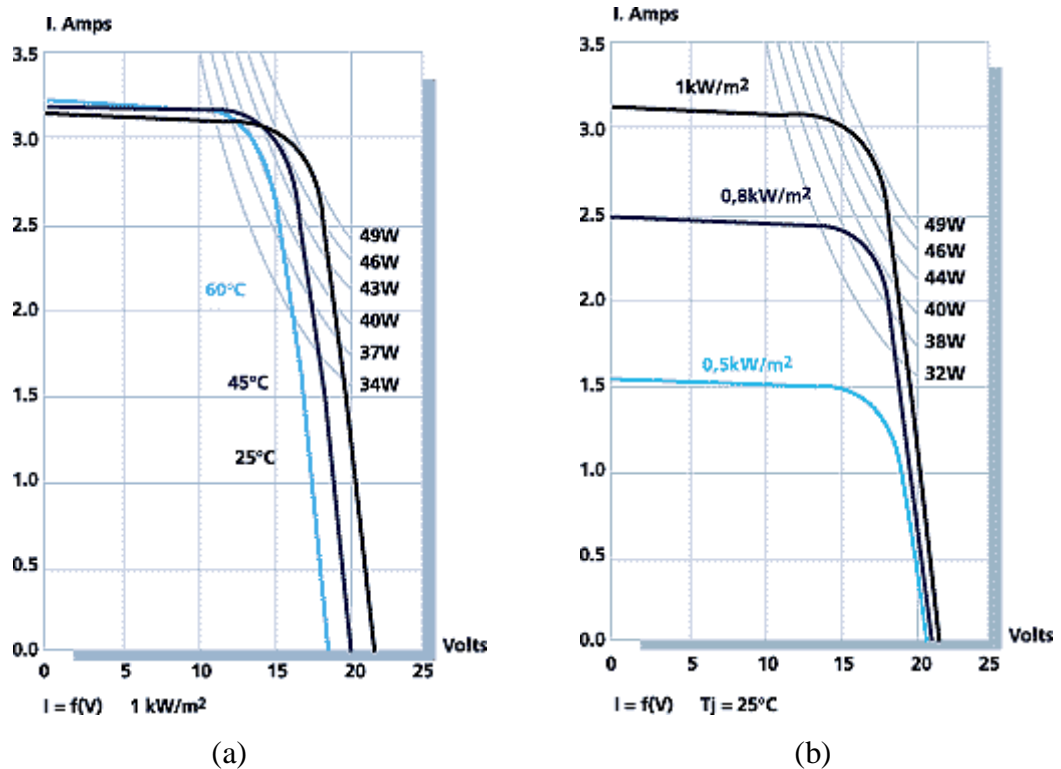
**d) Factor de Forma (FF)**

El factor de forma de una célula se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito, es decir:

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.1)$$

donde:  $I_M$  = Intensidad Máxima,  $V_M$  = Voltaje Máximo,  $V_{oc}$  = Voltaje de circuito abierto, e  $I_{sc}$  = Corriente de corto circuito.

Hay que tomar en cuenta que la variable que más influye sobre la respuesta eléctrica del panel y por lo tanto sobre sus curvas características, para cualquier temperatura de trabajo dada, es la irradiación ( $G$ ).



**Figura 2.14** Influencia de la irradiación,  $G$ , en las características de un panel fotovoltaico.

- a) Dependencia con  $G$  de los parámetros  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  de un determinado panel
- b) Características I-V del mismo panel con diferentes irradiaciones

Para completar la caracterización de un módulo se lo hace a través de la Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC) que se la define como la temperatura que alcanzan las células solares cuando se las somete a condiciones como:

**Tabla 2.2** Condiciones de Medida de Características de Módulos Fotovoltaicos

|                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| Irradiación              | 800 W / m <sup>2</sup> |
| Distribución espectral   | AM 1,5                 |
| Incidencia               | Normal                 |
| Temperatura de la célula | 20°C                   |
| Velocidad del viento     | 1 m/s                  |

Es muy importante conocer los cuatro parámetros mencionados  $P_{MAX}$ ,  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  y TONC para poder saber el comportamiento de un panel en cualquier condición de operación definida por un valor de la irradiación y un valor de temperatura ambiente.

#### **2.2.4.2. Influencia de la Temperatura en los Parámetros Básicos de un Módulo Fotovoltaico**

Los módulos fotovoltaicos funcionan mejor en climas fríos, esto se debe a que las celdas son dispositivos electrónicos reales y generan electricidad partiendo de luz y no del calor y como la mayoría de los dispositivos electrónicos, las celdas fotovoltaicas funcionan con mayor eficiencia a temperaturas frías.

Al aumentar la temperatura de la célula empeora el funcionamiento de la misma, por ejemplo:

- La intensidad de cortocircuito sufre un ligero incremento. Conocer este efecto es muy importante debido a que la radiación varía todo el día y será necesario colocar los paneles de manera que se pueda cambiar su posición a lo largo del tiempo que se requiera.
- El voltaje de circuito abierto disminuye aproximadamente 2.3 mV/ °C.
- Tanto como el factor de forma y el rendimiento de los módulos decrecen.

#### **2.2.5. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

También los módulos fotovoltaicos se los agrupa nuevamente de acuerdo al tipo de aplicación de suministro de energía que se necesita, formando los llamados sistemas fotovoltaicos. Existen tres grupos de sistemas fotovoltaicos que son:

- a) Sistemas Aislados
- b) Sistemas Híbridos
- c) Sistemas Conectados a la red

### **a) Sistemas Aislados**

Este sistema se emplea principalmente en lugares donde la red de distribución eléctrica no se encuentra disponible, el sistema aislado ofrece soluciones a problemas como sistemas de iluminación, repetidores de radio, electrificación de núcleos rurales y viviendas, hasta sistemas de bombeo y desalinización de agua.

Para este efecto la energía se suele acumular en baterías electroquímicas, que además puede contener un inversor, que permita transformar la corriente continua suministrada por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna.

### **b) Sistemas Híbridos**

El sistema fotovoltaico normal puede brindar una cierta cantidad de energía, para el caso de que se requiera más energía, se debería aumentar el tamaño del sistema y por lo tanto elevaría los costos. Esta es la razón principal por la que se emplean sistemas híbridos, que son una combinación entre un sistema fotovoltaico y otra fuente de suministro de energía eléctrica complementaria como son los generadores diesel o eólicos.

Estos sistemas deben estar equipados con sistemas de control más eficientes que los que cuentan únicamente con paneles, por ejemplo en el caso de tener un sistema fotovoltaico/Diesel, el generador Diesel debería empezar a funcionar cuando las baterías alcanzan el mínimo nivel de carga y dejar de funcionar cuando se alcance un nivel de carga aceptable.

Existen diferentes sistemas híbridos:

- **Sistemas con acumuladores:** En este sistema el motor generador funciona cuando la energía fotovoltaica almacenada se agotó.

- **Sistemas sin acumuladores o directos:** Para este tipo de sistema el motor generador funciona cuando la energía fotovoltaica no alcanza.

El sistema híbrido resulta más económico que ampliar la instalación de paneles fotovoltaicos, pero a largo plazo resultará más costoso debido a que el motor generador consume combustibles y necesita mantenimiento.

### **c) Sistemas Conectados a la Red**

Estos sistemas que se encuentran conectados a la red proveen de energía eléctrica al sistema o la suministran directamente cuando existe sobreproducción y viceversa, cuando es necesario se alimentan de la misma red. En estos sistemas se necesitan inversores y sistemas específicos que permiten el flujo y control de la energía. Su aplicación suele ser en ámbitos urbanos como edificios, tejados y fachadas o en grandes plantas de producción de energía solar fotovoltaica.

## **2.2.6. CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Los sistemas fotovoltaicos trabajan mejor en climas fríos ya que generan electricidad partiendo de la luz y no del calor. En climas templados, se genera mayor energía en verano que en invierno debido a que en invierno los días son más cortos y el sol cae con menor ángulo y las nubes cubren mayormente al sol.

A pesar de que se tenga días nublados, los paneles fotovoltaicos generan electricidad, aunque su potencia disminuye linealmente hasta alrededor del 10% respecto de la intensidad solar plena normal. No necesitan luz solar directa.

El ciclo de vida de un panel fotovoltaico está diseñado para durar por lo menos 30 años y cuentan con garantía de 20 años. Son capaces de soportar climas



muy adversos como el frío ártico, el calor del desierto, la humedad tropical, vientos en exceso de 200 kph, y 25mm de granizo a velocidad terminal.

Estos sistemas además pueden emplear baterías industriales de alta calidad que máximo tendrán una duración de 8 a 10 años. Respecto al mantenimiento que se les debe proporcionar a los sistemas fotovoltaicos, éste es mínimo debido a que no poseen partes móviles.

### 2.2.7. EFICIENCIA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos variará debido a varias razones como materiales de fabricación, clima, cantidad de radiación absorbida, entre otras.

La radiación captada por la superficie del panel dependerá de parámetros como: latitud del lugar, día del año y hora del día, inclinación de dicha superficie, estado climático reinante.

El límite en la eficiencia de conversión de energía para celdas solares basadas en materiales semiconductores simples, es de 31%. La primera razón para este límite, es que no hay material alguno que pueda captar perfectamente un rango amplio de radiación solar. Al respecto, las celdas solares construidas con al menos tres semiconductores han sido desarrolladas en la década pasada y tales celdas han logrado actualmente mayores eficiencias, alrededor del 30%.

**Tabla 2.3** Eficiencias proyectadas hasta el 2010.

| Tecnología de Celda         | 1999    | 2000 | 2010 |
|-----------------------------|---------|------|------|
| Silicio Monocristalino      | 14 – 16 |      |      |
| Silicio Policristalino      | 13 – 15 |      |      |
| Silicio en Cinta            | 14      |      |      |
| Silicio más Concentrador    | 18      | 25   | 30   |
| Silicio Amorfo (multicapas) | 6 – 8   | 10   | 14   |
| Diselenuro de Indio y Cobre | 7 – 8   | 12   | 14   |
| Teluro de Cadmio            | 7 – 8   | 12   | 14   |
| Capa Delgada de Silicio     | 8 – 10  | 12   | 15   |

### 2.2.8. APLICACIONES

La energía solar fotovoltaica se ha dividido en dos sectores básicos, bien diferenciadas:

- Uno para la producción de electricidad en zonas geográficas aisladas donde no llega la red eléctrica.
- La otra aplicación que actualmente se va imponiendo es el denominado sistema de energía solar fotovoltaico conectado a la red.

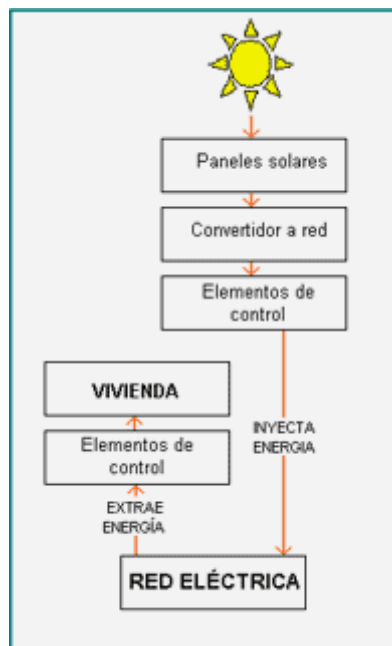


Figura 2.15 Sistema Fotovoltaico conectado a la Red

Pero en definitiva son muchísimas las aplicaciones donde se emplea la energía solar fotovoltaica, especialmente es utilizada donde se requiera un suministro de energía continuo y fiable sin necesidad de dependencias derivadas de las fuentes de energía convencional. Las aplicaciones se dan en sistemas como:

#### A) Instalaciones Eléctricas para Vivienda Rural

A pesar que la distribución de energía cubre gran extensión de terreno aún quedan lugares aislados cuyo abastecimiento resulta muy difícil, y en donde resulta más caro prolongar una línea eléctrica que instalar un sistema fotovoltaico.

Para diseñar una instalación fotovoltaica será imperativo conocer las necesidades eléctricas que se tenga, además de la ubicación y posición de los paneles y del resto de los elementos para su correcto funcionamiento. Se debe contar con un sistema de almacenamiento que posibilite hacer uso de la energía cuando sea necesaria, para ello se usan los acumuladores o baterías, además de reguladores para protección de descargas y sobrecargas y finalmente inversores que cambien la energía continua que se genera en los paneles (12/24V DC), en continua (110/120V AC).



**Figura 2.16** Esquema de una Instalación Fotovoltaica



**Figura 2.17** Instalación Fotovoltaica para vivienda rural

## **B) Alumbrado Público**

Unas de las soluciones para la iluminación en cualquier lugar son las farolas fotovoltaicas que se las emplean principalmente en vías públicas, caminos aislados, cementerios, jardines, urbanizaciones, zonas rurales, parques infantiles, camping. Entre as ventajas que estos sistemas presentan están:

- Es un sistema ecológico, no contaminante
- Resulta económico ya que se evita el tendido de cables eléctricos, y los costes de realización como levantamiento de calzadas.
- Trabaja a baja tensión lo que resulta seguro
- Son de fácil instalación y no requieren mucho mantenimiento.



**Figura 2.18** Farolas Fotovoltaicas

La iluminación de vallas publicitarias es otra aplicación en donde se pueden emplear farolas fotovoltaicas,



**Figura 2.19** Vallas Publicitarias iluminadas con Farolas Fotovoltaicas

### **C) Transporte**

Una de las innovaciones más prometedoras es el desarrollo de sistemas fotovoltaicos capaces de adaptarse a vehículos de todo tipo como son kioscos, las caravanas.

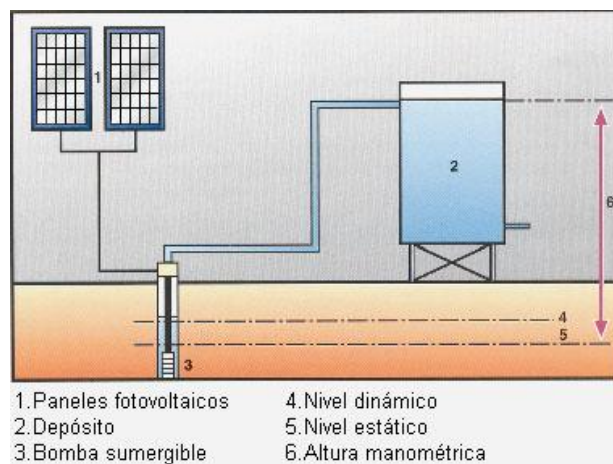


**Figura 2.20** Autos Solares

### D) Aplicaciones agrarias

Una aplicación muy importante que se le da a la energía fotovoltaica es en el campo agropecuario, como son Sistemas de bombeo, Sistemas automáticos de riego, Fertirrigación, Silos y almacenes, Bebederos automáticos para ganado, Cercas electrificadas, Pastores eléctricos, Invernaderos, Naves ganaderas, entre otros.

**Sistemas de Bombeo:** La energía solar fotovoltaica alimenta a sistemas de bombeo de agua autónomos, tanto para uso doméstico como agrícola. Estos sistemas son empleados principalmente por su fácil instalación, limpieza y fiabilidad comparadas con otras opciones.



**Figura 2.21** Esquema de un Sistema de Bombeo





**Figura 2.22** Sistema de Bombeo de Agua

**Sistemas automáticos de riego:** Una gran alternativa que se presenta actualmente son los sistemas de riego, accionados gracias a la energía que nos proporciona los paneles fotovoltaicos.



**Figura 2.23** Sistema de Riego

**Invernaderos:** Circulación del agua, iluminación y equipos de climatización.

Por otra parte también cada vez se están empleando estos sistemas fotovoltaicos en el Tratamiento de aguas, desalinización, cloración.

## **E) Comunicaciones**

Las empresas de telecomunicaciones fueron las primeras en desarrollar células fotovoltaicas, que se emplearon en satélites espaciales.



**Figura 2.24** Telecomunicaciones Satelitales

Actualmente los paneles son empujados para suministrar energía a Repetidores de señal y telefonía móvil y rural.



**Figura 2.25** Repetidores de TV, radio y telefonía móvil

Otra aplicación interesante es la activación de los radioteléfonos empleados sobre todo por militares.



**Figura 2.26** Radioteléfonos

## F) Señalización

Es muy importante tener una señalización adecuada, es por ello que es cada vez más común que se implanten paneles fotovoltaicos en señales áreas, marítimas, férreas y terrestres debido a la facilidad de instalación y al bajo mantenimiento que requieren.



**Figura 2.27** Faro Accionado con Paneles Fotovoltaicos

## G) Aplicaciones portátiles

Actualmente las células fotovoltaicas son empleadas en equipo portátiles como calculadoras, teléfonos móviles y otros equipos electrónicos pequeños, como generadores móviles, Equipos de adquisición de datos, Sismógrafos y mareógrafos entre otros.



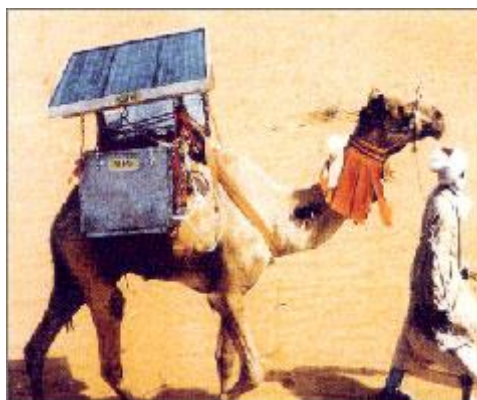
**Figura 2.28** Cargador



## H) Otras aplicaciones

Como se puede apreciar la energía solar fotovoltaica tiene innumerables aplicaciones como la electricidad, que va desde encender una bombilla hasta iluminar un pueblo completo, únicamente depende la inventiva de cada persona para darle un uso adecuado.

Los casos más particulares se dan en países en vías de desarrollo, debido a que en la mayoría de los casos, es la única alternativa de que disponen para acceder a la electricidad que les permita obtener agua potable, o acondicionar hospitales, escuelas. Y donde el suministro de medicamentos a áreas remotas es muy importante por lo que requieren de equipos de refrigeración adecuados.



**Figura 2.29** Equipo de Refrigeración móvil para el Transporte de vacunas en el Desierto.

### 2.2.9. VENTAJAS DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Usa como fuente de energía los rayos solares, esto la convierte en energía renovable, limpia y gratuita. Se trata de que la electricidad solar sea una clara apuesta por la conservación del medio ambiente. La generación de energía fotovoltaica se está convirtiendo en una forma eficiente de reducir las emisiones de agentes contaminantes a la atmósfera que se derivan de las fuentes convencionales, y al mismo tiempo, supone un ahorro de combustibles fósiles para las generaciones futuras.

Debido al posible agotamiento de la energía fósil nos permite ser menos dependientes de ella y nos brinda la oportunidad de desarrollar nuevas

tecnologías de conversión. La tecnología fotovoltaica es la base de un tejido industrial que goza de un elevado potencial de exportación, se está convirtiendo en una actividad productiva con futuro especialmente en la Unión Europea.

Evita el despoblamiento progresivo de determinadas zonas, gracias a que la energía puede ser descentralizada, captada y utilizada en cualquier territorio dan nuevas posibilidades de vida a los habitantes.

Disminuye costos de mantenimiento de las líneas eléctricas, sobre todo en zonas aisladas, ya que estos sistemas no necesitan mucho mantenimiento y los riesgos de daño son muy bajos. No se necesita invertir en combustibles, aceites, tiempo y costo de movilización.

Los sistemas fotovoltaicos son de fácil instalación, debido a que son modulares permite aumentar o reducir la potencia según las necesidades, por lo que no se tiene que preocuparse de problemas de aumento de consumo. Además son sistemas silenciosos y sencillos. Los paneles tienen una vida útil de entre 20 y 30 años, sin embargo hay que considerar a los otros elementos que completan el sistema.

La tecnología fotovoltaica se encuentra en un rápido desarrollo que tiende a reducir el costo y aumentar el rendimiento, por lo que a futuro será de gran utilidad y ventaja. El manejo del sistema solar es fácil, como conectarse a la red pública. Tampoco hay que preocuparse de aumentos del precio de la energía eléctrica o peor de fallas o apagones de la red pública eléctrica.

## **CAPITULO 3**

### **DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE CALOR**

#### **3.1. TRANSFERENCIA DE CALOR**

##### **3.1.1. DEFINICIONES**

Siempre que existe una diferencia de temperatura en el universo, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. De acuerdo con los conceptos de la termodinámica, esta energía transmitida se denomina calor.

Las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, pero siempre se refieren a sistemas que están en equilibrio, y solo pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro, por lo que no sirven para predecir la rapidez con que puedan producirse estos cambios.

La ciencia llamada transmisión o transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica clásica, proporcionando los métodos de análisis que pueden utilizarse para predecir la velocidad de la transmisión del calor, además de los parámetros variables durante el proceso en función del tiempo. La transferencia de calor es la energía de tránsito debido a una diferencia de temperatura entre dos medios: sólidos, líquidos, gaseosos o combinación de los mismos.

Para un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar mecanismos fundamentales de transmisión: conducción, convección y radiación, además del mecanismo de acumulación. El análisis de los sistemas

y modelos de intercambio de calor requieren familiaridad con cada uno de estos mecanismos y sus fundamentos, así como de sus interacciones.

Los fenómenos de transferencia de calor tienen un papel importante en muchos problemas industriales y ambientales. Por ejemplo el área vital de la producción y conversión de energía. No hay una sola aplicación en esta área que no implique efectos de transferencia de calor de alguna manera.

Como ya se mencionó, el fenómeno de transferencia de calor se refiere al transporte de energía debido a una diferencia de temperatura en un sistema. Esta transferencia de calor puede ocurrir por tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

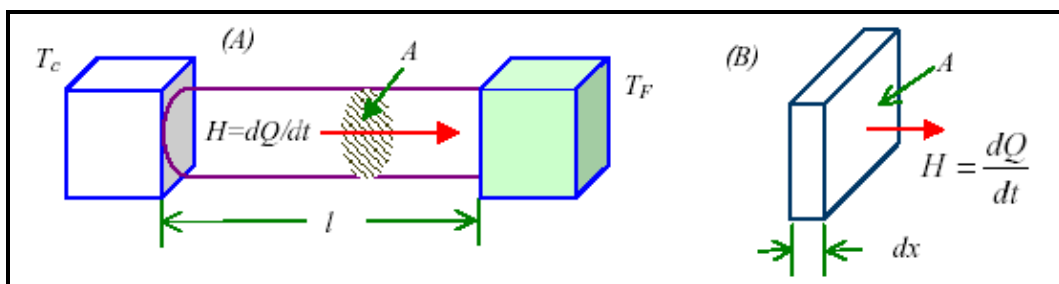
La conducción térmica se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia por interacciones entre ellas debido a un gradiente de temperatura. La convección se lleva a cabo entre una superficie y un fluido en movimiento siempre y cuando los dos se encuentren a temperaturas diferentes. La radiación es el fenómeno de transferencia que se caracteriza por el transporte de energía en forma de ondas electromagnéticas sin necesidad de un medio material.

Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. La conducción requiere contacto físico entre los cuerpos que intercambian calor, pero en la radiación no hace falta que los cuerpos estén en contacto ni que haya materia entre ellos. La convección se produce a través del movimiento de un líquido o un gas en contacto con un cuerpo de temperatura diferente. Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra recibe calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

### 3.1.2 TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia, debido a las interacciones entre las mismas. Las temperaturas más altas se asocian con las energías moleculares más altas y cuando las moléculas vecinas chocan, como lo hacen constantemente, debe ocurrir una transferencia de energía de las moléculas de mayor hacia las de menor energía. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir entonces en la dirección de la temperatura decreciente. En el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa (choque elástico en caso de líquidos) sin desplazamiento apreciable de las moléculas.

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor.



**Figura 3.1** (A) Transmisión del calor a lo largo de una barra de materia, asilada por los lados laterales, de longitud  $l$  con un extremo caliente ( $T_c$ ) y el otro frío ( $T_F$ ).  
(B) Transmisión de calor a través de un elemento de materia de espesor infinitesimal  $dx$ .

En el caso de los líquidos y gases, como el espacio intermolecular es mucho mayor y el movimiento de las moléculas es más aleatorio, el transporte de energía térmica es menos efectivo. La conductividad térmica de los gases y líquidos es por tanto menor que la de los sólidos en general.

Los metales en general son buenos conductores del calor (en general los buenos conductores eléctricos son también buenos conductores térmicos, aunque existen notables y útiles excepciones como el acero inoxidable, la mica y el diamante).

**Tabla 3.1** Conductividad térmica de ciertos materiales<sup>5</sup>

| Sustancia        | Conductividad Térmica "k"          |             |
|------------------|------------------------------------|-------------|
|                  | [Kcal/s.m.°C]<br>X 10 <sup>4</sup> | [W/m.k]     |
| Plata            | 1000                               | 420         |
| Cobre            | 920                                | 380         |
| Aluminio         | 500                                | 200         |
| Acero            | 110                                | 40          |
| Vidrio (común)   | 2.0                                | 0.84        |
| Pared o concreto | 2.0                                | 0.84        |
| Agua             | 1.4                                | 0.56        |
| Asbesto          | 0.4                                | 0.16        |
| Madera           | 0.2 - 0.4                          | 0.08 - 0.16 |
| Aire             | 0.0055                             | 0.023       |

### 3.1.3. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado Convección.

<sup>5</sup> Para detalle de otros materiales INCROPERA F. Fundamentos de Transferencia de Calor, Apéndice A, página 827.

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos de transporte, que son: la transferencia de energía debido al movimiento aleatorio de las moléculas (difusión térmica) y el movimiento global o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados.

Si se considera un fluido con velocidad  $V$  y temperatura  $T_\infty$  que circula sobre una superficie arbitraria la misma que se encuentra a una temperatura uniforme  $T_s$  y de área  $A_s$ , y si  $T_s \neq T_\infty$ ; se produciría una transferencia de calor por convección donde el flujo local  $q''$  se expresa como:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3.1)$$

donde  $h$  es el coeficiente de convección local. Como las condiciones de flujo varían de punto a punto sobre la superficie,  $q''$  y  $h$  también varían a lo largo de la superficie. La transferencia total de calor  $q$  que se obtiene estará dada por la ecuación:

$$Q = \bar{h} \cdot A_s (T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

donde  $Q$  es el flujo de calor por unidad de área expresada en  $(W/m^2)$  y  $\bar{h}$  es el coeficiente de convección promedio, también llamado coeficiente de película o fílmico, expresado en  $(W/m^2 \cdot K)$  para toda la superficie.

La transferencia de calor por convección ocurre en una región de interfase entre un fluido en movimiento y una superficie sólida, entre dos líquidos inmiscibles en movimiento relativo y entre un gas y un líquido que tiene movimiento relativo, que están a diferentes temperaturas.

El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende.

Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural, es decir el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de la diferencia de densidad ocasionada por la variación de la temperatura en los fluidos. La convección forzada se produce cuando el flujo es causado por medios externos, tales como: ventilador, bomba o vientos atmosféricos y se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se forja su movimiento de acuerdo a las leyes de la hidrodinámica.

Por ejemplo, si calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima.

De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior (que está más frío) desciende, mientras que al aire cercano al panel interior (más caliente) asciende, lo que produce un movimiento de circulación. El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección. Debido a la convección, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que



la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable del tiraje de las chimeneas.

La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie. Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, el flujo de calor por unidad de área, es proporcional a la diferencia de temperatura.

### 3.1.4. TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

Se sabe que la transferencia de calor por conducción y convección requiere la presencia de un gradiente de temperatura en alguna forma de materia. Por el contrario, la transferencia de calor mediante radiación térmica no requiere materia. Es un proceso en extremo importante, y en el sentido físico es quizá el más interesante de los modos de transmisión de calor.

Muy a menudo la radiación se considera como un fenómeno perteneciente solo a cuerpos calientes luminosos. En esta investigación se verá que no es el caso y que la radiación, como un tercer medio de transferencia de calor, difiere bastante de la conducción y de la convección.

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Aunque se centrará la investigación en la radiación en superficies sólidas, cabe mencionar que esta radiación puede también provenir de líquidos y gases. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (fotones).

Si se considera una superficie con emisividad  $\epsilon$ , absorptividad  $\alpha$  y temperatura  $T_s$ , la radiación que dicha superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área ( $W/m^2$ ) se denomina la *potencia emisiva superficial*  $E$  cuya expresión se detalla en la siguiente:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3.3)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ),  $T_s$  es la temperatura absoluta de la superficie ( $^{\circ}K$ ) y  $\epsilon$  es una propiedad radiactiva de la superficie con valores en el rango  $0 \leq \epsilon \leq 1$ , que proporciona una medida de

la eficiencia con que una superficie emite energía en relación a un cuerpo negro, dependiendo del material y acabado de la misma.

La radiación también puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores. Se origina desde una fuente especial, como el Sol, o de otras superficies a las que se expone la superficie de interés. Sin tener en cuenta la fuente, se designa la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la irradiación  $G$ . Una parte de la irradiación, o toda, tal vez sea absorbida por la superficie, y así se incrementaría la energía térmica del material. La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área superficial unitaria se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiactiva de la superficie denominada absorptividad  $\alpha$ . Es decir,

$$G_{abs} = \alpha G \quad (3.4)$$

donde  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Si  $\alpha < 1$  y la superficie es opaca, partes de la irradiación se reflejan. Si la superficie es semitransparente, partes de la irradiación también se transmiten. Sin embargo, mientras la radiación absorbida y emitida aumenta y disminuye, respectivamente, la energía térmica de la materia, la radiación reflejada y transmitida no tiene ningún efecto sobre esta energía. El valor de  $\alpha$  depende de la naturaleza de la irradiación así como de la superficie misma.

Alternativamente, la radiación se puede ver como la propagación de ondas electromagnéticas. En cualquier caso se desea atribuir a la radiación las propiedades características de las ondas: frecuencias ( $\nu$ ) y longitudes de onda ( $\lambda$ ). Para la radiación que se propaga en un medio particular, las dos propiedades se relacionan mediante:

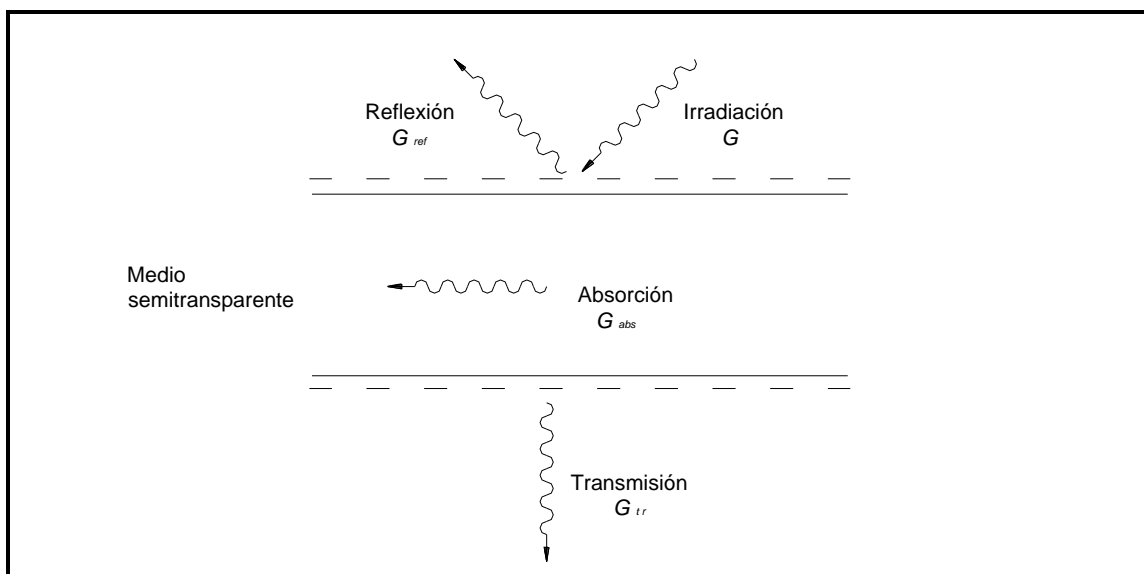
$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3.5)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el medio. Para la propagación en el vacío,  $c_0 = 2.998 \times 10^8$  m/s. La unidad de longitud de onda normalmente es la micra ( $\mu\text{m}$ ), donde  $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$  m.

### 3.1.5. ABSORCIÓN, REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN SUPERFICIALES<sup>6</sup>

La irradiación  $G$  puede incidir en todas las direcciones posibles y se puede originar desde varias fuentes diferentes. En la situación más común, la irradiación interactúa en un medio semitransparente, tal como una capa de agua o una placa de vidrio. A partir de un balance de radiación sobre el medio, se puede afirmar que:

$$G = G_{ref} + G_{abs} + G_{tr} \quad (3.6)$$



**Figura 3.2** Procesos de absorción, reflexión y transmisión asociados con un medio

Semitransparente

#### 3.1.5.1 Absortividad

<sup>6</sup> Descripción más detallada de la Figura 3.2 INCROPERA F. Fundamentos de Transferencia de Calor, página 662.

La absorptividad ( $\alpha$ ) es una propiedad que determina la fracción de la irradiación absorbida por una superficie. La determinación de esta propiedad es compleja por el hecho de que, al igual que la emisión, se puede caracterizar por una dependencia direccional y espectral.

La absorptividad depende de la distribución espectral de la radiación incidente, así como de su distribución direccional y de la naturaleza de la superficie de absorción.

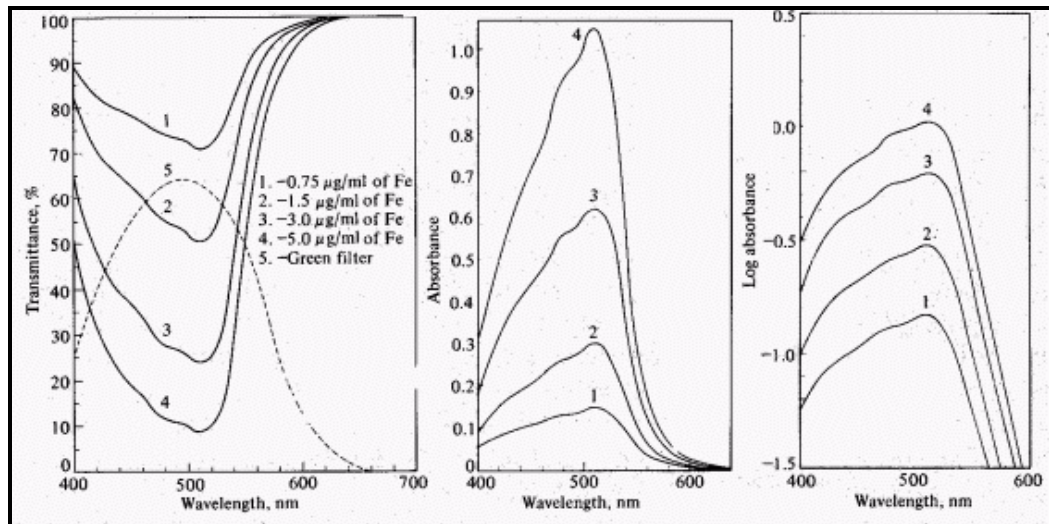
### **3.1.5.2 Reflectividad**

La reflectividad es una propiedad que determina la fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie. Sin embargo, su definición específica puede tomar varias formas diferentes, pues la propiedad es inherentemente bidireccional; es decir, además de depender de la dirección de la radiación incidente, también depende de la dirección que presenta la radiación reflejada.

Las superficies se pueden idealizar como difusas o especulares, de acuerdo con la forma en que reflejan la radiación. Esto ocurre sin importar la dirección de la radiación incidente, la intensidad de la radiación reflejada es independiente del ángulo de reflexión.

### **3.1.5.3 Transmisividad**

A pesar que el tratamiento de la respuesta de un material semitransparente a la radiación incidente es un problema complicado, a menudo se pueden obtener resultados razonables mediante el uso de transmisividades hemisféricas.



**Figura 3.3** Dependencia espectral de absorbancia y transmitancia espectrales

En general, la determinación de estos componentes es compleja; depende de las condiciones de las superficies superior e inferior, la longitud de onda de la radiación y las composición y espesor del medio. Además, las condiciones pueden ser fuertemente influenciadas por efectos volumétricos que ocurren dentro del medio. En una situación más simple, como generalmente ocurre, el medio es opaco a la radiación incidente, en esta caso  $G_{tr} = 0$  y los procesos de absorción y reflexión se pueden tratar como fenómenos superficiales. Es por tanto apropiado decir que la irradiación es absorbida y reflejada por la superficie, que dependen de la longitud de onda y de la naturaleza del material de la superficie.

### 3.1.6. RADIACIÓN AMBIENTAL

La radiación solar es esencial para toda la vida de la Tierra. A través de procesos térmicos y fotovoltaicos, se tiene el potencial para satisfacer mucha de nuestra demanda de calentamiento espacial, proceso de calor y electricidad.

El Sol es una fuente inagotable de energía debido a las reacciones nucleares que ocurren en su centro. Una gran parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética, la luz solar que podemos percibir está el espectro que abarca desde 0.2 hasta 2.6  $\mu\text{m}$ . Tiene  $1.39 \times 10^9$  m de diámetro y se localiza a  $1.50 \times 10^{11}$  m de la Tierra. Se comporta muy aproximadamente como un cuerpo negro emisor con una temperatura superficial efectiva de uno 5800 °K, lo cual significa que la distribución espectral de la radiación recibida por la Tierra es amplia. La incidencia total sobre la atmósfera terrestre es de  $1.3 \text{ kW m}^{-2}$ , llamada constante solar, el 95% de la cual es de longitud de onda inferior a 2  $\mu\text{m}$ .

Gran parte de esta radiación recibida por la Tierra es devuelta por dispersión al espacio y una gran proporción es absorbida selectivamente por diversos gases de la atmósfera, de tal modo que después de un simple tránsito vertical a través de la capa atmosférica, solo  $1 \text{ kW m}^{-2}$  aproximadamente alcanza la superficie terrestre.

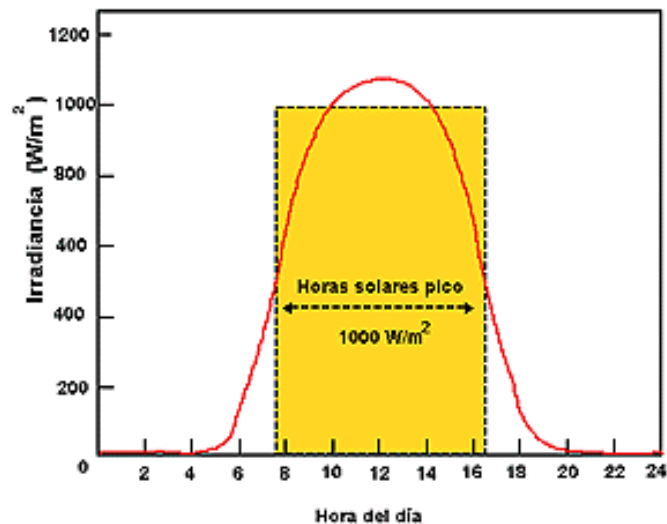
La energía de la radiación solar que se recibe en una superficie determinada en un instante dado se le conoce como *Irradiancia* y se mide en unidades de  $\text{W/m}^2$ . La irradiancia es un valor distinto para cada instante, es decir se espera que en un día despejado la irradiancia a las 10:00 hr. será diferente y menor a la que se obtiene a las 13:00 hr., esto se debe al movimiento de rotación de la tierra. Cuando es de noche, se tiene una irradiancia de 0 Watts por metro cuadrado, porque simplemente a esa parte de la Tierra el Sol no la puede ver.

La parte de la radiación que penetra en la atmósfera sin ser dispersada o absorbida está en la dirección del ángulo cenital y se denomina radiación directa. La radiación dispersada incide de todas direcciones, aunque su intensidad es mayor para direcciones cercanas a la de la radiación directa. Sin embargo, como la intensidad de la radiación a menudo se supone independiente de la dirección, la radiación se denomina difusa. La radiación solar total que alcanza la superficie terrestre es, por tanto, la suma de las contribuciones directa y difusa. La contribución difusa puede variar de

aproximadamente el 10% de la radiación solar total en un día claro a cerca del 100% en un día totalmente nublado.

Otro concepto importante es el de *Irradiancia*, éste corresponde a la integración de la insolación en un período determinado. En otras palabras es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. Este término tiene unidades de energía por área, comúnmente Watts-hora por metro cuadrado  $\left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}\right)$ .

Generalmente se reporta este valor como una acumulación de energía horaria, diaria, estacional o anual. La irradiancia también se expresa en términos de horas solares pico. Una hora de energía es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una irradiancia promedio de  $1000 \text{ W/m}^2$  (Figura 3.2). La energía útil que produce el arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la irradiancia que recibe.



**Figura 3.4** Irradiancia y horas de sol pico (irradiancia) durante un día soleado

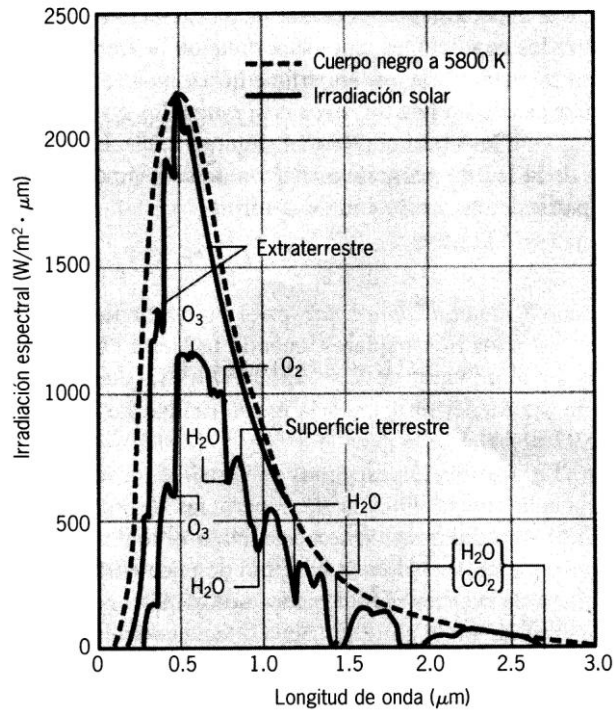


El arreglo recibe los rayos del Sol inclinados al amanecer, aumentando el ángulo durante la mañana para recibirlos perpendicularmente al mediodía y luego ir disminuyendo durante el atardecer. Esa irradiancia varía desde los 0 W hasta llegar a los 1000 W al mediodía para luego ir decreciendo a 0 W. El día solar tiene generalmente unas doce horas, pero de esas horas aproximadamente la mitad tienen máxima irradiancia o luminosidad, generalmente entre las 10:00 a 16:00 hs. Cada área geográfica de la Tierra tiene un valor medido en horas de máxima irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>.

La irradiancia es un parámetro clave en el diseño de sistemas solares. Los factores principales que afectan la irradiancia sobre una superficie captadora son las condiciones climáticas y el ángulo de la superficie captadora con respecto a la posición del sol. En lugares donde los días nublados son relativamente más frecuentes, la irradiancia promedio es menor. Cuando la latitud del lugar sobrepasa los 15°, los días de invierno son apreciablemente más cortos que los días de verano. Esto resulta en una mayor irradiancia promedio en el verano.

Debido a que la irradiancia depende del ángulo del arreglo con respecto a la posición del Sol, se usa la irradiancia horizontal para referirse al potencial solar del lugar. A partir de la irradiancia horizontal se puede estimar la irradiancia a un azimut y elevación determinado.

Las formas de longitud de onda larga de la radiación ambiental incluyen la emisión de la superficie terrestre, así como la emisión de ciertos constituyentes atmosféricos. La potencia emisiva asociada con la superficie se puede calcular mediante la ecuación 3.11. Los valores de las propiedades espectrales de una superficie a longitudes de onda corta pueden ser apreciablemente diferentes de los valores a longitudes de onda grandes.



**Figura 3.5** Distribución espectral de la radiación solar

En particular, la irradiación de la Tierra debida a la emisión atmosférica se puede expresar en la forma

$$G_{\text{atm}} = \sigma T_{\text{SKY}}^4 \quad (3.7)$$

donde  $T_{\text{SKY}}$  se denomina la temperatura efectiva del cielo. Su valor depende de las condiciones atmosféricas, que van desde un valor inferior de 230 K, bajo un cielo claro frío, a uno superior de aproximadamente 285 K bajo condiciones nubladas y calientes.

Como la radiación solar se concentra en la región de longitud de onda corta del espectro y la emisión superficial es en longitudes de onda mucho más grandes, se sigue que muchas superficies no se pueden aproximar como grases en su respuesta a la irradiación

solar. En otras palabras, la absorptividad solar de una superficie puede diferir de su emisividad.

**Tabla 3.2** Absortividad solar y emisividad de algunas superficies

| Superficie                                    | $\alpha$ | $\varepsilon$ (300 K) | $\alpha/\varepsilon$ |
|---|----------|-----------------------|----------------------|
| Película de aluminio evaporado                | 0.09     | 0.03                  | 3.0                  |
| Cuarzo fundido sobre una película de aluminio | 0.19     | 0.81                  | 0.24                 |
| Pintura blanca sobre un sustrato metálico     | 0.21     | 0.96                  | 0.22                 |
| Pintura negra sobre un sustrato metálico      | 0.97     | 0.97                  | 1.0                  |
| Acero inoxidable, como se recibe, mate        | 0.50     | 0.21                  | 2.4                  |
| Ladrillo rojo                                 | 0.63     | 0.93                  | 0.68                 |
| Piel humana (caucásica)                       | 0.62     | 0.97                  | 0.64                 |
| Nieve   | 0.28     | 0.97                  | 0.29                 |
| Hoja de maíz                                  | 0.76     | 0.97                  | 0.78                 |

### **3.1.7. DISEÑO DEL SISTEMA EXTRACTOR DE CALOR**

#### **3.1.7.1. Efecto Fototérmico**

La conversión fototérmica utiliza la absorción, no solo de la radiación infrarroja, sino también de la radiación visible. En realidad los buenos captadores fototérmicos rechazan gran parte del espectro solar infrarrojo y son efectivos para longitudes de onda inferiores a unos 2  $\mu\text{m}$ , lo cual supone que solo un 5% de la radiación solar deja de aprovecharse.

La distribución espectral de la radiación solar sugiere que un captador eficaz sería aquel que absorbiese fuertemente la radiación visible del espectro solar, tuviera un mínimo de pérdidas por conducción y convección a los alrededores y emitiera la menor radiación posible en la región infrarroja del espectro.

A medida que crece la temperatura de éste captador, la pérdida de energía por radiación crece según la ley de Stefan Boltzmann. Por encima de 100 °C las pérdidas energéticas por conducción y convección son menos importantes que por radiación. Cuando se produce un balance de energía entre la energía solar incidente y las pérdidas de calor, se alcanza una temperatura de equilibrio.

Como para cualquier longitud de onda la absorción es igual a la emitancia de un cuerpo negro a temperatura constante, resulta imposible disminuir su emitancia sin disminuir al mismo tiempo su absorción.

En efecto, igualando la pérdida radiante por unidad de área ( $\sigma T^4$ ) con la absorción de la energía solar ( $\alpha E$ ) para un cuerpo negro, resulta en el equilibrio

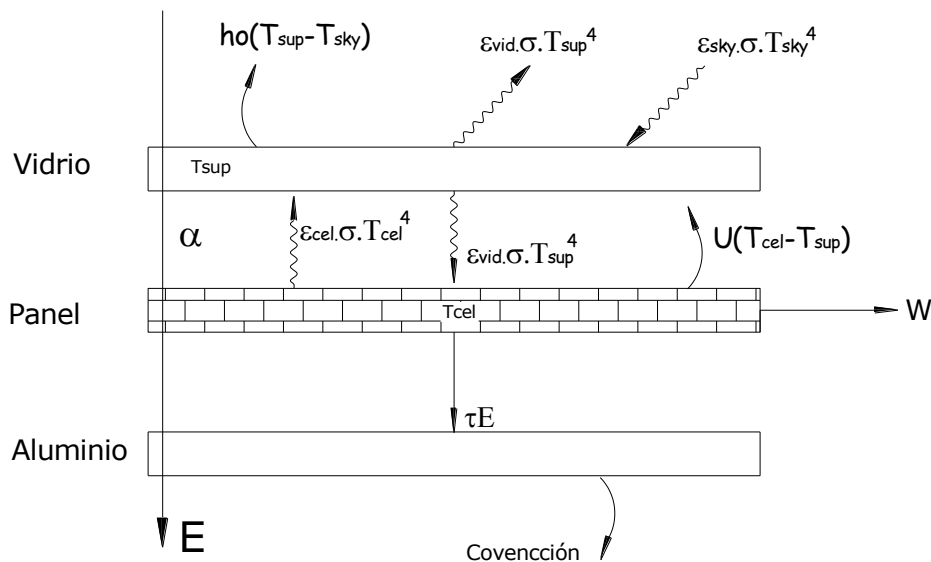
$$\alpha E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.8)$$

Para un cuerpo negro absorbente a la luz solar,  $T$  sería 345 °K, que es aproximadamente la temperatura alcanzada por una placa negra aislada dejada al Sol. Además existe una pérdida por convección en el aire en reposo y en un día ventoso dicha pérdida sería mucho mayor. Este balance energético omite el intercambio térmico con los objetos cercanos o con el suelo, factores difíciles de generalizar.

### 3.1.7.2. Diseño del Modelo Térmico

Para poder analizar el comportamiento térmico se considera inicialmente que el sistema posee una cubierta transparente de vidrio de donde se partirá para realizar los balances de energía. Que serán los modelos preliminares de los cuales se iniciará el cálculo.

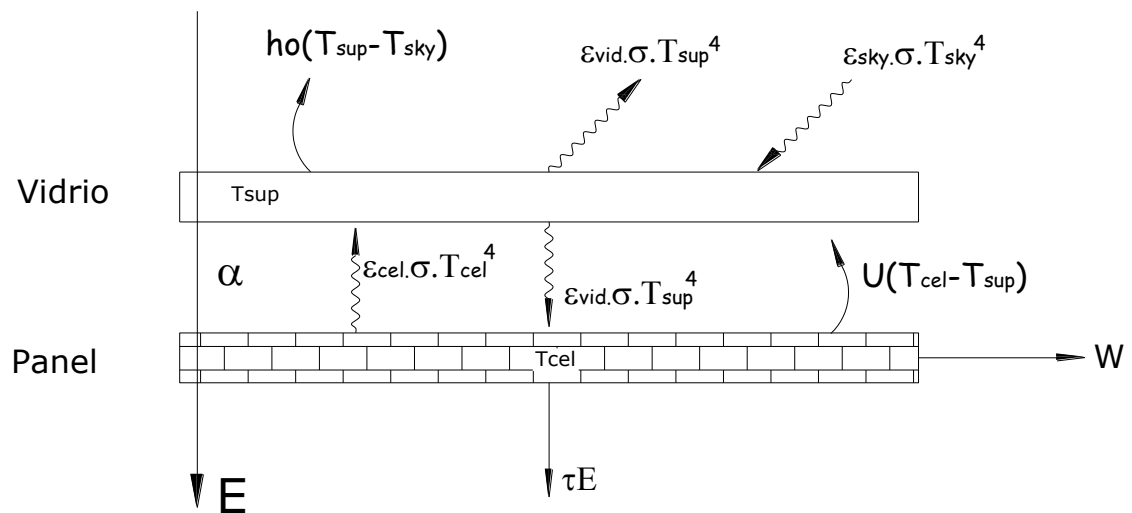
#### 3.1.7.2.1. Balance Energético del Panel Fotovoltaico



**Figura 3.6** Balance Energético del Panel Fotovoltaico

Para empezar el análisis del panel fotovoltaico se indica todas las irradiaciones que se encuentran involucradas dentro del sistema.

Para la cara superior del panel se procede a realizar un análisis energético en esta zona mediante la ecuación de conservación de energía para determinar el valor de la temperatura de la célula.



**Figura 3.7** Balance Energético de la Cara Superior del Panel Fotovoltaico

Por lo que es necesario conocer algunas propiedades de los materiales y algunas variables preliminares.

**Tabla 3.3** Datos necesarios para el análisis energético del Panel Fotovoltaico<sup>7</sup>

| <b>Símbolo</b>   | <b>Descripción</b>                   | <b>Valor</b> | <b>Unidades</b> |
|------------------|--------------------------------------|--------------|-----------------|
| $\epsilon_{al}$  | Emisividad del Aluminio              | 0.07         | [adim]          |
| $\epsilon_{vid}$ | Emisividad del vidrio                | 0.9          | [adim]          |
| $\epsilon_{si}$  | Emisividad del Silicio               | 0.87         | [adim]          |
| $\epsilon_{sky}$ | Emisividad del Sky                   | 0.65         | [adim]          |
| $\epsilon_{cel}$ | Emisividad de la célula fotovoltaica | 0.87         | [adim]          |
| $\alpha_{vid}$   | Absortividad del Vidrio              | 0.13         | [adim]          |
| $\alpha_{al}$    | Absortividad del Aluminio            | 0.15         | [adim]          |
| $\alpha_{si}$    | Absortividad del Silicio             | 0,08         | [adim]          |

---

<sup>7</sup> Los valores presentados en la Tabla 3.2 se encuentran en INCROPERA F. Fundamentos de Transferencia de Calor, apéndice A, pp. 852-853.

**Tabla 3.4** Constantes<sup>8</sup> empleadas para el análisis energético del Panel Fotovoltaico

| Símbolo  | Descripción                   | Valor                 | Unidades                                 |
|----------|-------------------------------|-----------------------|--|
| $\sigma$ | Constante de Stefan-Boltzmann | $5.67 \times 10^{-8}$ | $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$ |
| U        | Coefficiente de Convección    | 5                     | $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$   |

Cálculo de la temperatura sky<sup>9</sup> o de cielo

$$T_{\text{sky}} := 0.0522 \cdot T_a^{1.5}$$

$$T_{\text{sky}} = 266.763 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Cálculo del coeficiente de convección<sup>10</sup>

$$h_o := 5.7 + 3.8 \cdot W$$

$$h_o = 7.676 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Los datos de temperatura se obtienen sacando los promedios de los datos iniciales tomados en el panel fotovoltaico. (ANEXO B.1)

Con todos estos datos se realiza el análisis energético en la cara superior del panel, así

$$\text{Energía Entra} - \text{Energía Sale} = \text{Energía Acumulada}$$

---

<sup>8</sup> WILSON, J.I.B, Energía Solar. p. 109.

<sup>9</sup> Dada en función de la temperatura ambiente y es la que incide directamente sobre el panel fotovoltaico.

<sup>10</sup> Esta fórmula del coeficiente de convección se la emplea principalmente en colectores solares.



$$(\epsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot T_{sky}^4) + (\epsilon_{cel} \cdot \sigma \cdot T_{cel}^4) + [U \cdot (T_{cel} - T_{sup})] \\ - 2 \cdot (\epsilon_{vid} \cdot \sigma \cdot T_{sup}^4) - [h_o \cdot (T_{sup} - T_a)] = \alpha_{vid} \cdot E$$

Para poder resolver todas las ecuaciones planteadas en este diseño se procedió a utilizar el programa Mathcad de donde se obtiene que:

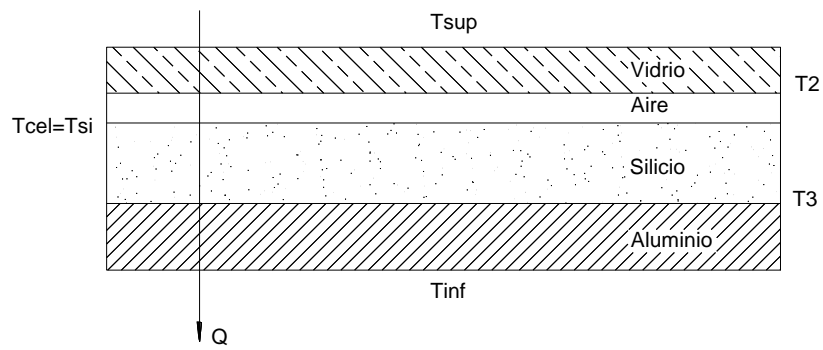
$$T_{cel} := 337.72 \text{ } ^\circ\text{K}$$

### 3.1.7.2.2. Cálculo del Calor Total

Una vez que se obtiene estos valores es importante calcular el calor que se genera en el panel fotovoltaico, causante de la baja de su rendimiento para lo que se empleó la transferencia de calor en pared delgada debido a las dimensiones de los componentes, así:

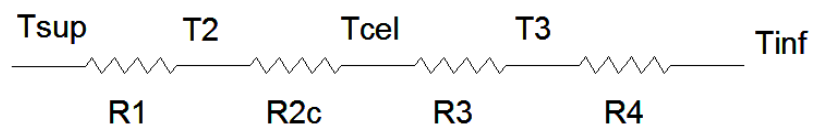
**Tabla 3.5** Datos necesarios para el cálculo de calor transferido

| Símbolo | Descripción                            | Valor | Unidades |
|---------|--|-------|----------|
| Kvid    | Coeficiente de Conducción del Vidrio   | 0.81  | [W/m.K]  |
| Ksi     | Coeficiente de Conducción del Silicio  | 148   | [W/m.K]  |
| Kal     | Coeficiente de Conducción del Aluminio | 236   | [W/m.K]  |
| Lvid    | Espesor del Vidrio                     | 0.003 | [m]      |
| Lsi     | Espesor del Silicio                    | 0.005 | [m]      |
| Lal     | Espesor del Aluminio                   | 0.005 | [m]      |
| L       | Largo del Panel Fotovoltaico           | 1.04  | [m]      |
| A       | Ancho del Panel Fotovoltaico           | 0,31  | [m]      |



**Figura 3.8** Cálculo del Calor Total

Para su análisis se realiza una analogía eléctrica de todos los componentes



**Figura 3.9** Resistencias Eléctricas

$$R1 := \frac{L_{vid}}{k_{vid} \cdot A}$$

$$R1 = 0.011 \quad \begin{matrix} \text{°K} \\ \text{W} \end{matrix}$$

$$R2c := \frac{1}{U \cdot A}$$

$$R2c = 6.203 \times 10^{-4} \quad \begin{matrix} \text{°K} \\ \text{W} \end{matrix}$$

$$R3 := \frac{Lsi}{ksi \cdot A}$$

$$R3 = 1.048 \times 10^{-5} \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$R4 := \frac{Lal}{kal \cdot A}$$

$$R4 = 6.571 \times 10^{-6} \frac{^{\circ}K}{W}$$

Por lo tanto se tiene que:

$$RT := R1 + R2c + R3 + R4$$

$$RT = 0.012 \frac{^{\circ}K}{W}$$

Y el calor se calcula mediante la fórmula:

$$Q := \frac{Tsup - Tinf}{RT}$$

$$Q = 268.034 \text{ W}$$

### 3.1.7.2.3. Dimensionamiento de la Coraza de Vidrio

Para el dimensionamiento de la coraza se realizaron los cálculos para convección forzada.

Se determinó la temperatura media aproximada del flujo de aire y mediante interpolación<sup>11</sup> se determinó el coeficiente de conducción del aire, el número de Prant y el coeficiente de viscosidad cinemática.

$$T_{\text{prom}} := \frac{T_{\text{sup}} + T_{\text{flujo}}}{2}$$

$$T_{\text{prom}} = 309.585 \quad ^\circ\text{K}$$

A esta temperatura se tiene que:

$$U_f := 16.8542 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$k := 27.01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\text{Pr} := 0.7057$$

A continuación se procede con el cálculo del número de Reynolds, Nusell, coeficiente de convección y finalmente el calor desalojado asumiendo que la velocidad requerida es de 8.1 m/s, valor que se lo determinó a partir de los datos del ANEXO B.1.

$$\text{Re} := \frac{w \cdot L}{U_f}$$

$$\text{Re} = 4.998 \times 10^5$$

---

<sup>11</sup> La interpolación se lo realizó entre 300 y 350 °K de INCROPERA F. Fundamentos de Transferencia de Calor, apéndice A, p. 839.

$$\text{Nu} := 0.032 \cdot \text{Re}^{0.8}$$

$$\text{Nu} = 1.159 \times 10^3$$

$$h_o := \frac{\text{Nu} \cdot k}{L}$$

$$h_o = 30.109 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$Q = h_o \cdot (2 \cdot L \cdot a) \cdot (\text{T}_{\text{sup}} - \text{T}_{\text{fluj}})$$

$$Q = 643.91 \text{ W}$$

Se debe tomar en cuenta que este sería el calor desalojado por un solo ventilador pero al momento de instalarlo obligaría a que la coraza sea muy grande, es por ello que se analizaron varias opciones de mercado, de distintos ventiladores pequeños y se optó por colocar seis ventiladores de 9V, 0.5 A con una velocidad individual de 3 m/s aproximadamente.

Debido a esto se procedió a armar un prototipo de un ventilador capaz de desalojar 145.99 W. (Ver ANEXO B.1). y en base a estas dimensiones se determinó las dimensiones quedando:

$$L_c := 1142 \text{ mm}$$

$$a_c := 339 \text{ mm}$$

$$a_{lc} := 100 \text{ mm}$$

#### **3.1.7.2.4. Cálculo de la Eficiencia del Panel**

Para saber la eficiencia real del panel se debe primero calcular la eficiencia nominal bajo condiciones de prueba ideales dadas por el fabricante, para esto se debe considerar algunos datos como:

**Tabla 3.6** Datos necesarios para el cálculo de la eficiencia del panel

| Símbolo | Descripción                       | Valor | Unidades            |
|---------|-----------------------------------|-------|---------------------|
| Tpanel  | Temperatura del Panel (ANEXO B.2) | 51.23 | [°C]                |
| Tcnp    | Temperatura del Panel en CNP      | 25    | [°C]                |
| Pnom    | Potencia del Panel                | 43    | [Wp]                |
| Et      | Irradiación ideal                 | 1000  | [W/m <sup>2</sup> ] |
| A       | Área del Panel Fotovoltaico       | 0.322 | [m <sup>2</sup> ]   |

$$\eta_n := \frac{P_{nom}}{E_t \cdot A}$$

$$\eta_n = 0.133$$

$$\eta_r := \eta_n \cdot [1 - .004(T_{panel} - T_{cnp})]$$

$$\eta_r = 0.119$$

### 3.1.7.2.5. Cálculo del Diseño de la Cámara de Secado

Para el cálculo del diseño de la cámara de secado, se tomó como referencia lo estipulado por la FAO<sup>12</sup> una organización de las Naciones Unidas encargada de dirigir proyectos de agricultura y alimentación. A más de eso, la FAO es una fuente de conocimientos y de información: ayuda a los países en desarrollo y a los países en transición a modernizar y mejorar sus actividades agrícolas, forestales y pesqueras, con el fin de asegurar una buena nutrición para todos.

Para más información ver ANEXO J

<sup>12</sup> Food and Agriculture Organization

Un estudio de dicha Organización propone que: “por cada metro cúbico de producto que se desee secar, es necesario diseñar una cámara de secado por donde ingrese un caudal de aire de entre 10 a 30 metros cúbicos por minuto”.

Como producto de prueba a utilizar para el secado se determinó el plátano verde cuya humedad relativa<sup>13</sup> = 75.7 %.

Para esto se determina el caudal del aire a la salida de la boca en función de los datos tomados (ANEXO B.3) y en función de ello se determina el volumen de producto a secar mediante regla de tres.

$$V_{\text{prod}} = 0.022 \text{ m}^3$$

Por lo que el volumen de la cámara será de:

$$V_c := 4V_{\text{prod}}$$

$$V_c = 0.089 \text{ m}^3$$

Cabe mencionar que aunque el volumen de la cámara es aproximado por lo que se puede alterar cualquiera de las tres dimensiones en función a los requerimientos propios de cada aplicación. Por lo que se procedió a hacer un esquema básico y finalmente se decidió que las dimensiones de ésta sean:

$$L_{\text{cam}} := 30 \text{ cm}$$

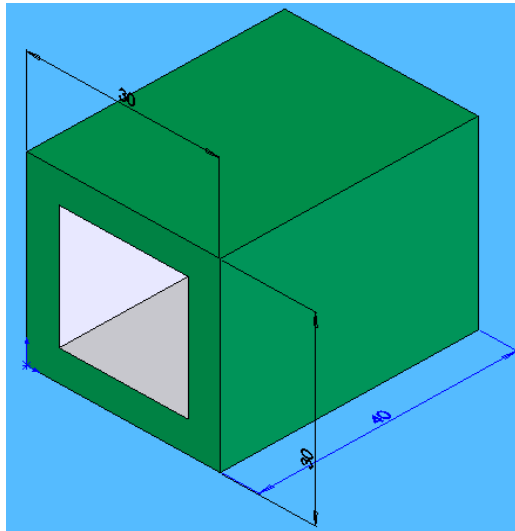
$$A_{\text{cam}} := 30 \text{ cm}$$

$$P_{\text{cam}} := 40 \text{ cm}$$

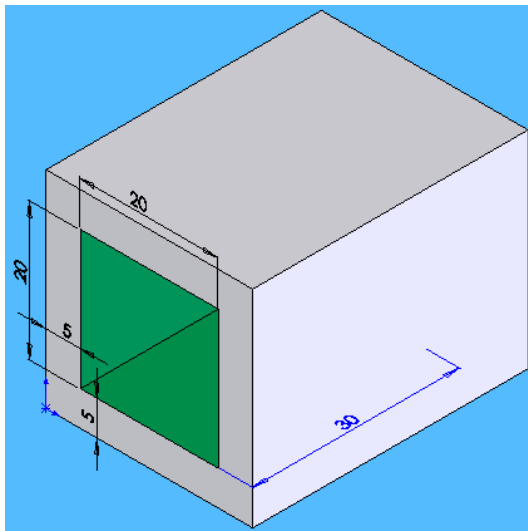
Para garantizar el secado del producto se colocó un revestimiento de lana de vidrio de 5 cm de espesor por cada lado de la cámara.

---

<sup>13</sup> Valores de humedad relativa de otros productos INCROPERA F. Fundamentos de Transferencia de Calor, apéndice A, p. 837.



**Figura 3.10** Dimensiones Exteriores de la Cámara de Secado



**Figura 3.11** Dimensiones Interiores de la Cámara de Secado

### 3.1.7.2.6. Cálculo de las pérdidas en el Sistema de Extracción

Para calcular las pérdidas que existen en cada tramo es necesario recurrir a la gráfica de “Pérdidas por fricción en ductos -unidades SI” del ASHRAE<sup>14</sup> (ANEXO F), estimando el valor en función del diámetro del ducto y la velocidad de flujo.

<sup>14</sup> American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers



### A) En el Panel Fotovoltaico:

Al tratarse de una sección rectangular se debió primero encontrar el diámetro equivalente en función del alto y ancho de la coraza así:

$$De := \frac{1.3(B \cdot H)^{\frac{5}{8}}}{(B + H)^{\frac{1}{4}}}$$

$$De = 0.191 \quad \text{m}$$

Por otra parte en esta sección el caudal se determino con:

$$Qaire := 2(w \cdot B \cdot H)$$

$$Qaire = 0.536 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con estos datos se determinó que las perdidas son de

$$Pfr := 20 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Y a través de todo el panel llegan a:

$$Ppfr := Pfr \cdot Lp$$

$$Ppfr = 20.8 \quad \text{Pa}$$

### B) En el ducto:

El ducto es circular de:

$$Ddc = 0.102 \quad \text{m}$$

Por lo tanto el caudal será

$$Q_{dc} := w_{dc} \cdot \frac{D_{dc}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$Q_{dc} = 9.972 \times 10^{-3} \quad \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Aplicando el mismo procedimiento se tiene:

$$P_{frd} := 0.33 \quad \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Para calcular esta pérdida se debe considerar la longitud con la que se trabaja en el ducto, debido a que se lo puede alargar hasta 1.50 m, para este caso la longitud empleada fue de 0.90 m.

$$P_{dfr} := P_{frd} \cdot L_{dc}$$

$$P_{dfr} = 0.297$$

Finalmente las pérdidas totales son:

$$P_T := P_{pfr} + P_{dfr}$$

$$P_T = 21.097 \quad \text{Pa}$$

En superficies lisas como el vidrio las pérdidas son relativamente bajas, es por esta razón que casi todo el caudal que ingresa al panel es el mismo que sale a la boca y llega al ducto de aluminio. Mediante el cálculo por fricción se puede ver que las pérdidas en el sistema apenas alcanzan los 21 Pa.

# CAPITULO 4

## CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA

Una vez concluidos los análisis y cálculos de diseño del equipo así como de la selección de los materiales más idóneos que formarán parte del prototipo de pruebas, se detallará a continuación la descripción de todo lo referente al proceso de fabricación del sistema y la forma de montaje sobre el panel fotovoltaico.

### 4.1 CONSTRUCCIÓN

Todo proyecto mecánico en el cual implique la construcción de un prototipo de pruebas, requiere de una detallada explicación de todos los procesos que se llevarán a cabo para la culminación del mismo, además de una adecuada secuencia de los pasos a seguir, facilitando así su construcción y ahorrando el tiempo empleado en su procesamiento.

Para esto, se han elaborado las respectivas hojas de proceso para todas las partes que conforman el sistema final a ser implementado y los diagramas de proceso, las mismas que indican el orden en el que deberán ser realizadas las operaciones.

Como primer punto, es necesario realizar una lista de todos los materiales que fueron utilizados para la construcción del prototipo y además describir las herramientas y equipos que se emplearon para su fabricación.

**Tabla 4.1** Lista de materiales adquiridos en el mercado

| Descripción                               | Especificación | Cantidad | Proveedor |
|---|----------------|----------|-----------|
| Tubo rectangular de aluminio de 3" x 1 ½" | 1762           | 1u       | ELAMSA    |
| Peinazo de aluminio (inferior)            | 2233           | 1u       | ELAMSA    |
| Peinazo de aluminio (superior)            | 1626           | 1u       | ELAMSA    |
| Angulo de aluminio de ½" x ½"             | 2407           | 1u       | ELAMSA    |

**Tabla 4.1** Lista de materiales adquiridos en el mercado (Continuación)

| Descripción                            | Especificación | Cantidad | Proveedor      |
|--|----------------|----------|----------------|
| Perfil "T" de aluminio                 | 1505           | 1u       | ELAMSA         |
| Revestimiento de aluminio              | 1424           | 1u       | ELAMSA         |
| Vidrio flotado claro de 4 mm (plancha) | SE             | 1u       | ELAMSA         |
| Perno colepato milimétrico             | 3/16"x3/8"     | 1 caja   | FERRISARIATO   |
| Perno colepato milimétrico             | 1/4"x3/8"      | 1 caja   | FERRISARIATO   |
| Tornillo colepato galvanizado          | 1 x 8          | 1 caja   | FERRISARIATO   |
| Tornillo colepato galvanizado          | 3/4 x 8        | 1 caja   | FERRISARIATO   |
| Remache negro                          | 1/2" x 1/8"    | 1 caja   | FERRISARIATO   |
| Broca de acero                         | 3/8"           | 1u       | FERRISARIATO   |
| Broca de acero                         | 1/4"           | 1u       | FERRISARIATO   |
| Broca de acero                         | 3/16"          | 1u       | FERRISARIATO   |
| Broca de acero                         | 5/32"          | 1u       | FERRISARIATO   |
| Broca de acero                         | 9/64"          | 1u       | FERRISARIATO   |
| Broca de acero                         | 1/8"           | 1u       | FERRISARIATO   |
| Tubo de silicón de temperatura         | SE             | 1u       | FERRISARIATO   |
| Tubo de silicón impermeabilizante      | SE             | 1u       | FERRISARIATO   |
| Suelda de estaño                       | SE             | 1m       | TECNIRAMA      |
| Ventilador DC FAN CENTRAL              | 12 V           | 6u       | TECNIRAMA      |
| Cable parlante                         | # 16           | 7m       | TECNIRAMA      |
| Switch interruptor negro               | 2 patas        | 6u       | TECNIRAMA      |
| Ducto de aluminio                      | 4"             | 1u       | COMERCIAL KYWI |
| Plancha de acero inoxidable            | 1/16"          | 1u       | FERROTORRE     |
| Lana de vidrio                         | SE             | 1u       | LA LLAVE       |
| Abrazadera metálica                    | 4"             | 2u       | COMERCIAL KYWI |

**Tabla 4.2** Lista de herramientas empleadas

| Herramienta                    | Especificación |
|--------------------------------|----------------|
| Machuelo                       | 1/4" - 3/16"   |
| Compás metálico                | SE             |
| Escuadra recta                 | SE             |
| Escuadra falsa                 | SE             |
| Tupi                           | SE             |
| Juego de destornilladores      | SE             |
| Llaves mixtas de boca y corona | 13 - 14 mm     |
| Llave hexagonal                | 18 mm          |

**Tabla 4.2** Lista de herramientas empleadas (Continuación)

| <b>Herramienta</b>                | <b>Especificación</b> |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Playo                             | SE                    |
| Flexómetro (long. 3m, aprec. 1mm) | SE                    |
| Cortafrió                         | SE                    |
| Cuchilla                          | SE                    |
| Arco de sierra                    | SE                    |
| Lima rectangular                  | SE                    |
| Lima fina                         | SE                    |
| Cortadores de vidrio              | SE                    |
| Lápiz de vidrio                   | SE                    |
| Formones para destajes            | SE                    |

**Tabla 4.3** Lista de maquinaria y equipos utilizados para la fabricación

| <b>Maquinaria y Equipos</b> | <b>Características</b> |
|-----------------------------|------------------------|
| Cortadora de aluminio       | 1200 rpm               |
| Caladora                    | 800 rpm                |
| Taladro de mano             | 1200 rpm               |
| Armador eléctrico           | SC                     |
| Cautín                      | SC                     |
| Esmeril                     | 2400 rpm               |
| Soldadora MIG               | 375A -35V              |
| Cortadora de chapa          | SC                     |
| Dobladora de chapa          | SC                     |

Una vez detallados todos los materiales, herramientas y equipos necesarios para empezar la construcción del prototipo, se puede iniciar con los procesos de manufactura de cada uno de los elementos individuales que componen el mismo.

Cada diagrama de proceso especifica el tipo de operación a ser realizada, las herramientas y maquinaria específicas involucradas en la construcción y dentro de lo posible el tiempo de operación requerido para dicho fin. (Ver Anexo H.)

#### 4.1.1. CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE EXTRACCION DE CALOR

La construcción se inició de la siguiente forma:

- Se inicia la construcción con la unidad de control eléctrico, para esto se utilizó tubo de aluminio de 3" x 1 ½", dentro del cual se encuentran todas las conexiones eléctricas del cable madre del panel fotovoltaico con los ventiladores y sus correspondientes interruptores de accionamiento.



**Figura 4.1.** Construcción de la unidad de control eléctrico

- Se elaboran los marcos estructurales donde se va a apoyar la coraza de vidrio. Para esto se utilizó el perfil peinazo de aluminio tanto para la parte superior como inferior del panel fotovoltaico.



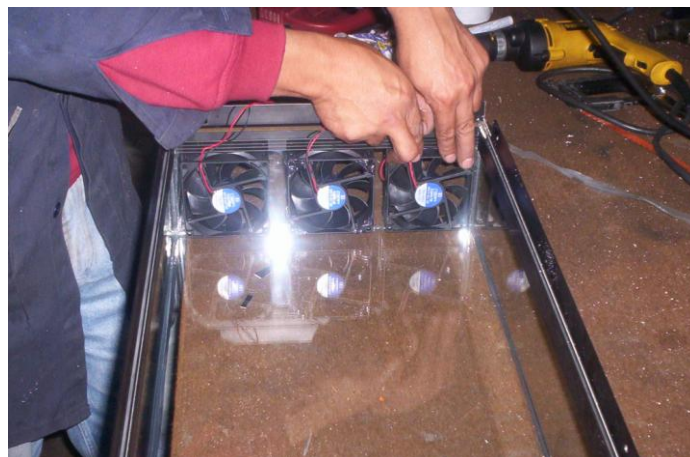
**Figura 4.2.** Construcción del marco estructural de aluminio apoya-coraza

- Se cortan los vidrios que formarán parte de la coraza superior e inferior. Se arman las corazas uniendo los vidrios con silicón impermeabilizante procurando que no se formen aberturas que den lugar a fugas de aire.



**Figura 4.3.** Construcción y armado de corazas superior e inferior

- Se colocan los ventiladores en las caras transversales de las corazas, disponiéndolos de forma proporcional a lo largo de las mismas.



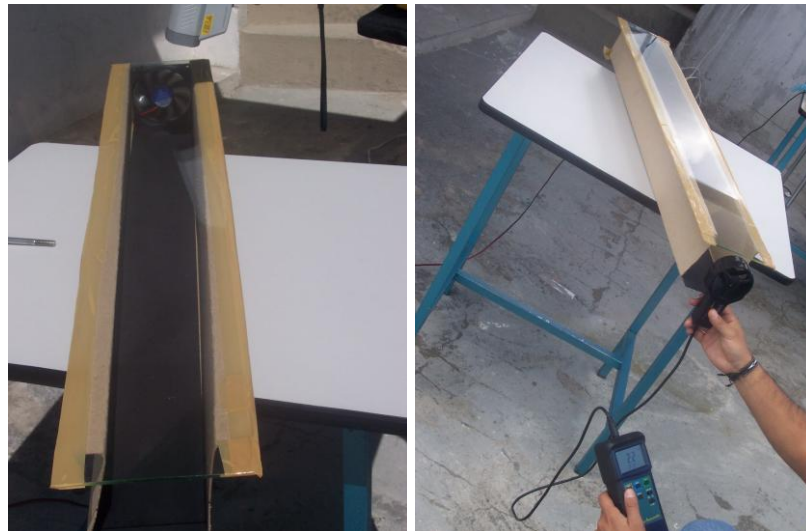
**Figura 4.4.** Colocación de ventiladores en las corazas superior e inferior

- Se refuerzan completamente con silicón todas las juntas y uniones de los componente de las corazas tanto interior como exteriormente.



**Figura 4.5.** Refuerzo total de uniones y juntas en las corzas superior e inferior

- Una vez reforzadas todas las uniones, se cortaron los alerones de vidrio encargados del direccionamiento óptimo del aire y se los acopló dentro de las corzas con las especificaciones dadas. Cabe mencionar que antes de construir los alerones, se fabricó un prototipo de pruebas en base a un túnel de viento con la utilización de un solo ventilador; dicho túnel permitió calcular experimentalmente el tamaño de los alerones, su disposición a lo largo de éste y el ángulo de incidencia para un enfriamiento total de la cara opaca.



**Figura 4.6.** Construcción y evaluación de viento en prototipo de pruebas





**Figura 4.7.** Construcción de los alerones de direccionamiento de aire

- Finalmente se elaboró el ducto de salida de aire, para esto se utilizó un revestimiento de aluminio en el cual se realizaron todos los cortes y dobleces respectivos.



**Figura 4.8.** Elaboración del ducto de salida de aire

La construcción de todas las piezas y partes anteriormente detalladas, fueron debidamente supervisadas que no contengan ningún tipo de aberturas, o fisuras que den lugar a fugas de aire hacia el exterior de la cámara o ingreso de suciedad o humedad hacia el panel fotovoltaico.

#### 4.1.2. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

El horno de calentamiento, se incorporó al sistema de extracción de energía térmica, con la finalidad de aprovechar el aire caliente (45 °C) que se puede desalojar del panel fotovoltaico. Esto se realizó como un valor agregado al presente Proyecto dando una aplicación experimental para el secado de un producto, en este caso el plátano verde.

La construcción de dicho sistema se inició de la siguiente forma:

- Luego de haberse calculado las dimensiones del horno, proporcionales a la temperatura y velocidad del aire a la salida del panel solar y al área de flujo en el mismo, se utilizó acero inoxidable de 1/32 “ para su respectiva construcción. Se cortaron los componentes interiores y exteriores del horno con la ayuda de la cizalla de mano.



**Figura 4.9.** Corte de chapa de acero inoxidable según medidas

- Se doblaron los componentes de la cámara de acuerdo a las medidas anteriormente calculadas (paredes superior, inferior y laterales, puerta, conducto de ingreso de aire y chimenea).



**Figura 4.10.** Doblado de elementos constitutivos de la cámara de secado

- Con la ayuda de la soldadora MIG, se realizó el armado de la cámara de secado, tanto de los componentes exteriores como interiores de la misma.



**Figura 4.11.** Soldadura y armado de la cámara de secado

- Finalmente, se pulieron todos los indicios de rebaba provocados por la soldadura y se comprobó que no existan fugas ni fisuras en el elemento.



**Figura 4.12.** Pulido y revisión final de fugas de aire

## **4.2. IMPLEMENTACIÓN**

### **4.2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE CALOR**

Una vez que se tienen listas las partes que conformarán el sistema extractor de energía térmica, es preciso tener en claro su forma de montaje o ensamblaje en el panel fotovoltaico, de tal forma de no causar daño a ningún elemento del conjunto.

Para esto se cuenta con la ayuda de los diagramas de proceso que indican el orden en el cual se van ensamblando las partes conforme se termina con su construcción definitiva.

El ensamblaje se realizó de la siguiente forma:

- Se inicia por la unidad principal, se colocan cuidadosamente cada una de las corazas de vidrio sobre y debajo del panel solar respectivamente, fijándolas mediante tornillos de sujeción al mismo que tiempo que se conectan todos los cables.



**Figura 4.13.** Implementación de corazas y conexiones eléctricas

- Se coloca el ducto de salida de aire en las corazas de vidrio al otro extremo de los ventiladores, fijándolo mediante remaches a los marcos estructurales de aluminio.



**Figura 4.14.** Implementación del ducto de salida de aire

- Finalmente se comprueba que todos los elementos que conforman el sistema se encuentren debidamente acoplados entre ellos y con el panel fotovoltaico, revisando una vez más que no existan fugas de aire ni fisuras en el conjunto.





**Figura 4.15.** Implementación y verificación de fugas de aire finales

#### **4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO**

Una vez construidas las partes que conformarán el sistema de calentamiento, se realizó el montaje o en todo el sistema conjunto.

El ensamblaje se lo realizó de la siguiente forma:

- Se implementa lana de vidrio al ducto de aluminio de 4" con la finalidad de proporcionarle un aislamiento térmico desde el ambiente hacia el interior de éste.



**Figura 4.16.** Colocación de lana de vidrio alrededor del ducto de aluminio

- Posteriormente se incorpora el ducto de aluminio revestido de material aislante en el orificio de ingreso de aire hacia la cámara de secado.



**Figura 4.17.** Implementación del ducto de aluminio en la boca de ingreso de aire

- Luego, se acopla el otro extremo del ducto aluminado a la salida de aire del sistema de extracción de calor, este proceso se realizó mediante abrazaderas de metal que proporcionaron seguridad en la implementación de los componentes.



**Figura 4.18.** Implementación del conjunto a la boca de salida de aire (panel solar)

- Finalmente, se revisa que todos los elementos se encuentren debidamente acoplados entre ellos, comprobando una vez más que no existan fugas de aire ni fisuras en el conjunto.



**Figura 4.19.** Verificación final del sistema completo

Una vez finalizados los procesos de construcción e implementación del sistema de extracción de energía térmica y de la cámara de secado, así como de su completa verificación de fugas o fisuras dentro del sistema conjunto, se puede realizar la toma de datos finales y las todas las pruebas respectivas en el equipo.



# CAPITULO 5

## PRUEBAS EN EL SISTEMA

Concluidos los trabajos de construcción de los diferentes componentes que forman el sistema y de su correcta implementación en el panel fotovoltaico, es necesario realizar varias pruebas en el sistema conjunto de tal forma de comparar y evaluar los resultados obtenidos de los parámetros antes del ensamblaje del sistema extractor de calor, con los mismos parámetros medidos una vez implementado dicho sistema.

Para esto se detallan a continuación varios puntos a seguir para que las pruebas realizadas en el equipo cumplan los requerimientos estipulados y los resultados obtenidos alcancen el objetivo principal del presente proyecto.

### 5.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS

Debido a la naturaleza experimental de la presente tesis, se vio en la necesidad de crear un tipo de ensayo acorde con los requerimientos impuestos al inicio de la misma.

Para lo cual se realizaron dos ensayos sobre el panel solar:

- El primer ensayo realizado se lo hizo sin el sistema de extracción de calor.

El objetivo de este ensayo fue la de verificar y medir las condiciones iniciales del equipo ante la radiación incidente, el proceso para este ensayo se detalla en la Tabla 5.2 que se encuentra más adelante en este mismo capítulo.



**Figura 5.1** Panel Fotovoltaico sin Sistema de Extracción de Calor

- El segundo ensayo fue una vez implementando el sistema de extracción de calor sobre el equipo y bajo las mismas condiciones iniciales, para medir y comparar la efectividad del sistema.



**Figura 5.2** Panel Fotovoltaico con Sistema de Extracción de Calor

Cabe señalar que para llegar al segundo ensayo se tuvo que construir un prototipo y hacer mediciones sobre éste. El equipo consistía en una placa negra cubierta por vidrio transparente y enfriado mediante un ventilador accionado por el mismo voltaje emitido por el panel fotovoltaico.



**Figura 5.3** Túnel de Viento enfriado por ventilador accionado por Panel Fotovoltaico

### 5.1.1. DESCRIPCIÓN

Antes de realizar la descripción de los ensayos practicados, se detalla la forma como se procedió a indicar el código en función de la secuencia de los ensayos

**Tabla 5.1** Descripción del código para cada ensayo

| PROYECTO |        |         | EQUPO              | ENSAYO           | NUMERACIÓN       |
|----------|--------|---------|--------------------|------------------|------------------|
| T        | Q      | V       | PF                 | 01               | 1                |
| Tesis    | Quispe | Villena | Panel Fotovoltaico | Número de Ensayo | Número de Acción |

A continuación se describe los procedimientos seguidos para la toma de datos:

**Tabla 5.2** Primer ensayo para el panel fotovoltaico con rotación en un eje con seguidor solar

| Código    | Descripción del ensayo  | Equipo/Instrumento utilizado                                    |
|-----------|---|---|
| TQV-PF011 | Con el panel fotovoltaico en posición perpendicular al sol medir la temperatura sobre y bajo el mismo, además del voltaje, amperaje que genera. | Pistola Láser<br>Multímetro<br>Termómetro Digital<br>Termocupla |
| TQV-PF012 | Adicionalmente tomar datos de la temperatura ambiente, velocidad de viento en la zona y tipo de radiación.                                      | Anemómetro<br>Termómetro Digital                                |

**Tabla 5.3** Segundo ensayo para el panel fotovoltaico con rotación en un eje con seguidor solar

| Código    | Descripción del ensayo  | Equipo/Instrumento utilizado  |
|-----------|---|---|
| TQV-PF021 | Con el panel fotovoltaico en posición perpendicular al sol medir la temperatura sobre y bajo el mismo, además del voltaje y amperaje generado, la velocidad del viento a la salida del sistema generado por los ventiladores y la temperatura de aire a la salida de la boca. | Pistola Láser<br>Multímetro<br>Termómetro Digital<br>Termocupla<br>Anemómetro |
| TQV-PF022 | Por otra parte tomar datos de la temperatura ambiente y tipo de radiación.  | Termómetro Digital  |

A pesar de que en el resultado final no está la toma de datos sobre el túnel de viento, es conveniente especificar el procedimiento que se realizó sobre éste.

**Tabla 5.4** Ensayo adicional para el túnel de viento previo al montaje en el panel fotovoltaico con rotación en un eje con seguidor solar

| Código    | Descripción del ensayo  | Equipo/Instrumento utilizado                   |
|-----------|---|--|
| TQV-PF031 | Medir la temperatura sobre la placa negra enfriada por el ventilador en tres puntos diferentes.   | Pistola Láser                                  |
| TQV-PF032 | Por otra parte tomar datos de la temperatura ambiente, tipo de radiación, velocidad de viento a la salida del túnel y voltaje del panel fotovoltaico. | Termómetro Digital<br>Multímetro<br>Anemómetro |
| TQV-PF033 | Finalmente sobre una superficie negra sin ventilar tomar datos de temperatura   | Pistola Láser.                                 |

## 5.2. NORMATIVAS

### 5.2.1. ANTECEDENTES

En un proyecto de investigación como el presente, es necesario establecer ciertas normativas en cuanto se refiere a parámetros de prueba, observaciones

técnicas, aplicación y uso de instrumentos de medición que permitan explicar de mejor forma el propósito del documento para su debida aplicación experimental en los ensayos. Es por ello que se recurrió a la Norma INEN 17025 que detalla los requisitos generales para la competencia de laboratorios de calibración y ensayo. Ver ANEXO G.

### 5.2.2. OBJETO

La finalidad del documento es definir las diferentes condiciones de prueba en las cuales se llevarán a cabo las respectivas mediciones de los parámetros más importantes para dicha aplicación, así como de la correcta utilización de los equipos de trabajo aplicables en el Proyecto.

### 5.2.3. DEFINICIONES Y SIMBOLOGÍA

En la siguiente tabla se presentan todos los parámetros utilizados en los ensayos, así como los parámetros por calcular.

**Tabla 5.5** Simbología y unidades de parámetros a utilizar

| Símbolo              | Descripción  | Unidades            |
|----------------------|--|---------------------|
| A                    | Amperaje del panel fotovoltaico                        | [A]                 |
| V                    | Voltaje del panel fotovoltaico                         | [V]                 |
| E                    | Radiación solar  | [W/m <sup>2</sup> ] |
| P <sub>exp</sub>     | Potencia experimental                                  | [W]                 |
| P <sub>teórica</sub> | Potencia teórica                                       | [W]                 |
| T <sub>cnp</sub>     | Temperatura en condiciones normales de prueba          | [°C]                |
| T <sub>a</sub>       | Temperatura ambiente                                   | [°C]                |
| T <sub>i</sub>       | Temperatura en la cara interior del panel fotovoltaico | [°C]                |
| T <sub>sup</sub>     | Temperatura superior promedio                          | [°C]                |
| V <sub>s</sub>       | Velocidad de viento a la salida del sistema            | [m/s]               |
| η <sub>exp</sub>     | Rendimiento experimental del sistema                   | [%]                 |

## 5.2.4. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

A continuación se presentan un conjunto de los instrumentos y equipos ha utilizar en los ensayos, con sus respectivas unidades de medición, que constituyen el objeto del presente documento.

**Tabla 5.6** descripción y unidades de medida de equipos a utilizar

| <b>Código</b> | <b>Descripción</b> | <b>Clase</b>                              | <b>Unidades</b> |
|---------------|--------------------|---|-----------------|
| PFTV          | Panel fotovoltaico | Equipo emisor de corriente eléctrica      | SU              |
| PLSR          | Pistola láser      | Equipo de medición de temperatura         | [°C]            |
| MLT           | Multímetro         | Equipo de medición de voltaje – amperaje  | [V-A]           |
| ANM           | Anemómetro         | Equipo de medición de velocidad de viento | [m/s]           |
| TMP           | Termocupla         | Instrumento de medición de temperatura    | [°C]            |
| TDIG          | Termómetro digital | Instrumento de medición de Ta             | [°C]            |

### Descripción de Equipos

#### 1. Anemómetro

**Tabla 5.7** Especificaciones Técnicas del Anemómetro

|                                   |                           |   |
|-----------------------------------|---------------------------|---|
| <b>Fabricante:</b><br>EXTECH Inc. | <b>Modelo:</b><br>Q110978 | <b>Unidades de medida empleadas:</b><br>m/s, °C |
|-----------------------------------|---------------------------|---|

#### 2. Panel Fotovoltaico

**Tabla 5.8** Especificaciones Técnicas del Panel Fotovoltaico

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Fabricante:</b><br>ARCOSOLAR Inc.   | <b>Modelo:</b><br>M65                   | <b>Calibrado a:</b><br>1000 W/m <sup>2</sup>          |
| <b>Voltaje de Operación:</b><br>12.8 V | <b>Amperaje de Operación:</b><br>3.26 A | <b>Corriente de Corto Circuito:</b><br>3.68 A @ 47 °C |
| <b>Potencia:</b><br>43 W pico          | <b>Potencia Máxima:</b><br>41.7 W pico  | <b>Voltaje Máximo:</b><br>20 DC                       |

### 3. Pistola Láser

**Tabla 5.9** Especificaciones Técnicas de la Pistola Láser

| <b>Fabricante:</b> | <b>Modelo:</b> | <b>Unidades:</b> |
|--------------------|----------------|------------------|
| RAYTECH            | MX2            | °C               |

### 4. Termómetro Digital

**Tabla 5.10** Especificaciones Técnicas del Termómetro Digital

| <b>Fabricante:</b> | <b>Modelo:</b> | <b>Unidades:</b> |
|--------------------|----------------|------------------|
| DIGI-SENSE         | 91100-50       | °C               |

### 5. Multímetro Digital

**Tabla 5.11** Especificaciones Técnicas del Multímetro Digital

| <b>Fabricante:</b> | <b>Modelo:</b> | <b>Unidades:</b> |
|--------------------|----------------|------------------|
| Fluye              | DT-830B        | V, A             |

#### 5.2.5. REQUISITOS

Las características que deben reunir los equipos considerados en el Proyecto se presentan a continuación:

- Las corazas de vidrio debe estar completamente limpias en ambas caras y colocadas adecuadamente en el panel solar.
- Revisar las conexiones eléctricas propias del panel solar.
- Calibrar la pistola láser de acuerdo a los parámetros ambientales y a las unidades de medida que se pretende alcanzar.
- Calibrar el termómetro digital de acuerdo a las unidades de medida deseadas.
- Colocar correctamente el anemómetro en relación a la dirección de la corriente de viento.

- Certificar y registrar la salida de datos proporcionada por el panel solar.
- Realizar los cálculos necesarios de acuerdo a los parámetros registrados.

### **5.2.6. INSPECCIÓN**

Los ensayos se realizarán dentro del Campus de la Escuela Politécnica del Ejército, específicamente en la Facultad de Ingeniería Mecánica cada cinco minutos y bajo las condiciones ambientales presentes en ese momento, excepto en condiciones lluviosas.

### **5.2.7. MÉTODO DE ENSAYO**

A continuación se presentan todas las instrucciones concernientes al procedimiento que debe regirse para la verificación del cumplimiento de los ensayos:

- Conectar los equipos de medición necesarios para el ensayo (multímetro, termómetro digital).
- Establecer sobre el panel solar las zonas en las que se tomarán las medidas de temperatura (mínimo tres).
- Direccional perpendicularmente el panel con respecto al Sol fijándose que no se produzca sombra en el seguidor.
- Registrar los datos de las mediciones cada cinco minutos, condiciones como:
  - Temperatura ambiente
  - Voltaje de salida
  - Amperaje de salida
  - Temperaturas sobre la cara del panel
  - Temperatura en la cara interior del panel
  - Temperatura de salida de aire
  - Velocidad de salida de aire
- Tomar datos al menos por el lapso de una hora mínimo.
- Desconectar todos los equipos utilizados en el ensayo.



- Realizar los cálculos respectivos de radiación y rendimiento del panel de acuerdo a las expresiones propuestas.
- Graficar E vs V de acuerdo a los datos obtenidos.

### 5.2.8. CÁLCULOS

Cálculo de la temperatura superior promedio:

$$\bar{T}_{sup} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (5.1)$$

Cálculo de la radiación solar presente:

$$E = \frac{\bar{V} * \bar{A} * 1000}{P_{cnp}} \quad (5.2)$$

Cálculo de la potencia experimental:

$$P_{exp} = \bar{V} * \bar{A} \quad (5.3)$$

Cálculo del Rendimiento Nominal del Panel

$$\eta_{nom} = \frac{P_{fab}}{A * 1000} \quad (5.4)$$

Cálculo del Rendimiento del Panel

$$\eta = \eta_{nom} * [1 - 0.004(T_{panel} - 25)] \quad (5.5)$$

Cálculo de la Variación Porcentual de la Potencia del Panel:

$$\eta = \frac{P_{\text{teórica}} - P_{\text{exp}}}{P_{\text{teórica}}} * 100 \quad (5.6)$$

Ecuación para graficar E vs V

$$E = I_{sc} \left( 1 - e^{\frac{-e(V_{oc}-V)}{\sigma \cdot T_{cel}}} \right) \quad (5.7)$$

donde:  $\sigma$  es la constante de Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/W y  
e es la carga del electrón =  $1.60 \times 10^{-19}$  C

Para poder realizar esta práctica se realizó una guía que se detalla en el ANEXO K.

### 5.2.9. INFORME DE RESULTADOS

Una vez concluido el ensayo se deberán realizar los siguientes pasos:

- Comparar y analizar los resultados obtenidos de los parámetros tomados con respecto a los datos proporcionados por el fabricante.
- Describir claramente las conclusiones y recomendaciones de la práctica.
- Graficar la curva E vs V.

### 5.3. PÉRDIDA DE RENDIMIENTO

Los paneles fotovoltaicos presentan pérdidas en su rendimiento debido a varios factores provocando que éstas sean permanentes, extendidas y temporales.

#### a) Pérdidas Permanentes

Este tipo de pérdidas se producen por:

1. *Causas externas*, cuando los paneles sufren daños debido a su exposición a condiciones ambientales extremas o realizadas por terceras personas, y
2. *Causas internas*, debido a fallas en las conexiones de las células o paneles que generalmente ocurren debido a un pobre diseño de las interconexiones y errores térmicos en los materiales.

#### **b) Pérdidas Extendidas**

Las pérdidas extendidas se producen principalmente por la acumulación de suciedad sobre la superficie del panel que reduce la transmisión de luz a la célula.

#### **c) Pérdidas Temporales**

Generalmente este tipo de pérdidas son generadas por sombras producidas por algún elemento externo como árboles, edificios, etc.

Además de estos factores los paneles fotovoltaicos experimentan bajas en su rendimiento debido al lugar de en que se encuentran operando. La temperatura sobre el panel hace que el voltaje de circuito abierto disminuya considerablemente.

### **5.3.1 POSIBILIDAD DE MEJORAMIENTO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA**

Cuando se trata de pérdidas temporales y extendidas es muy fácil remediar la situación, simplemente se identifica el problema y se toma acciones pertinentes para solucionar el problema.

Controlar las pérdidas producto de la temperatura resulta más difícil ya que cada panel operará de manera diferente de acuerdo al lugar en que se ponga en operación. Es por ello que de alguna forma se pretende controlar este factor mediante un sistema de extracción de calor que permita al panel trabajar bajo mejores condiciones.

## 5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

Para poder realizar un correcto análisis comparativo de resultados se presenta los cuadros resumen de los datos tomados en campo durante los períodos de tiempo analizados.

**Tabla 5.12** Cuadro Resumen de Datos antes de Instalar el Sistema de Extracción de Calor

| <b>Irradiación<br/>(W/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Potencia<br/>(W)</b> | <b>Eficiencia<br/>(%)</b> | <b>Temp<br/>Panel ( C)</b> |
|--|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 604,62                                   | 26,00                   | 0,1256                    | 39,86                      |
| 718,47                                   | 30,89                   | 0,1215                    | 47,45                      |
| 827,77                                   | 35,59                   | 0,1183                    | 53,61                      |
| 453,59                                   | 19,50                   | 0,1263                    | 38,53                      |
| 778,26                                   | 33,46                   | 0,1201                    | 50,07                      |
| 852,27                                   | 36,65                   | 0,1189                    | 52,34                      |
| 1047,27                                  | 45,03                   | 0,1154                    | 58,92                      |
| 986,02                                   | 42,40                   | 0,1159                    | 57,94                      |
| 1097,11                                  | 47,18                   | 0,1136                    | 62,32                      |
| <b>822,34</b>                            | <b>35,19</b>            | <b>0,1195</b>             | <b>51,23</b>               |

**Tabla 5.13** Cuadro Resumen de Datos después de Instalar el Sistema de Extracción de Calor

| <b>Irradiación<br/>(W/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Potencia<br/>(W)</b> | <b>Eficiencia<br/>(%)</b> | <b>Temp<br/>Panel ( C)</b> |
|--|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 734,96                                   | 31,60                   | 0,1302                    | 31,28                      |
| 1028,80                                  | 44,24                   | 0,1282                    | 35,03                      |
| 874,55                                   | 37,61                   | 0,1283                    | 34,74                      |
| 915,31                                   | 39,36                   | 0,1281                    | 35,17                      |
| 882,29                                   | 37,94                   | 0,1283                    | 34,89                      |
| 851,43                                   | 36,61                   | 0,1287                    | 34,07                      |
| <b>881,22</b>                            | <b>37,89</b>            | <b>0,1286</b>             | <b>34,20</b>               |

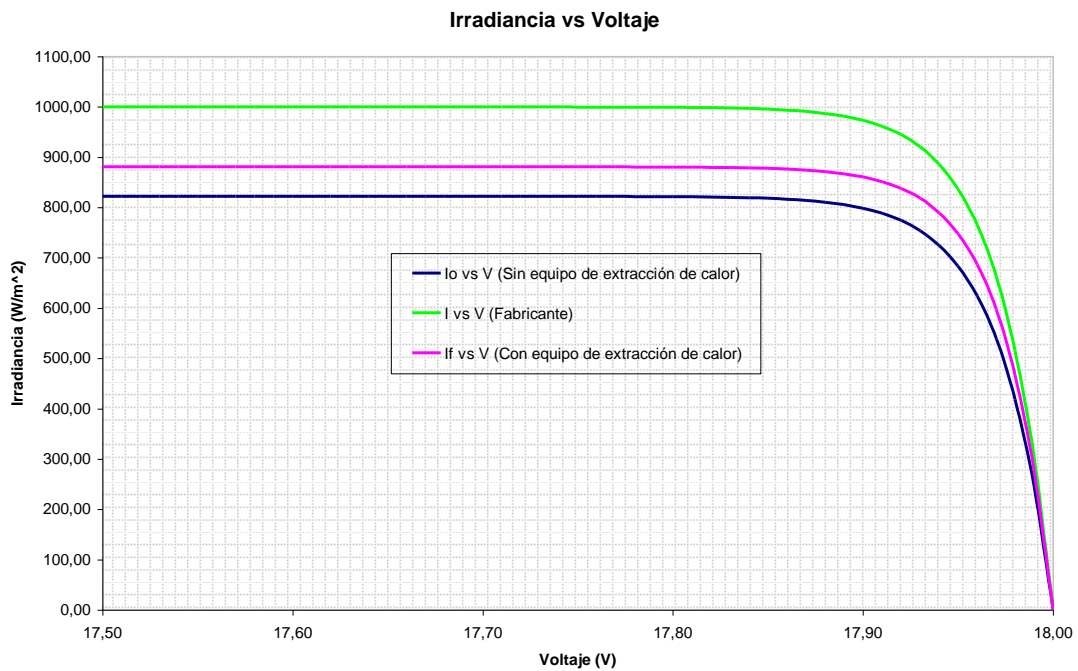
Con los promedios totales de todos los días en que se realizaron las mediciones se procede a la comparación y la determinación del porcentaje de incremento o decrecimiento de los valores medidos durante los ensayos.

**Tabla 5.14** Porcentaje de Variación de Resultados

| % DE VARIACIÓN    |        |
|-------------------|--------|
| Irradiación       | 6,68   |
| Potencia          | 7,13   |
| Eficiencia        | 7,07   |
| Temperatura Panel | -49,80 |

Para visualizar el comportamiento de los datos tomados se procede a representarlos gráficamente.

### 5.4.1. Irradiancia vs. Voltaje



**Figura 5.4.** Irradiancia vs. Voltaje

Para verificar efectivamente que la irradiación incidente sobre el panel ha aumentado, primero se grafica en color verde los parámetros sugeridos por el fabricante es decir para una irradiación de  $1000 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de

operación de 25 °C. Bajo estas condiciones el panel es capaz de generar una potencia máxima de 43 W.

Según el análisis de los datos previos al montaje del sistema de extracción se obtuvo una irradiancia de  $822.34 \text{ W/m}^2$  y una potencia máxima de 35.36 W representados en la gráfica de color azul, valores que representaban el comportamiento real del panel fotovoltaico.

Luego del diseño y montaje del equipo se logró obtener una irradiación de  $881.22 \text{ W/m}^2$  alcanzando así una potencia máxima de 37.89 W. Dando como consecuencia un incremento del 6.68% en la irradiancia captada por el panel, lo que permite incrementar el amperaje generado.

#### 5.4.2. Temperatura del Panel vs. Días de Prueba

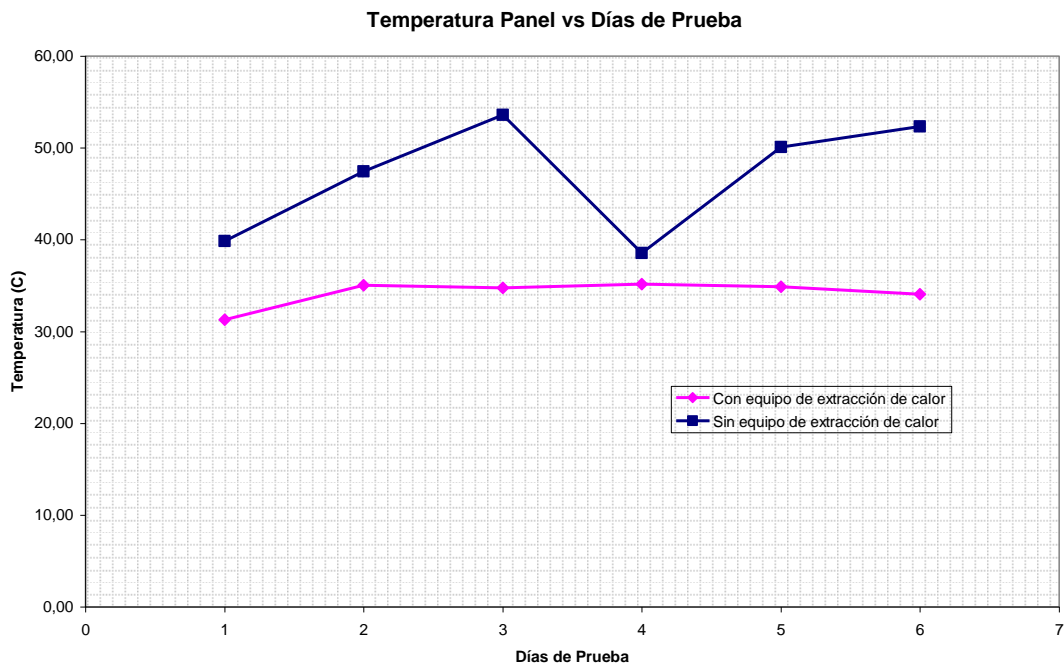


Figura 5.5. Temperatura del Panel vs. Días de Prueba

La temperatura del panel fotovoltaico antes de implementar el sistema de extracción de calor es evidentemente mucho mayor a la obtenida luego de

implementarlo. La gran variación que existió en la temperatura del panel al estar sin equipo se debió a que ésta era directamente proporcional a la radiación incidente en ese día específico

Entre las ventajas que se obtuvo de ésta experiencia una vez montado el sistema fue que la temperatura tendió a estabilizarse alrededor de 38 °C aproximadamente, lo que permitió tener un flujo de aire caliente a la salida con una temperatura constante que fue finalmente empleado en el sistema de secado adaptado como una aplicación práctica del mismo.

### 5.4.3. Potencia del Panel vs. Días de Prueba

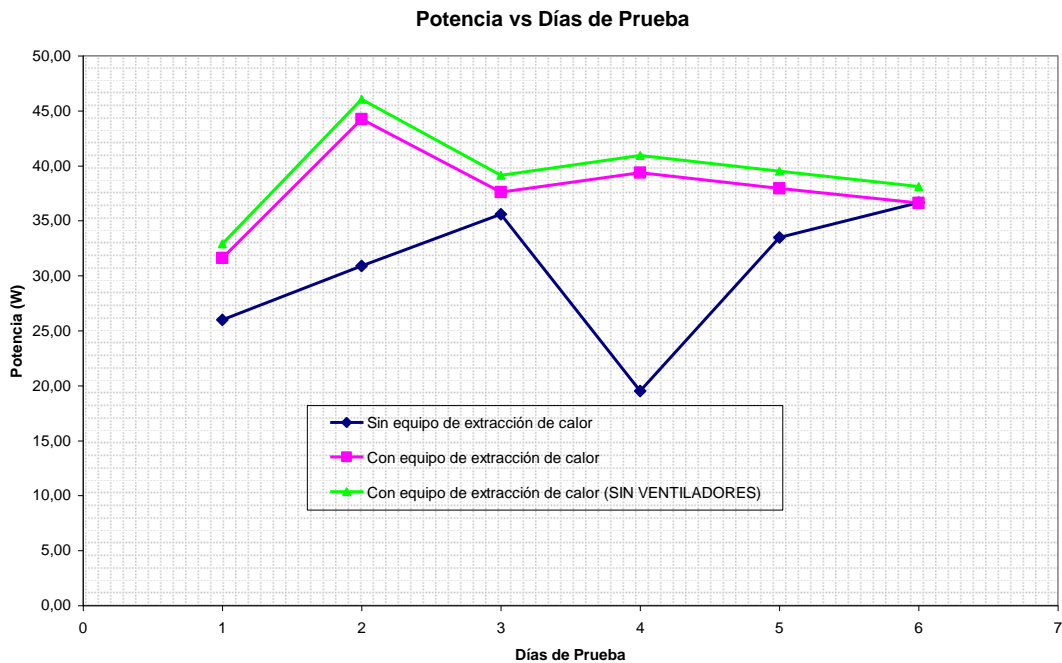


Figura 5.6. Potencia vs. Días de Prueba

Con el nuevo sistema de extracción adaptado al panel se comprobó que la potencia generada por el panel se eleva en un 7.13%, alcanzando una potencia de salida de 37.89 W respecto a los 35.19 W que inicialmente se obtuvo.

Cabe mencionar que el aumento de potencia podría ser un poco mayor al obtenido ya se debe tomar en cuenta que los ventiladores instalados en el

sistema emplean para su funcionamiento alrededor de 0.3 V cada uno. En este caso la potencia pudo alcanzar los 39.44 W, si no se los hubiera empleado.

Es decir, con un sistema alternativo de enfriamiento se obtendría mejores resultados de los ya calculados.

#### 5.4.4. Amperaje vs. Radiación Solar

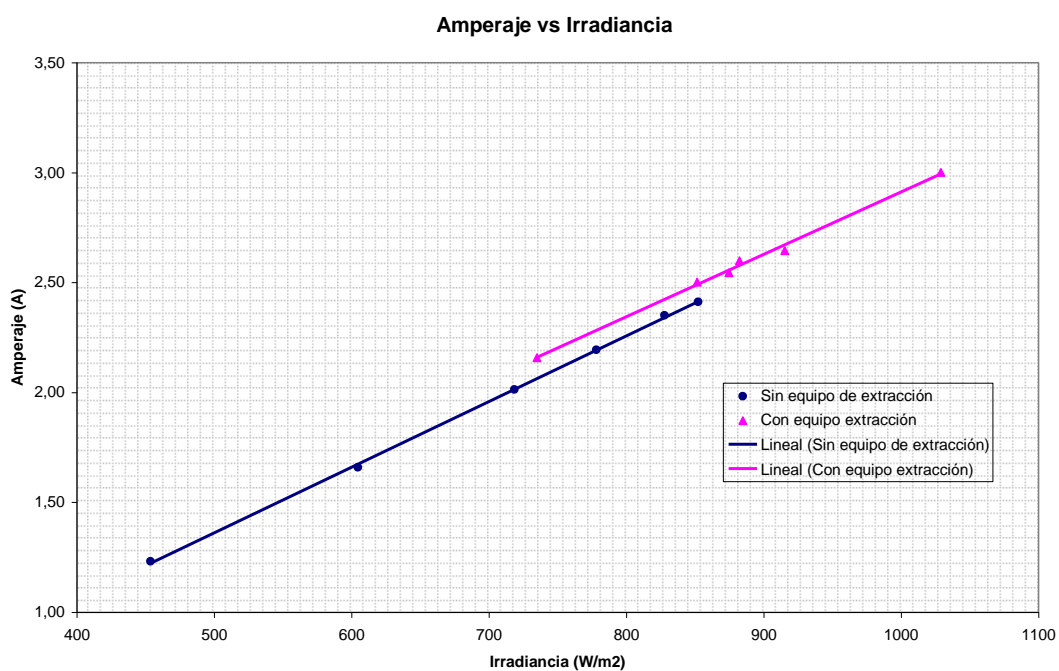


Figura 5.7 Amperaje vs. Irradiancia

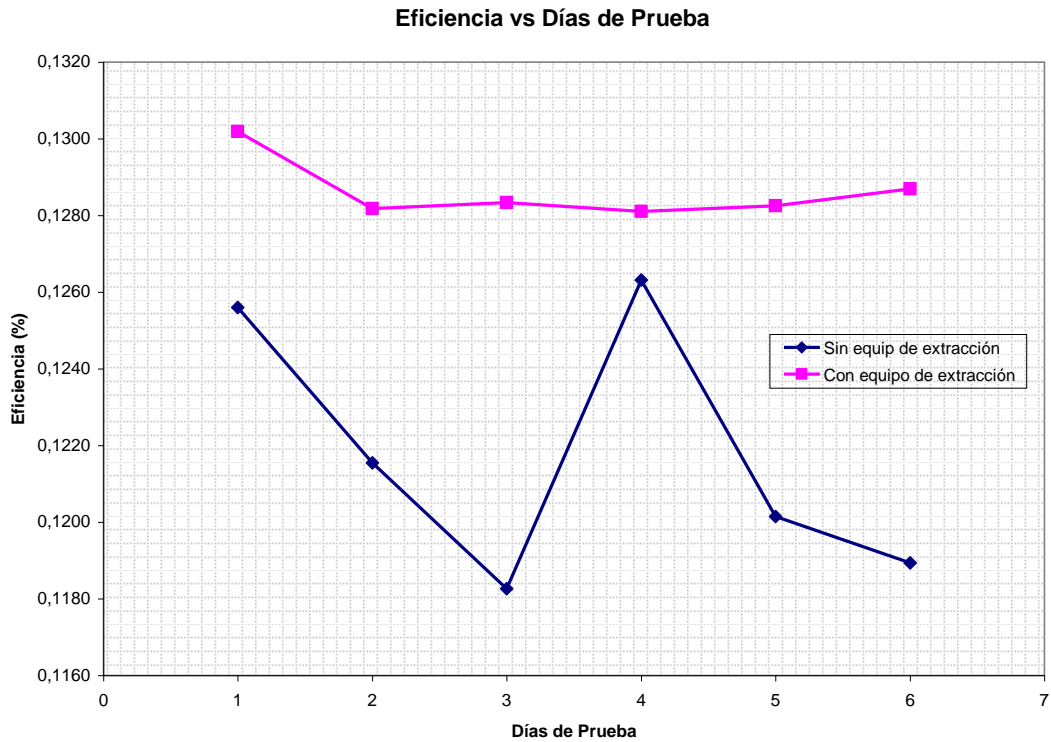
El amperaje que emite el equipo antes y después de instalar el sistema de extracción de calor es directamente proporcional a la irradiancia diaria absorbida, por lo que gracias al sistema que logró incrementar la irradiancia incidente sobre el panel también se consiguió elevar el amperaje en un 7.13% llevándolo de 2.32 A. a 2.57 A.

Es necesario mencionar que al analizar los datos de amperaje medidos en los días de prueba se observó que éstos tendían a estabilizarse y ya no variaban



tan drásticamente como lo hacían en un principio cuando el sistema aún no se encontraba montado.

#### 5.4.5. Eficiencia vs. Días de Prueba



**Figura 5.8** Eficiencia vs. Días de Prueba

Finalmente y como consecuencia al incremento de irradiación y amperaje que presentó el sistema se muestra que la eficiencia del panel también se incrementó en un 7.07%, es decir se logró subir de 11.95% a 12.86%.

Con esto queda demostrado que los sistemas fotovoltaicos trabajan mejor si la temperatura de operación es baja ya que se evitan pérdidas por el calor generado.

## CAPITULO 6

### ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

Es preciso señalar que para determinar si un proyecto se debe llevar a cabo o no, hay que realizar tanto un estudio económico como financiero a éste, para cuantificar por medio de índices económicos si el presupuesto destinado para tal fin resulta conveniente o no para la institución que demande tal proyecto.

Con todo esto, se realizó un análisis económico completo de todos los elementos constitutivos que hicieron posible la culminación del Proyecto, así como un control de personal destinado para dicho propósito.

#### 6.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para realizar el Análisis Económico se debe tomar en cuenta todos los costos de inversión del Proyecto, cuyos análisis se resumen a continuación:

##### 6.1.1. COSTO DE INVERSION DEL PROYECTO

Cuando se habla del Costo es necesario remitirse a las siguientes expresiones:

$$CP = MPD + MOD \quad (6.1)$$

donde:  $CP$  es el costo primo,  $MPD$  es la materia prima directa y  $MOD$  es la mano de obra directa

$$CT = CP + CIF + GA \quad (6.2)$$

donde: CT es el costo total, CP es el costo primo, CIF constituyen los costos indirectos de fabricación y GA son los gastos administrativos.

Aplicando estas expresiones al presente Proyecto se obtiene el siguiente cuadro resumen:

**Tabla 6.1** Cuadro Resumen de los Costos del Proyecto

| <b>HOJA DE COSTOS DEL PROYECTO</b>                   |                 |                    |               |
|--|-----------------|--------------------|---------------|
| <b>Parámetros</b>                                    | <b>No. Hoja</b> | <b>VALOR (USD)</b> | <b>(%)</b>    |
| Materia Prima Directa (MPD)                          | Hoja-1          | 358.96             | 4.31          |
| Mano de Obra Directa (MOD)                           | Hoja-2          | 60.25              | 0.72          |
| Costo Primo (CP)                                     |                 | 419.21             |               |
| C.I.F. Tiempo Útil Personal Intelectual              | Hoja-3          | 7,480.00           | 89.81         |
| C.I.F. Utilización Materiales, Herramienta y Equipos | Hoja-4          | 143.58             | 1.72          |
| Gastos Administrativos (GA)                          | Hoja-5          | 285.6              | 3.43          |
| Costo Total (CT)                                     | <b>TOTAL</b>    | <b>8,328.39</b>    | <b>100.00</b> |

Como se puede observar, en esta tabla se encuentra el resumen de costos de todos los factores incidentes en el Proyecto.

**En este cuadro que resume las tablas 2, 3, 4, 5 y 6 se evidencia que éste es un proyecto de carácter Científico en donde el aporte intelectual es del 89.81%, con respecto del Costo Total.**

Para el cálculo de los costos indirectos de fabricación, se tomará el valor correspondiente al 40% de la materia prima directa como un costo de arrendamiento de taller.

A continuación se detallan cada una de las tablas con el análisis los parámetros anteriormente mencionados:

**Tabla 6.2** Costo de materiales directos

**Hoja No. 1.- COSTO MATERIALES DIRECTOS**

| <b>ITEM</b> | <b>Descripción</b>                | <b>Referencia</b> | <b>Unidad de Medida</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio Unitario</b> | <b>Total</b> |
|-------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|--------------|
| A.1         | <b>Perfilería de Aluminio</b>     |                   |                         |                 |                        |              |
| A.1.1       | Tubo de aluminio de 3" x 1 ½"     | 1762              | 1 x 6m                  | 1               | 36.80                  | 36.80        |
| A.1.2       | Peinaso de aluminio (Inferior)    | 2233              | 1 x 6.40m               | 1               | 14.90                  | 14.90        |
| A.1.3       | Angulo de aluminio de 1/2" x 1/2" | 2407              | 1 x 6.40m               | 1               | 6.30                   | 6.30         |
| A.1.4       | Peinaso de aluminio (Superior)    | 1626              | 1 x 6.40m               | 1               | 15.90                  | 15.90        |
| A.1.5       | Perfil "T" de aluminio            | 1505              | 1 x 6.40m               | 1               | 10.20                  | 10.20        |
| A.1.6       | Revestimiento de Aluminio         | 1424              | 1 x 6m                  | 1               | 16.80                  | 16.80        |
| A.2         | <b>Vidrios</b>                    |                   |                         |                 |                        |              |
| A.2.1       | Vidrio de 4 mm flotado claro      | 34x113            | cm <sup>2</sup>         | 2               | 7.03                   | 14.06        |
| A.2.2       | Vidrio de 4 mm flotado claro      | 9.5x113           | cm <sup>2</sup>         | 4               | 3.03                   | 12.12        |
| A.2.3       | Vidrio de 4 mm flotado claro      | 9.5x34            | cm <sup>2</sup>         | 2               | 1.08                   | 2.16         |
| A.2.4       | Vidrio de 4 mm flotado claro      | 5x33              | cm <sup>2</sup>         | 2               | 0.83                   | 1.66         |
| A.2.5       | Vidrio de 4 mm flotado claro      | 2.8x33            | cm <sup>2</sup>         | 2               | 0.67                   | 1.34         |
| A.2.6       | Vidrio de 6 mm flotado claro      | 9x34              | cm <sup>2</sup>         | 2               | 2.09                   | 4.18         |
| A.3         | <b>Pernos</b>                     |                   |                         |                 |                        |              |
| A.3.1       | Perno colepato milimétrico        | 3/16"x3/8"        | caja                    | 1               | 4.60                   | 4.60         |

|       |                               |            |                |     |              |               |
|-------|-------------------------------|------------|----------------|-----|--------------|---------------|
| A.3.2 | Perno colepato milimétrico    | 1/4"x3/8"  | caja           | 1   | 5.30         | 5.30          |
| A.4   | <b>Tornillos</b>              |            |                |     |              |               |
| A.4.1 | Tornillo colepato galvanizado | 1x8        | caja           | 1   | 4.50         | 4.50          |
| A.4.2 | Tornillo colepato galvanizado | 3/4x8      | caja           | 1   | 4.20         | 4.20          |
| A.5   | <b>Remaches</b>               |            |                |     |              |               |
| A.5.1 | Remache negro                 | 1/2"x 1/8" | u              | 100 | 4.90         | 4.90          |
| A.6   | <b>Ventiladores</b>           |            |                |     |              |               |
| A.6.1 | Ventilador                    | 12 voltios | u              | 6   | 3.00         | 18.00         |
| A.7   | <b>Cable</b>                  |            |                |     |              |               |
| A.7.1 | Cable parlante                |            | m              | 7   | 0.12         | 0.84          |
| A.8   | <b>Switch</b>                 |            |                |     |              |               |
| A.8.1 | Switch negros 2 patas         |            | u              | 6   | 0.50         | 3.00          |
| A.9   | <b>CÁMARA DE SECADO</b>       |            |                |     |              |               |
| A.9.1 | Plancha de acero inoxidable   | 1.5 mm     | u              | 1   | 150.00       | 150.00        |
| A.9.2 | Ducto de Aluminio             | 4"         | u              | 1   | 7.20         | 7.20          |
| A.9.3 | Lana de Vidrio                | s.r.       | m <sup>2</sup> | 2   | 10.00        | 20.00         |
|       |                               |            |                |     |              |               |
|       |                               |            |                |     |              |               |
|       |                               |            |                |     | <b>TOTAL</b> | <b>358.96</b> |

**Tabla 6.3** Costo de la Mano de Obra Directa

**Hoja 2.- COSTO MANO DE OBRA  
DIRECTA**

| <b>PERSONAL</b>              | <b>Salario Unificado</b> | <b>Aporte IESS 20.5%</b> | <b>Total</b> | <b>Horas Efectivas de Trabajo</b> | <b>Costo de Hora Hombre</b> | <b>Tiempo Utilizado (Horas)</b> | <b>Total M.O.D.</b> |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Artesano - Maestro de Taller | 85.00                    | 17.43                    | 102.43       | 160                               | 0.64                        | 50                              | 32.01               |
| Auxiliar Aprendiz            | 75.00                    | 15.38                    | 90.38        | 160                               | 0.56                        | 50                              | 28.24               |
|                              |                          |                          |              |                                   |                             |                                 |                     |
|                              |                          |                          |              |                                   |                             | <b>TOTAL</b>                    | <b>60.25</b>        |

**Tabla 6.4** Costo Indirectos (Personal Intelectual)

**Hoja 3. COSTOS INDIRECTOS**

| <b>Costo de Personal Intelectual (indirecto)</b> |                    |                             |                                      |                  |                         |                              |              |
|--|--------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------|------------------------------|--------------|
| <b>Reporte de Horas Asignadas al Proyecto</b>    |                    |                             |                                      |                  |                         |                              |              |
|  |                    | <b>Oct-05</b>               | <b>Nov-05</b>                        | <b>Dic-05</b>    | <b>Ene-06</b>           | <b>Feb-06</b>                | <b>Total</b> |
| Director   | Ing. José Guasumba | 10                          | 20                                   | 15               | 20                      | 15                           | 80           |
| Codirector                                       | Ing. Ernesto Soria | 10                          | 20                                   | 15               | 20                      | 15                           | 80           |
| Supervisión ( Responsables )                     |                    |                             |                                      |                  |                         |                              |              |
| Sup.1  | Srta. Ana Villena  | 60                          | 120                                  | 90               | 120                     | 90                           | 480          |
| Sup.2  | Sr. Paúl Quispe    | 60                          | 120                                  | 90               | 120                     | 90                           | 480          |
| <b>Costo de Horas Asignadas al Proyecto</b>      |                    |                             |                                      |                  |                         |                              |              |
| <b>Dirección:</b>                                | <b>Personal</b>    | <b>Valor hora Honorario</b> | <b>Tiempo Utilizado Real (Horas)</b> | <b>Sub-Total</b> | <b>Costo mantención</b> | <b>Costo de Movilización</b> | <b>Total</b> |
| Director   | Ing. José Guasumba | 15.00                       | 80                                   | 1,200.00         |                         |                              | 1,200.00     |
| Codirector                                       | Ing. Ernesto Soria | 15.00                       | 80                                   | 1,200.00         |                         |                              | 1,200.00     |
| Supervisión ( Responsables )                     |                    |                             |                                      |                  |                         |                              |              |
| Sup.1  | Srta. Ana Villena  | 5.00                        | 480                                  | 2,400.00         | 80.00                   | 80.00                        | 2,560.00     |





**Tabla 6.5** Costos Indirectos (materiales)

**Hoja 4. COSTOS INDIRECTOS**

Utilización de Materiales, Herramientas y Maquinarias

COSTO ARRENDAMIENTO = 40% DE LA M.P.D.

| <b>B.-Detalle del Material Indirecto</b> |                                   |       |   |
|--|-----------------------------------|-------|---|
| B.1                                      | Brocas                            |       |   |
| B.1.1                                    | Broca                             | 3/8"  | u |
| B.1.2                                    | Broca                             | 1/4"  | u |
| B.1.3                                    | Broca                             | 3/16" | u |
| B.1.4                                    | Broca                             | 5/32" | u |
| B.1.5                                    | Broca                             | 9/64" | u |
| B.1.6                                    | Broca                             | 1/8"  | u |
| B.2                                      | Silicón                           |       |   |
| B.2.1                                    | Tubo de silicón de temperatura    | s/r   | u |
| B.2.2                                    | Tubo de silicón impermeabilizante | s/r   | u |
| B.3                                      | Suelda                            | s/r   | u |
| B.3.1                                    | Suelda de estaño                  | s/r   | m |
| B.4                                      | Varios                            |       |   |
| B.4.1                                    | Taipe                             | s/r   | u |
| B.4.2                                    | Batería 9 voltios                 | s/r   | u |
| B.4.3                                    | Juego de pilas                    | AA    | u |
| B.4.4                                    | Tarro de pintura negro mate       |       | u |
|  |                                   |       |   |
| <b>C.-Herramientas (Fungibles)</b>       |                                   |       |   |
| C.01                                     | Machuelo                          | 1/4"  | u |
| C.02                                     | Machuelo                          | 3/16" | u |
| C.03                                     | Compás metálico                   | s/r   | u |
| C.04                                     | Escuadra recta                    | s/r   | u |
| C.05                                     | Escuadra falsa                    | s/r   | u |
| C.06                                     | Tupi                              | s/r   | u |
| C.07                                     | Juego de destornilladores         | s/r   | u |
| C.08                                     | Llave de boca y corona            | 13mm  | u |
| C.09                                     | Llave de boca y corona            | 14mm  | u |
| C.10                                     | Llave Exagonal                    | 8mm   | u |
| C.11                                     | Cortadores de vidrio              | s/r   | u |
| C.12                                     | Lápices de Vidrio                 | s/r   | u |
| C.13                                     | Formones para destajes            | s/r   | u |
| C.14                                     | Playo                             | s/r   | u |
| C.15                                     | Flexómetro                        | s/r   | u |
| C.16                                     | Cortafrío                         | s/r   | u |
| C.17                                     | Cuchilla                          | s/r   | u |
| C.18                                     | Sierra de mano                    | s/r   | u |
| C.19                                     | Lima rectangular                  | s/r   | u |
| C.20                                     | Lima fina                         | s/r   | u |

|                                 |                       |     |   |
|---------------------------------|-----------------------|-----|---|
| <b>D.- Maquinaria y Equipos</b> |                       |     |   |
| D.01                            | Cortadora de Aluminio | s/r | u |
| D.02                            | Caladora              | s/r | u |
| D.03                            | Taladro               | s/r | u |
| D.04                            | Armador Eléctrico     | s/r | u |
| D.05                            | Cautín                | s/r | u |

**Tabla 6.6** Gastos Administrativos

### Hoja 5. GASTOS ADMINISTRATIVOS

Suministros de Oficina

| Descripción                    | Cantidad | Costo Unitario      | Sub-total | Total        |
|--------------------------------|----------|---------------------|-----------|--------------|
| Resma de papel Bond 70 Gr. A-4 | 4        | 3.80                | 15.20     |              |
| Tinta de impresora             | 2        | 33.00               | 66.00     |              |
| Copias                         | 1000     | 0.025               | 25.00     |              |
| Caja de CD                     | 1        | 9.00                | 9.00      | 115.20       |
|                                |          |                     |           |              |
|                                |          |                     |           |              |
| <b>SERVICIOS</b>               |          |                     |           |              |
| Descripción del Servicio       | # meses  | Costo Mensual       | Total     |              |
| Teléfono                       | 5        | 10.00               | 50.00     |              |
| Internet                       | 5        | 15.68               | 78.40     |              |
| Seguro de Computadora          | 8        | 5.25                | 42.00     | 170.40       |
|                                |          |                     |           |              |
|                                |          | <b>Total Gastos</b> |           | <b>285.6</b> |

## **6.2. ANÁLISIS FINANCIERO**

Si bien los parámetros económicos anteriormente calculados permiten conocer el valor real del costo del Proyecto, es necesario conocer si el mismo puede dar una rentabilidad a corto, mediano o largo plazo.

Para esto se debe tomar en cuenta los índices financieros como son:

- Tasa Interna de Retorno (TIR)
  
- Valor Actual Neto (VAN)

### **6.2.1. INDICES FINANCIEROS**

Ya que el objetivo principal de este proyecto tiene relación con una investigación científica en donde el único beneficiario será la Escuela Politécnica del Ejército y particularmente la Facultad de Ingeniería Mecánica, es muy difícil precisar un valor de rentabilidad en monto.

Si se pretende comercializar el Proyecto y obtener de él una rentabilidad, se lo puede realizar con la venta de un ejemplar a Instituciones y Laboratorios Educativos de Nivel Superior; de igual forma, para que se utilice la energía resultante para su implementación o estudio en cualquier actividad industrial, esto llevaría a obtener una recuperación de la inversión a corto plazo. Con este antecedente, únicamente se nombrarán estos índices financieros en función de la importancia en el presente trabajo.

La Tasa Interna de Retorno (TIR), devuelve el monto de una inversión para una serie de valores en efectivo y representa el porcentaje de ganancia que genera el proyecto en un lapso de tiempo determinado. Para esto, es necesario realizar un flujo de caja completo que permita su determinación

Por otra parte, el Valor Actual Neto (VAN), devuelve el valor actual de una inversión a partir de una tasa de descuento y una serie de pagos futuros (valores negativos) y entradas (valores positivos). Se enfoca en traer a valor presente

todos los flujos que se han calculado dentro de los próximos diez años, y si dicho valor supera al monto utilizado en la inversión, el Proyecto es considerado como rentable.

Si el presente trabajo es utilizado como una venta de ideas, se espera que su inversión sea cubierta a corto plazo. En este caso se lo ha considerado como un aporte social en donde los directos beneficiarios serán los alumnos de la FIME, ya que en él encontrarán una herramienta práctica de estudio y formación científica.

Como ejemplo práctico se calculará el TIR y el VAN para el caso de producción y venta de varios equipos similares.

Para este ejemplo práctico se considera que el proyecto se lo desarrollará en un período de 5 años. En base a lo analizado previamente se podría estimar un precio inicial de 4000 usd, por unidad, durante la el primer año se planea construir alrededor de 20 unidades e invertir un capital inicial de 30000 usd.

A continuación se detalla los costos asociados a la fabricación de los sistemas de extracción de calor y secadora solar.

**Tabla 6.7** Costo de Fabricación

| <b>COSTOS DE PRODUCCIÓN</b>   |                          |                  |
|-------------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>Costos Directos</b>        |                          |                  |
| <b>ITEM</b>                   | <b>DESCRIPCION</b>       | <b>VALOR</b>     |
| E.1                           | Panel Fotovoltaico       | 1040             |
| E.2                           | Estructura metálica      | 200              |
| E.3                           | Seguimiento              |                  |
| E.3.1                         | Regulador                | 80               |
| E.3.2                         | Batería                  | 40               |
| E.3.3                         | Inversor                 | 150              |
| E.3.4                         | Fotocélulas              | 30               |
| E.3.5                         | Caja de control          | 350              |
| E.4                           | Coraza de vidrio         | 300              |
| E.5                           | Cámara de secado         | 800              |
| <b>ST1</b>                    |                          | <b>59800</b>     |
| <b>Costos Indirectos</b>      |                          |                  |
| E.6                           | Instrumentos de Limpieza | 100              |
| <b>ST2</b>                    |                          | <b>100</b>       |
| <b>Mano Obra Directa</b>      |                          |                  |
| E.7                           | Maestro Artesano         | 2400             |
| E.8                           | Ayudante                 | 1200             |
| <b>ST3</b>                    |                          | <b>3600</b>      |
| <b>Mano de Obra Indirecta</b> |                          |                  |
| E.9                           | Limpieza                 | 1.723,01         |
| <b>TOTAL</b>                  |                          | <b>65.123,01</b> |

**Tabla 6.8** Costo de Fabricación

| <b>COSTOS ADMINISTRATIVOS</b> |                    |               |
|-------------------------------|--------------------|---------------|
| <b>ITEM</b>                   | <b>DESCRIPCION</b> | <b>VALOR</b>  |
| E.10                          | GAF                | 285,6         |
| E.11                          | Sueldo             | 2160          |
| <b>TOTAL</b>                  |                    | <b>2445,6</b> |

Para completar la inversión inicial de 30000 usd, se requerirá hacer un préstamo al banco, a continuación se detalla los períodos y costos financieros.

**Tabla 6.9** Costo de Financiero

| <b>COSTOS FINANCIERO</b> |                    |              |
|--------------------------|--------------------|--------------|
| <b>ITEM</b>              | <b>DESCRIPCION</b> | <b>VALOR</b> |
| E.11                     | Capital            | 20000        |
| E.12                     | Préstamo           | 10000        |
| <b>TOTAL</b>             |                    | <b>30000</b> |

**Tabla 6.9** Costo de Financiero

| <b>PERIODOS</b> | <b>DEUDA</b> | <b>INTERES</b> | <b>COUTA</b> | <b>CAPITAL</b> |
|-----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 1               | 10000        | 730            | 2117,43      | 1387,43        |
| 2               | 8612,57      | 628,72         | 2117,43      | 1488,71        |
| 3               | 7123,86      | 520,04         | 2117,43      | 1597,38        |
| 4               | 5526,48      | 403,43         | 2117,43      | 1713,99        |
| 5               | 3812,49      | 278,31         | 2117,43      | 1839,12        |
| 6               | 1973,37      | 144,06         | 2117,43      | 1973,37        |

Para determinar el costo total, se suma los costos parciales.



**Tabla 6.10** Flujo Neto de Fondos

| <b>AÑOS<br/>RUBROS</b>                                    | <b>0</b>      | <b>1</b>         | <b>2</b>         | <b>3</b>         | <b>4</b>         | <b>5</b>         |
|---|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>+ Ingresos</b>   |               | <b>80000</b>     | <b>100000</b>    | <b>100000</b>    | <b>120000</b>    | <b>100000</b>    |
| <b>- Egresos</b>  |               | <b>69.127,33</b> | <b>83.742,08</b> | <b>83.240,98</b> | <b>97.818,61</b> | <b>82.818,61</b> |
| Costos de<br>Producción                                   |               | 65.123,01        | 80.073,01        | 80.073,01        | 95.023,01        | 80.073,01        |
| Costos<br>Administrativos                                 |               | 2445,6           | 2445,6           | 2445,6           | 2445,6           | 2445,6           |
| Costos<br>Financieros                                     |               | 1358,72          | 923,48           | 422,37           | 0                | 0                |
| Otros Costos  |               | 200              | 300              | 300              | 350              | 300              |
| <b>= Utilidad<br/>Bruta</b>                               |               | <b>10.872,67</b> | <b>16.257,92</b> | <b>16.759,02</b> | <b>22.181,39</b> | <b>17.181,39</b> |
| <b>-</b> 15%  |               | 1.630,90         | 2.438,69         | 2.513,85         | 3.327,21         | 2.577,21         |
| <b>= Utilidad<br/>antes IR</b>                            |               | <b>9.241,77</b>  | <b>13.819,23</b> | <b>14.245,17</b> | <b>18.854,18</b> | <b>14.604,18</b> |
| <b>-</b> -25%   |               | 2.310,44         | 3.454,81         | 3.561,29         | 4.713,55         | 3.651,05         |
| <b>= Utilidad Neta<br/>- Inversión<br/>+ Depreciación</b> | 30000         | <b>6.931,33</b>  | <b>10.364,42</b> | <b>10.683,88</b> | <b>14.140,64</b> | <b>10.953,14</b> |
|   |               | 3300             | 3300             | 3300             | 3300             | 3300             |
| <b>FNF</b>  | <b>-30000</b> | <b>10.231,33</b> | <b>13.664,42</b> | <b>13.983,88</b> | <b>17.440,64</b> | <b>14.253,14</b> |





## Calculo del VAN

Para determinar el VAN se encontró un TMAR respecto a la media ponderada del capital y el préstamo efectuados.

**Tabla 6.11** Determinación del TMAR

|              | <b>EFFECTIVO</b> | <b>%</b> | <b>INTERES</b> | <b>i</b>    |
|--------------|------------------|----------|----------------|-------------|
| CAPITAL      | 20000            | 0,67     | 10             | 6,7         |
| PRESTAMO     | 10000            | 0,33     | 14,6           | 4,9         |
| <b>Total</b> | <b>30000</b>     |          | <b>SUMA</b>    | <b>11,5</b> |

**Tabla 6.12** Determinación del VAN

| <b>AÑOS</b> | <b>FNF</b> | <b>VAN</b>       | <b>VAN</b>      |
|-------------|------------|------------------|-----------------|
|             |            | <b>I = 11,15</b> | <b>I = 35</b>   |
| 0           | -30000     | -30000           | -30000          |
| 1           | 10.231,33  | 9173,33811       | 7578,76279      |
| 2           | 13.664,42  | 10984,5407       | 7497,62525      |
| 3           | 13.983,88  | 10078,9104       | 5683,63688      |
| 4           | 17.440,64  | 11270,5115       | 5250,82179      |
| 5           | 14.253,14  | 8258,23167       | 3178,64209      |
|             |            | 19765,5323       | -<br>810,511197 |

## Determinación del TIR

Para determinar el TIR se busca un valor de  $i$  para que el VAN sea 0, para esto se interpola entre el valor positivo y negativo.

$$vp := 19765.53 \quad ip := 11.5$$

$$v := 0$$

$$vn := -810.51 \quad in := 35$$

Given

$$\frac{i - ip}{in - i} = \frac{v - vp}{vn - v}$$

$$\text{Find}(i) \rightarrow 34.074312404136072830$$

Por lo tanto el TIR = 34.074

### Determinación del Período de Recuperación

**Tabla 6.13** Determinación del Período de Recuperación

| PERIODO DE RECUPERACIÓN |            |                 |
|-------------------------|------------|-----------------|
| AÑOS                    | FNF        | VALOR ACUMULADO |
| 0                       | -30000     | -30000          |
| 1                       | 10.231,33  | -19.768,67      |
| 2                       | 13664,422  | -6.104,25       |
| 3                       | 13.983,88  | 7.879,63        |
| 4                       | 17440,6374 | 25.320,27       |
| 5                       | 14.253,14  | 39.573,40       |

La inversión se recupera entre el segundo y tercer año.

### Determinación del Punto de Equilibrio

Aproximadamente el 70% del costo total pertenece a fijos, el restante es de variables, por lo tanto se tiene que:

$$CT = 69127.33$$

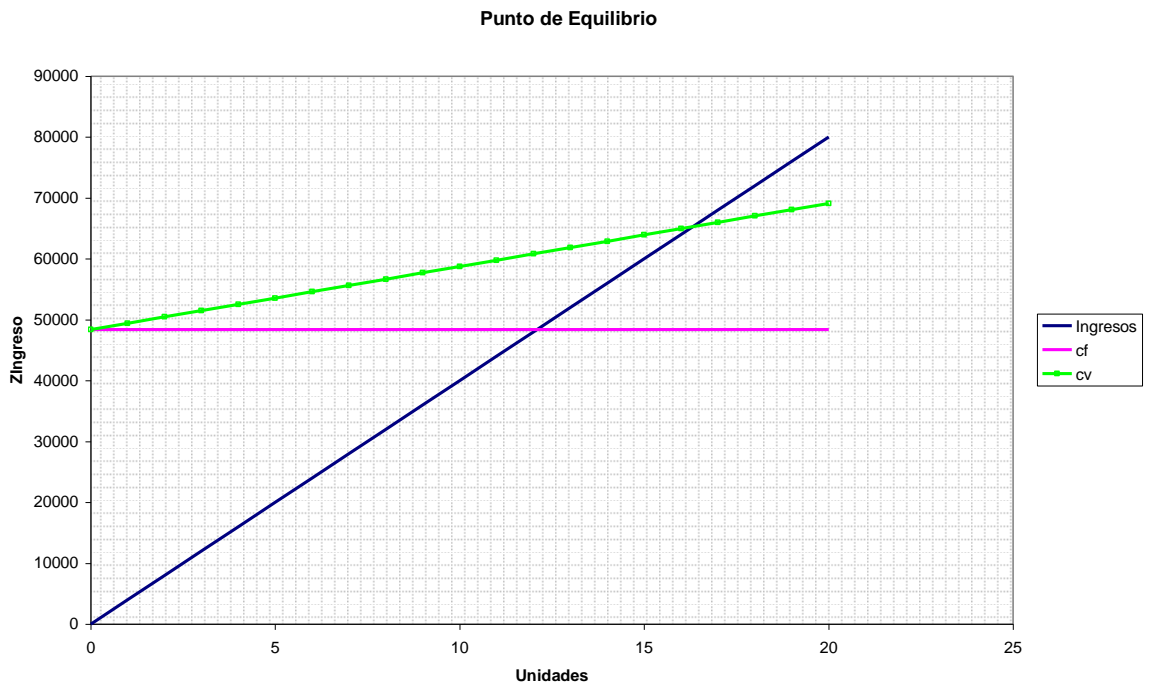
$$CF = 0.7 \times 69127.33$$

$$CF = 48389.13$$

$$cv = 1036.91$$

$$PE := \frac{CF}{1 - \frac{CV}{IT}}$$

$$PE = 65322.525$$



**Figura 6.1** Punto de Equilibrio

Los valores tanto del VAN como del TIR son aceptables y se encuentran dentro de los parámetros normales para este tipo de proyectos.

# CAPITULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

1. En la actualidad, los paneles fotovoltaicos a pesar de ser una gran alternativa de generación eléctrica, presentan aún bajas eficiencias debido a varios factores que van desde su fabricación hasta su operación y que deben ser investigados para buscar soluciones y alcanzar su máximo rendimiento.
2. El efecto que se tiene al elevar la temperatura del panel es de incrementar la corriente de corto circuito en 0.1% y disminuir el voltaje de circuito abierto en 0.3% por cada grado que éste aumenta.
3. Gracias al diseño y construcción del sistema de extracción de energía térmica, se logró comprobar que los sistemas fotovoltaicos trabajan en forma directamente proporcional a la cantidad de luz emitida e inversamente proporcional al calor incidente sobre estos.
4. En base a los datos analizados se comprobó que la radiación aumentó en un 7.13%, consecuencia de esta captación la potencia del panel aumentó en un 7.63% y por lo tanto, el rendimiento del mismo también se elevó en un 7.61%. Cabe mencionar que este modelo utilizó exclusivamente la energía emitida por el panel por lo que los incrementos pudieran llegar a ser mayores si se hubiera empleado otro sistema de enfriamiento accionado por fuentes externas.
5. Con el incremento del rendimiento en el panel solar gracias al diseño y montaje del extractor de calor, se logró alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, además que se le dio un valor agregado al

aprovechar el calor extraído en una aplicación útil como es el secado de productos.

6. Este tipo de investigaciones sirve para contribuir al desarrollo de nuevas fuentes energéticas como son las renovables, que son indispensables para la preservación del medio ambiente explotando nuevos recursos antes no aprovechados como son: el Sol, el viento.
7. Por ser este proyecto de carácter científico, donde el objetivo principal es demostrar una teoría no se puede calcular el VAN y el TIR, ya que la inversión hecha en el proyecto no se compara con el beneficio intelectual que este representa, ya que la rentabilidad del mismo es inmediata en el momento que se demostró esta hipótesis.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

1. Dar mayor importancia a los recursos energéticos renovables, ya que el futuro se encuentra encaminado hacia la correcta aplicación y preservación del medio ambiente y el aprovechamiento de sus recursos.
2. Para obtener resultados más reales se debe tomar datos en intervalos de tiempo lo más cortos posible y por períodos de al menos seis horas bajo condiciones ambientales favorables.
3. Procurar que tanto la superficie del panel como de la cubierta se encuentren libres de suciedad y proyección de sombra para evitar la mala captación de luz y permitir que el panel trabaje a su máxima capacidad.

4. Tener un especial cuidado con el equipo de prueba y con los instrumentos de medición, por tratarse de aparatos sensibles y extremadamente costosos.
  
5. Si se pretende comercializar el proyecto y obtener de él una rentabilidad con la venta de un ejemplar a instituciones afines o en el uso de su energía resultante se puede estimar valores de TIR y VAN aproximados llegando a obtener una recuperación de la inversión a corto plazo.