

**APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS TECNOLÓGICOS DE CONVERSIÓN DE
ENERGÍA SOLAR**

JONATHAN FELIPE CASTRO ROJAS

WILSON FRANCISCO RODRÍGUEZ SERREZUELA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE EDUCACIÓN

LICENCIATURA EN EDUCACIÓN BÁSICA CON ÉNFASIS

EN CIENCIAS NATURALES Y EDUCACIÓN AMBIENTAL

NEIVA

2010

**APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS TECNOLÓGICOS DE CONVERSIÓN DE
ENERGÍA SOLAR**

JONATHAN FELIPE CASTRO ROJAS

WILSON FRANCISCO RODRÍGUEZ SERREZUELA

**Director
JUSTO PASTOR VALCÁRCEL MONTAÑEZ
Doctor en Ciencias**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Licenciado en Educación Básica con Énfasis
en Ciencias Naturales y Educación Ambiental**

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE EDUCACIÓN

LICENCIATURA EN EDUCACIÓN BÁSICA CON ÉNFASIS

EN CIENCIAS NATURALES Y EDUCACIÓN AMBIENTAL

NEIVA

2010

Firma del Jefe de Programa

Firma del jurado

Firma del Jurado

Firma del Director

Neiva, Septiembre de 2010

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos a:

Justo Pastor Valcárcel Montañez, Dr. en Ciencias, profesor de la Universidad Surcolombiana, por sus aportes y dirección en la formación académica, durante nuestra carrera profesional.

Lic. Bleyner Solano Nández, por la gestión y apoyo administrativo y académico con CENSOLAR, y su asesoría para llevar a cabo la realización del proyecto.

Pedro Luis García Reyes, auxiliar del Laboratorio de Física de la USCO, por su colaboración, facilitándonos nuestro trabajo en el laboratorio.

A nuestras familias, por su apoyo y entrega incondicional durante el desarrollo de nuestra carrera, como Licenciados.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. JUSTIFICACIÓN	17
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROGRAMA EN CIENCIAS NATURALES Y EDUCACIÓN AMBIENTAL	18
3. OBJETIVOS	22
3.1 GENERAL	22
3.2 ESPECÍFICOS	22
4. HIPÓTESIS	23
5. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	24
6. IMPACTO	25
7. ANTECEDENTES	26
8. MARCO DE REFERENCIA	27
8.1 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA SOLAR	27
8.2 JUSTIFICACIÓN AL ESTUDIO DE LA ENERGÍA SOLAR	28
8.3 PANORAMA GENERAL DE LA ENERGÍA	31
8.4 IMPORTANCIA DE LA SOSTENIBILIDAD	32
8.5 ENERGÍA, SOSTENIBILIDAD Y SU FUTURO	34
8.6 SITUACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES	37
8.7 ATENUACIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES	38
8.8 ENERGÍA PARA EL MUNDO	39
8.9 LA ENERGÍA DEL SOL	41
8.9.1 La geometría Tierra-Sol	41
8.9.2 Movimientos de la Tierra	42
8.9.3 Trayectoria aparente del Sol	42
8.9.4 Posición del Sol	44
8.9.5 Geometría del movimiento del Sol	45

8.10	LA NATURALEZA DE LA ENERGÍA SOLAR	47
8.11	LA MEDICIÓN DE LA ENERGÍA DE SOL: LA CONSTANTE SOLAR	50
8.12	LA RADIACIÓN NORMAL EXTRATERRESTRE	52
8.13	DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR	53
8.14	VARIACIÓN DEL FLUJO DE ENERGÍA CON LA DISTANCIA	54
8.15	ENERGÍA RENOVABLE	56
8.16	CLIMA	56
8.17	NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR	57
8.17.1	La radiación solar terrestre	57
8.17.2	Energía solar térmica	60
8.17.2.1	La captación térmica	60
8.17.2.2	Colectores solares de baja temperatura	61
8.17.2.3	Colectores solares de media y alta temperatura	62
8.17.2.4	Tipos especiales de colectores solares de concentración	64
8.17.3	Energía solar fotovoltaica	67
8.17.3.1	Propiedades de los semiconductores	67
8.17.3.2	Conformación de elementos fotovoltaicos	69
8.17.3.3	Aplicaciones de la tecnología fotovoltaica	70
8.18	OTRAS APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR	72
8.18.1	Estanque solar	72
8.18.2	Potabilización del agua	73
8.18.3	Secado solar	74
8.18.4	Acondicionamiento térmico de albercas	75
8.18.5	Refrigeración solar	76
8.19	EL EFECTO FOTOELÉCTRICO	77
8.20	RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO	87
8.21	LA TEORÍA CUÁNTICA DE LA LUZ	89
9.	METODOLOGÍA DEL TRABAJO	95
10.	METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN	96
11.	MONTAJES PROPUESTOS	97

12. DESARROLLO EXPERIMENTAL	98
13. CONCLUSIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	125

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. La energía fotovoltaica para necesidades mínimas (esquema de Wolfgang Palz para un modelo de un pueblo de 600 habitantes distribuidos en cuarenta familias de 15 personas cada una).	40
Cuadro 2. Resultados obtenidos en el ensayo del colector solar de placa plana.	122

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Movimientos de la Tierra	42
Figura 2. Definición de la posición del Sol	43
Figura 3. Trayectoria del Sol en Ginebra	44
Figura 4. Movimiento del Sol	45
Figura 5. Trayectoria solar	46
Figura 6. Coordenadas celestes horarias	46
Figura 7. Coordenadas celestes horizontales	47
Figura 8. Irradiancia espectral del Sol y de un cuerpo negro	53
Figura 9. Variación del flujo de energía con la distancia	54
Figura 10. Trayectorias estacionales del Sol	58
Figura 11. Medición de la radiación solar	59
Figura 12. Piranómetro o Solarímetro	60
Figura 13. Muro Trombe	66
Figura 14. Efecto de Seebeck	67
Figura 15. Conformación de elementos fotovoltaicos	70
Figura 16. Estanque solar	72
Figura 17. Refrigeración solar	76
Figura 18. Demostración del efecto fotoeléctrico	78
Figura 19. Observación del efecto fotoeléctrico	79
Figura 20. Gráfica de fotocorrientes	80
Figura 21. Grafica de los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico	82
Figura 22. Gráfico del trabajo de Millikan	83
Figura 23. Montaje experimental del efecto fotoeléctrico	86
Figura 24. Mediciones experimentales de la emisión del cuerpo negro	88
Figura 25. Radiación de cuerpo negro	89

Figura 26. Microturbina eólica por efecto chimenea	98
Figura 27. Curvas de emisión de cuerpo negro	101
Figura 28. Prueba de la estufa solar	102
Figura 29. Estufa solar	103
Figura 30. Estufa solar por concentración de radiación del Sol	107
Figura 31. Operación de una celda fotovoltaica	111
Figura 32. Acción de los fotones	112
Figura 33. Interior de un colector solar	116
Figura 34. Ilustración del efecto invernadero	119
Figura 35. Despiece de un colector solar de placa plana.	121
Figura 36. Gráfica de los resultados obtenidos en el ensayo del colector solar de placa plana. Temperatura vs Tiempo.	122

LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Construcción del montaje Microturbina Eólica	99
Foto 2. Montaje Microturbina Eólica completo, para ser ensayado	100
Foto 3. Producción de energía	100
Foto 4. Construcción de la estufa solar	104
Foto 5. Terminación de la estufa solar	104
Foto 6. Obtención de los resultados	105
Foto 7. Estufa solar (Método Ustorio)	107
Foto 8. Construcción de la base para la estufa solar (Método Ustorio)	108
Foto 9. Construcción del reflector	109
Foto 10. Comprobación de la estufa solar por el método ustorio	109
Foto 11. Auto solar	113
Foto 12. Construcción y terminación del auto solar	113
Foto 13. Colector solar de placa plana	115
Foto 14. Construcción del colector solar de placa plana	117
Foto 15. Adecuación de los materiales del colector solar	117
Foto 16. Ensayo del colector solar de placa plana	118

GLOSARIO DE TÉRMINOS FRECUENTES EN ENERGÍA SOLAR

Solamente se aclaran aquellos términos que se relacionan directamente o indirectamente con la energía solar y el cual no ha sido explicado a lo largo del trabajo.

ADIABÁTICO: proceso en el que no hay intercambio de calor con el exterior.

ALBEDO: fracción de la energía reflejada o difundida por la superficie de un cuerpo que recibe energía luminosa.

BRILLO: luminancia o luminosidad de un objeto.

CÉLULA SOLAR O FOTOVOLTAICA: Dispositivo que transforma la energía solar en energía eléctrica

CENIT: punto de la esfera celeste situado justamente sobre la vertical del lugar considerado.

CONCENTRADOR SOLAR: colector solar que enfoca o concentra los rayos solares sobre un absorbente de área menor que la superficie total colectora, logrando de esta forma aumentar la intensidad de la radiación incidente.

CUANTO: unidad elemental de energía. El cuanto de energía luminosa se llama también fotón.

DIAGRAMA DE GANTT: gráfica de Gantt o carta Gantt es una popular herramienta gráfica cuyo objetivo es mostrar el tiempo de dedicación previsto para diferentes tareas o actividades a lo largo de un tiempo total determinado.

ECLÍPTICA: trayectoria aparente que sigue el Sol a lo largo del año en la esfera celeste.

EMISIVIDAD: relación entre la energía emitida por la superficie de un cuerpo y la emitida por un cuerpo negro perfecto.

ENDOTÉRMICO: proceso que absorbe calor.

EÓLICO: relativo al aire y al viento.

EQUINOCCIOS: momentos del año en que la duración del día es igual a la de la noche.

ESTANQUE SOLAR: estanque de agua salada que es capaz de almacenar energía solar en forma de calor, gracias a un efecto de estratificación por la diferente densidad de las distintas capas que lo componen.

EXOTÉRMICO: proceso que desprende calor.

FISIÓN: es la separación del núcleo de un átomo en otros elementos, liberando gran cantidad de energía.

FOTOLISIS: proceso químico causado por la luz.

FRECUENCIA: magnitud física igual al inverso del periodo de una onda. Se mide en ciclos por segundo, también llamados hertzios.

FUSIÓN: consiste en la unión de núcleos atómicos de masa pequeña que forman núcleos más pesados, con el desprendimiento de una gran cantidad de energía.

HELIÓGRAFO: instrumento que mide la insolación o tiempo en que el Sol luce en un día determinado.

HORNO SOLAR: dispositivo capaz de alcanzar temperaturas muy elevadas enfocando los rayos solares sobre un pequeño receptor.

INVERSOR: convertidor de corriente continua en alterna.

IRRADIANCIA: Densidad de potencia incidente en una superficie o la energía incidente en una superficie por unidad de tiempo y unidad de superficie. Se mide en kW/m^2 .

ISÓBARO: proceso en el que la presión permanece constante.

ISÓCORO: proceso en el que no hay variación de volumen.

ISOTERMO: proceso que se realiza sin variación de temperatura.

LANGLEY: unidad de medida de la intensidad de la radiación solar, cada vez más en desuso, que equivale a 1cal/cm^2 .

LENTE DE FRESNEL: lámina, generalmente de plástico transparente, en cuya superficie se disponen una serie de surcos concéntricos tallados de forma tal que el conjunto es capaz de enfocar la luz de modo análogo al de una lente convencional.

RADIACIÓN SOLAR: Energía procedente del sol en forma de ondas electromagnéticas.

RADIACIÓN UMBRAL: intensidad de la radiación solar tal que, para un colector dado, hace que su rendimiento sea nulo, es decir, la energía absorbida es exactamente igual a las pérdidas térmicas del colector.

SILICONA: producto químico usado en juntas flexibles y en diversos pegamentos.

TEMPERATURA DE ESTANCAMIENTO: es la alcanzada en una placa captadora cuando no hay circulación del fluido caloportador.

RESUMEN

Con el pasar del tiempo, las sociedades han crecido en el uso y dependencia de la energía. Actualmente dependemos en gran medida del petróleo, que con el crecimiento de la población mundial incrementa su consumo y por ende los daños medioambientales que conlleva su uso, siendo esta una de las mayores preocupaciones del mundo contemporáneo. La necesidad de renovar las fuentes convencionales ha impulsado la investigación y el creciente desarrollo de las tecnologías alternativas mediante el aprovechamiento de energías renovables, que son consideradas como fuentes de energía inagotables, con la particularidad de ser energías limpias, que presentan un nulo o escaso impacto ambiental, su utilización no tiene riesgos potenciales e indirectamente ayudan a un aumento de los recursos naturales.

En Colombia, la principal producción de energía proviene de la hidroelectricidad, por la abundancia de agua en la mayoría de zonas del país, y en un segundo lugar encontramos los combustibles fósiles, cuyas reservas están por desaparecer. La disponibilidad energética de las fuentes de energía renovables es mayor que las fuentes de energía convencionales, pues estas son las que aprovechamos directamente de los recursos naturales considerados inagotables como el Sol, el viento y los cuerpos de agua.

Con base en esto, el propósito de nuestro trabajo es impulsar la utilización y aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de energías alternativas (como la energía solar) y mostrar que el Sol puede suministrar la energía suficiente para satisfacer nuestras necesidades básicas y lo único que tenemos que hacer es aprender a aprovecharla. Por esto se hace necesario estudiar y demostrar que su utilización es una vía para solucionar el problema de la crisis energética mundial y contribuir a un medio ambiente más limpio y evitar el calentamiento global.

ABSTRACT

As time goes by, societies have grown in use and energy dependence. Nowadays, we rely heavily on oil, that with the growth of world population increases its consumption and thus the environmental damage that it entails. This is one of the biggest concerns of the contemporary world. The need to renew conventional sources has prompted research and the growing development of alternative technologies by the use of renewable energy, which is considered as inexhaustible energy sources. This energy is characterized for being clean energy, with zero or low environmental impact, its use has no potential risks and even indirectly helps increase the natural resources.

In Colombia, the main energy production comes from hydroelectricity. It is due to the abundance of water in most areas of the country; the second sources are the fossil fuels, whose reserves are disappearing. The energy availability of renewable energy sources is higher than conventional energy sources, as these are the ones we use directly from natural resources deemed inexhaustible like the Sun, wind and water bodies.

Based on the above mentioned, this work is aimed at promoting the use and application of technologies to take advantage of alternative energy sources (like solar energy) and show that the Sun can provide enough energy to meet our basic needs and all we have to do is to learn to make use of it. Therefore it is necessary to study and demonstrate that their use is a way to solve the problem of global energy crisis and contribute to a cleaner environment and prevent global warming.

INTRODUCCIÓN

Como es ampliamente conocido, el agotamiento de las fuentes tradicionales de energía (combustibles fósiles) ha puesto a la mayoría de países del mundo a buscar soluciones en energías alternativas. Colombia cuenta con un gran potencial en la generación de este tipo de energías por su posición geográfica y en especial el departamento del Huila. Por tal motivo, nuestro trabajo está dirigido a impulsar estas tecnologías que existen para generar energía por medios alternativos a los combustibles fósiles; y su uso para disminuir los efectos del calentamiento global, su impacto y la implementación de dispositivos fotoeléctricos y fotovoltaicos.

En estos momentos la energía proveniente del petróleo es la base de la vida moderna, pero a medida que los países se industrializan y sus poblaciones aumentan, también crece el consumo y los daños medioambientales que produce. En Colombia la producción de energía primaria proviene de la hidroelectricidad, por la abundancia de agua en la mayoría de zonas del país, y en un segundo lugar de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), cuyas reservas están desapareciendo.

Las energías alternativas o renovables son las que aprovechamos directamente de los recursos considerados inagotables como el Sol, el viento, las mareas y el calor interno de la Tierra. Por esta razón, se hace necesaria la divulgación de los beneficios que recibimos de la energía del Sol, con fines de estudiar y demostrar que la utilización y aplicación de los sistemas tecnológicos que existen para generar energía por medios alternativos a los combustibles fósiles, es una vía para solucionar el problema de la crisis energética mundial, contribuir a un medio ambiente más limpio y disminuir el calentamiento global; los cuales serán demostrados a través del montaje de algunos prototipos experimentales como la microturbina eólica, estufa solar, auto solar, y colector solar de placa plana; y así mostrar la obtención de energía eléctrica y térmica a partir de la captación de la energía solar.

1. JUSTIFICACIÓN

Los recursos energéticos inagotables, baratos y no contaminantes provienen de los ciclos naturales del planeta haciendo posible que se disponga de ellos de manera permanente. Los combustibles tradicionales (carbón, petróleo, gas...) resultan caros, contaminan y no son renovables.

La disponibilidad energética de las fuentes de energía renovables es mayor que las fuentes de energía convencionales, sin embargo su utilización es escasa; a pesar que en Colombia existen leyes, decretos y reglamentos enfocados a la preservación del medio ambiente desde el punto de vista de la conservación y uso racional de los recursos naturales no renovables y del uso racional y eficiente de la Energía para garantizar fundamentalmente la disponibilidad y continuidad de los mismos al igual que el desarrollo económico y sostenible del país. De esta manera, los encontramos presentes en la constitución política de Colombia de 1991 mencionadas en el Título II, Capítulo 2, Artículo 67; Capítulo 3, Artículo 79; Título X, Capítulo 1, Artículo 268; por mencionar algunos de sus apartados que se refieren al cuidado y protección del medio ambiente.

También la ley general de educación habla de un proceso permanente de formación determinado desde el artículo 67 de la constitución política, y que busca formar al colombiano en el respeto a los derechos humanos, a la paz y a la democracia; y en la práctica del trabajo y la recreación, para el mejoramiento cultural, científico, tecnológico y para la protección del ambiente; relacionados en el Título I, Artículo 5; Título II, Capítulo 1, Artículo 14, Artículo 21, Artículo 22, Artículo 32. De la misma forma la Ley 697 de 2001, mediante la cual se fomenta el uso racional, eficiente de la energía y se promueve la utilización de energías alternativas.

De acuerdo con lo establecido en toda esta normatividad, el objetivo es ampliar el uso y protección de la energía; fomentando el desarrollo sostenible, mediante la eficiencia energética, el uso de energías renovables, como forma de asegurar nuevos desarrollos tecnológicos, hacia el mejoramiento en la productividad, y para la mitigación de los impactos ambientales asociados al consumo de combustibles fósiles.

El desarrollo de la tecnología, el incremento de la exigencia social y los costos más bajos de instalación y rápida amortización, están impulsando un mayor uso de las fuentes de energía de origen renovable en los últimos años. Las energías de origen renovable, son consideradas como fuentes de energía inagotables, con la peculiaridad de ser energías limpias, con las siguientes características: suponen un nulo o escaso impacto ambiental, su utilización no tiene riesgos potenciales e indirectamente suponen un enriquecimiento de los recursos naturales.

Durante el siglo pasado, las aplicaciones de la física nuclear han tenido efectos inmensos sobre la especie humana; algunos fueron benéficos y otros catastróficos. Existen ciertas aplicaciones como bombas y reactores. Las reacciones nucleares que alteran las estructuras pueden inducirse también por el impacto de una partícula o algún núcleo sobre otro núcleo. Hay dos clases de reacciones de interés especial, que son: la *fisión* y la *fusión*, y concretamente en la solar, al estar íntimamente ligada al aprovechamiento de la energía de fusión de nuestra estrella, no podríamos sobrevivir sin los 3.90×10^{26} watts que produce un reactor cercano de fusión, el Sol. La alternativa de futuro es la energía nuclear, que se basa en el poder de los núcleos de los átomos, considerada una fuente inagotable y barata de energía que resuelve parte del problema mundial de la escasez energética.

En el desarrollo de nuestro trabajo queremos impulsar la utilización y el avance de estas tecnologías, pues son una forma de evitar el desgaste o deterioro del medio ambiente que se viene afectando día tras día con la utilización de los combustibles energéticos que contaminan (carbón, petróleo, gas, y otros).

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROGRAMA EN CIENCIAS NATURALES Y EDUCACIÓN AMBIENTAL

Durante las últimas décadas ha aumentado la convicción sobre la importancia del aprendizaje de las ciencias de la naturaleza, tanto en la educación general de todos los ciudadanos como en la promoción de carreras científicas, con el propósito de crear comunidad científica o grupos de investigación, tan necesarios para el desarrollo de los países.

Paralelamente se ha producido un gran desarrollo de investigación, teorías y debates para cambiar la enseñanza de las ciencias naturales con el fin de hacerla más adecuada en sus objetivos, en sus contenidos y en sus métodos.

Organizaciones internacionales tales como la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y la organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI), vienen desarrollando amplios programas para mejorar la enseñanza de las ciencias, fomentar la alfabetización en ciencias y tecnología para todos los ciudadanos y renovar los currículos y la formación de profesores en la enseñanza de las ciencias.

El Estado Colombiano mediante la ley 115 de 1994 establece con respecto a la formación científica los siguientes objetivos:

1. Generales de la Educación Básica (Artículo 20):

a. Propiciar una formación general mediante el acceso, de manera crítica y creativa, al conocimiento científico, tecnológico, artístico y humanístico y de sus relaciones con la vida social y con la naturaleza, de manera tal que prepare al educando para los niveles superiores del proceso educativo y para su vinculación con la sociedad y el trabajo.

c. Ampliar y profundizar en el razonamiento lógico y analítico para la interpretación y solución de los problemas de la ciencia, la tecnología y de la vida cotidiana.

2. Específicos de la Educación Básica en el ciclo de Primaria (Artículo 21):

g. La asimilación de conceptos científicos en las áreas de conocimiento que sean objeto de estudio, de acuerdo con el desarrollo intelectual y la edad.

h. La valoración de la higiene y la salud del propio cuerpo y la formación para la protección de la naturaleza y el ambiente.

3. Específicos de la Educación Básica en el ciclo de Secundaria (Artículo 22):

d. El avance en el conocimiento científico de los fenómenos físicos, químicos y biológicos, mediante la comprensión de las leyes, el planteamiento del problema y la observación experimental.

e. El desarrollo de actitudes favorables al conocimiento, valoración y conservación de la naturaleza y el ambiente.

i. El estudio científico del universo, de la Tierra, de su estructura física, de su división y organización política, del desarrollo económico de los países y de las diversas manifestaciones culturales de los pueblos.

m. La valoración de la salud y de los hábitos relacionados con ella.

4. Específicos de la Educación Media (Artículo 30):

b. Profundización en conocimientos avanzados de las Ciencias Naturales.

c. La incorporación de la investigación al proceso cognoscitivo, tanto de laboratorio, como de la realidad nacional en sus aspectos naturales, económicos, políticos y sociales.

Como puede observarse en la ley 115 de 1994, los fines, propósitos y objetivos de la Educación Básica y Media, contemplan la ambición de la ley de garantizar una formación en Ciencias Naturales y Educación Ambiental de alta calidad en los jóvenes que ingresan en el sistema educativo colombiano. Este anhelo sólo será posible si los profesionales encargados de impartir la docencia acreditan una sólida formación científica.

El artículo 68 de la Constitución de 1991 establece que la enseñanza estará a cargo de personas de reconocida idoneidad ética y pedagógica. Además la ley garantizará la profesionalización y significación de la actividad docente.

Por otra parte, el área de influencia de la Universidad Surcolombiana está conformada por el departamento del Huila, el sur del Tolima, el departamento del Putumayo y buena parte del departamento del Cauca. La facultad de Educación y el programa de Licenciatura en Educación Básica con énfasis en Ciencias Naturales y Educación Ambiental tienen la gran responsabilidad de dar cuenta a la región surcolombiana por los mandatos de la carta en sus artículos 67 y 68.

Como se sabe, éste es el único programa de Licenciatura en Educación Básica con énfasis en Ciencias Naturales y Educación Ambiental que existe en la región, razón por la cual su responsabilidad de formar docentes acordes con los principios de la carta es inaplazable e indelegable. De hecho la existencia del programa debe verse como una contribución muy significativa de la Universidad Surcolombiana y su Facultad de Educación en la formación de docentes idóneos, responsables, justos y solidarios.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

- Sistematizar los desarrollos científicos y tecnológicos sobre conversión de energía solar en energía eléctrica y proponer el rediseño de prototipos fotovoltaicos y térmicos que permitan la captación directa del calor de Sol y su posterior transformación, valiéndonos de la disponibilidad permanente de éste astro en la zona norte del departamento del Huila, con el fin de promover el uso de energía renovable y limpia, contribuyendo así a generar procesos de sensibilización y capacitación sobre los efectos del calentamiento global.

3.2 ESPECÍFICOS

- Identificar las distintas tecnologías que existen para generar energía por medios alternativos a los combustibles fósiles.
- Realizar el montaje de los siguientes prototipos experimentales: Microturbina eólica, estufa solar, auto solar, y colector solar de placa plana.
- Mostrar la obtención de energía eléctrica y térmica a partir de la captación de la energía solar.

4. HIPÓTESIS

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables (solar, eólica, geotérmica y biomasa) aumentará en los próximos diez años como una estrategia de mitigación del calentamiento global, permitiendo el desarrollo de la industria energética no convencional en países en vía de desarrollo.

La energía solar puede ser complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación, hecho que supliría progresivamente la dependencia, minimizando el daño ambiental.

5. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La utilización de energías convencionales no renovables arroja altas emisiones de contaminantes al medio ambiente siendo, paradójicamente, los más utilizados durante el último siglo.

La propuesta pretende mostrar que a pesar de las asimetrías entre los costos de producción de energía convencional y los de obtención de energía eléctrica y térmica, su uso progresivo contribuirá a disminuir los problemas generados por el uso masivo de las energías convencionales, como el cambio climático, los residuos radiactivos, la lluvia ácida, la contaminación atmosférica y el calentamiento global.

6. IMPACTOS

- Fortalecer la línea de investigación en ciencia básica y aplicada en el uso de energías alternativas.
- Promover la formación de investigadores en área de energías alternativas en la USCO.
- Fomentar procesos de capacitación sobre protección y conservación del medio ambiente, como estrategia de desarrollo sostenible.

7. ANTECEDENTES

- El Grupo de Investigación en Física Teórica de la Universidad Surcolombiana, lleva a cabo un proyecto relacionado con el “DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS EN APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS (ENERGÍA SOLAR)”, esta propuesta apunta a realizar una capacitación de los investigadores sobre el beneficio de las energías alternativas, especialmente los desarrollos tecnológicos en materia de energía proveniente del Sol y así elaborar un Manual sobre aprovechamiento de energía solar, a partir de una propuesta de rediseño de prototipos fotovoltaicos que permitan aprovechar la radiación solar existente en la zona norte del departamento del Huila y minimizar con ello los efectos del calentamiento global.
- La fundación APROTEC*, se encuentra localizada en la ciudad de Cali (Valle del Cauca), se dedica desde 1990 a la difusión, comercialización, aplicación, producción, innovación y desarrollo de todos los sistemas relacionados con Energías Renovables y Tecnologías Apropriadas. Realiza estudios de factibilidad, análisis de campo y evaluación de los recursos naturales disponibles y su posible aprovechamiento en especial en el área de la electrificación rural con comunidades aisladas. Diseña, vende e instala sistemas completos de energía alternativa (sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos, microhidroeléctricos, y solares térmicos). Construye maquinaria especializada como turbinas hidráulicas, molinos de viento, bombas manuales, calentadores, destiladores y hornos solares.
- El Centro Experimental “Las Gaviotas” es una fundación sin ánimo de lucro, fundada en 1971, cuya realización más importante es la creación de una comunidad en la cuenca del Orinoco colombiano, en un sitio remoto y despoblado, prácticamente incomunicado con el resto de Colombia. Fundado y dirigido por Paolo Lugari, Las Gaviotas construye casas bioclimáticas, en las que se puede controlar la temperatura con paneles de energía y calentadores solares de agua, además de producir molinos de viento, arietes hidráulicos, bombas de camisa para extracción de agua de pozos profundos, turbinas hidráulicas para generación de electricidad.**

* <http://www.aprotec.com.co/index.html>

** <http://www.centrolasgaviotas.org/>

8. MARCO DE REFERENCIA

8.1 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA SOLAR

La disponibilidad de energía en el mundo se ha convertido en un problema crucial, dado que la gran mayoría de los países, tanto los que están en vía de desarrollo como los industrializados, se ven afectados por las crecientes demandas requeridas para satisfacer sus metas económicas y sociales.

Es inevitable que la oferta de energía debe sufrir una transición desde su actual dependencia de los hidrocarburos hacia aplicaciones energéticas más diversificadas, lo que implica el aprovechamiento de la variedad de fuentes de energías renovables que se disponen.

El Sol es una fuente inagotable de recursos para el hombre. Provee energía limpia, abundante y disponible en la mayor parte de la superficie terrestre y puede por lo tanto, liberarnos de los problemas ambientales generados por los combustibles convencionales, como el petróleo, y de otras alternativas energéticas, como las centrales nucleares. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos de las últimas décadas, el aprovechamiento de esta opción ha sido insignificante, comparándolo con el consumo global de energía en el mundo.

Los problemas técnicos que se plantean para el aprovechamiento de la energía solar son los siguientes:

- Gran dispersión de la energía solar sobre la superficie de la Tierra
- Carácter incontrolable y variable en el tiempo de la intensidad de radiación solar
La radiación solar que recibe una superficie horizontal es del orden de $1\text{KW}/\text{m}^2$ al mediodía, variando según la latitud del lugar, nubosidad, humedad y otros factores, pero su principal problema es su intermitencia. En invierno, que es generalmente cuando más se necesita, es menor, de modo que en la mayoría de los casos la disponibilidad no coincide con la demanda. Por ello, se requiere el almacenamiento para un tiempo de autonomía determinado y además, en caso de superarse el mismo, contar con el apoyo de sistemas de respaldo o fuentes suplementarias de energía.

Por ello, para el aprovechamiento destinado a la aplicación de la energía solar es necesario realizar los siguientes procesos:

- Captación y concentración de la energía solar
- Transformación para su utilización
- Almacenamiento para satisfacer uniformemente la demanda con un tiempo de autonomía establecido.
- Disponer de una fuente energética suplementaria disponible si se supera el tiempo de autonomía
- Transporte de la energía almacenada, para su utilización en los puntos de consumo.¹

De esta manera, para lograr una solución técnica que optimice las inversiones a realizar, en cada caso particular es necesario analizar detenidamente cual es el tiempo de autonomía adecuado para la instalación, teniendo en cuenta que cuanto mayor es la capacidad de almacenamiento, menor es el tamaño de las fuentes energéticas de apoyo.

8.2 JUSTIFICACIÓN AL ESTUDIO DE LA ENERGÍA SOLAR

La disponibilidad de recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico. A su vez, es dicho desarrollo tecnológico el que acaba determinando la utilización de ciertos tipos de energía y, por tanto, la disponibilidad de este recurso. Estos recursos energéticos son usados por el hombre con objeto de satisfacer algunas de sus necesidades, en la mayoría de los casos en forma de calor y trabajo.

En lo que se refiere al calor, es necesario para un gran número de aplicaciones, como la climatización de los locales, la preparación de alimentos, o la producción o transformación de algunos compuestos químicos. La utilización doméstica del calor, comenzó con el dominio del fuego en las épocas prehistóricas y se consolidó a partir de la invención de las máquinas térmicas a partir del siglo XVII.

¹ FERNÁNDEZ SALGADO, José María. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. (Adaptado al código técnico de la edificación y al nuevo RITE). Madrid :Mundi-Prensa, 2008. p. 1

Ambos hitos constituyen sin duda unos de los logros tecnológicos más grandes en la historia de la humanidad.

Respecto del trabajo, se utiliza para una gran variedad de procesos en los que hay que vencer fuerzas de oposición: como por ejemplo para levantar una masa en un campo gravitacional, para deformar un cuerpo, estirar una liga o un resorte o hacer fluir un líquido o gas; en los procesos industriales, para transformar materia prima en un producto determinado; para el transporte de personas y de mercancías, incluso, para tocar cualquier instrumento musical.

Calor y trabajo, en el sentido aquí expuesto, son dos necesidades básicas en cualquier grupo humano, independientemente de su nivel social, económico o tecnológico. Para producirlos, el hombre ha utilizado, a lo largo de su historia, una gran variedad de recursos energéticos. Al principio de nuestra era, por ejemplo, el calor – tanto para usos de calefacción, cocina, etc.... – era producido en gran medida por medio de la combustión de leña, mientras que el trabajo en pequeña escala era producido por la fuerza humana; a mediana escala se obtenía de ciertos animales domesticables – como caballos, burros, bueyes – y a gran escala podría extraerse, por ejemplo, del viento que se utilizaba para mover los grandes veleros mercantes y de guerra.

Las primeras máquinas térmicas de uso práctico aparecieron hacia finales del siglo XVII. En la segunda mitad del siglo XVII, el escocés James Watt perfeccionó la máquina de vapor y con ello se facilitó la producción industrial de cantidades relativamente grandes de trabajo a partir de la combustión, primero de leña y después de carbón mineral. A principios del siglo XIX ya existían en Inglaterra y en Estados Unidos algunos barcos de vapor que efectuaban viajes comercialmente. Antes del segundo tercio del mismo siglo, entró en servicio en Inglaterra un ferrocarril impulsado por una máquina de vapor.²

Las máquinas de vapor eran del tipo “combustión externa”. Este concepto implica que la fuente de calor que se utilice no es muy importante, siempre que cumpla con ciertos requisitos. Así, una máquina de vapor que pueda funcionar con leña, también puede hacerlo con carbón, con petróleo o con ciertos residuos de basura. Pero, hace más de cien años, se construyó en Francia una máquina de vapor cuya fuente de energía era el Sol.

² FERNÁNDEZ SALGADO, José María. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. (Adaptado al código técnico de la edificación y al nuevo RITE). Madrid :Mundi-Prensa, 2008. p. 2

Hacia mediados del siglo XIX se inventaron los primeros motores de combustión interna, que requieren un combustible muy específico para funcionar. Con el tiempo, debido a razones técnicas y económicas, los motores de combustión interna, principalmente los de gasolina y diesel, se hicieron cada vez más seguros, confiables, económicos y, por tanto, abundantes. Aparecieron también otras máquinas térmicas, como las turbinas y los motores a reacción, que también consumen combustibles muy específicos. Fue así como nuestra sociedad se fue haciendo extraordinariamente dependiente de los combustibles fósiles.

Los combustibles fósiles comprenden principalmente el petróleo y sus derivados (gasolina, diesel etc.), el gas natural y el carbón mineral. Al principio de la explotación de estos recursos, se consideraban ilimitados y su impacto ambiental era despreciable. Sin embargo, el extraordinario crecimiento de la población mundial (y nacional), junto con el aumento en el consumo per cápita de estos recursos, ha propiciado que sólo queden reservas de petróleo disponibles para su explotación económica durante la primera mitad del siglo XXI.

Por otro lado, el consumo masivo de hidrocarburos está produciendo ya alteraciones de la atmósfera a nivel mundial. Los niveles de dióxido de carbono que se detectan actualmente son significativamente mayores que los que existían en 1950. Esto produce el conocido efecto de invernadero, que está produciendo ya un incremento en las temperaturas promedio mundiales.³

Los combustibles fósiles también son causantes de la llamada lluvia ácida, que en los bosques cercanos a las áreas altamente industrializadas está causando grandes daños al suelo, y por lo tanto a la flora y la fauna.

En las grandes ciudades, la combinación de las emisiones de gases de combustión, con algunos otros fenómenos naturales, como las inversiones térmicas, la humedad y la radiación solar producen algunos efectos indeseables para la salud humana, como las altas concentraciones de ozono y, en general, la concentración de componentes nocivos en la atmósfera.

Tanto por razones económicas (próxima escasez de hidrocarburos) como ecológicas (alteración de la atmósfera y el suelo), es imperativo el desarrollo de nuevas alternativas energéticas, que sean menos agresivas contra el ambiente. El

³FERNÁNDEZ SALGADO, José María. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. (Adaptado al código técnico de la edificación y al nuevo RITE). Madrid :Mundi-Prensa, 2008. p. 2

actual esquema de consumo energético, tanto en España como a nivel global, simplemente no es sustentable, es decir, no puede mantenerse indefinidamente sin amenazar su propia existencia.

Algunos modelos que consideran los efectos que está teniendo actualmente el uso y abuso de los combustibles fósiles, considerando las posibles tendencias futuras, amenazan con producir una catástrofe en contra de la humanidad, antes de terminar el siglo XXI.

Como solución a estos problemas medioambientales y tecnológicos existen muchas alternativas energéticas. Algunas de ellas no han sido desarrolladas por limitaciones técnicas y económicas, y otras se han utilizado sólo parcialmente.⁴

8.3 PANORAMA GENERAL DE LA ENERGÍA

Uno de los mayores desafíos a los que deberá hacer frente la humanidad durante el presente siglo XXI será, con toda seguridad, proporcionar un acceso universal a la energía, de forma que se consiga que este mundo sea seguro, limpio y sostenible.

A través de la historia, el uso de la energía ha sugerido como un asunto central en el funcionamiento y desarrollo de las sociedades humanas, pero durante los siglos XX y XXI, la humanidad aprendió el modo de aprovechar la energía contenida en los combustibles fósiles, fundamentalmente carbón, petróleo, gas natural y energía nuclear. Esto produjo una energía que condujo a la revolución industrial, trayendo consigo un aumento sin parangón de la **productividad** en millones de personas, trabajadores y amas de casa, en todo el mundo. A medida que avancemos hacia el tercer milenio, va teniendo lugar un crecimiento del conocimiento de los sistemas energéticos mundiales, quedando patente que estos se hallan necesitados de un cambio radical, de modo que permitan satisfacer nuestras necesidades energéticas de una forma **sostenible** a largo plazo.⁵

⁴FERNÁNDEZ SALGADO, José María. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. (Adaptado al código técnico de la edificación y al nuevo RITE). Madrid :Mundi-Prensa, 2008. p. 3

⁵GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI.: de las energías fósiles a las alternativas. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. p. 19

8.4 IMPORTANCIA DE LA SOSTENIBILIDAD

Los sistemas energéticos actualmente existentes en el mundo han sido contruidos fundamentalmente en torno a las ventajas derivadas del uso de los **combustibles fósiles** (carbón, petróleo y gas natural), y ahora dependemos demasiado de ellos. Con respecto a los suministros y a su agotamiento en un plazo corto-medio probablemente se haya exagerado, gracias, sobre todo, al continuo descubrimiento de **nuevas reservas** y a una aplicación cada vez mayor de las tecnologías avanzadas de exploración. Sin embargo, subsiste el planteamiento de que las reservas de combustibles son finitas, y a largo plazo se verían **finalmente agotadas**, debiendo encontrarse, por ello, sustitutos a las mismas.

Los combustibles fósiles se han concentrado, debido a procesos naturales, en relativamente pocos países. Dos tercios de las reservas mundiales probadas de petróleo, por ejemplo, están localizadas en Oriente Medio y en el Norte de África. Esta concentración de recursos escasos ha llevado ya a varias crisis y conflictos mundiales, tales como: la crisis del petróleo de los 70, la Guerra del Golfo de los 90, y la posterior Guerra de Irak, disponiendo de un potencial para crear, similares e incluso **más graves conflictos** en el futuro.

Las sustanciales subidas de los precios del petróleo, pueden también originar grandes convulsiones y ampliar el ambiente de protesta, como se ha visto en Europa y Estados Unidos en el 2000 y 2004. Esto no ha hecho más que empezar y la política de mirar para otro lado no parece que sea la actitud más inteligente.

La explotación de los combustibles fósiles entraña significativos peligros para la salud de las personas, esto puede ocurrir en el curso de su *extracción* de la Tierra, por ejemplo por los accidentes en las minas de carbón, incendios en los pozos en el caso del petróleo, o en los equipos de perforación, en el caso del gas, así como graves peligros de contaminación si se trata del uranio.

Pueden ocurrir también durante la *distribución*, en los vertidos de los buques petroleros que originan fuertes agresiones al medio ambiente destruyendo cualquier forma de vida en un entorno más o menos cercano, por ejemplo, el derrame de crudo ocurrido en el golfo de México coincidentemente, el mismo día en el que se celebraba en el mundo entero el Día de la Tierra^{***}, que supone un

^{***} 22 de Abril de 2010. El accidente de la compañía British Petroleum (BP), ocurrió, probablemente por un aumento inesperado de la presión de salida del crudo.

verdadero desastre ecológico, una nueva amenaza para el medio ambiente que se convierte en un desastre ambiental sin precedentes; o bien por la misma *combustión*, que genera emisiones nocivas a la atmósfera tales como el dióxido de azufre los óxidos de nitrógeno que son dañinos al entorno y a la salud.

El combustible fósil genera también elevadas cantidades de dióxido de carbono (CO₂), el más importante gas antropogénico (generados por las personas) con alteración notable del **efecto invernadero**.

La mayoría de los científicos mundiales creen, en la actualidad, que las emisiones de gases del efecto invernadero originarán un aumento en la temperatura de la Tierra, que puede aumentar, hasta llegar a una velocidad de aumento de la misma sin precedentes desde la última glaciación. Esto es muy probable que origine cambios importantes en el sistema climático mundial, provocando una alteración considerable en la agricultura y los ecosistemas, la elevación del nivel del mar podría incluso hacer desaparecer bajo las aguas a algunos países y regiones, por efecto de una fusión acelerada de los glaciares.

La energía nuclear ha crecido en importancia desde el final de la Segunda Guerra Mundial y suministra ahora el 7% de la energía mundial primaria. Una ventaja importante de las Centrales Nucleares, en contraste con las térmicas clásicas de combustible fósil, es que no emiten gases de efecto invernadero. Ahora bien, aunque los suministros de Uranio, el principal combustible nuclear, son suficientes para varias décadas y, posiblemente, pueden durar siglos a las tasa actuales de utilización, sin embargo, el uso de la energía nuclear, hace surgir otros problemas: desde la emisión rutinaria de sustancias radioactivas, así como dificultades en cuanto a ubicación final de los residuos, y el peligro de proliferación de armas nucleares. A esto debemos añadir la posibilidad de importantes accidentes nucleares naturales o provocados (terroristas), los cuales, aunque altamente improbables podrían producir efectos catastróficos si sucedieran. Aunque algunos de estos problemas puedan ser manejables dentro de un largo plazo, tales *soluciones* no han sido aún totalmente desarrolladas.⁶

Extraer energía de los combustibles fósiles o nucleares, genera un significativo impacto ambiental y social. Estos impactos son muy elevados debido a la **baja eficiencia de nuestros sistemas actuales** para la consecución de energía útil, que luego es utilizada en tareas específicas en nuestras casas, maquinaria, vehículos y otras aplicaciones. Una forma importante de disminuir el impacto

⁶GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI.: de las energías fósiles a las alternativas. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. p. 19

medioambiental es mejorar la eficiencia de estos sistemas. En décadas pasadas, se consiguieron mejoras mucho más importantes aún, lo que supondría una repercusión económica significativa.

Por supuesto, no todas las fuentes de energía son de origen fósil o nuclear. Las energías renovables, principalmente la energía solar, tanto la directa: alta temperatura, baja temperatura y fotovoltaica; como sus derivados en la forma de bioenergía, hidroeléctrica, eólica, oleaje y géiser, se estiman serán muy importantes en los sistemas energéticos del futuro. Las renovables están basadas en flujos energéticos que son repuestos mediante procesos naturales, con lo que no existe el peligro de agotamiento, como ocurre en el caso de los combustibles fósiles y nucleares aún cuando pudieran existir otras limitaciones a su uso. El impacto medioambiental de las energías renovables es variable, pero generalmente mucho más bajo que el de los combustibles convencionales, sin embargo, los costes actuales de las energías renovables son, en muchos casos, más elevados que los correspondientes a las energías convencionales, y esa ha sido una razón importante para retrasar su desarrollo.

Todas estas consideraciones sugieren que para la creación de un futuro energético sostenible para la humanidad durante las próximas décadas, será necesario:

- Emplear tecnologías notablemente mejoradas para el aprovechamiento de los combustibles fósiles y nucleares, con el fin de asegurar su uso, si éste continúa, pero creando un impacto medioambiental y social mucho menor.
- Desarrollar y desplegar fuentes de energía renovable de una escala mucho más amplia.
- Realizar mejoras importantes en la eficiencia de la conversión de la energía, así como en su distribución.

8.5 ENERGÍA, SOSTENIBILIDAD Y SU FUTURO

Para centrar el problema deberíamos ser capaces de contestar algunos interrogantes: ¿Qué es lo que significa la energía? ¿Qué es lo que hace que el concepto de sostenibilidad cobre esa importancia? Y, finalmente, ¿Qué es lo que significa el futuro en este contexto?

La palabra **energía** cuando apareció por primera vez en Europa en el siglo XVI no tenía un significado científico, y estaba basado en la palabra griega acuñada por Aristóteles con el significado de fuerza o vigor.

Solo hasta comienzos del siglo XIX, que el concepto de energía fue desarrollado por científicos para describir y comparar estas observaciones sobre el comportamiento de diversos fenómenos como la transmisión de calor, el movimiento de los planetas, el funcionamiento de la maquinaria y la corriente eléctrica. Hoy en día, la definición científica generalizada que se da a la palabra energía es aquella que tiene capacidad para desarrollar un trabajo, es decir, mover un objeto venciendo su resistencia al mismo.⁷

En el lenguaje usual, la palabra *energía* es, a menudo, usado como sinónimo de sistema energético y de hecho así lo haremos frecuentemente. Pero hablando más científicamente, la energía se define como la capacidad para realizar un trabajo, es decir, la proporción en que la energía es convertida de un tipo a otro. La unidad principal de medida de la energía es el julio (**J**) y la unidad principal de **potencia o trabajo** es el vatio (**W**), el cual se define como la energía por unidad de tiempo esto es: un julio por segundo.

El término *sostenibilidad* se introdujo mucho más recientemente; sostenibilidad y en particular el **desarrollo sostenible**, se define como «un desarrollo que cumple las necesidades actuales, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades».⁸

En el contexto de la energía, la **sostenibilidad** ha llegado a significar el aprovechamiento de estas fuentes de energía de modo que:

- No se vean agotadas sustancialmente por un uso continuado de las mismas.
- Su uso no suponga la emisión de sustancias perjudiciales u otros daños al entorno de una forma sustancial.
- Su uso no implique la perpetuación de daños o injusticias sociales.

⁷GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI.: de las energías fósiles a las alternativas. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. p. 19

⁸GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI.: de las energías fósiles a las alternativas. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. p. 19

Este concepto de sostenibilidad constituye, por supuesto, un ideal muy amplio. Pocas fuentes energéticas pueden llegar a cumplir todas estas condiciones, aún aquellas que quedan considerablemente cercas de las óptimas. En la práctica, la sostenibilidad es un concepto más relativo que absoluto, esto no indica que ciertas fuentes de energía sean sostenibles y otras no, sino que, en ciertos contextos, son más sostenibles que en otras.

La determinación de la sostenibilidad relativa de un sistema energético frente a otro, es usualmente un proceso complejo, que implica consideraciones detalladas de los procesos específicos implicados y las tecnologías propuestas, el contexto en el cual están siendo explicadas y los diferentes valores e intereses de las partes interesadas e implicadas.

Supongamos que el gobierno de un país esté proponiendo construir una gran central hidroeléctrica, los vecinos de los pueblos que van a quedar inundados por la presa, tendrán con toda probabilidad un punto de vista diferente, con respecto a la sostenibilidad de la central, que la que tuvieron los planificadores de la empresa eléctrica propietaria que propuso finalmente su construcción. Las viviendas de los proyectistas y constructores, no van a quedar afectadas, en absoluto, ni tampoco su carrera profesional, por el contrario, muy probablemente se verá favorecida con la realización de tal proyecto.

Cuando hablamos de futuro en el contexto de un **futuro sostenible**, ¿Qué es lo que queremos decir? ¿El próximo año? ¿Una o dos décadas después? ¿El final del siglo XXI? ¿El fin del tercer milenio? ¿Para siempre?

En teoría según el **informe de Bruntland**⁹ la humanidad no debería comprometer las necesidades de las generaciones futuras, sino juzgar la necesidad de todos los sistemas energéticos en una escala de tiempos infinita, en un futuro suficientemente alejado. En la práctica, sin embargo, esto podría ser realmente identificado con un entorno capaz de asegurar que los sistemas lleguen a ser sostenibles, o bien mucho menos insostenibles. Las próximas generaciones se lamentarán de nuestra falta de previsión, aunque difícilmente podamos ser responsables de aquello que no somos siquiera capaces de prever, aunque algunos lo intentemos más que otros.

⁹GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI.: de las energías fósiles a las alternativas. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. p. 19

8.6 SITUACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El aprovechamiento de las energías renovables no es nuevo, no ha surgido con los últimos avances tecnológicos propiciados por el silicio o los modernos materiales. Hace mucho que aprendimos a utilizar los rayos del Sol para fines diferentes a los climatológicos (en el siglo II a.C., Arquímedes ya consiguió quemar las naves romanas que asediaban su pueblo mediante espejos) y aprovechar los vientos generados como consecuencias de las variaciones de temperatura para mover las aspas de los molinos. Pero sí en los últimos decenios cuando se ha potenciado su desarrollo como consecuencia del constante aumento del precio del petróleo, de la incertidumbre política en los países productores de hidrocarburos y por nuestra sensibilidad hacia el medio ambiente, ese que vemos en zozobra por nuestras innatas condiciones depredadoras.

El consumo de energía sigue una curva ascendente que parece no tener fin. La introducción en el hogar de una innumerable cantidad de electrodomésticos para el ocio y el bienestar lo provoca.

Para el hogar, la industria electrónica ha puesto a disposición del consumidor múltiples equipos audiovisuales que suponen la complacencia de los usuarios porque, entre otras funciones, se manejan mediante el control remoto, y también de las empresas comercializadoras de electricidad, ya que nuestros equipos caseros, en reposo (el “stand by” anglosajón), están consumiendo energía para facilitarnos esa comodidad. Es la eterna paradoja: mientras que se desarrollen apresuradamente medios técnicos para reducir nuestra dependencia del petróleo, los consumidores despilfarran energía sin saberlo. La respuesta de algunos expertos de que el porcentaje de “despilfarro”, es insignificante con respecto al consumo energético global no convence.

Del mismo modo que los hogares se han llenado de medios audiovisuales, las terrazas, las fachadas y cubiertas de nuestros edificios se han poblado de compresores y otros equipos similares para proporcionar aire fresco. Su empleo está justificado bajo criterios de bienestar, pero el consumo energético que provoca es de una magnitud sólo comparable al número de barriles de petróleo necesario para satisfacer la demanda, suponiendo, naturalmente, que el suministro energético no proceda de centrales nucleares, algo que asusta tanto o más que lo primero.

Por los motivos expuestos, que no dejan de ser una mera reflexión en voz alta de una situación conocida (y padecida), se están llevando a cabo grandes esfuerzos por parte de organismos públicos y privados para conseguir el mejor

aprovechamiento de las **energías renovables** y con ello disponer de **energías alternativas** a las de origen fósil. La energía renovable y por tanto perdurable del Sol está siendo aprovechada mediante muy diferentes tecnologías para proporcionar electricidad y calor y cuya participación como energía alternativa está creciendo continuamente.¹⁰

8.7 ATENUACIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES

Las energías renovables persiguen en primer lugar atenuar las emisiones a la atmósfera de agentes contaminantes y reducir, en segundo término, nuestra dependencia del petróleo por la incertidumbre que supone las alteraciones de su precio como consecuencia de los cambios políticos en una zona tan conflictiva como es Oriente Medio. Cuatro son principalmente los agentes contaminantes que degradan nuestra atmósfera y provocan malestar en los seres vivos:

- Dióxido de carbono. Se produce durante la combustión de combustibles de origen fósil, como son el petróleo, el gas natural y otros de la biomasa tal como la madera.

La emisión de CO₂, a la atmósfera se considera el causante directo del cambio climático.

- El Óxido Nítrico. Se produce este agente contaminante con altas temperaturas de combustión por la reacción del oxígeno con el nitrógeno del aire.

Tal reacción da lugar a la formación de ozono en las capas bajas de la atmósfera y causa malestar en las vías respiratorias del ser humano.

- Monóxido de Carbono. Se produce ante combustiones incompletas de petróleo, gas natural o madera.
- Dióxido de Azufre. Se produce este agente contaminante ante la combustión de combustibles con contenido de azufre, tal como el gasóleo.

¹⁰ PERALES BENITO, Tomás. Guía del instalador de energías renovables. ;México: Limusa, 2007. p. 15

El dióxido de azufre reacciona con el vapor de agua de la atmósfera y ataca a las plantas y a los edificios con el efecto denominado “lluvia ácida”.¹¹

8.8 ENERGÍA PARA EL MUNDO

Más de la mitad de los seis mil millones de personas sobre este planeta viven en áreas rurales, principalmente en los llamados países en vías de desarrollo, más específicamente, países con rentas per cápita bajas.¹²

La energía no está vista probablemente como un problema prioritario para estos países. Las preocupaciones más inmediatas incluyen la paliación de la pobreza, la seguridad de los alimentos, el acceso a la salud, la educación y el empleo, la migración de zonas rurales a urbanas, el comercio internacional, las reservas de divisas y, a menudo, la situación de guerra civil. El principal problema energético en las áreas rurales es normalmente encontrar suficiente madera para cocinar. En algunos países el combustible para cocinar representa más de la mitad del consumo energético nacional.

La mayoría de los países en vías de desarrollo están en el proceso de extender a ritmo constante su red eléctrica en las áreas rurales en un intento de mejorar la calidad de la vida rural. Esta propuesta es demasiado cara para ser una solución completa, ya que el coste de las líneas de distribución normalmente asciende hasta los 20.000 – 30.000 dólares por kilometro. Tales costes pueden ser recuperados solamente en áreas de gran densidad de población y donde los clientes puedan permitirse el lujo de usar una gran cantidad de energía. Aunque esta forma de electrificación rural debería continuar y continuará, no podrá paliar las necesidades de grandes segmentos de población a corto o medio plazo.¹³

La energía fotovoltaica puede suministrar un modelo complementario a estos programas de electrificación. La modularidad de la energía fotovoltaica le permite generar electricidad exactamente donde se necesita. Los programas subvencionados en las zonas más ricas del mundo para promover el uso residencial urbano de la fotovoltaica están ayudando a disminuir los precios de la

¹¹Ibid., p. 21

¹²GREEN, Martín. Energía fotovoltaica: de la luz solar a la electricidad usando células solares. España : Acribia, 2002. p. 69

¹³GREEN, Martín. Energía fotovoltaica: de la luz solar a la electricidad usando células solares. España : Acribia, 2002. p. 69

misma. Esta tendencia a la baja permitirá a la fotovoltaica adaptarse mejor a necesidades energéticas más modestas en algunas de las áreas rurales más pobres del mundo.

En su artículo «Power for the World» (Energía para el Mundo), Wolfgang Palz de la Comisión Europea en Bruselas solicita una iniciativa internacional y masiva de 20 años para suministrar electricidad, usando la fotovoltaica, a más de 1.000 millones de personas en el mundo. Palz calcula que se necesitan por persona aproximadamente 10 vatios de energía fotovoltaica para «necesidades de supervivencia» y «necesidades básicas y de desarrollo» mostradas en el cuadro 1.

También calcula la inversión necesaria de 3.000 millones de dólares por año sobre un periodo de 20 años (Palz señala que esta cantidad es el 3% de las inversiones energéticas acumuladas anuales en los países en vías de desarrollo y menos de 0,5% del gasto militar global).

Cuadro 1. La energía fotovoltaica para necesidades mínimas (esquema de Wolfgang Palz para un modelo de villa de 600 habitantes distribuidos en cuarenta familias de 15 personas cada una).

<i>Necesidades de supervivencia</i>	<u>Vatios per cápita</u>
Desinfección y suministro de agua	3,15
Centro de salud	0,35
Teléfono de emergencia	0,05
Cuidado dental	0,45
Total:	4,00
<i>Necesidades básicas y de desarrollo</i>	
Iluminación familiar	0,87
Iluminación calles	0,40
Centro cultural	0,33
Lucha contra insectos	0,50
Televisión educacional	0,23
Estación de carga de baterías	0,34
Teléfono rural	0,03
Frigorífico para la tienda del pueblo	0,17
Taller	0,68
Total:	3,50
<i>Pérdidas técnicas (baterías, etc.)</i>	2,50
TOTAL	1,0

Fuente: Energía fotovoltaica. España. Acibia, 2002. p. 70

¿Es factible este objetivo? ¿Cuáles son los principales problemas? Ya hay suficiente experiencia con este tipo de sistemas, describe Palz, con más de 200.000 «sistemas solares en hogares» ya funcionando en el mundo entero, en particular en China, Colombia, India, Indonesia, Kenia, Marruecos y México. Hay también más de 100.000 bombas de agua solares que suministran agua para consumo y riego. La iluminación exterior alimentada por células solares también está extendida, como por ejemplo en clases de alfabetización para adultos en India o en lugares de reunión en los pueblos de Indonesia. La fotovoltaica también está ampliamente extendida en los centros de salud rural para tareas como la refrigeración de vacunas (la refrigeración doméstica no es utilizada de forma generalizada en algunas comunidades en los países en vías de desarrollo cuyos alimentos tradicionales no requieren el almacenaje en frío).

Se ha propuesto que el cociente de adopción de una nueva tecnología dependa de su «ventaja relativa» sobre aquello que reemplaza (o sobre otros posibles usos de los fondos disponibles). El grado de ventaja relativa suele reflejar preocupaciones económicas y sociales. El acceso a la radio y televisión que un sistema solar provee, puede llegar a ser un importante factor para que una familia haga el sacrificio económico necesario para adquirir, o incluso mantener tales sistemas. El probable desarrollo de televisores de baja potencia usando cristal líquido como en los ordenadores portátiles podría estimular este mercado. Los enfoques que implican propiedad y responsabilidad individual para el sistema solar y algún tipo de sacrificio financiero por parte del usuario, incluso si es simbólico en términos de costes del sistema real, generalmente han salido mejor parados que aquellos enfoques que implican grandes sistemas para una comunidad.¹⁴

8.9 LA ENERGÍA DEL SOL

8.9.1 La geometría Tierra-Sol. El Sol es una estrella de forma casi esférica con un diámetro de 1.391.000 km. Está situado a una distancia media de 149.598.000 km de la Tierra. Está compuesto de materia gaseosa, esencialmente de hidrógeno y helio, con producción de reacciones de fusión nuclear permanentes y con una temperatura en su núcleo de 10.000.000 K.

¹⁴GREEN, Martín. Energía fotovoltaica: de la luz solar a la electricidad usando células solares. España : Acribia, 2002. p. 69

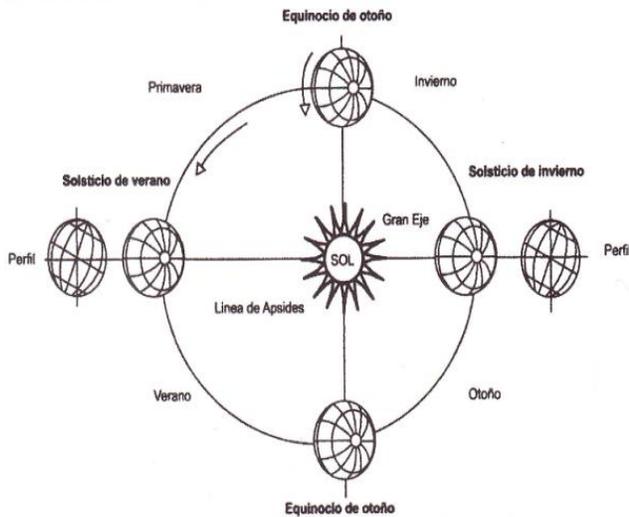


Figura 1. Movimientos de la tierra: la órbita terrestre y las estaciones. Fuente A. Labouret – M. Villos. Madrid: 2008. Mundi-Prensa.

8.9.2 Movimientos de la Tierra. La Tierra describe alrededor del Sol una trayectoria ligeramente elíptica donde el Sol ocupa el punto central (ver la Figura 1). La distancia que les separa varía en $\pm 1,69\%$, en el curso del año, debido a la ligera excentricidad de la órbita terrestre ($e=0,017$).

El eje de rotación de la Tierra sobre ella misma está inclinado $23^{\circ}27'$ con relación al plan de la órbita terrestre. Se llama declinación α al ángulo formado por el eje Tierra-Sol con el plano del Ecuador en un momento dado del año. La declinación tiene un valor de $+23^{\circ}27'$ en el solsticio de verano, y $-23^{\circ}27'$ en el solsticio de invierno, siendo nulo su valor en los equinoccios. Esta declinación es responsable de las estaciones, ya que en el hemisferio norte, los rayos del Sol nos llegan con un ángulo más elevado en verano, y más respecto al horizonte en invierno (ocurre lo contrario en el hemisferio sur). Esto explica que las diferencias estacionales sean más marcadas en las latitudes más altas.

Se sabe también que la actividad no es constante, ya que se producen erupciones solares, pero sus consecuencias no sobrepasan el 4% de variación de la intensidad de los rayos emitidos.

8.9.3 Trayectoria aparente del Sol. Para un observador situado sobre la superficie de la Tierra, el Sol describe una trayectoria aparente que depende de la latitud y de la longitud del lugar donde se encuentra. Recordemos que latitud es la distancia angular de un punto cualquiera del globo con relación al Ecuador (de 0 a

90° en el hemisferio norte). La longitud es también un ángulo, que viene dado con referencia al meridiano de Greenwich (arco del círculo que pasa por los dos polos de la Tierra y por la ciudad de Greenwich, en Inglaterra), desplazándose hacia el Este.

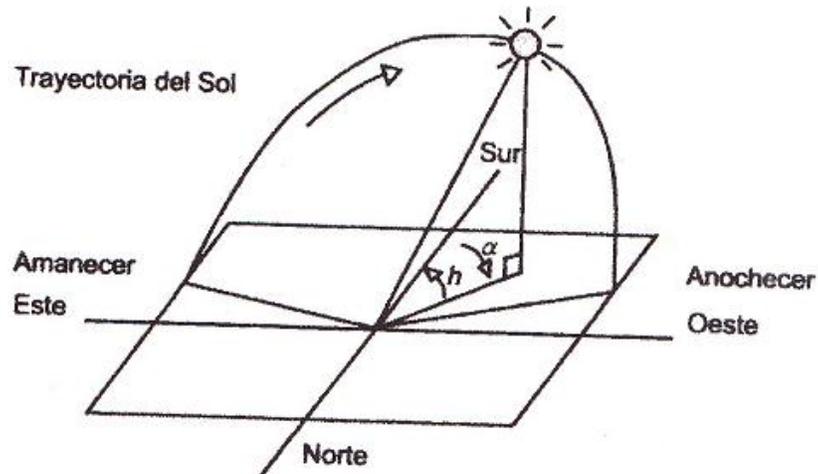


Figura 2. Definiciones de la posición del Sol (altura y azimut). Fuente A. Labouret – M. Villos. Madrid: 2008. Mundi-Prensa.

La posición del Sol se define por dos ángulos:

- Su *altura angular* h , que es el ángulo entre la dirección del Sol y el plano horizontal del lugar (Figura 2).
- Su *azimut* α , que es el ángulo entre el meridiano del lugar y el plano vertical que pasa por el Sol, contado negativamente hacia el este (figura 2).

La Figura 3 dibuja las trayectorias descritas por el Sol para un lugar determinado. Se puede leer la altura y el azimut del Sol en un instante cualquiera del año.

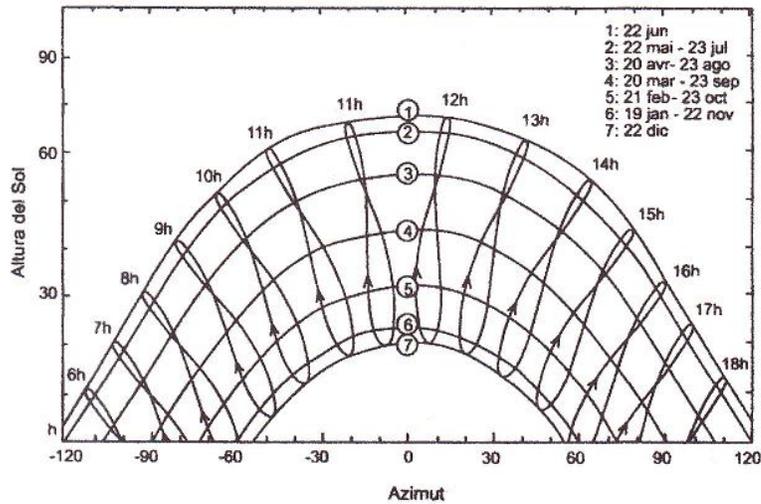


Figura 3. Trayectoria del Sol en Ginebra (lat. 46° 12' N, long. 6° 09') Fuente A. Labouret – M. Villos. Madrid: Mundi-Prensa, 2008

8.9.4 Posición del Sol. Junto con las condiciones atmosféricas hay otro factor que determina la incidencia de la radiación sobre un captador solar, el movimiento aparente del Sol a través de la bóveda celeste, a lo largo del día y del año. La Tierra describe un movimiento de traslación alrededor del Sol que sigue una trayectoria en forma de elipse, con una excentricidad de un 3%. La línea imaginaria que representa la órbita descrita se llama eclíptica. Esta órbita define el plano de la eclíptica. En su movimiento de traslación el eje de rotación terrestre forma siempre el mismo ángulo de 23,5° con la perpendicular al plano de la eclíptica. El ángulo que forma el plano de la eclíptica con el plano del Ecuador varía a lo largo del año como indica la Figura 4. Este ángulo, conocido como *declinación*, varía entre -23,5° el día del solsticio de invierno y 23,5° el día del solsticio de verano.

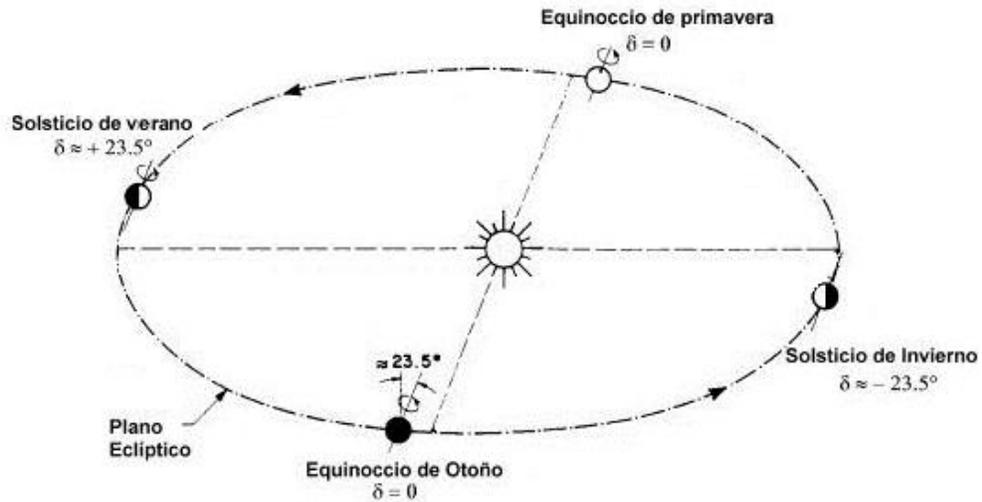


Figura 4. Los trópicos de Cáncer ($23,5^\circ$ Norte) y de Capricornio ($23,5^\circ$ Sur) corresponden a los lugares extremos de latitud tal que el Sol se sitúa en la perpendicular al plano del horizonte un instante al año, al mediodía del solsticio de verano y de invierno, respectivamente. Fuente Ibañez, J.R. Rosell, J.I. Rosell. Madrid: 2005. Mundi-Prensa.

8.9.5 Geometría del movimiento del Sol. Desde el punto de vista de un observador sobre la superficie de la Tierra, el Sol parece describir un arco de círculo desde su salida (orto) hasta su puesta (ocaso) Figura 5. A mitad de este recorrido, al mediodía solar, se sitúa por definición el plano meridiano local. La vertical del observador sobre la superficie terrestre intercepta a la bóveda celeste en un punto llamado *cénit*. El eje de la Tierra forma un ángulo igual a la latitud del lugar (\varnothing) con el plano del horizonte del observador.

La posición del Sol se puede referir en dos sistemas de coordenadas centradas en el observador según el sistema de referencia escogido: *horarias* (δ_s *declinación*, ω_s *ángulo horario*) y *horizontales* (h_s *altura solar*, a_s *acimut*). Estas coordenadas determinan el vector solar entendido como un vector con origen en el observador y extremo en el Sol.

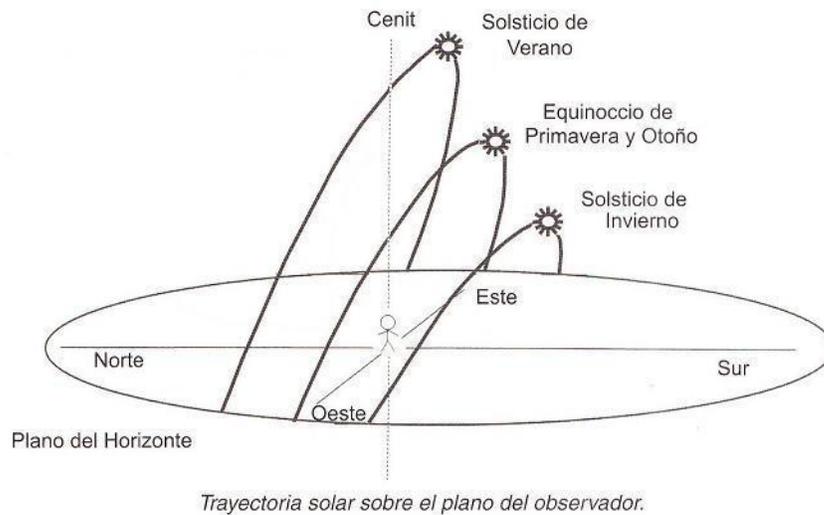


Figura 5. Trayectoria solar sobre el plano del observador. Fuente: Ibañez, J.R. Rosell, J.I. Rosell. [Figura] Madrid: 2005. Mundi-Prensa,

δ_s *declinación solar* ($^\circ$): posición angular del Sol al mediodía solar con respecto al plano del Ecuador terrestre.

ω_s *ángulo horario solar* ($^\circ$): desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar. Se toma como origen del ángulo horario el mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del Sol. Cada hora es igual a 15° .

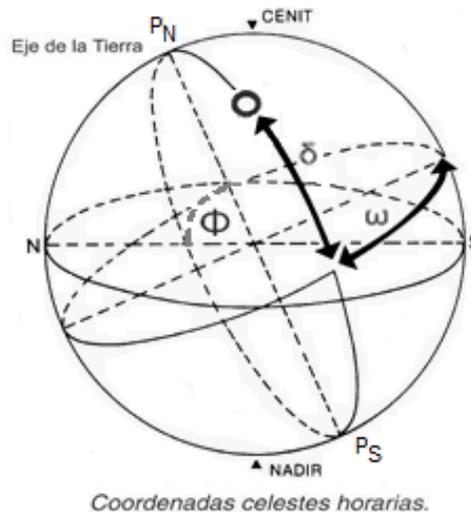


Figura 6. Coordenadas celestes horarias. Fuente: Ibañez, J.R. Rosell, J.I. Rosell.. Madrid: Mundi-Prensa, 2005.

h_s altura solar ($^\circ$): ángulo que forma la radiación solar directa y el plano del horizonte. El ángulo complementario es el llamado ángulo cenital solar.

a_s acimut solar ($^\circ$): ángulo que forma la radiación solar directa y el meridiano del observador. Se toma como origen de acimuts el mediodía solar y valores crecientes en sentido horario observando el norte desde el sur del lugar (en el hemisferio del Norte).¹⁵

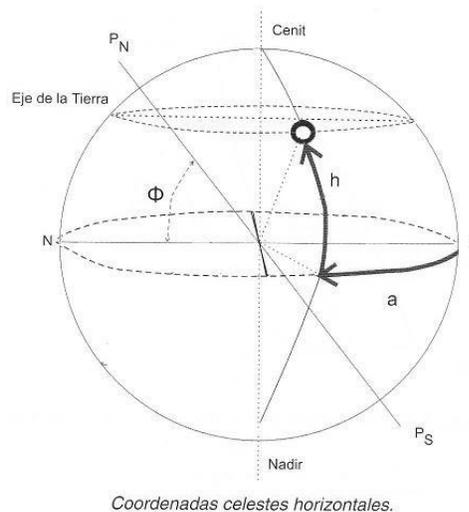


Figura 7. Coordenadas celestes horizontales. Fuente: Ibañez, J.R. Rosell, J.I. Rosell. Madrid: 2005. Mundi-Prensa.

8.10 LA NATURALEZA DE LA ENERGÍA SOLAR

Para los fines del aprovechamiento de su energía, el Sol es una esfera de gases de alta temperatura, con un diámetro de 1.39×10^9 m, situado a la distancia media de 1.5×10^{11} m respecto a la Tierra. Esta distancia se llama unidad astronómica.

Se estima que la temperatura en el interior del Sol debe ser del orden de 10^7 K, pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa del Sol, la temperatura “efectiva de cuerpo negro” es de 5.762 K. Existen, sin embargo, otras formas de calcular la temperatura de la fotosfera, que dan como resultado alrededor de 6.300 K. Es claro que nadie ha colocado un termómetro en la superficie del Sol. Su

¹⁵IBAÑEZ, M; et al. Energías renovables. tecnología solar. Madrid. Mundi-Prensa. 2005. p.. 29

temperatura se mide por métodos indirectos, basados en diversos modelos. De ahí que no coincidan todas las estimaciones de su temperatura.

Algunos datos interesantes acerca del Sol son los siguientes:

- El Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión – por ejemplo dos átomos de hidrógeno que producen helio, o uno de helio y uno de hidrógeno que producen litio, etc. – que se llevan a cabo en su núcleo.
- La generación de energía proviene, por tanto, de la pérdida de masa de Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein, $E=mc^2$, donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m ; c es la velocidad de la luz.
- El núcleo solar es la región comprendida dentro del 23% de su radio, a partir del centro, que corresponde a tan sólo el 15% del volumen, pero en cambio contiene el 40% de la masa y ahí se genera el 90% de la energía. En esa región, la temperatura es del orden de 10^7 K y la densidad es del orden de 10^5 kg/m³. (Recordemos que la densidad del agua es 10^3 Kg/m³).
- La fotosfera es la superficie aparente del Sol, cuando se observa con un filtro adecuado. Ésta es una región opaca, de donde se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio. (opaco, en óptica significa que no deja pasar la radiación. Por ejemplo, un espejo es opaco. Una fuente luminosa puede ser opaca. Una lámpara de neón, emite luz desde su superficie, pero no podemos ver su interior, es opaca. Por tanto, el significado técnico de esta palabra es diferente del que le damos en el lenguaje común. Técnicamente, lo opuesto a opaco es transparente). Por ser opaca, la fotosfera impide observar el interior del Sol.

Sin embargo, es claro que, como todo el Sol, desde el núcleo hasta su superficie se encuentra en forma gaseosa, no hay una superficie física claramente definida, como la hay en la Tierra.

Sobre la fotosfera existen también gases, en condiciones tales que son esencialmente transparentes, que se conoce como la corona solar, observable durante los eclipses totales de Sol.

- La corona solar es la atmósfera del Sol. De forma similar como sucede en la Tierra, la corona es cada vez más tenue a medida que está a mayor distancia del núcleo solar, hasta confundirse con el vacío relativo que existe en el espacio interestelar.

El físico alemán Bethe descubrió a mediados del siglo XX que el Sol obtenía su energía gracias a reacciones nucleares sucesivas de fusión que se producen en sus regiones centrales, en donde dos átomos de hidrógeno producen uno de helio, uno de helio y uno de hidrógeno que producen litio, etc., más precisamente en su núcleo (ciclo de Bethe).

Esta transformación se realiza con una pérdida de masa. El átomo de helio obtenido tiene una masa inferior a la de cuatro átomos de hidrógeno. La pérdida de masa se transforma en energía, y se ha calculado que el Sol pierde por segundo 4.2 millones de toneladas de materia que se transforma en energía. La generación de energía proviene de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

donde:

E: cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m

c: es la velocidad de la luz (300.000 km/s)

Se deduce de la ecuación de Einstein ($E = mc^2$)

$$E = (4,2 \times 10^9 \text{Kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 3,78 \times 10^{26} \text{ J/s} , (1 \text{ J/s} = 1 \text{ W})$$

Ya que la Tierra está a una distancia media del Sol de 1.5×10^{11} m se calcula lo que recibe una superficie de 1 m^2 en la Tierra, relacionando la potencia producida por el Sol con respecto a la superficie esférica a la distancia que se ubica nuestro planeta.

$$I_{sc} = \frac{3,78 \times 10^{26}}{(4\pi)(1.5 \times 10^{11} \text{ m})^2}$$

$$I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$$

La radiación recibida fuera de la atmósfera terrestre es de 1353 W/m^2 , este valor recibe el nombre de *constante solar extraterrestre* I_{sc} , (el subíndice **sc** se usa para

la constante solar (del inglés solar constant); es definida como la cantidad de energía procedente del Sol por unidad de tiempo y área. La radiación recibida en la superficie terrestre es del orden de 1000 W/m^2 . La disminución de la radiación se produce por el paso a través de la atmósfera, interviniendo fundamentalmente tres factores:

- Gases atmosféricos (nitrógeno, oxígeno, ozono, etc.).
- Vapor de agua (nubes).
- Polvo (contaminación).

Se calcula que el Sol brillará 5000 millones de años más, por lo que, al menos mientras el ser humano viva en la Tierra y mucho más, no tendrá cambios importantes.

La energía solar es aprovechable térmicamente (calentando materiales sólidos, líquidos y gases) o fotovoltaicamente (generando electricidad mediante paneles especiales).

8.11 LA MEDICIÓN DE LA ENERGÍA DEL SOL: LA CONSTANTE SOLAR

La combinación de tres factores: la distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y la temperatura del Sol, determinan un flujo luminoso, i.e., un flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra.

Se llama flujo de “algo” (material, energía), la cantidad de ese “algo” que pasa a través de una superficie, por unidad de área y por unidad de tiempo. Por tanto, el flujo luminoso, que es en realidad un flujo de energía, tiene unidades de energía por unidad de área y por unidad de tiempo, por ejemplo, $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$, equivalentes a Wm^{-2} .

Mucho se ha discutido acerca de si el Sol emite un flujo de energía constante, o se trata de una estrella variable. Algunos estudios parecen indicar que la variación de la emisión de energía, por parte del Sol, es menor al 1% a lo largo de un ciclo solar terrestre, que dura 22 años. No se conoce a ciencia cierta la causa de estas variaciones. Sin embargo, para su aplicación en el campo de la ingeniería, la

emisión de energía en el Sol puede considerarse constante. El recurso energético solar está mucho más ligado, en la superficie terrestre, a las variaciones meteorológicas, que a las solares.

La radiación emitida por el Sol, junto con sus condiciones geométricas respecto de la Tierra, dan por resuelto que, sobre la atmósfera terrestre, incide una gran cantidad de radiación solar casi constante. Esto ha dado lugar a la definición de la llamada constante solar.

La constante solar, G_{sc} , es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera.

Aclaremos algunos puntos de esta definición:

- Primero, es un flujo de energía, es decir, la constante solar se refiere a una cantidad de energía que incide, instantáneamente, sobre una superficie de área unitaria.
- Segundo, esta superficie hipotética es perpendicular o normal a la dirección de propagación de la luz, lo cual en lenguaje no técnico equivale a decir que “ve al Sol”. Es obvio que una superficie en posición oblicua respecto de la dirección del Sol, recibiría un menor flujo de energía.
- Tercero, nuestra superficie hipotética se encuentra situada a la distancia media del Sol a la Tierra de 1.5×10^{11} m. Es claro que la distancia desde la fuente de radiación hasta el plano en cuestión, influye fuertemente en el flujo de energía. Todos sabemos que la intensidad de la radiación solar es mucho mayor en Mercurio que en la Tierra, y que en nuestro planeta es mucho mayor que en Plutón. Como la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, por lo tanto, la distancia Tierra-Sol no es constante, debe considerarse un valor promedio, para poder hablar de una constante.
- Por último, nuestra ya famosa superficie hipotética, debe estar colocada fuera de la atmósfera, para evitar la atenuación de la radiación causada por la diversidad de fenómenos físicos y químicos que se verifican en la atmósfera.

El valor comúnmente aceptado para G_{sc} ha variado en los últimos años, según las técnicas de medición que se han empleado, lo cual no indica que haya variado en sí la magnitud de la energía que se recibe del Sol. Y está es:

$$G_{sc} = 1.353 Wm^{-2}$$

Que en otras unidades equivale a:

$$G_{sc} = 1.940 \text{ cal/cm}^2\text{min} = 428 \text{ Btu/ft}^2\text{hora} = 4.872 \text{ kJ/m}^2\text{hora}$$

Estos valores fueron aceptados por la NASA (1971) y por la ASTM.¹⁶

8.12 LA RADIACIÓN NORMAL EXTRATERRESTRE

La radiación extraterrestre que incide sobre la Tierra está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio Sol.

Por un lado, la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino cuasi-elíptica. La pequeña excentricidad de la órbita hace que, alrededor del 4 de enero, cuando la Tierra se encuentra en el perihelio (mínima distancia al Sol) la radiación solar extraterrestre sea máxima. Por otro lado, alrededor del 1 de julio – seis meses después – la Tierra se encuentra en el afelio (máxima distancia al Sol) y entonces la radiación solar extraterrestre es mínima.

La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right]$$

Donde G_{on} es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación, y n es el número de día del año.

En la ecuación anterior, las normas para los subíndices son: el subíndice “**sc**” se usa para la constante solar (del inglés solar constant); el subíndice “**o**” se usa para la radiación extraterrestre, esto es, fuera de la atmósfera. Por último, el subíndice “**n**” se utiliza para la radiación medida en un plano normal a la dirección de

¹⁶ FERNÁNDEZ SALGADO, Op. cit., p. 25.

propagación de la radiación. De esta forma, el subíndice “on” se utiliza para la radiación extraterrestre observada en un plano normal a la radiación.

8.13 DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de su energía, sólo es importante la llamada **radiación térmica** que incluye sólo el ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la infrarroja (IR).

Todos los cuerpos emiten cierta cantidad de radiación en virtud de su temperatura. A mayor temperatura ocurren dos cambios en la radiación emitida:

1. La intensidad de la emisión es mayor, con un mayor número de energía por unidad de superficie (W/m^2).
2. El tipo de radiación cambia hacia una menor longitud de onda, esto es, del IR al VIS y al UV, a medida que aumenta la temperatura.

La fotosfera se encuentra a unos 6.000 K y, por tanto, emite un cierto flujo de energía correspondiente a esa temperatura. Su distribución espectral es como se indica en la Figura 8.

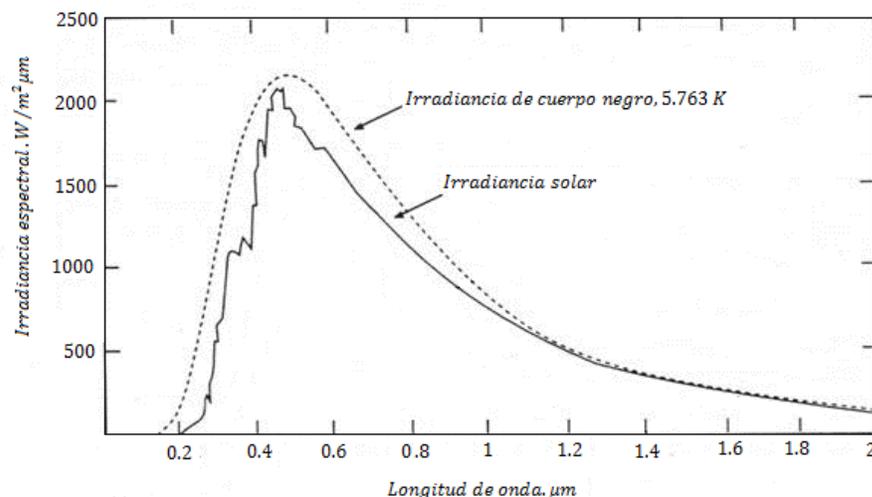


Figura 8. Irradiancia espectral del sol y de un cuerpo negro a 5.763 k. Fuente: Fernández Salgado J. M. Madrid: 2008. Mundi-Prensa.

Esta figura muestra la irradiancia espectral (energía por unidad de tiempo, en la unidad de área, por unidad de longitud de onda) en función de la longitud de onda. La línea continua pero irregular corresponde a la irradiancia observada, medida desde la Tierra.

La curva punteada representa la irradiancia espectral que tendría un cuerpo negro (radiador ideal), que se encontrara a la temperatura de 5.763 K. Esta temperatura corresponde a la que debería tener dicho radiador ideal, para tener la misma emisión de energía que el Sol.

8.14 VARIACIÓN DEL FLUJO DE ENERGÍA CON LA DISTANCIA

Cuando se tiene una fuente luminosa que emite en todas las direcciones, la intensidad luminosa o flujo de energía varía inversamente con el cuadrado de la distancia a la fuente emisora.

Una deducción muy sencilla de esta expresión, puede hacerse como sigue. Considérese una fuente luminosa cualquiera: una bombilla incandescente, una estrella, el Sol, que emite energía en forma homogénea en todas direcciones.

Considérense dos esferas concéntricas, de radio r_1 y r_2 , mucho mayores que el de la fuente luminosa, cuyo centro coincida exactamente con la posición de dicha fuente, Figura 9.

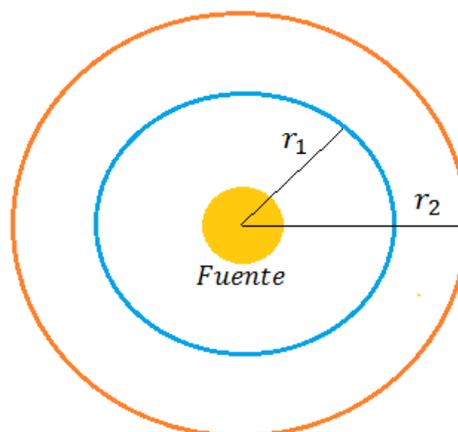


Figura 9. Variación del flujo de energía con la distancia

Supongamos que medimos la intensidad luminosa (flujo de energía) en la superficie de la esfera con radio r_1 , y llamemos ese valor G_1 . La potencia (energía por unidad de tiempo) que pasa a través de la esfera completa estará dada por G_1 multiplicada por el área de la esfera:

$$\text{Potencia}_1 = 4\pi r_1^2 G_1$$

Por otro lado, si llamamos G_2 a la intensidad luminosa medida a la distancia r_2 , tendremos, mediante el mismo razonamiento, que la potencia evaluada en la superficie de la esfera "2" es:

$$\text{Potencia}_2 = 4\pi r_2^2 G_2$$

Si además consideramos que el espacio que separa las dos esferas es perfectamente transparente, es decir, no absorbe radiación, entonces la misma energía por unidad de tiempo que atraviesa la esfera "1" debe atravesar la esfera "2".

Por tanto,

$$\text{Potencia}_1 = \text{Potencia}_2$$

Entonces,

$$4\pi r_1^2 G_1 = 4\pi r_2^2 G_2$$

La cual se reduce a la expresión:

$$r_1^2 G_1 = r_2^2 G_2$$

$$G_2 = \frac{r_1^2 G_1}{r_2^2}$$

donde r_1 y r_2 son las distancias correspondientes a los puntos en los que el flujo de energía es G_1 y G_2 .

Esta ecuación es de uso bastante general. Sirve para relacionar intensidades luminosas producidas por lámparas a ciertas distancias (útil en fotografía, por ejemplo), lo mismo que para calcular la constante solar en diversos planetas. Sin embargo, no se aplica para luz emitida por medio de reflectores parabólicos,

láseres, etc., cuya emisión es dirigida y no cumple con la hipótesis de disiparse en todas direcciones.¹⁷

8.15 ENERGÍA RENOVABLE

En el sentido formal, energía es la capacidad de realizar un trabajo. Se llama energía renovable la que puede aprovecharse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible (en la Tierra) no disminuye y se renueva a medida que se aprovecha. Como se sabe, la principal fuente de energía renovable es el Sol. En la atmósfera terrestre se convierte en una variedad de efectos, algunos tienen importancia como recurso energético, tal es el caso de la energía eólica (del viento), la energía de la biomasa (organismos vegetales y animales), la energía hidráulica (movimiento del agua en las corrientes de ríos), la diferencias de temperaturas en los océanos y la energía de las olas del mar.

En contraparte, una fuente de energía no renovable es aquella que está almacenada en cantidades inicialmente fijas, usualmente en el subsuelo. Estos recursos se agotan conforme se consumen. El petróleo, la madera, el gas natural, el carbón mineral y el uranio constituyen estas fuentes. Las reservas disponibles dependen de la factibilidad técnica y económica de su explotación, del descubrimiento de nuevos yacimientos y del ritmo de extracción y consumo.

8.16 CLIMA

Conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan durante un largo periodo el estado medio de la atmósfera y su evolución en un lugar dado; puede entenderse como consecuencia directa de la acción del Sol sobre la Tierra. El clima de una región resulta de la combinación de las diversas propiedades de la atmósfera (humedad, temperatura, viento, presión atmosférica, etc.) durante un largo periodo.

La medición de los parámetros climatológicos depende de complejas interacciones tecnológicas en Tierra, mar y aire. Ofrecen datos esenciales para predicciones, avisos meteorológicos y cálculo de recursos energéticos renovables.

¹⁷FERNÁNDEZ SALGADO, Op. cit., p. 25.

8.17 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR

8.17.1 La radiación solar terrestre. Para alcanzar la superficie terrestre la radiación solar debe atravesar la atmósfera donde experimenta diversos fenómenos de reflexión, absorción, y difusión que disminuyen la intensidad final. La radiación que llega directamente del Sol es la denominada “radiación directa” y la que previamente es absorbida y difundida por la atmósfera (muy significativa, por ejemplo, en días nublados) es la “radiación difusa”.

La radiación solar, tanto directa como difusa, se refleja en todas las superficies en las que incide dando lugar a la “radiación reflejada”. La reflexión dependerá de las características y naturaleza de la superficie reflectora. La radiación solar global es la suma de los tres tipos antes citados, directa, difusa y reflejada, y es la que podemos aprovechar para su transformación térmica.

Las proporciones de radiación directa, dispersa y reflejada recibida por una superficie determinada dependen:

- De las condiciones meteorológicas (de hecho, en un día nublado la radiación es prácticamente dispersa en su totalidad; en un día despejado con clima seco predomina, en cambio, la componente directa, que puede llegar hasta el 90% de la radiación total).
- De la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal (una superficie horizontal recibe la máxima radiación dispersa – si no hay alrededor objetos a una altura superior a la de la superficie – y la mínima reflejada)
- De la presencia de superficies reflectantes (debido a que las superficies claras son las más reflectantes, la radiación reflejada aumenta en invierno por efecto de la nieve y disminuye en verano por efecto de la absorción de la hierba o del terreno).

En función del lugar, además, varía la relación entre la radiación dispersa y la total, ya que al aumentar la inclinación de la superficie de captación, disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada. Por ello, la inclinación que permite maximizar la energía recogida puede ser diferente dependiendo del lugar.

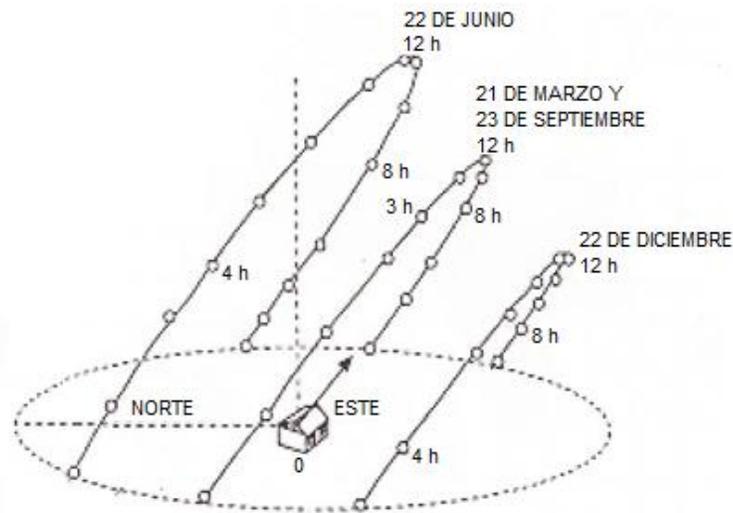


Figura 10. Trayectorias estacionales del Sol para un punto situado a 40° de latitud Norte. Fuente: Fernández Salgado J. M. 2008. Mundi-Prensa.

La posición óptima, en la práctica (para el hemisferio Norte), se obtiene cuando la superficie está orientada al Sur, con ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar: la orientación al Sur, de hecho, maximiza la radiación solar captada recibida durante el día y si la inclinación es igual a la latitud hace que sean mínimas, durante el año, las variaciones de energía solar captadas debidas a la oscilación de 23.5° de la dirección de los rayos solares respecto a la perpendicular a la superficie de recogida.

La Figura 10, muestra las trayectorias estacionales del Sol para un punto situado a 40° de latitud Norte. La radiación directa será mayor cuando la incidencia de los rayos solares sea perpendicular a la superficie.

Si llamamos I_D a la radiación directa, I_S a la dispersa e I_R al albedo, entonces resulta que la radiación solar total (I_T) que cae sobre una superficie es:

$$I_T = I_D + I_S + I_R$$

Como hemos visto, esto implica que los valores de la radiación solar total sobre cada punto serán variables. No obstante, este valor también depende de la ubicación concreta de la superficie y de la distancia al Sol, es decir, del día del año. En este sentido, existe una referencia de lo que se refiere a la radiación solar directa que se recibe sobre una superficie horizontal.

En general, los datos de irradiación solar de los que se dispone, son en el mejor de los casos, valores de irradiación global horaria sobre la superficie horizontal. Para estimar la irradiación global sobre superficies inclinadas es necesaria la utilización de modelos matemáticos. En este caso es necesario, en primer lugar descomponer la irradiación global horizontal en sus componentes directa y difusa horizontales.

Una vez se tienen estos valores de irradiación directa y difusa horizontal es posible calcular la irradiación directa sobre una superficie inclinada por métodos geométricos. Para ello es imprescindible conocer con exactitud la hora solar en la ubicación a estudiar. Si el estudio se realiza sobre un sistema con seguimiento solar será necesario integrar los valores para cada instante, según evoluciona la hora solar. Frente al cálculo de la irradiación global total, el empleo de distintos modelos matemáticos da como resultado ligeras variaciones, que se verán acentuadas en el caso de superficies con seguimiento solar.¹⁸

La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe el Sol. Por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa.

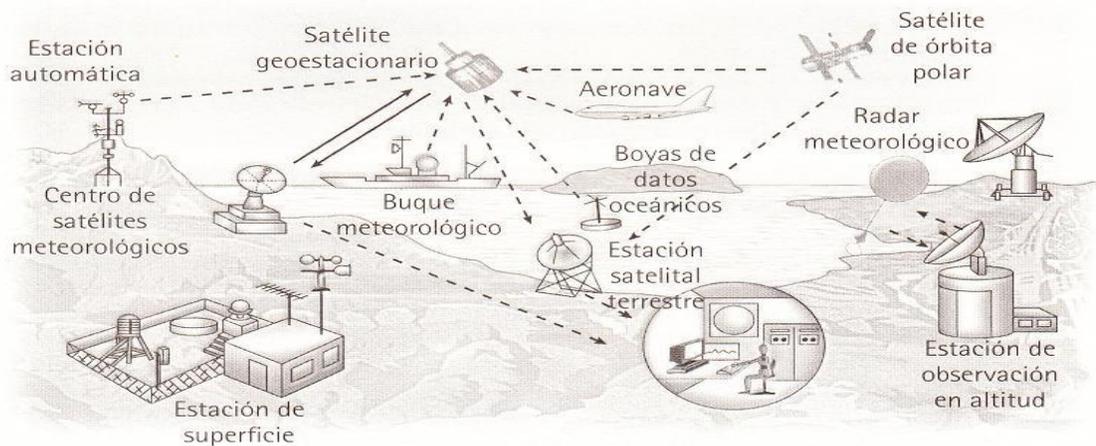


Figura 11. Fuente: Guillén Solís. Medición de la radiación solar. [Figura] México: 2004. Trillas.

El Sol puede considerarse como un gran reactor de fusión en el que cada segundo 700 millones de toneladas de hidrógeno son transformadas en helio. La radiación difusa, en un día despejado, es la que proviene del cielo azul. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las nubes

¹⁸ Compendio de Energía Solar. Cap. 2 Pág. 25 - 32

densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes es únicamente radiación difusa. Conviene definir las siguientes relaciones útiles:

$$\text{radiación total} = \text{radiación directa} + \text{radiación difusa} + \text{albedo}$$

$$\text{radiación global} = \text{radiación directa} + \text{radiación difusa}$$

Para muchas aplicaciones prácticas no basta con calcular la radiación teórica que incide sobre un lugar o sobre un equipo solar determinado, Figura 11. Es necesario hacer las mediciones, para así tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector. El método más aceptado comúnmente es el uso de un Piranómetro o Solarímetro.



Figura 12. Piranómetro o Solarímetro. Fuente: sitio web: <http://www.fices.unsl.edu.ar/~p-59703/solar/glosario%20rad2.htm>

Un piranómetro es un instrumento para medir la irradiancia global, ubicado sobre una superficie horizontal. Su elemento fundamental es una termopila (sensor de temperatura que transforma su lectura a impulsos eléctricos) sobre la cual incide la radiación a través de dos cúpulas semiesféricas de vidrio. Se llama también solarímetro o actinómetro.

8.17.2 Energía solar térmica

8.17.2.1 La captación térmica. Se entiende por captación térmica de la energía solar al procedimiento de transformación de la energía radiante del Sol en calor o energía térmica. Nos referiremos a aplicaciones de la energía solar a baja

temperatura cuando la energía térmica que se obtiene se utiliza para temperaturas inferiores a 80°C.

Se pretende de esta forma obtener a partir del Sol una energía que podremos utilizar en aplicaciones térmicas: calentar agua sanitaria, usos industriales, calefacción de espacios, calentamiento de piscina, secaderos, etc.

La mayoría de las aplicaciones de la energía solar, particularmente las que proporcionan un servicio que se necesita de manera continua, requiere al menos dos elementos: un “colector”, en donde se transforme la luz solar en el efecto deseado, y un almacén, en donde se pueda tener una “reserva” del efecto deseado, para cuando no hay insolación.

El colector es una superficie, que expuesta a la radiación solar, permite absorber su calor y transmitirlo a un fluido. Existen tres técnicas diferentes en función de la temperatura que puede alcanzar la superficie captadora. La decisión de cuál colector emplear en un diseño depende de las temperaturas que se necesitan obtener; se pueden clasificar como:

- Colectores solares de baja temperatura.
- Colectores solares de media temperatura.
- Colectores solares de alta temperatura.

8.17.2.2 Colectores solares de baja temperatura. La captación de la energía solar es directa. La temperatura del fluido está por abajo del punto de ebullición del agua al nivel del mar (100°C). Generalmente entre 40 y 60°C.

Principales características: El aprovechamiento térmico a baja temperatura se realiza mediante colectores planos cuya característica común es que no tiene poder de concentración, es decir, la relación entre la superficie externa del colector y la superficie captadora interior es prácticamente la unidad.

Consta de los siguientes elementos:

- *Cubierta exterior.* En general, formada por una lámina de cristal, lo más transparente posible, aunque a veces es sustituida por algún tipo de plástico (Tedlar, EVA*). Se pueden encontrar con varias capas de cristales y evitar así pérdidas de calor, pero hace más costoso el colector. Es la parte más propensa a la rotura, ya sea por agresiones externas o por efecto de la dilatación del cristal.
- *Placa absorbente.* Placa plana pintada de negro para aumentar su poder de absorción y disminuir la reflexión. Se pueden encontrar los tubos para el fluido caloportador que van soldados a la placa o sencillamente son parte de ella.
- *Aislamiento.* Es el recubrimiento en todos los lados del panel, excepto en la parte acristalada, que evita pérdidas térmicas. El material es cualquier tipo de aislante (fibra de vidrio, poliuretano) y el grosor depende de la aplicación, del lugar y del tipo de aislante.
- *Caja exterior.* Alberga a todos los componentes (cubierta exterior, placa absorbente, aislamiento) generalmente de aluminio, por ligero y anticorrosivo.

8.17.2.3 Colectores solares de media y alta temperatura. En los colectores solares de baja temperatura la captación de energía tiene bajo índice de concentración, la temperatura de fluido es más alta de 100 y hasta 300°C. En colectores solares de alta temperatura la captación energética se da con un alto índice de concentración, la temperatura del fluido es mayor a 300°C.

Principales características: Para obtener altas temperaturas es necesario recurrir a colectores especiales porque con los planos es imposible. Éstos son colectores de concentración cuya finalidad no es más que aumentar la radiación por unidad de superficie. Hay varias formas y sistemas, pero la característica común a todos es que necesita orientación.

Existe gran variedad de colectores concentrados. Todos pueden clasificarse en dos categorías básicas: los de enfoque y los fijos o semifijos. Los concentradores de enfoque constan fundamentalmente de tres partes:

- El concentrador o sistema óptico.
- El receptor donde está el absorbedor.
- Mecanismo de seguimiento para el Sol.

Los de enfoque necesitan forzosamente un mecanismo para seguir al Sol. Con ellos pueden lograrse altas temperaturas en el absorbedor. Los fijos o semifijos no necesitan dicho mecanismo, pero sólo pueden obtenerse temperaturas moderadas.

Este tipo de colectores solares tiene las siguientes partes:

- *Superficie reflectora.* Constituida por una lámina reflectora, generalmente *Mylar*, *Hostafilon* u otro material plástico de características similares; también pueden ser de vidrio con recubrimiento de espejo, éstos no son muy usuales porque tienen que soportar las inclemencias del medio y es difícil la fabricación de forma curvada. En todos los casos deben tener una capacidad de reflexión alta.
- *Superficie absorbente.* Dependen de la forma de la superficie reflectora, pero en general son de forma cilíndrica o plana pintadas de negro o recubiertas con una capa de material selectivo.
- *Cubierta protectora.* Protegen a la superficie absorbente y casi nunca a la superficie reflectora; el aislante habitual es el vacío.

El sistema de seguimiento solar (orientación) puede ser de varios tipos:

- De movimiento longitudinal, de un eje, con movimiento de Este a Oeste.
- De movimiento latitudinal, de un eje, con movimiento de Norte a Sur.
- De movimiento completo, de dos ejes; puede orientarse en todas direcciones.

También es importante considerar la forma de la superficie reflectora, que puede ser:

- *Concentradores cilindro-parabólicos compuestos (CPC)*. Están constituidos por dos ramas de parábola, cuyos focos se encuentran en el extremo de la rama opuesta.
- *CPC sin truncar*. En éstos las ramas de parábola son simétricas y cubren ángulos iguales a ambos lados de la superficie reflectora.
- *CPC truncados*. Las ramas de parábolas no son simétricas, tienen truncadas una o ambas ramas
- *CPC asimétricos*. Como indica su nombre, no tienen simetría respecto del eje del concentrador.

8.17.2.4 Tipos especiales de colectores solares de concentración. Existen muchas aplicaciones, sobre todo en la industria, donde se necesita que la energía se libere a altas temperaturas. Con estos colectores pueden obtenerse temperaturas entre 100 y 500°C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500°C si el sistema óptico de los colectores tiene buen acabado, y entre 1500 y 3500°C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

El acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico no sólo debe ser de buena calidad, sino que deben conservarse sus propiedades por largos periodos sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos. También la demanda de los materiales utilizados en el receptor (aislante térmico, fluido de trabajo, tubos absorbedores y cubiertas) son mayores en este tipo de colectores, debido a que es ahí donde se obtienen las altas temperaturas.

Colectores Paraboloidales: Están formados por una paraboloides (parábola girando sobre un eje en el espacio) y dotados de una geometría muy compleja de fabricar. Llegan a tener la posibilidad de concentrar la energía solar hasta 2000 veces, aproximadamente.

Deformación elástica de membrana: Formada por membranas metalizadas, montadas sobre una estructura parecida a la de un tambor. Adquiere una forma parecida a un paraboloides cuando son sometidas a una depresión mediante vacíos.

Lentes de Fresnel: Puede lograrse una alta razón de concentración mediante los sistemas que utilizan lentes de Fresnel. Consisten en un conjunto de lentes colocadas en una sola unidad de concentración y cada segmento de lentes concentra, mediante refracción, la radiación solar incidente en un receptor posicionado centralmente. Los concentradores logran ser lineales y circulares. Los que utilizan lentes Fresnel lineales pueden colocarse en hileras y necesitan sólo un seguimiento unidimensional del Sol.

Hoy día se fabrican lentes de Fresnel en acrílico vaciado, con alta calidad óptica, aunque la incidencia directa de la radiación solar los deteriora.

Colectores por deformación elástica de membrana: Están formados por membranas metalizadas montadas sobre una estructura, parecida a la de un tambor. Adquieren una forma parecida a un paraboloides cuando son sometidas a una depresión mediante vacíos.

Espejos planos con un punto común de concentración de energía: Es la distribución de un grupo de colectores solares altamente reflejantes con un sistema de seguimiento solar que enfocan el rayo reflejado en un solo punto de un edificio receptor que trasmite una alta temperatura hacia sus aplicaciones, por ejemplo, fundición de metales. Dicho edificio colector de energía recibe el nombre de “helióstato”.

Muro Trombe: Es un muro de color oscuro orientado al Sol, ver Figura 13, utilizado para acumular calor. Llamado así en honor a M. Trombe, quien diseñó una casa en el sur de Francia con este tipo de elemento tan peculiar. Dicho muro es un colector solar para aire, integrada en la fachada del edificio. Consiste en un muro grueso con orificios para entrada y salida de aire y un aislamiento térmico. Cumple con las siguientes especificaciones:

- Debe estar orientado para tener la máxima insolación.
- Se pinta de negro o de un color oscuro si es que se desea mejorar la estética de la vivienda.
- A 10 o 15 cm del muro se colocan cristales, se deja la zona cerrada también por los costados y la parte superior se deja móvil, para que se pueda abrir y cerrar.
- Los orificios en el muro deben ir en las partes superior e inferior. Si se trata de edificios de varias plantas es conveniente que el orificio en el exterior del muro coincida con la parte de la vivienda en el interior.

El comportamiento es de lo más sencillo:

En invierno, con el acristalado completamente cerrado, los rayos solares atraviesan el cristal y calientan el muro, de la misma manera que se calienta el aire cercano al muro. El aire calentado tiende a subir y penetra por el orificio superior a la vivienda. El aire frío, por convección, sale por el orificio inferior, se calienta de nuevo y se repite el ciclo.

En verano, con la parte superior del acristalamiento abierta y el orificio superior del muro cerrado con una ventana abierta en el lado opuesto de la radiación solar, los rayos solares atraviesan el cristal y calientan el muro. El aire cercano al muro se calienta y tienden a irse por la parte superior del acristalamiento. El aire que se va es el del interior de la casa, que sale por el orificio inferior. El mismo aire que se va tiene que entrar, y es por la ventana, contraria a la radiación solar, es decir aire fresco.

En el muro Trombe también puede servir de acumuladores de calor, pero para ello es necesario incorporar recipientes de agua en el interior del muro. El muro y el agua de los recipientes se calientan de día y descargan su calor por la noche. Esto se debe a la propiedad del calor específico del agua, absorbe y cede calor con lentitud.

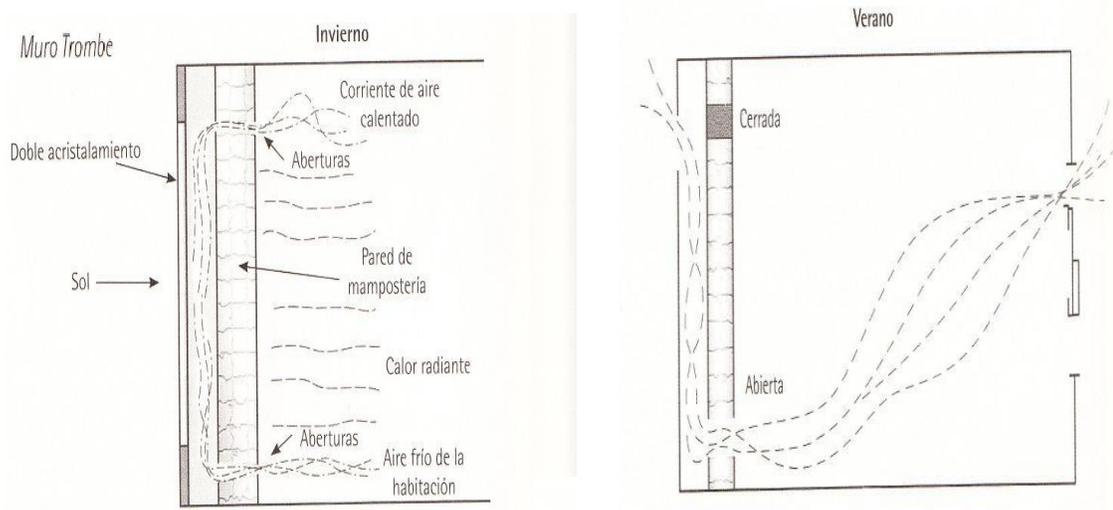


Figura 13. Muro Trombe. Fuente: O. Guillén Solís. México: 2004. Trillas.

8.17.3 Energía solar fotovoltaica. El sistema de aprovechamiento de la energía del Sol para producir energía eléctrica se denomina *conversión fotovoltaica*. La energía eléctrica no está presente en la naturaleza como fuente de energía primaria y, en consecuencia, sólo puede disponerse de ella si se obtiene por transformación de alguna otra forma de energía.

Es posible obtener electricidad mediante dispositivos especiales llamados “paneles fotovoltaicos” que transforman la energía solar en electricidad de modo directo, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía. De lo anterior, puede decirse que las células solares o celdas fotovoltaicas son dispositivos capaces de transformar la radiación solar en electricidad, de un modo directo. Estos dispositivos son estáticos y en absoluto semejantes a los generadores convencionales a partir de combustibles fósiles.

Cada panel fotovoltaico está formado por pequeños componentes llamados celdas fotovoltaicas que, en conjunto, generan electricidad por medio del efecto de Seebeck; el cual se basa en la conversión de una diferencia de temperatura en electricidad, en un circuito formado por dos metales o semiconductores diferentes, A y B, con dos uniones a diferente temperatura, T_1 y T_2 , aparece una diferencia de potencial V . Ver Figura 14.

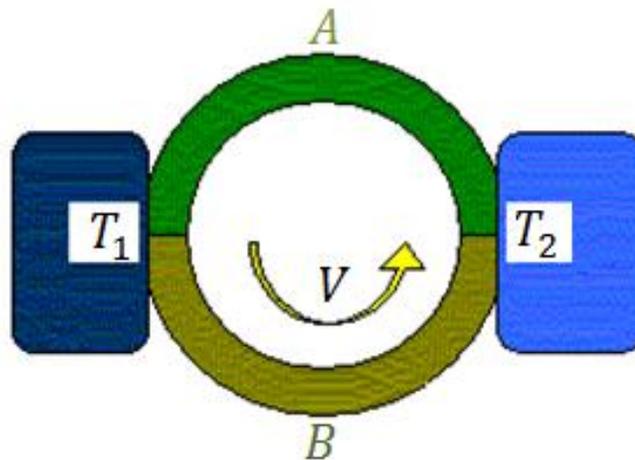


Figura 14. Efecto de Seebeck. Fuente: sitio web: [http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE\(c\).htm#s](http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE(c).htm#s)

8.17.3.1 Propiedades de los semiconductores. Las celdas fotovoltaicas están fabricadas de materiales con propiedades específicas, denominados semiconductores. Para entender su funcionamiento, a continuación se explican las propiedades de los semiconductores.

La celda fotovoltaica es el elemento fundamental para la conversión directa de la energía solar en eléctrica. En su estructura más simple (y la más utilizada comercialmente hoy día), las celdas están constituidas por dos capas de material semiconductor, una positiva y otra negativa. Cuando las partículas de luz conocidas como fotones impactan en la celda, alguna de ellas es absorbida por el material semiconductor y producen un exceso de electrones libres en la capa negativa. Los electrones libres pueden fluir hacia la capa positiva si existe un circuito externo que permita su paso.

La corriente eléctrica producida por este proceso es proporcional a la densidad de potencia de la radiación solar incidente en la celda y al área de la misma. En resumen, para que una célula solar expuesta al Sol produzca energía eléctrica debe reunir las siguientes características fundamentales:

- Ser capaz de absorber una fracción importante de la radiación solar para que la generación de pares electrón-hueco sea eficiente.
- Tener un campo eléctrico interno que separe las dos cargas impidiendo su posterior recombinación.
- Finalmente, las cargas separadas deben ser capaces de viajar a través de la oblea hasta los electrodos superficiales desde donde pasan al circuito exterior.

Aunque en la práctica las células solares de uso más generalizado son las de silicio monocristalino, ya se han ensayado y desarrollado gran variedad de nuevos tipos, modelos y conceptos de células solares. Éstas se pueden fabricar de diferentes geometrías según las necesidades. Entre ellos se pueden destacar: silicio policristalino, silicio amorfo, policristalinos de lámina delgada, sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre, telurio de cadmio, seleniuro de cobre e indio, arseniuro de galio o de concentración.

Los actuales electrodos transparentes de película delgada utilizan materiales tales como el ITO (Indium-Tin Oxide) que tiene disponibilidad limitada, son relativamente quebradizos, requieren de vacío y calor para su procesamiento, padecen disgregación laminar y problemas de compatibilidad química, y son relativamente costosos.

El material ideal del electrodo transparente debería tener alta conductividad laminar y ser superior al 90% de transparencia, estar hecho de materiales que sean abundantes y no tóxicos, ser flexibles y tener excelente adhesión, y ser económicamente procesables de manera que sea compatible con materiales orgánicos. Las redes nanotubulares de carbón tienen el potencial para ser significativamente superiores en rendimiento, así como también el de ser menos costosas que el ITO.

Los resultados experimentales preliminares con redes nanotubulares de carbón son prometedores. En el área de flexibilidad y adhesión, los electrodos de redes nanotubulares de carbón claramente superan los ITO.

Las celdas solares sobre sustratos poliméricos flexibles pueden alcanzar 5 mm de curvatura sin degradación utilizando electrodos nanotubulares de carbono, mientras que celdas solares que utilizaron electrodos ITO fueron destruidos con este radio de curvatura. Los resultados sobre eficiencia también son prometedores, con las primeras celdas solares nanotubulares de carbón se obtuvo un 2,5% de eficiencia, al contrario del 3,0% logrado para las celdas solares ITO.¹⁹

8.17.3.2 Conformación de elementos fotovoltaicos. Para formar los módulos, las celdas se interconectan y se encapsulan. Se utilizan capas de varios materiales. En el módulo terminado las celdas y sus conexiones están aisladas eléctricamente y protegidas del medio, tiene buenas propiedades mecánicas, puede ser rígido o flexible y su vida útil es superior a 20 años.

Los módulos se interconectan, a su vez, para formar arreglos fotovoltaicos cuya capacidad va desde cientos hasta millones de watts. Los arreglos se montan en estructuras que permiten orientar su superficie de captación para optimizar la incidencia de radiación solar.

¹⁹ Gary C. Bjorklund y Baer Thomas M. (Traducido por Dr. en Ciencias J. P. Valcárcel). Investigación sobre celdas solares de película delgada orgánica en la Universidad de Stanford. En: Revista entornos. Neiva. Septiembre, 2008, No. 21, p. 100-101

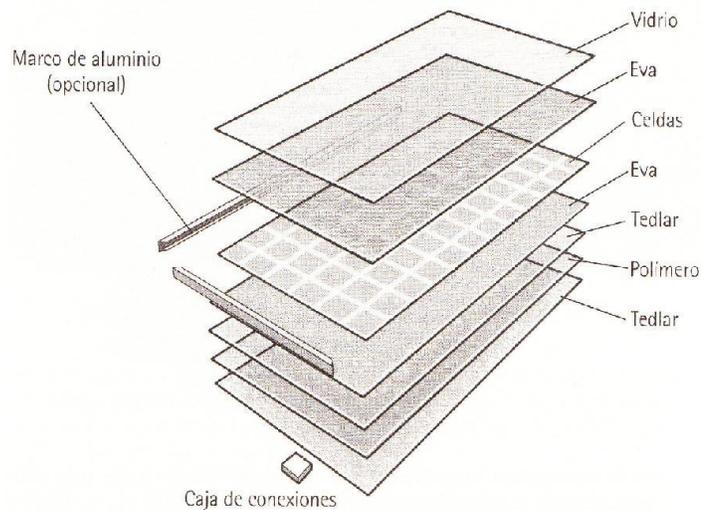


Figura 15. Conformación de elementos fotovoltaicos. Fuente: O. Guillén Solís. México: 2004. Trillas.

8.17.3.3 Aplicaciones de la tecnología fotovoltaica. Desde un punto de vista histórico el motivo de construcción de las celdas fotovoltaicas fueron los satélites artificiales. La idea era construir un generador eléctrico para alimentar los equipos de toma de datos que llevaban a bordo, que presentara ventajas con respecto a otros generadores como los termoeléctricos y las pilas de combustibles. De hecho, las ventajas encontradas en este tipo de generadores fueron: peso reducido, larga vida, ocupación de espacio mínimo y nivel de insolación alto y continuo por estar fuera de la atmósfera terrestre, aunque sus costos eran muy altos. Para aplicaciones terrestres el factor económico era muy importante si se deseaba tener una aplicación más generalizada y, por tanto, desde esos años (1972-1973), se inició una carrera cuya meta era la simplificación y el descubrimiento de nuevas tecnologías, procesos e investigación de nuevos materiales, que condujeran a abaratar las células solares y demás componentes del generador fotovoltaico.

Dichos esfuerzos han rendido frutos y hoy día los precios han bajado notablemente y existen muchas aplicaciones de las células solares, las cuales se mencionan a continuación:

- *Electrificación solar y de viviendas aisladas.* Existen muchas zonas rurales y viviendas aisladas donde llevar la energía eléctrica convencional, pero por medio de la red general sería demasiado costoso y, por tanto, no cuentan con este servicio. En este caso, la instalación de un generador fotovoltaico es ampliamente rentable.

- *Comunicaciones.* Los generadores fotovoltaicos son una excelente solución cuando hay necesidad de transmitir cualquier tipo de señal o información desde un lugar aislado, por ejemplo, emisores de señales de TV, plataformas de telemetría, enlaces por radio, estaciones meteorológicas.
- *Ayudas a la navegación.* Aquí la aplicación puede ser relativa a la navegación misma o a sus señalizaciones, como alimentar eléctricamente faros, boyas, balizas, plataformas y embarcaciones.
- *Transporte terrestre.* Iluminación de cruces de carretera peligrosos y túneles largos. Alimentación de radioteléfonos de emergencia o puestos de socorro lejos de líneas eléctricas. Señalizaciones de pasos a desnivel o cambio de vías en los ferrocarriles.
- *Agricultura y ganadería.* Se está dando una atención muy especial en estos sectores. Mediante generadores fotovoltaicos puede obtenerse la energía eléctrica necesaria para granjas que conviene que estén aisladas de zonas urbanas por motivos de higiene. Sin embargo, la aplicación más importante y de futuro es el bombeo de agua para riego y alimentación de ganado que usualmente se encuentran en zonas pobladas. Otras aplicaciones pueden ser la vigilancia forestal para prevenir incendios.
- *Aplicaciones en la industria.* Una de las principales aplicaciones en este campo es la obtención de metales como el cobre, aluminio y plata por electrólisis y la fabricación de acumuladores electroquímicos.
- *Difusión de la cultura.* Televisión escolar para zonas aisladas. Difusión de información mediante medios audiovisuales alimentados eléctricamente mediante generadores fotovoltaicos.

Es conveniente mencionar que hoy día también se trabaja con generadores mixtos o híbridos, esto es, adaptar el generador fotovoltaico con otros generadores ya existentes como los eólicos o los generadores diesel. Actualmente se han construido algunas centrales fotovoltaicas que proporcionan potencia considerable y pueden ser rentables en ciertos casos, comparadas con las centrales tradicionales como las termoeléctricas o hidráulicas.

8.18 OTRAS APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR

8.18.1 Estanque solar. Los estanques solares son un sistema para almacenar energía solar en forma de calor de un modo sencillo y económico. Permiten el almacenamiento en largos periodos. Consiste en:

- Lagos o estanques donde penetra la radiación solar y calienta el agua salobre.
- El agua al calentarse en su parte inferior, empieza a fluir vertical y circularmente volviéndose menos denso que el resto del líquido, ascendiendo por convección.
- En la superficie es más denso, frío y pesado.

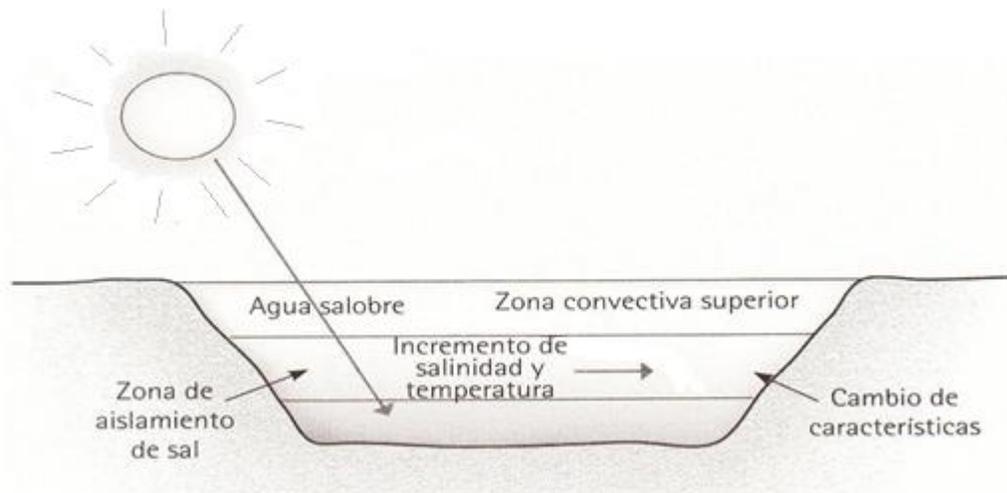


Figura 16. Estanque solar. Fuente: O. Guillén Solís. México: 2004. Trillas.

Estos fenómenos ocurren por convección, que es el modo más común de transporte de calor en los fluidos. Si se logra impedir la convección, la zona de agua caliente no tendrá flujo vertical y no habrá circulación, no podrá ascender o descender. Así se almacena agua caliente.

El estanque solar está formado por tres capas:

- La capa superficial, que es convectiva a causa de la lluvia, del viento, de la evaporación, etcétera.

- La capa intermedia, que no es convectiva, es donde se acumula el agua caliente.
- La capa inferior, que es convectiva, trasmite calor al fondo del estanque o lago.

8.18.2 Potabilización de agua. Mediante las diversas variantes de esta técnica es posible producir agua potable a partir de agua contaminada. Como esto puede lograrse mediante tecnología relativamente simple, esta aplicación resulta especialmente útil para regiones alejadas de las comodidades de la civilización, como islas y regiones costeras poco comunicadas. También pueden encontrarse aplicaciones factibles en otros lugares.

Según el grado de contaminación del agua existen diversas tecnologías solares para su purificación. En general, los sistemas solares para purificar agua son capaces de eliminar sólo cantidades relativamente pequeñas de contaminación excepto, quizá, de los que se utilizan para purificar agua de mar. Los destiladores solares no son adecuados para purificar aguas negras ni residuos industriales.

Son adecuados para potabilizar aguas superficiales (ríos, lagos), aguas subterráneas o agua de mar.

Básicamente habría que considerar dos niveles de contaminación para los cuales son adecuados:

- *Agua con contaminación microbiana ligera.* Para este caso es posible eliminar la contaminación microbiana mediante calentamiento en un calentador solar que opera en condiciones adecuadas para ello. Para eliminar los microorganismos basta pasar de los 60°C, sostenido durante varios minutos.
- *Agua contaminada con sales disueltas.* El caso más común es el del agua de mar, pero también puede presentarse este problema en aguas continentales, salobres o con algún residuo específico indeseable. Algunos ejemplos son: arsénico, residuos de fertilizantes en muchas norias de regiones agrícolas, residuos sulfurosos en aguas termales, entre otros.

La desalación por evaporación y condensación es la idónea de aplicar en un sistema de energía solar. Simplemente se coloca el agua en un recipiente donde se pueda calentar mediante algún efecto solar, puede ser por irradiación directa, o

utilizando colectores. Al calentarse el agua se evapora, deja sales y después se condensa en alguna parte del equipo donde no pueda mezclarse con el agua contaminada.

Se llama *destilado* o *salmuera* al agua contaminada cuyas sales o microorganismos se desea eliminar. Mediante el proceso de la destilación solar se obtiene el destilado, que es, simplemente, el agua condensada, ya sin sales.

8.18.3 Secado solar. Muchos productos agrícolas necesitan un secado posterior a la cosecha para su adecuada conservación hasta que llegan a los centros de consumo. Aun en el caso de los productos que se comercializan frescos, el secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción y poca demanda.

El secado al aire libre, en que los productos se exponen directamente al Sol colocados en el suelo, es uno de los usos más antiguos de la energía solar y es aún uno de los procesos agrícolas más comunes en nuestro país y en muchos otros. Este procedimiento es de muy bajo costo pero puede producir considerables mermas ocasionadas por las lluvias y el ataque de insectos y animales. Además, la contaminación de polvos e insectos afecta la calidad del producto.

En regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial en gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y los mayores precios de los combustibles han despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de la energía solar. Se trata de desarrollar diversas técnicas que permitan solucionar los problemas mencionados en relación con el secado al aire libre.

Secar significa eliminar el agua presente en cierto material. El término se emplea también al extraer líquidos orgánicos de materiales sólidos. El secado es un proceso en que se intercambian calor y masa. Implica la transferencia de un líquido procedente de un sólido húmedo a una fase gaseosa. Incluye una operación energética elemental y representa una de las acciones básicas en la industria de la transformación y agroalimentaria.

El secado o deshidratación de alimentos se usa como técnica de preservación porque los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y desarrollarse sin agua.

Una de las maneras más simples para lograr el secado es exponer el material húmedo a una corriente de aire con determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad. Cuanto más seco y más caliente esté el aire, mayor será la velocidad de secado. El calor se añade por contacto directo del producto que se va a secar con aire caliente a presión atmosférica y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.

8.18.4 Acondicionamiento térmico de albercas. Los requerimientos de temperatura de una alberca van desde 22°C en una alberca deportiva hasta 30°C en una alberca para niños. Mantener la temperatura dentro de estos límites consume demasiada energía. Debido a esto y al constante incremento de precios de la principal fuente de energía utilizada, los hidrocarburos, muchos de los sistemas tradicionales (calderas a combustóleo y calentadores de gas) para calentar albercas han dejado de utilizarse.

Cuando las albercas tienen algún tipo de calentamiento auxiliar sólo tienen una temperatura agradable varios meses del año, y rara vez se encuentran lo suficientemente tibias durante la tarde o muy temprano. Esto ha obligado a buscar nuevos caminos de uso de energía y se ha encontrado que el uso de la energía solar encuentra aquí un campo de aplicación muy interesante, ya que la utilización adecuada y eficiente de la energía solar puede suministrar toda la energía necesaria para mantener la temperatura de la alberca dentro de un rango aceptable.

El principio de funcionamiento es simple.

- Con la bomba de recirculación existente el agua de la alberca es dirigida a través de válvulas a los colectores solares.
- El agua de la alberca entra al colector solar por abajo y sube a través de los tubos individuales del colector.
- Cuando el agua pasa a través del colector es calentada por la energía radiante del sol.
- El agua regresa a la alberca para repetir el ciclo hasta que ésta haya sido calentada por el sol. Paulatinamente el agua de la alberca alcanzará la temperatura deseada.

Están incluidas en esta configuración las tuberías necesarias, un control electrónico con sensores de temperatura y controles de arranque y paro de la bomba y los sistemas de fijación necesarios.

Es conveniente aclarar que esta aplicación permitirá ahorrar energía y no sustituirá totalmente al sistema convencional de calentamiento de agua, pero que un 70% de la energía empleada en un periodo promedio (un año por ejemplo) será de origen solar.

8.18.5 Refrigeración solar. Los sistemas que más se acoplan para utilizar la energía solar como fuente de energía son los de refrigeración por absorción. A continuación se explica el funcionamiento:

Si se consiguen dos recipientes interconectados por una válvula, cada uno tendrá una doble función. El primero como generador-absorbedor y el segundo como condensador-evaporador. El funcionamiento se puede dividir en dos etapas: de generación y de enfriamiento.

En la etapa de generación, el recipiente, que en este caso sirve como generador, inicialmente contiene una solución acuosa concentrada de amoníaco.

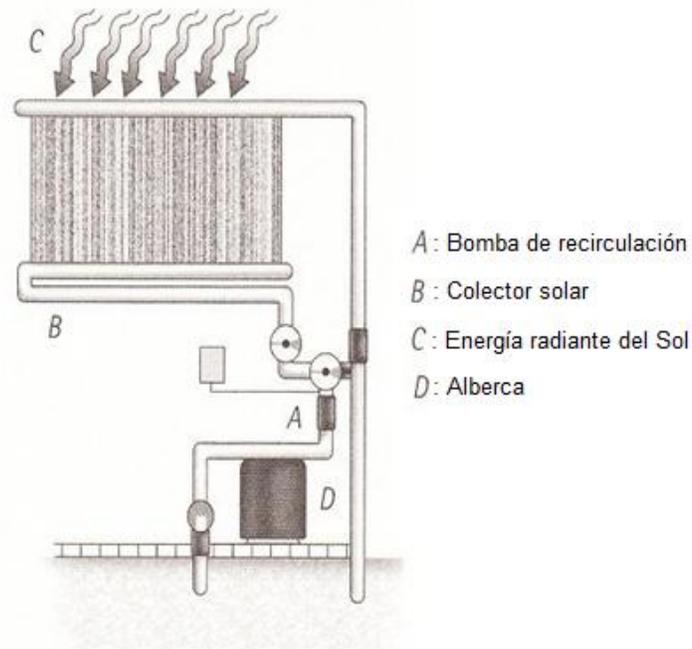


Figura 17. Refrigeración solar. Fuente: O. Guillén Solís. México: 2004. Trillas.

Ésta se calienta con energía solar de manera que se genera o produce vapor de amoníaco que después de pasar por la válvula se condensa en el otro recipiente, que en esta etapa sirve como condensador. Se enfría con aire o agua para lograr mantenerlo en estado líquido y a alta presión. Esta etapa se lleva a cabo mientras el flujo de energía solar es suficiente para continuar generando vapor de amoníaco. Debe considerarse que conforme transcurren las horas de sol la solución inicialmente concentrada se torna una solución débil y, por lo mismo, es más difícil seguir generando amoníaco.

Ya terminada la etapa de generación se cierra la válvula intermedia y se deja enfriar el primer recipiente que ahora contiene una solución débil de amoníaco y baja presión. En el condensador queda almacenado amoníaco líquido a alta presión listo para usarse en la etapa de enfriamiento. En esta etapa se vuelve a abrir la válvula intermedia. Al comunicar de nuevo los dos recipientes, la presión del sistema completo baja lo suficiente para que el amoníaco no pueda existir en estado líquido y pasa al estado gaseoso. Esto se hace en el segundo recipiente que sirve como evaporador. El amoníaco absorbe calor de los alrededores para pasar de líquido a vapor y, por tanto, es aquí donde se tiene el efecto de refrigeración.

El vapor de amoníaco pasa el primer recipiente y se absorbe en la solución diluida de amoníaco. Este recipiente ahora tiene la función de absorbedor. Hay que retirar el calor que se genera por la absorción para evitar que aumente la temperatura y se dificulte la absorción que afectaría el funcionamiento del sistema completo. Con esto se completan las dos etapas del ciclo intermitente de refrigeración y el sistema queda listo para iniciar un nuevo ciclo cuando vuelva a haber flujo de energía radiante.

Desde luego, un sistema real no es tan sencillo como lo anterior, y debe tenerse especial cuidado sobre todo en el diseño del colector de energía solar que contendrá la solución de amoníaco que se va a evaporar y en las interconexiones entre el colector-absorbedor y el condensador-evaporador²⁰.

8.19 EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

El efecto fotoeléctrico fue visto por primera vez en 1887, por Heinrich Hertz, quien observó que una descarga saltaba con más facilidad entre dos esferas cargadas

²⁰GUILLEN SOLIS, O. Energías Renovables: Una perspectiva ingenieril. México: Trillas, 2004. p. 9 – 36.

eléctricamente, cuando sus superficies se iluminaban con la luz de otra fuente luminosa. La luz que incide sobre las superficies facilita de alguna manera el escape de lo que hoy sabemos que son los electrones.

Esta idea en sí no era revolucionaria. Ya se conocía la existencia de la barrera superficial de energía potencial. Thomas Edison descubrió en 1883 la *emisión termoiónica*, en la que la energía de escape se suministra calentando el material a una temperatura muy alta; se liberan electrones mediante un proceso análogo a la ebullición de un líquido. La cantidad *mínima* de energía que debe ganar un electrón para escapar de determinada superficie se llama **función de trabajo** para esa superficie, y se representa con ϕ . Sin embargo, las superficies que utilizó Hertz no estaban a las altas temperaturas necesarias para la emisión termoiónica.

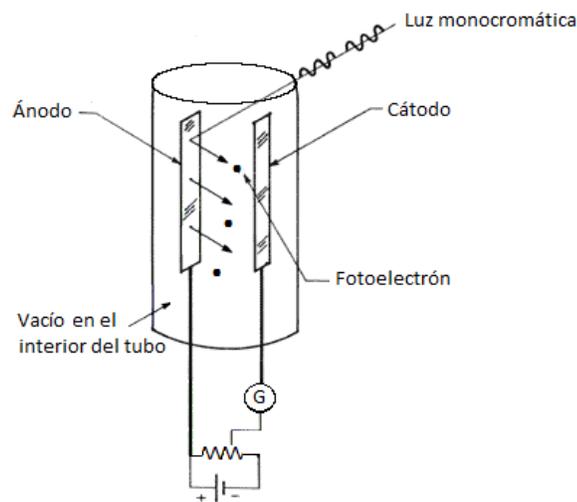


Figura 18. Demostración del efecto fotoeléctrico. Fotones, electrones y átomos. Fuente: Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D y Freedman, R. A. México, Editorial Pearson, 2005.

El efecto fotoeléctrico fue investigado con detalle por los físicos alemanes Wilhelm Hallwachs y Philipp Lenard, durante los años 1886 a 1900; sus resultados fueron muy inesperados. Describiremos su trabajo en términos de un fototubo más moderno (Figura 18). Dos electrodos conductores, el ánodo y el cátodo, están dentro de un tubo de vidrio al vacío. La batería de la Figura 18, u otra fuente de diferencia de potencial, forma un campo eléctrico cuya dirección es de ánodo a cátodo. La luz que llega a la superficie del cátodo crea una corriente en el circuito externo; la corriente se mide con el galvanómetro (G). Hallwachs y Lenard

estudiaron la forma como esta *fotocorriente* varía en función del voltaje, la frecuencia y la intensidad de la luz.²¹

Después del descubrimiento del electrón en 1897, los físicos observaron que cuando la luz ilumina ciertas superficies metálicas, se emiten cargas negativas o electrones. A esto se le llama el efecto fotoeléctrico. La figura 19 muestra cómo fue observado por primera vez este efecto.

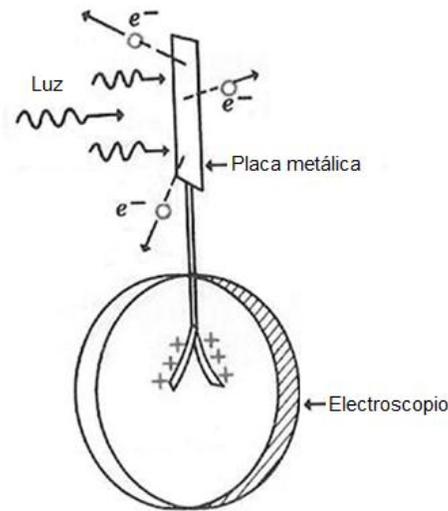


Figura 19. Observación del efecto fotoeléctrico. Fuente: OREAR, Jay. México: Limusa-Wiley S.A, 1971.

A un electroscopio descargado se le conectó una hoja metálica. Se observó que solamente cuando se prendía la luz, salía la carga negativa dejando el electroscopio con una carga neta positiva.²²

Aclarando que la luz causa la emisión de electrones del cátodo. Debido a su carga negativa $-e$, los *fotoelectrones* emitidos son impulsados por el campo eléctrico hacia el ánodo. Para reducir al mínimo el choque de los electrones con las moléculas de gas se necesita un alto vacío, a presiones residuales de 0.01 Pa ($10^{-7} atm$) o menos.

²¹SEARS, F. W., et al. . Física universitaria con física moderna: fotones, electrones y átomos. 11 ed. México: Pearson, 2005. p. 1449.

²² OREAR, Jay. física fundamental. teoría cuántica: el efecto fotoeléctrico. 2 ed.. México: Limusa-Wiley, 1971. p. 325.

Hallwachs y Lenard encontraron que cuando sobre el cátodo incidía luz monocromática, *no* se emitían fotoelectrones, a menos que la frecuencia de la luz fuera mayor que cierto valor mínimo llamado **frecuencia de umbral**. Esta frecuencia mínima depende del material del cátodo. Para la mayor parte de los metales, la frecuencia de umbral está en ultravioleta (que corresponde a longitudes de onda λ entre 200 y 300 nm).

Einstein ahondaría más respecto a las teorías clásicas al extender esta a la propia radiación. En su análisis del efecto fotoeléctrico, el campo electromagnético deja de ser un fenómeno continuo y aparece compuesto de granulaciones del campo o fotones. Cuando se ilumina la superficie de un metal como el zinc (Zn), rubidio (Rb), potasio (K), etc., con una radiación ultravioleta, en determinadas circunstancias se puede observar la emisión de electrones (fotoelectrones).

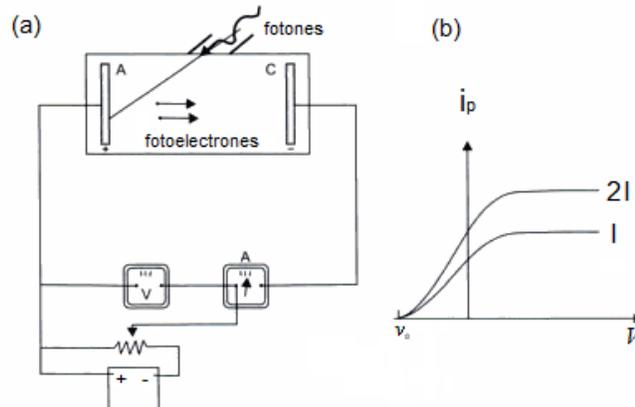


Figura 20. La radiación del cuerpo negro. Gráfica de fotocorrientes. Fuente: CARREÑO, Fernando, ANTÓN Miguel A. Madrid: Prentice Hall, 2001.

En la figura 20 (a) se muestra el montaje experimental. Uno de los electrodos es iluminado por una radiación de frecuencia ν . La intensidad de la radiación es I . Los electrones arrancados del metal se pueden acelerar o frenar mediante una batería que suministra un voltaje V . (b) corriente fotoeléctrica para i para una frecuencia constante de luz, en función del potencial V del ánodo con respecto al cátodo. El potencial de frenado $V = -v_0$ es independiente de la intensidad luminosa, pero la corriente fotoeléctrica es directamente proporcional a la intensidad, cuando V es grande y positivo. Los hechos experimentales más relevantes del fenómeno los podemos resumir de la siguiente manera:

- La emisión de fotoelectrones depende de la frecuencia de la radiación incidente. De hecho, existe una frecuencia umbral ν_0 , por debajo de la cual no se produce emisión fotoeléctrica cualquiera que sea la intensidad de la radiación incidente.

- Esta frecuencia es característica de cada metal.
- La emisión de electrones es casi instantánea.
- Existe una potencia de frenado $V = -v_0$ que detiene la emisión de fotoelectrones que es independiente de I .²³

En 1905 Einstein sugirió la siguiente explicación; la energía en un haz de luz monocromática llega en porciones de magnitud $h\nu$, donde ν es la frecuencia; este *cuanto* de energía puede transferirse por completo a un electrón. En otras palabras, el electrón adquiere la energía $E = h\nu$ mientras se encuentra en reposo dentro del metal. Si ahora suponemos que hay que realizar una cierta cantidad de trabajo ω , para extraer del metal el electrón, éste saldrá del primero con una energía cinética

$$E_c = E - \phi,^{24}$$

O bien

$$E_c = h\nu - \phi \tag{1}$$

Se supone que la cantidad ϕ , conocida como *trabajo de extracción* del material, es una constante característica del metal, independiente de la frecuencia ν .

$$h\nu = \phi + E_{cmax}$$

O

$$E_{cmax} = h\nu - \phi \tag{2}$$

Hemos llamado E_{cmax} a esta energía cinética ya que otros electrones menos favorecidos se emiten con menor E_c .

Si se ilumina con luz monocromática una superficie de un metal puro, los electrones serán emitidos con energías hasta E_{cmax} . Ahora, si se aumenta la frecuencia de la luz, se observa que la E_{cmax} aumenta. Si se hace una gráfica de estos resultados experimentales como una función de ν , se obtiene la curva de la Figura 21. Obsérvese que la constante de Planck, h , puede obtenerse midiendo la pendiente de la curva.

²³CARREÑO, Fernando y ANTÓN, Miguel A. Óptica física: Introducción a la teoría cuántica de la radiación. La radiación del cuerpo negro. 2 ed. Madrid: Prentice Hall, 2001. p. 273 – 276.

²⁴WICHMANN, Eyvind H. Física cuántica. España: Reverté, 1972. p. 31 – 35.

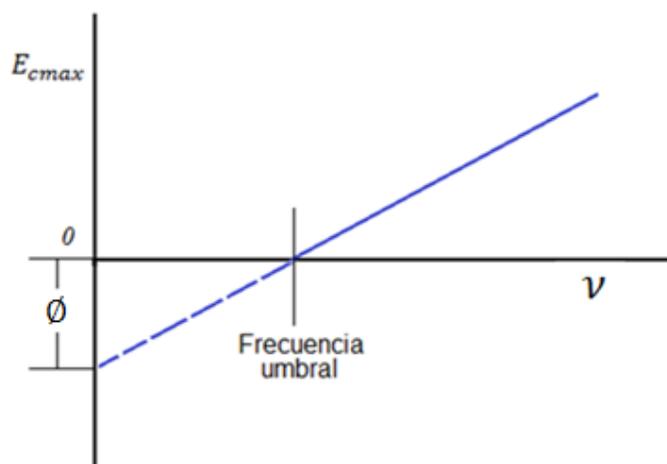


Figura 21. Gráfica de los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico, E_{cmax} contra ν para un metal cuya función de trabajo es ϕ .²⁵ Fuente: OREAR, Jay. México: Limusa-Wiley S.A, 1971.

La figura anterior es una gráfica de la energía máxima de fotoelectrones E_{cmax} frente a la frecuencia ν de la luz incidente en un experimento en particular. Es evidente que la relación entre E_{cmax} y la frecuencia ν implica una proporcionalidad, que podemos expresar así

$$E_{cmax} = h(\nu - \nu_0) = h\nu - h\nu_0 \quad (3)$$

Donde ν_0 es la frecuencia umbral por debajo de la cual no se produce fotoemisión y h es la constante de Planck. El valor de h es,

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{Julios} \cdot \text{s}$$

Siempre es el mismo, aunque ν_0 varíe con el tipo de metal iluminado.²⁶

Einstein llegó a esta idea observando que ciertos aspectos de la extraña ley de la radiación del cuerpo negro de Planck podrían entenderse atribuyendo propiedades

²⁵ OREAR, Op. cit., p. 325 – 327.

²⁶ BEISER, Arthur. Concepts of Modern Physics. The photoelectric effect. 3 ed. New York: McGraw-Hill., 1963. p. 39 – 45.

corpúsculares a la radiación electromagnética en la cavidad, es decir, admitiendo que la energía radiante está constituida por cuantos. Hemos de hacer notar aquí que el significado real de la hipótesis de Planck se encontraba por aquel entonces oculto en la oscuridad y la nueva visión del fenómeno de la radiación del cuerpo negro que ofrecía Einstein fue, por consiguiente, un importante paso adelante. Con todo, el aspecto más notable de todo eso fue que Einstein pudo aplicar su interpretación del fenómeno de la radiación del cuerpo negro a una situación física nueva: el efecto fotoeléctrico.

Estas cuestiones fueron estudiadas por R. A. Millikan, quien realizó una serie de experimentos exhaustivos que establecieron la ecuación fotoeléctrica de manera precisa $h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2}mv_m^2$, que puede también escribirse como: $h\nu = \phi + E_c$; donde h es la constante de Planck, ν_0 es la frecuencia umbral o frecuencia mínima de los fotones para que tenga lugar el efecto fotoeléctrico, ϕ es la función trabajo, y E_c es la máxima energía cinética de los electrones que se observa experimentalmente. Sus trabajos se consideran ahora como los que dan el valor más exacto de h , en las que encontró un completo acuerdo con la ecuación de Einstein.

El método de Millikan se ilustra esquemáticamente en la Figura 22. Se emiten electrones con una energía $E_c = h\nu - \phi$, donde ϕ es el trabajo de extracción característico del material del cátodo, cuando la luz de frecuencia ν incide sobre el fotocátodo. La corriente eléctrica dirigida hacia el colector cesará cuando el potencial de frenado $V > (h\nu - \phi)/e$. Un electrodo colector, que se puede mantener a un potencial arbitrario $-V$ respecto del fotocátodo, se coloca cerca de la superficie sensible a los fotones y se mide la corriente de fotoelectrones. La observación de cómo varía el potencial de frenado crítico $V_0 = (h\nu - \phi)/e$, en función de ν proporciona la constante h/e .

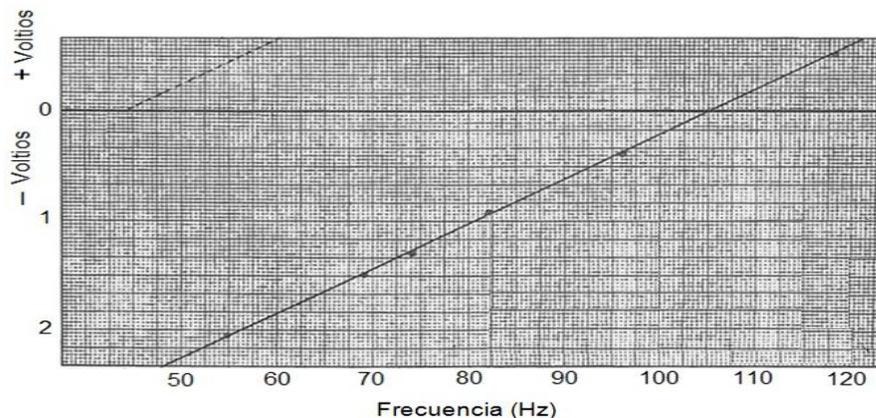


Figura 22. Gráfico del trabajo de Millikan para el efecto fotoeléctrico. Fuente: Wichmann, Eyvind H. España, Editorial REVERTE S.A. 1972.

Gráfico tomado del trabajo de Millikan, que representa la relación lineal entre el potencial crítico de frenado V_0 y la frecuencia de la luz para una superficie fotosensible de sodio. Como se ve, Millikan presentó su cálculo de la constante de Planck basándose en la curva de la figura anterior.

$$\frac{1}{2}mv^2 = hv - P = PDe$$

$$\frac{dPD}{dv} = \frac{dV_{\text{Volt}}}{dv} \cdot \frac{10^5}{3 \times 10^{10}} = \frac{h}{e}$$

$$\frac{dV}{dv} = \frac{3}{(121.00 - 48.25) \times 10^{13}} = 4.124 \times 10^{-15}$$

$$h = \frac{edV}{300dv} = \frac{4.774 \times 10^{-25}}{300} \times 4.124 = 6.56 \times 10^{-25}$$

En consecuencia, podemos observar la corriente en función del potencial de frenado V y si V_0 es el menor valor del potencial para el que la corriente se anula, tenemos

$$V_0 = \left(\frac{h}{e}\right)v - \frac{\phi}{e} \quad (4)$$

Un gráfico del valor de corte de potencial de frenado V_0 en función de la frecuencia ν será, por consiguiente, una recta como muestra la Figura 22 tomada del trabajo de Millikan. La pendiente de esta recta permite hallar la constante h/e y de su intersección con el eje V_0 se puede deducir la constante del material ϕ/e .

Este es un experimento claro y conceptualmente simple, pero para obtener resultados precisos y reproducibles se requiere un cuidado considerable.

Consideremos la ecuación (3) desde el punto de vista numérico, con

$$h = 6,63 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

y

$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Obtenemos

$$\frac{h}{e} = 4,14 \times 10^{-15} V \cdot s$$

Para la luz visible la longitud de onda varía en el intervalo de 4000 Å a 7000 Å , donde 1 Å (Angström) = 10^{-8} cm. Esto corresponde al intervalo de frecuencias $(4,3 \text{ a } 7,5) \times 10^{14} \text{s}^{-1}$, y para este caso obtenemos $(h/e)v \sim 28 \text{ volt}$.

Para la luz en la región visible o en el ultravioleta próxima, el potencial de frenado será, pues, del orden de magnitud de 1 volt. Es un hecho experimental que la constante material ϕ/e es también típicamente de este orden. Su valor resulta particularmente pequeño para los metales alcalinos, (Litio (Li), Sodio (Na), Potasio (K) etc., los metales alcalinos son capaces de emitir electrones al incidir en ellos luz visible) y ésta es la razón por la cual las células fotoeléctricas para luz visible tienen fotocátodos constituidos por estos materiales. Una célula fotoeléctrica no respondería, evidentemente, a radiación para la cual $\phi > h/\nu$.

Los rasgos cualitativos de la emisión de fotoelectrones que se habían descubierto antes de 1905 eran ciertamente notables, aunque fue necesario el ingenio mental de Einstein para apreciar por completo el significado de estos fenómenos. Si en aquel tiempo se hubiera podido disponer de los resultados cuantitativos de Millikan, no hay duda de que se habría reconocido en ellos de un modo más general un importante desafío a las ideas clásicas.²⁷

A finales del siglo XIX, una serie de experimentos revelaron que los electrones son emitidos por una superficie metálica cuando una luz de frecuencia suficientemente alta cae sobre ella.

Este fenómeno se conoce como el efecto fotoeléctrico. La Figura 23 ilustra el tipo de aparato que se empleó en estos experimentos.

²⁷ WICHMANN, Op.cit., p. 31

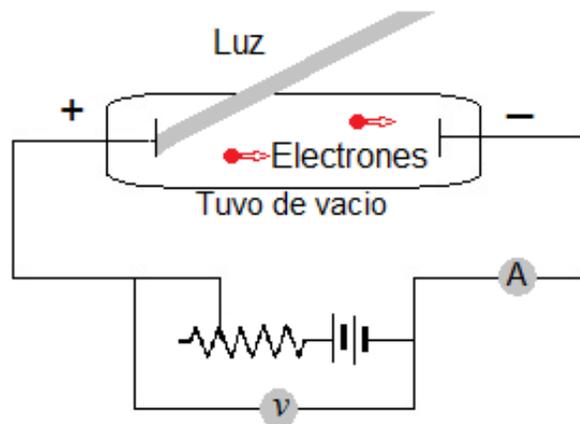


Figura 23. Montaje experimental del efecto fotoeléctrico. Fuente: BEISER, Arthur. The photoelectric effect. New York, Editorial McGraw-Hill. 1963.

Un tubo al vacío contiene dos electrodos conectados a un circuito externo como se muestra esquemáticamente en la Figura 23, con una placa (ánodo) de metal cuya superficie está sometida a irradiación. Algunos de los fotoelectrones que emergen de la superficie irradiada tienen energía suficiente para alcanzar el cátodo a pesar de su polaridad negativa, y constituyen la corriente que se mide por el amperímetro en el circuito. A medida que el potencial V se incrementa, son cada vez menos los electrones que llegan al cátodo y la corriente cae. En última instancia, cuando V es igual o supera cierto valor, del orden de unos pocos voltios, no hay más electrones que lleguen al cátodo y la corriente cesa.

La existencia del efecto fotoeléctrico no debería ser sorprendente, después de todo, las ondas de luz transportan energía, y parte de la energía absorbida por el metal puede concentrarse en los electrones individuales y reaparecerá como energía cinética.

Una de las características del efecto fotoeléctrico es que la distribución de energía de los electrones emitidos (llamados fotoelectrones) es independiente de la intensidad de la luz. Un fuerte rayo de luz producirá más electrones que uno débil de la misma frecuencia, pero la energía promedio del electrón es la misma.²⁸

²⁸ BEISER, Op. cit., p. 39

8.20. RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

La superficie de un cuerpo material mantenido a temperatura elevada emite luz de todas las frecuencias, o longitudes de onda. Si representamos gráficamente la cantidad de energía radiante emitida por unidad de tiempo, por unidad de área por unidad de intervalo de longitud de onda en función de la longitud de onda, obtenemos una curva que tiende a cero tanto para longitudes de onda muy largas, como para longitudes de onda muy cortas; en general, la curva presentará un solo máximo para cierta longitud de onda λ_{max} que depende de la temperatura. La posición de este máximo y la cantidad total de radiación emitida es más o menos la misma para todas las superficies materiales.

En vez de estudiar la radiación procedente de una *superficie material*, cabe observar la radiación que emerge por un *pequeño orificio* en la pared de una superficie material cerrada mantenida a una temperatura fija. En una medición de este tipo, tenemos un recinto cerrado, u “horno”, construido con un material refractario adecuado, con un pequeño orificio en la pared (es decir, un orificio que es pequeño comparado con las dimensiones lineales de la cavidad). Dirigimos nuestros instrumentos hacia el orificio y de esta manera medimos la energía radiante que emerge del *interior* del recinto. En tales mediciones se halló que

- i. Un gráfico (Figura 24) de la intensidad de radiación procedente del orificio en función de la longitud de onda es una curva lisa que tiende a cero lo mismo para las longitudes de ondas largas que cortas, y con un máximo para una longitud de onda λ_{max} que depende de la temperatura T de las paredes de una manera muy simple,

$$\lambda_{max} = \frac{B}{T} \quad (5)$$

$$\lambda_{max} \cdot T = B$$

$$B = 2,90 \times 10^{-3} \text{mK}$$

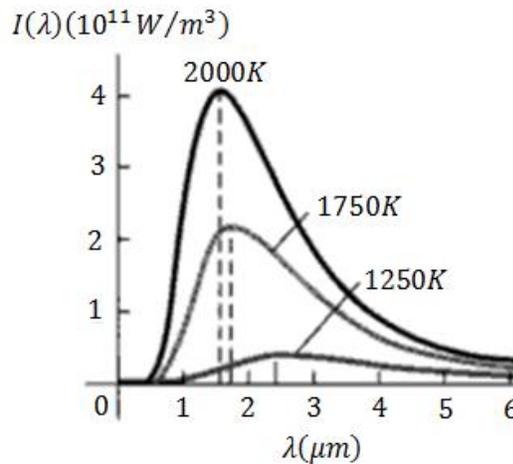


Figura 24. Mediciones experimentales de la emisión de cuerpo negro. Fotones, electrones y átomos. Fuente: Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D y Freedman, R. A. México, Pearson, 2005.

En la Figura 24, se muestran emitancias espectrales $I(\lambda)$ medidas a tres temperaturas distintas. Cada una tiene una longitud de onda máxima λ_{max} , a la cual la intensidad emitida por intervalo de longitud de onda es máxima. Los experimentos demuestran que λ_{max} es inversamente proporcional a T , de tal manera que su producto es constante (B). A este resultado se le llama **ley de desplazamiento de Wien**. El valor experimental de la constante es $B = 2,90 \times 10^{-3} \text{mK}$.²⁹

- ii. La distribución espectral de la radiación emitida, es decir, la forma de la curva citada en (i), es independiente de la forma de la cavidad, como también de la naturaleza del material de las paredes. La constante B de la ecuación (4), que expresa la *ley de desplazamiento de Wien*, es así una constante universal que describe una notable propiedad de las cavidades en general.
- iii. La intensidad de la radiación que emerge por el orificio es siempre mayor, para cada longitud de onda, que la correspondiente intensidad de emisión por una superficie material mantenida a la misma temperatura que las paredes de la cavidad; el orden de magnitud de la intensidad es el mismo.

²⁹ SEARS, Op. cit., p. 1475

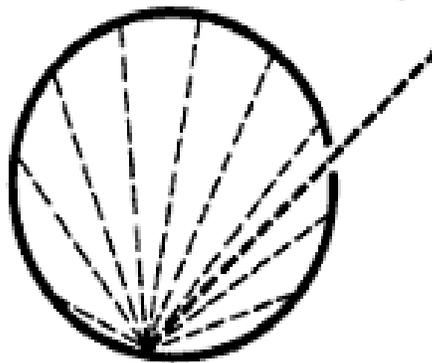


Figura 25. Radiación de cuerpo negro. Fuente: Wichmann, Eyvind H. España, REVERTE, 1972.

Una superficie que absorbe toda radiación que incide sobre ella se llama superficie de cuerpo negro. Para un observador externo, un pequeño orificio en la pared de una cavidad se comporta de manera más o menos parecida a una superficie de cuerpo negro, sobre todo si las paredes interiores de la cavidad son rugosas y están ennegrecidas, Figura 25. La razón de ello consiste, simplemente, en que cualquier radiación (luz) que incida desde el exterior sobre el orificio será casi por completo absorbida en múltiples reflexiones dentro de la cavidad, incluso si las paredes interiores no son perfectamente absorbentes.³⁰

8.21 LA TEORÍA CUÁNTICA DE LA LUZ

La teoría clásica de la radiación permite explicar razonablemente gran parte de la fenomenología que aparece en la interacción entre la radiación y la materia. A comienzos del siglo XX, el paradigma (paradigmas = acepciones de ideas, pensamientos, creencias incorporadas) electromagnético parecía poder explicar la totalidad de los fenómenos ópticos. Como ocurre siempre que ha tenido lugar una revolución científica, el nuevo paradigma que nace, explica situaciones hasta entonces desconocidas pero plantea nuevos interrogantes. Los científicos trabajan dentro del paradigma en la resolución de tales problemas.³¹

La teoría electromagnética de la luz es aplicable para una variedad de fenómenos. Sin embargo, está en desacuerdo con el efecto fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico

³⁰ WICHMANN, Op.cit., p. 26 - 30

³¹ CARREÑO, Op. cit., p. 273 – 276.

fue explicado satisfactoriamente por Einstein en 1905. Su explicación también vino a dar un significado físico adicional a una hipótesis anterior formulada por Max Planck (1900).³²

La hipótesis de Planck consistió en suponer que las paredes del cuerpo negro están constituidas por osciladores que intercambian energía con la radiación no de manera continua sino en pequeñas cantidades múltiplos de $h\nu$, siendo ν la frecuencia de oscilador y el modo de la radiación y h una constante. De esta manera, dos estados contiguos de energía accesibles por el sistema estarán separados una cantidad $h\nu$.³³ Planck fue capaz de obtener una fórmula para el espectro de esta radiación (es decir, el brillo relativo de los varios colores presentes) en función de la temperatura del cuerpo que estaba de acuerdo con la experiencia, siempre que se supone que la radiación se emite de forma discontinua como pequeñas explosiones de energía. Estas explosiones de energía son llamados cuantos. Planck supuso que la energía de una onda luminosa debía ser un número entero de cuantos, donde la energía de cada cuanto es la constante física h , multiplicada por la frecuencia ν de la onda luminosa. Esto es,

$$E = h\nu \quad \text{Energía de un fotón}$$

Donde h conocida como la constante de Planck tiene el valor de,

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{Julios} \cdot \text{s}^{34}$$

Planck pudo deducir una función, que hoy se llama **ley de radiación de Planck**, que concordaba muy bien con las curvas experimentales de distribución de la intensidad, cuyo resultado es:

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad \text{Ley de radiación de Planck (6)}$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta y λ es la longitud de onda.³⁵

³² OREAR, Op. cit., p. 325 – 327.

³³ CARREÑO, Op. cit., p. 273 – 276.

³⁴ OREAR, Op. cit., p. 325 – 327.

³⁵ SEARS, Op, cit., p. 1477

Mientras que él tuvo que asumir que la energía electromagnética irradiada por un objeto caliente era intermitente, Planck no tenía duda de que se propaga continuamente a través del espacio como ondas electromagnéticas. Einstein propuso que no sólo la luz se emite en cuantos, sino que también se propaga como cuantos individuales.

La fórmula empírica de la ecuación 1 puede ser escrita

$$h\nu = E_{max} + h\nu_0 \quad (7) \quad \text{Efecto fotoeléctrico}$$

La propuesta de Einstein implica que los tres términos de la ecuación 2 se deben interpretar de la siguiente manera:

$h\nu$: El contenido de energía de cada cuanto de luz incidente

E_{max} : La energía máxima de fotoelectrones

$h\nu_0$: La energía mínima necesaria para desalojar un electrón de la superficie del metal iluminado

Debe haber un mínimo de energía requerida para que un electrón logre escapar de la superficie metálica, o más electrones que desembocarían incluso en ausencia de luz. La energía $h\nu_0$ característica de una superficie determinada se denomina función de trabajo. Por lo tanto la ecuación 2 establece que

energía cuántica = energía máxima de electrones + función de trabajo de la superficie

Es fácil ver que no todos los fotoelectrones tienen la misma energía, sino que emergen con todas las energías hasta el valor de E_{max} ; $h\nu_0$ es el trabajo que debe hacerse para arrancar un electrón que se encuentra justamente debajo de la superficie metálica; si el electrón se encuentra a mayor profundidad en el metal, es necesario realizar un trabajo mayor.

La validez de esta interpretación del efecto fotoeléctrico se ve confirmada por los estudios de emisión termoiónica. Hace mucho tiempo se hizo saber que la presencia de un objeto muy caliente aumenta la conductividad eléctrica del aire circundante, y al final del siglo XIX, la razón de este fenómeno se consideró la emisión de electrones de tal objeto.

La emisión termoiónica hace posible el funcionamiento de los tubos de vacío tan ampliamente utilizado en la electrónica, donde filamentos de metal o de cátodos con un recubrimiento especial suministra altas temperaturas y flujos densos de electrones. Los electrones emitidos, evidentemente, obtienen su energía de la agitación térmica de las partículas que constituyen el metal, y debemos esperar que los electrones deban adquirir una energía mínima con el fin de escapar. Esta energía mínima se puede determinar para muchas superficies, y siempre es casi idéntica a la función de trabajo fotoeléctrico para las mismas superficies. En la emisión fotoeléctrica, los fotones de la luz proporcionan la energía requerida por un electrón para escapar, mientras que en la emisión del calor termoiónica no lo hace, en ambos casos los procesos físicos involucrados en la aparición de un electrón de una superficie de metal son los mismos.

Vamos a aplicar la ecuación 2 a un ejemplo específico. El trabajo de extracción de potasio es de $2,0 \text{ eV}$. Cuando la luz ultravioleta de longitud de onda 3500 \AA ($1 \text{ angstrom} = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) cae sobre una superficie de potasio, cual es la máxima energía en electrón-voltios de los fotoelectrones. De la ecuación 2.

$$E_{max} = h\nu + h\nu_0$$

Ya $h\nu_0$ se expresa en electrón-voltios, sólo tenemos que calcular la energía cuántica $h\nu$ de 3500 \AA luz.

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Julios} \cdot \text{s} \times 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 10^{10} \frac{\text{\AA}}{\text{m}}}{3500 \text{ \AA}} = 5,7 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Para convertir esta energía de julios a electrón-voltios, recordamos que

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ julios}$$

y así

$$h\nu = \frac{5,7 \times 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3,6 \text{ eV}$$

Por lo tanto la energía máxima del fotoelectrón es

$$E_{max} = h\nu + h\nu_0$$

$$E_{max} = 3,6 \text{ eV} - 2,0 \text{ eV}$$

$$E_{max} = 1,6 \text{ eV}$$

La opinión de que la luz se propaga como una serie de pequeños paquetes de energía se opone directamente a la teoría. Estos proporcionan el único medio de explicar una serie de efectos ópticos en particular la difracción y las interferencias, uno de los más firmemente establecidos de las teorías físicas. Planck sugiere que un objeto caliente emite luz en forma de cuantos por separado, que es incompatible con la propagación de la luz como una onda. Einstein en 1905 sugiere que la luz viaja a través del espacio en distintos fotones, sin embargo, provocó la incredulidad de sus contemporáneos.

De acuerdo con la teoría de las ondas, las ondas de luz se emiten desde una fuente, de la misma forma como las ondas que se despliegan en la superficie de un lago cuando una piedra cae en ella. La energía transportada por la luz, en esta analogía, se distribuye de forma continua durante todo el patrón de onda. De acuerdo con la teoría cuántica, por el contrario, la luz se propaga a partir de una fuente como una serie de concentraciones localizadas de la energía, cada una lo suficientemente pequeña para ser absorbida por un simple electrón.

Curiosamente, la teoría cuántica de la luz, lo trata como un fenómeno estrictamente de partículas, de manera explícita implica la frecuencia de la luz, en el sentido estricto del concepto de onda. La teoría cuántica de la luz es un éxito sorprendente en la explicación del efecto fotoeléctrico.

Se predice correctamente que la energía máxima de fotoelectrones debe depender de la frecuencia de la luz incidente y no de su intensidad, contrariamente a lo que sugiere la teoría ondulatoria, y es capaz de explicar por qué incluso la luz más débil puede dar lugar a la emisión inmediata de fotoelectrones, de nuevo en contra de la teoría ondulatoria. La teoría ondulatoria no puede dar ninguna razón por qué debería haber un umbral de frecuencia tal que, cuando la luz de una frecuencia más baja está ocupada, no se observan fotoelectrones por muy fuerte que sea el haz de luz, algo que brota naturalmente de la teoría cuántica.

Una gran multitud de hipótesis físicas han tenido que ser alteradas o rechazadas cuando se encontraba que estaban en desacuerdo con la experiencia, pero nunca hasta ahora se habían tenido que ingeniar dos teorías totalmente distintas para dar cuenta de un único fenómeno físico. En este caso la situación es completamente distinta de la de las mecánicas relativista y newtoniana, pues esta última se transforma en una aproximación de la primera. No hay modo de poder deducir la teoría cuántica a partir de la teoría ondulatoria o viceversa.

En cada caso particular la luz se muestra, o bien ondulatoria, o bien corpuscular, pero nunca ambas a la vez. El mismo haz luminoso que se difracta en una red puede ser motivo de la emisión de fotoelectrones de una superficie adecuada, pero estos procesos ocurren independientemente. **Las teorías cuántica y ondulatoria de la luz se complementan entre sí.** Las ondas electromagnéticas proporcionan la única explicación posible para determinados experimentos que implican fenómenos ópticos y luminosos, mientras que los fotones dan explicación para todos los demás de este campo. En realidad no tenemos otra alternativa que considerar a la luz como algo que se manifiesta en una corriente de fotones discretos o como un tren de ondas al resto de las veces. La verdadera naturaleza de la luz no es un concepto de significación plena y nosotros debemos aceptar ambas teorías, la ondulatoria y la cuántica, que, aunque sean contradictorias entre sí, nos proporcionan la descripción más completa de la luz.³⁶

³⁶ BEISER, Op.cit., p. . 39 – 45.

9. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Dado el carácter integrador e interdisciplinar de nuestro trabajo, el planteamiento de la metodología para su desarrollo ha requerido que se indague sobre el beneficio que podemos obtener de la energía solar. El planteamiento de los objetivos es una guía a lo largo de nuestra investigación, llevando a cabo una sistematización de los desarrollos científicos y tecnológicos sobre la conversión de la energía solar en energía eléctrica y térmica, y será comprobado con el rediseño de prototipos experimentales que permitan captar de manera directa la energía solar y su posterior transformación.

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
Lunes		Definición de la Metodología	Distribución de compromisos	Definición de Justificación	Compra de materiales	Desarrollo experimental de la propuesta
Martes	Definición de propuesta					
Miércoles			Definición de Objetivos	Cotización de materiales		
Jueves					Redacción del trabajo de la primera entrega	
Viernes	Desarrollo de la propuesta	Reunión con asesor		Reunión con asesor		Reunión con asesor

	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12
Lunes	Corrección de la Primera Entrega	Desarrollo experimental de la propuesta	Desarrollo experimental de la propuesta	Desarrollo experimental de la propuesta		
Martes					Recolección de Bibliografía e información	
Miércoles						Reunión con asesor
Jueves					Redacción del trabajo de la última entrega	
Viernes		Reunión con asesor		Reunión con asesor	Corrección de la última Entrega	Entrega final

10. METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN

Este proyecto está desarrollado para manifestar cómo podemos ahorrar energía y evitar la contaminación del medio ambiente, beneficiándonos con la energía natural del Sol y de igual manera tener en cuenta el beneficio económico y del medio ambiente.

Para el desarrollo del proyecto vemos conveniente estructurarlo en tres fases, las cuales nos permitirá tener una guía clara para proceder a su realización y de una manera más organizada sacar provecho al máximo de cada una las actividades realizadas, ya sea en la realización de cada uno de los montajes propuestos o en la recopilación teórica para la transformación de la energía solar en energía eléctrica aplicada.

- La primera fase, es una investigación formativa; donde se pretende dar un repaso a las características termodinámicas de transferencia de calor, caracterizado por la teoría de la radiación de Planck y una recopilación de información sobre el efecto fotoeléctrico; proceso en el cual se transforma la luz solar en energía eléctrica. De este modo, será comprobada mediante los montajes propuestos.
- La segunda fase, será la adquisición de los implementos necesarios para la reproducción del modelo más representativo de nuestro proyecto, que es el Colector Solar de Placa Plana.
- La tercera fase, es la elaboración de los diseños de cada uno de los montajes experimentales propuestos, y serán escogidos de acuerdo con la complejidad de su construcción, y luego se efectuarán las pruebas correspondientes para su comprobación. Posteriormente se elaborarán las respectivas conclusiones.

11. MONTAJES PROPUESTOS

Los montajes propuestos para la obtención de energía eléctrica y térmica a partir de la captación de la energía solar, permite impulsar la utilización y aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de ésta, pues son una forma para solucionar el problema de la contaminación ambiental causado por la utilización de energías convencionales. Por esta razón, pretendemos demostrar que las energías alternativas son un recurso natural del cual se dispone de manera permanente y son una forma de evitar el desgaste o deterioro al medio ambiente.

Por tal motivo, se han escogido los siguientes montajes:

- MICROTURBINA EÓLICA POR EFECTO CHIMENEA.
- ESTUFA SOLAR:
 - MÉTODO NORMAL
 - MÉTODO USTORIO
- AUTO SOLAR
- COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

12. DESARROLLO EXPERIMENTAL

▪ TRABAJO EXPERIMENTAL NÚMERO 1

MICROTURBINA EÓLICA POR EFECTO CHIMENEA

Energía Eólica

El viento es aire en movimiento, una forma indirecta de la energía solar, este movimiento de las masas de aire se origina por diferencia de temperatura causada por la radiación solar sobre la tierra. Cuando el aire se calienta, su densidad se hace menor y sube, mientras que las capas frías descienden, así se establece una doble corriente de aire.

La energía eólica puede transformarse principalmente en energía eléctrica por medio de aerogeneradores, o en fuerza motriz empleando molinos de viento. Es una energía segura y gratuita, pero tiene las desventajas de que la velocidad del viento es variable y poco confiable, los aerogeneradores producen ruido y la vida silvestre puede verse afectada, ya que existe el riesgo que las aves caigan en ellos y mueran.

MONTAJE EXPERIMENTAL

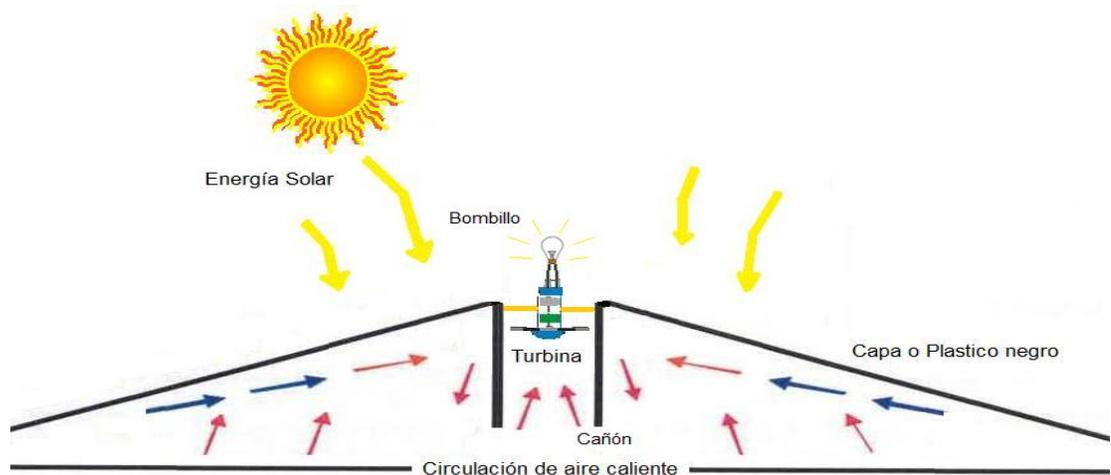


Figura 26. Microturbina eólica por efecto chimenea, Grupo trabajo de grado

El aire tiende a salir por el cañón o cualquier otro conducto al ser sometidos al calor debido a su baja densidad en comparación con la del gas y el aire que los rodea. Por medio de una turbina eólica, el cual es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. Estas están diseñadas para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en la energía mecánica, por medio de un eje. Luego en la turbina, ésta energía mecánica se convierte en electricidad por medio del campo magnético. La electricidad generada se puede almacenar en baterías, o utilizar directamente.

Materiales

- Plástico de color negro, en promedio con un radio de 3 metros.
- Un tubo de PVC.
- Una turbina (motor)
- Termómetro
- Bombillo

Procedimiento

Se une la turbina (motor) el bombillo indicador de la generación de electricidad, luego se ensamblan al tubo, el cual será el desfogue de salida de aire, presente en el interior del montaje. Se tiende el plástico unido al tubo, y esperamos a que empiece a fluir el calor dentro del montaje.

Primera Fase

- **Construcción del Montaje Microturbina eólica**



Foto 1. Construcción del montaje Microturbina eólica, Grupo trabajo de grado

Segunda Fase

- **Terminación del Montaje**



Foto 2. Montaje Microturbina eólica completo para ser ensayado, Grupo de trabajo de grado

Tercera Fase

- **Resultados**

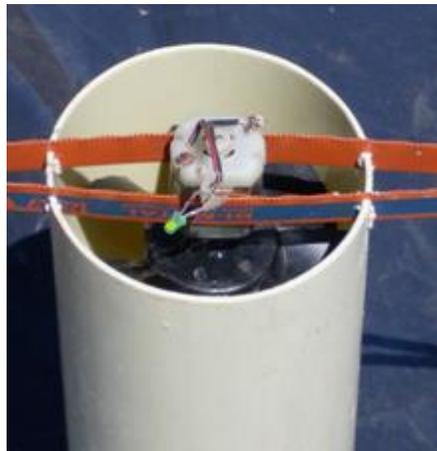


Foto 3. Producción de energía, Grupo de trabajo de grado

Luego de estar el montaje realizado, tomamos la temperatura dentro del montaje (del plástico), para verificar de esta forma a que temperatura se enciende el bombillo. El aire al calentarse, su densidad se hace menor y sube, provocando que la pequeña hélice gire y genere corriente dentro del motor encendiendo la bombilla puesta para la comprobación de la producción de energía. Transcurridos 2 horas y a una temperatura de 89 °C vemos que el bombillo se enciende, dando los resultados esperados.

▪ TRABAJO EXPERIMENTAL NÚMERO 2

Este trabajo se basa en la teoría de cuerpo negro, el cual es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un modelo ideal físico para el estudio de la emisión de radiación electromagnética. El nombre *Cuerpo negro* fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro.

Todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas, que se emite incluso en el vacío, ver Figura 27. La energía radiante emitida por un cuerpo a temperatura ambiente es escasa y corresponde a longitudes de onda superiores a las de la luz visible (es decir, de menor frecuencia). Al elevar la temperatura no sólo aumenta la energía emitida sino que lo hace a longitudes de onda más cortas; a esto se debe el cambio de color de un cuerpo cuando se calienta. Los cuerpos no emiten con igual intensidad a todas las frecuencias o longitudes de onda, sino que siguen la ley de Planck.

A igualdad de temperatura, la energía emitida depende también de la naturaleza de la superficie; así, una superficie mate o negra tiene un **poder emisor** mayor que una superficie brillante. De esta manera, la energía emitida por un filamento de carbón incandescente es mayor que la de un filamento de platino a la misma temperatura. La ley de Kirchhoff establece que un cuerpo que es buen emisor de energía es también buen absorbedor de dicha energía.

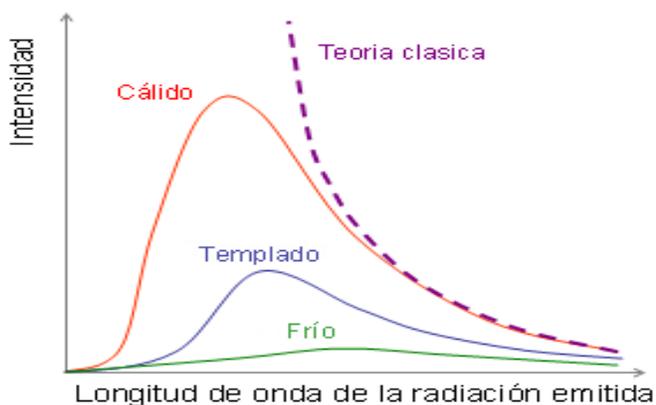


Figura 27. Radiación de cuerpo negro para diferentes temperaturas. Fuente: sitio web: http://www.astrored.org/enciclopedia/wiki/Ley_de_Planck

MONTAJE EXPERIMENTAL

Es posible estudiar objetos con comportamiento muy cercano al del cuerpo negro. Para ello se estudia la radiación proveniente de un agujero pequeño en una cámara aislada. La cámara *absorbe* muy poca energía del exterior, ya que ésta solo puede incidir por el reducido agujero. Sin embargo, la cavidad irradia energía como un cuerpo negro. La luz emitida depende de la temperatura del interior de la cavidad, produciendo el espectro de emisión de un cuerpo negro. El sistema funciona de la siguiente manera:

La luz que entra por el orificio incide sobre la pared más alejada, donde parte de ella es absorbida y otra reflejada en un ángulo aleatorio y vuelve a incidir sobre otra parte de la pared. En ella, parte vuelve a ser absorbido y otra parte reflejada, y en cada reflexión una parte de la luz es absorbida por las paredes de la cavidad. Después de muchas reflexiones, toda la energía incidente ha sido absorbida.

Una forma de demostrar el comportamiento del cuerpo negro es por medio de la Estufa Solar.

ESTUFA SOLAR POR EL MÉTODO NORMAL

La Estufa Solar por el método normal es un horno que puede ser fácilmente construido. Lo indispensable es tener cartón, papel aluminio y pintura.

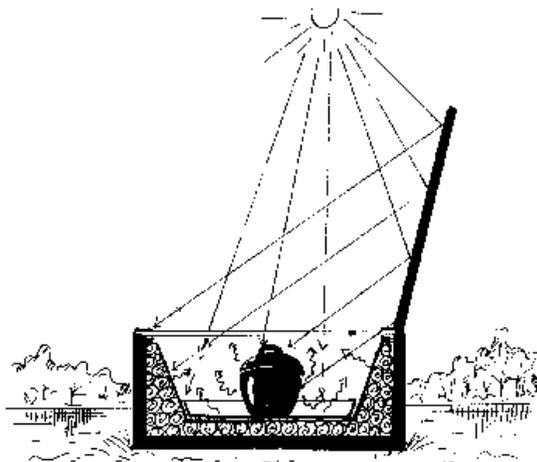


Figura 28. Prueba de la estufa solar. Fuente: sitio web: http://www.sunspot.org.uk/Solar_ESP.htm

MATERIALES

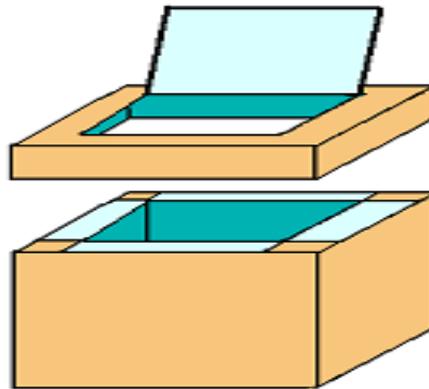


Figura 29. Estufa solar. Fuente: sitio web:<http://www.chilerenovables.cl/2009/08/14/con-cajas-de-carton-haga-su-cocina-solar-de-un-modo-facil/>

- Dos cajas de cartón, De cualquier tamaño servirán. En general, las cocinas más grandes son más calientes. El factor limitante es la relación entre la cantidad de comida y el tamaño de la cocina. Sugerimos usar cajas que de por lo menos 38 cm x 38 cm.
- Un rollo de papel de aluminio.
- Un tarro de pintura negra mate.
- Un recipiente (olla con tapa) de aluminio.

PROCEDIMIENTO

Armamos las cajas. Pintamos el interior de la caja con la pintura negra mate, luego pegamos el papel aluminio y también en la parte interior de las tapas, a la segunda caja sólo le pintamos las tapas interiores y el resto de la caja le pegamos papel aluminio, el montaje de las dos cajas se hace por separado.

Luego de haber realizado el montaje anterior, procedemos a ubicar la cocina solar en una posición en la cual reciba toda la radiación solar posible. De esta manera lograr obtener los resultados esperados. El tiempo necesario para conseguir lo propuesto varía dependiendo del clima, debe estar bastante soleado para tal fin.

Primera Fase

- **Construcción del Montaje**



Foto 4. Construcción de la estufa solar, Grupo trabajo de grado

Segunda Fase

- **Terminación del Montaje**



Foto 5. Terminación de la estufa solar, Grupo trabajo de grado

Tercera fase

- **Resultados**



Foto 6. Obtención de los resultados, Grupo trabajo de grado

Luego de realizar el montaje, y ser expuesto a la radiación solar, se observa que luego de un tiempo (alrededor de 1/2 hora) empiezan a formarse pequeñas burbujas en el fondo del recipiente, además de sudoración en el vidrio de la cubierta de la cocina. En el transcurso de 1 hora aproximadamente el agua empezó a hervir, alcanzando una temperatura $> 94^{\circ} \text{C}$.

Como logramos comprobar, el principio básico con el cual funciona la cocina solar, es acumular el calor dejando que los rayos de sol penetren a través de un cristal transparente a un recinto bien aislado. La luz, al quedar 'atrapada' en la caja, se convierte en calor cuando es absorbida por la olla y el agua. El secreto de una buena cocina solar es tener buen aislamiento, sin huecos y un buen reflector en la tapa para conseguir la máxima radiación posible en la caja.

- **TRABAJO EXPERIMENTAL NÚMERO 3**

ESTUFA SOLAR POR EL MÉTODO USTORIO

RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrogeno en el núcleo del sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar.

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

MONTAJE EXPERIMENTAL

Esta radiación solar ha sido utilizada desde hace miles de años por medio del calor que esta produce, hoy en día se canaliza esta energía solar para producir calor o generar electricidad, de esta forma disponemos de una de las energías renovables no contaminantes.

Cuando un cuerpo es expuesto a algún tipo de radiación, parte de esta radiación es absorbida, otra es reflejada y otra parte es transmitida (si el cuerpo no es opaco). Existen dos tipos de reflexiones: especular y difusa. La reflexión es especular cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado y es difusa cuando la reflexión ocurre uniformemente distribuida en todas las direcciones. En superficies reflectoras reales ocurren reflexiones de los dos tipos siendo, en superficies pulidas, prominente la especular y en superficies rugosas, la difusa.

Para una estufa solar por el método ustorio, es importante que el material reflectante del concentrador tenga una reflexión altamente especular. También es importante que la superficie en el receptor sea altamente selectiva, esto es que

tenga una alta absorbanza a la radiación solar y una baja emitancia en el rango de temperaturas que se desea trabajar.

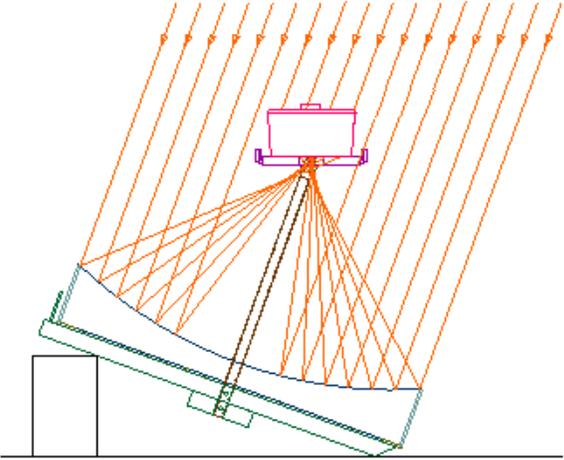


Figura 30. Estufa solar por el método ustorio. Fuente: sitio web: http://www.sunspot.org.uk/Solar_ESP.htm

ESTUFA SOLAR POR EL MÉTODO USTORIO



Foto 7. Estufa solar (Método Ustorio)

MATERIALES

- Cajas de Cartón. Una de 50cm x 50cm, que será utilizada como la base del horno solar, y la otra se utilizará para sacar 24 trozos en forma radial para elaborar el reflector.
- Cinta adhesiva
- Rollos de papel aluminio
- Tubo de acero para el soporte
- Recipiente de aluminio

PROCEDIMIENTO

El reflector solar se hizo de 24 trozos de cartón colocados en forma radial cada 15 grados. Cada uno de los 24 elementos reflectores se pega con cinta a las costillas. La caja y los reflectores son de 1m x 1m. La eficiencia y estabilidad son muy buenas. Para comprobar el punto focal colocamos un periódico que se incendió en segundos. El único problema es que en época de lluvia, con bastante humedad y luego de unos meses de almacenada, el cartón tiende a perder su forma.

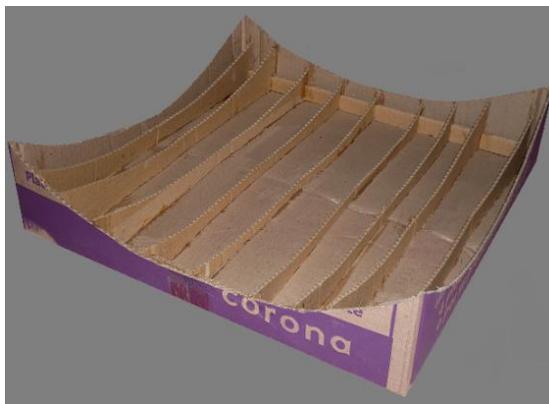


Foto 8. Construcción de la base para la estufa solar (Método Ustorio), Grupo trabajo de grado

Este modelo es más estable y simple de construir. Se usa el principio de la "caja de vino" para asegurar el cartón por la parte interior y así crear la forma requerida

para que el reflector quepa adentro. Esta es una versión pequeña de 50cm x 50cm. El reflector tiene forma esférica con un radio de 25cm (igual a las dimensiones de la caja) con lo cual se obtiene una forma casi parabólica con un punto focal a 25cm del reflector. Cada costilla está a 5 cm de distancia. Se necesitan 11 costillas para lograr la forma. Cada costilla tiene un radio diferente, dependiendo de dónde se coloca. Todo lo que se tiene que hacer es dibujar en un papel para sacar el molde y luego transferir estos dibujos al cartón y cortar la forma requerida. Luego se hacen unos cortes en la parte inferior de las piezas y se va ensamblando.

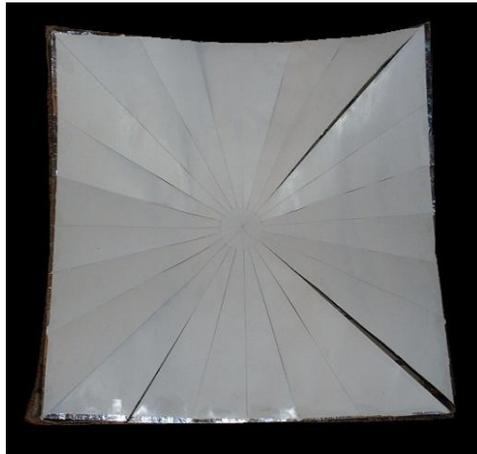


Foto 9. Construcción del reflector para la estufa solar (Método Ustorio), Grupo trabajo de grado

El reflector se hace con papel aluminio, del que se usa en la cocina, luego pegarlo a una cartulina o cartón delgado. Una de las caras es muy brillante, que debe ir hacia el exterior. Se marcan en ángulos de 15 cm y luego se corta con una cuchilla afilada, dejando un lugar en el medio sin cortar.

Luego se coloca el reflector en el cartón y se cortan los lados a la longitud adecuada. El reflector se asegura luego con cinta adhesiva por los bordes, con lo que se obtiene un punto focal preciso.



Foto 10. Comprobación de la estufa solar por el método ustorio, Grupo trabajo de grado

La grilla se hace de tubo de hierro y algunas tiras de hierro que serán la base para la olla. Un punto de apoyo en el medio que permita variar con la altura del sol.³⁷

La Estufa Solar por el método Ustorio, usa un reflector parabólico para concentrar la luz solar en un punto. Esto tiene el efecto de una enorme lupa. Con un reflector preciso se puede conseguir una amplificación de 100. El reflector se alinea para que apunte al sol, y luego una olla negra se sitúa en una parrilla en el punto focal. Puesto que la olla es negra, absorbe gran parte de la luz solar y crea suficiente calor como para cocinar.

Hemos comprobado el aprovechamiento de la energía solar para aplicaciones en el cocinado de alimentos, usando una estufa solar por el método ustorio. Durante el ensayo que tuvo una duración de 1 hora y media, de las 12:00 pm a la 13:30 pm, se observó que la temperatura del fluido colocado en el interior de la olla alcanzó una temperatura > 93 °C.

Estos resultados son de gran validez porque resaltan la importancia que tiene el aprovechamiento de la energía solar por medio de las estufas solares.

³⁷ <http://www.cienciafacil.com/prototipos.html>

- TRABAJO EXPERIMENTAL NÚMERO 4

AUTO SOLAR

EFECTO FOTOELÉCTRICO

La energía Fotovoltaica es la conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico, que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

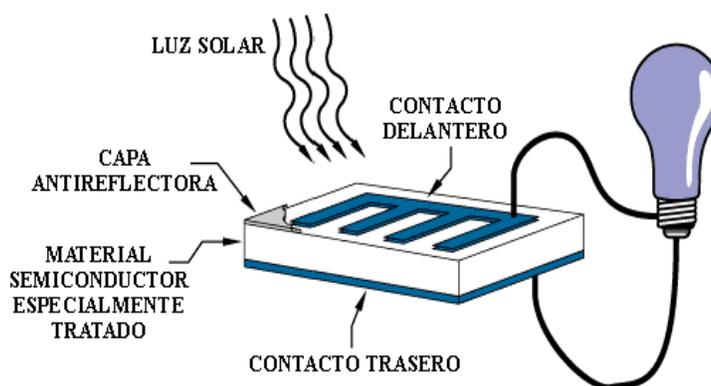


Figura 31. Operación de una celda fotovoltaica. Fuente: sitio web: http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2002/images/sunshine/cell_sp.gif

El diagrama ilustra la operación de una celda fotovoltaica, llamada también celda solar. Las celdas solares están hechas de la misma clase de materiales semiconductores, tales como el silicio, que se usan en la industria microelectrónica. Para las celdas solares, una delgada rejilla semiconductor es especialmente tratada para formar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro.

Cuando la energía luminosa llega hasta la celda solar, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor. Si ponemos conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de una corriente eléctrica, es decir, en electricidad. La electricidad puede entonces ser usada para suministrar potencia a una carga, por ejemplo para encender una luz o energizar una herramienta.

MONTAJE EXPERIMENTAL

Una célula fotoeléctrica, también llamada fotocélula o celda fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto fotoeléctrico.

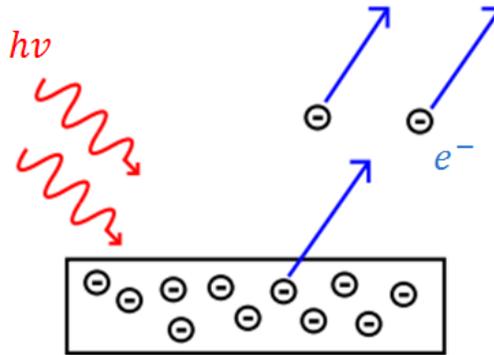


Figura 32. Acción de los fotones. Fuente: sitio web: <http://www.genciencia.com/fisica/el-efecto-fotoelectronico>

Los fotones incidentes son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de energía suficiente para escapar de éste.

MATERIALES

- Trozos de acrílico o madera liviana
- Ruedas de autos de juguete
- Arandelas pequeñas
- Motor de auto de juguete
- Cables delgados
- Celda solar
- Poleas
- Trozos de alambre o palitos

Un auto solar se construye con pocos materiales fáciles de obtener. El único problema es la adquisición de la celda solar que no se encuentra fácilmente.

AUTO SOLAR



Foto 11. Auto solar, Grupo trabajo de grado

PROCEDIMIENTO

Como puede verse en la figura de arriba, debemos cortar un trozo rectangular de acrílico o madera liviana, para hacer el chasis del auto solar, se puede hacer un auto de igual o menor tamaño. Luego tomamos unas ruedas de juguete y les aseguramos a un eje. El motorcito se coloca con su respectiva polea sobre el chasis. La polea de transmisión es de goma y se puede obtener de una casetera en desuso o se puede conseguir fácilmente en el mercado. El motor se sujeta con trozos de madera o simplemente usando silicona caliente.

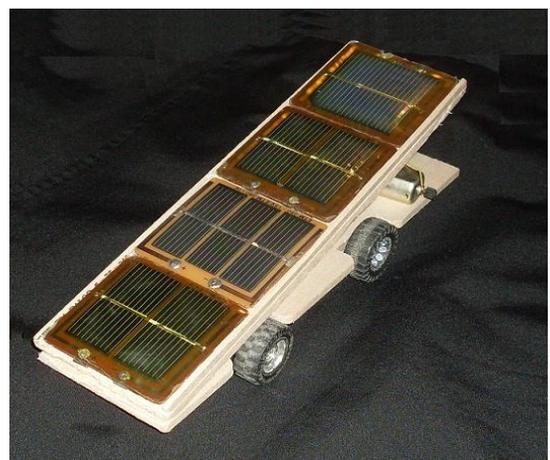
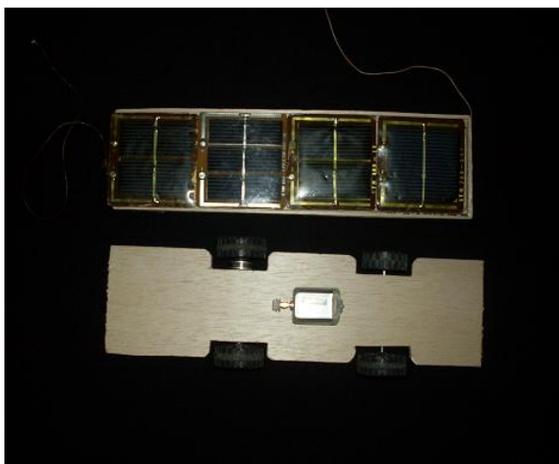


Foto 12. Construcción y terminación del auto solar, Grupo trabajo de grado

Luego se hacen las conexiones al motor. Debemos tener cuidado con la "polaridad" es decir que el polo positivo y el negativo estén conectados de manera correcta al motor, no sea que al funcionar vaya hacia atrás. Debemos asegurarnos que el motor gire en la dirección apropiada. En la foto podemos ver el carro solar armado y listo para funcionar. Como se puede notar, estamos usando varios paneles solares y es que el motorcito de auto de juguete consume mucha corriente y no funcionaría con menos paneles. En caso de no tener a mano este tipo de paneles recomendamos usar motorcitos de walkman en desuso. Estos tienen además la ventaja de que vienen con su propia pulea y funcionan con muy poca corriente.

El auto solar en el mismo instante de ser expuesto a la radiación del Sol inicia su funcionamiento, siempre y cuando se tenga un día soleado y libre de nubes. En el ensayo del auto solar, se presentaron algunas nubes que se interponían en la radiación solar ocasionando que el auto se detuviera momentáneamente mientras estas seguían su curso.

- TRABAJO EXPERIMENTAL NÚMERO 5

ENERGÍA TÉRMICA

El Sol es una fuente inagotable de energía y, a su vez, ecológica. La energía térmica del tipo solar emplea el calor generado por la radiación solar para obtener electricidad, este recurso es válido tanto para la producción eléctrica de grandes centrales como para una producción menor, es decir, de tipo doméstica. Actualmente el mundo cuenta con varias centrales de generación de electricidad que emplean a la energía solar térmica captada por dispositivos de baja concentración. Poseen varios cilindros parabólicos que concentran la radiación en una tubería que posee en su interior un fluido.

Éste, cuando se calienta, es transportado a una red de tuberías que es diseñada específicamente para reducir las pérdidas de calor; los dispositivos de baja concentración son los más tecnológicos pero poseen una desventaja bastante grande: dependen del Sol, es por eso que para trabajar adecuadamente necesitan un cielo despejado.

MONTAJE EXPERIMENTAL

Los colectores solares captan la energía térmica de la luz solar y la transfieren al agua fría que circula a través de ellos. A medida que el agua aumenta su temperatura, su densidad disminuye y asciende a la parte superior del tanque térmico de almacenamiento. El agua caliente en ascenso (menos densa) desplaza al agua fría (más densa) obligándola a circular a través de los colectores. En su movimiento a través de los colectores el agua desplazada aumenta de temperatura y asciende nuevamente al tanque. El ciclo se repite indefinidamente siempre y cuando existan diferencias de temperaturas en el sistema. Este proceso de circulación natural se llama *termosifón*.



Foto 13. Colector solar de placa plana, Grupo trabajo de grado

Un calentador solar de agua es un *sistema fototérmico* capaz de utilizar la energía térmica del sol para el calentamiento de agua sin usar ningún tipo de combustible. Se compone de: un colector solar plano, donde se captura la energía del sol y se transfiere al agua; un termotanque, donde se almacena el agua caliente; y un sistema de tuberías por donde circula el agua.

Los colectores solares domésticos tienen un funcionamiento en realidad muy sencillo. La luz solar se convierte en calor al tocar la placa térmica colectora, la cual puede ser metálica (hierro, cobre, aluminio, etc.) o de plástico. Esta debe ser oscura para lograr la mayor recolección de calor, por debajo de la misma se encuentran los cabezales de alimentación y circulación de agua, por donde el líquido “entra frío y sale caliente” del colector solar plano. El agua circula dentro

del sistema, mediante el mecanismo de termosifón, el cual se origina por la diferencia de temperatura que se genera en el agua debido al calentamiento proporcionado por el sol. Esto significa que, el agua caliente es más ligera que la fría y, en consecuencia, tiende a subir. Esto es lo que sucede entre el colector solar plano y el termotanque, con lo cual se establece una circulación natural, sin necesidad de ningún equipo de bombeo. Para que el agua se mantenga caliente y lista para usarse en el momento requerido, esta se almacena en el termotanque, el cual está forrado con un aislante térmico para evitar la pérdida de calor. El calentador solar tiene la capacidad de proporcionar agua a una temperatura de hasta 65°C en un día soleado. Sin embargo, la temperatura del agua depende de la aplicación, que se le desee dar y de las condiciones climáticas.

MATERIALES

- Lámina de zinc
- Tubo de cobre
- Fibra de vidrio
- Placa térmica

COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

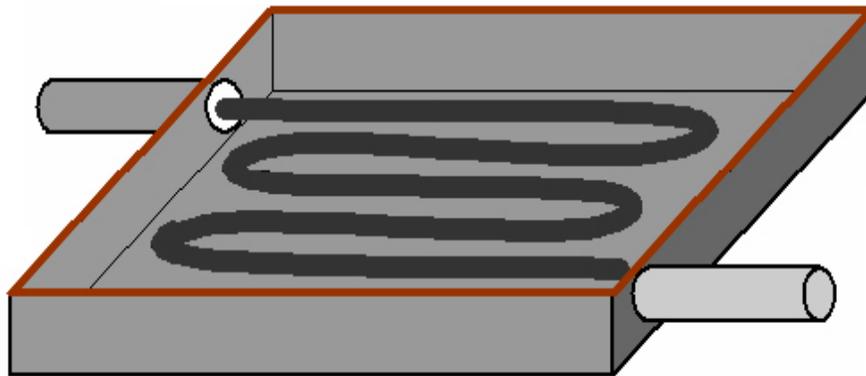


Figura 33. Interior de un colector solar. Fuente: sitio web:
http://www.ecotermic.net/index.php?option=com_content&view=article&id=44&Itemid=59

PROCEDIMIENTO

Para la construcción de la caja, se utilizó una lámina de zinc, de calibre 21 por un área de 1m². El aislante utilizado fue fibra de vidrio, la cual se consigue con facilidad en el mercado, se recubre por todo el contorno hasta obtener la forma del mismo.



Foto 14. Construcción del colector solar de placa plana, Grupo trabajo de grado

Luego se realizó la construcción del sistema placa-conductos, se decidió que la unión entre las dos placas y las platinas, sería soldada para obtener hermeticidad en cada punto. Después se procedió a doblar los extremos de la lámina para poder asegurar los tubos colectores de entrada y salida del agua.

El tubo de cobre es doblado en espiral para luego ser introducido en la caja, antes de esto, se procede a cubrir el contorno interior de la placa con la fibra de vidrio para ser utilizado como el aislante térmico.



Foto 15. Adecuación de los materiales del colector solar, Grupo trabajo de grado

Luego de estar totalmente distribuida la fibra de vidrio, procederemos a ubicar el tubo de cobre que será el conductor del agua, teniendo todo el conjunto listo placa-platina-tubos, se cerró todo el contorno hasta obtener una total hermeticidad del mismo, como último paso antes de dar el acabado, se pegaron los tapones en los tubos, luego de ensayar el sistema para comprobar su hermeticidad se procedió a dar el acabado.

De los ensayos iniciales, se puede afirmar que el sistema solar para calentamiento de agua alcanza las condiciones de temperatura requeridas para ser usada en el consumo doméstico de manera medianamente eficiente.

Además, podemos decir, un cuerpo expuesto al Sol recibe un flujo energético, bajo cuyo efecto se calienta. Simultáneamente se producen pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción, que crecen con la temperatura de dicho cuerpo. En un colector solar la energía, es extraída del mismo a través de un fluido, llamado fluido caloportador, que se hace pasar por su interior, recogiendo parte del calor producido y llevándolo a otro lugar donde será utilizado o acumulado.



Foto 16. Ensayo del colector solar de placa plana, Grupo trabajo de grado

En cuanto a la orientación, sabemos que a mayor ángulo de incidencia entre los rayos y la normal a la superficie del captador, menor será la radiación aprovechada, lo que provocará a su vez una disminución de su energía, será preciso por tanto, orientar los colectores para que reciban durante el período de utilización la mayor cantidad posible de radiación.

El vidrio es transparente entre 0,3 y 3 μm , la mayor parte del espectro de radiación solar está comprendido entre 0,3 y 2,4 μm , por lo que la luz solar atraviesa el vidrio sin mayor problema (una pequeña cantidad es reflejada en su superficie y otra absorbida en su interior en mayor o menor grado, según el espesor).

En el colector cuya cubierta sea de vidrio, el absorbedor, que es la parte del captador, generalmente metálica, en donde se efectúa la conversión de energía electromagnética en térmica, está situado bajo la cubierta y a unos pocos centímetros de distancia de ésta. Después de atravesar el vidrio, la radiación llega a la superficie del absorbedor, el cual se calienta y emite a su vez radiación con una longitud de onda más o menos comprendida entre 4,5 y 7,2 μm , para la cual el vidrio es opaco.

La radiación emitida por el absorbedor y devuelta hacia el vidrio, es reflejada en un pequeño porcentaje por la superficie interior de dicho vidrio, pero el resto es absorbida, no escapando al exterior. Ahora el vidrio se calienta y empieza también a emitir radiación. Aproximadamente la mitad de esta radiación se pierde en el exterior, pero la otra mitad vuelve al interior y contribuye así a calentar aún más la superficie del absorbedor. Es este último fenómeno lo que se conoce como efecto invernadero.

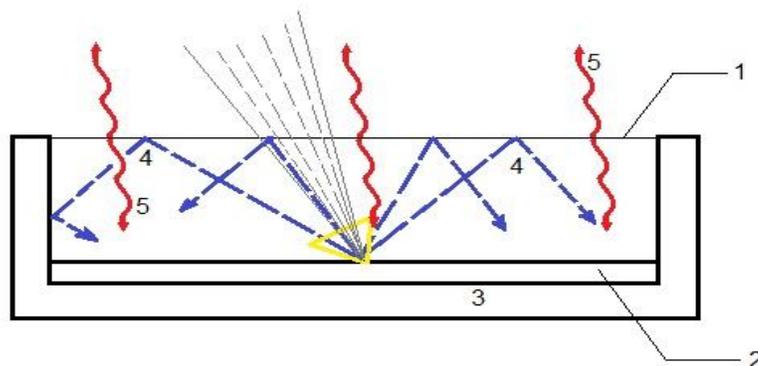


Figura 34. Ilustración del efecto invernadero. Fuente: “Curso de instalaciones de Energía Solar”, CENSOLAR. Octava Edición. 2010. PROGNSA (Promotora General de Estudios, S.A.) p. 2

Ilustración del efecto invernadero en un corte transversal de un colector solar de placa plana teórico.

1. Cubierta transparente (vidrio)
2. Placa absorbente (tubería)

3. Aislamiento (fibra de vidrio)
4. Radiación reflejada en el interior del colector
5. Radiación emitida por la cubierta al calentarse

La velocidad del viento es un factor que influye notablemente, ya que cuanto mayor sea, mayores serán las pérdidas de calor por convección, con la consiguiente disminución de la temperatura del absorbedor. La temperatura, dada en °C, depende de las condiciones exteriores: cuanto más frío sea el ambiente, más baja será, lo que importa en la práctica es la temperatura exterior, en los alrededores del colector, para así obtener los resultados esperados.

Si ponemos a correr el fluido caloportador por el interior del colector, entrando por un orificio y saliendo por otro, dicho fluido, al pasar en contacto con la parte interior del absorbedor, va tomando calor del mismo y aumentará de temperatura a expensas del absorbedor, la cual irá disminuyendo.

La temperatura que puede alcanzar el fluido es siempre menor que la del absorbedor, debido a las características físicas propias del fenómeno de la conducción del calor. Que es la forma en que éste se transmite entre ambos. La temperatura media puede identificarse con la temperatura del fluido caloportador a la entrada (t_e) y a la salida (t_s) del colector, con lo cual tenemos, por ejemplo,

$$t_m = \frac{(t_e + t_s)}{2}$$

$$t_m = \frac{(36 + 80)}{2}$$

$$t_m = 58$$

Ahora, la diferencia Δt entre la temperatura media del fluido y la del ambiente será:

$$\Delta t = \frac{(t_e + t_s)}{2} - t_a$$

$$\Delta t = \frac{(36 + 80)}{2} - 34$$

$$\Delta t = 24$$

Dándonos como resultado para la diferencia de temperatura $\Delta t = 24^{\circ}\text{C}$.

Cuando el colector funciona normalmente, siempre ha de cumplirse que t_s es mayor que t_e , ya que el fluido se va calentando al pasar a través del absorbedor. Esta afirmación es válida siempre y cuando la radiación solar en ese momento sea suficiente para producir en el absorbedor una temperatura superior a la del fluido entrante.

El colector solar de placa plana está constituido por cuatro elementos principalmente, que son: la cubierta transparente, el absorbedor, el aislamiento y la carcasa.

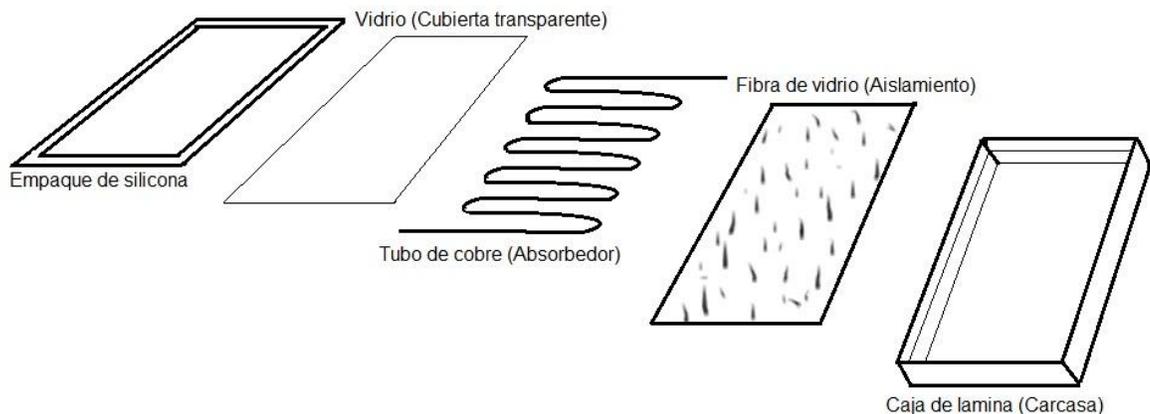


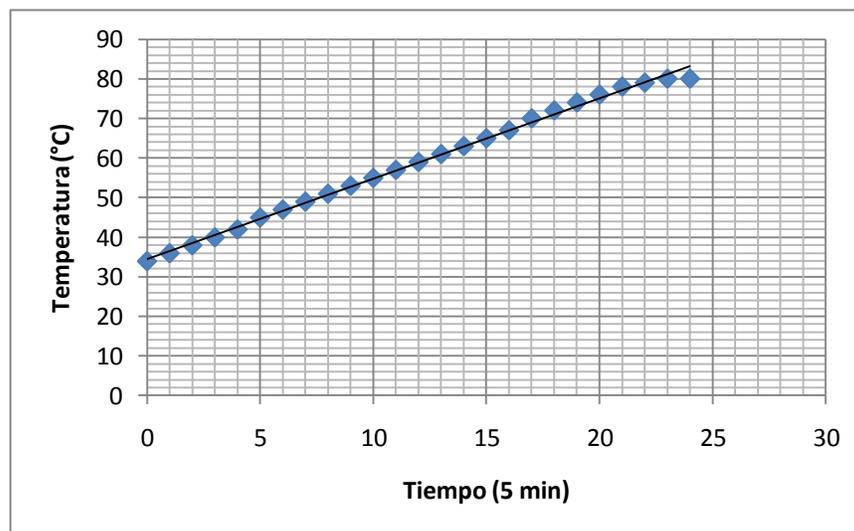
Figura 35. Despiece de un colector solar de placa plana. Fuente: "Curso de instalaciones de Energía Solar", CENSOLAR. Octava Edición. 2010. PROGNSA (Promotora General de Estudios, S.A.) p. 19

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo del montaje, como se puede apreciar, en la tabla de datos y en la gráfica, la temperatura va ascendiendo conforme el tiempo transcurre. El ensayo tuvo una duración de 2 horas, iniciando a las 11:00 am a la 13:00 pm, durante este tiempo se tomaron mediciones de la temperatura cada 5 minutos, donde se observó que la temperatura del fluido caloportador ascendía en promedio de 2°C , hasta alcanzar una temperatura de 80°C .

Cuadro 2. Resultados obtenidos en el ensayo del colector solar de placa plana.

TIEMPO (cada 5 minutos)	TEMPERATURA (°C)
1	34
2	36
3	38
4	40
5	42
6	45
7	47
8	49
9	51
10	53
11	55
12	57
13	59
14	61
15	63
16	65
17	67
18	70
19	72
20	74
21	76
22	78
23	80
24	80

Figura 36. Gráfica de los resultados obtenidos en el ensayo del colector solar de placa plana. Temperatura Vs Tiempo.



13. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

- A través de la sistematización, logramos identificar los diferentes desarrollos científicos y tecnológicos que existen para generar energía a partir del Sol, y por medio del rediseño de prototipos experimentales fotovoltaicos y térmicos como la microturbina eólica, la estufa solar, el auto solar, y el colector solar de placa plana, evidenciamos la obtención de energía eléctrica y térmica a partir de la captación directa de la energía solar, y de esta manera promover el uso de energías renovables y limpias, contribuyendo así a generar procesos de sensibilización y capacitación sobre los efectos del calentamiento global.
- No podemos asegurar que las energías tradicionales sean más económicas, pues si incluimos el costo que supone limpiar la contaminación que provocan, el precio de la energía obtenida del petróleo, carbón, gas o uranio sería bastante más alto del que tienen en el mercado. Además, los países que podrían verse afectados por un cambio en su economía, no desean afrontar ningún riesgo y prefieren llegar a neutralizar cualquier investigación o simplemente anular cualquier intento de usar este tipo de energías renovables.
- Como puede comprobarse, en realidad no existe un problema de falta de recursos energéticos. Una parte del problema energético actual consiste en que nuestra sociedad se ha hecho muy dependiente de un solo recurso: los hidrocarburos. En otras palabras, se ha rezagado el desarrollo tecnológico y, por tanto, la viabilidad económica de algunas otras alternativas energéticas.
- Evidentemente, la importancia del consumo de energía sobre el medio ambiente y el agotamiento de los recursos naturales resulta hoy en día incuestionable, y así se ha fijado en todos los foros internacionales. La energía solar, eólica y demás, son las energías que debemos explotar, ya que son energías renovables y por lo tanto son gratuitas, inagotables, y algo de mayor importancia es que no contaminan el medio ambiente a causa del efecto smog y el efecto invernadero.
- El desarrollo industrial de esta tipo de energía como bien lucrativo podría acelerar la investigación en el uso de ésta. También el uso de otros materiales recientemente investigados podría llegar a aumentar su nivel de eficacia pues si solo siguiera aumentando su capacidad de recolección de energía solar en los colectores, se podría desplazar rápidamente a la energía producida por otros tipos de fuentes.

- Con el uso de estufas solares (por método normal y ustorio), aplicados en la vida diaria para cocer alimentos, se está beneficiando el medio ambiente, debido que al utilizar energía renovables como la del sol, se pueden disminuir los problemas ambientales que acarrear las llamadas energías convencionales, como el cambio climático, los residuos radiactivos, las lluvias ácidas y la contaminación atmosférica y el gran problema mundial que a todos nos afecta “el calentamiento global” pues, aplicándolas se reducen las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.
- Creemos conveniente que tanto la Universidad Surcolombiana, como los entes gubernamentales, deberían promover la divulgación de este tipo de proyectos, pues el papel de la educación ambiental tiene participación en lo económico, empresarial y en un desarrollo sostenible, pues se sabe que existe una responsabilidad social y legal, y no es sólo en las instituciones educativas sino también en la sociedad, para educar, proponer, participar, evitar y crear conciencia en la prevención y solución de los problemas ambientales.
- Con el desarrollo de nuestro trabajo pretendemos crear conciencia y demostrar que la energía directa que recibimos del Sol, nos puede aportar beneficios económicos y a la vez disminución de la contaminación ambiental; lo que creemos necesario es una gran inversión financiera de los entes gubernamentales para la implementación de laboratorios de investigación y la producción de dispositivos necesarios para la aplicación de los sistemas tecnológicos de conversión de energía solar.

BIBLIOGRAFÍA

BEISER, Arthur. Concepts of modern physics. The photoelectric effect. 3 ed. New York: McGraw-Hill., 1963. p. 39 – 45.

CARREÑO, Fernando y ANTÓN, Miguel A. Óptica física: Introducción a la teoría cuántica de la radiación. La radiación del cuerpo negro. 2 ed. Madrid: Prentice Hall, 2001. p. 273 – 276.

“Curso de instalaciones de Energía Solar”, CENSOLAR. Octava Edición. 2010. PROGENSA (Promotora General de Estudios, S.A.). Tomo III. p. 2, 19

FERNÁNDEZ SALGADO, José María. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. (Adaptado al código técnico de la edificación y al nuevo RITE). Madrid :Mundi-Prensa, 2008. p. 1– 3, 25 – 32.

Gary C. Bjorklund y Baer Thomas M. (Traducido por Dr. en Ciencias J. P. Valcárcel). Investigación sobre celdas solares de película delgada orgánica en la Universidad de Stanford. En: Revista entornos. Neiva. Septiembre, 2008, No. 21, p. 100 – 101

GIL GARCÍA, Gregorio. Energías del siglo XXI.: de las energías fósiles a las alternativas. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. p. 19 – 23, 541.

GREEN, Martín. Energía fotovoltaica: de la luz solar a la electricidad usando células solares. España Acibia, 2002. p. 69 – 71.

GUILLEN SOLIS, O. Energías Renovables: Una perspectiva ingenieril. México: Trillas, 2004. p. 9 – 36.

IBAÑEZ, M; et al. Energías renovables. Tecnología solar. Madrid. Mundi-Prensa. 2005. p. 29 – 32.

LABOURET, A y VILLOZ, M. Energía solar fotovoltaica: manual práctico. (Adaptado al Código técnico de la edificación) Madrid: Mundi-Prensa, 2008. p. 28 – 30.

OREAR, Jay. Física fundamental. Teoría cuántica: el efecto fotoeléctrico. 2 ed. México: Limusa-Wiley, 1971. p. 325 – 327.

PERALES BENITO, Tomás. Guía del instalador de energías renovables. México: Limusa, 2007. p. 15 – 16, 21.

SEARS, F. W., et al. . Física universitaria con física moderna: fotones, electrones y átomos. 11 ed. México: Pearson, 2005. p. 1448 – 1449.

WICHMANN, Eyvind H. Física cuántica. España: Reverté, 1972. p. 31 – 35.