

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA SOLAR, CONCEPTOS Y APLICACIONES.

EDGAR DARÍO OBANDO PAREDES



Universidad
del Cauca

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN.
INGENIERÍA FÍSICA.
POPAYÁN, COLOMBIA.
2014.

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA SOLAR, CONCEPTOS Y APLICACIONES.

EDGAR DARÍO OBANDO PAREDES.

Trabajo de grado presentado en cumplimiento a los requerimientos
para optar al título de:
Ingeniero Físico

Director:

Dr. Rubiel Vargas Cañas

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA.
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN.
INGENIERÍA FÍSICA.
POPAYÁN, COLOMBIA.
2014.**

Nota de Aceptación

Director
Dr. Rubiel Vargas Cañas

Jurado
Dr. Willfrand Pérez Urbano

Jurado
MSc. Arbey Osorio Dulce

Fecha de sustentación: **Popayán, 11 de Noviembre de 2014.**

DEDICATORIA.

A la memoria de Santiago Efraín Paredes, mi abuelo.

Quien me enseñó que para alcanzar grandes metas se requiere trabajar con constancia y dedicación.

A mi madre, Inés Paredes.

Por siempre estar conmigo, ser la fuerza y apoyarme en cada día, cada hora y cada minuto, por su cariño incondicional y por siempre, creer en mí.

A mi padre, Edgar Obando.

Por enseñarme el valor del trabajo, a conseguir metas con esfuerzo y jamás rendirse en el camino de la vida.

A mi hermana, Daniela E. Obando.

Por ser mi polo a tierra, junto con mis padres ser la razón principal de tanto esfuerzo y dedicación.

A mi madrina, Elsa María Paredes.

Por nunca dejarme solo; ser como una segunda madre y brindarme tanto apoyo en todas las etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS.

A mi director, Dr. Rubiel Vargas Cañas, por darme la oportunidad de trabajar con él, creer en mí, por su orientación, su tiempo y la grandísima colaboración en la ejecución de este trabajo.

A mis jurados, Dr. Willfrand Pérez y MSc. Arbey Osorio, por el tiempo dedicado a la lectura de este trabajo, sus recomendaciones y sugerencias.

A todos los amigos de la Universidad del Cauca por el tiempo de vida que compartieron conmigo.

Introducción.

El Sol es la principal estrella de nuestro sistema solar, y la más cercana, la Tierra y los demás planetas giran alrededor del Sol. La energía del Sol en forma de Radiación solar es compatible con casi toda la vida en la tierra a través de fotosíntesis y de esta radiación depende directamente el clima de la Tierra. El Sol genera su energía por la fusión nuclear del hidrogeno con helio. La luz del sol es la principal fuente de energía a la superficie de la tierra que puede ser aprovechada a través de una variedad de procesos naturales y sintéticos.

Básicamente todas las formas de energía en el mundo tal como lo conocemos tienen su origen en la radiación solar, petróleo, carbón y gas natural fueron producidos originalmente por procesos fotosintéticos, seguido de reacciones químicas complejas en las que la vegetación en descomposición fue sometiendo a altas presiones y temperaturas durante un largo periodo de tiempo. Incluso la energía del viento y la marea tiene un origen solar, ya que son provocadas por las diferencias de temperatura en diferentes regiones de la Tierra.

La mayor ventaja de la energía solar en comparación con otras formas de energía es que es limpia y se puede suministrar sin la contaminación al medio ambiente. Entre los usos más comunes que se le da a la radiación solar están desde el cultivo de alimentos, se utiliza para calentar y enfriar edificios, calentar agua para usos domésticos e industriales, generación de electricidad y más usos prácticos.

Preliminares.

I. Planteamiento del problema

La generación de alternativas limpias de obtención de energía, su aplicación, estudio y entendimiento, son vitales para tener un medio ambiente más sostenible, de acuerdo con la Organización de Naciones Unidas uno de sus *Objetivos de Desarrollo del Milenio*, es Garantizar la Sostenibilidad del Medio Ambiente, dados los altos índices de emisión de Dióxido de Carbono (CO_2), que desde 1990 se han incrementado un 46% [4], y en general en todo el mundo se ha reanudado el aumento de las emisiones de los gases de efecto invernadero, causantes de la lluvia acida, cabe agregar que la alta demanda existente sobre los llamados *combustibles fósiles* (Carbón, petróleo, gas natural), son una preocupante tendencia que exige que se tomen medidas drásticas.[4] Es por eso que estudiar y comprender las técnicas de obtención de energía limpia y renovable, ya sea para uso domestico o industrial por medio del sol, se proyectan como un factor importantísimo para crear fuentes de energía limpia y renovable, mitigar el daño al medio ambiente, hacerlo más sostenible y disminuir el alza en los combustibles convencionales.

II. Objetivos del trabajo.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar y comprender el funcionamiento de los sistemas de aprovechamiento de energía solar, sus componentes, técnicas de utilización, y difundirlos en sesiones de seminario. Para lograr este objetivo se han planteado los siguiente objetivos específicos: en primer lugar, fundamentar la teoría física de las técnicas de aprovechamiento de energía solar, en segundo lugar, estructurar, con la información obtenida, un documento didáctico que pueda ser utilizado como material de referencia de diseños basados en energía solar y finalmente diseñar un algoritmo adecuado para la implementación de un sistema solar que muestre la relación Costo/beneficio de la instalación de energía solar.

III. Justificación.

Si la economía mundial se expande para satisfacer las expectativas de los países de todo el mundo, la demanda de energía es probable que aumente, aunque se hacen grandes esfuerzos para aumentar la eficiencia del uso de energía, actualmente se cree que a mediano y largo plazo las tecnologías energéticas solares pueden satisfacer la demanda a precios que son iguales o menores que los dados por la energía convencional. Se prevé que con el estudio y apropiación de las técnicas en

energías solares y en fuentes renovables de energía, éstas podrían ser responsables de tres quintas partes de mercado de la electricidad del mundo y dos quintas partes del mercado de los combustibles. Por otra parte, hacer una transición a un uso intensivo de energía renovable proporcionaría beneficios ambientales y otros que no están registrados en la norma en términos económicos. Se prevé que para 2050 las emisiones de Dióxido de Carbono global (CO_2) se reducirán al 75 % desde 1985 [25], a condición de que se adopte las energías renovables. Además, tales beneficios podrían lograrse sin costo adicional, ya que se espera que la energía renovable sea competitiva con la energía convencional.

IV. Contribución.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende dar un gran impacto tanto en el campo académico como en el industrial, desde el punto de vista del uso y masificación de nuevas fuentes de energía renovable, que a mediano y largo plazo serán competitivas con las fuentes convencionales.

Índice general.

Índice general.

Índice de figuras.

Índice de tablas.

1. Introducción a la Energía Solar: Conceptos Preliminares.	1
1.1 Conversión y fuentes de Energía.	1
1.2 Reseña histórica de la utilización de la Energía Solar.	3
1.3 Radiación Solar.	5
1.3.1 Efecto Fotoeléctrico.	5
1.3.2 El Sol considerado como un cuerpo negro.	6
1.4 Parámetros básicos del sol.	8
1.5 Interacción de la radiación Solar con la Tierra.	10
1.5.1 Absorción, reflexión, transmitancia y dispersión.	10
1.5.2 Interacción de la radiación solar con la atmosfera.	10
1.5.3 Referencia AM1.5 para la Radiancia solar espectral.	11
1.5.4 Radiación Directa, Dispersa y Albedo.	12
1.5.5 Mapa Anual de Radiación Solar.	13
2. Celdas Solares: Fundamentos físicos de la conversión de Radiación solar en electricidad.	14
2.1 ¿Cómo convertir la luz en electricidad?	14
2.2 Celdas solares.	15
2.2.1 Principio de funcionamiento	15
2.2.2 Parámetros externos de una celda solar.	15
2.2.2.1 Características corriente-voltaje.	15
2.2.2.2 Potencia y eficiencia.	17
2.3 Parámetros de operación de celdas solares.	18
2.3.1 Mecanismos de recombinación de portadores de carga.	18
2.3.1.1 Recombinación Shockley	19
2.3.1.2 Recombinación <i>Auger</i>	19
2.3.1.3 Recombinación por radiación	19
2.3.2 Respuesta de las celdas solares al espectro de radiación.	20
2.3.2.1 Eficiencia externa cuántica.	20
2.3.2.2 Densidad de corriente en base a	

la eficiencia externa cuántica.	21
2.3.3 ¿Cómo las celdas atrapan la luz incidente?	21
2.3.2.1 Perdidas por absorción en una celda solar.	22
2.3.4 Temperatura en la celda.	23
2.4 Materiales y tecnologías usados en la elaboración de Celdas solares	24
2.4.1 Materiales del III-V grupo de la tabla periódica.	24
2.4.1.1 Características corriente-voltaje	24
2.4.2 Película delgada de silicio	26
2.4.3 Tecnología CIS y CIGS	27
2.4.4 Telurio de Cadmio.	28
2.4.5 Materiales orgánicos.	29
2.5 Relación Costo/eficiencia en energía fotovoltaica	30
3. Tecnología solar: Componentes de sistemas de aprovechamiento de energía solar.	31
3.1 Tipos de sistemas de conversión utilizando fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).	31
3.1.1 Sistemas tipo <i>Stand-alone</i> .	31
3.1.2 Sistemas conectados a la red eléctrica.	32
3.1.2.1 Sistemas energéticos descentralizados conectados a la red.	32
3.1.2.2 Sistemas energéticos centralizados conectados a la red.	32
3.2 Componentes de implementación de sistemas energéticos.	33
3.2.1 Conversores.	33
3.2.1.1 Paneles fotovoltaicos.	33
3.2.1.2 Turbina eólica.	34
3.2.2 Inversores.	34
3.2.2.1 Características de un inversor.	34
3.2.2.2 Tipos de inversores.	34
3.2.2.3 Topología de implementación de inversores.	35
3.2.3 Controlador de carga.	37
3.2.3.1 Principio de funcionamiento.	38
3.2.3.2 Mecanismos de prevención de sobrecarga.	38
3.2.4 Contadores bidireccionales.	39
3.3 Parámetros de funcionamiento de receptores de energía.	39
3.3.1 Paneles fotovoltaicos.	39
3.3.1.1 Características corriente-voltaje.	39

3.3.1.2	Inclinación y orientación de paneles fotovoltaicos.	40
3.3.1.3	Dependencia de la temperatura en la eficiencia Del panel fotovoltaico.	41
3.3.1.4	Punto de máxima potencia (MPPT).	42
3.3.2	Turbinas eólicas.	45
3.3.2.1	Potencia del viento.	45
3.3.2.2	Diseño de turbinas eólicas.	46
4.	Calculo, diseño y puesta a punto de sistemas de conversión de energía solar	47
4.1	Diseño de sistemas energéticos tipo <i>Stand-alone</i> .	47
4.1.1	Generalidades	47
4.1.2	Diagrama general de diseño.	47
4.1.2.1	Estudio de demanda de carga y días de autonomía.	48
4.1.2.2	Cuantificación de pérdidas en el sistema.	49
4.1.2.3	Horas de Sol equivalentes por día.	49
4.1.2.4	Diseño del arreglo fotovoltaico.	50
4.1.2.5	Controlador de carga.	50
4.1.2.6	Baterías necesarias.	51
4.1.2.7	Determinación del inversor.	52
4.2	Diseño de sistemas energéticos interconectados a la red.	52
4.2.1	Generalidades.	52
4.2.2	Eficiencia de un sistema interconectado a la red.	53
4.2.3	Diagrama general de diseño.	53
4.2.3.1	Estudio de demanda de carga.	54
4.2.3.2	Cuantificación de pérdidas y hora solar.	54
4.2.3.3	Determinación del inversor a usar.	55
4.3	Viabilidad financiera de los sistemas energéticos usando energía solar.	56
4.3.1	Valor presente neto.	56
4.3.2	Periodo de recuperación.	57
4.3.3	Tarifificación en sistemas energéticos.	58
4.3.3.1	Tarifificación bruta.	58
4.3.3.2	Tarifificación neta.	58
4.3.4	Costo normalizado de energía (LCOE).	58
4.3.5	Equivalencia con la red eléctrica.	59
4.3.6	Relación de rendimiento energético.	60
4.3.7	Periodo de recuperación de energía.	60

Anexos

Anexo A: Radiación y ondas electromagnéticas.	62
Anexo B: Atlas de radiación solar mundial.	65
Anexo C: Atlas de radiación solar Colombia.	66
Anexo D: Estado y perspectivas de aprovechamiento de energía solar.	67
Anexo E: Conductores, semiconductores y aislantes.	70
Anexo F: Celdas de cristal de Silicio (c-Si).	73
Anexo G: Baterías.	80
Anexo H: Sistemas solares térmicos.	85

Índice de Tablas.

1.1 Reseña histórica de la utilización de la Energía Solar.	3
1.2 Composición química del Sol.	9
2.1 Valores de banda de <i>gap</i> de películas delgadas de silicio.	27
4.1 Estudio de carga para potencia DC.	48
4.2 Estudio de carga para potencia AC.	48
4.3 Casos para determinar la interconexión entre módulos fotovoltaicos.	51
F.1 Tipos de cristal de silicio	74

Índice de Figuras.

1.1 Diagrama representativo de conversión de fuentes de Energía	2
1.2 Efecto Fotoeléctrico.	6
1.3 Espectro de Radiación de Cuerpo negro.	7
1.4 Espectro de Radiación Solar al llegar a la Tierra.	7
1.5 Interacción de la luz del Sol con la Atmosfera.	11
1.6 Espectro de radiación para AM1.5.	12
1.7 Esquemas pirómetro.	12
1.8 Tipos de Radiación.	13
2.1 Funcionamiento de una celda solar.	15
2.2 Circuito equivalente de una celda solar	16
2.3 Características de corriente y voltaje de una celda solar.	17
2.4 Potencia máxima.	18
2.5 Banda de <i>gap</i> directa/indirecta.	20
2.6 Eficiencia cuántica ideal.	20
2.7 Incidencia de la luz en un material absorbente.	21
2.8 Coeficiente de absorción para diferentes materiales.	22
2.9 Pérdidas generadas en una celda solar.	22
2.10 Celda solar multi-unión	25
2.11 Corriente-Voltaje para una celda multi-unión	25
2.12 Fases de una película delgada de silicio.	26
2.13 Respuesta al espectro AM1.5 de aleaciones de películas delgadas.	27
2.14 Celda con tecnología CIS y CIGS	28
2.15 Celda de telurio de cadmio.	29
2.16 Celda experimental de polímero.	29
2.17 Relación costo/eficiencia de diferentes tecnologías fotovoltaicas.	30
3.1 Sistema energético tipo <i>stand-alone</i>	31
3.2 Sistema conectado a la red eléctrica.	32
3.3 interconexión entre celdas fotovoltaicas.	33
3.4 Topología de inversor central.	36
3.5 Topología de instalación tipo micro inversor.	36
3.6 Topología de implementación inversor en serie.	37
3.7 Topología de inversor en serie múltiple.	37
3.8 Controlador de carga	38
3.9 Topología de implementación de controladores de carga.	39
3.10 Curva corriente-voltaje para un panel fotovoltaico.	40

3.11	Inclinación de un sistema fotovoltaico.	41
3.12	Efectos de la temperatura en un panel fotovoltaico.	41
3.13	Grafica Potencia-Voltaje, Corriente-Voltaje y PPM.	42
3.14	Grafica Potencia-Voltaje.	44
3.15	Grafica Potencia-Voltaje representando conductancia incremental.	44
3.16	Flujo de aire a través de una turbina-rotor.	45
3.17	Diagrama de fuerzas sobre las aspas de una turbina eólica.	46
4.1	Diagrama general de diseño sistemas <i>Stand-alone</i> .	48
4.2	Diagrama general de diseño sistemas interconectados a la red.	54
4.3	Equivalencia del precio de red eléctrica y precio del sistema fotovoltaico.	59
4.4	Costo de producción de tecnologías fotovoltaicas.	60
4.5	Tiempo de recuperación energética para distintos tipos de tecnologías.	61
A.1.	Espectro Electromagnético.	64
B.1.	Mapa Anual de la radiación Solar en el mundo.	65
C.1.	Mapa Anual de la radiación Solar en Colombia.	66
D.1.	Sistemas fotovoltaicos instalados alrededor del mundo	67
D.2.	Fuentes de Energía renovable independientes de combustibles fósiles instalados y una proyección al futuro.	68
E.1.	Representación esquemática de las bandas de conducción, valencia y de <i>gap</i> , en los distintos tipos de materiales.	70
E.2.	Esquema representativo semiconductores tipo <i>n</i> y <i>p</i> .	71
E.3.	Diagrama representativo para la densidad de corriente de los huecos en una unión <i>p-n</i> .	72
F.1	Procesos de manufactura del Silicio.	75
F.2	Celda solar de Silicio	76
F.3	Contactos en una celda solar.	76
F.4	Dimensiones de contactos.	77
F.5	Superficie del silicio monocristalino.	78
F.6	Celda de alta eficiencia	79
G.1	Ciclo de Vida vs intensidad de descarga en una batería.	83
G.2	Batería de electrodos de plomo.	83
H.1	Componentes de un sistema solar térmico.	87
H.2	Balance de energía en un colector solar térmico.	87
H.3	Eficiencia de colector solar térmico.	88
H.4	Tipo de colector solar térmico descubierto.	88
H.5	Tipo de colector solar térmico cubierto.	89
H.6	Tipo de colector solar térmico de vacío.	89
H.7	Colector tipo plano.	90

H.8 Colector tipo concentrador y dispositivo óptico.	90
H.9 Interconexión entre paneles solares.	91
H.10 Circuito solar térmico directo.	92
H.11 Circuito solar térmico indirecto.	92
H.12 Sistema solar térmico activo.	93
H.13 Sistema solar térmico pasivo.	93
H.14 Sistema solar térmico de potencia.	94

Capítulo 1.

Introducción a la Energía Solar: Conceptos Preliminares.

La energía como concepto está con nosotros todos los días de nuestra vida, su definición científica y técnica es la capacidad de un sistema de realizar un trabajo [1]. Imaginar este concepto es algo difícil ya que requiere cierto grado de abstracción, lo que resulta mejor, es estudiar cómo aprovechar y transformar las diversas formas de energía que nos presenta la naturaleza.

1.1 Conversión y fuentes de Energía.

Definir energía es uno de los conceptos más importantes tanto en ciencia como en ingeniería, se busca dar una respuesta a la pregunta: ¿Qué es la energía? Usamos la energía a diario para diferentes tareas, que van desde usarla como combustible para desplazarnos, hasta el uso de electricidad, pero estas ideas realmente no definen lo que es la energía. Cada proceso físico que ocurre en el universo implica una transferencia de energía o una transformación de ésta. De acuerdo al teorema del trabajo y la energía *la energía de un sistema no se crea ni se destruye, solo se transforma* [1]. Donde si el aumento total de energía ($\Delta E_{sistema}$) en un sistema cambia, este aumento esta dado por las diferentes formas de trabajo que realiza el sistema ($\sum T$), los cuales puede ser, *trabajo* mecánico (W), o trabajo calorífico, *calor* (Q), o ambos, esto es:

$$\Delta E_{sistema} = \sum T \quad (1.1)$$

Las unidades en el Sistema Internacional, tanto para el trabajo mecánico como para la energía total esta dado por **Newton.metro (N.m)**. Esta combinación de unidades es usada con poca frecuencia, por lo cual se define una nueva unidad derivada, que recibe el nombre de Joule (J).

Otro concepto derivado de la energía, es el de potencia (P), el cual se define como la energía del sistema por unidad de tiempo, y sus unidades en el Sistema Internacional son los Joules/segundo o mejor llamados *Watts (W)* [2].

$$P = \frac{\Delta E}{t} \quad (1.2)$$

Pero para aplicaciones prácticas, la unidad que se utiliza comúnmente son los Kilowatt-hora (kWh), el cual define una unidad de energía en términos de una unidad de potencia [1]. La cantidad de energía representada por 1 kWh es:

$$1 kWh = (10^3 W)(3600s) = 3.60 \times 10^6 J \quad (1.3)$$

La conversión de fuentes de energía; se muestran en la Figura 1.1, los combustibles fósiles, fuentes primarias de energía pueden ser convertidos en calor, con una eficiencia del 90%. Este calor se transforma mediante dispositivos, con una eficiencia del 60%, en energía mecánica y generadores eléctricos se encargan de transformarla en energía eléctrica, en todo el proceso de conversión para llegar a energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, la pérdida de energía es de menos del 60%. Mediante celdas combustibles de hidrógeno se puede llegar a energía eléctrica a partir de energía química, con una eficiencia de conversión de alrededor 60%. Para el proceso contrario, es decir, de energía eléctrica a energía química se utiliza el proceso llamado electrólisis, donde en este caso, agua pura se "disocia" usando corriente eléctrica, en Hidrógeno almacenado en el cátodo y Oxígeno, que se almacena en el ánodo [3]. La energía cinética del viento se transforma en Energía Eléctrica, a partir de molinos de viento, haciendo la transición primero a energía mecánica; con un potencial energético mundial respecto al viento de 55 Twatts [4]. La energía solar puede ser convertida a dos formas, la primera es a Energía Eléctrica, usando dispositivos fotovoltaicos, con una eficiencia en el rango 15-20%, y la segunda es a energía térmica donde se transforma la radiación en calor, mediante dispositivos llamados colectores [5].

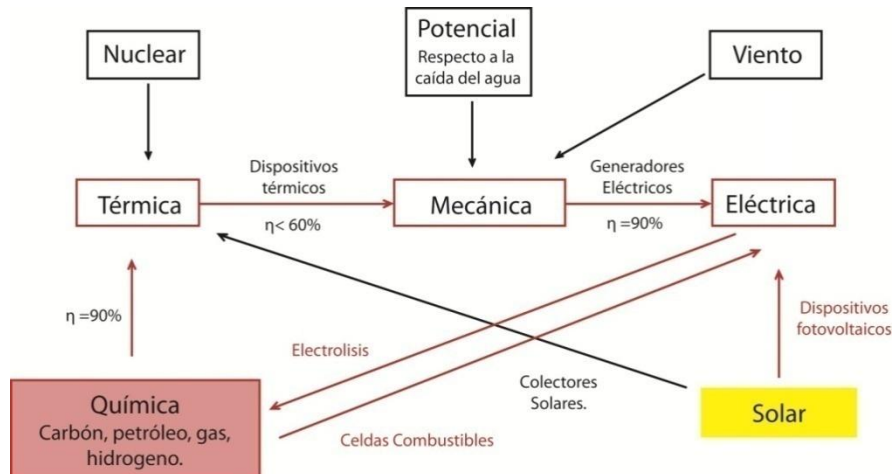


Figura 1.1 Diagrama representativo de conversión de fuentes de Energía [4].

1.2 Reseña histórica de la utilización de la Energía Solar.

A lo largo del desarrollo humano la apropiación y aprovechamiento de la energía solar no ha sido ajena a este desarrollo y evolución, los hechos más representativos en avances tecnológicos se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Reseña histórica de la utilización de la energía solar.

Periodo de Tiempo	Avance Tecnológico	Personajes o Entidades Representativos.
2.500 A.C	El primer uso práctico para la energía solar, fue el secar la comida para su respectiva preservación [5].	Primeras civilizaciones.
Siglo VII A.C	Arquímedes usa espejos cóncavos que concentraban la radiación del Sol en un punto, esto, para quemar la flota romana.[6]	Arquímedes (287–212 A.C.)
Siglo XVIII.	<ul style="list-style-type: none"> • Se construye una red de “edificios calientes”, los cuales usaban cajas hechas de vidrio que al hacer pasar agua por ellas, se calentaba hasta 180°C, considerándose los primeros colectores. • Se construye en Francia, un horno usando lentes, el cual alcanzaba una temperatura de 1750°C. 	<ul style="list-style-type: none"> • Horace de Saussure (1740-1799) • Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794)
Siglo XIX.	<ul style="list-style-type: none"> • Se construyen las primeras plantas de uso masivo de energía solar, en Europa y el Norte de África, dichas plantas alimentaban con vapor un cierto número de dispositivos [7]. • Se diseña un nuevo tipo de colector solar en forma de cono truncado, haciendo que recolectar la radiación solar sea más eficiente [8]. • Se hacen los primeros pasos para la tecnología fotovoltaica con una unión primitiva de platino y Selenio, posteriormente con una unión oro- 	<ul style="list-style-type: none"> • August Monchot (1825-1911) • Abel Pifre (1852-1928) • William Grylls (1836-1915) • John Ericsson (1803-1889)

	<p>selenio se llega a la primera celda fotovoltaica independiente con una eficiencia del 1%.</p>	
Siglo XX.	<ul style="list-style-type: none"> • Se instalan los primeros colectores solares en EE.UU, en forma de sombrilla invertida, conformada por cerca de 178 espejos, para captar mejor la radiación solar [8]. • En Egipto se construye la planta más grande de bombeo de vapor para la época, transformando radiación solar, mediante colectores cilíndricos [8]. • Se sientan las bases del cristal de silicio, tecnología aún usada hasta hoy para producir celdas solares fotovoltaicas, y de igual manera se producen las primeras celdas solares en propiedad, con eficiencias desde el 4% hasta 11% • El uso más común de la tecnología fotovoltaica, en esta época, es alimentar los satélites enviados al espacio exterior [9]. • Se construye el mayor sistema de plantas solares en California, destinados a transformar a energía térmica la radiación del Sol [10]. 	<ul style="list-style-type: none"> • A.G Eneas (1876-1963) • Frank Shuman (1862-1918) • Jan Czochralski (1885-1953) • AT&T (<i>American Telephone & Telegraph</i>) • NASA (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>) • NREL (<i>National Renewable Energy laboratory</i>)
Siglo XXI.	<ul style="list-style-type: none"> • La Unión Europea va a la cabeza en la apropiación de energía solar fotovoltaica, teniendo la mayor parte de sistemas instalados en países que la conforman [11]. • Se trabaja en una placa fotovoltaica que concentre mayor radiación solar, minimizando perdidas por energía calorífica en la conversión a electricidad y una eficiencia del 80%. [12]. • Se buscan nuevos materiales, en este 	<ul style="list-style-type: none"> • Unión Europea (<i>UE</i>) • Universidad Asociada de Vanderbilt. • IBM (<i>International Business Machines</i>) • Google.

	<p>caso orgánicos, basados en espinacas para desarrollar módulos y celdas fotoeléctricas con una eficiencia mayor, alrededor del 10% más que las convencionales de silicio [11].</p> <ul style="list-style-type: none">• El uso de nanotubos de carbono hacen que las pérdidas por calor en la conversión térmica sean reducidas un 20%; además poder almacenarla indefinidamente. [11].• Google, construye la planta solar más grande del mundo, con una capacidad de 400MW, y abastecer de electricidad a 140.000 edificios de California [12].	
--	--	--

1.3 Radiación Solar

La energía solar llega a la Tierra en forma de radiación. Para empezar a estudiar las propiedades de la radiación solar necesitamos considerar y entender dos puntos de vista: el primero es ver la radiación como un flujo de fotones, y el segundo es abordarla como ondas electromagnéticas. El primer punto de vista es esencial para entender cómo se recargan las celdas solares y los procesos fotoquímicos involucrados con el Sol. El segundo punto de vista es esencial para aplicaciones térmicas de la energía solar.

1.3.1 Efecto Fotoeléctrico.

El proceso por el cual se liberan electrones de un material por la acción de radiación se denomina *emisión fotoeléctrica* o *efecto fotoeléctrico*. Los electrones emitidos se denominan *fotoelectrones* debido al método de producción [13].

Experimentalmente, una envoltura de vidrio encierra al aparato en un espacio al vacío, la luz incidente la cual es monocromática penetra a través de una ventana de cuarzo, incide sobre la placa de metal y libera electrones como en el ejemplo mostrado en la Figura 1.2, los cuales al ser atraídos a la copa de metal mediante una diferencia de potencial V aplicada entre los dos metales, generan una corriente eléctrica [13].

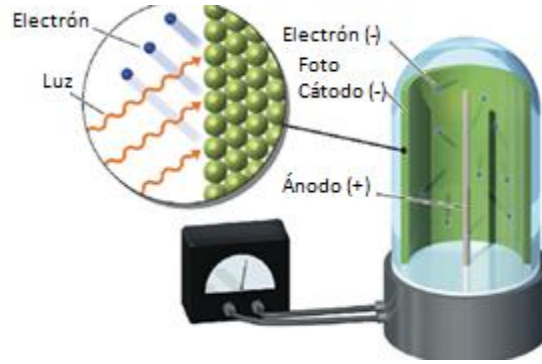


Figura 1.2 Esquema que representa el dispositivo para estudiar el efecto fotoeléctrico [14].

Sin embargo, si esta diferencia de potencial se hace lo suficientemente grande se alcanzara un valor V_0 para el cual la corriente fotoeléctrica se hace igual a cero, a este valor se le llama *potencial de frenado*. Esta diferencia de potencial V_0 multiplicada por la carga del electrón es una medida de energía cinética K_{max} .

$$K_{max} = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \phi \quad (1.4)$$

Donde $h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$ es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la luz y ϕ es la *función trabajo* del metal. Cuando un fotón, partícula energética que compone la luz carente de masa, interactúa con un electrón en un metal, este le transfiere toda su energía al electrón, dado por la función trabajo del metal, típicamente esta dado en electrón-volt e.V. Si la energía del fotón es más pequeña que la función trabajo, el electrón permanecerá en el metal. En cambio, si la energía del fotón es mayor que la función trabajo, el electrón escapara del metal [15].

1.3.2 El Sol considerado como un cuerpo negro.

Para estudiar mejor el Sol y su radiación, tendremos que considerarlo como un cuerpo negro, se lo considera así, ya que según la definición de cuerpo negro, es un cuerpo que no refleja y absorbe toda la radiación que incide sobre él. En equilibrio térmico, la densidad de radiación de un cuerpo negro, esta dado por la *ley de Planck*, como el mostrado en la Ecuación 1.5.

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1.5)$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, λ es la longitud de onda de emisión de radiación, T es la temperatura a la que este el cuerpo y k es la constante de Boltzman [18].

La Figura 1.3 muestra que el espectro de radiación a determinada longitud de onda de un cuerpo depende de la temperatura a la que este el cuerpo [18].

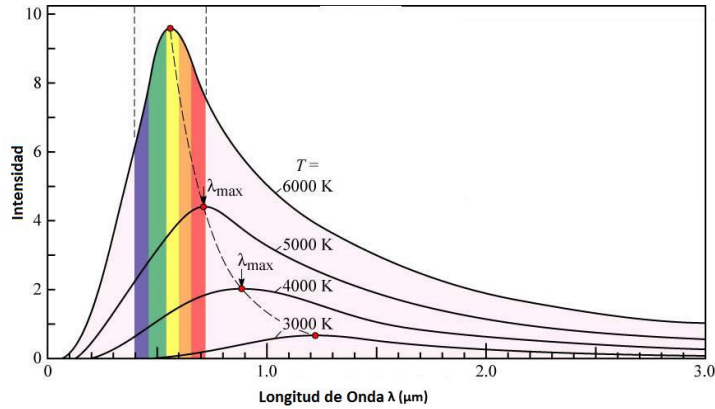


Figura 1.3 Radiancia espectral de un cuerpo negro como función de la frecuencia de radiación para diferentes temperaturas.

A pesar de todo, el Sol no es un cuerpo negro perfecto, ya que no está en equilibrio térmico, pero la ley de Planck es una excelente primera aproximación a la radiación electromagnética emitida por el mismo tal como lo muestra la Figura 1.4. Cuando el Sol emite radiación, el 9% del espectro solar es radiación en el espectro del ultravioleta y tiene una longitud de onda de tan solo 400 nm. 44% de esta radiación esta en el rango visible, mientras el 47% de la misma esta en el infrarrojo [19].

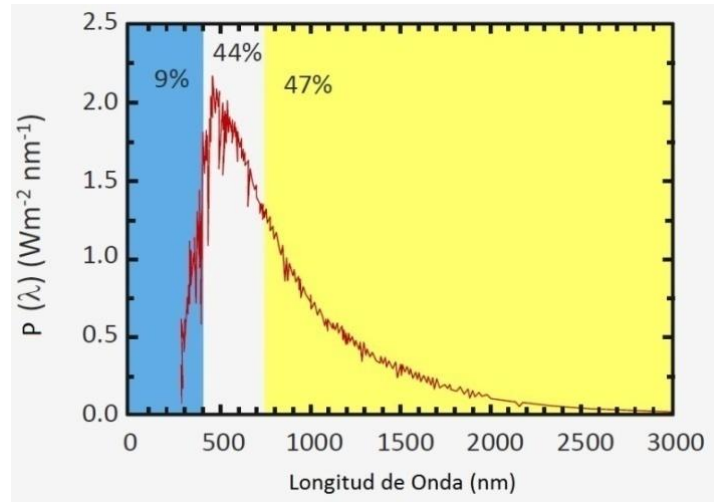


Figura 1.4 Espectro de radiación del Sol al llegar a la Tierra

1.4 Parámetros Básicos del Sol

- **Constante Solar.** La variación en la densidad de radiación teniendo en cuenta la posición promedio de la Tierra, no excede 0.1% en un siglo. A pesar de no ser una constante física, esta cantidad, S , es llamada *constante solar*,

$$S = 1366 \pm 3W/m^2 \quad (1.6)$$

- **Distancia de la Tierra al Sol.** Dado que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es una elipse, la distancia no es constante. En el *perihelio*, la distancia es mínima, $1.471 \times 10^{11}m$. En cambio en el *afelio*, la distancia es máxima, $1.521 \times 10^{11}m$. La distancia promedio, A_{\odot} , es tratada como una cantidad fundamental en astronomía, *unidad astronómica de longitud*. [20],

$$A_{\odot} = 1.5 \times 10^{11}m \quad (1.7)$$

- **Radiación total del Sol.** La radiación total del Sol, L_{\odot} , o también llamada *luminosidad solar*, puede ser evaluada usando la constante solar y el promedio de la distancia entre la Tierra y el Sol, A_{\odot} , se obtiene,

$$L_{\odot} = 4\pi A_{\odot}^2 S = 3.84 \times 10^{26} W \quad (1.8)$$

Así pues, en un segundo, el Sol irradia más energía que la consumida por la humanidad durante toda su existencia y en una hora la tierra recibe más energía solar de la que necesitaría toda la humanidad en un año [20].

- **Masa.** La masa del Sol fue medida utilizando las leyes de Kepler y los parámetros orbitales de los planetas. Para aplicaciones prácticas, un valor aproximado, con una tolerancia del 1% está dado por el valor [20]:

$$m_{\odot} = 2 \times 10^{30} Kg \quad (1.9)$$

- **Radio.** Ya que la distancia entre el Sol y la Tierra no es constante el diámetro angular del Sol no es constante, sin embargo este valor está comprendido en un rango entre 31.6' a 32.7'. El valor promedio es 32' o 0.533°. Usando la distancia promedio A_{\odot} , el radio del Sol es:

$$r_{\odot} = \frac{1.5 \times 10^{11} \times 0.533}{2 \times 57.3} m \cong 6.96 \times 10^8 m \quad (1.10)$$

- **Potencia de Emisión.** La potencia de emisión en la superficie del Sol, en Watts por metro cuadrado, puede ser calculada mediante la Ecuación 1.11.

$$U_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r_{\odot}^2} = \frac{3.84 \times 10^{26}}{4\pi (6.96 \times 10^8)^2} \cong \frac{63.1 MW}{m^2} \quad (1.11)$$

- **Temperatura en la Superficie.** Considerando el Sol como un cuerpo negro, la temperatura puede ser calculada mediante la ley de Stefan-Boltzman Ecuación 1.13.

$$U_{\odot} = \sigma T^4 \quad (1.12)$$

$$T_{\odot} = \left[\frac{U_{\odot}}{\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{63.1 \times 10^6}{5.67 \times 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{4}} \cong 5800 K \quad (1.13)$$

Para efectos prácticos usaremos el valor de 5800K como temperatura de superficie, y su equivalente, 0.5 eV, un valor que es conveniente para el capítulo en el que trataremos la técnica de conversión fotovoltaica [21].

- **Composición del Sol.** La fina estructura del espectro solar provee evidencias de su composición química (Tabla 1.2). Los elementos constitutivos del Sol fueron descubiertos a partir del espectro solar de radiación [20].

Tabla 1.2 Composición química del Sol.

Elemento	Z	Peso Molecular	Abundancia (% de Número de Átomos)	Abundancia (% de masa)
Hidrogeno.	1	1.008	91.2	71.0
Helio.	2	4.003	8.7	27.1
Oxigeno.	8	16.000	0.078	0.97
Carbono.	6	12.011	0.043	0.40
Nitrógeno.	7	14.006	0.0088	0.096
Silicio.	14	28.086	0.0045	0.099
Magnesio.	12	24.312	0.0038	0.076
Neón.	10	20.183	0.0035	0.058
Hierro.	26	55.847	0.0030	0.14

1.5 Interacción de la radiación solar con la Tierra.

Debido al efecto de la atmosfera, la luz del sol puede ser reflejada, dispersada, o absorbida antes de llegar a la superficie de la Tierra. Las condiciones de radiación solar varían con la región y el tiempo.

1.5.1 Absorción, Reflexión, Transmitancia y Dispersión.

Cuando en un cuerpo incide radiación, en general, parte de esa radiación incidente puede ser *reflejada*, *absorbida*, otra parte es *transmitida* y además otra parte puede ser *dispersada*. Se definen tres coeficientes;

$A(\lambda)$, *absorbancia*, fracción de radiación incidente de longitud de onda λ que es absorbida.

$R(\lambda)$, *reflectancia*, fracción de radiación incidente de longitud de onda λ que es reflectada.

$T(\lambda)$, *transmitancia*, fracción de radiación incidente de longitud de onda λ que es transmitida.

La *dispersión* tiene su origen en una disminución en la velocidad de propagación de la luz cuando atraviesa el medio. Debido a que el material **absorbe** y reemite la luz cuya frecuencia es cercana a la frecuencia de oscilación natural de los electrones que están presentes en él, ésta luz se propaga un poco más despacio en comparación a luz de frecuencias distintas [20].

Si la radiación incidente no presenta carga eléctrica, o su longitud de onda no presenta cambio, el principio de conservación de energía requiere que se cumpla:

$$A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1 \quad (1.14)$$

1.5.2 Interacción de la Radiación solar con la Atmosfera.

Aproximadamente, el 30% de la radiación solar es reflejada, o transmitida de vuelta al espacio como se muestra en la Figura 1.5, un 6% es transmitida por el aire, 20% es reflejada por las nubes; 4% es reflejada por la superficie de la Tierra; y 20% es absorbido por la atmosfera: 16% es absorbida por el agua, vapor y ozono (O_3); el otro 4% es absorbido por las nubes. Así la radiación solar que es absorbida calienta la atmosfera. 50% es absorbida por la superficie solida de la Tierra. La radiación total recibida por la atmosfera y la parte solida de la Tierra es de alrededor del 70% [21].

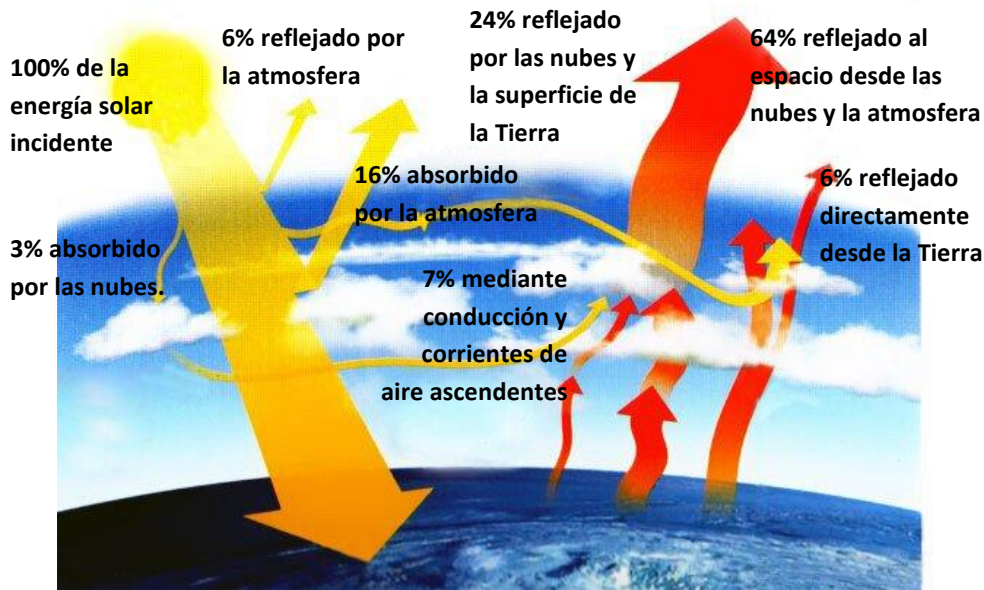


Figura 1.5 Interacción de la luz del Sol con la Atmósfera.

1.5.3 Referencia AM1.5 para la Radiancia solar espectral.

En la superficie de la Tierra durante la dispersión y absorción, en un día perfecto, es decir con el cielo totalmente despejado, cuando la radiación solar es perfectamente perpendicular con la superficie, la radiación se reduce cerca de un 22% [22].

Para estandarizar las medidas para aplicaciones de energía solar, en 1982, la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, (ASTM por sus siglas en inglés), empezó a promulgar las *tablas estándar de referencia para la radiancia solar espectral con masa de aire 1.5*. Este estándar fue revisado en 2003 en ASTM G173-03.

Un estándar separado, teniendo en cuenta la masa del aire nula, fue promulgado en 2006 en la norma ASTM E490-06. Una extensión de diferentes ángulos de inclinación fue promulgada en 2008 en ASTM G197-08. El estándar norteamericano fue adoptado por la Organización Internacional de Estandarización (ISO), el cual está indexado en la norma *ISO 9845-1*, de 1992.

La medición de la *masa de aire* (AM) se realiza, teniendo en cuenta el ángulo zenit, el cual es el ángulo que forma la vertical de un lugar y la esfera celeste, en este caso, el Sol, dicho de otra forma, es el punto más alto en el cielo con relación al observador, que se encuentra justo sobre su cabeza (90°). Cuando el Sol está bajo un ángulo zenit correcto y condiciones atmosféricas razonables, la absorción a la atmósfera es definida como *masa de aire 1* [22].

En muchos casos, el ángulo zenit del Sol no es cero. ASTM escogió la condición estándar cuando la absorción es 1.5 veces la masa normal de aire, que se abrevia como AM1.5. El ángulo zenit estándar, se define como se muestra en la Ecuación 1.15:

$$\theta = \arccos \frac{1}{1.5} = 48.19^\circ \quad (1.15)$$

El espectro de radiación para AM1.5 se muestra en la Figura 1.6. La densidad de potencia de radiación es 1.366 kW/m². El espectro AM1.5 muestra un número de efectos atmosféricos asociados al ángulo zenit [22].

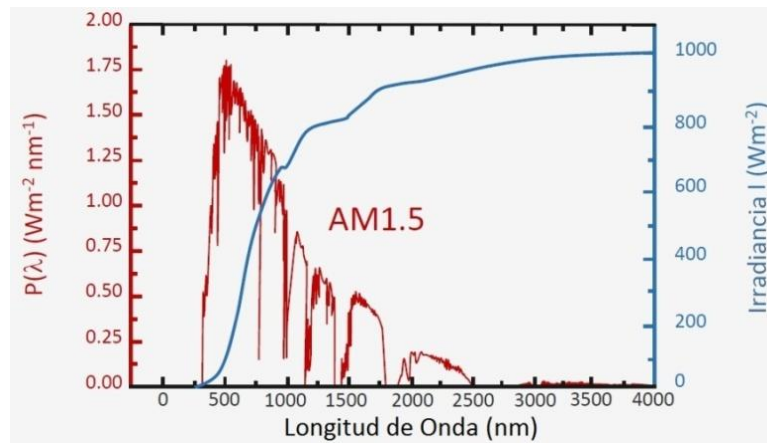


Figura 1.6 Espectro de radiación para AM1.5

1.5.4 Radiación Directa, Dispersa y Albedo.

Según cómo llegue la luz solar a la superficie de la Tierra, podemos clasificar la radiación en tres tipos diferentes: **directa**, **dispersa** o **difusa** y **albedo**. Esta radiación es censada y los datos procesados por un *pirómetro*, el cual es un instrumento que mide la radiancia solar Figura 1.7.

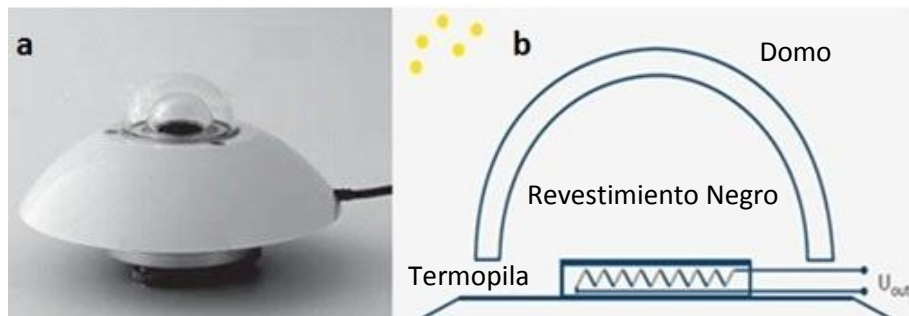


Figura 1.7 a) Pirómetro típico exterior. b) Diagrama esquemático [30].

La radiación solar *directa* es la que incide sobre cualquier superficie con un ángulo, único y preciso, depende del tiempo y de la ubicación geográfica de la región.

Los gases de la atmosfera *dispersan* más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que longitudes de onda más largas (naranja y rojo).

Se llama *albedo* a la fracción de la radiación reflejada por la superficie de la Tierra o cualquier otra superficie. Para un cuerpo negro, su valor es igual a cero. La Figura 1.8 muestra un esquema de los tipos de radiación [23].

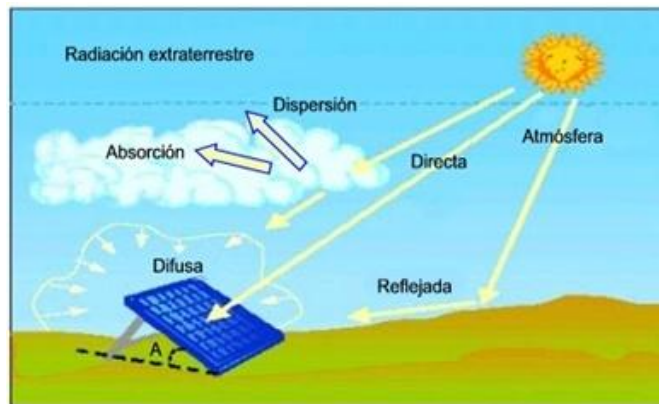


Figura 1.8 Tipos de Radiación.

1.5.5 Mapa anual de radiación solar.

Se discutió anteriormente que la variación de radiación solar directa es función del tiempo, de la longitud y la latitud de la región en cuestión. Esto debido a que en la radiación incidente siempre se presentará un porcentaje de pérdidas, este porcentaje depende de la localización de la región. Una representación frecuente es el *mapa anual de radiación solar* (ver Anexo B y C), el cual tiene dos convenciones:

1. La radiación anual en Kilowatt-hora por metro cuadrado. La radiación solar estándar se define como un sol, o 1 kW/m^2 . Además la radiación es expresada en horas por año.
2. El promedio de radiación diurna en kilowatts-hora por metro cuadrado en un año. De forma similar se expresa en h/día. El rango más alto es el de 6h/día y el más bajo es 2h/día. De aquí se establece la Ecuación 1.16:

$$\text{Radiación Anual} = 365.2422 \times \text{promedio de radiación durante el día.} \quad (1.16)$$

Capítulo 2.

Celdas Solares: Fundamentos físicos y técnicos de la conversión de radiación solar en electricidad.

Las celdas fotovoltaicas, son dispositivos de estado sólido que convierten la luz solar directamente en electricidad, sin necesidad de dispositivos adicionales tales como motores térmicos o equipo rotativo. Generan electricidad sin producir emisiones de efecto invernadero u otros gases similares y su principio de operación es prácticamente silencioso.

2.1 ¿Cómo convertir la luz en electricidad?

Las partículas constitutivas de la luz (*fotones*) interactúan con los electrones de los materiales, estos materiales deben tener propiedades y características que permitan generar una corriente eléctrica. Los semiconductores son los materiales más utilizados para desarrollar dispositivos fotovoltaicos y su principio de funcionamiento se emplea en las denominadas *celdas solares*.

2.1.1 Excitación de portadores de carga por medio de la luz en un Semiconductor.

Para excitar las cargas por medio de la luz, consideremos un fotón incidente. Este fotón puede ser absorbido por un material semiconductor y puede ser usado para excitar un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción. Sin embargo, si el fotón absorbido cuenta con una energía más pequeña que la banda de *gap*, este fotón carece de la energía necesaria para excitar un electrón y hacerlo pasar de la banda de valencia a la banda de conducción. Una situación contraria se presenta cuando la energía del fotón es mucho mayor que el valor de la banda de *gap* del semiconductor, este fotón puede excitar un electrón de un nivel de energía más profundo de la banda de valencia y llevarlo hasta la banda de conducción. La energía extra es liberada en forma de calor, la cual es responsable del calentamiento del semiconductor [28].

2.2 Celdas Solares.

2.2.1 Principio de Funcionamiento

Una celda solar es un diodo semiconductor de una gran área [4]. La radiación del Sol que incide en el semiconductor genera pares electrón-hueco causando un incremento de la concentración de portadores de carga, estos portadores de carga llegan hasta la zona de agotamiento y son impulsados por el campo eléctrico existente. Como lo muestra la Figura 2.1, entre los contactos de la región n y la región p se detecta una tensión V . Cuando una resistencia de carga R se aplica, una corriente I fluye, y se disipa una potencia [30].

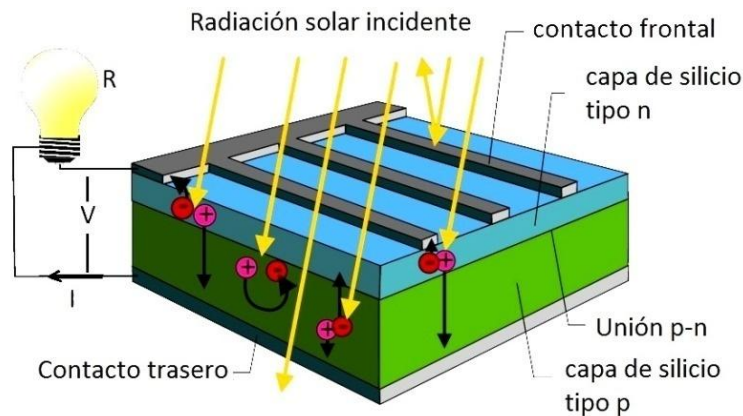


Figura 2.1 Esquema de funcionamiento de una celda solar [4].

2.2.2 Parámetros externos de una celda solar.

2.2.2.1 Características Corriente-Voltaje.

Los fotones provenientes de la radiación solar chocan con los electrones de los átomos del material semiconductor, creando pares electrón-hueco. Si los contactos eléctricos están unidos a los lados positivo y negativo, forman un circuito eléctrico y los electrones son capturados en forma de corriente eléctrica, denominada *fotocorriente*, I_{ph} , ya que durante la oscuridad la celda solar no está activa y trabaja como un diodo que no produce ninguna corriente o voltaje. Sin embargo, si es unido a un suministro de voltaje externo genera una corriente, llamada corriente de diodo o *corriente oscura*, I_D . Una celda solar por lo general es representada por un modelo eléctrico equivalente de un diodo como el esquema mostrado en la Figura 2.2 [30].

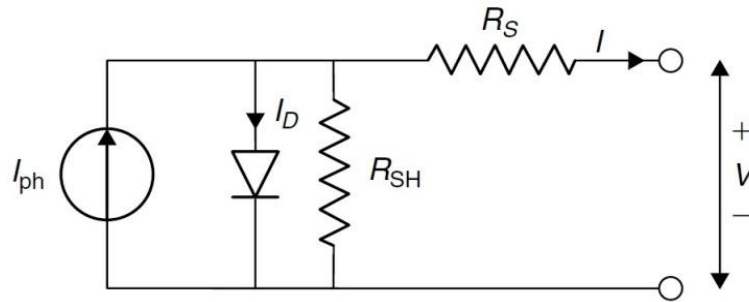


Figura 2.2 Circuito equivalente de una celda solar [31].

El modelo simplificado contiene una fuente de corriente, I_{ph} , un diodo, y una resistencia en serie R_s , que representa la resistencia dentro de cada celda. El diodo también posee una resistencia interna, R_{SH} . La corriente neta es la diferencia entre la fotocorriente, I_{ph} , y la corriente normal del diodo, I_D . Dado que la resistencia interna del diodo es por lo general mucho más grande que una resistencia de carga, logrando de este modo que menos potencia sea disipada internamente en la celda, como lo muestran las Ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{e(V+IR_s)}{kT_c} \right] - 1 \right\} - \frac{V+IR_s}{R_{SH}} \quad (2.1)$$

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{qV}{kT_c} \right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

Donde,

$k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K; constante de Boltzman para los gases.

T_c =temperatura absoluta de la celda (K).

$q=1.602 \times 10^{-19}$ J/V; Carga eléctrica electrón.

V = voltaje a través la celda (V)

I_o =corriente de saturacion de oscuridad, depende de la temperatura (A).

Las características de una celda solar sin radiación incidente (características a oscuridad), corresponden a las de un diodo. Cuando la celda solar es iluminada, estas características cambian por el aumento de la fotocorriente I_{ph} , en dirección contraria, como lo muestra la Figura 2.3. [30].

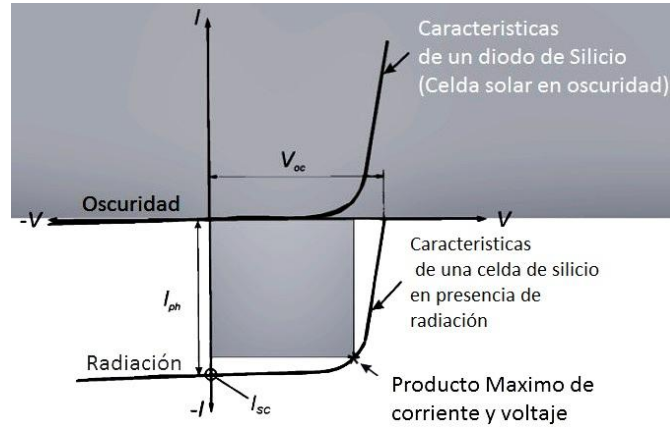


Figura 2.3 Características de corriente y voltaje de un diodo (celda solar en la oscuridad) y una celda solar iluminada con una corriente de corto-circuito I_{sc} y un voltaje de circuito abierto V_{oc} [30].

En la curva de corriente-voltaje de una celda solar bajo iluminación se presenta una corriente llamada corriente de corto circuito, I_{sc} , la cual es máxima y se genera de manera constante mientras el voltaje en la celda es cero [30].

El valor V_{oc} es el voltaje de circuito abierto, el cual bajo iluminación describe la tensión entre los electrodos, si no hay corriente fluyendo [5]. El voltaje de circuito abierto puede ser calculado cuando la fotocorriente, I_{ph} , es igual a I_D . Resolviendo para V_{oc} , como se representa en la Ecuación 2.3.

$$V_{oc} = \frac{kT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.3)$$

Donde V_t , es el denominado *voltaje térmico* [30].

2.2.2.2 Potencia y eficiencia.

La *potencia* puede ser calculada por el producto de la corriente y el voltaje. La potencia máxima se indica en la Figura 2.4. En este punto la resistencia es óptima, la potencia disipada es máxima y está dada por la Ecuación 2.7

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (2.4)$$

Cabe señalar, sin embargo que la celda puede ser usada a una potencia inferior. De acuerdo con la Figura 2.4, existen varias curvas de potencia. Por convención se utiliza la fotocorriente con signo positivo, al contrario de la Figura 2.6 que la indicaba con signo negativo [30].

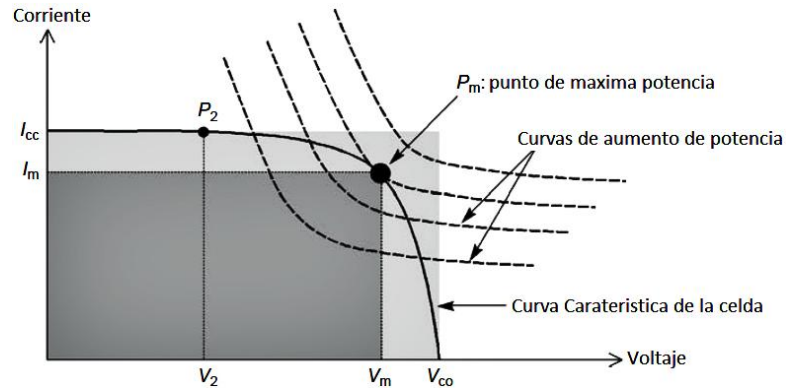


Figura 2.4 Potencia máxima en una grafica corriente-voltaje [30].

Se puede observar que el cuadro representado en la Figura 2.7 es la potencia máxima. Esta propiedad es medida por el *factor de relleno*, representado en la Ecuación 2.5.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{sc}} \quad (2.5)$$

El factor de relleno mide las características corriente-voltaje reales. Para celdas de excelente rendimiento el valor es de 0.7 [32].

La *eficiencia* es definida como el máximo valor de potencia, dividido entre la potencia de radiación incidente. La eficiencia máxima para una celda fotovoltaica se mide en base a condiciones estándar, esto es: una temperatura de 25°C y una potencia incidente de 1000 W/m² con un espectro del Sol en el medio día (AM 1.5). La potencia máxima (P_m) de salida de una celda en condiciones STC es expresada en vatios pico, W_p . La eficiencia se describe en la Ecuación 2.9 [6]. Donde A es el área de la celda, y G_t es la radiación incidente 1000W/m².

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} V_{max}}{AG_t} \quad (2.6)$$

2.3 Parámetros de operación de celdas solares.

2.3.1 Mecanismos de Recombinación de portadores de Carga.

Existen tres mecanismos de recombinación de portadores de carga en la banda de *gap*: mecanismo *Shockley*, *Auger*, y radiativo [31].

2.3.1.1 Recombinación Shockley

La consecuencia de este mecanismo es el de atrapar electrones móviles por parte de las impurezas que poseen estados de energía en la banda de *gap*. Un electrón es atrapado por un agujero móvil que lo encuentra, luego de esto, ambos portadores de carga se recombinan de nuevo. La recombinación *Shockley* depende fuertemente de la densidad de impurezas del semiconductor. Las impurezas pueden estar localizadas en la mayoría de semiconductores, pero también pueden estar presentes en varias interfaces entre materiales usados para las celdas solares, tales como: óxidos conductores y contactos metálicos [31].

2.3.1.2 Recombinación Auger

La recombinación *Auger* es el proceso mediante el cual el momento y la energía surgida de la recombinación de dos pares electrón-hueco, se conservan y se transfiere energía y momento a otro electrón (o agujero). El electrón es excitado hacia altos niveles de la banda de electrones, este electrón excitado regresa a su nivel de energía más bajo y la energía que regresa se convierte en modos de vibración de *fonones*. Los modos de vibración de fonones son vibraciones de la red cristalina y depende directamente del calor.

2.3.1.3 Recombinación por radiación.

La eficiencia de este proceso depende del tipo de banda de *gap* del semiconductor a utilizar, ésta se clasifican en dos tipos:

- **Banda de *gap* indirecta:** como lo muestra la Figura 2.5a, en la banda de *gap* indirecta, el punto máximo de la banda de valencia no está en línea con el punto más bajo de la banda de conducción. Es decir: para hacer que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción es necesaria una energía extra derivada de un momento adicional dado por un fonón.
- **Banda de *gap* directa:** En la banda de *gap* directa, el punto de más alta energía de la banda de valencia esta verticalmente alineado con el punto de más baja energía de la banda de conducción, aquí no se requiere energía adicional, como lo indica la Figura 2.5b.

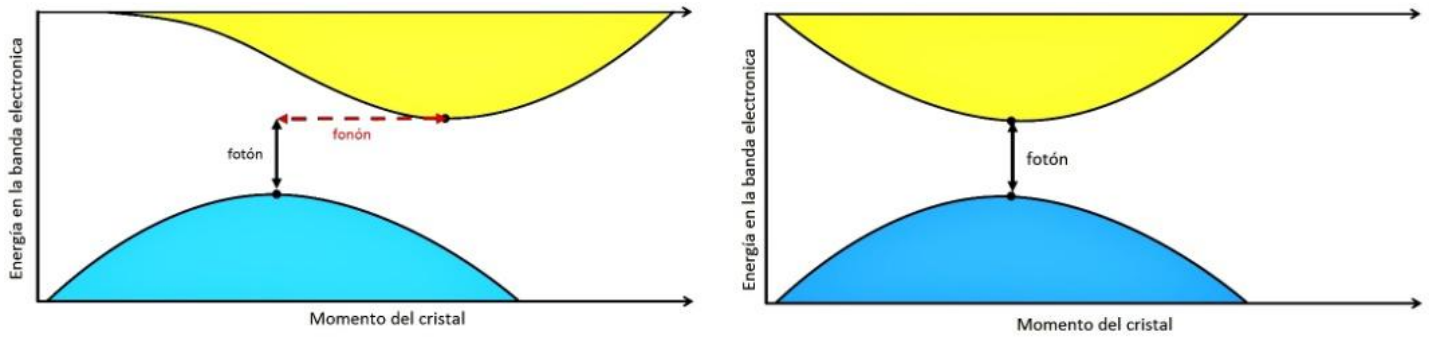


Figura 2.5 a) Banda de *gap* indirecta, b) banda de *gap* directa [31].

2.3.2 Respuesta de las celdas solares al espectro de radiación.

2.3.2.1 Eficiencia externa cuántica.

La respuesta de una celda solar al espectro de radiación y la longitud de onda que incide sobre ésta puede ser determinada y medida, en términos de la *eficiencia externa cuántica* (EQE por sus siglas en inglés). La eficiencia externa cuántica se define como el número de electrones por incidencia de fotones a una cierta longitud de onda (λ), mostrada en la Ecuación 2.10.

$$EQE(\lambda) = \frac{\frac{I(\lambda)}{Aq}}{\Phi(\lambda)} \quad (2.7)$$

Donde, $I(\lambda)$ es la corriente producida por un flujo de fotones $\Phi(\lambda)$ a una cierta longitud de onda, A es el área de la celda solar y q es la carga elemental. La eficiencia cuántica ideal se muestra en la Figura 2.6. En realidad la EQE es siempre más pequeño que el 100% y su valor varía con la longitud de onda [32].

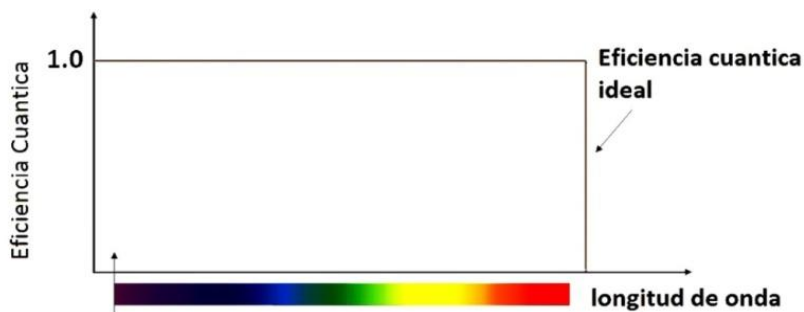


Figura 2.6 Eficiencia cuántica ideal [32].

2.3.2.2 Densidad de corriente en base a la eficiencia externa cuántica.

Bajo condiciones estándar de prueba la densidad de corriente total generada a una longitud de onda (λ), es la carga elemental q , multiplicada por el flujo de fotones (Φ) y EQE, la cual puede ser determinada integrando en todo el rango de longitudes de onda necesarios. Lo anterior, representado en la Ecuación 2.8.

$$J_{SC}(V = 0) = q \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \Phi(\lambda)_{AM\ 1.5} EQE(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

2.3.3 ¿Cómo las celdas solares atrapan la luz incidente?

En la Figura 2.8, se muestra un medio de una longitud x que absorbe la radiación monocromática que incide sobre él, la absorción en el medio puede ser definida en términos de un coeficiente de absorción alfa (α) [32].

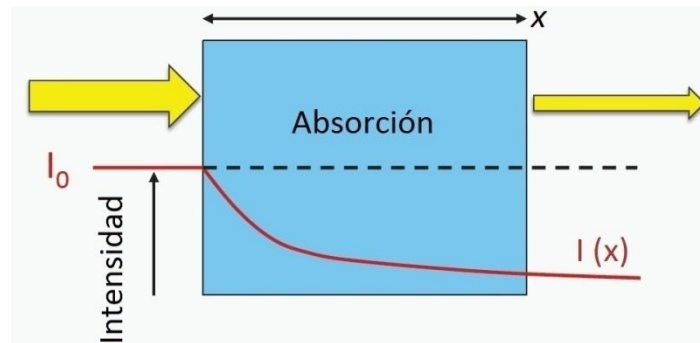


Figura 2.7 Esquema que representa la incidencia de la luz en un material absorbente [32]

La intensidad de luz cae exponencialmente con la distancia de la capa absorbente, este comportamiento está descrito por la ley de Lambert-Beer., Donde I_0 , es la intensidad de luz incidente y ν , es la frecuencia de emisión de la luz. La relación entre estos parámetros se encuentra en la Ecuación 2.9.

$$I(\nu, x) = I_0(\nu) \exp(-\alpha(\nu)x) \quad (2.9)$$

Para una celda solar, lo ideal sería que la absorción sea del 100%. Esto significa una transmisión y reflexión de 0 %. En la Figura 2.8 se muestra el coeficiente de absorción para diferentes materiales. En general todos los materiales semiconductores muestran que el coeficiente de absorción en el azul es de orden mucho mayor que el rojo.

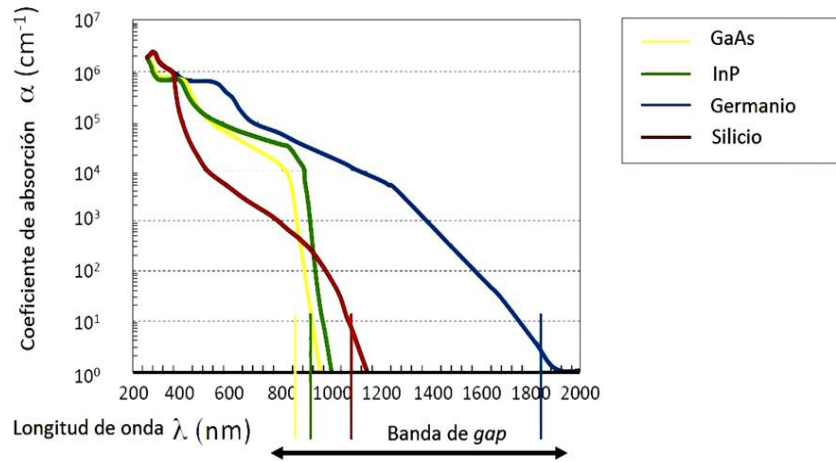


Figura 2.8 Coeficiente de absorción para diferentes materiales [7]

2.3.3.1 Pérdidas por absorción en una celda solar.

Consideremos una celda de silicio cristalina, Figura 2.9, el cristal de silicio es tipo *p*, con una delgada capa de semiconductor tipo *n* en la superficie y tanto arriba como abajo, contactos metálicos en la interfaz donde están los contactos metálicos y el semiconductor, se procura que sean regiones con más dopado. Existen pérdidas por absorción, es decir, mecanismos impiden que toda la luz incidente sea absorbida por la celda.

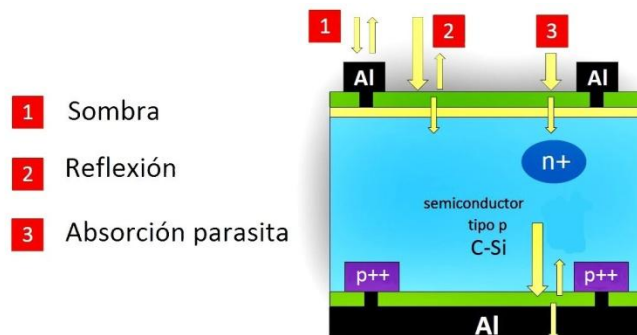


Figura 2.9 Esquema representativo de las pérdidas generadas en una celda de cristal de silicio [8].

En primer lugar los contactos metálicos sombrean un área determinada, evitando que la luz se absorba por las capas activas de la celda. El segundo mecanismo de pérdida es la reflexión en las diferentes interfaces que conforman la celda solar. La luz que pasa a través de una interfaz entre dos medios con diferentes índices de refracción, siempre se reflejará una parte de la luz incidente y se transmitirá una

parte a estas interfaces. Un tercer mecanismo de pérdida por absorción, son las absorciones parasitas en las capas no activas de la celda, en la Figura 2.9, la capa superior (verde) puede ser un revestimiento antirreflexivo o una capa pasiva para reducir el número de defectos en la superficie. Este mecanismo de pérdida juega un papel importante en las celdas basadas en películas delgadas [5].

2.3.4 Temperatura en la celda.

La temperatura de la celda es determinada mediante un balance de energía, y considerando que una parte de la energía solar que absorbe la celda se transmite al medio en forma de calor. El balance de energía de una celda fotovoltaica que disipa calor al ambiente está dado por la Ecuación 2.10;

$$(\tau\alpha)G_t = \eta_e G_t + U_L(T_c - T_a) \quad (2.10)$$

Donde, el producto entre los coeficientes de absorción y transmisión ($\tau\alpha$); se toma como 0.9 [8], $G_t = 1000 \text{ W/m}^2$, es la potencia de radiación por metro cuadrado a condiciones estándar; η_e es el coeficiente de temperatura de la celda, T_c es la temperatura de la celda, T_a es la temperatura ambiente y U_L es el coeficiente de pérdidas por calor, este coeficiente incluye pérdidas por convección y por radiación [5].

Si se opera la celda solar en condiciones de funcionamiento nominal y teniendo en cuenta la velocidad del viento (NOCT por las siglas en ingles *Nominal Operating Cell Temperature*), esto es:

- Irradiación, $G_{t,NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$
- Temperatura ambiente, $T_{a,NOCT} = 20^\circ\text{C}$
- Velocidad del viento, $W_{NOCT} = 1 \text{ m/s}$

Considerando un coeficiente $\eta_e = 0$; la Ecuación 2.10 es necesaria para determinar la tasa de cambio entre el producto de la absorción y transmisión y el coeficiente de pérdidas.

$$\frac{(\tau\alpha)}{U_L} = \frac{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{t,NOCT}} \quad (2.11)$$

Sustituyendo la Ecuación 2.10 en la Ecuación 2.11, se llega a la temperatura de la celda bajo condiciones de operación nominales:

$$T_c = (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[\frac{G_t}{G_{t,NOCT}} \right] \left[1 - \frac{\eta_e}{(\tau\alpha)} \right] + T_a \quad (2.12)$$

Cuando el coeficiente de temperatura de referencia de la celda es dado por el fabricante, la Ecuación 2.13 puede ser usada para estimar este coeficiente en base a la temperatura de la celda;

$$\eta_e = \eta_R [1 - \beta(T_C - T_{NOCT})] \quad (2.13)$$

Donde β , es el coeficiente de temperatura (1/K) y η_R es la eficiencia de referencia.

2.4 Materiales y tecnologías usados en la elaboración de celdas solares.

2.4.1 Tecnología fotovoltaica con materiales del III-V grupo de la tabla periódica.

Este tipo de celdas solares son usados mayormente en la tecnología espacial y de concentración de rayos solares. Los materiales del III grupo se basan en los elementos de 3 electrones de valencia como el aluminio, galio e indio. Los materiales del V grupo se basan en los elementos de 5 electrones de valencia como el fósforo y arsénico. Existen varios compuestos hechos de estos elementos, como ejemplos tenemos al arseniuro de galio ($GaAs$), fósforo de galio (GaP), fósforo de indio (InP) y arseniuro de indio ($InAs$) [33].

Existe una mayor eficiencia de este tipo de celdas solares respecto a las de cristal de silicio, pero debido a la toxicidad del galio no son producidas en masa además de los costos elevados de producción. Su mayor eficiencia se debe a que se trabaja bajo el concepto de multi-unión, donde más de una banda de gap es usada. En la Figura 2.10 se muestra una representación de una triple unión típica de materiales semiconductores. Se basa en un material de banda de gap baja, un sustrato de $GaAs$, el cual tiene una banda de gap de 1.4eV. La celda en la mitad está compuesta por $GaAs$ y tiene una banda de gap de 1.67 eV y en su parte superior se basa en $GaInP_2$ con una banda de gap en el orden de 1.86 eV [33].

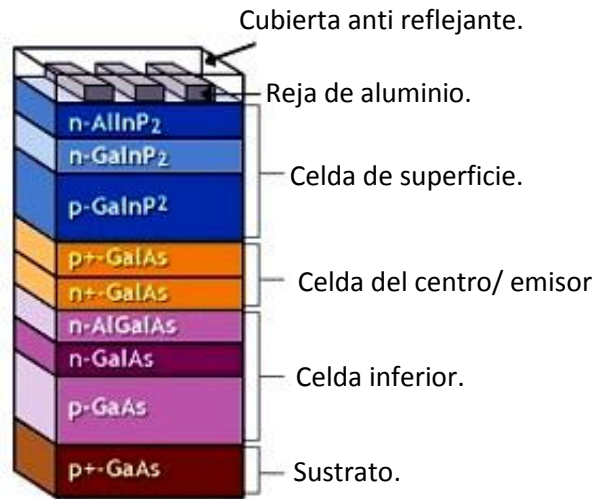


Figura 2.10 representación esquemática de una celda solar con multi-union [11].

2.4.1.1 Características de corriente-voltaje.

Para conocer las propiedades de corriente voltaje de una celda solar con multi-unión, consideremos 3 tipos de uniones $p-n$ individuales con diferentes características, la primera región tiene un voltaje de circuito abierto más alta pero una densidad de corriente baja lo que significa que tiene una gran banda de gap . La tercera región tiene un voltaje de circuito abierto bajo y una densidad de corriente alta, lo que traduce en que tiene una banda de gap de más bajo valor y la segunda región tiene una banda de gap en la mitad de las dos regiones anteriores, como lo muestra la curva densidad de corriente-Voltaje de la Figura 2.11a. Si queremos conformar una unión triple en función de las regiones 1,2 y 3; la región 1 será la capa superficial, la región 2 será el cuerpo de la celda y la unión 3 estará en la parte inferior.

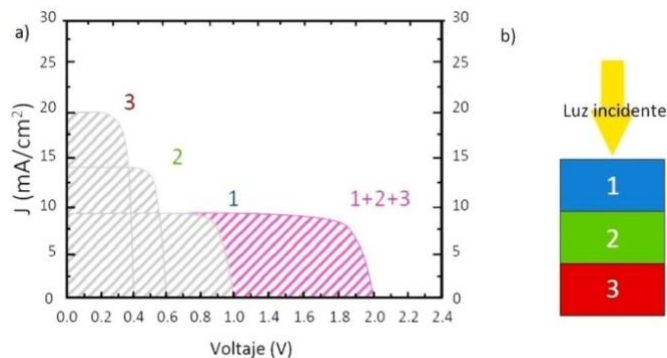


Figura 2.11 a) Curva corriente voltaje para celdas solares individuales y el resultado total. b) Representación esquemática de las regiones que conforman una unión triple de celda solar [33].

Para efectos de observar cual es el comportamiento corriente voltaje de la multi-unión, se conecta el circuito equivalente en serie, para efectos de tener una suma total de las caídas de voltaje desde el voltaje más alto (región 1), hasta el más bajo (región 3). Cabe resaltar que las medidas de densidad de corriente están determinadas por la región $p-n$ que más baja densidad registre como se muestra en la Figura 2.11a.

2.4.2 Película delgada de Silicio.

Una ventaja de las celdas solares de silicio de película delgada es que pueden ser depositados sobre sustratos flexibles. Existen varias aleaciones para películas delgadas de silicio, entre las más comunes están las aleaciones silicio-germanio y silicio nano cristalino hidrogenado, este último con un porcentaje entre el 5 y el 15% de hidrogeno en su composición [34].

En la Figura 2.12, se observa que las fases de la película delgada de silicio se componen de pequeños gránulos que forman un tejido de silicio amorfo hidrogenado. En el lado derecho, la fase representa una red amorfa. En el lado izquierdo, una fase completamente cristalina. El ir de derecha a izquierda, se nota que la fase amorfa está cambiando a una fase mixta, la velocidad de cambio de fase depende del proceso de manufactura, con una temperatura de alrededor de 105°C a 200°C [35]

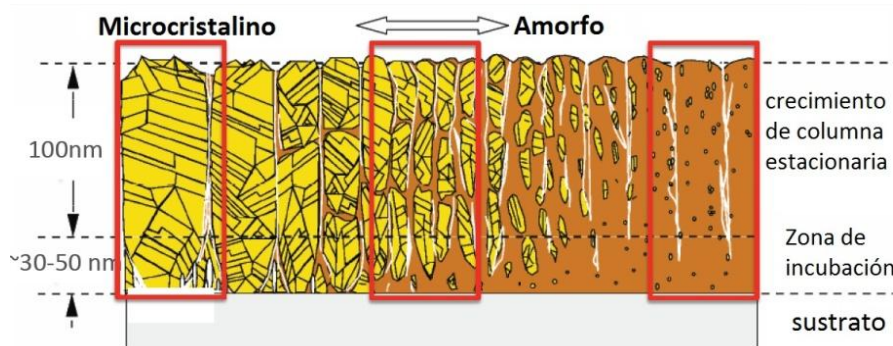


Figura 2.12 Distintas fases de una película delgada de silicio [36].

La banda de gap característica de la película delgada de silicio es una banda directa. En la Tabla 2.2 se muestran los diferentes valores de banda de gap de los materiales usados para hacer películas delgadas y su respuesta al espectro de radiación AM 1.5 en la Figura 2.13. Se observa que el silicio hidrogenado tiene una de las bandas de gap más grandes junto con el silicio nano cristalino. La densidad

de corriente de una película delgada de silicio amorfo está alrededor de 18 mA/cm², con una eficiencia cuántica (EQE) promedio de 74 al 77%. La tensión de circuito abierto esta en el orden de 0.85 V [36].

Tabla 2.1 diferentes valores para la banda de *gap* de películas delgadas de silicio.

Aleación	Banda de <i>gap</i> (eV.)
Silicio Amorfo Hidrogenado. (a-Si:H)	1.6-1.9
Silicio nano cristalino. (nc-Si:H)	1.1-1.3
Silicio-germanio amorfo hidrogenado (a-SiGe:H)	1.4-1.6
Silicio Carbono amorfo hidrogenado (a-SiC:H)	>1.9
Oxido de silicio nano cristalino amorfo (nc-SiO:H)	>2.0

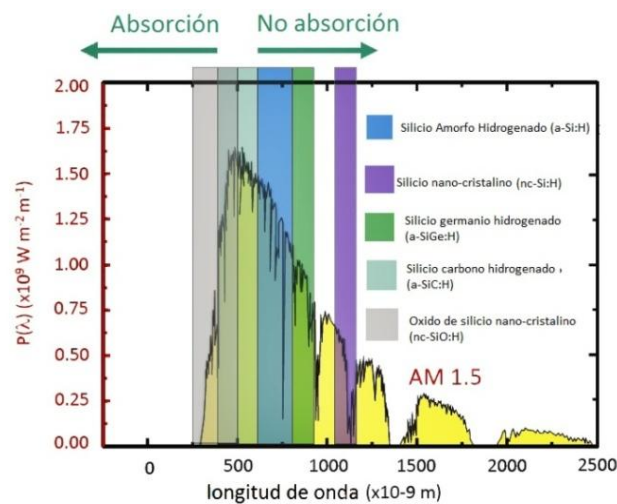


Figura 2.13 Respuesta al espectro AM1.5 de aleaciones de películas delgadas.

2.4.3 Celdas con tecnología CIS y CIGS.

CIS, o mejor $CuInSe_2$ es otra tecnología fotovoltaica que resulta de la aleación de cobre, indio y selenio. Se acopla con una unión *n* superficial de sulfuro de cadmio (CdS). Teóricamente ésta unión tiene una eficiencia del 25%, posee excelentes propiedades de absorción, pero su banda de *gap* es solo de 1.04 eV. Es por esto que se agrega galio para aumentarla, ya que la banda de *gap* del $CuGaSe_2$ es 1.65eV. Este compuesto se llama CIGS, por $Cu(In,Ga)Se_2$, el cual es formado por el ajuste de la concentración de galio y se obtiene una banda de *gap* de 1.45 eV. La estructura básica de una celda CIGS se muestra en la Figura 2.14 [36].

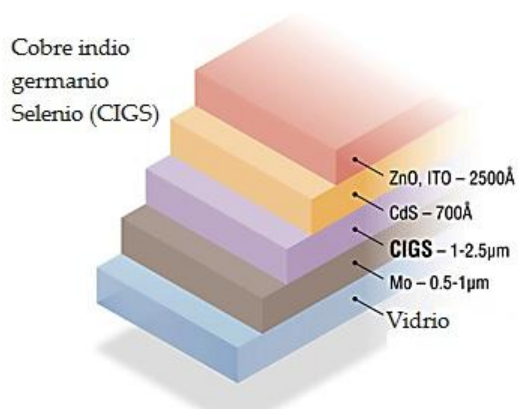


Figura 2.14 Representación de la estructura de una celda CIGS [36].

Su base está hecho de vidrio (típicamente 3mm) cubierto por molibdeno (Mo), que actúa como contacto posterior, sobre la que se deposita una capa de CIGS (región dopada tipo p), a continuación, una capa de CdS forma la heterounión y finalmente una capa transparente de óxido de zinc (ZnO), como electrodo. EL CIGS absorbe más luz, debido a que su superficie Sulfuro de cadmio (CdS) actúa como un "concentrador", ya que con su alta banda de gap 2.4 eV admite toda la luz visible.

Pero el uso de indio crea otra dificultad. El costo de este elemento raro, que es ampliamente utilizado en la producción de pantallas en forma de electrodos de ITO (óxido de indio y estaño). El indio se encuentra solamente en cantidades minúsculas en las minas de zinc. Para la industria de CIGS, este es un problema real que podría limitar su desarrollo a largo plazo [36].

2.4.4 Celdas solares de telurio de cadmio ($CdTe$).

El telurio de cadmio ($CdTe$) es un material cuyo valor de banda de gap es de 1.45 eV, además de un coeficiente de absorción alto, lo que le permite a una película de grosor de menos de 2 micras absorber todo el espectro visible. El $CdTe$ es generalmente una región de tipo p , junto con el sulfuro de Cadmio (CdS) que es una región tipo n , esta última sirve como la capa superficial, para formar una heterounión, mostrada en la Figura 2.15. Estas celdas tienen la ventaja de una eficiencia alta a radiación solar directa si no también a radiación difusa. La mejor eficiencia de $CdTe$ es del 16.5% y se espera que suba al 20% [12].

Se debate acerca de la toxicidad del cadmio como elemento activo en la producción y manufactura de este tipo de tecnología, desventaja que no ha permitido su desarrollo comercial a gran escala.

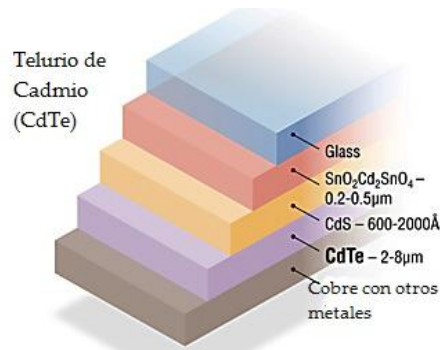


Figura 2.15 Esquema de una celda solar de telurio de cadmio (CdTe) [13].

2.4.5 Celdas solares basadas en materiales orgánicos.

Materiales orgánicos, por ejemplo, polímeros conjugados, tintes o cristales moleculares orgánicos pueden mostrar regiones *p-n* y propiedades semiconductoras. Este tipo de celda se caracteriza por coeficientes altos de absorción, lo que da como resultado una producción de celdas solares de un grosor, muy por debajo de 1 micra. La capa de recombinación de portadores de carga para las celdas orgánicas es mucho menor que para las celdas inorgánicas. Con el fin de superar este obstáculo, se realiza el concepto de redes interpenetrantes con fullereno modificado. Los fullerenos han demostrado ser muy eficientes en materia de aceptar electrones, esto, con una eficiencia cuántica cercana a la unidad. En la Figura 2.16 se muestra una celda solar experimental orgánica, con una eficiencia del 3.3% bajo condiciones de iluminación AM1.5.

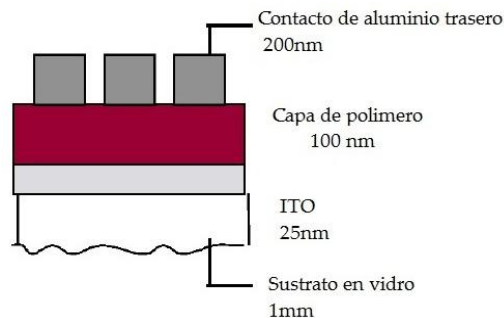


Figura 2.16 Esquema de partes constitutivas celda solar de polímero [8].

2.5 Relación costo/eficiencia en energía fotovoltaica.

La relación económica costo/eficiencia en la implementación de tecnología fotovoltaica es un muy importante ya que en base a un análisis de costos se puede

hacer una implementación real usando diferentes tecnologías fotovoltaicas. Para diferenciar las tecnologías usadas en materia fotovoltaica se las agrupa en celdas de I, II y III generación, esto con el fin de hacer un mejor estudio acerca de su eficiencia y costo de inversión de conversión de energía solar.

- **Celdas fotovoltaicas de I generación:** se basa en el uso de materiales como el silicio cristalino.
- **Celdas fotovoltaicas de II generación:** los dispositivos de segunda generación se basan en celdas solares de película delgada. Se fabrican utilizando tecnología de procesamiento más barato. Como consecuencia, los materiales tienen más impurezas que resultan en eficiencias menores. Cabe resaltar que el costo por área es significativamente menor.
- **Celdas fotovoltaicas de III generación:** las tecnologías fotovoltaicas de tercera generación se basan en los conceptos de recombinación Shockley más efectiva y eficiente. Así, la tecnología de tercera generación produce eficiencias de conversión más altas en referencia a la primera y segunda generación.

En la Figura 2.17 se presenta diferentes ejemplos de rectas de costos por metro cuadrado y su eficiencia, donde W_p es el vatio pico de potencia eléctrica. Si la pendiente de estas líneas es mayor, el precio de costo por vatio es baja, mientras que si la pendiente es menor, el precio de costo por vatio pico es mayor. Cabe resaltar que en el gráfico está presente el límite máximo de eficiencia de los materiales actualmente. Se espera que en el futuro este límite sea superado con el uso de nuevos materiales y se abaraten los costos de producción [30].

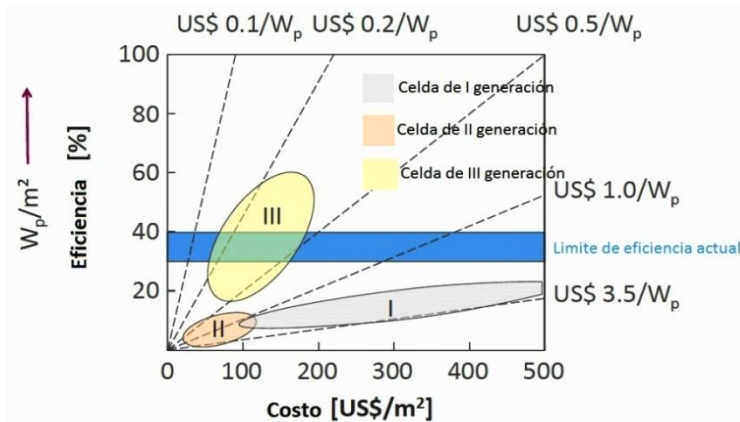


Figura 2.17 Relación costo/eficiencia de las diferentes tecnologías fotovoltaicas [30]

Capítulo 3.

Tecnología Solar: componentes de sistemas de aprovechamiento de energía solar.

La energía solar, ya sea en forma de radiación o movimientos de masas de aire debido al cambio de temperatura, se transforma en otro tipo de energía para su utilización. Existen dispositivos comunes de los distintos tipos de sistemas: inversores, baterías y controladores de carga en cuanto a los sistemas fotovoltaicos y eólicos. Mientras que bombas, tuberías y motores se hacen presentes por el lado de los sistemas térmicos. La unión de todos estos componentes da como resultado sistemas de aprovechamiento de energía solar.

3.1 Tipos de sistemas de conversión utilizando fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR).

3.1.1 Sistemas tipo *Stand-Alone*.

Los sistemas tipo *Stand-Alone*, convierten energía en un amplio rango: con potencias desde milivatios hasta kilovatios. Se caracterizan por no estar conectados a la red eléctrica. Esta es una aplicación ideal puesto que no se necesita de almacenamiento. Todos las aplicaciones de módulos fotovoltaicos y turbinas eólicas, tienen integrado un conversor de voltaje DC/AC, y en muchos casos un almacenamiento de energía y un controlador de carga, Figura 3.1 [31].

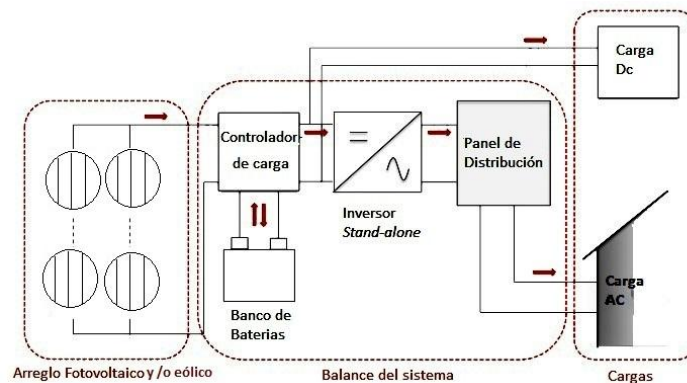


Figura 3.1 Esquema de un sistema fotovoltaico tipo *Stand-alone*. [1].

3.1.2 Sistemas conectados a la red eléctrica

Una instalación conectada a la red, está formada por una serie de receptores de energía. Estos receptores están conectados en serie o en paralelo para alcanzar una tensión y corriente óptimas, además de estar conformados por un inversor que transforma la corriente continua que entregan los paneles y turbinas en corriente alterna del mismo voltaje que la red eléctrica, tal como lo muestra la Figura 3.2.[1].

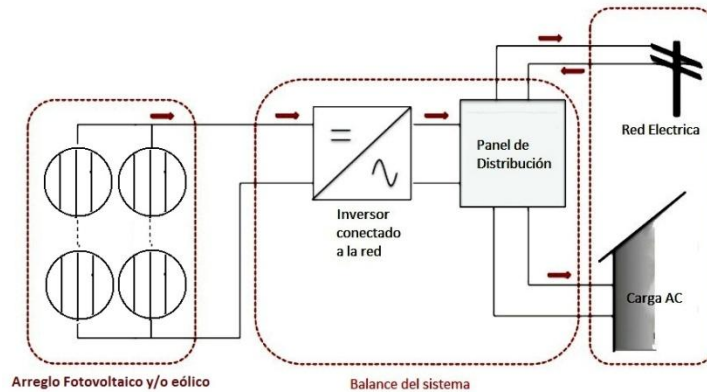


Figura 3.2 Diagrama de bloques de un sistema conectado a la red eléctrica [1].

3.1.2.1 Sistemas energéticos descentralizados conectados a la red.

Estos sistemas tienen un rango de potencia menor y típicamente se instalan en el techo de los edificios. El almacenamiento de energía no es necesario en este caso. En los días soleados o con mucho viento los receptores proporcionan energía eléctrica. El exceso de energía se suministra a la red pública. Durante los días nublados y con poco viento, la instalación se alimenta de la red eléctrica, de esta manera, la red eléctrica puede ser considerada como una gran "unidad de almacenamiento" [31].

3.1.2.2 Sistemas energéticos centralizados conectados a la red.

Los sistemas centrales conectados a la red tienen una potencia típica instalada de unos cuantos Megavatios. Con estas centrales energéticas es posible alimentar directamente a la red de media o alta tensión. La instalación típica de las centrales eléctricas se hace en tierra, sin embargo en algunos casos se puede instalar en la

azotea de grandes edificios. Tanto los sistemas energéticos descentralizados como centralizados tienen dos componentes principales:

- Convertor de energía (Modulo fotovoltaico, Turbina eólica).
- Inversor [2].

3.2 Componentes de implementación de sistemas energéticos.

3.2.1 Conversores.

Los conversores de los sistemas energéticos en este caso son: paneles fotovoltaicos y turbinas de viento. Dichos dispositivos son encargados de coleccionar y transformar la energía de una forma a otra para su aprovechamiento [31].

3.2.1.1 Paneles fotovoltaicos.

La interconexión entre varias celdas solares da como resultado un nuevo dispositivo llamado *panel*. Las celdas se agrupan normalmente en paneles que se encapsulan con diversos materiales con el fin de protegerlas, como se muestra en la Figura 3.3, un panel fotovoltaico consiste en, N_{PM} , ramificaciones paralelas, las cuales a su vez tienen, N_{SM} , celdas solares en serie. Por lo tanto, el voltaje obtenido por las terminales del panel es denotado por: V^M , donde la corriente total generada es denotada por I^M [31].

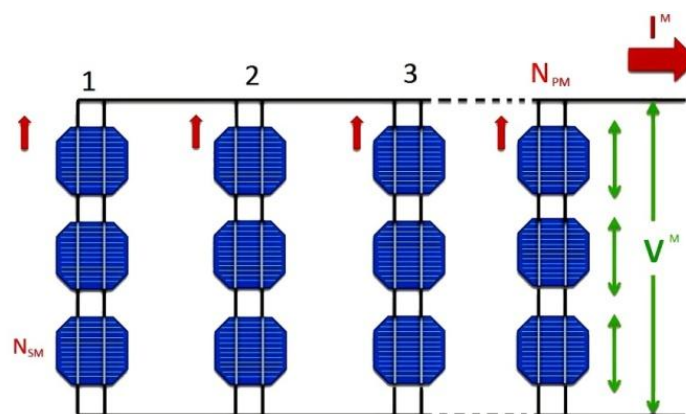


Figura 3.3 Interconexión entre celdas fotovoltaicas [2].

3.2.1.2 Turbina eólica.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, así como la intensidad de las ráfagas en intervalos de tiempo breves. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario conocer una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele encontrarse entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "*cut-in speed*", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "*cut-out speed*" [39].

3.2.2 Inversores

La energía eléctrica producida por los paneles fotovoltaicos necesita ser convertida a una forma alterna (AC), debido a que la corriente y voltaje generados por los paneles y turbinas es de forma directa (DC). Este trabajo es llevado a cabo por el inversor. [32].

3.2.2.1 Características de un inversor.

Se presentan eficiencias típicas que están en el intervalo del 95% en condiciones nominales (STC) [6]. Se espera que los inversores unidos a la red eléctrica tengan capacidad de detección de *islas*. Las *islas* se refieren a la situación en la que los inversores en una configuración dada siguen alimentando el sistema a pesar de que la potencia desde el operador de red haya sido restringida. Debido a cuestiones de seguridad, tales como sobrecarga de voltaje y corriente en la red, además de la aparición de corrientes parásitas que en determinado momento dañarían la cara, el efecto isla necesita prevenirse, por lo tanto, se espera que el inversor detecte y responda de inmediato impidiendo la introducción de energía parásita a la red [32].

3.2.2.2 Tipos de inversores.

Los inversores de los sistemas fotovoltaicos pueden ser clasificados por su tamaño, modo de operación, o topología de implementación. Teniendo en cuenta el modo de operación se clasifican en: Inversores independientes o *stand-alone*, conectados a la red eléctrica, o inversores bimodales [32].

- **Inversor tipo *stand-alone*:** en un sistema fotovoltaico independiente, donde la carga solo puede depender de la energía que suministra el sistema fotovoltaico. El inversor que suministra energía alterna AC, debe aparecer como una fuente de voltaje estable y de frecuencia igual al suministro de $110V_{ac}$ a 60 Hz en Latinoamérica y $220 V_{ac}$ a 50 Hz en Europa.[4].
- **Inversor conectado a la red eléctrica:** En un sistema fotovoltaico conectado a la red, el inversor está conectado a la misma red. La carga en este tipo de sistemas depende tanto de la instalación fotovoltaica como también de la red de energía. El inversor adopta el mismo voltaje y frecuencia de la red eléctrica y la principal tarea del inversor es suministrar energía a la red. Así el inversor actúa como una fuente AC suministrando corriente, mientras que el papel de fuente de voltaje constante en el sistema lo cumple la red eléctrica [4].
- **Inversor bimodal:** En un sistema híbrido, el sistema es capaz de funcionar ya sea como un sistema autónomo con una batería o como un modo de conexión a la red. El inversor tiene un papel fundamental, ya que cuenta con la implementación de hardware necesaria para trabajar en cualquiera de los dos modos. En el modo *stand-alone*, la red se desconecta y el sistema puede alimentar cargas de seguridad donde el inversor se comporta como una fuente de voltaje AC. En el modo conectado a la red el inversor se comporta como una fuente de corriente alterna [32].

3.2.2.3 Topología de implementación de inversores.

Además de los modos de operación los inversores también se clasifican sobre la base topológica de su instalación. Puede haber 4 categorías diferentes bajo esta clasificación: inversores centrales, inversores módulo o micro inversores, inversores de serie e inversores en serie múltiple [32].

Inversores centrales.

En la Figura 3.4, muestra la interconexión de paneles fotovoltaicos los cuales son abastecidos por un único inversor. [32].

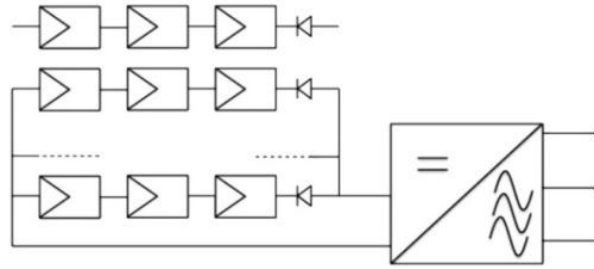


Figura 3.4 Topología de Inversor central [32].

Micro Inversores.

En este tipo de topología cada modulo tiene un inversor integrado. Por lo tanto, la topología representada en la Figura 3.5, es más resistente a los efectos de sombra parcial en comparación con la topología de inversor central, puesto que cada modulo maneja su etapa de potencia por separado y no como un arreglo total [32].

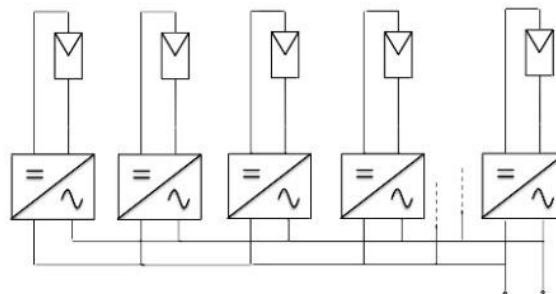


Figura 3.5 Topología de instalación tipo Micro inversor [5].

Inversores en serie.

En el caso de los inversores en serie, busca lograr un equilibrio entre la topología de micro inversor y la topología de inversor central. La topología de inversor en serie, representada en la Figura 3.6, es más resistente a la falta de condiciones de operación que la de inversor central, ya que cada cadena es operada de forma independiente en su punto máximo de potencia, lo que garantiza un mayor rendimiento energético [32].

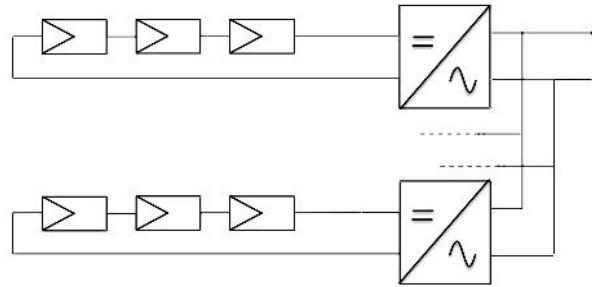


Figura 3.6 Topología de implementación de inversor en serie [32].

Inversores en serie múltiple.

Cada una de las series produce una potencia que luego es adicionada a una potencia total, usando convertidores DC-DC de baja potencia, tal como lo muestra la Figura 3.7. Todos los convertidores están conectados a través de un bus de DC al inversor, y en última instancia a la red [32].

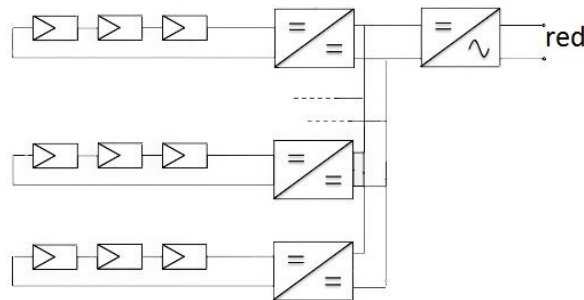


Figura 3.7 Topología de implementación de inversor en serie múltiple [5].

3.2.3 Controlador de carga.

En controlador de carga es un dispositivo capaz de hacer interactuar el arreglo de receptores fotovoltaicos y/o eólicos, la batería y la carga, haciendo funcionar el banco de baterías al voltaje nominal dado por el fabricante, como lo muestra la Figura 3.8. Además de esto asegura que los parámetros eléctricos alrededor de la batería se mantengan dentro de las especificaciones del fabricante.

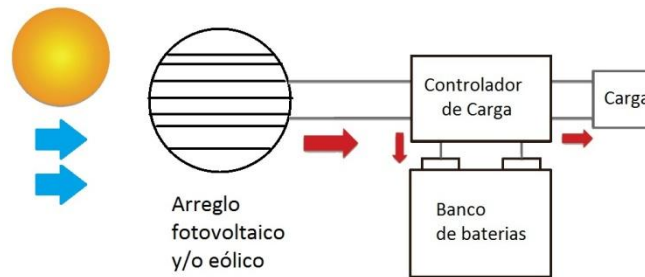


Figura 3.8 Esquema de implementación de un controlador de carga.

3.2.3.1 Principio de funcionamiento.

Cuando la batería está totalmente cargada, y el receptor de energía todavía está conectado a la batería, tiene tendencia a sobrecargarse. Esto conlleva la pérdida de capacidad y el sobrecalentamiento en la batería. Aquí es donde el funcionamiento del controlador de carga es esencial, ya que corta la energía fotovoltaica que causa sobrecarga en la batería. Si el sistema fotovoltaico tiene diferentes valores de voltaje máximo de potencia (V_{mpp}), a diferentes condiciones de temperatura y radiación, el regulador de carga debe llevar este valor de voltaje a un valor adecuado para asegurar que la batería funciona en el rango de tensión especificado.

3.2.3.2 Mecanismos de prevención de sobrecarga.

Existen dos tipos de topologías implementadas para los reguladores de carga dentro de un sistema energético: en serie y en paralelo. Como lo muestra la Figura 3.9a. En un regulador en serie, la sobrecarga se evita mediante el asilamiento del arreglo fotovoltaico hasta que se detecta una caída de tensión en particular, momento en el que el circuito se completa de nuevo. Por otro lado, en un arreglo en paralelo, como el mostrado en la Figura 3.9b. La sobrecarga se evita por un cortocircuito en el generador fotovoltaico.

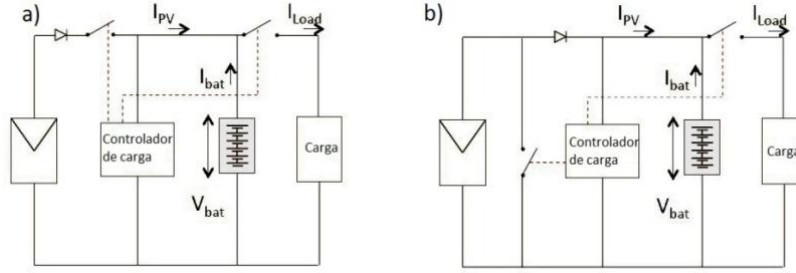


Figura 3.9 a) Topología de implementación en serie del controlador de carga. b) implementación en paralelo.

3.2.4 Contadores bidireccionales.

Los contadores que acumulan la diferencia entre los pulsos recibidos por sus entradas de cuenta ascendente y cuenta descendente, que permiten una regulación tarifaria en el caso de los sistemas energéticos conectados a la red. El sistema energético estará dimensionado de tal forma, que genere energía eléctrica de acuerdo al promedio anual de su residencia o instalación, su tarifación y toma de pulsos está reglamentada mediante las disposiciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), en el caso de Colombia.

3.3 Parámetros de funcionamiento de receptores de energía.

3.3.1 Paneles Fotovoltaicos

3.3.1.1 Características Corriente-Voltaje

La corriente total I^M bajo condiciones estándar de operación está descrita por la Ecuación 3.1. Donde V^M , es el voltaje que cruza el panel, N_{SM} , es el numero de celdas en serie que conforman el panel, V_t^C , es el voltaje térmico de una celda.

$$I^M = I_{SC}^M \left[1 - \exp\left(\frac{V^M - V_{OC}^M + R_S^M I^M}{N_{SM} V_t^C}\right) \right] \quad (3.1)$$

Cabe señalar que la corriente de los paneles fotovoltaicos, I^M , es una función implícita que depende de:

1. La corriente de corto-circuito dada por, Ecuación 3.2:

$$I_{SC}^M = N_{PM} I_{SC}^C \quad (3.2)$$

2. El voltaje de circuito abierto dado por, Ecuación 3.3, donde V_{OC}^C , es el voltaje de circuito abierto de una celda unitaria.

$$V_{OC}^M = N_{PM} V_{OC}^C \quad (3.3)$$

3. La resistencia equivalente en serie del panel, Ecuación 3.4, donde R_S^C , es la resistencia en serie de una celda unitaria.

$$R_S^M = \frac{N_{SM}}{N_{PM}} R_S^C \quad (3.4)$$

De las celdas interconectadas, la celda con la corriente de corto circuito más baja en serie N_{SM} dicta la corriente de corto circuito total del panel, del mismo modo, el voltaje de circuito abierto más baja en las celdas N_{PM} en paralelo dicta el voltaje nominal de circuito abierto del panel, como se muestra en la Figura 3.10.

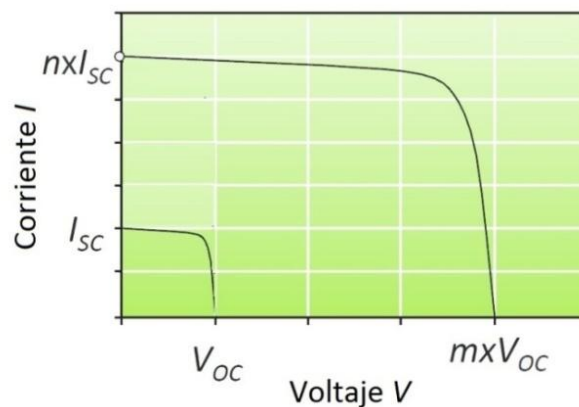


Figura 3.10 Curva Corriente –voltaje para un panel solar representado como un arreglo de N_{SM} celdas en serie y N_{PM} celdas en paralelo.

3.3.1.2 Inclinación y orientación de paneles fotovoltaicos.

Inclinación es el grado de libertad que define la elevación de panel solar con respecto a la horizontal. El ángulo óptimo de inclinación, orientados al norte es aproximadamente la latitud geográfica, con una tolerancia de +/- 10 grados. Para evitar sombra excesiva, los conjuntos de paneles tienen que estar separados por una distancia, d , relacionada con el alto, a , como se muestra en la Figura 3.11 y en la Ecuación 3.5.

$$\frac{d}{a} = \cos \beta + \frac{\sin \beta}{\tan \varepsilon} \quad (3.5)$$

Donde, ε , puede ser expresado mediante la latitud geográfica, φ , y el ángulo elíptico $\delta = 23.3^\circ$.

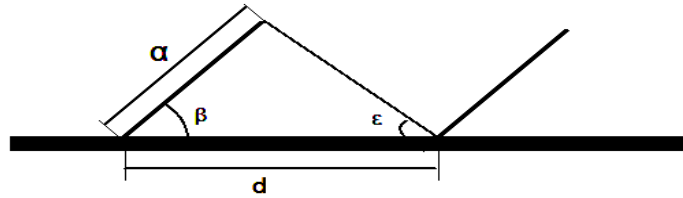


Figura 3.11 Esquema representativo de la inclinación de un arreglo fotovoltaico [2].

Orientación: La orientación es el grado de libertad que define el azimut, con respecto a una posición, que en este caso es el norte geográfico. Los puntos de referencia más comunes son el norte y sur geográfico. Para conseguir capturar la mayor cantidad de energía solar, el plano del panel debe ser perpendicular a los rayos directos del Sol.

3.3.1.3 Dependencia de la temperatura en la eficiencia del panel fotovoltaico.

En la Figura 3.12, si se mantiene la radiación incidente constante mientras que la temperatura aumenta, la corriente de corto circuito aumenta y existe una caída significativa en el voltaje de circuito abierto. Esto significa que la potencia total de salida ha disminuido. Por otro lado, si la temperatura disminuye mientras que la radiación incidente es constante, la potencia de salida del sistema fotovoltaico mostrará un aumento.

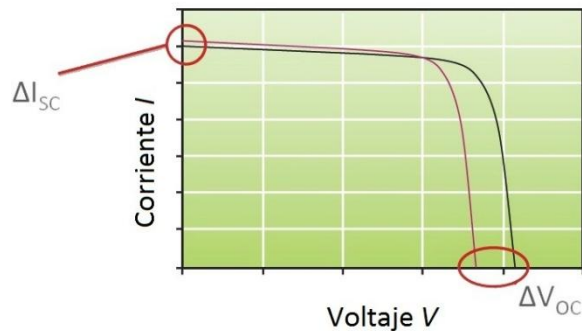


Figura 3.12 Efectos de la temperatura en un módulo fotovoltaico.

Los fabricantes de paneles fotovoltaicos incluyen lo que se conoce como *coeficientes de temperatura* en las hojas de información técnica. Los coeficientes de temperatura no son más que la tasa de cambio de un parámetro respecto a la temperatura.

Factor ideal de modulación (MIF)

La diferencia entre el rendimiento esperado de un panel fotovoltaico con una eficiencia nominal y el rendimiento real debido al efecto de la temperatura dan lugar a un factor ideal de modulación (MIF). Se define como la relación entre el rendimiento esperado del panel fotovoltaico teniendo en cuenta los efectos de la temperatura, mostrado en la Ecuación 3.6

$$MIF = \frac{E_{PV,T}}{E_{esperada}} \quad (3.6)$$

Donde $E_{PV,T}$, es el rendimiento anual del panel fotovoltaico con respecto a la temperatura y $E_{esperada}$, es el rendimiento anual esperado sin efectos de temperatura.

3.3.1.4 Punto de máxima potencia (MPPT)

En la Figura 3.13, se representa, en negro la curva corriente-voltaje de un arreglo fotovoltaico, y en rojo, la potencia producida por el sistema y eventualmente la carga que puede suplir en un diseño eléctrico. Para obtener la máxima potencia entregada, se debe operar el panel al punto de máxima Potencia (P_{MPP}), este punto corresponde al pico de la curva potencia-voltaje, para determinar este punto máximo de potencia se necesita conocer la corriente (I_{mpp}) y el voltaje máximos (V_{mpp}) entregados por el panel.

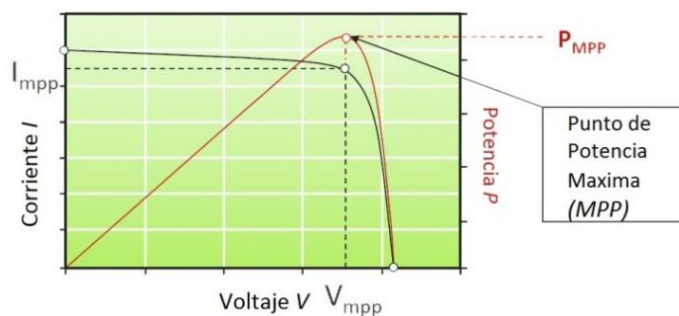


Figura 3.13 Potencia-voltaje, corriente-voltaje y punto de máxima potencia.

Si las condiciones estándar de operación cambian, el punto máximo de potencia cambia, por lo tanto para conocer el *nuevo* punto máximo de potencia se requiere *seguir* los cambios en la curva corriente-voltaje del panel. Este proceso se denomina *seguimiento de punto máximo de potencia* y los dispositivos que realizan este proceso se denominan *seguidores de punto máximo de potencia*. Un seguidor de punto máximo de potencia, tiene dos técnicas de operación: forma *directa e indirecta*.

Método indirecto.

En el método indirecto de seguidor de punto máximo de potencia se realiza por medio de dos técnicas: la primera de ellas; es el *método de voltaje fijo*, se basa en el ajuste del voltaje de funcionamiento del panel solar sobre una base, donde se espera que el porcentaje de radiación incidente sea constante.

Otra de las técnicas de seguimiento de punto máximo indirecto es el método de voltaje de circuito abierto fraccionado. Este método da una expresión que relaciona el voltaje de circuito abierto, V_{OC} , y una constante k , para obtener el voltaje de máxima potencia V_{mpp} , como lo muestra la Ecuación 3.7.

$$V_{mpp} = k * V_{OC} \quad (3.7)$$

Existen desventajas en la implementación de este método: en primer lugar el concepto de k es sólo una aproximación donde no siempre apunta al verdadero punto máximo de potencia, pero lleva a una región de aproximación denominada "*Región de punto máximo de potencia*". En segundo lugar, cada vez que al sistema se le cambian las condiciones de iluminación, la constante k , debe ser cambiada. Tercero, el modulo debe estar desconectado de la carga momentáneamente para medir su voltaje de circuito abierto, es decir, la corriente es cero. Lo que resulta en una pérdida de producción de energía fotovoltaica. Para solucionar este inconveniente se incluye una celda fotovoltaica *piloto* que se adiciona al arreglo del panel fotovoltaico.

Método directo.

Este tipo de método para seguimiento del punto de máxima potencia implica mediciones de corriente, voltaje o potencia y una respuesta más precisa y más rápida que el método indirecto. Los algoritmos de seguimiento de este método se denominan como "*algoritmos de colina*".

El primero de estos algoritmos es el de *Perturbar y Observar*, o comúnmente llamado Algoritmo P&O. En este algoritmo se perturba la tensión en el modulo fotovoltaico, esto se traducirá en un aumento o disminución en la potencia. En la Figura 3.14, el algoritmo aprovecha el hecho de que en la curva potencia-voltaje crece a la izquierda del punto de máxima potencia y decrece a la derecha del punto de máxima potencia.

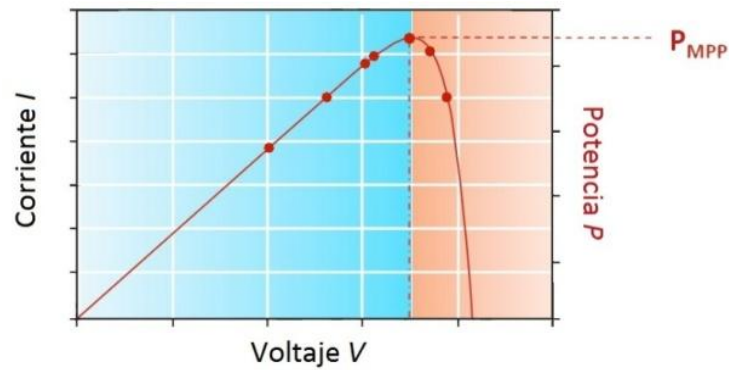


Figura 3.14 Potencia- Voltaje donde los puntos rojos indican los distintos puntos de trabajo que pueden estar a la derecha o izquierda del punto de máxima potencia MPP.

Otro tipo de algoritmo de medición directa es el denominado *Método de Conductancia Incremental*. En primer lugar se definirá los conceptos de conductancia y conductancia incremental. La conductancia de un componente eléctrico es la relación entre la corriente y el voltaje, es decir, es el recíproco de la resistencia, como lo muestra la Ecuación 3.8.

$$\text{Conductancia} = \frac{I}{V} \quad (3.8)$$

En la Figura 3.15, en el punto de potencia máximo, la pendiente de la gráfica de potencia-voltaje es cero, esto es:

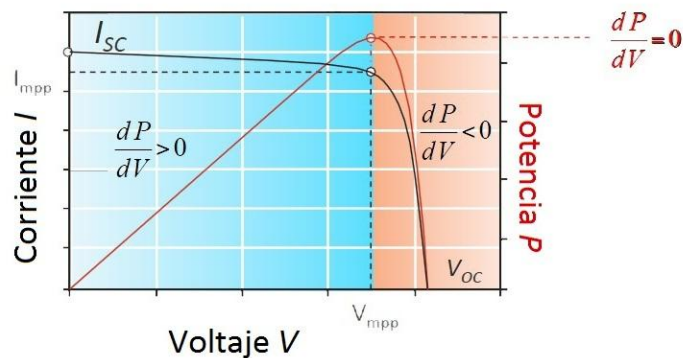


Figura 3.15 Potencia-voltaje representando la conductancia incremental [8].

El algoritmo explota estos datos básicos de la curva corriente-voltaje y la curva Potencia-Voltaje de un panel solar. En general, el algoritmo impone una tensión en el panel en cada iteración, mide el cambio gradual en la conductancia, la compara

con la conductancia instantánea y decide si el punto de operación es a la izquierda o a la derecha del Punto de Máxima Potencia.

3.3.2 Turbinas eólicas.

3.3.2.1 Potencia del viento.

El aire que se aproxima a una turbina de viento de eje horizontal se considera que fluye dentro de un cilindro de radio r , donde r es el radio del disco del rotor. La potencia asociada con el movimiento causado por el aire está dada por la Ecuación 3.9.

$$\dot{W}_i = \frac{1}{2} \dot{m} C^2 = \frac{1}{2} (\rho A_r C) C^2 \quad (3.9)$$

Donde ρ , es la densidad promedio del aire, y C es la velocidad de corriente. \dot{W}_i , representa la potencia del aire a velocidad constante. Debido a factores aerodinámicos, la potencia máxima teórica que puede ser desarrollada por la turbina es menor que \dot{W}_i . La Figura 3.16 muestra el volumen de control del aire que fluye a través del rotor.

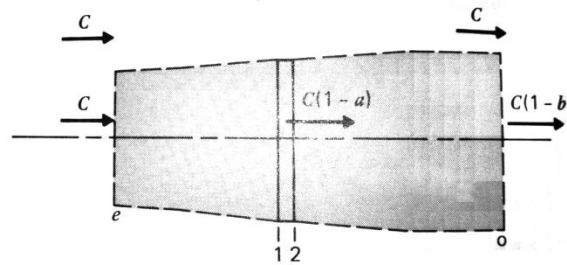


Figura 3.16 Flujo de aire a través de una turbina- rotor.

3.3.2.2 Diseño de turbinas eólicas.

El aire que se mueve a través del rotor, a una velocidad C , crea una presión dinámica en la superficie de las aspas. La fuerza resultante F_r actúa en la misma dirección en la que se mueven las aspas, en el centro de presión, normal al aspa. En la Figura 3.17. Se presentan la fuerza de sustentación F_L la cual es normal a la dirección del vector velocidad relativa C_r , F_U , es una fuerza de rotación y F_o es una componente tangencial de la fuerza resultante.

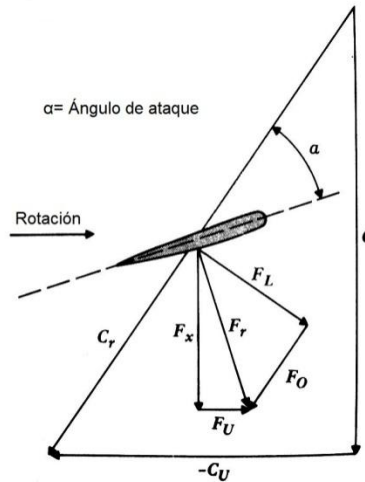


Figura 3.17 Diagrama de fuerzas sobre las aspas de una turbina eólica.

F_r , también se descompone en sus componentes axiales y de fuerza de rotación F_x y F_u , respectivamente. La fuerza F_u produce el torque que hace girar el rotor contra una resistencia externa, la fuerza F_x produce el empuje axial.

La velocidad del viento es el principal parámetro que influye en el diseño de una turbina-generador de viento (WTG), en parte debido a que la potencia desarrollada por la turbina es proporcional al cubo de la velocidad del viento. La turbina está diseñada para funcionar dentro de un rango de velocidad que se seleccionan en relación con la velocidad local del viento.

Capítulo 4.

Cálculo, diseño y puesta a punto de sistemas de conversión de energía solar.

4.1 Diseño de sistemas energéticos tipo *stand-alone*.

4.1.1 Generalidades de sistemas energéticos *stand-alone*.

Como se discutió anteriormente el sistema fotovoltaico autónomo o *stand alone* posee diferentes componentes; de forma global se encuentra que:

-El *generador fotovoltaico* es una interconexión de módulos o paneles que suministra la energía requerida al sistema. La potencia nominal de funcionamiento se determina sobre la base de los requisitos de carga.

-El *banco de baterías* aumenta la capacidad de funcionamiento del sistema fotovoltaico. Sin la batería, el sistema no sería capaz de cumplir con las demanda de carga fuera de la radiación natural disponible.

-El *regulador de carga* es el responsable de garantizar el buen funcionamiento de la batería, además de aumentar su vida útil.

-El *inversor* responsable de la conversión eficiente de señal directa en alterna, en una amplia gama de cargas. Cuanto mejor sea el inversor mayor es la eficiencia en las etapas de procesamiento de energía. Todos estos componentes, regulador, baterías, inversor, y cableado constituyen la etapa de balance del sistema o BOS (*Balance of system*).

4.1.2 Diagrama general de diseño de sistemas *stand-alone*.

Para diseñar sistemas autónomos, con especificaciones de diseño se tiene en cuenta el diagrama de flujo representado en la Figura 4.1. En él se dan los pasos para dimensionar y poner a punto sistemas energéticos teniendo en cuenta, carga a manejar, días de autonomía, número de batería, etc.

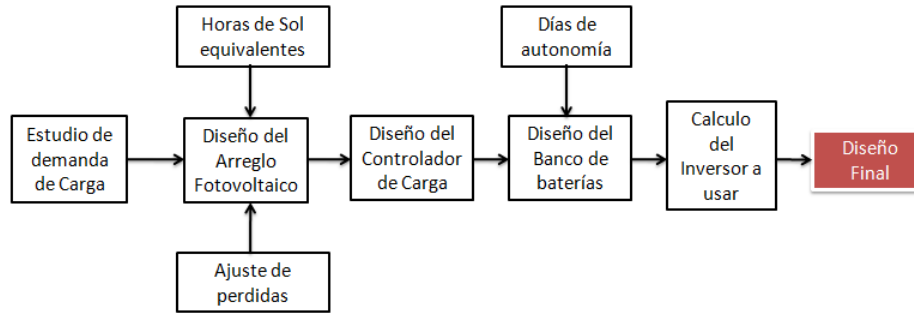


Figura 4.1 Diagrama de flujo, diseño de sistemas *stand-alone*.

4.1.2.1 Estudio de demanda de carga directa, alterna y días de autonomía.

El estudio de demanda de carga hace referencia a la potencia de consumo de los dispositivos que funcionarán con la implementación del sistema solar autónomo. Hay que tener en cuenta que el sistema abastecerá de energía tanto a dispositivos que consuman potencia directa como a los que consuman potencia alterna, es por esto que se debe hacer uso de las Tablas 4.1 y 4.2 llevando una tabulación de su consumo, tiempo de uso y energía total.

Tabla 4.1 Estudio de demanda de carga para potencia DC.

Ítem	Cantidad	Potencia unitaria (P_{DC})	Potencia total (P_T)	Tiempo de uso al día (T_d)	Potencia total de consumo (P_{TDC})
Bombillos LED	2	25	50	2	100
:	:	:	:	:	:

Tabla 4.2 Estudio de demanda de carga para potencia AC.

Ítem	Cantidad	Potencia unitaria (P_{AC})	Potencia total (P_T)	Tiempo de uso al día (T_d)	Potencia total de consumo (P_{TAC})
TV	1	100	100	2	200
:	:	:	:	:	:

La potencia total de consumo tanto directa como alterna está dada por la Ecuación 4.1, la cual es el producto total entre la potencia total en vatios y el tiempo de uso al día, en horas.

$$P_{TDC/TAC} = (P_T)(T_d) [Wh] \quad (4.1)$$

Se requiere que el sistema goce de una total de autonomía de n días, es decir, una batería completamente cargada debe ser capaz de alimentar la carga cuando existan n días sin radiación solar, por parámetros de diseño, se requiere que los días de autonomía estén en el rango de 1 a 10 días, para evitar pérdidas de eficiencia, el número preciso de días está determinado por el cliente.

4.1.2.2 Cuantificación de pérdidas en el sistema.

Para diseño en sistemas energéticos se debe tener en cuenta las diferentes pérdidas en el sistema. Al hacerlo, se quiere estimar la potencia mínima que se espera que el arreglo fotovoltaico pueda entregar. Típicamente, la eficiencia del inversor es de alrededor del 90% mientras que la eficiencia combinada del controlador de carga, la batería y los cables es de 85%. La potencia de consumo de carga directa se mantiene sin cambios, mientras que la potencia de consumo alterna se convierte desde su equivalente de carga directa basado en la eficiencia del inversor. Estas potencias de carga equivalentes deben llegar a la salida del generador fotovoltaico. Lo anterior es para poder obtener la cantidad real de potencia fotovoltaica (P_{SF}) esperada por el sistema al día. En la Ecuación 4.2 se muestra la potencia real del sistema como una función de las eficiencias del inversor (η_{inv}) y la eficiencia combinada de los cables, regulador y baterías (η_c).

$$P_{SF} = \frac{\left(P_{TDC} + \frac{P_{TAC}}{\eta_{inv}}\right)}{\eta_c} \quad (4.2)$$

4.1.2.3 Horas equivalentes de radiación solar por día (h_s).

Lo siguiente que se debe tener en cuenta son las horas de Sol equivalentes en el día. Lo anterior depende de la irradiación de la ubicación elegida, para el departamento del Cauca de acuerdo al atlas general de radiación para Colombia existe un rango promedio de 4.5 a 6 horas de equivalentes de Sol.

4.1.2.4 Diseño del arreglo fotovoltaico.

Conociendo la potencia requerida por el sistema fotovoltaico, y las horas de sol equivalente, se debe estimar la potencia fotovoltaica nominal requerida en el sistema fotovoltaico. Suponiendo que el panel estará funcionando en el máximo pico de potencia por el fabricante W_p , podemos obtener el número necesario de paneles. Lo primero es calcular la energía fotovoltaica mínima requerida M_{W_p} , como se muestra en la Ecuación 4.3, dividiendo la potencia requerida por el sistema P_{SF} , entre las horas de sol equivalentes h_s .

$$M_{W_p} = \frac{P_{SF}}{h_s} \quad (4.3)$$

El número de paneles, N , puede calcularse como se muestra en la Ecuación 4.4, estableciendo una relación entre la energía fotovoltaica mínima (M_{W_p}) y la potencia pico del panel (W_p). Hay que tener en cuenta que el número de paneles siempre será la aproximación al número entero superior más cercano.

$$N = \frac{M_{W_p}}{W_p} \quad (4.4)$$

Las posibles configuraciones de los paneles fotovoltaicos son dos: serie y paralelo. Para la configuración en paralelo; la corriente máxima I_{max} , está dada por la Ecuación 4.5, el producto entre el número de paneles y la corriente de corto circuito del panel, I_{SC} , dada por el fabricante.

$$I_{max} = N * I_{SC} \quad (4.5)$$

Por otro lado, en una configuración en serie existirá una tensión máxima V_{max} , dada por la Ecuación 4.6, la cual es el producto entre el número de paneles y el voltaje de circuito abierto del panel, V_{OC} , dado por el fabricante.

$$V_{max} = N * V_{OC} \quad (4.6)$$

4.1.2.5 Controlador de carga.

En las especificaciones del controlador de carga disponible para implementación, basado en el diseño de potencia, hay que asegurarse que los parámetros del controlador son coherentes con los parámetros máximos que anteriormente se

calcularon. Se denomina *Voltaje de operación* al voltaje de la batería a usar el cual debe ser compatible con el voltaje a controlar. Por lo tanto la tensión nominal de funcionamiento directo del sistema está determinada por la capacidad de carga, existen controladores desde 12, 24, 36 y 48 Voltios de funcionamiento. En la Tabla 4.3 se listan los diferentes casos para la conexión de los paneles calculados dependiendo de las especificaciones de voltaje y corriente máximas que puede manejar el controlador, denotados por V_{cont} e I_{cont} .

Tabla 4.3. Casos para determinar la conexión entre módulos dependiendo de parámetros del controlador de carga.

		Tipo de conexión entre módulos
Caso 1	$V_{cont} < V_{max}$	Paralelo.
	$I_{cont} \geq I_{max}$	
Caso 2	$V_{cont} \geq V_{max}$	Serie
	$I_{cont} < I_{max}$	
Caso 3	$V_{cont} \geq V_{max}$	Serie.
	$I_{cont} \geq I_{max}$	

En el caso 3 es posible interconectar los módulos en paralelo pero en general, dada una elección entre serie y paralelo, se prefiere una configuración en serie para minimizar la pérdida de cable en implementación directa además de mantener bajos valores de corriente.

4.1.2.6 Baterías necesarias para el sistema.

El tamaño del banco de baterías depende directamente de los días de funcionamiento autónomo que se esperan del sistema. El fabricante de baterías da las especificaciones necesarias, tales como intensidad de descarga DOD, voltaje de la batería V_{batt} y capacidad de batería C_{batt} . Lo siguiente es elegir la configuración óptima de la interconexión entre baterías. Para esto, se define la capacidad mínima de la batería, como en la Ecuación 4.7, la cual establece una relación entre la potencia fotovoltaica real, el DOD y el voltaje de operación del sistema V_s , multiplicado por los días en el que el sistema funcionara de forma autónoma.

$$C_{min} = \frac{P_{SF}}{DOD * V_s} \times n \quad (4.7)$$

Hay que tener en cuenta que los días de autonomía y las pérdidas del sistema tienden a aumentar el tamaño del banco de baterías. Por otro lado, cuanto mayor sea el DOD de la batería, esta puede descargarse más y por lo tanto reducir la capacidad del banco de baterías necesario. La cantidad de baterías en serie estará dada por la Ecuación 4.8, la cual establece una relación entre el voltaje de operación del sistema V_S , y el voltaje de la batería V_{batt} .

$$N_{bs} = \frac{V_S}{V_{batt}} \quad (4.8)$$

La cantidad de baterías en paralelo estará dada por la cantidad de corriente que necesita el sistema. Se calcula en la Ecuación 4.9, la cual establece la relación entre la capacidad mínima de la batería y la capacidad de la batería dada por el fabricante.

$$N_{bp} = \frac{C_{min}}{C_{batt}} \quad (4.9)$$

El número total de baterías requerido por el sistema estará dado por el producto de las anteriores cantidades, representado en la Ecuación 4.10.

$$N_T = N_{bs} * N_{bp} \quad (4.10)$$

4.1.2.7 Determinación del inversor.

Un inversor está disponible con una eficiencia η_{inv} , y la tensión de servicio V_S . Se sabe por el estudio de carga que la potencia alterna es P_{AC} . En la Ecuación 4.11 se calcula la potencia nominal como una relación entre la potencia alterna y la eficiencia. Hay que tener en cuenta que el inversor puede ser menos eficiente que el calculado en el rendimiento nominal, en estas condiciones puede ser más seguro tener un margen para las especificaciones de potencia.

$$P_{inv} = \frac{P_{AC}}{\eta_{inv}} \quad (4.11)$$

4.2 Diseño de sistemas interconectados a la red.

4.2.1 Generalidades de sistemas interconectados a la red.

Al igual que en los sistemas autónomos existe el generador fotovoltaico necesario para suministrar energía eléctrica al sistema.

El *inversor* es la columna vertebral de la instalación fotovoltaica conectada a la red. El inversor es el responsable no solo del suministro de energía a la red como fuente de corriente, sino también para el seguimiento de la tensión y la frecuencia de la red. La interacción con la red es de dos vías, mientras que la interacción con la carga es unidireccional.

Un *contador* también se encuentra generalmente en este tipo de sistemas, es un instrumento de medida de potencia consumida; de dos vías ya que este medidor tiene en cuenta no solo la potencia consumida de la red por parte del consumidor, sino también el poder alimentar a la red a través de la instalación fotovoltaica.

4.2.2 Eficiencia de un sistema interconectado a la red.

En el caso de la eficiencia del sistema, si se asume una radiación constante bajo la norma AM1.5. Lo primero es saber la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, η_{PV} . Hay que tener en cuenta que el Balance del Sistema BOS, debe ser instalado a cierta distancia de los paneles debido al hecho que los inversores deben estar protegidos. Dependiendo de la longitud de los cables y la cantidad de corriente a través de ellos, existen pérdidas que están alrededor de 1% al 5%, de aquí se deriva la existencia de una eficiencia debida al cableado, η_{cab} . La eficiencia del inversor, η_{inv} , depende de la potencia a operar. El producto de todas estas cantidades da como resultado la eficiencia total del sistema representado en la Ecuación 4.12.

$$\eta_{sis} = \eta_{PV} \times \eta_{cab} \times \eta_{inv} \quad (4.12)$$

4.2.3 Diagrama general de diseño sistemas conectados a la red.

El diagrama de flujo para diseño de sistemas conectados a la red, mostrado en la Figura 4.2 es algo más simple, debido a la ausencia de batería y controlador de carga, sigue la metodología del diseño de sistemas *stand-alone*, puesto que la red eléctrica actúa como una fuente constante de corriente y voltaje, no se necesita almacenamiento.

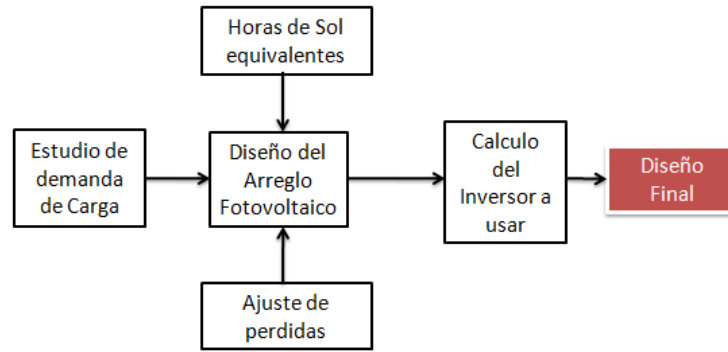


Figura 4.2 Diagrama de flujo diseño sistemas conectados a la red.

4.2.3.1 Estudio de demanda de carga

Para comenzar a diseñar un sistema interconectado a la red lo primero que se debe hacer es un estudio de demanda de carga, pero en este caso las potencias a manejar van a ser de carácter alterno, con la ayuda de la Tabla 4.2 se toman los requerimientos de consumo del lugar a instalar. En este tipo de sistemas no existe el concepto de día autónomo, ya que la red eléctrica actúa como una unidad de almacenamiento ilimitada.

4.2.3.2 Cuantificación de pérdidas y equivalentes de hora solar.

Las pérdidas en el sistema ayudaran a encontrar la energía necesaria en la salida del generador fotovoltaico para cubrir con éxito la carga diaria. En este caso los cables tienen una eficiencia de transmisión del 98% y el inversor conectado a la red una eficiencia del 95%. La Ecuación 4.13 muestra la potencia de carga del sistema fotovoltaico como la transposición de energía antes de que se produzcan estas pérdidas.

$$P_{SF} = \frac{P_{TAC}}{\eta_{inv} \eta_{cable}} \quad (4.13)$$

De la misma manera que en la sección 4.1.2.3 el equivalente de horas solares (h_s) está determinado en el rango de 4.5 a 6 horas diarias en el departamento del Cauca.

El diseño del arreglo fotovoltaico se realiza de manera similar a un sistema *stand-alone*, utilizando las Ecuaciones 4.3-4.6

4.2.3.3 Determinación del inversor a usar.

Por lo general en sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, los paneles fotovoltaicos no tienen por qué ser exactamente los necesarios para cumplir con los requisitos de carga; esto debido a que cualquier exceso o déficit de energía se puede compensar mediante la red eléctrica. Caso contrario se presenta en la instalación autónoma. Lo anterior es una diferencia con el sistema autónomo, donde cualquier variación de energía había que suplirla con una variación en el tamaño de almacenamiento, lo que lleva a costes elevados. En consecuencia en sistemas conectados a la red se observa que el inversor está dimensionado en base al número de paneles fotovoltaicos y no al tamaño de la carga, tal como lo muestra la Ecuación 4.14, donde N es el número de paneles y W_p es la potencia pico de un panel. Ésta es la potencia que debe manejar el inversor.

$$P_{Niv} = N * W_p \quad (4.14)$$

Las características del inversor darán la configuración de los paneles, ya sea en serie o en paralelo en base al voltaje y corrientes máximas anteriormente calculadas. Si el voltaje calculado es menor que el voltaje máximo del inversor se conectan los paneles en serie, si por el contrario la corriente calculada es menor que la corriente máxima del inversor se conectan los paneles en paralelo.

En general para realizar la tarifación de pulsos se debe consultar las políticas públicas de implementación y la compañía que presta el servicio, actualmente con la Ley 1715 de 2014 apenas se adopta la interconexión de sistemas energéticos a la red nacional.

4.3 Viabilidad financiera de sistemas energéticos usando energía solar.

La economía en el campo de la energía fotovoltaica se puede discutir en varios niveles, entre los que se destacan, niveles de consumo, fabricación, instaladores fotovoltaicos o el nivel de la tecnología utilizada.

4.3.1 Valor presente neto para un sistema energético.

Si bien el precio de la planta fotovoltaica y la electricidad producida por ésta, sigue superando el precio de la energía convencional se debe principalmente a la gran inversión inicial en la implementación del sistema. El precio de la electricidad producida por sistemas fotovoltaicos depende directamente de los siguientes parámetros:

- Inversión inicial
- Vida útil de la planta fotovoltaica
- Rendimiento total al cabo de la vida útil.
- Tasa de interés del capital.
- Costo de mantenimiento.

Inversión inicial: Inversión de capital para la adquisición, instalación y funcionamiento del sistema fotovoltaico, en este ítem está contemplado el precio de los diferentes componentes eléctricos a instalar.

Vida útil de la planta: generalmente la vida útil de la planta se asume entre 15 y 20 años, puesto que se asume el menor tiempo de vida de los componentes a instalar, en este caso son los módulos fotovoltaicos.

Rendimiento total: El rendimiento total de una instalación fotovoltaica se define en la Ecuación 4.15. Establece una relación entre la Potencia nominal de la planta fotovoltaica (P_N) y la energía total a usar (E_{usada}). Esta herramienta da la posibilidad de comparación de diferentes sistemas fotovoltaicos en el mismo lugar de funcionamiento respecto a la potencia de salida total.

$$R_T = \frac{E_{usada}}{P_N} \quad (4.15)$$

Tasa de interés: Cambia de país en país y con el tiempo. Para un análisis económico se toma una tasa de interés promedio, este valor está dado por el Banco Central del país en cuestión.

Costo de mantenimiento: Normalmente un sistema fotovoltaico de 3 a 5 KW_p (*Kilovatio pico*) no necesita mantenimiento mecánico. Mientras que los sistemas de potencias mayores a 5 KW_p necesitan tener un control periódico cada tres años.

Otros posibles costos son los asociados con administración, seguros, impuestos y posibles arrendamientos del espacio a instalar. La mayor parte del coste de mantenimiento de un sistema fotovoltaico es una reserva para la posible reparación o sustitución del inversor. El costo de mantenimiento se calcula por lo general como el 1% de la inversión inicial cada tres años.

Con los parámetros antes mencionados se puede calcular la *viabilidad económica* del sistema, ya que una instalación energética es una inversión a largo plazo que se extiende a lo largo de la vida útil de la planta. Los costos de los descuentos deben hacerse en efectivo y los ingresos son dinero en el presente. A esta relación se le denomina Valor Presente Neto o VPN, se muestra en la Ecuación 4.16; quien depende directamente de la inversión inicial I_o , la tasa de interés r , la vida útil de la planta n , en años, y los denominados *Flujos netos de caja (FNC)*, que representan el valor total de retribución con todos los costes de mantenimiento asociados. Si el VPN es positivo la instalación es viable de lo contrario el proyecto no es viable económicamente.

$$VPN = -I_o + \sum \frac{FNC}{(1+r)^n} \quad (4.16)$$

4.3.2 Periodo de recuperación.

El periodo de recuperación de la inversión se define como la cantidad de tiempo requerido para recuperar el coste en una inversión. Depende directamente del Valor Presente Neto, puesto que al final de un cierto tiempo se recuperará la inversión inicial teniendo en cuenta los flujos netos de caja los cuales dependen directamente de administración, mantenimiento, etc.

Hay que tener en cuenta que el periodo de recuperación depende de la ubicación de la instalación fotovoltaica. Por supuesto en regiones con más radiación mayor es el rendimiento del sistema y más rápida es la recuperación de la inversión. Además los ahorros por la instalación fotovoltaica no solo depende del rendimiento del sistema fotovoltaico sino también de los costos de la electricidad de la red, finalmente los costos iniciales del sistema fotovoltaico son también un factor importante para calcular el periodo de recuperación.

4.3.3 Tarificación en sistemas energéticos.

A nivel de consumo, la tarificación es la velocidad a la que paga un consumidor por la electricidad que el sistema fotovoltaico conectado a la red contribuye a la red local. Existen dos tipos de tarificación bruto y neto.

4.3.3.1 Tarificación bruta.

La tarificación bruta en sistemas fotovoltaicos se refiere a la cantidad de energía tasada que es cubierta por el sistema, independientemente del consumo doméstico.

4.3.3.2 Tarificación neta.

Las tarifas tienen una tasa más alta para el excedente de electricidad que se suministra a la red, después de restar el consumo doméstico.

4.3.4 Costo normalizado de energía eléctrica. (LCOE)

Es el costo por kWh de electricidad producida por un proyecto de generación de energía. Normalmente se utiliza para comparar los costos de vida útil de los proyectos basados en distintas fuentes de energía. El concepto de LCOE asigna los costos de una planta de energía a través de su vida útil, para dar un precio efectivo por kWh. Si conocemos el rendimiento anual del sistema fotovoltaico durante toda su vida útil, y los costes del sistema que se acompañan, el LCOE se puede encontrar como lo muestra la Ecuación 4.17. Donde A_t es el costo anual total en el año t , I_0 es la inversión inicial, N es la vida útil de la planta en años, E_t es el rendimiento anual de electricidad y r es la tasa de descuento, un factor utilizado para descontar los costos futuros y traducirlos en valores al presente.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (4.17)$$

Además las tasas de descuento utilizadas tendrán un impacto en el valor LCOE, para el productor de energía. El LCOE es un valioso indicador de la competitividad de los costes de una determinada tecnología de producción de energía. Además es un indicador de punto de buen precio, es decir, que el

productor de energía tendrá que vender la energía a un precio mayor que el LCOE para obtener beneficios.

4.3.5 Equivalencia con la red eléctrica.

El concepto de equivalencia con la red eléctrica es aquella situación en la que la energía fotovoltaica generada puede tener un costo nivelado que es igual al precio de alimentación de la red eléctrica convencional. Este concepto puede generalizarse a otras tecnologías de energía renovable como turbinas eólicas o represas hidroeléctricas. Por lo tanto en comparación con el precio al por mayor, la equivalencia de red pueden ser cubiertos más rápidamente como se muestra en la Figura 4.3.

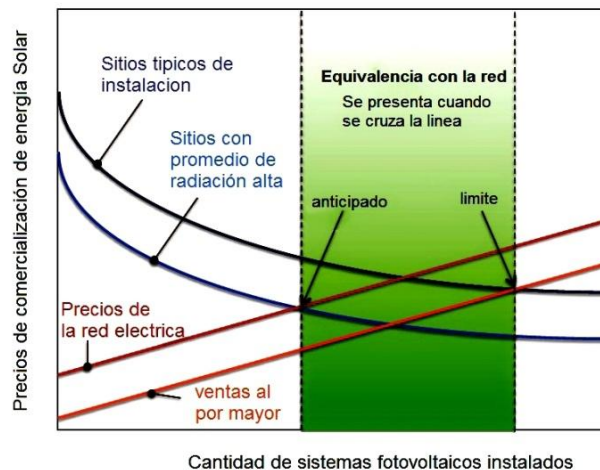


Figura 4.3 Equivalencia con el precio de red eléctrica para un sistema fotovoltaico.

En el gráfico se representa de volumen de aplicación de sistemas fotovoltaicos instalados, en el eje x, que puede correlacionarse directamente con el tiempo, ya que en la última década la instalación de sistemas fotovoltaicos ha aumentado considerablemente. Por otro lado se espera que el costo de los combustibles fósiles, tiendan a subir los costos en la red convencional. La equivalencia de red se produce cuando las líneas de energía solar y de la red se cruzan. Por supuesto, a la equivalencia de red se puede llegar más rápido con el uso de incentivos y subsidios. Sin embargo se considera realmente que la equivalencia de red se dará cuando los precios de la energía fotovoltaica sean menores que los de la red pero sin la ayuda de subsidios. Es preponderante que en Colombia exista una paridad

de red ya que así es más fácil la integración de energías renovables con la matriz energética de la región.

4.3.6 Relación de rendimiento energético.

La tasa de rendimiento energético no es más que la relación de la cantidad total de producción de energía de la instalación fotovoltaica y la cantidad de energía dada en su vida útil, tal como lo muestra la Ecuación 4.18. Cabe resaltar que el rendimiento fotovoltaico depende de varios factores como el lugar de la instalación, la calidad de los paneles, la elección de la tecnología, etc.

$$E_R = \frac{E_{SF}}{E_V} \quad (4.18)$$

4.3.7 Periodo de recuperación de energía.

Se define como la entrada total de energía durante la vida útil para la producción de energía anual del sistema, como lo muestra la Ecuación 4.19. Por lo general, el periodo de recuperación de la energía de la mayoría de los sistemas es de 1 a 7 años, dependiendo de las horas de sol equivalentes en el lugar de aplicación.

$$E_{PT} = \frac{\text{Entrada de energía total}}{\text{Producción de energía anual}} \quad (4.19)$$

En la Figura 4.4 se presentan algunas de las tecnologías fotovoltaicas y la cantidad de energía necesaria para su fabricación. La gráfica muestra el rango de consumo de energía primaria para la fabricación de módulos. De acuerdo a la gráfica en la manufactura de tecnologías de película delgada de silicio se invierten menores cantidades de energía en comparación del silicio monocristalinos.

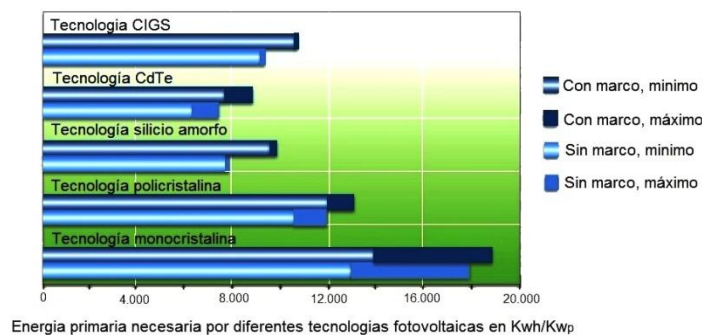


Figura 4.4 Costos de producción de tecnologías fotovoltaicas.

En la Figura 4.5 se muestra el tiempo de recuperación de energía para sistemas basados en 2 diferentes tecnologías policristalina y de película delgada de silicio. Se observa como las regiones de radiación superiores muestran un tiempo de retorno menor que los sistemas instalados en las zonas bajas de radiación. Los paneles fotovoltaicos basados en la tecnología de película delgada el proceso de recuperación toman menos tiempo puesto que su proceso de fabricación es más bajo. Sin embargo el Balance del Sistema BOS, para los sistemas basados en la misma tecnología tiene un tiempo de recuperación mayor, debido al menor rendimiento de los paneles de silicio. En general, se considera el tiempo de amortización de la energía es alrededor de 2 a 6 años.

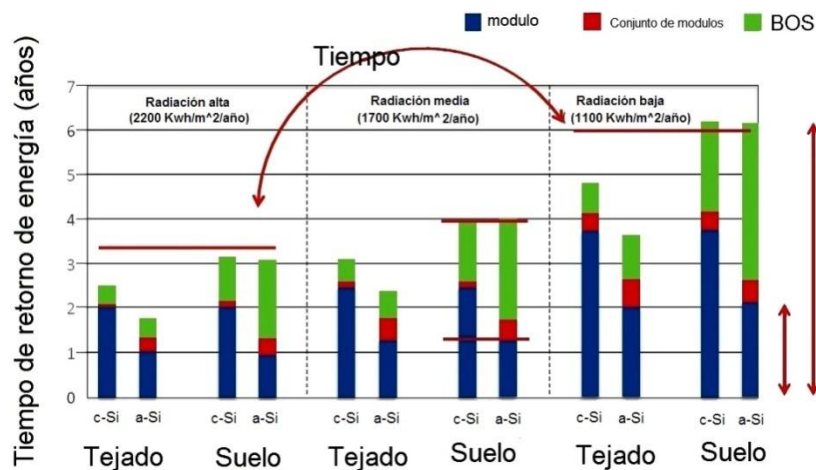


Figura 4.5 Tiempo de recuperación energética para dos tipos de tecnología.

Los paneles de película delgada de silicio amorfo pueden trabajar mejor bajo radiación difusa pero la energía de fabricación es mayor que en los paneles de silicio cristalino; en contra parte los paneles de silicio cristalino son menos eficientes, y los costes de producción son menores. Así que vemos una vez más que se requiere una gran cantidad de optimización y desarrollo tecnológico a nivel de manufactura para elegir el módulo óptimo a implementar.

Anexos

Anexo A

Radiación y ondas electromagnéticas.

En 1865, James Clerk Maxwell, establece una completa base de ecuaciones que explican el fenómeno electromagnético, lo que ahora conocemos como: *Ecuaciones de Maxwell*. Basado en estas ecuaciones, el predijo la existencia de ondas electromagnéticas como se muestra en las Ecuaciones A.1 y A.2 [16].

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A.2})$$

Y además se cumple que la velocidad de propagación está dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (\text{A3})$$

Se encuentra que las ondas electromagnéticas se propagan a una velocidad constante, igual a la de la luz en el vacío, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$. Definida por la permitividad (ϵ_0) y permeabilidad (μ_0) del medio donde se propague. El vector de intensidad de campo eléctrico (\mathbf{E}) es perpendicular a la dirección de propagación de la luz y este a su vez es perpendicular al vector intensidad de campo magnético (\mathbf{B}). [16].

Espectro Electromagnético.

La frecuencia de una onda electromagnética (ν) puede expresarse como la velocidad de la luz dividida entre la longitud de onda mostrada en la Ecuación A.4, así pues la energía del fotón (E), puede ser expresada en términos de la longitud de onda, esto es igual a tener el producto de la constante de Planck (h) por la velocidad de la luz (c) dividido entre la longitud de onda (λ), todo esto se relaciona en la Ecuación A.5 [17].

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{A.4})$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{A.5})$$

De acuerdo a lo anterior las ondas electromagnéticas existen en muchos rangos del espectro electromagnético, dependiendo de la frecuencia a la que son emitidas Figura A.1.

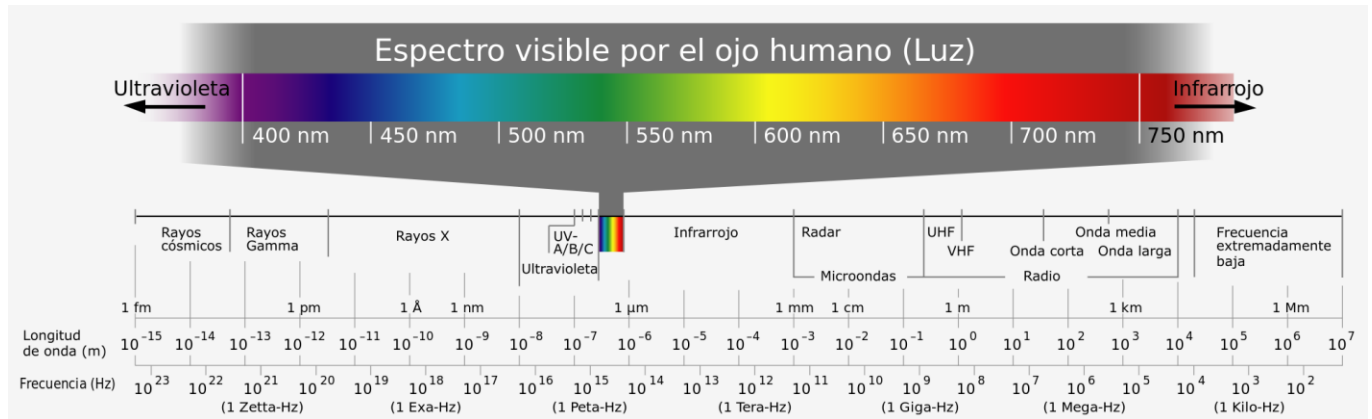


Figura A.1 Espectro Electromagnético [17].

El espectro visible está en el rango de longitud de onda comprendido entre 400nm a 700nm correspondiendo a una frecuencia en el orden de 10^{14} Hertz. Las diferentes longitudes de onda o frecuencias corresponden a los distintos colores y el rojo esta en el extremo de mayor longitud de onda y baja frecuencia de la región visible y el azul en el extremo de menor longitud de onda y alta frecuencia [17].

Anexo B.

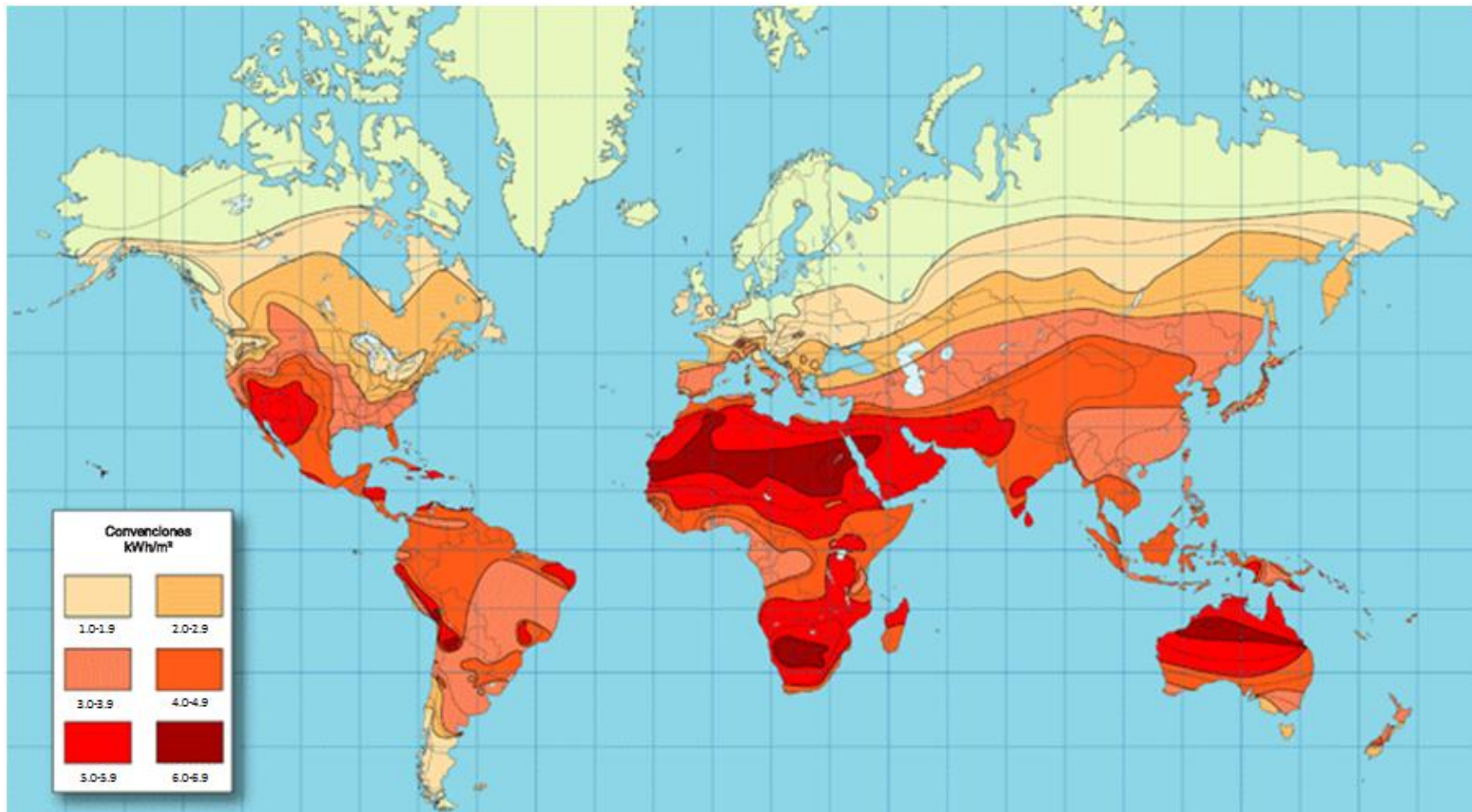


Figura B.1. Mapa Anual de la radiación Solar en el mundo. 2010. [25]

Anexo C.

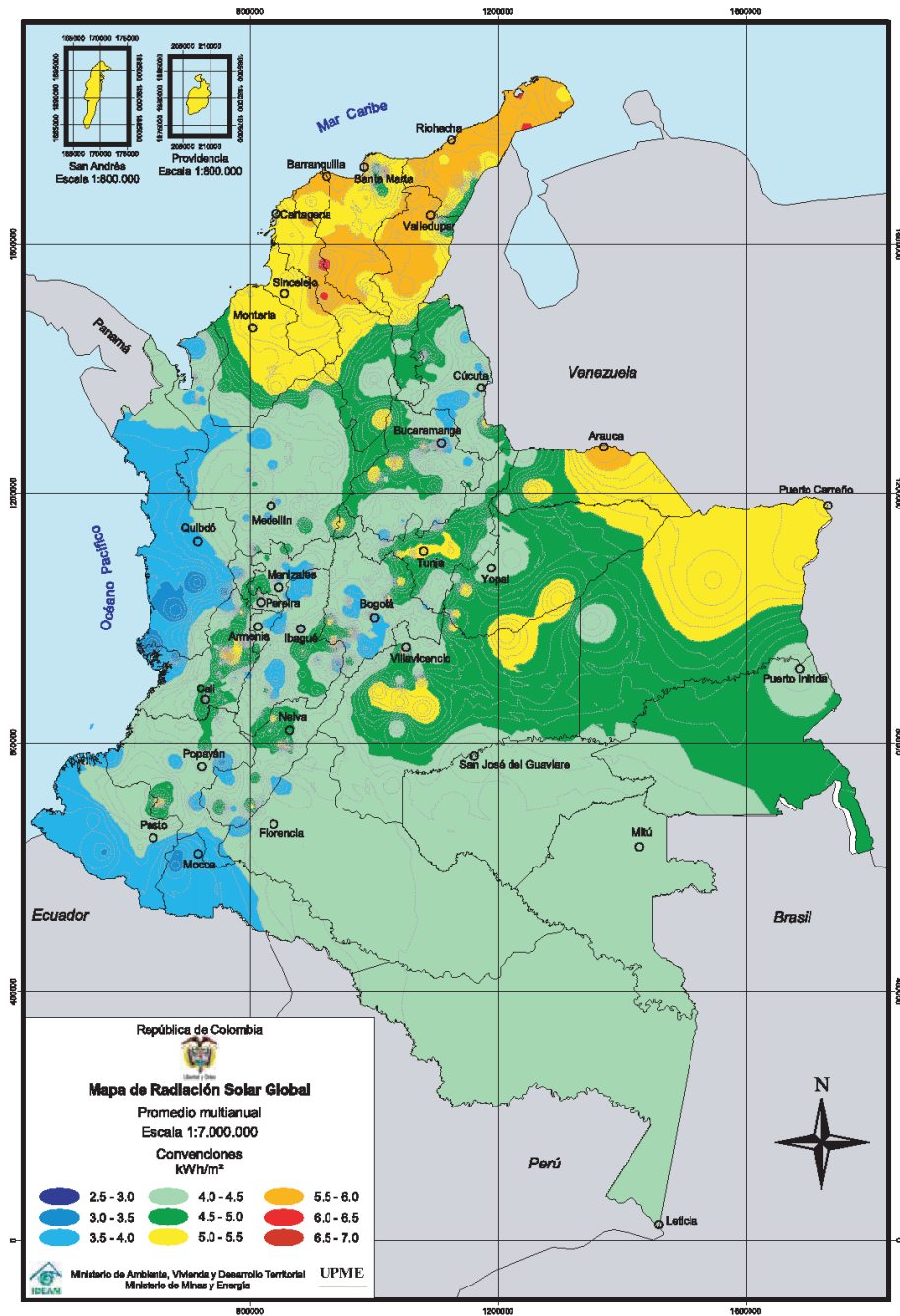


Figura C.1. Mapa Anual de la radiación Solar en Colombia. 2006. [26]

Anexo D.

Estado y perspectivas de aprovechamiento de la Energía Solar.

En general, existen dos principales razones por las que investigar y estudiar nuevas formas de energía, la primera, es el resultado del peligro inminente en el mundo producto del cambio climático derivado del consumo de combustibles fósiles. La segunda razón, radica en que las reservas de los combustibles fósiles son limitadas y en cualquier momento el planeta se vería desabastecido en materia energética. Es necesario entonces tomar medidas drásticas que conlleven a apropiarse de tecnologías en sistemas energéticos auto sostenibles [23].

La Figura D.1, muestra la capacidad instalada de los sistemas fotovoltaicos alrededor del mundo, observándose un crecimiento exponencial. En Europa se concentra la mayoría de los sistemas fotovoltaicos instalados, teniendo a Alemania como país a la cabeza. Cabe resaltar que a pesar de que está una región con un índice de radiación bajo, es el país que más ha desarrollado y contribuido a la instalación de estos sistemas con un 31% del total mundial, esto muestra el gran potencial de la energía solar en diferentes regiones del mundo. Se representa también la región Asia-pacífico, donde la mayoría de instalaciones se encuentran en Japón, esto en mayor medida debido a que después del desastre de Fukushima el gobierno implementó un plan de adopción de nuevas fuentes de energía, dando estímulos económicos y dándole la puntada inicial a un ambicioso proyecto de introducción a nuevas formas de fuentes de energía.

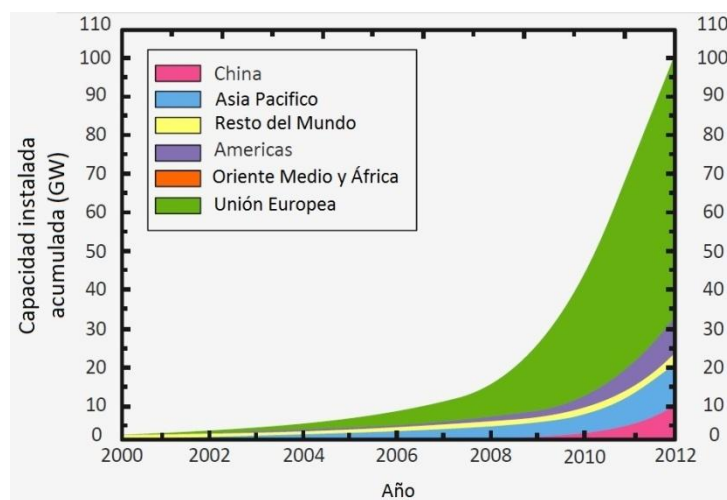


Figura D.1 Sistemas fotovoltaicos instalados alrededor del mundo [23].

La evolución de uso e instalación de fuentes de energía que no usan combustibles fósiles, se muestra en la Figura D.2. Hay que tener en cuenta que los números que se muestran son los representativos de la potencia que cada energía produce, pero no es el promedio de electricidad que produce cada energía en realidad. Existe una relación entre estas dos cantidades llamada *factor de capacidad* (C_f), que es básicamente una forma de medir los resultados de una fuente de electricidad en un determinado periodo de tiempo. Si bien la energía solar tiene un poco menos factor de capacidad que la energía nuclear y la energía suministrada por el agua, pero extrapolando en el tiempo, se observa que la energía solar aumenta su uso, de aquí al 2020, en relación con otras fuentes de energía renovable.

¿Por qué la Energía solar tendrá ventaja en relación con otras fuentes de energía renovable? Existen razones entre las que se destacan, en primer lugar, el hecho de que la energía solar está en todo el mundo a cualquier hora. Por la evaporación del agua ocasionada por la acción del Sol, la hidroelectricidad es una forma derivada de energía solar, y el viento es la segunda forma de energía solar por la inducción de una diferencia de temperaturas ocasionadas por la radiación del Sol. Así entonces la energía solar es la más grande fuente de energía renovable a nuestro alrededor.

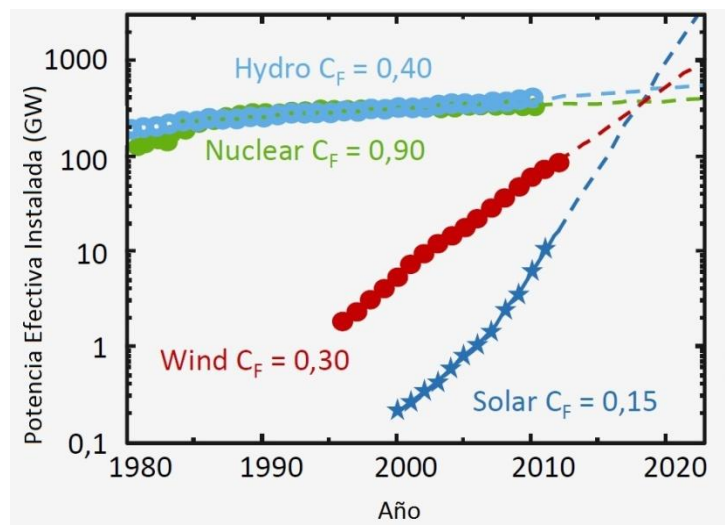


Figura D.2 Fuentes de Energía renovable independientes de combustibles fósiles instalados y una proyección al futuro [24].

En segundo lugar la hidro-energía y la energía nuclear tienen algo de complicación a la hora de ser implementados, ya que se necesita un gran parque o una gran planta para transformar este tipo de fuentes de energías, lo que implica que tendrían que construirse grandes sistemas y por ende inversión privada o estatal.

En contraparte la instalación y descentralización del uso de energía solar hace que la revolución solar este cada vez más cerca de nosotros [25].

Para Colombia, las políticas implementadas por el Ministerio de Minas y Energía, en materia de energías renovables han tenido una buena acogida y su implementación poco a poco está siendo adoptada. Con el ingreso de nuestro país a la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), de la cual hacen parte 50 países, Colombia está ratificando su posición como país gestor de desarrollo de tecnologías de producción limpias y amigables con el ambiente. La agencia, fue creada con el objetivo de promover las energías renovables en todo el mundo y proporcionar asesoría y logística a los estados asociados. Colombia esta privilegiada con su posición geográfica, ubicada en la zona ecuatorial permitiéndole contar con radiación solar constante en determinadas zonas del territorio. La radiación media en el país es de $4.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$, y el área con mejor recurso solar es la Península de la Guajira, con $6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ de radiación. De los 6 MW de energía solar instalados en Colombia (equivalente a aproximadamente 78.000 paneles solares), 57% está distribuido para aplicaciones rurales y 43% para torres de comunicación y señalizaciones de tránsito [26].

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, (IPSE), es la entidad encargada de identificar, socializar los proyectos y dar solución a problemas energéticos a regiones del país donde el servicio es deficiente. Este es el organismo que en Colombia está al tanto del estado y perspectivas de uso de las energías renovables.

Pero en contraparte a las medidas tomadas por el estado Colombiano, en el Cauca la política en materia de apropiación de fuentes de energía renovable no es la mejor; de acuerdo al Plan de desarrollo del Departamento del Cauca 2012-2015 [27], se trabaja para garantizar el sustento del medio ambiente esto enmarcado en los objetivos de desarrollo del milenio de la ONU, pero no se menciona el uso de energías alternativas. En el programa *un campo con energía* [27] se menciona la construcción y estudio de generación de energía y proyectos alternativos, pero la política y el estado en el Departamento, en líneas generales, es muy pobre.

Para lograr conocer más acerca de las técnicas de aprovechamiento y su apropiación, en el capítulo 2 se tratará la energía solar *fotovoltaica*, la cual, usando diferentes técnicas en la apropiación de materiales semiconductores y principios físicos de materiales, se llega a transformar la radiación solar en electricidad.

Anexo E.

Conductores, Semiconductores y aislantes.

Una propiedad de los sólidos es su conductividad eléctrica. Algunos materiales llamados *aislantes*, son muy pobres conductores de electricidad. Otros sólidos son excelentes *conductores* de la electricidad; en este grupo están los metales como el cobre y la plata. Entre estos dos grupos extremos hay una tercera clase de sólidos, llamados *semiconductores* [28]. Cuando los átomos se enlazan para formar la estructura de un material, la energía electrónica de los átomos individuales se altera y sus niveles de energía se agrupan en *bandas de energía*. Los electrones en la capa más externa son los únicos que interactúan con otros átomos, esta es la banda más alta y es llamada la *banda de valencia*. Algunos electrones de la banda de valencia pueden poseer una gran cantidad de energía lo que les permite saltar a una banda superior, estos electrones son responsables de la conducción de la electricidad y del calor, esta banda recibe el nombre de *banda de conducción*. La diferencia en la energía de un electrón para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción se llama la *banda prohibida* o *banda de gap*, como lo muestra la Figura E.1 [28].

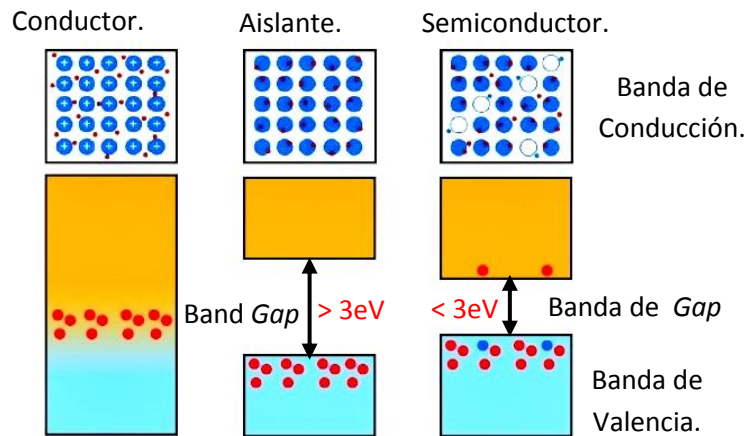


Figura E.1 Representación esquemática de las bandas de conducción, valencia y de *gap*, en los distintos tipos de materiales. Los puntos azules representan cargas positivas (protones) y los rojos cargas negativas (electrones) [13].

De acuerdo a esto, en los aislantes la banda de valencia está llena y la banda de conducción está vacía, tienen una banda de *gap* muy grande que hace difícil que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción; el valor de la banda de *gap* en estos materiales es superior a 3 eV. En los conductores, las bandas

de conducción y valencia están superpuestas. Los electrones de valencia son capaces de aceptar la energía de un campo externo y pasar a un estado permitido de mayor energía dentro de la misma banda; los metales cumplen esta propiedad y los electrones pueden ser fácilmente emitidos fuera de la estructura atómica y ser libres para conducir electricidad. En los semiconductores el valor de la banda de *gap* es menor que 3eV. Existen dos tipos de semiconductores, los puros, llamados *semiconductores intrínsecos* y los semiconductores dopados con pequeñas cantidades de impurezas llamados *semiconductores extrínsecos*. [28].

Unión *p-n*.

Un semiconductor tipo *n* se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado añadiendo un cierto tipo de átomos para poder aumentar el número de electrones, este exceso de electrones está disponible para la conducción. En contraparte, un semiconductor tipo *p* se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado añadiendo un cierto tipo de átomos para poder aumentar el número de portadores de carga positiva o *huecos*, estos huecos pueden acoger electrones faltantes [3]. Como lo indica la Figura E.2.

Al unir ambos cristales, se manifiesta una difusión de electrones del cristal *n* al *p* (J_e). Al establecerse estas corrientes aparecen cargas fijas en una zona a ambos lados de la unión, zona que recibe el nombre de *zona de agotamiento* o de *deplexión*. A medida que progresa el proceso de difusión, la zona de carga espacial va incrementando su anchura profundizando en los cristales a ambos lados de la unión [28].

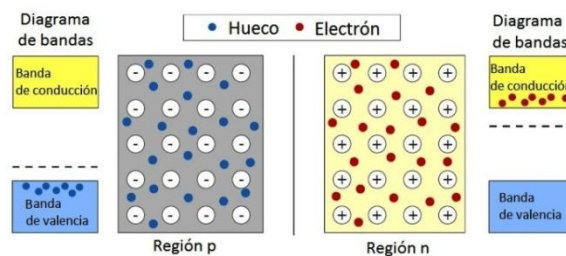


Figura E.2 Esquema representativo semiconductores tipo *n* y *p* [28]

Transporte de Portadores de carga en un semiconductor.

En un semiconductor existen dos tipos de mecanismos de transporte de portadores de carga: *difusión* y *deriva*.

- **Difusión:** si se considera una distribución de partículas no uniforme, en el que la densidad de partículas es mayor en un espacio que en otro, se le

denomina *gradiente de concentración*. El movimiento neto de partículas inducidas por este gradiente es llamado *difusión*. Cuando la densidad es uniforme, no existe gradiente, así que no hay movimiento neto de partículas debido a la difusión. La difusión de electrones esta descrita por la *ley de Fick*, Ecuación E.1. Donde J_e es la densidad de corriente de electrones, q es la carga elemental, D_e es el coeficiente de difusión de electrones o huecos, y dn/dx representan la densidad del gradiente en la dirección x . Cabe resaltar que también hay difusión para los huecos, Ecuación E.2 [29].

$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx} \quad (E.1)$$

$$J_h = qD_h \frac{dp}{dx} \quad (E.2)$$

- **Deriva:** Para el caso de la deriva, el movimiento de electrones y huecos se presenta debido a un campo eléctrico. Dependiendo de la dirección y sentido del campo electrico será la dirección de movimiento tanto de los electrones como de los huecos. La densidad de corriente, Ecuación E.3, inducida por un campo eléctrico esta dado por el producto de la densidad de electrones o huecos (n, p), la carga del electrón q , la constante de movilidad μ en [cm^2/Vs] y el campo eléctrico E .

$$J = J_e + J_h = nq\mu_n E + pq\mu_h E \quad (E.3)$$

Al establecerse una corriente de difusión, aparecen cargas fijas en una zona a ambos lados de la unión, zona que recibe el nombre de **región de agotamiento**, en donde aparece un campo eléctrico por acción de las cargas fijas, campo eléctrico necesario para la generación de una densidad de corriente, como lo muestra la Figura E.3.

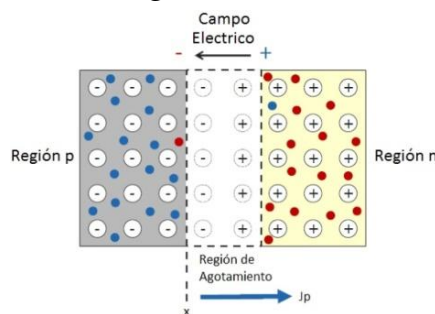


Figura E.3 Diagrama representativo para la densidad de corriente de los huecos en una unión p - n [29].

Anexo F.

Celdas de cristal de silicio (c-Si)

Es el grupo más representativo en tecnología solar, a la fecha las celdas de silicio cristalino tienen un 80-90% del mercado de celdas solares. El material posee ciertas ventajas sobre otros materiales:

- Desde el punto de vista químico el silicio es muy estable.
- EL silicio que comprende el 27% de la superficie de la Tierra, es el segundo elemento más abundante después del oxígeno.
- El silicio no es tóxico.
- Basado en la industria microelectrónica la producción y procesamiento, el silicio ultra puro ha tenido mejores avances en procesos de desarrollo.

Propiedades del Cristal de Silicio.

Para el cristal de silicio una banda de gap de 1.12 eV. Su estructura cristalina es de tipo cubica de cara centrada (diamante), posee un parámetro de red de 5.4307 Å, Alrededor de una longitud de onda de 970 nm, el cristal de Silicio (c-Si) tiene un coeficiente de absorción de $1/100 \text{ cm}^{-1}$ y esto requiere una longitud de absorción de 230 micras para absorber toda la radiación incidente, el cual es un grosor típico de una celda de silicio, además de eso posee una concentración intrínseca a temperatura ambiente de 25°C , $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. [30]

Tipos de cristal de silicio.

Los tipos de cristal de silicio se listan en la Tabla F.1.

Tabla F.1 Tipos de cristal de silicio.

Tipos de cristal de Silicio.			
Silicio monocristalino		Silicio policristalino	
Llamado también cristal continuo, es un sólido cristalino en donde la red cristalina es continua y no posee impurezas hasta los bordes, normalmente es de color uniforme [9].		Abreviado polisilicio, es un material que consiste en muchos cristales pequeños, en orientaciones y tamaños aleatorios [10].	

Manufactura del cristal de silicio.

El silicio existe en grandes cantidades en la naturaleza en forma oxidada, este es el constituyente básico de la arena, en forma de sílica (SiO_2). Para hacer el silicio puro, la arena es refinada mediante un proceso de reducción por carbono en un horno eléctrico de arco. La reacción sigue la Ecuación F.1;



Su pureza es de alrededor de 98-99%, las principales impurezas son de hierro y aluminio. Para producir celdas solares, el silicio puro puede ser tratado mediante dos procedimientos alternativos [4]. Para las celdas solares monocristalinas, se aplica el proceso Czochralski o el proceso *floatzone*, aparte de esto, el silicio puro se puede fundir en un horno para producir lingotes policristalinos [30].

Proceso de Czochralski y *floatzone* para el silicio.

El silicio policristalino granulado se funde en un crisol con un material de dopado, por ejemplo, Boro, para obtener un semiconductor tipo *p*. Durante este proceso, una pequeña porción de silicio monocristalino se coloca en la orientación precisa y se deja crecer, en el proceso la temperatura juega en papel fundamental ya que la concentración de portadores intrínsecos depende de ésta y el cristal de muestra está en contacto con la superficie fundido a una temperatura ligeramente superior

a la temperatura de fusión, cabe resaltar que el mecanismo de la Figura F.1a. Gira en el sentido de las manecillas del reloj a una velocidad dada por el diámetro que se quiere conseguir en los cristales finales.

Una técnica de crecimiento de cristales alternativa es la técnica de zona flotante o *floatzone*. En la Figura F.1b, se muestra una varilla sólida altamente purificada pero el silicio policristalino se funde mediante calentamiento por inducción y un único cristal es sacado de la zona en donde se funde. Las celdas solares de gran eficiencia han sido fabricadas con este procedimiento, pero es demasiado costoso para la producción de celdas solares de uso común [31].

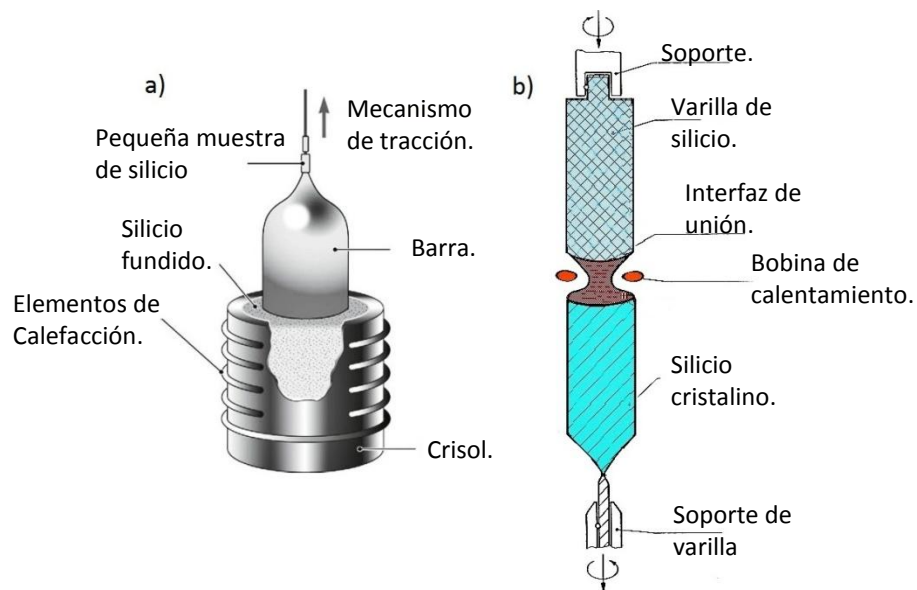


Figura F.1 a) Proceso de Czochralski **b)** Esquema de la técnica de zona flotante *floatzone* [31].

Reglas de diseño de celdas solares con cristal de silicio.

Las celdas de silicio, como se mencionó antes están compuestas de materiales semiconductores que al unirlos forman una unión *p-n*, en la Figura F.2 se muestra una celda solar convencional de cristal de silicio.

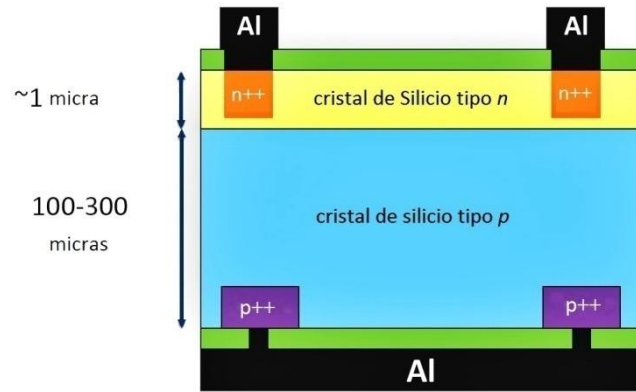


Figura F.2 Esquema representativo de una celda solar de cristal de silicio [6].

La región p de la unión es lo que llamamos *oblea* de silicio, y la región n (amarilla) es mucho más delgada que la región p y es llamada la región de emisión, esta región es del orden de 1 micra, mientras que el resto de la celda está en el rango de 100 a 300 micras, esto debido a los procesos de absorción de la luz asociados a la ley de Fick, Ecuación 2.1, en las capas activas de la celda [31].

Contactos metálicos.

Los contactos metálicos son los conductores por donde los electrones fluyen, una consideración especial es que el área de material debajo de ellos debe ser fuertemente dopada, para que no existan pérdidas en la recombinación de cargas. En la Figura F.3, se muestra la red de contactos típicos de una celda solar, existen 2 líneas de contacto más gruesas que las demás, conocidas como barras colectoras o *busbars*, y los caminos más delgados que van desde las barras colectoras hasta el borde de la celda solar que se denominan *fingers* (dedos) [31].

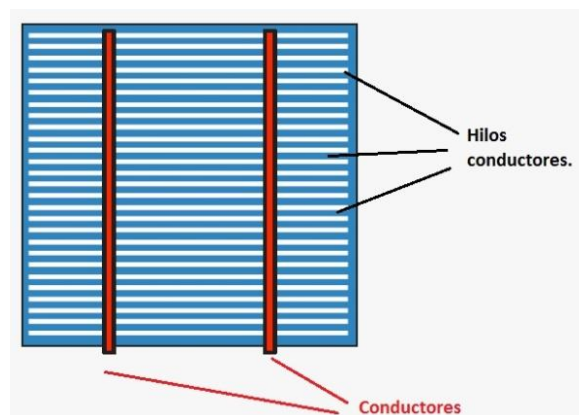


Figura F.3 Representación esquemática de los contactos en una celda solar [31].

Los contactos tienen una resistencia R como se muestra en la Ecuación F.2. Donde, L es la longitud del contacto, W es el ancho, H es la altura, y ρ es la resistividad eléctrica del metal, indicada en el esquema de la Figura F.4.

$$R = \rho \frac{L}{WH} \quad (\text{F.2})$$

Cabe resaltar que la resistencia de los contactos actuará como una resistencia en serie en un circuito eléctrico equivalente. Una resistencia en serie más grande dará lugar a factores de llenado (*fill factor*) más bajos en la celda solar [31].

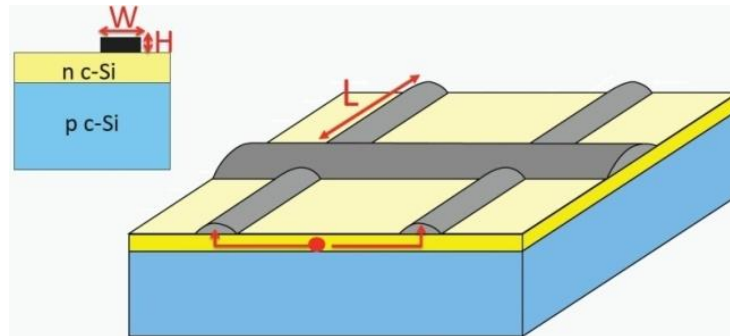


Figura F.4 Representación esquemática de las dimensiones de los contactos en una celda solar [31].

En la parte posterior de la celda solar existe también un contacto que cubre toda la celda, este contacto es de aluminio, y de igual manera el área donde se encuentra debe estar fuertemente dopada, indicado en la Figura F.2 como n^{++} y p^{++} , para prevenir pérdidas por la no recombinación de portadores de carga. Dado que existen pérdidas en este contacto posterior, si la distancia entre la interfaz $p-n$ y el contacto es menor que la longitud típica de difusión de los portadores de carga, estos se pueden perder en las impurezas de la interfaz de contacto debido a la recombinación por efecto Shockley. Para minimizar las pérdidas de electrones, se busca que la interfaz entre el contacto metálico y el semiconductor sea lo más pequeña posible [31].

Las pérdidas surgidas por recombinación pueden reducirse aun más, utilizando un campo de superficie posterior (*back surface field*). Una región p altamente dopada se coloca por encima de los contacto en la superficie, indicados por p^{++} y la región n altamente dopada se indica mediante n^{++} . El funcionamiento del campo de superficie es análogo al de una barrera para la excitación de los portadores minoritarios de carga en la región de dopado menor para que fluyan a la superficie posterior.

Reducción de pérdidas por reflexión.

La superficie de las celdas de silicio posee una textura de pirámides invertidas la cual se obtiene al sumergir las celdas en una solución diluida de Hidróxido de potasio (KOH) o Hidróxido de sodio (NaOH) a 70°C. El proceso de texturizar la superficie activa de la celda es refractar y aumentar la longitud de trayectoria de la luz incidente, además de atraparla y que ésta se vea obligada a reflejarse varias veces. Éste proceso no se puede aplicar en el silicio policristalino puesto que se componen de cristales de irregulares orientaciones, mostradas en la Figura F.5.

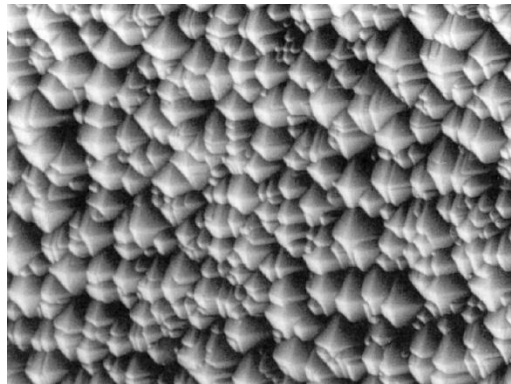


Figura F.5 Pirámides en la superficie del silicio monocristalino mediante microscopio electrónico [32].

Para prevenir que la luz se escape en las múltiples reflexiones ocasionadas por las pirámides, se procede a poner una película encima de la muestra de silicio con índice de refracción menor, se pueden reducir las pérdidas. El valor óptimo para el índice de refracción de esta capa intermedia, para el silicio y una longitud de onda de 500 nm es de 2.1. Esta capa antirreflexiva debe tener un índice de refracción n dado por la Ecuación F.3, donde n_s es el índice de refracción del medio circundante.

$$n = (n_{si}n_s)^{1/2} \quad (F.3)$$

Conceptos de alta eficiencia en celdas solares de cristal de silicio.

Las pérdidas en una celda de c-Si pueden ser minimizadas por diferentes mecanismos: las pérdidas por reflexión, se pueden reducir mediante el uso de recubrimientos antirreflexivos y la textura de la superficie, las pérdidas eléctricas se las puede dividir en óhmicas y recombinación de los portadores de carga. Las pérdidas óhmicas surgen en el material semiconductor, en particular en la capa delgada del emisor. La unión entre los contactos de metal y el semiconductor tanto

en la parte delantera y la parte trasera puede representar una resistencia de contacto. Estas pérdidas se pueden reducir mediante el mayor dopado de las regiones donde están los contactos [32]. Mostrados en el diagrama de la Figura F.86. Además de los siguientes parámetros:

- Contactos metálicos con una distancia mínima entre sí.
- El contacto de la superficie posterior debe tener propiedades de reflexión y reflejar la luz que penetra en la parte posterior de la celda [32].

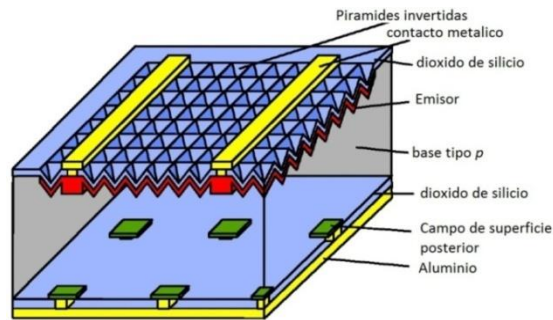


Figura F.6 esquema de la estructura de alta eficiencia de una celda de silicio monocristalino [7].

Anexo G.

Baterías

Las baterías son dispositivos electroquímicos que convierten y almacenan la energía química en energía eléctrica. De acuerdo con el tipo de conversión de energía se pueden clasificar en:

- **Baterías Primarias:** convierten de manera irreversible la energía química en energía eléctrica, en este grupo se incluyen las pilas de zinc-Carbono y baterías alcalinas [32].
- **Baterías Secundarias:** o como se conocen comúnmente, *baterías recargables*, convierten de forma reversible energía química en energía eléctrica. Es decir, se pueden recargar cuando la reacción química se invierte utilizando un potencial nominal de funcionamiento mucho mayor. En este grupo se clasifican baterías de electrodos de plomo, iones de Litio, etc. Otros tipos de baterías secundarias son las baterías de níquel e hidruro metálico y níquel-cadmio. [32].

Las unidades de carga y descarga de las baterías están dadas en: *densidad de energía volumétrica*, que se define como la cantidad de energía almacenada por unidad de volumen de la batería y se mide en vatios/hora por litro (Wh/L) [32].

Características y parámetros de funcionamiento de baterías.

El *Voltaje nominal* de la batería es aquel al cual se supone que la batería funciona denotado por V . [32].

La *capacidad* a largo plazo en el campo de las baterías se refiere a la cantidad de carga que la batería puede suministrar al voltaje nominal. La capacidad es directamente proporcional a la cantidad de electrodo en la batería. La unidad de medida de la capacidad de la batería es Amperio-hora o Amp-h, denotado Ah, esta denotado por C_{batt} [32].

Capacidad energética de una batería: la capacidad energética de una batería es el valor total de energía que esta puede almacenar. La capacidad energética de una batería se calcula mediante la Ecuación G.1.

$$E_{batt} = C_{batt} V \quad (G.1)$$

Es el producto entre la tensión nominal, de la batería en voltios y la capacidad de la batería (C_{batt}) en amperios-hora, lo que da como resultado que la capacidad total de la batería se mide en vatios-hora [32].

Tasa C: para poder definir lo que se conoce como *tasa C*, primero se aborda la carga y descarga de baterías. Esta carga y descarga se basan en una reacción química, en este caso en la batería de electrodos de plomo, la cual está dada por la Ecuación G.2 que depende de la dirección de la corriente desde y hacia la batería, la reacción aplica también para las baterías electroquímicas [32].



La *tasa-C*, es una medida de la tasa de descarga de la batería con relación a su capacidad. La cantidad de la tasa-C no es más que el múltiplo de la corriente, I , a través de una corriente que la batería puede mantener más de una hora, tal como lo muestra la Ecuación G.3 [4].

$$tasa - C = \frac{I}{\frac{C_{batt}}{1h}} \quad (G.3)$$

Eficiencia de almacenamiento: La eficiencia de almacenamiento se define en la Ecuación G.4. Es la relación entre la salida neta de energía (E_{salida}) y la entrada de energía total del sistema de almacenamiento ($E_{entrada}$).

$$\eta = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}} \times 100 \quad (G.4)$$

Eficiencia de Batería: Para definir la eficiencia total de una batería se define en primer lugar dos tipos de eficiencia presentes:

- **Eficiencia de voltaje:** Como lo muestra la Ecuación G.5, es la relación entre el voltaje de descarga media a la tensión media de carga [32].

$$\eta_V = \frac{V_{descarga}}{V_{carga}} \times 100 \quad (G.5)$$

- **Eficiencia de Coulomb:** la cual de acuerdo con la Ecuación A.16 se define como la relación de la carga total de la batería y la carga total en la batería durante un ciclo de carga completo [32].

$$\eta_c = \frac{Q_{descarga}}{Q_{carga}} \times 100 \quad (G.6)$$

La eficiencia total de la batería se define como el producto de estas dos eficiencias, como se muestra en la Ecuación G.7.

$$\eta_{batt} = \eta_v \eta_c \quad (G.7)$$

Estado de carga: o conocido por sus siglas en inglés SOC (*State of Charge*), se define de acuerdo a la Ecuación G.8, como el porcentaje de capacidad de la batería disponible para la descarga [32].

$$SOC = \frac{E_{disponible}}{C_{batt} V} \times 100 \quad (G.8)$$

Intensidad de descarga: o por sus siglas en inglés DOD (*Depth of Discharge*), se define en la Ecuación G.9, como el porcentaje de capacidad de la batería para ser descargado.

$$DOD = \frac{E_{descargada}}{C_{batt} V} \times 100 \quad (G.9)$$

Ciclo de vida de la batería: El ciclo de vida de la batería se define como el número de ciclos de carga y descarga, después de lo cual la capacidad de la batería cae por debajo de 80% del valor nominal. Por lo general el ciclo de vida se representa como un número absoluto. El ciclo de vida depende de la temperatura y de la intensidad de descarga, tal como lo muestra la Figura G.1 [32].

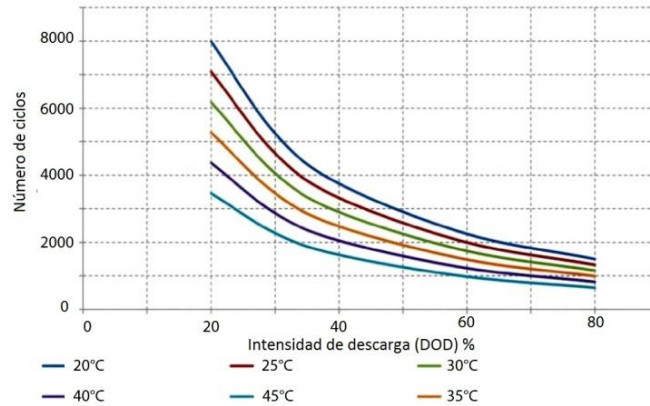


Figura G.1. Ciclo de Vida vs intensidad de descarga en una batería.

3.2.3.2 Batería de electrodos de plomo.

Las baterías de plomo pueden tener diferentes tipos de montaje, cuando se construyen como un conjunto en bloque, representado en la Figura G.2a. Las celdas individuales comparten el compartimiento y están interconectados internamente [2]. El electrolito en esta batería está fabricado con ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4). Dos placas de polaridad opuesta se insertan en la solución de electrolito que actúan como electrodos. Los electrodos contienen un material poroso en forma de rejilla que actúa como una esponja, proporcionando una superficie suficiente para ayudar a la reacción electroquímica [32].

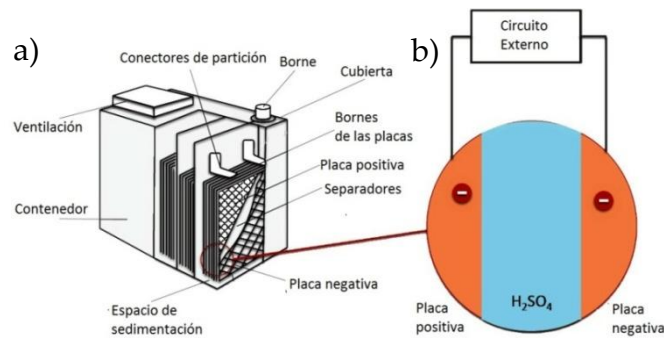


Figura G.2 a) Esquema de montaje de batería de electrodos de plomo; **b)** Circuito esquemático de funcionamiento [5].

La masa activa en el electrodo negativo es de plomo y en electrodo positivo es de óxido de plomo. Cuando se produce una corriente eléctrica, como lo muestra la Figura G.2b. Los electrones fluyen desde el electrodo negativo al electrodo positivo

a través del circuito externo, debido a una reacción química entre las placas y el electrolito. Esta reacción también agota el electrolito, lo que afecta su estado de carga. Cuando la batería se recarga, el flujo de electrones se invierte, ya que el circuito externo no requiere corriente de carga, y actúa una fuente que tiene un voltaje superior al de la batería para permitir la reacción inversa. En los sistemas fotovoltaicos, esta fuente no es más que el módulo fotovoltaico o la matriz de suministro de turbinas eólicas.

Anexo H.

Sistemas solares térmicos.

La energía solar térmica es un campo completamente diferente del estudio de la energía fotovoltaica, pero de igual manera usa la energía proveniente del Sol para transformarla en energía térmica que se puede utilizar con ayuda de conceptos termodinámicos en aplicaciones variadas.

Calor

El Calor es causado por la suma total de energía potencial y cinética de las moléculas en la materia. Existen dos formas de calor: *calor latente* y *calor sensible* [9].

Calor sensible: a presión constante, es el calor que da lugar a cambios en la temperatura y se puede definir como el producto del calor específico C_p , la masa m y la diferencia de temperaturas, mostrado en la Ecuación H.1.

$$Q = mC_p(T_2 - T_1) \quad (\text{H.1})$$

Calor latente: Calor que sin cambio en la temperatura es capaz de hacer que el material cambie en su fase. En otras palabras, es la energía necesaria para pasar de sólido a líquido o de líquido a gas. De acuerdo con la Ecuación H.2, se puede calcular multiplicando la masa de la sustancia por la constante de calor latente.

$$Q = m\lambda \quad (\text{H.2})$$

Mecanismos de transporte de calor.

La *conducción* es la transferencia de calor en un medio debido a un gradiente de temperatura. Se describe en la Ecuación H.3, conocida como Ley de Fourier, en donde: Q es el flujo de calor en vatios, k es la conductividad térmica del material en vatios por grado kelvin por metro, A es el área de contacto en metros cuadrados y dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección x . Se mide en grados kelvin por metro.

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{H.3})$$

La *convección* puede ser forzada, cuando el movimiento del fluido es causado por variables externas, o natural por las diferencias de densidad causadas en el fluido debido a los gradientes de temperatura. En ambos casos, la transferencia de calor puede ser descrita como en la Ecuación H.4, donde h es el coeficiente de transferencia de calor en vatios por metro cuadrado por kelvin.

$$Q_{conv} = -hA\Delta T \quad (\text{H.4})$$

El mecanismo de *radiación* es el más importante mecanismo de transferencia de calor para instalaciones solares. La radiación térmica es emitida por los cuerpos en función de su temperatura. De acuerdo al Capítulo 1, una definición importante es la de *cuerpo negro*, donde la ley de Planck describe la radiación electromagnética a una cierta temperatura en cualquier medio como una función de longitud de onda. Mediante la integración de la Ley de Planck sobre todas las longitudes de onda en la que se emite la radiación, se consigue la Ecuación H.5, conocida como ley de Stefan-Boltzmann, que da la energía total emitida por unidad de área, donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura del cuerpo en grados kelvin.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (\text{H.5})$$

Pero la mayoría de los cuerpos no son cuerpos negros perfectos; por tanto no absorben toda la radiación que incide sobre ellos. La energía emitida y absorbida todavía puede ser descrita por la ley de Planck, pero se introduce un coeficiente de emisión (ϵ), como en la Ecuación H.6, que representa la cantidad de luz que es absorbida y emitida en el material.

$$Q = \epsilon A \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{H.6})$$

Sistemas de calentamiento de agua.

Un sistema solar térmico es una combinación de colectores solares, un sistema de transferencia de energía y un tanque de almacenamiento, como se muestra en la Figura H.1. La parte principal de un sistema térmico solar es el arreglo de colectores, que absorbe la radiación solar y la convierte en calor. Este calor es absorbido por un fluido de transferencia que pasa a través del colector. Este calor puede ser almacenado o utilizado directamente.

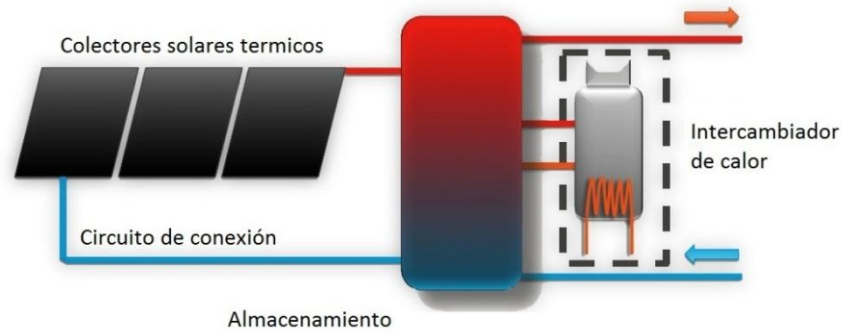


Figura H.1 Esquema representativo de componentes de un sistema solar térmico.

Colector Solar.

En el colector el fluido de trabajo se calienta por la radiación solar. Por lo general, consiste en una superficie negra, llamado *absorbente*, y una cubierta transparente, como lo muestra la Figura H.2.

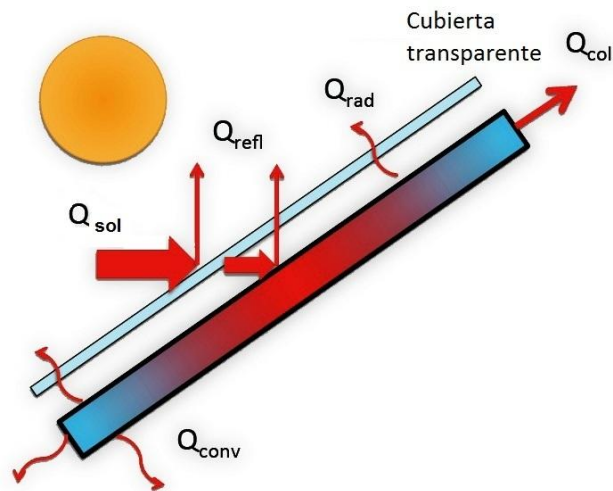


Figura H.2 Esquema de balance de energía de un colector solar térmico.

La capa absorbente es capaz de absorber la mayor parte de la energía incidente del Sol (a través de la cubierta transparente), representada como Q_{sol} , elevando su temperatura y la transferencia de calor al fluido de trabajo. La energía de salida se mueve con el fluido de trabajo que está representado por Q_{col} . Pero no toda la luz incidente se convierte en calor una parte de ella, Q_{refl} , regresa al medio en forma de reflexión, ya sea en la encapsulación o en el absorbente en sí mismo. Otras pérdidas están relacionadas con el intercambio de calor con el aire circundante por

el mecanismo de convección, representado por Q_{conv} . Todas estas cantidades están relacionadas en la Ecuación H.7, un balance de energía.

$$Q_{col} = Q_{sol} - Q_{refl} - Q_{rad} - Q_{conv} \quad (H.7)$$

De acuerdo a la Figura H.3 *la eficiencia* del colector depende principalmente de dos factores: el total neto en que la luz se convierte en calor por el absorbedor (ópticas) y las pérdidas de calor al medio (térmicas).

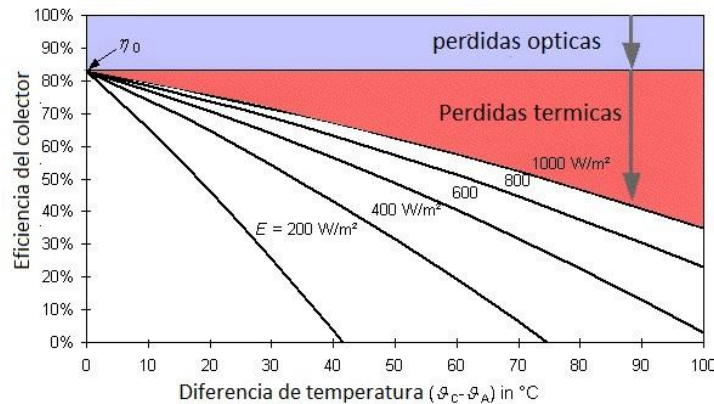


Figura H.3 Eficiencia de colector solar térmico.

Los colectores solares pueden clasificarse en tres categorías por su tipo de cubierta: Descubiertos, cubiertos y de vacío [12].

- **Colectores descubiertos:** Como se ve en la Figura H.5, no tienen una cubierta transparente, el Sol golpea directamente en la superficie absorbente, evitando una buena fracción de pérdidas por reflexión. Se utiliza solo para pequeñas diferencias en la temperatura con respecto a temperatura ambiente.

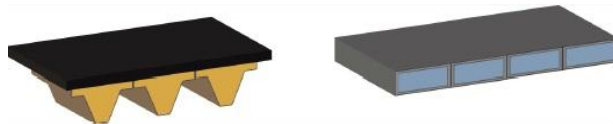


Figura H.4 Tipo de colector solar térmico descubierto

- **Colectores cubiertos:** Estos colectores están cubiertos por un material transparente, proporcionando aislamiento adicional, como se muestra

en la Figura H.5, además de aumentar las pérdidas por reflexión. Estos colectores se utilizan para temperaturas de 100°C.

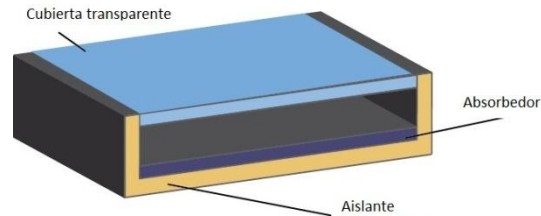


Figura H.5 Tipo de colector solar térmico cubierto

- **Colectores de vacío:** En este caso el absorbedor está encapsulado en un espacio vacío, como se muestra en la Figura H.6. Este colector se puede utilizar para aplicaciones de temperatura alta ya que las pérdidas por convección a los alrededores son inferiores que en los otros tipos.



Figura H.6 Tipo de colector solar térmico de vacío.

Otra forma de clasificar los colectores: por su forma. En este caso, podemos considerar colectores de placa plana y concentradores.

- **Colectores de placa plana:** como indica su nombre y la Figura H.7, consisten en absorbedores planos. Pueden proporcionar temperaturas moderadas, en torno a los 100°C. Usan tanto la radiación solar directa y difusa, por lo que no requieren sistema de rastreo de intensidad solar.



Figura H.7 Colector de placa plana.

- **Concentradores:** estos colectores son para aplicaciones que requieren temperaturas mayores que las posibles con los colectores planos. Las temperaturas se pueden aumentar al disminuir el área de pérdida de calor. Esto se hace mediante la interposición de un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie de absorción de energía, como se muestra en la Figura H.8.

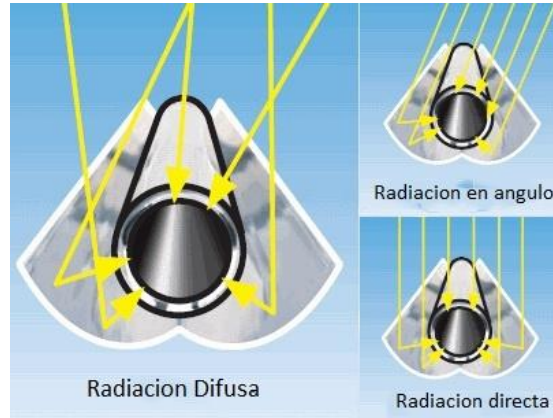


Figura H.8 Colector tipo concentrador y dispositivo óptico.

Conexiones entre colectores.

Los colectores se pueden interconectar entre sí, como lo muestra la Figura H.9, en serie o en paralelo. La conexión en paralelo es más frecuente ya que minimiza la caída de presión. En cualquier caso, la elección de la conexión ya sea en serie o en paralelo depende de la temperatura requerida del sistema. La conexión en paralelo

significa que todos los colectores tienen como entrada la misma temperatura, mientras si se utiliza la conexión en serie de la temperatura de salida de un colector es la entrada de la siguiente.

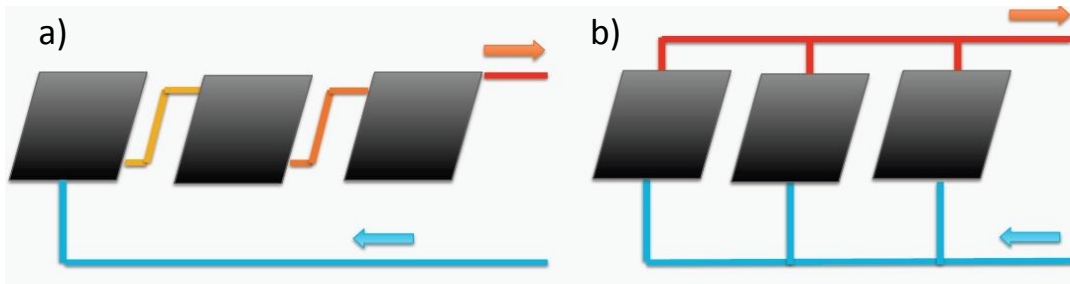


Figura H.9 a) Interconexión de colectores solares en serie; **b)** interconexión en paralelo.

Almacenamiento de energía térmica.

El almacenamiento de energía térmica tiene una influencia enorme en el costo global del sistema, su rendimiento y fiabilidad. En el caso del agua la energía utilizable se puede calcular como lo muestra la Ecuación H.8, donde V es el volumen en el tanque, ρ es la densidad de agua en el tanque, C_p , es el calor específico de fluido y el rango de temperatura de operación.

$$Q_s = V\rho C_p \Delta T \quad (\text{H.8})$$

La pérdida de calor en el tanque, Q_{loss} , se puede determinar por la Ecuación H.9, donde A es el área exterior del tanque y U es el coeficiente global de intercambio de calor. El valor de U da la calidad del aislamiento, y por lo general varía entre 2 y 10 W/K.

$$Q_{loss} = UA\Delta T \quad (\text{H.9})$$

Fluido de trabajo y circuito de interconexión.

El medio transportado no se debe congelar o ebullicar a las temperaturas de trabajo, debe tener un gran valor de calor específico, baja viscosidad, no debe ser tóxico, debe ser barato y abundante. Los fluidos de trabajo más comunes son agua, aceites, o aire. Hay que tener en cuenta que si las tuberías son muy largas, las pérdidas pueden ser considerables. Así, la longitud de la tubería debe ser minimizada.

Tipos de sistemas de calentamiento de agua.

Los sistemas solares térmicos se clasifican de acuerdo a como se calienta el fluido en el colector y si tienen o no, bomba de circulación.

Clasificación de sistemas de acuerdo a su forma de calentar el fluido.

Cuando el fluido utilizado en el sistema es el mismo que se calienta en el colector se denomina un *circuito directo o abierto*, como lo muestra la Figura H.10.

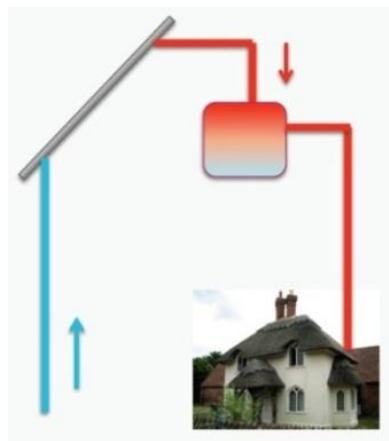


Figura H.10 Esquema representativo de un circuito directo [11].

En cambio, cuando el fluido calentado en el colector pasa a un intercambiador de calor para calentar el fluido, se denomina un *circuito cerrado o indirecto*, como se muestra en la Figura H.11

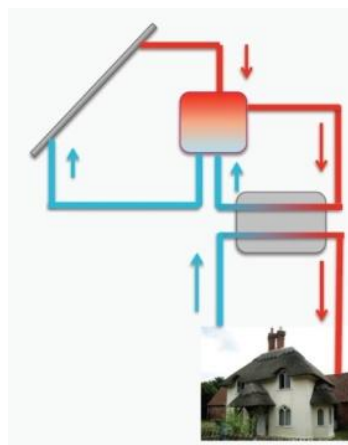


Figura H.11 Esquema representativo de un circuito indirecto.

Clasificación de sistemas de acuerdo a su forma de transportar el fluido.

Cuando el fluido es circulado por bombas desde el colector hasta el tanque de almacenamiento, como lo muestra la Figura H.12. Se denomina *sistema activo* y por lo general son más costosos, voluminosos y menos eficientes que los sistemas que no requieren bomba. Sin embargo, se tiene la ventaja de controlar el flujo de suministro.

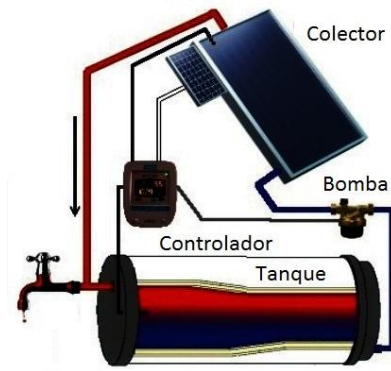


Figura H.12.Esquema representativo de un sistema activo.

En contra parte los *sistemas pasivos*, que no utilizan bomba, pero si utilizan la convección natural para transportar el fluido desde el colector hasta el almacenamiento, como en el esquema mostrado en la Figura H.13. Esto sucede debido a que la densidad del fluido disminuye cuando aumenta la temperatura, por lo que el liquido resulta más fácil subirlo desde el fondo hasta la parte superior del colector.

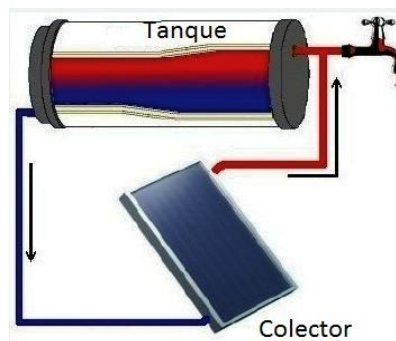


Figura H.13 Esquema representativo de un sistema pasivo aplicado a un sistema solar térmico.

Sistemas solares de potencia térmica.

El calentamiento de un fluido a alta temperatura puede ser utilizado en turbinas de vapor para producir energía eléctrica, esto es lo que sucede en las llamadas plantas de potencia térmica, como la mostrada en la Figura H.14. Estos sistemas consisten básicamente en un arreglo de colectores donde se absorbe la energía solar, un sistema de almacenamiento, de agua, una caldera que actúa como un intercambiador de calor entre los fluidos del colector y el motor, y el motor en sí, que convierte la energía térmica en energía mecánica. Por lo general, los recolectores incluyen sistemas de concentración, para poder llegar a altas temperaturas.

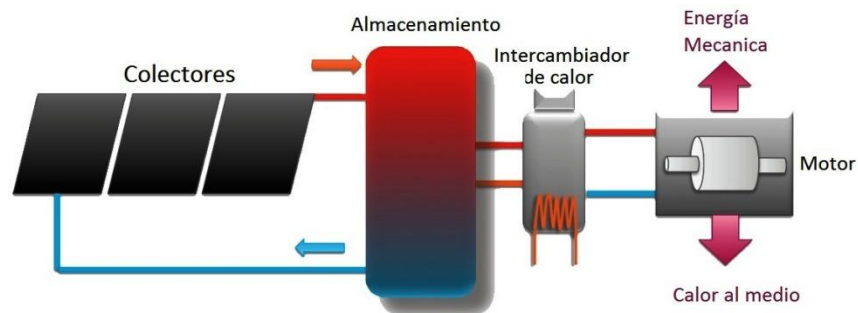


Figura H.14 Esquema que representa un Sistema térmico de potencia.

Bibliografía.

El desarrollo de la temática del Trabajo de Grado, se realizó en base al curso de Energía Solar de la Universidad Tecnológica de Delft, en Holanda, y se amplió con el uso de:

- [1] Serway A. Raymond. *Physics for scientists and Engineers*. McGraw Hill. 2003
- [2] Alonso M, Finn E. *Física tomo I*. Fondo Educativo Interamericano. 1978.
- [3] Chang R. *Química*. McGraw Hill. 2003
- [4] L. Frieris, D. Infield, *Renewable Energy In power Systems*, Wiley 2008
- [5] Kalogirou, Soteris. *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier. 2009.
- [6] Kalogirou, S.,. *Solar thermal collectors and applications*. Prog. Energ. 2004
- [7] Delyannis, A.,. *Solar stills provide island inhabitants with wáter*. 1967.
- [8] Kreider, J.F., Kreith, F.,. *Solar Heating and Cooling*. McGraw-Hill. 1977
- [9] Gizmologia, IBM desarrolla un panel que capta la energía de 2.000 soles,
<http://gizmologia.com/2013/04/panel-solar-de-ibm> [citado el 12/12/2013]
- [10] LeBlanc, G., Chen, G., Gizzie, E. A., Jennings, G. K. and Cliffl, D. E., *Enhanced Photocurrents of Photosystem I Films on p-Doped Silicon*. Adv. Mater. 2012
- [11] Mundo Solar; *Energía solar súper eficiente gracias a nanotubos*,
<http://www.dforcesolar.com/energia-solar/energia-solar-supereficiente-gracias-a-nanotubos/> [citado el 14/12/2013]
- [12] Actualidad RT; *Luces y sombras de la planta solar de Google*,
<http://actualidad.rt.com/actualidad/view/120038-planta-solar-google-dano-ecologico> [Citado el 17/02/2013]
- [13] Alonso M, Finn E. *Física tomo III*. Fondo Educativo Interamericano. 1978.

-
- [14] Blogs de Ciencia y Tecnología de Fundación Telefónica, *Efecto fotoeléctrico*, <http://blogs.creamoselfuturo.com/nano-tecnologia/2009/02/02/aplicaciones-de-las-teorias-cuanticas-a-la-nanoteconologia/> [citado el 20/12/2013]
- [15] Eisberg R., Resnick R. *Quantum Physics of Atoms-Molecules-Solids-Nuclei-Particles*. Limusa Wiley 1985
- [16] Fujimoto M. *Physics of Classical Electromagnetism*. Springer. 2007
- [17] Hecht E. *Optics*. Addison Wesley. 2002.
- [18] Sears F, Zemansky M, *Física*, Aguilar. 1966.
- [19] Wolson R., Pasachoff J., *Física para ciencias e Ingeniería*. Harla.1998.
- [20] Chen, C. Julian. *Physics of Solar Energy*. John Wiley & Sons, inc. 2011
- [21] M. Stix. *The Sun, an Introduction*. Springer, New York, 2002.
- [22] J. P. Peixoto and A. H. Oort. *Physics of Climate*. John Wiley & Sons, 1992.
- [23] Sánchez Maza Miguel, *Energía solar térmica*, Limusa. 2008
- [24] European Photovoltaic Industry Association, *Solar Photovoltaic Technology*, <http://www.epia.org/about-us/about-photovoltaics/solar-photovoltaic-technology/> [citado el 25/01/2014]
- [25] NISIEN; Clean Tech Solutions. <http://www.nisien.nl/Solar.html> [Citado el 25/01/2014]
- [26] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf [Citado el 31/01/2014]
- [27] Gobernación del Cauca, *Plan de desarrollo departamental 2012-2015, Cauca todas las oportunidades*, 2012.
- [28] Kittel C. *Introduction to solid state physics*. Willey. 1953
- [29] Millman J, Grabel A; *Microelectrónica*; Editorial Hispano-Europea. 1991.
- [30] A. Goetzberger V.U. Hoffmann. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer. 2005.

- [31] Labouret , Viloz M. *Solar Photovoltaic Energy*. The Institution of Engineering and Technology of United Kingdom. 2009
- [32] Krauter S, *Solar Electric Power generation-photovoltaic Energy Systems*. Springer. 2006
- [33] Unidad 3- Materiales y procesos de fabricación de células fotovoltaicas, http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/tecnologia-de-celulas-y-modulos-fotovoltaicos/Materiales/unidad-3/skinless_view [citado el 13/03/2014].
- [34] Los paneles solares fotovoltaicos, <http://www.sitiosolar.com/los-paneles-solares-fotovoltaicos/> [citado el 14/03/2014].
- [35] Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R&D, <http://www.nrel.gov/pv/thinfilm.html> [citado el 16/02/2014].
- [36] Silicon Thin-Film Solar Cells Gaining Ground, http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/EN/2002/index74f3_htm.html [citado el 16/03/2014].
- [37] Zekai, Sen, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy*. Springer. 2008.
- [38] Mukund R. Pate, *Wind and Solar Power Systems – Design, analysis and Operation*. Springer. 2006.
- [39] Sorensen, Harry, *Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons, inc. 1983
- [40] G. Lorenzini, C. Biserni & G. Flacco, *Solar Thermal and Biomass Energy*. WIT press. 2009.
- [41] Instituto Colombiano de Normas técnicas y certificación. *Eficiencia energética. Evaluacion de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos (NTC4405)*. 1998