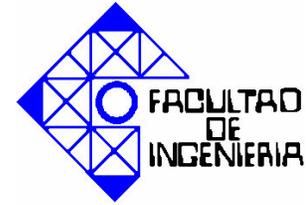




Universidad de Carabobo  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Departamento de Potencia



**Diseño de un módulo solar para ser fabricado en Venezuela que sea producto de un análisis comparativo de las distintas tecnologías de celdas solares existentes.**

Autores:

Oswaldo A. Arráez C. C.I 19.991.669

Antonio R. Santos A. C.I 19.411.597

Tutor:

Ing. Eva Monagas

Valencia, Mayo de 2013

## **Dedicatoria**

A mis padres, Oswaldo Arráez y Ninfa Cancelliere, este éxito es para ustedes, gracias a su apoyo incondicional, enseñanzas en valores, sus consejos y muchas otras cosas soy quien soy hoy en día, son mi modelo a seguir y me considero y siempre me consideraré afortunado de tener unos padres tan maravillosos como ustedes, espero siempre poder hacerlos sentir orgullosos.

A Dios, por llenarme de bendiciones y guiarme en las decisiones que he tomado.

A mis hermanos, Daniel y Cinthya, ya que soy reflejo en cierta parte de cada uno de ellos, espero que nunca dejemos de ser tan unidos y continuemos apoyándonos siempre de la manera en que lo hacemos.

A mis nonos y a mi tato, ya que desde el cielo sé que cuidan de mí, siempre los recordaré con mucho cariño.

A mi familia, mi tata y mis tíos, me alegra el saber que soy miembro de una familia tan unida y que me han brindado su apoyo a lo largo de mi vida.

A Diana Hernández, si no fuera por ella no hubiese ido al seminario donde nació la idea que definió el tema de este proyecto de grado, por su apoyo y deseos de que día a día crezca como persona, este éxito es ejemplo de como con determinación, disciplina y deseo se puede cumplir cualquier meta propuesta.

A mis amigos, ya que para mí son como hermanos, y como hermandad que somos, los éxitos son compartidos, así que este éxito se los dedico.

A mi compañero de tesis Antonio, sé que no fue sencillo soportarme, por apoyar cada loca idea tomada y siempre apoyarme en un proyecto que no fue fácil.

A mis profesores, por sus valiosas enseñanzas y experiencias compartidas, dentro y fuera del salón de clases, siempre tendrán un lugar en mis recuerdos y espero poder hacer buen uso de todos los conocimientos otorgados.

**Oswaldo Antonio Arráez Cancelliere.**

## **Dedicatoria**

A mi Madre, Solveyg, quien me fue la persona que más me apoyo en toda mi vida, me educó para ser una persona constante y de buenos valores, gracias a ella soy lo que soy hoy en día, siempre la tendré presente en mis pensamientos y es mi inspiración para seguir adelante.

A mis Hermanas, Desire y Ariana, gracias a ellas estar a mi lado en los momentos más difíciles, todos los momentos felices y tristes y darme el apoyo para cumplir mis metas.

A mi abuela, Sila, mi segunda madre y que siempre está ahí para ayudar.

A mis Tías y Tíos, que son mi familia son esos padres y madres que siempre están ahí para mí y mis hermanas, apoyándonos.

A mis Primos, Daniela, Victoria, Nida, Yuni, Franny, Daniel y Franklin, que siempre están para pasar un rato alegre en familia.

A mis amigos, Carola, Jeka, David, Rafael, Paola, Luisana, Angela, mis acompañantes en momentos de ocio y prácticamente mis hermanos.

A mis compañeros y futuros colegas, Majo, Ivonne, Emilio H., Emilio B., Miguelantonio, Roberto, Joe, Ricardo, Daniel, María Veronika, que fueron mis compañeros de estudios y me acompañaron durante la carrera.

A la Familia Vergara Rodriguez, que fue como mi segundo hogar por mucho tiempo y me hicieron sentir como parte de su familia.

Y a mi compañero de tesis Oswaldo, que juntos pudimos sacar adelante este proyecto.

Antonio Rafael Santos Aguilera

## **Agradecimientos**

A nuestros padres por todo su apoyo durante toda nuestra carrera universitaria.

A nuestra tutora Eva Monagas, por todo la ayuda brindada durante el desarrollo de este Proyecto.

Al Prof. Carlos Jiménez, por colaborar con nosotros en el proyecto, por estar pendiente sobre el progreso del proyecto y ponernos en contacto con personas fueron fuentes valiosas de información.

Al Lcdo. Leonardo Barrios y la Lcda. Maylidmar Hurtado de FUNDELEC, por brindarnos asesoría y documentos de utilidad para la elaboración de este proyecto.

Al Ing. Juan Vásquez del Departamento de Energías Renovables del Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, egresado de la Universidad y que también realizó su proyecto de grado en el área de energías renovables, por no dudar en prestarnos su ayuda.

Al Ing. Adrian Suarez Gerente de Desarrollo y Proyectos de Soluciones Energéticas Alternativas C.A, por mostrar interés en nuestro proyecto y brindarnos su tiempo para entrevistarlo y aclarar dudas sobre el mercado fotovoltaico en Venezuela.

Al Ing. Michel Cancelliere, por poner a nuestra disposición muchos artículos de revistas en el área fotovoltaica, gracias por enviarnos información que fue de utilidad para esta investigación.

A la Arq. Daniela Coronel, por su valiosa colaboración y asesoría técnica brindada al momento de elaborar los planos en este proyecto.

Y todas aquellas personas que participaron directa e indirectamente en la elaboración de este proyecto.



# Índice General

## Introducción

### Capítulo I: El Problema

1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Objetivos	7
1.2.1 Objetivo General	7
1.2.2. Objetivos Específicos	7
1.3. Justificación	7
1.4. Delimitaciones.	9

### Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes	11
2.2 Bases Teóricas	13
2.2.1 Energía Solar.	13
2.2.2. Bases Teóricas y Físicas de las Celdas Solares.	14
2.2.2.1. Fundamentos Físicos de las celdas solares	15
2.2.2.2. Circuito equivalente de las Celdas Solares	19
2.2.2.3 Ecuaciones de las Celdas Solares	20
2.2.2.4. Medición de Corriente Vs Voltaje	21
2.2.3. Infografía del desarrollo fotovoltaico.	23
2.2.4. Aplicaciones de la Energía Solar	26
2.2.5 Tipos de Celdas Fotovoltaicas.	27
2.2.5.1. Celdas solares de silicio cristalino.	27
2.2.5.2. Celdas de película delgada.	30
2.2.5.3. Celdas solares orgánicas.	34



---

2.2.5.4. Celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC).	36
2.2.6. Ensayos y pruebas de eficiencia en celdas solares	37
2.2.6.1 Condiciones Estándar de Información (Standard Reporting Conditions)	37
2.2.7 Elementos de un Sistema Fotovoltaico.	38
2.2.8 Inversión Inicial de la Tecnología Solar Fotovoltaica	39
2.3. Glosario de términos básicos.	39
<b>Capítulo III: Marco Metodológico</b>	
3.1 Modalidad de la Investigación	43
3.2 Procedimiento Metodológico	44
3.3 Unidad de estudio y análisis	48
3.4 Técnicas de recolección, análisis, interpretación y presentación de la información.	48
3.4.1 Instrumentos de recolección de datos	48
3.4.2 Técnicas de Análisis de datos	49
<b>Capítulo IV: Análisis y Discusión de los Resultados</b>	
4.1 Identificación de los tipos de celdas solares fabricadas a nivel mundial.	50
4.1.1 Descripción de los avances en materia de celdas solares.	50
4.1.2 Identificación de los tipos de tecnologías usadas en Venezuela y en qué medida.	66
4.1.3 Análisis preliminar de las distintas tecnologías en celdas solares.	69
4.2 Análisis de diferentes procesos de fabricación de una celda solar para su futura fabricación en Venezuela.	80
4.2.1 Identificación de las diferentes etapas en el proceso de fabricación de cada tipo de celda.	80
4.2.1.1 Celdas Solares de Silicio Monocristalino	80
4.2.1.2 Celdas Solares de Silicio Policristalino	84



---

4.2.1.3 Celdas Solares de Silicio Amorfo	86
4.2.1.4 Celdas Solares de Teluro de Cadmio	90
4.2.1.5 Celdas Solares de Cobre Indio Galio Selenio (CIGS)	93
4.2.2 Disponibilidad de recursos para la fabricación de la celda solar en Venezuela.	96
4.2.3 Estimación de costos de la fabricación de cada tipo de celda solar.	97
4.3 Diseño propuesto y procedimiento para la elaboración de un módulo de celda solar en Venezuela.	101
4.3.1 Análisis comparativo para seleccionar el tipo de celda que compondrá el módulo a diseñar.	101
4.3.2 Diseño del Módulo	113
<b>Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones</b>	
Conclusiones	127
Recomendaciones	131
<b>Bibliografía</b>	133
<b>ANEXOS</b>	140
I. Instrumento para la realización del análisis comparativo.	
II. Entrevista Ing. Adrian Suarez. Gerente de Desarrollo & Proyectos de la Empresa Soluciones Energéticas Alternativas C.A.	
III. Lista de proveedores de materiales.	
IV. Plano de la celda solar usada en el diseño del módulo	
V. Plano del módulo diseñado.	
VI. Ficha técnica de la celda Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3.	
VII. Ficha técnica del módulo comercial.	
VIII. Ensayos para el funcionamiento de Módulos Fotovoltaicos conectados en paralelo a la red eléctrica.	
IX. Ensayos de calificación de módulos fotovoltaicos.	



## Índice de Figuras.

1.1	Radiación solar anual en kWh/m <sup>2</sup> .	3
1.2	Precio promedio global de módulos PV, 1984-2010	5
2.1	Representación esquemática del diagrama de bandas de un semiconductor	16
2.2	Representación esquemática del movimiento de electrones y huecos libres bajo la acción aplicada.	17
2.3	Circuito Equivalente de una celda solar.	20
2.4	Esquema Típico del Sistema para medir la característica I-V.	22
2.5	Característica I-V Típica de un PV comercial de 50W, con luz y en oscuridad.	23
2.6	Evolución histórica de las celdas solares y las eficiencias alcanzadas.	25
2.7	Evolución histórica del mercado de celdas solares.	26
2.8	Proceso de fabricación de las celdas de silicio cristalino.	28
2.9	Proceso de fabricación de las celdas de silicio monocristalino. Método de Czochralski.	29
2.10	Proceso de fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos de silicio.	30
2.11	Proceso de fabricación de las celdas de película delgada.	32
2.12	Representación esquemática de las técnicas de fabricación por deposición en capa fina de las celdas solares de CdTe.	33
2.13	Elementos de un Sistema Fotovoltaico.	39
3.1	Esquema resumen de las fases metodológicas de ésta investigación.	47
4.1	Clasificación de las celdas solares.	51
4.2	Divergencia en curva en S de las diferentes tecnologías en celdas solares.	51
4.3	Producción del silicio de alta pureza a partir de Cuarzita.	53
4.4	Resumen de las celdas solares de Silicio Monocristalino.	54



---

4.5 Producción del silicio policristalino	55
4.6 Resumen de las celdas solares de Silicio Policristalino.	56
4.7 Estructura de una celda de Silicio Amorfo a) simple. Fuente: A. b) multiunion.	57
4.8 Resumen de las celdas solares de Silicio Amorfo.	58
4.9 Vista de corte transversal de una celda de CdTe.	59
4.10 Resumen de las celdas solares de Teluro de Cadmio (CdTe).	61
4.11 Vista de corte trasversal de una celda de CIGS.	62
4.12 Resumen de las celdas solares de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS).	64
4.13 Número de módulos instalados 2005-2012.	67
4.14 Potencia instalada, proyecto sembrando luz 2005-2012.	68
4.15 Recursos Minerales de Venezuela.	72
4.16 Record de eficiencia alcanzado por las distintas tecnologías de celdas solares.	73
4.17 Porcentaje de mercado por tecnologías en celdas solares fotovoltaicas.	74
4.18 Envíos anuales a nivel mundial de cada tipo de módulo fotovoltaico.	75
4.19 Variación de la característica I-V de una celda solar debido a cambios en la temperatura.	78
4.20 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Silicio Monocristalino.	82
4.21 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Silicio Policristalino.	85
4.22 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Silicio Amorfo.	88
4.23 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Teluro de Cadmio.	91
4.24 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Cobre-Indio-Galio-Selenio..	94
4.25 Costos de Fabricación vs Eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas solares.	97
4.26 Costo de fabricación de módulos VS producción en MW.	98
4.27 Costo de fabricación de módulos de capa delgada.	100



4.28 Circuito Equivalente de una celda solar.	115
4.29 Curvas características aplicando modelo ideal (a) Curva IV (b) Curva P vs V.	116
4.30 Curvas características del modelo con $R_s$ (a) Curva IV (b) Curva P vs V.	118
4.31 (a) Curva IV (b) Curva P vs V.	119
4.32 Curvas características del módulo diseñado. (a) Curva IV (b) Curva P vs V.	122
4.33 Composición típica de un módulo de silicio.	124



## Índice de Tablas.

1.1 Evolución de precios de la energía solar vs costo de la energía en la red en Vzla.	4
1.2 Porcentaje del mercado global de las distintas tecnologías de celdas solares para el año 2010.	5
2.1 Condiciones estándar para reportar eficiencias en celdas solares y módulos solares (SRC).	38
4.1 Resumen de diferentes tecnologías en celdas solares. Parte 1	64
4.2 Resumen de diferentes tecnologías en celdas solares. Parte 2	66
4.3 Costo de generación en US-\$/Wp de las distintas tecnologías en celdas solares fotovoltaicas.	73
4.4 Diversidad de aplicaciones de las celdas solares.	77
4.5 Comparación de diversidad de aplicaciones por tipo de celda.	77
4.6 Variación de eficiencia nominal debido a efectos de temperatura.	79
4.7 Etapas de fabricación de las celdas de Silicio Monocristalino.	83
4.8 Etapas de fabricación de las celdas de Silicio Policristalino	85
4.9 Etapas de fabricación de las celdas de silicio amorfo	88
4.10 Etapas de fabricación de las celdas de Teluro de Cadmio.	92
4.11 Etapas de fabricación de las celdas de CIGS.	95
4.12 Costo del modulo de las distintas tecnologías de celdas solares, Año 2010.	99
4.13 Costo de fabricación de las celdas de silicio cristalino.	101
4.14 Comparación de costos de fabricación	104
4.15 Comparación de Valores de eficiencia comercial	105
4.16 Comparación de efectos de temperatura	107
4.17 Diversidad de aplicaciones	107
4.18 Comparación de diversidad de aplicaciones por tipo de celda.	108
4.19 Madurez de la tecnología de Celdas Solares	109



4.20 Comparación de las reservas de los materiales que componen las distintas celdas solares.	111
4.21 Instrumento para la realización del análisis comparativo	112
4.22 Parámetros Eléctricos de la celda de silicio policristalino, Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3 4.04	114
4.23 Coeficientes de temperatura de la celda de silicio policristalino, Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3 4.04.	114
4.24 Parámetros Eléctricos de la celda Solar policristalina, Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3 4.04	120
4.25 Lista de Componentes	125



## Introducción

El objetivo fundamental del presente proyecto es presentar un diseño de un módulo solar para ser fabricado en Venezuela que sea producto de un análisis comparativo de las distintas tecnologías de celdas solares existentes.

En nuestro tiempo, con el avance tecnológico e industrial a nivel mundial y las crecientes necesidades de generación de energía para el desarrollo y el aumento de la calidad de vida, es de importancia indiscutible la toma de conciencia acerca de la necesidad de incrementar el acceso sostenible a la energía, la eficiencia energética y la energía renovable en el ámbito nacional.

En este sentido, conviene resaltar las ventajas que representa la utilización de la energía generada por paneles fotovoltaicos, como son el bajo impacto ambiental que estos generan, la versatilidad de la que gozan debido a su facilidad de disposición en el lugar de requerimiento y la sencillez de su mantenimiento.

Venezuela posee potencial de aprovechamiento de energía fotovoltaica debido a su alta irradiancia anual promedio, sin embargo, el alto costo de estos sistemas han hecho que esta rama de generación de energía no sea muy usada. Por otra parte, en la Universidad de Carabobo ha desarrollado múltiples proyectos de investigación pero todos orientados a implementar sistemas fotovoltaicos en determinadas zonas. Sin embargo, no podemos esperar conseguir una independencia tecnológica si en el país no se incentiva el diseño y la fabricación de equipos, punto que se contempla tanto en el Plan de Necesidades 2011 publicado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y como en la línea de investigación de Calidad de Energía y Eficiencia Energética del departamento de Potencia de la Escuela de Eléctrica de la Universidad De Carabobo.

Por tal motivo, esta investigación busca lograr un mejor entendimiento de los principios en los cuales se basa la energía solar, hacer un estudio de su evolución histórica y comparar las distintas tecnologías de celdas solares estudiando variables de interés como eficiencia, vida útil, tiempo en el mercado, porcentaje del mercado global y características constructivas como lo son los materiales y los distintos proceso de fabricación y los costos asociados a



estos. Esta información será la base para realizar un análisis comparativo para determinar la fabricación en Venezuela.

Esta investigación se encuentra dividida en 5 capítulos, que se pueden resumir de la siguiente manera:

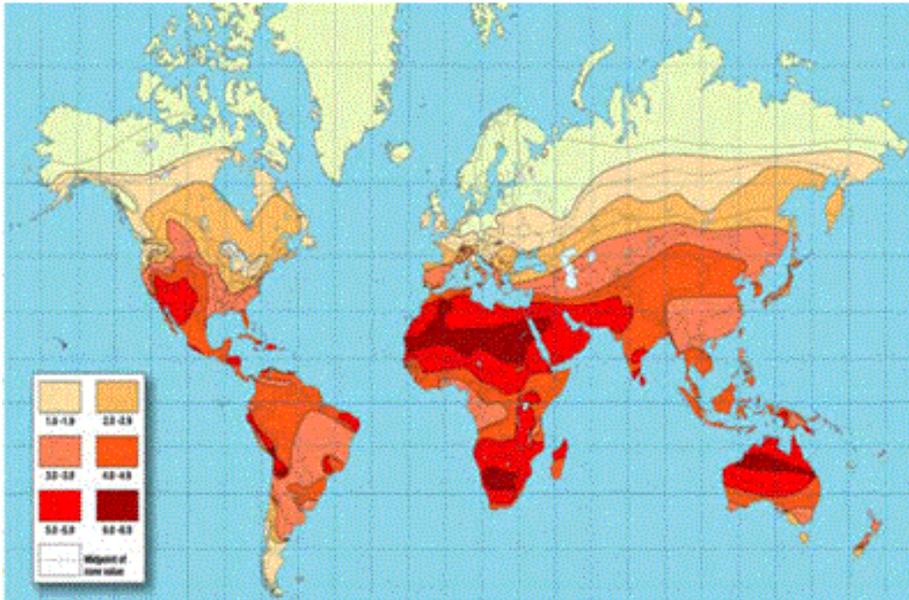
- El Capítulo I en el cual se describe el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y la delimitación de esta investigación.
- El Capítulo II en el que se abarca toda la teoría asociada a la investigación, los antecedentes asociados a investigaciones en el área fotovoltaica, se presenta la infografía de las celdas solares y la definición de términos básicos de este proyecto.
- El Capítulo III consiste en el marco metodológico, en éste se plantea el tipo de investigación, los procedimientos de recolección y análisis de datos y la descripción de las fases metodológicas.
- El Capítulo IV, abarca todo lo referido al análisis técnico-económico de las distintas tecnologías en celdas solares, el análisis comparativo para determinar la celda más conveniente para usar en el diseño del módulo con voltaje de salida de 15 V y una potencia pico de más de 100 W.
- Por último, el Capítulo V engloba las conclusiones y recomendaciones producto de este trabajo de grado.

## Capítulo I: El Problema

### 1.1. Planteamiento del Problema

Por su ubicación geográfica y riqueza en fuentes y recursos naturales, el territorio venezolano cuenta con un valioso potencial para el aprovechamiento de las energías renovables, en especial la energía solar, hidroeléctrica y eólica.

En materia solar, alrededor de tres cuartas partes del territorio nacional se caracteriza por presentar una insolación media del orden de los 5 kWh/m<sup>2</sup> al día [1], valor apropiado para el aprovechamiento de la energía solar, en la Figura 1.1 se observar los valores aproximados de insolación media en el resto del planeta, mientras mayor sea el tono de rojo, mayor es el valor de la irradiancia promedio, valores por encima de 3 kWh/m<sup>2</sup> son adecuados para la generación fotovoltaica.



**Figura 1.1. Radiación solar anual en kWh/m<sup>2</sup>. Fuente: FUNDAELEC “Programa Sembrando Luz” [2]**

Según Rodríguez, F y Uribe, E (2008) [3] en Venezuela, el potencial de energías alternativas, específicamente de energía solar equivale a 4,56 millones de barriles de petróleo al día. Por su parte, estudios realizados en la Universidad de Carabobo por Y. Román y E. Nicolliello (2005) [4] concluyen que lo elevado de la inversión inicial para la



implementación de un sistema fotovoltaico hace que este tipo de tecnología no sea rentable económicamente frente a la ya existente. Siempre que se disponga de energía de red esta será la opción económica más rentable ya que los costos de la misma, en el país, son en promedio de 0,016\$/kWh (a tasa de cambio de 6,3Bs/\$). A continuación se muestra en la tabla N° 1.1, la evolución de los costos de adquisición y el incremento al costo de la energía en dólar-USA por vatio pico (Wp) que representa un módulo policristalino de silicio, siendo este el más común en Venezuela según el Ing. Adrián Suárez, experto en el área. Se usó como referencia investigaciones previas realizadas en la Universidad de Carabobo y se comparó con el costo de adquisición actual.

**TABLA 1.1**  
**Evolución de precios de la energía solar versus costo de la energía en la red en Venezuela**

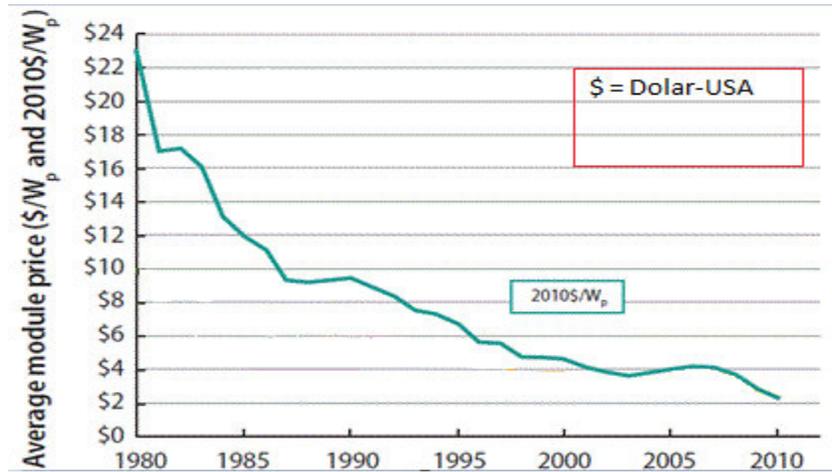
Fuente	Año	Modelo de Módulo	Tipo de Celda	Capacidad del Módulo	Costo del Módulo [dólar-USA]*	Costo en dólar-USA/Wp
Vásquez y Gudiño <sup>[36]</sup>	2005	BP Solar 3160	Policristalino	160 W	782,22	4.88
Román y Nicolielo <sup>[4]</sup>	2005	BP Solar 3150	Policristalino	150W	630	4.2
AlteStore	2013	Kyocera KD 140GX-LFBS	Policristalino	140 W	370.5	2.65

- El costo del panel no incluye los costos por importación (estimado en 30% sobre el costo).

En la tabla N° 1.1 se observa que la evolución del costo de la energía producida ha disminuido más de un 30% desde el 2005 al 2013. Sin embargo, la adquisición de los módulos sin el acceso al dólar preferencial proporcionado por CADIVI se hace poco factible. Otra alternativa sería que se fabricaran los módulos en el país evitando así el problema de divisas.

De la misma manera, el U.S Department of Energy (2011) indica que como consecuencia de la incorporación de nuevas tecnologías y al aumento de la capacidad de producción de los módulos, el precio de los módulos fotovoltaicos ha ido disminuyendo considerablemente en la última década como se observa en la figura 1.2. De continuar esta tendencia, y si se presenta una revisión de la política tarifaria de la energía en Venezuela tal

como lo mencionó el Ministro Navarro en fecha 27/11/2012 en diario “La Verdad” [37], la energía fotovoltaica podría tener mejores oportunidades en el país.



**Figura 1.2. Precio promedio global de módulos PV, 1984-2010 Fuente: U.S Department of Energy [5]**

La Figura 1.2 muestra como el precio de los módulos fotovoltaicos ha venido cayendo desde 1980, y esto se debe principalmente al incremento de producción de módulos, sin embargo hay otras razones, como la misma dinámica del mercado que reduce los precios para elevar la demanda, y la introducción de nuevas tecnologías que abaratan los costos de producción.

Según la European Photovoltaic Industry Association (EPIA), las celdas solares pueden ser clasificadas en 3 generaciones según su tecnología. La primera generación son las celdas de silicio cristalino (monocristalino y policristalino). La segunda generación incluye la tecnología de película delgada (silicio amorfo, Cadmio Telurio, CIGS) mientras que la tercera generación incluye la energía fotovoltaica concentrada, celdas solares orgánicas y otras tecnologías que no han sido comercializadas a gran escala [6].

La celdas de silicio han dominado el mercado por más de 30 años, sin embargo, el porcentaje del mercado global se ha visto disminuido en los últimos 5 años, desde su pico de 95% en 2004 a alrededor de 85% en 2010. En la tabla 1.2 se muestra el porcentaje del mercado global que representan las distintas tecnologías en celdas solares para el año 2010 de acuerdo al Solar Technologies Market Report (2010) hecho por U.S Department of Energy [5].



**TABLA 1.2**  
**Porcentaje del mercado global de las distintas tecnologías de celdas solares para el año 2010**

<b>Celda de Silicio Policristalino</b>	<b>48 %</b>
<b>Celda de Silicio Monocristalino</b>	<b>37 %</b>
<b>Celdas de Película Delgada</b>	<b>13 %</b>

**Fuente: U.S. Department of Energy [5]**

La tabla 1.1 muestra que para el año 2010 los módulos de silicio policristalino dominan el mercado, sin embargo, las nuevas tecnologías en película delgada debido a su bajo costo poseen un 13% del mercado global incrementando su venta un 8% en sólo 5 años. El último 2% corresponde a celdas solares de tercera generación, como las celdas orgánicas y sensibilizadas con pigmentos, que debido a su baja eficiencia y poca vida útil aun no son muy comerciales.

Según proyecciones proporcionadas por la EPIA, para el año 2020 se espera que el 61% de las ventas sea en tecnología de silicio cristalino, mientras que las ventas de celdas de película delgada esté alrededor del 33% [6].

Por su parte, en la Universidad de Carabobo, para el año 2011 se realizó una evaluación del avance de la investigación en el área de Eficiencia Energética y Calidad de Energía observándose que el Plan de Investigaciones en el área de eficiencia energética establece el “desarrollo de sistemas y equipos que permitan el uso eficiente de la energía en edificaciones residenciales, industriales y comerciales tal que contribuya con el desarrollo sustentable de la nación, el cuidado del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales de las próximas generaciones” en donde establece como tema de investigación “innovación en diseño de sistemas y equipos en fuentes de energía alternativa” [7].

En la Universidad de Carabobo los estudios se han orientado al diseño de sistemas, pero no hay investigaciones orientadas al diseño de equipo. Sin embargo, los primeros pasos para la fabricación de un diseño en Venezuela es un análisis comparativo de las distintas opciones, el cual no existe, que nos permita definir hacia dónde dirigir los estudios futuros en el área de energía fotovoltaica en la Universidad de Carabobo.



Este trabajo persigue estudiar los principios de la energía fotovoltaica e identificar las variables (eficiencia, vida útil, tiempo en el mercado, porcentaje del mercado global y costo) y características constructivas (materiales, proceso de fabricación) de los tipos de celdas solares fabricadas a nivel mundial para realizar un análisis comparativo que permita hallar el más favorable para el potencial de fabricación de Venezuela.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar de un módulo solar para ser fabricado en Venezuela que sea producto de un análisis comparativo de las distintas tecnologías de celdas solares existentes.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- 1 Identificar los tipos de celdas solares fabricadas a nivel mundial y la tecnología de celdas solares disponibles en Venezuela, y la elaboración de la lista de materiales que la conforman, identificación de sus procesos constructivos y rendimiento energético por tipo de celda.
- 2 Determinar las etapas, costos, equipos y materiales de los procesos de fabricación de una celda solar según su tecnología para realizar análisis comparativo a efectos de seleccionar la celda que se utilizará en el diseño.
- 3 Proponer un diseño y procedimiento para la elaboración de un módulo constituido por celdas solares, con base a un análisis comparativo que determine la tecnología más favorable para el potencial de fabricación de Venezuela.

## **1.3. Justificación**

En nuestro tiempo, con el avance tecnológico e industrial a nivel mundial y las crecientes necesidades de generación de energía para el desarrollo y el aumento de la calidad de vida, es de importancia indiscutible la toma de conciencia acerca de la necesidad de incrementar el acceso sostenible a la energía, la eficiencia energética y la energía renovable en el ámbito



local, nacional, regional e internacional. Hoy el mundo utiliza cerca de 13 teravatios (TW) de potencia y las proyecciones indican que serán necesarios alrededor de 30 teravatios (TW) para el 2050 [8].

Debido a las limitadas reservas de hidrocarburos y de potencial hidroeléctrico, se hace urgente buscar nuevas formas de generación de electricidad para garantizar la sostenibilidad energética en el futuro. En este contexto, la generación de electricidad vía conversión fotovoltaica de la radiación solar juega un papel importante.

En este sentido, conviene resaltar las ventajas que representa la utilización de la energía generada por paneles fotovoltaicos, como son el bajo impacto ambiental que estos generan, la versatilidad de la que gozan debido a su facilidad de disposición en el lugar de requerimiento y la sencillez de su mantenimiento.

En el plan de necesidades 2011 proporcionado por el Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias en el área de energía y petróleo establece como necesidad, “Identificar fuentes de energías alternativa y desarrollar mecanismos eficientes de generación, distribución y uso sustentable de la energía, favoreciendo el equilibrio entre la conservación del ambiente, el desarrollo integral de las comunidades y las prioridades nacionales como potencia energética”.

Es por ello que conviene identificar los avances tecnológicos en sistemas fotovoltaicos, y hacer un análisis comparativo de las variables (eficiencia, vida útil, tiempo en el mercado, porcentaje del mercado global y costo) y características constructivas (materiales, proceso de fabricación) que sustente el diseño de un módulo solar que pueda ser fabricada en Venezuela que sea producto de una análisis comparativo de las distintas tecnologías de celdas solares existentes y suministre elementos técnicos y económicos para la toma de decisiones de inversión en el sector fotovoltaico.

Así pues, según Monagas (2011) en su trabajo “Análisis cuantitativo de la línea de investigación Eficiencia Energética y Calidad de Energía de la Universidad de Carabobo”, este trabajo constituye un aporte a la línea de investigación de Eficiencia Energética y Calidad de Energía y a su Plan de Investigaciones específicamente en el área de Eficiencia



Energética, tema de “Fuentes de Energía Alternativa”, aspectos esenciales “Innovación en diseño de sistemas y equipos” [7].

#### 1.4. Delimitaciones.

**De Espacio (Geográfico) y Tiempo:** El trabajo de investigación se realizará en Bárbula, Municipio Naguanagua, Estado Carabobo en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo. En un periodo de tiempo que inició en el Octubre de 2011 en el 2° periodo lectivo de la Facultad de Ingeniería hasta diciembre 2012.

**De Contenido:** El trabajo de investigación a realizar comprende la descripción de las distintas tecnologías de celdas solares y se tomarán en consideración las siguientes características: materiales, proceso de fabricación, eficiencia teórica, porcentaje del mercado global en ésta área y aplicaciones. También consolida una infografía de la evolución en el tiempo.

La información será obtenida de revistas científicas y bases de datos disponibles en la Universidad de Carabobo y otras redes de información a las cuales la universidad tiene acceso, tales como: eBrary, ProQuest, documentos y estándares de la IEEE e IET y DOAJ y reconocidos organismos e instituciones que consolidan información respecto a energía fotovoltaica, como la European Photovoltaic Industry Association (EPIA), National Renewable Energy Laboratory (NREL), PVInsight y el U.S Department of Energy.

Respecto a los costos, el análisis y determinación de los mismos se fundamenta en los costos presentados por los fabricantes y consolidados en reconocidas instituciones que los hacen públicos. Sin embargo, esta investigación no analiza ni determina los costos en las fases de fabricación dado que tal información no es pública ni se consolida para la vista abierta de las cifras.

El diseño propuesto comprenderá la ingeniería conceptual y proporcionará los siguientes resultados:

- Planos detallados del módulo a construir.



- Descripción del módulo indicando variables de potencia y rendimiento estimado del módulo.
- Conectividad de las celdas que componen el módulo.
- Listado de materiales.



## Capítulo II: Marco Teórico

En el presente capítulo se muestran las bases que fundamentan esta investigación, como son los antecedentes, bases teóricas, avances y evolución histórica de las celdas solares, además de cómo se conforma un sistema fotovoltaico.

### 2.1. Antecedentes

**Román, Y – Eliezer, E (2005) “Sistemas de Alimentación de Energía con Paneles Solares para la Iluminación de un salón de clases en la Facultad de Ingeniería”. Universidad de Carabobo. Venezuela**

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema de alimentación de energía con paneles solares para la iluminación de un salón de clases, en la facultad de ingeniería. Por lo tanto se realizó un análisis extenso del funcionamiento, y las partes que conforman un sistema fotovoltaico, determinando las ventajas y desventajas ante su implementación y dimensionamiento en aquellos sitios en que se dispone de un acceso a una red de potencia.

Este trabajo de grado nos aporta información relacionada al dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y el estudio de las ventajas y desventajas de los mismos. Este trabajo de grado contribuye con la primera y la tercera fase metodológica del proyecto.

**Vázquez, J – Gudiño, J (2005) “Análisis Técnico económico para la generación de energía eléctrica a través de celdas solares de una zona rural del estado Carabobo” Universidad de Carabobo. Venezuela**

El objetivo de esta investigación fue el análisis técnico-económico para la generación de energía eléctrica a través de celdas solares en una zona rural del Estado Carabobo. En este trabajo se analiza las características de un sistema fotovoltaico, el alto potencial de nuestro país para el uso de estos sistemas y la disposición de los paneles para mejorar la eficiencia del sistema. Además se hacen comparaciones de precios entre sistemas adquiridos en el país y el exterior, dando como resultado que es más económico adquirir los equipos que conforman dicho sistema en el exterior. Lo anteriormente expuesto aporta al proyecto la forma en que se realizan los estudios técnico-económicos para realizar el



estudio de factibilidad de los diferentes tipos de paneles solares. Este trabajo de grado aporta a la tercera fase metodológica del proyecto.

**Peña, D - Tejera, D (2006) “Factibilidad y diseño de un sistema de generación de energía eléctrica mediante el uso de energía alternativa para la zona costera del país.” Universidad de Carabobo, Venezuela.**

El objetivo de este trabajo fue determinar la factibilidad y diseño de un sistema local de generación que utiliza como fuentes energías alternativas, tales como, la energía del viento en combinación con la energía solar para las zonas costeras del Estado Carabobo. Este trabajo evidencia la factibilidad de usar sistemas de energía alternativa, como la solar, en el país, ayudando a justificar la presente investigación. Este trabajo aporta a la primera fase metodológica del proyecto.

**Barrera, M (2009). “Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y silicio cristalino para aplicaciones espaciales” Universidad Nacional de General San Martín. Argentina.**

En este trabajo se hizo un estudio detallado de los diferentes tipos de celdas solares y de las ecuaciones matemáticas que rigen su comportamiento, para aplicaciones en satélites espaciales. Es de apoyo a nuestro trabajo ya que nos brinda resultados acerca de los parámetros eléctricos de interés para nuestro análisis comparativo. Esta tesis ofrece una contribución directa a la primera fase metodológica del desarrollo del proyecto.

**Murillo González, R (2005). “Evaluación de la inserción de sistemas fotovoltaicos a la red pública de Costa Rica”. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.**

En este proyecto se puede conocer las aplicaciones de la energía solar no sólo de la manera natural, sino que también aprovechándose como energía calórica por ejemplo para obtener agua caliente para usos sanitarios y como energía eléctrica para abastecer de energía a comunidades alejadas de la red. El aporte que proporciona a esta investigación son las diversas aplicaciones en las que se puede emplear la energía fotovoltaica, brindando un soporte a la primera fase metodológica del proyecto.



**Figueroa, A (2010). “Análisis, diseño y construcción de un seguidor solar para celdas fotovoltaicas”. Universidad Mayor. Chile.**

Este trabajo presenta unos sistemas de seguimiento solar aceptados por el IEEE, el seguimiento solar es usado en los sistemas fotovoltaicos para emplear elementos seguidores del sol que favorecen y aumentan la captación de la radiación solar. Aporta a ésta investigación fundamentos teóricos tratados en su investigación, además aporta información sobre el proceso de fabricación de celdas solares de silicio, y el estado en el que se encuentran otros tipos de tecnologías de celdas fotovoltaicas. Contribuyendo con la primera y segunda fase metodológica del proyecto.

**Peña, L (2011). “Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones”. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia.**

Este trabajo hace una revisión del estado del arte de celdas solares en las que se haya buscado la transparencia de la misma, abordando su desarrollo desde múltiples tecnologías. Esta investigación contribuyendo con la primera y segunda fase metodológica del proyecto.

## **2.2 Bases Teóricas**

En la siguiente sección se presentan las bases teóricas que fundamentan esta investigación, como lo es la definición de términos básicos relacionados con la energía solar, variables de interés al momento de diseñar una celda solar y los diferentes tipos de celdas y sus características: materiales, proceso de fabricación, eficiencia teórica, tiempo en el mercado, porcentaje del mercado global en ésta área.

### **2.2.1 Energía Solar.**

La energía solar es aquella energía que se obtiene mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol o se puede definir también como la energía radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión la cual llega a la tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre. [9]



La energía solar se puede clasificar en varios tipos, entre las cuales tenemos:

- **Energía Solar Activa:** para este tipo de energía se maneja dependiendo la temperatura a la que se vaya a utilizar.
- **Energía Solar Pasiva:** aprovecha los rayos del sol sin necesidad de mecanismos o sistemas mecánicos, retiene el calor para disponerlo después para la calefacción o refrigeración de espacios.
- **Energía Solar Térmica:** es usada para producir agua caliente para uso sanitario y calefacción.
- **Energía Solar Fotovoltaica:** es usada para producir electricidad mediante placas de semiconductores que se alteran con la radiación solar. Tiene muchas aplicaciones pero esencialmente el suministro de energía eléctrica.
- **Energía Solar Termoeléctrica:** es usada para producir electricidad convencional a partir de un fluido calentado a alta temperatura.
- **Energía Solar Híbrida:** es la energía solar se obtiene al con otro tipo de energía. Según la energía con la que se combine puede ser renovable o no renovable.
- **Energía Eólica Solar:** concentra la luz del sol en un colector, para calentar un fluido, que produce un vapor para generar energía eléctrica. Se considera de alto potencial para la producción de procesos industriales, especialmente en lugares donde hay mayor radiación del sol.

### **2.2.2. Bases Teóricas y Físicas de las Celdas Solares.**

En esta sección se explican las bases teóricas y físicas involucradas en el estudio de las celdas solares, necesarias para poder explicar su funcionamiento, además se presenta el circuito equivalente y se describen las ecuaciones que describen el fenómeno.



### 2.2.2.1. Fundamentos Físicos de las celdas solares [10]

Para la transformación de la energía de la radiación solar en electricidad se requiere que se cumplan tres aspectos fundamentales:

- Existencia de una unión p-n.
- Incidencia de fotones con energías igual o mayor que la banda prohibida del semiconductor.
- Producción de portadores de carga libres (electrones y huecos).

Una celda solar es un dispositivo donde ocurren los tres eventos antes mencionados. Está constituida por una unión p-n que convierte directamente la energía por radiación solar en energía eléctrica. En la ecuación 2.1 se observa que al incidir la luz sobre una celda solar genera un voltaje entre sus terminales y al mismo tiempo una corriente que circula por un circuito externo, produciendo una potencia que puede ser empleada energizar cualquier equipo, aparato o accesorio electrónico.

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

En la celda solar no hay elementos móviles necesarios para la transformación como en los métodos convencionales, que ocurren en una central eléctrica, la transformación de la energía se da entonces de manera directa.

Para entender el funcionamiento de una celda solar, es necesario comprender las propiedades de los elementos químicos y los materiales que la constituyen.

A temperatura ambiente la red cristalina de un sólido cristalino tiene una energía térmica determinada, provocando que los electrones oscilen con mayor amplitud, causando que algunos electrones adquieran energía excedente que les permita poder escapar del enlace que los mantiene unidos a los átomos, convirtiéndose en electrones libres que participan en la conducción eléctrica; sin embargo el desempeño para una óptima conversión es obtenido cuando la corriente de unión es ideal, cuando hay una desmejora en el desempeño, esto ocurre cuando la corriente es influenciada por la recombinación o fuga a través de los canales superficiales. El desempeño de la conversión de cualquiera de los semiconductores

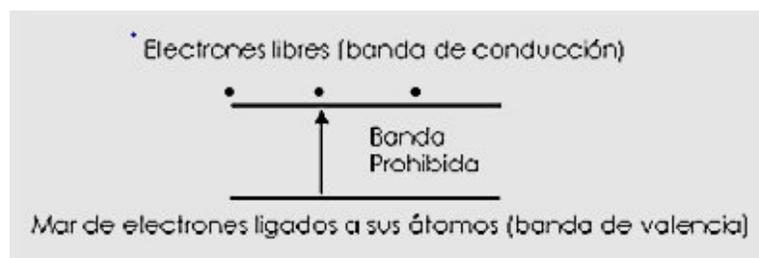
mejora cuando el nivel de dopaje aumenta. Dependiendo de la energía propia que se necesita en cada cristal para que un electrón de valencia pueda estar libre del enlace, los sólidos cristalinos, se dividen en: conductores, semiconductores y aislantes.[10]

El material óptimo para la conversión de energía solar es en función de la temperatura. Mientras la temperatura aumenta, la máxima eficiencia cambia para los materiales con un ancho de banda más grande. [11]

Las bajas temperaturas producen una conversión fotovoltaica más eficiente para celdas solares monocristalinas. La eficacia de una celda solar monocristalina disminuye a medida que la temperatura de funcionamiento de los aumentos de las células. [12]

Los átomos que conforman los elementos semiconductores son aquellos que se encuentran en el grupo IV de la tabla periódica, fundamentalmente el Si y el Ge. También existen compuestos semiconductores, formados por la combinación de elementos del grupo III y V y por la combinación de los elementos del grupo II y VI (llamados semiconductores II-VI, como el telurio de cadmio y el sulfuro de cadmio).

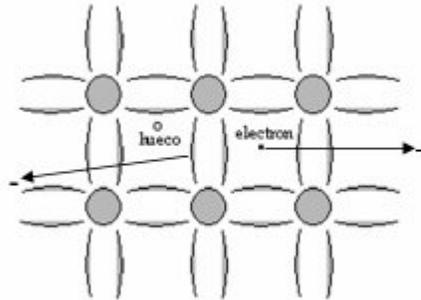
El rasgo más distintivo de un semiconductor es su representación en los llamados esquemas de bandas. Estas bandas se muestran esquemáticamente en la Figura 2.1



**Figura 2.1 Representación esquemática del diagrama de bandas de un semiconductor. Fuente: H. Poggi-Varaldo y A. Martínez [10]**

Cuando un electrón de valencia rompe su enlace y pasa a la banda de conducción deja atrás un enlace suelto que puede ser ocupado por otro electrón que se encuentra en la banda de valencia. Este movimiento es equivalente al movimiento de una carga positiva a través del

crystal. Es mucho más conveniente analizar este espacio vacío, al cual se le llama hueco, que el conjunto total de los electrones restantes. El hueco similar al electrón pero con carga positiva. En la Figura 2.2 se muestra esquemáticamente el movimiento de electrones y huecos libres bajo la acción de un campo eléctrico externo. Nótese que el electrón se mueve hacia el potencial positivo en tanto el hueco lo hace hacia el potencial negativo.



**Figura 2.2 Representación esquemática del movimiento de electrones y huecos libres bajo la acción aplicado. Fuente: H. Poggi-Varaldo y A. Martínez [10]**

El Concepto de banda prohibida o “Gap” de energía es fundamental para el funcionamiento de una celda solar. Para una eficiente operación de una celda solar las propiedades esenciales de los materiales semiconductores están caracterizadas por los siguientes parámetros.

- La banda prohibida
- El número de portadores de carga libre que constituyen a la conducción.
- El proceso de generación y recombinación de los portadores libres cuando incide la luz.

La unión p-n es el elemento base de una celda solar. La formación de una unión p-n requiere la existencia de una región de conductividad tipo p (huecos mayoritarios) y otra de conductividad tipo n (electrones mayoritarios). Por lo general un semiconductor de conductividad tipo-p o tipo-n se obtienen mediante un proceso de dopaje o impurificación del material, que consiste en introducir en la red cristalina del semiconductor elementos de otros grupos de la tabla periódica.



El Silicio adquiere conductividad tipo-p, dopándolo con elementos del grupo III y conductividad tipo-n dopándolo con elementos del grupo V. En compuestos semiconductores las conductividades tipo p y n pueden lograrse por deficiencias estequiométricas. Por ejemplo, el CdTe es un compuesto semiconductor que puede obtenerse con conductividad tipo-p por exceso de Te en la red cristalina y el CdS con conductividad tipo-n, por exceso de Cd.

Una unión p-n se obtiene “uniendo” semiconductores con conductividades tipo-p y tipo-n. Si las regiones p y n son hechas del mismo material, decimos que se ha formado una homounión. En el caso de que las regiones n y p sean de materiales distintos, decimos que se ha formado una heterounión. Las celdas solares son fabricadas tanto con homouniones, como con heterouniones. El rasgo más distintivo en una unión p-n para la transformación fotovoltaica es la existencia de un campo eléctrico, que es el responsable de separar las cargas libres creadas por la absorción de los fotones provenientes de la radiación incidente.

El valor de este campo eléctrico es del orden de  $10^5$  V/cm, que representa un valor inmenso, únicamente como comparación para el rompimiento dieléctrico del aire se requieren  $3 \times 10^3$  V/cm, lo que es una magnitud de campo eléctrico 33 veces menor que el que existe entre las uniones semiconductoras n y p. Obviamente en una unión p-n no existe un voltaje de  $10^5$  V/cm, pero la distancia entre las regiones p y n, tampoco es de 1 cm. Un valor típico de voltaje en una unión p-n es de 1V, siendo la distancia entre las regiones de unas 0.1 micras (1 micra =  $10^{-4}$  cm), por lo que 1 V aplicado a una distancia entre dos placas, produce el mismo campo que el de  $10^5$  V aplicado a una distancia de 1 cm entre 2 placas.

La radiación solar incidente es absorbida por el semiconductor en dependencia del valor de banda prohibida, creando pares electrón hueco fuera del equilibrio. En la región p los huecos, fuera del equilibrio, creados por la absorción de la luz, no modificarán el número de huecos en equilibrio sustancialmente, sin embargo en la misma región-p, los electrones originados por la radiación solar experimentarán un cambio en la concentración respecto a su concentración de equilibrio. Análogamente ocurre con los huecos fuera del equilibrio en la región-n, de manera que los portadores minoritarios (electrones en la región-p y huecos



en la región-n) son los que gobiernan el mecanismo de conducción. Los pares electrón-hueco que arriban a la región del campo eléctrico de la unión p-n son separados por este, contribuyendo a la corriente. Los pares que no alcanzan la región de la unión p-n se recombinan y transforman su energía en calor.

Los pares electrón-hueco creados por la luz no generan en sí mismo una potencia eléctrica, porque para ello necesita que aparezca un voltaje entre los terminales de la unión el cual surge mediante un proceso conocido como efecto fotovoltaico. La separación de huecos y electrones debido al campo eléctrico de la unión p-n provoca que los electrones se muevan hacia la región-n y los huecos hacia la región. Bajo condición de cortocircuito ( $V=0$ ) la corriente que fluye por el circuito exterior es la corriente generada por la luz  $I_L$ . Bajo condición de circuito abierto, aparecerá un voltaje en los extremos de la unión.

De esta manera, los mecanismos físicos básicos en la operación de una celda solar son:

- Creación en el semiconductor de pares electrón-hueco generados por la absorción de la radiación solar (absorción de fotones).
- Separación de los pares electrón-hueco por el campo de la unión p-n generando una corriente eléctrica  $I_L$ .
- Aparición de un voltaje entre los terminales de la celda solar.
- Utilización de la potencia eléctrica a través de una carga exterior.

#### **2.2.2.2. Circuito equivalente de las Celdas Solares [13]**

Una celda solar es un sensor fotovoltaico capaz de transformar la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica, se basa en el efecto fotoeléctrico. En la Figura 2.3, se observa el circuito equivalente de una celda solar.

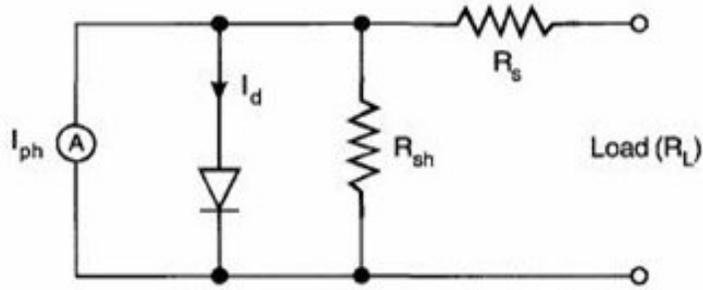


Figura 2.3 Circuito Equivalente de una celda solar. Fuente: D. Carranza [13].

En una celda solar real existen efectos que afectan el comportamiento externo de la misma. Estos efectos son tenidos en cuenta al considerar la resistencia serie  $R_s$  y la resistencia paralelo  $R_{sh}$  (Figura 2.3). La primera proviene principalmente de la resistividad del emisor  $n$  y de la base  $p$ , de las resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos, y de la resistencia de los dedos metálicos que constituyen la grilla de la metalización frontal. La segunda es esencialmente debida a pérdidas en los bordes y a la presencia de defectos cristalinos y precipitados de impurezas en la zona de la juntura. [14]

### 2.2.2.3 Ecuaciones de las Celdas Solares [15]

Como se mostró en la Figura 2.3 una celda solar puede ser representada como una fuente de corriente conectada en paralelo con un diodo. La ecuación fundamental de las celdas solares es

$$I = I_o \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - I_{sc} \quad (2.2)$$

La cual es consistente con la ecuación del diodo. Sin embargo, en la ecuación 2.2 mientras que el voltaje sea siempre positivo, la corriente será siempre negativa. Esto es comprensible debido a que el diodo es un elemento pasivo que consume energía. Pero considerando la celda solar como una batería, la dirección de la corriente debería ser invertida. Entonces, una mejor forma de la ecuación es

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Donde tanto el voltaje como la corriente son siempre positivos. El voltaje de circuito abierto es el voltaje cuando la corriente es cero, definida por esta condición entonces

$$I_{sc} = I_o \left( e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$



Despejando Voc,

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Pero como la corriente de cortocircuito (Isc) siempre es mucho más grande que la corriente de saturación inversa(Io), la ecuación 2.5 puede ser simplificada como:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_o} \right) \quad (2.6)$$

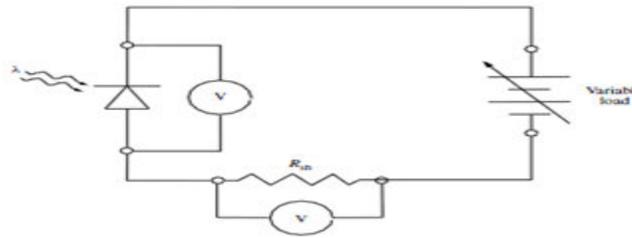
#### 2.2.2.4. Medición de Corriente Vs Voltaje [16]

La medición del comportamiento I-V en celdas solares permite la determinación de la característica del diodo, y otros parámetros de importancia incluyendo el punto de máxima potencia  $P_{max}$ .

Una gran variedad de sistemas de medición de características I-V han sido desarrollado para medir el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, desde celdas de  $0.01 \text{ cm}^2$  hasta arreglos de varios kilovatios. Un sistema genérico I-V se muestra en la Figura 2.4. El voltaje a través del dispositivo fotovoltaico es regulado por una carga variable, además la corriente es censada por una resistencia shunt. Los parámetros críticos de las curvas I-V son el voltaje a circuito abierto (Voc), la corriente de cortocircuito (Isc), y el punto de máxima potencia. ( $P_{max}$ ). La figura 2.5 muestra una curva típica de un módulo de 50 W con luz al SRC y en la oscuridad. El factor de llenado es un parámetro normalizado que indica que tan ideal son las propiedades del diodo y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.7)$$

Con frecuencia es expresado en porcentaje multiplicando la expresión anterior por 100. Podemos obtener la característica I-V a partir del circuito de la Figura 2.4.



**Figura 2.4 Esquema Típico del Sistema para medir la característica I-V. Fuente: A. Luque y S. Hegedus[16]**

El voltaje a circuito abierto puede ser determinado por el sector lineal de la curva alrededor del punto de corriente cero o midiendo el voltaje con la carga desconectada. Este valor es obtenido a menudo por la interpolación lineal de los dos puntos más cercanos al valor de corriente cero.

El valor de corriente de cortocircuito es usualmente determinado por la interpolación de los 2 puntos más cercanos a voltaje igual cero. Realizar esta interpolación usando más de 2 puntos reducirá la incertidumbre en la determinación de esta variable.

El punto de máxima potencia es con frecuencia tomado por ser la más alta medición de potencia. Para prevenir errores que resulten en dispositivos con un bajo nivel de FF, en la medición de potencia contra el voltaje el dato escogido debe ser mayor a 80% del voltaje medido en el punto de máxima potencia.

La eficiencia depende de muchos factores. Por ejemplo el espectro de radiación solar no es el mismo en el espacio extraterrestre, que en un país del trópico o uno nórdico. También la eficiencia depende de la temperatura a la cual está sometida la celda solar, de la intensidad de la radiación, de los mecanismos de recombinación, en fin de la suma de factores de los cuales dependen la corriente de cortocircuito, la tensión a circuito abierto y el factor de llenado. Por ello se ha establecido un conjunto de normas para poder comparar el funcionamiento de unas celdas con otras. En general, se trata de obtener altos valores de corriente de cortocircuito, voltaje a circuito abierto y factor de llenado para alcanzar elevados valores de conversión de energía solar en eléctrica. En la figura 2.5 se muestra una curva IV de un módulo comercial de 50 W..

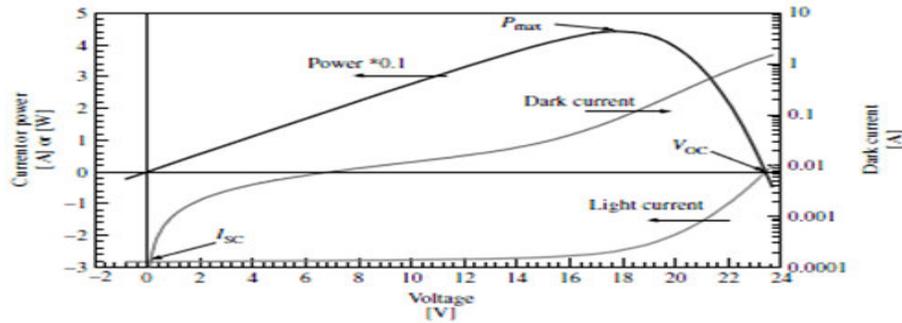


Figura 2.5 Característica I-V Típica de un PV comercial de 50W, con luz y en oscuridad. Fuente: A. Luque y S. Hegedus [16]

Con los parámetros de las curvas I-V observados en la figura 2.5, se procede a realizar la caracterización eléctrica de los módulos solares, que se realizan por la medición de los parámetros en los dispositivos. Además, por el método de las cuatro puntas se obtiene la resistividad y portadores de carga de los semiconductores, generalmente aplicado a muestras de película delgada. [14]

### 2.2.3. Infografía del desarrollo fotovoltaico.

En el año 1839 Edmund Becquerel, un físico francés, descubre el efecto fotovoltaico, en una celda electrolítica compuesta de 2 electrodos metálicos sumergidos en una solución conductora, la generación de energía aumentaba al exponer la solución a la luz.

En 1873 Willoughby Smith descubre la fotoconductividad del selenio.

En 1877 W.G. Adams y R.E. Day observan el efecto fotovoltaico en selenio sólido y construyen la primera celda de selenio.

En 1951 el desarrollo de la unión PN crecida posibilita la producción de una celda de germanio monocristalino.

En 1954 los investigadores de los laboratorios Bell publican los resultados de su descubrimiento de celdas solares de silicio con una eficiencia de 4,5%.

En 1955 se comercializa el primer producto fotovoltaico, con una eficiencia del 2% al precio de \$25 USD cada celda de 14 mV.

En 1963 en Japón se instala un sistema fotovoltaico de 242 W en un faro.



En 1973 la Universidad de Delaware construye “Solar One”, una de las primeras viviendas con EFV.

En 1974-1977 se fundan las primeras compañías de energía solar. El Lewis Research Center (leRC) de la NASA coloca las primeras aplicaciones en lugares aislados.

En 1980 la empresa ARCO Solar es la primera en producir más de 1 MW en módulos FV en un año.

En 1982 la producción mundial de EFV supera los 9,3 MW.

En 1983 la producción mundial de EFV supera los 21,3 MW

En 1996 el centro nacional para la energía fotovoltaica se ha establecido para integrar mejor los esfuerzos de investigación entre Sandia National Laboratories y el NREL. [17]

En 2000 la empresa First Solar comienza la producción de paneles fotovoltaicos de película delgada en Perrysburg, Ohio, con la estimación de que pueda producir lo suficiente cada año para generar 100 MW. [17]

En 2005 investigadores de Sandia National Laboratories comienzan a desarrollar los próximos platos generación de colectores solares en la instalación solar térmica. [17]

En 2011 se desarrollan las plantas de energía solar flotantes por una colaboración franco-israelí, esta innovadora tecnología de energía solar presenta un nuevo paradigma en la producción de energía. [18]

En 2012 el Solar Impulse, un avión experimental propulsado por energía solar, que tiene 12.000 celdas solares. Atravesó el estrecho de Gibraltar y entró en Marruecos. El inmenso y ultraligero avión, pilotado por el suizo Bertrand Picard, un psiquiatra y especialista en globos aerostáticos de 54 años. Tras diez horas de vuelo, el Solar Impulse avanzaba a 45 km/h, a más de 5.500 metros de altitud. [19]

En la Figura 2.6 se muestra un análisis hecho por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) en el cual se aprecia la aparición de las distintas tecnologías en celdas solares y la evolución en sus niveles de eficiencia.

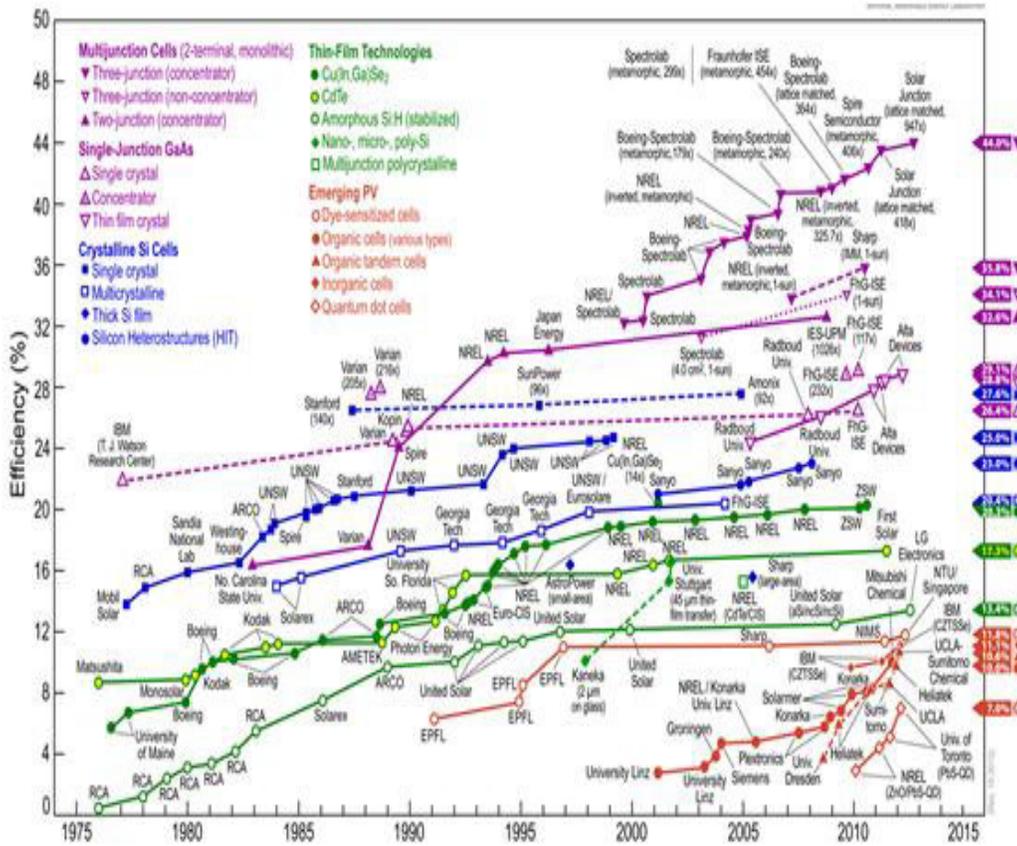


Figura 2.6 Evolución histórica de las celdas solares y las eficiencias alcanzadas. Fuente: NREL [20].

Se puede observar que los mayores niveles de eficiencia se encuentran con celdas multiunion que es la unión de varios materiales en una celda con el fin de obtener mayor captación del espectro solar, sin embargo éstas no son comerciales debido a su alto costo y son desarrolladas para aplicaciones espaciales, no se consideran una nueva generación de celdas debido a que es combinación de las ya existentes. Además destaca la evolución en niveles de eficiencia que han tenido desde comienzos del 2000 las celdas tecnologías emergentes, que han alcanzado en laboratorio niveles de eficiencia de 11.8 % niveles que son comerciales hoy en día, sin embargo no poseen aún una larga vida útil para competir comercialmente con otras tecnologías.

En la Figura 2.7 se observa la variación del porcentaje del mercado mundial a través del tiempo en función del tipo de tecnología de celdas solares.

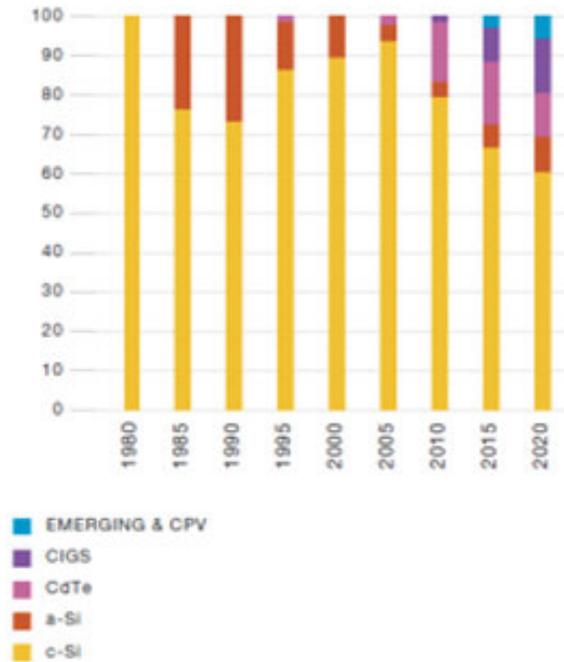


Figura 2.7 Evolución histórica del mercado de celdas solares. Fuente: EPIA [6].

En la Figura 2.7 se puede observar como las tradicionales celdas de silicio cada vez se hacen menos comerciales, y esto se debe a que, con el tiempo tecnologías de película delgada como CdTe y CIGS, alcanzaran economía de escala, reduciendo aún más los precios de la misma.

#### 2.2.4. Aplicaciones de la Energía Solar [21]

Además de aprovecharla de manera natural, la energía solar se puede convertir en energía calórica y energía eléctrica, y por lo tanto se puede usar en todos los casos donde utilizan otras fuentes convencionales de energía.

En la actualidad los usos más extendidos de la energía solar son la obtención de agua caliente para usos sanitarios y la producción de energía eléctrica para viviendas alejadas de la red.

El calor se logra por captación térmica mediante colectores solares o térmicos, y puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades, como por ejemplo: obtención de agua caliente, esterilización de elementos hospitalarios, calefacción, climatización de piscinas, secaderos agrícolas, purificación o desalinización de agua, entre otras.



La electricidad producida a través de la captación botánica de los módulos fotovoltaicos se puede destinar a instalaciones autónomas mediante sistemas aislados, o bien, puede ser inyectada a la red pública mediante sistemas conectados.

En los sistemas aislados las posibilidades de aplicación son enormes: desde viviendas o equipamientos aislados y/o independientes, hasta centrales eléctricas rurales, telecomunicaciones, bombeo de agua, refrigeración, protección catódica, señalizaciones, equipos de sonido, sistemas de iluminación, ordenadores o teléfonos portátiles, entre otras. Estas instalaciones contribuyen a la solidaridad y cumplen la función de satisfacer necesidades básicas de familias o comunidades que se encuentran alejadas del suministro de energía convencional.

### **2.2.5 Tipos de Celdas Fotovoltaicas.**

A continuación se repasa cada uno de las diferentes tipos de celdas utilizadas para aplicaciones fotovoltaicas disponibles comercialmente. Se presentan los materiales típicos empleados, eficiencias conseguidas.

#### **2.2.5.1. Celdas solares de silicio cristalino.**

Estas celdas surgieron a partir de la década de los 50, son la primera generación de celdas solares y gran parte de la tecnología se basaba en este tipo de celdas <sup>[22]</sup> y por ser una de las tecnologías en paneles solares más maduras cuenta con aproximadamente el 80% del mercado [6].

Las celdas solares de silicio cristalino convierten entre 14 y 22% la luz del sol que transforman en electricidad. Estas celdas presentan una eficiencia que varía entre los 12 y 24%.

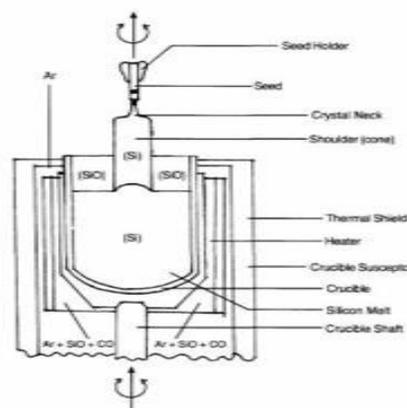
Existen diversas técnicas para la elaboración de las celdas solares de silicio cristalino, de las cuales cabe resaltar dos de ellos que son el método de Czochralski y el método flotante. En la figura 2.8 se aprecia como es el proceso de fabricación de la celda de una manera general, partiendo del hasta el producto terminado que es el panel fotovoltaico de celdas de silicio cristalino.



**Figura 2.8** Proceso de fabricación de las celdas de silicio cristalino. Fuente: EPIA [6].

El método de Czochralski es el más usado comercialmente y el más económico, se utiliza para el crecimiento del cristal de silicio. En este proceso, una semilla del cristal se pone en contacto con una masa de silicio de alta pureza, se eleva lentamente la semilla del cristal haciendo que los átomos de silicio fundido adopten el patrón de esta, para luego enfriarse y solidificarse. A partir de este lingote de silicio cristalino, las obleas son rebanadas y texturizadas para mejorar la absorción de la energía solar. Estas obleas son fabricadas en uniones pn por difusión a alta temperatura, dopadas principalmente con boro y fósforo que modifica la composición de la capa superficial.

El lingote de silicio debe tener una estructura reticular casi perfecta y debe ser de una pureza muy alta para que las celdas sean eficientes, el principal problema que se puede presentar al momento de realizar estas celdas es al momento de cortar las obleas ya que se pierde cristal bueno en forma de aserrín. En la figura 2.9, se muestra el esquema del proceso de cristalización de Czochralski. [22]



**Figura 2.9** Proceso de fabricación de las celdas de silicio monocristalino por el Método de Czochralski.

Fuente: P.J Reddy [22].



A continuación se muestra como ejemplo de la secuencia del proceso de fabricación de celdas de silicio policristalino por la empresa HEBE corporation, que divide su proceso de fabricación en 9 pasos que son [23]:

- Horno de fundición: El primer paso en la producción de silicio (Si) es pasar de la arena a lo que se conoce como silicio grado metalúrgico. Lo que se hace es reducir dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) con carbono en grandes hornos de arco eléctrico a una temperatura superior a  $3000\text{ }^\circ\text{C}$ . [24]
- Horno de difusión: en este horno se realiza la unión pn, se realiza mediante la introducción de impurezas de fósforo en el silicio. [25]
- Sala de limpieza: se realiza la revisión y se procede a limpiar los excesos de las láminas de silicio.
- Línea de procesamiento de las celdas: se realizan los cortes de las láminas de silicio.
- Conexión y soldadura: las celdas se sueldan juntas en cadenas de 10, con un determinado patrón, para luego colocar en la parte de abajo conectores de metal para unir a las celdas. [26]
- Línea de ensamblaje: después de soldar y hacer las conexiones, las celdas son enmarcadas para protegerlas del clima e impactos y se le coloca la caja de conexiones que permite las conexiones entre módulos.
- Laminación: en este parte del proceso se procede a hacer una compresión del módulo, para que este tenga un espesor uniforme.
- Simulación y control de calidad: se le realizan las pruebas pertinentes al módulo y se verifica que cumplan con los requerimientos para su distribución.
- Producto final: se realiza la última inspección, se procede a empacar el producto para ser distribuido a los consumidores.

Estos se observan en la figura 2.10.



**Figura 2.10** Proceso de fabricación de paneles solares fotovoltaicos policristalinos de silicio. Fuente: A. Figueroa [23].

### 2.2.5.2. Celdas de película delgada.

Los módulos de película delgada son construidos depositando láminas muy delgadas de material fotosensible sobre una superficie de bajo costo, como vidrio, acero inoxidable o plástico. Una vez el material depositado está adjunto a la superficie, esta es cortada en múltiples celdas delgadas [6].



Las celdas solares desarrolladas con tecnología de película delgada, que surgieron como alternativa frente a las celdas de silicio monocristalino y policristalino, triplicaron su eficiencia en los últimos 25 años. Tres tecnologías lideran esta actividad: Cobre-Indio-Galio-Diselenio (CIGS), Teluro de cadmio (CdTe) y Silicio amorfo (a-Si) [27].

Lo que motivó la producción de celdas de película delgada fue, y aún es, el potencial que tienen para la producción a alta velocidad y la reducida cantidad de material necesario, lo cual contribuye a la reducción de costos.

La mayor ventaja de la tecnología de película delgada radica en que el esquema de producción de los módulos, en el que se pueden fabricar celdas por lotes y conectarlas en módulos, contrario a las celdas de silicio en la cual es necesario ensamblar cada celda individualmente en el módulo fotovoltaico [28].

El proceso de fabricación de celdas de película delgada tiene cinco pasos comunes [6]:

- Una larga lámina de sustrato es producido. Típicamente está hecha de vidrio, sin embargo otros materiales como el acero flexible, plástico o aluminio son también utilizados.
- El sustrato es recubierto por una capa conductora transparente.
- El material semiconductor es depositado sobre el sustrato o supersustrato. Esta capa puede ser depositada usando diversas técnicas. Deposición física y química por vapor son las más comunes. Para algunas tecnologías (usualmente CIGS, CIS y CdTe) una capa de sulfato de cadmio es también aplicada al sustrato para incrementar la absorción de luz.
- Se aplica una tira de contacto metálico en la parte trasera de la celda usando trazado por láser o técnicas tradicionales de impresión sobre pantallas. La tira de contacto permite que el módulo sea conectado.
- El módulo completo es enmarcado en una carcasa de polímero de vidrio.

Para sustratos flexibles, el proceso de fabricación usado es la técnica roll-to-roll (R2R). Esta permite crear celdas solares en un rollo de plástico flexible u hoja de metal. Usar R2R tiene el potencial de reducir el tiempo de producción, los costos de producción y transporte.

En la figura 2.11 se presenta un diseño esquemático general de los pasos necesarios para construir una celda solar de película delgada [6].



**Figura 2.11** Proceso de fabricación de las celdas de película delgada. Fuente: EPIA [6].

A continuación se procederá a describir las principales celdas solares desarrolladas con ésta tecnología.

#### **2.2.5.2.1. Celdas solares de Teluro de Cadmio.**

El CdTe (Telurio de Cadmio) es un semiconductor de los llamados II-VI, que posee las propiedades óptimas para su utilización en celdas solares, tiene un alto valor del coeficiente de absorción y un ancho de la banda prohibida de 1.42 eV a temperatura ambiente óptimo para el acoplamiento con el espectro de la radiación solar. El hecho de que el CdTe sea un gran absorbente de la radiación solar, permite la utilización de capas delgadas, disminuyendo el costo del dispositivo [10].

Las Celdas de Teluro de Cadmio tienen un grosor que varía de 1 a 30 micrómetros según la fabricación, en la figura 2.12 se observan los diferentes métodos de fabricación de estas celdas:

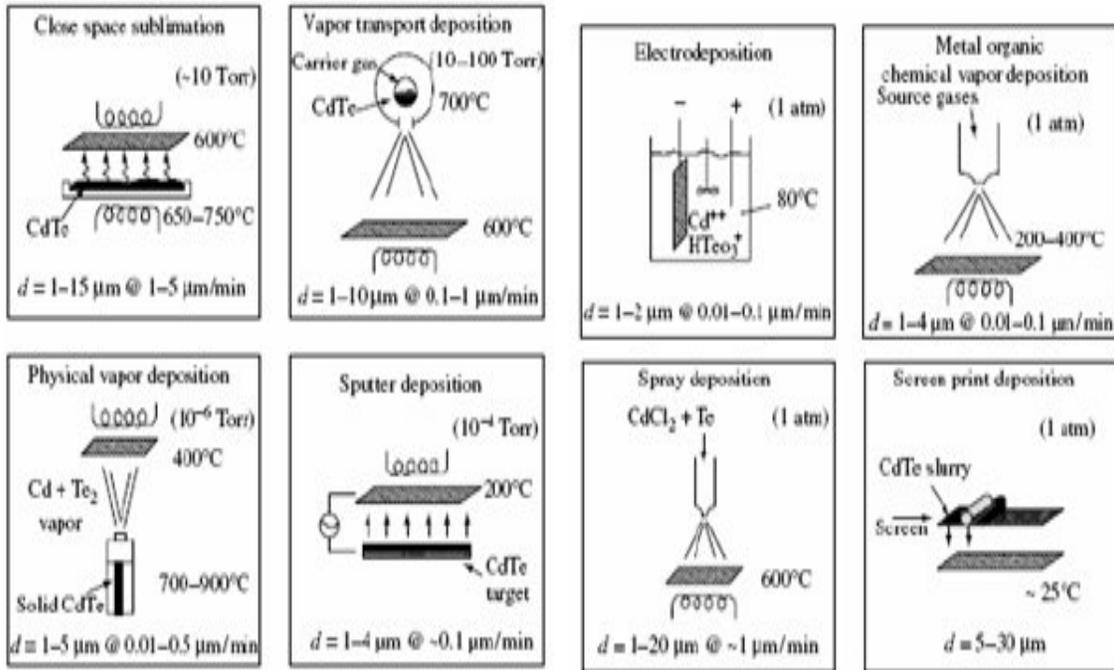


Figura 2.12 Representación esquemática de las técnicas de fabricación por deposición en capa fina de las celdas solares de CdTe. Fuente: L. Peña [29].

Los métodos de fabricación pueden organizarse en tres conceptos químicos [29]:

- 1- Condensación/reacción de los vapores de Cd y  $Te_2$  en una superficie (PVD, VTD, CSS Y deposición catódica).
- 2- Reducción galvánica de los iones de Cd y Te en la superficie (electrodeposición).
- 3- Reacción de precursores en una superficie (deposición de vapor químico metal-orgánico (MOCVD), deposición por spray, etc.).

#### 2.2.5.2.2. Celdas solares de silicio amorfo

Usan semiconductores no cristalinos. En estos materiales el enlace químico de los átomos es semejante al de los cristalinos. Sin embargo, una pequeña y desordenada variación de los ángulos en los enlaces elimina la estructura de red regular. Estos semiconductores amorfos pueden tener propiedades electrónicas aceptablemente buenas suficientes para muchas aplicaciones.



Los átomos de silicio amorfo conservan en gran parte la misma estructura básica del silicio cristalino: cada átomo de silicio está conectado por enlaces covalentes a otros cuatro átomos de silicio en forma de tetraedro [9].

#### **2.2.5.2.3. Celdas solares de Cu (InGa) Se<sub>2</sub>**

Las celdas solares basadas en Cu (InGa) Se<sub>2</sub> han sido a menudo consideradas una de las tecnologías de celdas solares más prometedoras por su capacidad de generación de potencia a un coste reducido. Esto se debe parcialmente a las ventajas de las películas delgadas de bajo coste, con un alto grado de deposición de semiconductor de unas pocas micras de grosor sobre largas áreas y con una fabricación de módulos interconectados monolíticamente. Además, se han mostrado eficiencias muy altas para celdas y módulos solares de Cu (InGa) Se<sub>2</sub>. Las celdas y módulos solares de Cu (InGa) Se<sub>2</sub> han mostrado excelente estabilidad a lo largo del tiempo en pruebas de exterior. Además de sus ventajas potenciales para aplicaciones terrestres de gran superficie, las celdas solares de Cu (InGa) Se<sub>2</sub> han mostrado alta resistencia a la radiación (comparadas a las celdas solares de silicio) y pueden ser hechas muy ligeras sobre sustratos flexibles [9].

#### **2.2.5.3. Celdas solares orgánicas.**

A pesar de los avances en el campo de la industria solar, el coste de la fabricación de celdas fotovoltaicas continúa siendo muy alto para muchas aplicaciones, sobre todo cuando se requieren grandes superficies. Uno de los factores que elevan el precio de estas tecnologías es la necesidad de procesar semiconductores a altas temperaturas en ambientes al vacío. Esto limita la fabricación a procesos por lotes, con la poca rentabilidad que esto conlleva. [9]

Una posible solución es el uso de semiconductores orgánicos, los cuales pueden ser producidos en grandes superficies a temperaturas relativamente bajas, tanto como por métodos al vacío, como por sublimación de material o preferiblemente por procesos con materiales capaces de formar películas como los polímeros. Las celdas solares orgánicas muestran una gran promesa como una tecnología económicamente y ambientalmente amigable debido a sus procesos de fabricación simples y el uso mínimo de material. Sin



embargo, las innovaciones y los avances son necesarios para que las celdas solares orgánicas sean competitivas comercialmente en un futuro. [30]

La reducción de costes tendrá lugar en parte por el bajo coste del poco volumen necesario en las delgadas capas activas de semiconductor, pero más importante por el bajo coste de los otros materiales usados, como los sustratos, y los reducidos costes de fabricación por procesos como la producción “roll to roll”.

La fotoabsorción en estos materiales crea un estado excitado que es confinado normalmente a una molécula o a una región de una cadena polimérica. Esta excitación localizada es conocida como “excitón”. Puede ser considerado tanto como un estado de excitación neutral de una molécula, o, utilizando términos de semiconductores, como un par electrón-hueco, unidos por interacciones de Coulomb y de red. La unión electrón-hueco es bastante fuerte, del orden del 0,5 eV o superior, por lo que a temperatura ambiente ( $kT = 25 \text{ meV}$ ) es raro que ocurra la separación del par.

Se utilizan polímeros conjugados capaces de conducir los electrones. La especial configuración de sus enlaces, alternando dobles y simples, permite la conducción electrónica como semiconductor, obteniendo comportamientos análogos a semiconductores inorgánicos dopados.

Debido a sus propiedades, la extracción de los electrones sólo es posible en grosores menores de 20  $\mu\text{m}$ , aunque se ha intentado hacerla más gruesa para evitar la transparencia y poder aumentar su captura de radiación lumínica. Esto es así debido a que en grosores mayores no se es posible energéticamente separar el par electrón-hueco.

Al tratarse de materiales poliméricos, se pueden fabricar en masa por las tecnologías actualmente utilizadas con estos materiales como la producción “roll to roll”.

Una de las formas de fabricación consiste en sucesivas deposiciones de las distintas capas que lo forman. Se empieza poniendo el contra electrodo transparente (ITO: óxido de estaño



e indio por ejemplo) en el sustrato transparente (cristal, etc.), la capa o capas de semiconductor polimérico (por sublimación al vacío y/o por procesamiento de soluciones) y un electrodo de metal (por deposición al vacío).

Las técnicas de fabricación de celdas solares orgánicas son relativamente simples y pueden ser fácilmente aplicadas para grandes superficies y producciones a gran escala. Además, otras técnicas de recubrimiento por capa delgada normalmente usadas en la industria del plástico, como los procesos “roll to roll”, pueden ser utilizadas para fabricar celdas solares orgánicas. [9]

#### **2.2.5.4. Celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC).**

A diferencia de una celda solar convencional tipo “pn”, el mecanismo de las DSSC no involucran un proceso de recombinación de cargas entre electrones y huecos porque solo se inyectan los electrones desde el fotosensibilizador al semiconductor y no se forma hueco en la banda de valencia del semiconductor. Muchos materiales semiconductores, incluidas formas mono y policristalinas de Si, GaAs, InP y CdS, han sido utilizados como fotoelectrodos. Estos materiales, usados con un electrolito redox apropiado, pueden producir la conversión de la luz solar en corriente con una eficiencia aproximada del 10%. Sin embargo, bajo radiación solar, suele ocurrir la fotocorrosión del electrodo en la solución del electrolito resultando en una celda poco estable. Materiales de óxido semiconductor tienen una buena estabilidad en la solución bajo radiación solar. [9]

Son celdas solares fotoelectroquímicas consistentes en un fotoelectrodo, un electrolito redox y un contraelectrodo. La sensibilización de grandes bandas de gap en materiales de óxido semiconductor como TiO<sub>2</sub>, ZnO y SnO<sub>2</sub> con fotosensibilizadores, como colorantes orgánicos, que pueden absorber luz visible han sido extensamente estudiados desde el desarrollo de la fotografía (s.XIX). En el proceso de sensibilización, los fotosensibilizadores absorbidos en la superficie del semiconductor absorben luz visible y los electrones excitados son inyectados en la banda de conducción de los electrodos semiconductores. [9]



Además, los colorantes orgánicos que fueron usados tenían un estrecho rango de absorción de luz visible, lo que contribuía a un bajo rendimiento de la celda solar. Por lo tanto, para mejorar la eficiencia de la recolecta lumínica y el rendimiento de la celda, los investigadores han seguido dos enfoques: [9]

- Desarrollar fotoelectrodos con una mayor área superficial que puedan absorber una gran cantidad de colorante.
- Sintetizar colorantes con un rango de absorción más amplio.

El diseño y desarrollo de nuevos colorantes orgánicos con grandes coeficientes de absorción en la región cercana al infrarrojo son necesarios para mejorar el rendimiento de las celdas solares sensibilizadas por colorante. [9]

Además, se ha conseguido una estabilidad a larga duración satisfactoria en celdas selladas en pruebas de condiciones suaves (bajas temperaturas sin exposición a rayos UV). [9]

### **2.2.6. Ensayos y pruebas de eficiencia en celdas solares [16]**

El rendimiento de las celdas y módulos solares puede ser descrito por su característica Corriente vs Voltaje (I-V) y por la característica respuesta espectral vs longitud de onda ( $S(\lambda)$ ). El indicador de rendimiento más común es la eficiencia fotovoltaica bajo condiciones estándar SRC (temperatura, irradiancia espectral, irradiancia total). La eficiencia en sistemas fotovoltaicos es la máxima potencia eléctrica dividida entre la irradiancia total. Además de esto debido a que los sistemas fotovoltaicos deben operar entre 20 a 30 años, con una degradación de menos del 1 %, también existen procedimientos para medir la durabilidad de los módulos PV.

#### **2.2.6.1 Condiciones Estándar de Información (Standard Reporting Conditions) [16]**

El rendimiento de los PV en términos de SRC es comúnmente expresado en términos de eficiencia. A nivel de investigación, es internacionalmente aceptado el set de SRC y es esencial prevenir que el investigador ajuste estas condiciones para maximizar la eficiencia. Los procedimientos para medir el rendimiento respecto a las SRC deben ser rápidos,



fáciles, reproducibles y precisos, tanto para investigadores incursionando en el tema hasta para fábricas con metas de producción. La eficiencia de conversión ( $\eta$ ) es calculada a partir de la medición del máximo o pico de potencia PV ( $P_{max}$ ), el área de la celda ( $A$ ), y la irradiancia total incidente ( $E_{tot}$ ):

$$\eta = \frac{P_{max}}{E_{Total}} * 100 \quad (2.8)$$

Las SRC para calificar el rendimiento de las celdas y módulos se muestra en la tabla 2.1

**TABLA 2.1**

**Condiciones estándar para reportar eficiencias en celdas solares y módulos solares (SRC).**

Aplicación	Irradiancia [ $Wm^{-2}$ ]	Espectro Referencia	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
<b>Celdas</b>	1000	Global	25
<b>Módulos, Sistemas</b>	1000	Global	25
<b>Concentrado</b>	>1000	Directo	25
<b>Extraterrestre</b>	1366, 1367	AM0	25, 28

Fuente: A. Luque y S. Hegedus [16]

Es importante tomar en cuenta la temperatura de la celda al momento de determinar la eficiencia de la misma, ya que éste al igual que la reflexión de la luz incidente son variables que afectan de manera crítica la eficiencia de la celda. Optimizar estas variables hacen posible conseguir mejores eficiencias reduciendo, de esta forma, el costo del a energía fotovoltaica. [31]

### 2.2.7 Elementos de un Sistema Fotovoltaico. [22]

En la Figura 2.13 tenemos un esquema de cómo se conforma sistema fotovoltaico, este consiste en:

- Un módulo fotovoltaico.
- Controladores de carga, para regular la potencia de los módulos.
- Sistema de almacenamiento de energía, conformados por baterías.
- Inversor DC/AC.
- Fuente de poder de apoyo (si es necesario).
- Cables, sensores y la estructura física.

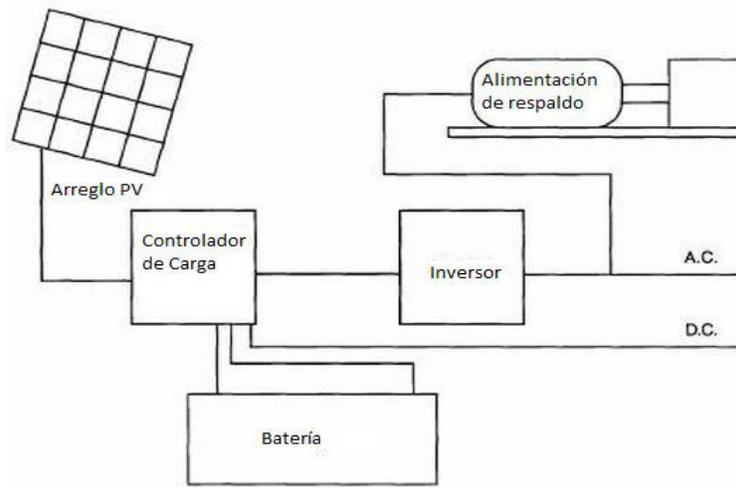


Figura 2.13 Elementos de un Sistema Fotovoltaico. Fuente: P.J Reddy [22]

### 2.2.8 Inversión Inicial de la Tecnología Solar Fotovoltaica

La rentabilidad de un proyecto es una medida que permite conocer de una manera anticipada el resultado global de la operación de un proyecto desde un punto de vista económico. [4]

Generar energía eléctrica con tecnología solar fotovoltaica, tiene asociado en el aspecto económica una fuerte inversión inicial, sin embargo, los costos operacionales y mantenimiento son casi nulos. [4]

### 2.3. Glosario de términos básicos.

**Área de Contacto:** es el área que el contacto óhmico en la superficie tipo p o n de la celda solar para las conexiones del circuito eléctrico. [35]

**Band gap:** es la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción. Está presente en aislantes y semiconductores. Determina cual es la parte del espectro solar, una célula fotovoltaica absorbe.

**Caracterización de materiales:** se refiere al establecimiento de las características de un material determinado a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales, etc.



**Celda solar sensibilizada por colorantes:** produce electricidad mediante un principio foto-electroquímico, cambiando la energía luminosa en energía eléctrica. Se trata de una aplicación de la biónica, cuya función también se denomina celda electroquímica de color.

**Celdas fotovoltaicas:** generan energía eléctrica de la radiación electromagnética del sol, transformándola en energía eléctrica.

**Células solares orgánicas:** producen electricidad a partir de la luz con la ayuda de polímeros semiconductores. Se trata de una tecnología relativamente nueva.

**CIGS:** es el acrónimo en inglés de CopperIndiumGalliumSelenide ( $\text{CuInGaSe}_2$ ), un material semiconductor compuesto de Cobre, Indio, Galio y Selenio. Es utilizado sobre todo por su alta eficiencia fotovoltaica para construir paneles solares, y por su menor coste con respecto del silicio.

**Corriente de Cortocircuito ( $I_{sc}$ ):** es la intensidad que circula con la celda en cortocircuito, con una iluminación determinada y fija. Su valor es directamente proporcional a la energía solar recibida, por lo tanto a la superficie total y al nivel de iluminación.

**Crecimiento Epitaxial:** es uno de los procesos en la fabricación de circuitos integrados. A partir de una cara de un cristal de material semiconductor, o sustrato, se hace crecer una capa uniforme y de poco espesor con la misma estructura cristalina que este. Mediante esta técnica se puede controlar de forma muy precisa el nivel de impurezas en el semiconductor, que son los que definen su carácter (N o P). Para hacer esto se calienta el semiconductor hasta casi su punto de fusión y se pone en contacto con el material de base para que, al enfriarse, recristalice con la estructura adecuada.

**Efecto fotoeléctrico:** consiste en la emisión de electrones por un metal o fibra de carbono cuando se hace incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general)

**Eficiencia de Conversión:** es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una célula solar está conectada a un circuito eléctrico.



**Electrólito redox:** es toda reacción química en la cual existe una transferencia electrónica entre los reactivos, dando lugar a un cambio en los estados de oxidación de los mismos con respecto a los productos.

**Factor de Llenado:** se define como la relación entre el máximo punto de potencia dividido entre el voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente en cortocircuito ( $I_{sc}$ ).

**Panel:** es la unidad de mayor tamaño de combinación de celdas solares o subpaneles que está técnicamente diseñado para su fabricación y manejo y éste establecerá las bases para las pruebas de rendimiento eléctrico. [35]'

**Recombinación:** es un fenómeno de que un electrón ocupe la posición dejada por otro. [35]

**Sistema Fotovoltaico:** Es el sistema por el cual se genera la electricidad por la radiación electromagnética (luz visible, infrarrojos, ultravioletas).

**Teluro de cadmio (CdTe):** es compuesto cristalino formado por cadmio y telurio. Se utiliza como ventana óptica de infrarrojos y como material de célula solar. Por lo general se intercala con sulfuro de cadmio para formar una célula fotovoltaica de unión pn.

**Teravatio (TW):** Unidad de potencia, el prefijo Tera indica un factor de  $10^{12}$ , en este caso serian  $10^{12}$  vatios.

**Vatio (W):** es la unidad de potencia del Sistema Internacional de Unidades. Es el equivalente a 1 julio por segundo (1 J/s) y es una de las unidades derivadas. Expresado en unidades utilizadas en electricidad, un **vatio** es la potencia eléctrica producida por una diferencia de potencial de 1 voltio y una corriente eléctrica de 1 amperio (1 voltiamperio).

**Vatio Pico (Wp):** El vatio pico define la potencia de producción fotovoltaica de un módulo con una temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  bajo los rayos solares de  $1\text{ kW/m}^2$  (insolación recibida a las 12:00 horas en una superficie perpendicular al sol). 1 vatio pico produce una potencia eléctrica de 1 vatio bajo una insolación de  $1\text{ kW/m}^2$



**Voltaje de vacío ( $V_{oc}$ ):** esta magnitud es la diferencia de potencial entre los bornes de la celda en ausencia de consumo, con una iluminación fija y a una temperatura determinada. Su valor depende de la unión utilizada y varía muy poco con la intensidad luminosa.



## Capítulo III: Marco Metodológico

En esta sección del trabajo de investigación se indica a qué tipo pertenece la investigación, describe el conjunto de pasos ordenados para llevarla a cabo y que permitieron la obtención y clasificación de la información y la forma de organizarla para obtener la solución al problema planteado.

### 3.1 Modalidad de la Investigación

**Hernández Sampieri Roberto, Fernández Collado Carlos y Baptista Lucio Pilar** (2010; pág. 80) en su libro titulado Metodología de la Investigación, plantea este tipo de trabajo como un estudio de alcance **descriptivo**, el cual busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis independiente. Es decir, únicamente pretende medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas. El investigador debe definir qué se va a medir y cómo lograr la precisión de esta medición.

En el caso de la presente investigación se van a describir las distintas tecnologías en celdas solares y los procedimientos factibles para la elaboración de las mismas, entre las variables que se van a estudiar están presente los materiales, procesos de elaboración, eficiencia y costos de fabricación de las celdas objeto de estudio.

Además según el mismo autor se define la investigación con un diseño transeccional descriptivo, ya que se pretende realizar descripciones comparativas entre las diferentes variables y procesos constructivos de las distintas tecnologías en celdas solares.



## 3.2 Procedimiento Metodológico

En esta sección se busca describir de manera detallada las fases metodológicas de ésta investigación.

**Fase 1: Identificación de los tipos de celdas solares fabricadas a nivel mundial y la tecnología de celdas solares disponibles en Venezuela, y la elaboración de la lista de materiales que la conforman, identificación de sus procesos constructivos y rendimiento energético por tipo de celda.**

Esta fase comprende las siguientes acciones y resultados:

1.1 Descripción de los avances en materia de celdas solares logrados a nivel mundial, mediante información disponible en fuentes bibliográficas tales como revistas, libros y trabajos de investigación asociados al tema. El resultado se presentará en forma simplificada mediante tablas comparativas con las distintas tecnologías en celdas solares, para contrastar las siguientes características: materiales, proceso de fabricación (costos), eficiencia teórica, tiempo en el mercado, porcentaje del mercado global en ésta área, aplicaciones.

1.2 Identificación de los tipos de tecnologías usadas en Venezuela y en qué medida, para ello se contará de entrevistas a expertos en el área. Alguna de las instituciones encargadas de la investigación e implementación de estos sistemas son: FUNDAELEC y en el MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA LA ENERGÍA ELÉCTRICA, departamento de energías renovables. El resultado se presentará mediante el uso de tablas y gráficas que muestren el uso de las distintas tecnologías, y se compare con otros tipos de generación de energía eléctrica.

1.3 Elaboración de un análisis preliminar que contraste el uso de distintas tecnologías en celdas solares a nivel mundial y en el país. El resultado será mostrado mediante el uso de gráficas que permitan visualizar de manera sencilla las semejanzas y diferencias.



## **Fase 2: Análisis de las etapas, costos, equipos y materiales de los procesos de fabricación de una celda solar según su tecnología.**

Esta fase comprende las siguientes acciones y resultados:

2.1 Identificar las diferentes etapas en el proceso de fabricación de cada tipo de celda. Además se identificará qué equipos y que materia prima se necesita en cada una de las etapas del proceso. Para ello se contará con la información recopilada en la fase 1.

2.2 Verificar la disponibilidad de los materiales, reactivos y equipos necesarios para la elaboración de la celda solar, para ello se contactará con empresas proveedoras de, los materiales y equipos necesarios para la elaboración de las celdas, de esta manera estimar disponibilidad. Ubicar a proveedores para la adquisición de aquellos materiales, reactivos y equipos no disponibles en el país.

2.3 Estimar de los costos de la fabricación de cada tipo de celda solar. Los mismos son estimados de acuerdo a información suministrada por instituciones encargadas de consolidar información sobre el mercado de sistemas fotovoltaicos a nivel mundial.

## **Fase 3: Propuesta de un diseño y procedimiento para la elaboración de un módulo constituido por celdas solares, con base a un análisis comparativo que determine la tecnología más favorable para el potencial de fabricación de Venezuela.**

Esta fase comprende las siguientes acciones y resultados:

3.1 Usando la información recogida en las fases previas de esta investigación se hará un análisis comparativo cuyo diseño se muestra en el anexo I.

3.2 En base a los resultados obtenidos del análisis comparativo realizado, se propondrá un diseño de un módulo fotovoltaico que comprenderá los siguientes aspectos:

- Planos detallados del módulo a construir.



- Descripción del módulo indicando variables de potencia y rendimiento estimado del módulo.
- Conectividad de las celdas que componen el módulo.
- Listado de materiales.

En la figura 3.1 se muestra el esquema donde se resumen el contenido de las fases metodológicas.

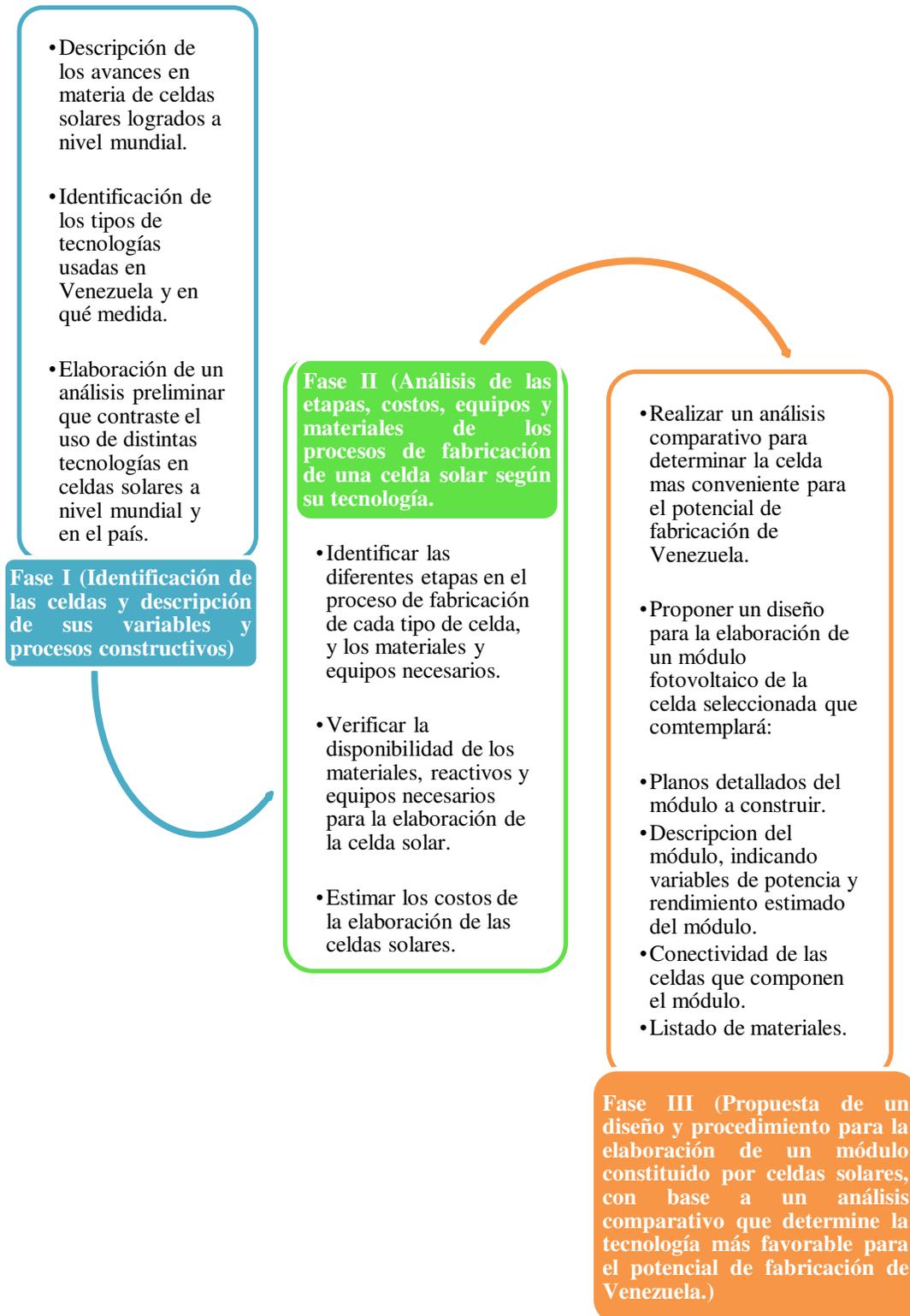


Figura 3.1 Esquema resumen de las fases metodológicas de ésta investigación.



### 3.3 Unidad de estudio y análisis

**Unidad de Análisis:** Para ésta investigación la unidad de análisis son las diferentes tecnologías en celdas solares.

**Población:** Enmarca los procesos de fabricación de las distintas celdas solares y sus características constructivas.

**Muestra:** Son aquellas tecnologías que posean una vida útil mayor de 10 años sin disminuir su rendimiento a menos de un 80% y sean comerciales.

### 3.4 Técnicas de recolección, análisis, interpretación y presentación de la información.

En esta sección se presentan las técnicas de recolección y análisis de datos que se usarán en esta investigación así como las formas de presentar los resultados.

#### 3.4.1 Instrumentos de recolección de datos

Se usarán referencias bibliográficas, se consideran como tales: Eventos (Congresos, Seminarios, Jornadas, Taller, etc.), libro, manual, monografía, leyes, normas, prensa, revista científica, tesis o trabajos de ascensos, informes técnicos de las empresas, folletos y obras referenciales.

Además para la Fase 1.2 se usarán consultas a expertos en el área y a funcionarios e investigadores de instituciones encargadas de la investigación e implementación de sistemas fotovoltaicos tales como: FUNDAELEC y en el MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA LA ENERGÍA ELÉCTRICA, departamento de energías renovables.

En la Fase 2 se consultarán mediante medios electrónicos a empresas encargadas de fabricar distintas tecnologías de celdas solares, la herramienta que se usará para determinar la lista de materiales y equipos necesarios se presenta en el Anexo I.



### 3.4.2 Técnicas de Análisis de datos

Una vez conformados los datos de la Fase I se presenta la información de forma que ésta se pueda visualizar de una manera más sistemática y resumida. Los datos de interés se organizarán dependiendo del tipo de variables.

Por otra parte, a los datos recopilados en ésta investigación se le aplicará un análisis descriptivo de variables tales como: tipo, materiales, técnicas de fabricación, y eficiencia, tiempo en el mercado, costo estimado, uso y porcentaje de mercado en el país y a nivel mundial. Posteriormente se presentará mediante tablas y gráficas donde se pueda visualizar de manera sencilla los resultados del análisis.

A continuación, será necesario un análisis de toma de decisiones en la fase 3, donde se evalúen las ventajas y desventajas en relación a la disponibilidad de los materiales, y el costo de los procedimientos de fabricación analizados en la fase 2, para determinar de ésta forma, cual es el modelo de celda más adecuado para su futura fabricación en Venezuela. El diseño de la herramienta que se usará para realizar el análisis comparativo se presenta en el anexo I.



## Capítulo IV: Análisis y Discusión de los Resultados

En el siguiente capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado. Se realiza un análisis comparativo de las distintas tecnologías en celdas solares con el objetivo de determinar cuál es la más adecuada para ser fabricada en el país, los campos a comparar se muestran en el anexo I. A continuación, se muestra el diseño y el procedimiento de elaboración de dicho modulo como producto final de éste trabajo.

### **4.1 Identificación de los tipos de celdas solares fabricadas a nivel mundial.**

En esta sección se identifican los principales tipos de celdas solares fabricadas a nivel mundial, la tecnología de celdas solares disponibles en Venezuela, la elaboración de la lista de materiales que la conforman, identificación de sus procesos constructivos y rendimiento energético por tipo de celda. Se describen las tecnologías más relevantes en celdas solares a nivel mundial, y la presencia de las mismas en el mercado venezolano. Además, se muestra mediante esquemas, las características de cada tipo de celda, como lo son: material, proceso de fabricación, eficiencia comercial, evolución en el mercado, porcentaje de mercado global y aplicaciones.

#### **4.1.1 Descripción de los avances en materia de celdas solares.**

En esta fase se describen los avances en materia de celdas solares logrados a nivel mundial, mediante información disponible en fuentes bibliográficas tales como revistas, libros y trabajos de investigación asociados al tema. El resultado se presentará en forma simplificada mediante tablas comparativas con las distintas tecnologías en celdas solares, para contrastar las siguientes características: materiales, proceso de fabricación (costos), eficiencia teórica, tiempo en el mercado, porcentaje del mercado global en ésta área, aplicaciones.

Como se expuso en el capítulo II, los avances en celdas solares en el mundo han sido notorios en la última década, en la figura 4.1 se puede observar la clasificación de las celdas solares, en la actualidad existen 3 categorías de celdas solares, que son: Celdas solares de silicio, Celdas solares de capa delgada y celdas solares de tercera generación.



Figura 4.1 Clasificación de las celdas solares.

Un análisis del estado de desarrollo en el cual se encuentran estas tecnologías se muestra en la curva en S que se observa en la figura 4.2.

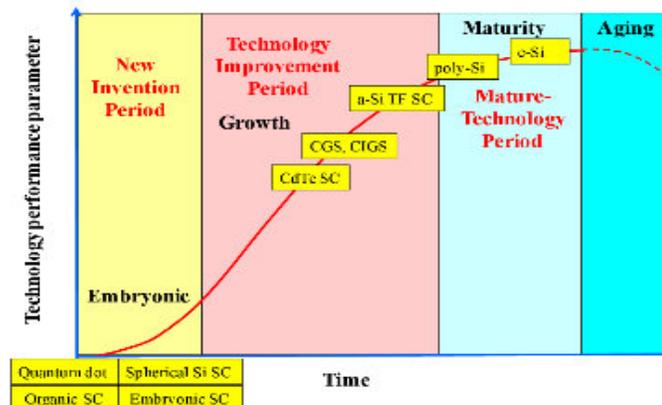


Figura 4.2 Divergencia en curva en S de las diferentes tecnologías en celdas solares. Fuente: Y. Nakata [46]

Debido a que las celdas solares de tercera generación, como las que se observan en la franja amarilla de la figura 4.2, se encuentra en una etapa de investigación y desarrollo, para el



objeto de este trabajo se describirán las celdas solares de silicio y las celdas solares de capa delgada.

Sin embargo, es importante mencionar las características más resaltantes de las tecnologías de tercera generación son:

- Celdas solares Orgánicas y Sensibilizadas con pigmentos: Ambas han sido objeto de mucha investigación y desarrollo en los últimos años, sin embargo su expectativa de vida es muy baja (3 a 5 años) pero el costo de manufactura es bajo en relación con su eficiencia. Se está implementando su uso en dispositivos móviles, como celulares, tiendas de campaña, y techos de los automóviles para alimentar sistemas de sonido o aire acondicionado. [47]
- Celdas solares híbridas: consisten en la unión de una celda de silicio cristalina con una celda de silicio amorfo. Demuestra un alto ratio costo de manufactura contra eficiencia. Actualmente, Sanyo una de las más grandes manufactureras de celdas solares en Japón ha desarrollado una celda híbrida con eficiencia de 21% en laboratorio llamada HIT (HeteroJuntionIntrinsicThin film Solar Cell). Aun se encuentra en período de investigación y desarrollo para su próxima comercialización. [40]

A continuación se presentan la descripción de las principales características de cada tecnología de celda solar fotovoltaica.

### **Celdas solares de Silicio.**

Las celdas de silicio son la más antiguas y con más presencia en el mercado, desde su aparición el año de 1954, se han convertido en la tecnología más utilizada. Las celdas solares de silicio entran en dos categorías, el silicio monocristalino y el silicio policristalino. A continuación se describirán las características de esta categoría.

### **Celdas Solares de Silicio Monocristalino:**

#### **Materiales:**

El principal material es el silicio, este elemento es el segundo más abundante en la tierra y se encuentra mayormente en la arena o Cuarzita, pero la arena tiene demasiadas impurezas

para ser tratada para obtener el silicio, como se aprecia en la figura 4.3 el silicio pasa por procesos que permiten la purificación del material desde los granos de Cuarzita con un contenido desde un 90% de Silicio, hasta el silicio de alta pureza que es el utilizado para la producción de celdas solares.



**Figura 4.3 Producción del silicio de alta pureza a partir de Cuarzita.**

### **Proceso de Fabricación:**

El proceso de fabricación consiste en tres etapas: la fabricación del silicio, cristalización y fabricación de la celda. Los precios de los equipos y materiales necesarios serán detallados en la sección 4.2.

La primera etapa es la fabricación del silicio a partir de la Cuarzita que se somete a procesos de purificación hasta obtener el silicio de alta pureza la segunda etapa es la cristalización para la cual se utilizan diferentes métodos pero el más utilizado es el método de Czochralski, y la tercera etapa es la fabricación de la celda donde se realiza el corte del lingote de silicio producto de la cristalización para formar celdas de aproximadamente 300 mm, en donde se pierde aproximadamente 20% de Silicio en forma de polvo.

### **Eficiencia:**

La eficiencia comercial de las celdas de Silicio Monocristalino según el EPIA [6] está entre 16-22% sin embargo los niveles de eficiencia alcanzados en laboratorio según el NREL son de 24,7%. [20]

### **Evolución en el mercado:**

A pesar de que se inventaron en 1954, esta tecnología fue comercializada tiempo después y ha dominado el mercado junto a las celdas de silicio policristalino por los últimos 30 años [6]. Para el año 2001 representa 35,17 % del mercado global [39].

## Aplicaciones:

Las aplicaciones más comunes de este tipo de celda son:

- Iluminación (Calles, Avenidas)
- Electrificación Rural (Edificios, Residencias, Casas)
- Comercial

En la figura 4.4 se presenta el resumen de las principales características de las celdas de Silicio Monocristalino.

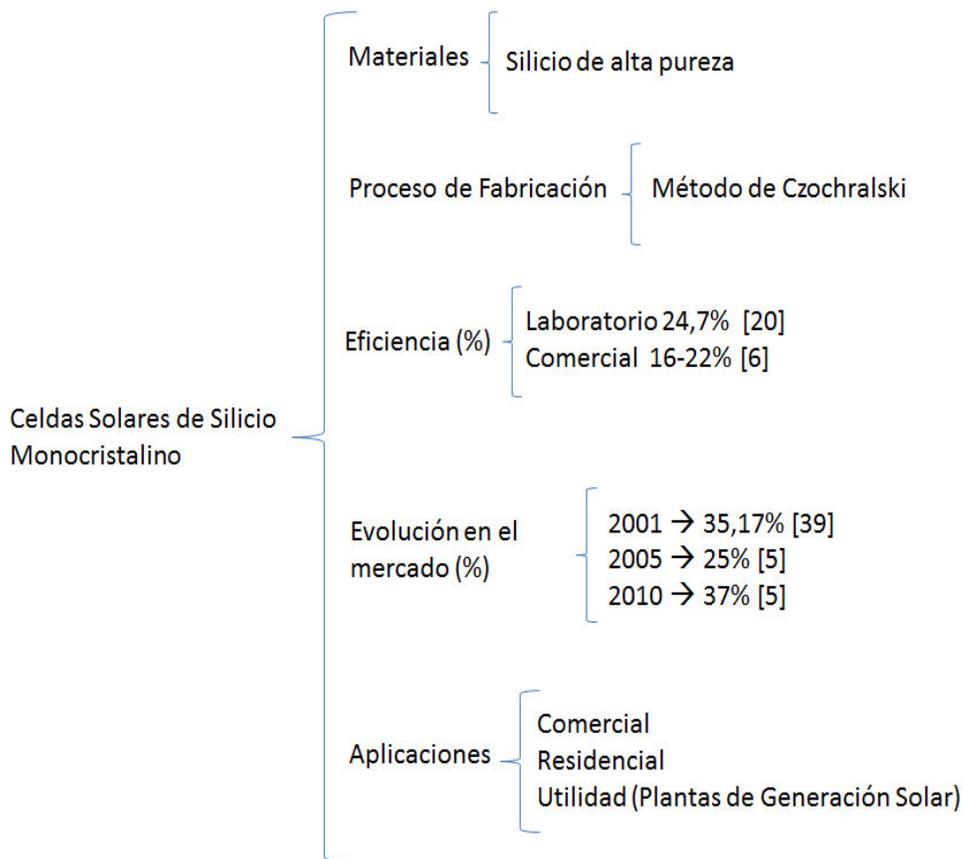


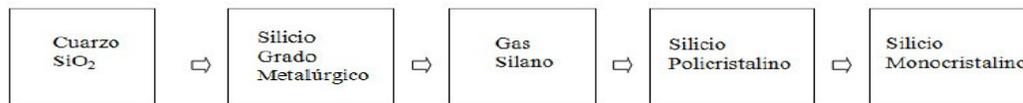
Figura 4.4 Resumen de las celdas solares de Silicio Monocristalino.

## Celdas Solares de Silicio Policristalino:

### Materiales:

Al igual que las celdas de Silicio Monocristalino, el principal material es el silicio, los procesos previos a la obtención del Silicio Policristalino son, la reducción del cuarzo, en la

cual se obtiene el silicio de grado metalúrgico con una pureza de 98%, después se obtienen los gases triclorosilano ( $\text{SiHCl}_3$ ) y silano ( $\text{SiH}_4$ ) que son los gases del silicio metalúrgico, para finalmente realizar la reducción y pirolisis del silano y así obtener el Silicio Policristalino [43]. Mediante el método de Czochralski se puede obtener el Silicio Monocristalino a partir del Policristalino. En la figura 4.5 se observa el proceso de producción de silicio policristalino.



**Figura 4.5 Producción del silicio policristalino [43]**

### **Proceso de Fabricación:**

En el capítulo II del trabajo de grado se mencionaron los pasos utilizados por la empresa HEBE para la fabricación de los paneles de silicio policristalino[23]. De los cuales tomaremos los primeros 4 que son los pasos en donde se elaboran las celdas de silicio policristalino, estos son:

- Horno de Fundición
- Horno de Difusión
- Sala de Limpieza
- Línea de procesamiento de las celdas

Estos procesos al igual que los equipos utilizados serán detallados en el punto 4.2.

### **Eficiencia:**

La eficiencia comercial de las celdas de Silicio Policristalino según el EPIA [6] está entre 14-18% sin embargo los niveles de eficiencia alcanzados en laboratorio según el NREL son de 20,4%. [20]

### **Evolución en el mercado:**

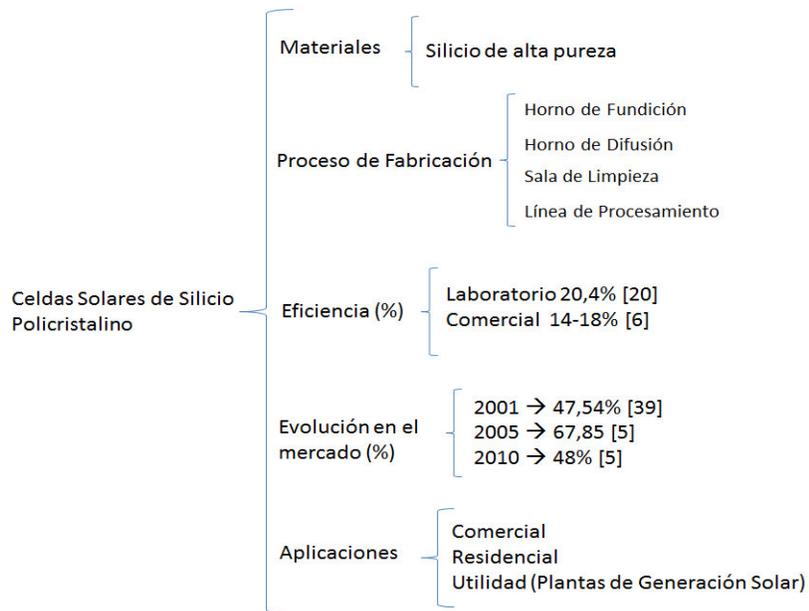
Esta tecnología ha dominado el mercado junto a las celdas de silicio monocristalino por los últimos 30 años [6]. Para el año 2001 representa el 47,54 % del mercado global [39].

## Aplicaciones:

Las aplicaciones más comunes de este tipo de celda son:

- Iluminación (Calles, Avenidas)
- Electrificación Rural (Edificios, Residencias, Casas)
- Comercial

En la figura 4.6 se presenta el resumen de las principales características de las celdas de Silicio Policristalino.



**Figura 4.6 Resumen de las celdas solares de Silicio Policristalino.**

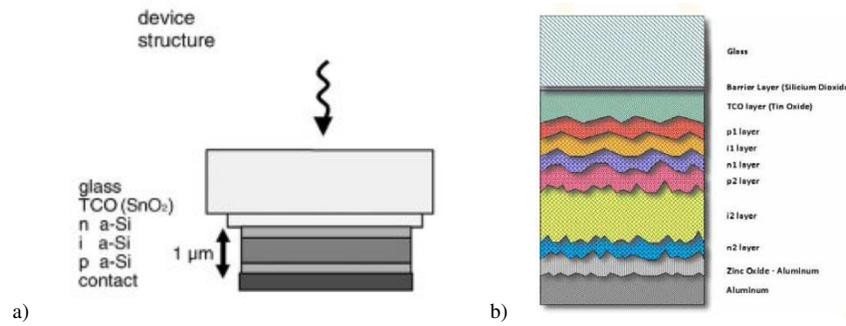
## Celdas de capa delgada.

Las celdas solares de capa delgada, también llamadas celdas solares de segunda generación son menos costosas en comparación a las celdas de silicio, esto debido a que se usa menos material y procesos de manufactura más sencillos. Son ejemplo de ésta tecnología las celdas solares de silicio amorfo(a-Si), las celdas solares de Teluro de Cadmio (CdTe) y las celdas solares de Cobre, Indio, Galio y Selenio (CIGS).

## Celdas Solares de Silicio Amorfo

### **Materiales:**

El Silicio Amorfo es una Aleación de Silicio con Hidrógeno[39]. El sustrato en el que es depositado es vidrio con una capa de Oxido de Estaño (TCO) el cual sirve de capa conductora. En vista de que se descubrió que las celdas de silicio amorfo simple (Figura 4.7a) reducen sus niveles de eficiencia con la exposición prolongada al sol (efecto Stabler y Wronski), se desarrollaron celdas de silicio amorfo multiunión, para reducir el efecto degenerativo y mejorar los niveles de eficiencia (Figura 4.7b).



**Figura 4.7 Estructura de una celda de Silicio Amorfo a) simple. Fuente: A. Goetzberger [39] b) multiunión. Fuente: Green Solar [45]**

### **Proceso de Fabricación:**

Estas celdas se obtienen mediante la deposición de capas muy delgadas de silicio amorfo sobre superficies de vidrio o laminas de acero inoxidable, estas por su parte sufren un proceso de deposición de oxido de estaño que sirve como capa conductora.

Los procesos de deposición usados, el método de obtención del silicio amorfo y los materiales necesarios para la elaboración de este tipo de celda serán descritos en el punto 4.2 del presente trabajo de grado.

### **Eficiencia:**

La eficiencia comercial de las celdas de Silicio Amorfo según el EPIA [6] está entre 4-8% sin embargo los niveles de eficiencia alcanzados en laboratorio según el NREL son de 13,4%. [20]

### Evolución en el mercado:

Aparecieron en la década de 1960, en 1976 fue publicado el primer documento de esta tecnología[39] y fue reportado por Carlson y Wronski, solo un año más tarde Stabler y Wronski descubrieron que la luz produce un efecto de degradación en este tipo de celda, disminuyendo la eficiencia debido a la prolongada exposición solar[44], 5 años después las celdas de Silicio Amorfo han sido la tecnología más utilizada para aplicaciones sencillas como lo son las calculadoras y relojes solares, debido a su bajo costo de fabricación en comparación con otros tipos de celdas solares, para 1985 estas tenían una presencia del 25%[6]. Para el año 2001 representaba 8,30 % del mercado global [39].

### Aplicaciones:

Las aplicaciones más comunes de este tipo de celdas son:

- Calculadoras Solares
- Relojes Solares
- Iluminación de Edificios

En la figura 4.8 se presenta el resumen de las principales características de las celdas de Silicio Amorfo.



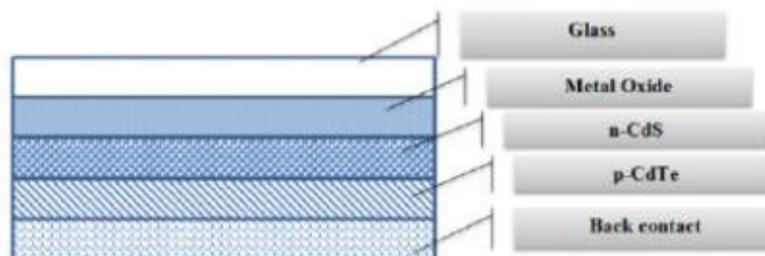
Figura 4.8 Resumen de las celdas solares de Silicio Amorfo.

## Celdas Solares de Teluro de Cadmio

Por muchos años las celdas solares de Teluro de Cadmio (CdTe) han sido una de las tecnologías en celdas solares más prometedoras por su bajo costo, alta eficiencia, diversidad de procesos de manufactura y su capacidad de producción a gran escala. Actualmente este tipo de celdas son las que poseen el precio más bajo por vatio generado, usan la menos cantidad de material, y permite procesos de manufactura en líneas de producción que permite la fabricación de módulos tiempos menores a otras tecnologías de celdas solares.

### **Materiales**

Las celdas solares de capa delgada, se caracterizan en general por ser formadas por un sustrato que es recubierto con múltiples capas de material semiconductor. Generalmente posee una capa de óxido de indio estaño (ITO) que otorga la propiedad de conductor al sustrato de vidrio, seguido de una capa de Sulfuro de Cadmio (CdS) como semiconductor tipo n y posteriormente una capa de Teluro de Cadmio (CdTe) como semiconductor tipo p. Por último es necesario una capa que sirva de contacto trasero (Back Contact) que permita la conexión de las celdas cuando integren el módulo, este contacto en las celdas de CdTe puede ser de grafito (C) dopado con Te, y plata (Ag), o con una capa de Telurio de Zinc dopado con cobre y Ti (ZnTe:Cu/Ti), evitando así, una reacción química indeseada con la capa de CdTe. En la figura 4.9 se observa una vista de la sección transversal de una celda de CdTe, donde se muestra la distribución de las capas. [40,41]



**Figura 4.9** Vista de corte transversal de una celda de CdTe. Fuente: V.V Tyagi [40].



## **Proceso de Fabricación**

Existen múltiples técnicas para la fabricación de las celdas solares, éstas varían en el método de deposición que se usa para aplicar las diferentes capas. Entre las técnicas más comunes son las técnicas de deposición física de vapor (PVD), donde la deposición de las capas se obtiene transportando físicamente los átomos en estado gaseoso desde la fuente hasta el sustrato y las técnicas de deposición química de vapor, donde la deposición ocurre por una reacción química en la superficie del sustrato [6].

El proceso de fabricación que se presenta en el trabajo es el usado por L.R Cruz [41] en donde describe un proceso de fabricación en línea, usando un proceso de deposición en estado cerrado (CSS), un técnica de deposición física de vapor muy usado para la fabricación de celdas de CdTe, éste se detallará en la sección 4.2, al igual que la estimación del costo de fabricación, de los equipos y materiales.

## **Eficiencia**

La eficiencia comercial de las celdas de CdTe según el EPIA [6] es del 10-11% sin embargo los niveles de eficiencia alcanzados en laboratorio según el NREL es de 16,5%. [20]

## **Evolución en el mercado.**

Esta tecnología ha tenido en la última década un crecimiento significativo en el porcentaje del mercado global que representa. Para el año 2000 representaba menos del 1 % del mercado global [39], para el 2005 este porcentaje se incrementó a 2 % y solo 5 años después ya representa un 13% del mercado global [6]. Para el año 2011 solo existen 10 compañías registradas a nivel mundial que trabajen este tipo de tecnología pero manejan grandes volúmenes de producción de celdas, por ejemplo First Solar [40]. En la figura 4.16 se muestra la evolución del porcentaje del mercado de esta tecnología en la última década.

## **Aplicaciones**

Estas celdas son mayormente usadas en la construcción de plantas de generación, debido a su rápida producción y bajo costo. La empresa First Solar (anexo III), líder en producción

de ésta tecnología, ha diseñado proyectos de plantas de generación de más de 500 MW, como lo es Topaz Solar Farm en California, Estados Unidos, que contará con más de 9000 módulos de celdas solares de CdTe.

En la figura 4.10 se presenta un esquema resumen de las principales características de las celdas de CdTe.

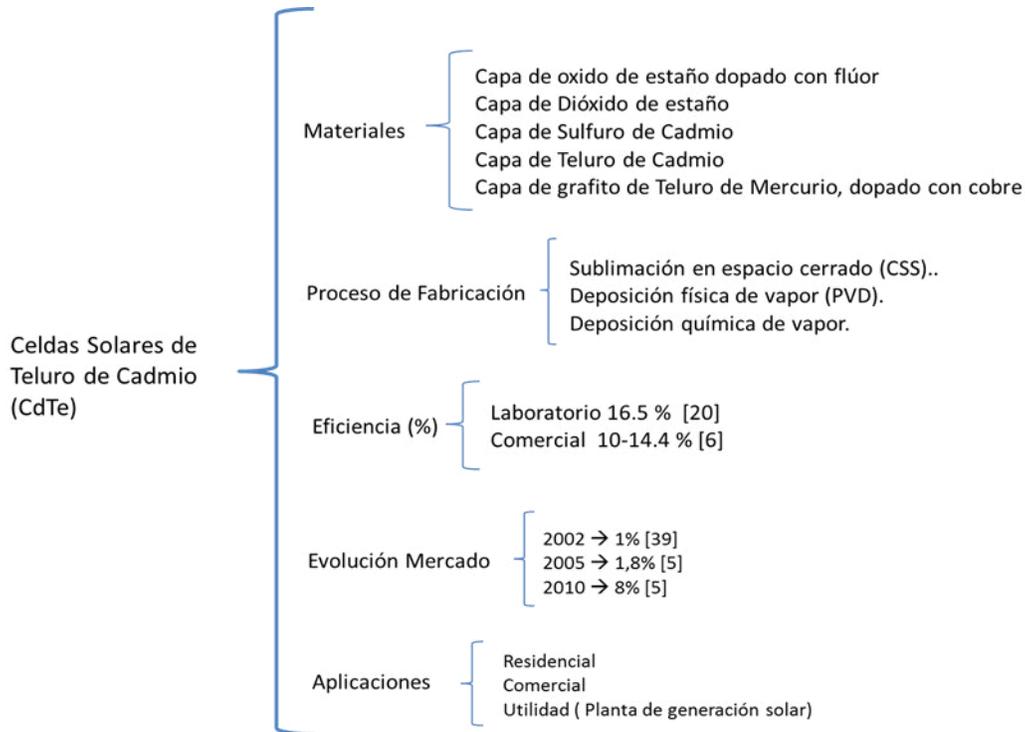


Figura 4.10 Resumen de las celdas solares de Teluro de Cadmio (CdTe).

## Celdas Solares de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS)

### **Materiales**

Usando como modelo de fabricación el empleado por K. Matsunaga [42] en el caso de las celdas solares de CIGS, el sustrato recomendado es laminas de vidrio de baja alcalinidad, de resto, la estructura de la celda consta de una capa de molibdeno como contacto posterior (back contact), una capa de Cobre-Indio-Galio-Diselenio (CIGS) como absorbente y por ultimo un contacto frontal de ZnO:Al (frontContact), con grosores de 0.4 1.4 y 0.6 micrómetros respectivamente. En la figura 4.11 se muestra la estructura de la celda de capa

delgada de CIGS. Como capa tipo n, en este proceso se ha sustituido el común Sulfuro de Cadmio por Sulfuro de Indio, por razones de ecológicas.



Figura 4.11 Vista de corte transversal de una celda de CIGS. Fuente: K. Matsunaga [42]

### Proceso de Fabricación

Para lograr depositar las capas de material semiconductor en el sustrato hay una variedad de métodos como son:

- Pulverización catódica (Sputtering)
- Impresión por “tinta” (‘Ink’ Printing)
- Galvanoplastia (Electroplating)

Sin embargo, el material que se deposita es un precursor metálico de 3 Cobre-Galio-Indio (CIG). Luego es necesario un proceso de Selenización con  $H_2S$  para terminar de formar la capa de CIGS. En el proceso de fabricación descrito por K.Matsunaga [42] se usa pulverización catódica por corriente directa (sputtering DC), un proceso de Selenización y un baño químico. La descripción del proceso de fabricación será descrita con más detalles en el punto 4.2.

Una alternativa a este proceso es realizar la deposición de los 4 elementos mediante coevaporación, sin embargo es proceso lento y además es necesario un cuidadoso estudio de los valores de las fuentes de evaporación para garantizar una alta eficiencia cuando el producto esté terminado. Este proceso es más usado en laboratorios que para la producción a gran escala.



## **Eficiencia**

La eficiencia comercial de las celdas de CIGS según el EPIA [6] es del 12.1% sin embargo los niveles de eficiencia alcanzados en laboratorio según el NREL son de 20.3%.[20].

## **Evolución en el mercado.**

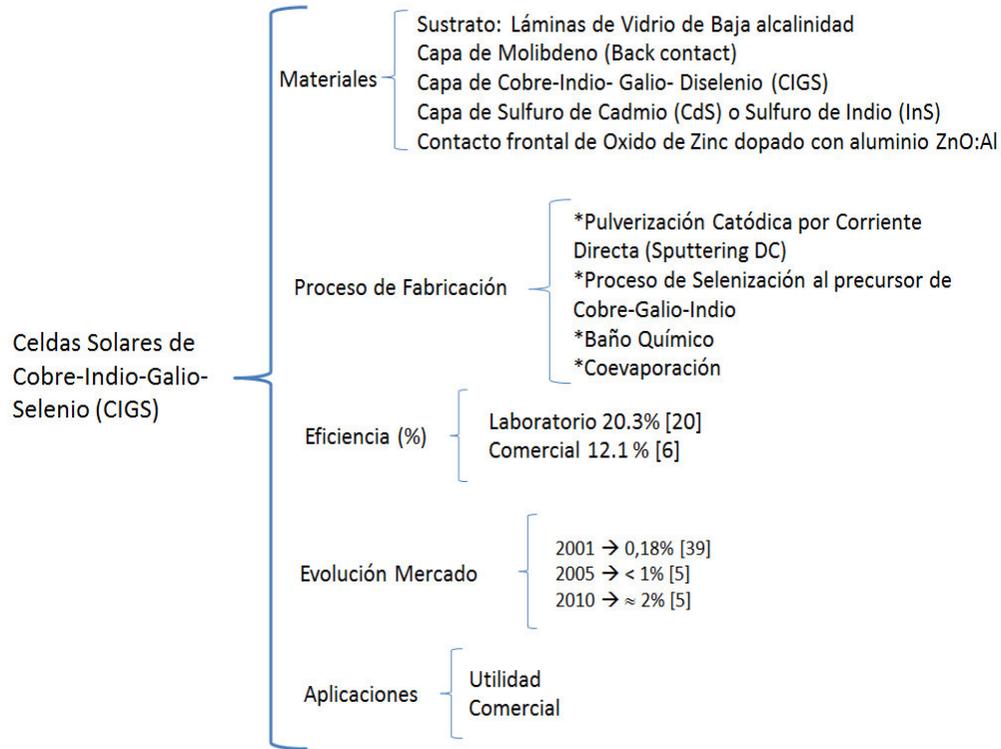
Esta tecnología es relativamente reciente, y debido al incremento en la demanda de energía fotovoltaica y a las mejoras en los niveles de eficiencia producidos en los últimos 5 años, esta tecnología ha empezado a tomar un porcentaje del mercado global desde el 2010. Para el año 2011 solo existen 59 compañías registradas a nivel mundial que trabajen este tipo de tecnología [40]. En la gráfica 4.16 se puede observar como a partir del año 2010 el porcentaje del mercado de las celdas CIGS empieza a crecer y se estima que siga incrementando.

## **Aplicaciones**

Las plantas de energía solar a nivel industrial son el segmento más grande y que más rápido está creciendo en un momento en el que el coste normalizado de la energía solar fotovoltaica iguala al de la generación de energía convencional en todo el planeta. Esto trae como consecuencia que surjan empresas que empleen tecnologías, como celdas fotovoltaicas CdTe y CIGS, que permitan una rápida producción para proyectos de gran escala. La empresa Nanosolar presentada (Anexo III) es una de las principales exponentes de esta tecnología en los Estados Unidos.

Esta tecnología también se emplea en aquellos comercios con techados medianos o grandes para aprovechar el espacio instalando módulos fotovoltaicos para aprovechar la energía eléctrica y de esta manera reducir costos.

En la figura 4.12 se muestra un resumen de las principales características de las celdas de Cobre-Galio-Indio-Selenio.



**Figura 4.12 Resumen de las celdas solares de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS).**

En las Tabla 4.1 y 4.2 se muestran las principales características de las distintas tecnologías en celdas solares fotovoltaicas.

**TABLA 4.1**  
**Resumen de diferentes tecnologías en celdas solares. Parte 1**

Tipo de celda	Eficiencia(%)	Porcentaje del mercado (%)	Aplicaciones
Silicio Monocristalino	Laboratorio 24,7% Comercial 16-22%	2001 --> 35,17% 2005 --> 25% 2010 --> 37%	Electrificación rural Iluminación
Silicio Policristalino	Laboratorio 20,4% Comercial 14-18%	2001 --> 47,54% 2005 --> 67,85% 2010 --> 48%	Electrificación rural Iluminación



**TABLA 4.1**  
**Resumen de diferentes tecnologías en celdas solares(Continuación)**

Tipo de celda	Eficiencia (%)	Porcentaje del mercado (%)	Aplicaciones
Silicio Amorfo	Laboratorio 13,4% Comercial 4-8%	2001 --> 8,30 % 2005 --> 3,57 % 2010 --> 4%	Relojes Solares Calculadoras Solares Electrificación de Edificios
Teluro de Cadmio	Laboratorio 16,5% Comercial 10-14.4%	2001 -->1 % 2005 --> 1.8 % 2010 --> 8 %	Residencial Comercial Generación a gran escala
Cobre-Galio-Indio-Selenio (CIGS)	Laboratorio 20.3% Comercial 12.1%	2001 --> 0.18 % 2005 -->< 1% 2010 --> 2 %	Residencial Comercial Generación a gran escala

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

En esta tabla se puede apreciar como son las celdas de silicio monocristalino y policristalino respectivamente las que poseen el mayor valor de eficiencia, y como los valores entre las eficiencias comerciales y de laboratorio difiere, esto evidencia que tecnologías de capa delgada aun le falta investigación y desarrollo para optimizar sus procesos de producción. Además se muestra la evolución en el mercado de las celdas de película delgada, como las celdas de Teluro de Cadmio (CdTe) y Cobre-indio-Galio-Selenio han ido tomando cada vez más terreno en el mercado fotovoltaico, sin embargo aún falta mucho para que se compare con común tecnología de silicio. Con respecto a los usos, solo las celdas de silicio amorfo tienen aplicaciones para dispositivos móviles comerciales como calculadoras, relojes y cargadores portátiles.

**TABLA 4.2**  
**Resumen de diferentes tecnologías en celdas solares. Parte 2**

Tipo de celda	Materiales	Proceso de Fabricación	Costo de la Energía (\$/Wp) [48]
Silicio Monocristalino	Silicio de alta pureza	Método de Czochralski	Alto: 0,99 Bajo: 0,55
Silicio Policristalino	Silicio de alta pureza	Horno de Fundición Horno de Difusión Sala de Limpieza Línea de procesamiento	Alto: 0,99 Bajo: 0,55
Silicio Amorfo	Dióxido de Estaño	Preparación del vidrio Creación de las capas activas Creación de las capas conductivas Encapsulado y producto terminado	Alto: 0,94 Bajo: 0,52
Teluro de Cadmio (CdTe)	Vidrio de baja alcalinidad. Dióxido de Estaño Sulfuro de Cadmio Teluro de Cadmio	Sublimación de en espacio cerrado Deposición física de vapor Deposición química de vapor	Alto: 0,94 Bajo: 0,52
Cobre-Indio-Galio-Selenio	Vidrio de baja alcalinidad Oxido de Zinc dopado con aluminio. Molibdeno Cobre, Indio, Galio y Selenio.	Sputtering DC Selenización Baño químico Coevaporación	Alto: 0,94 Bajo: 0,52

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

En esta tabla se muestran los materiales principales y principales etapas del proceso de fabricación de las distintas tecnologías de celdas solares, los mismos serán ampliados en el punto 4.2. Además se muestra el costo puerta de fábrica del US-\$/Wp de las tecnologías de silicio y de capa delgada para el año 2013, estos valores son proporcionados por análisis hechos por una consultora de energía fotovoltaica llamada PVInsight [48], una extensión de este análisis se mostrará en el punto 4.2.3.

#### **4.1.2 Identificación de los tipos de tecnologías usadas en Venezuela y en qué medida.**

A pesar del alto potencial de aprovechamiento de energía fotovoltaica que posee Venezuela debido a su alta irradiancia, el alto costo de la generación de energía por este medio en

comparación a los proporcionados por adquirir la energía de la red, han hecho que esta rama de generación no sea muy comercial en el país.

Alguna de las instituciones encargadas de la investigación e implementación de los sistemas fotovoltaicos en Venezuela son: el IVIC, el INZIT, FUNDAELEC y en el Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, departamento de energías renovables.

En el año 2005 la Fundación para el Desarrollo del Servicio Eléctrico (FUNDELEC) empezó a emplear sistemas fotovoltaicos como parte de su proyecto “Sembrando luz”. Hasta la fecha han instalado 2885 sistemas fotovoltaicos en zonas aisladas, indígenas y fronterizas, lo que actualmente permite generar 2573 kWp y beneficiar a más de 1000 comunidades. En la figura 4.C la evolución en el número de sistemas instalados por el proyecto “Sembrando Luz” y la Figura 4.13 muestra la variación de la energía generada por esta iniciativa en la desde el 2005 hasta el 2012. [1]

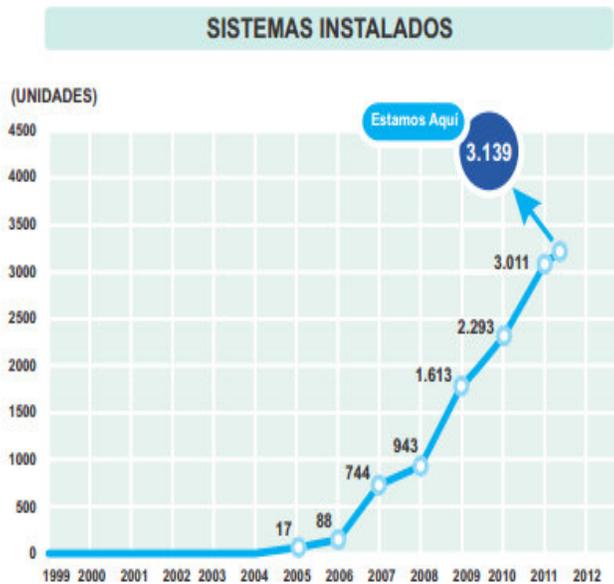
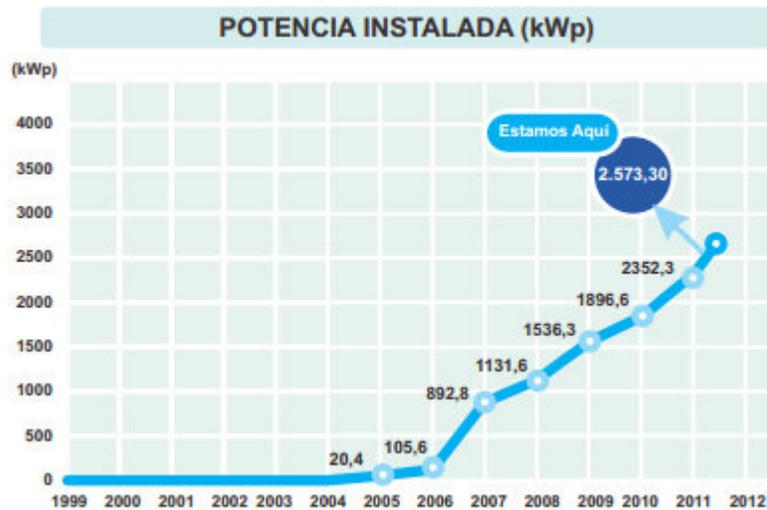


Figura 4.13 Número de módulos instalados 2005-2012. Fuente: FUNDELEC “Proyecto Sembrando Luz” [1].



**Figura 4.14 Potencia instalada, proyecto sembrando luz 2005-2012. Fuente: FUNDELEC “Proyecto Sembrando Luz” [1].**

En las figuras 4.13 y 4.14 se observa que a partir del 2005 en Venezuela se empezó a instalar sistemas de energía renovable para abastecer de energía a lugares aislados de la red, y desde el año 2005 hasta mediados del 2011 se tiene un incremento en la potencia instalada de 12612 %. Para el año 2012 se han instalado 3139 sistemas fotovoltaicos, esto demuestra el creciente interés en Venezuela en este tipo de sistemas, sin embargo, según el Lic. Leonardo Barrios, funcionario de FUNDAELEC e integrante del proyecto “Sembrando Luz” estos sistemas son importados, y esto retrasa la instalación de los proyectos e incrementa los costos, y en la búsqueda de solventar este problema se desarrolló la industria para el ensamblaje de los módulos, y está evaluándose actualmente el proyecto para producir las celdas solares de silicio policristalino.

Por otra parte, se entrevistó al Ing. Adrián Suarez, Gerente de Desarrollo & Proyectos de Soluciones Energéticas Alternativas C.A, el cual participó en el proyecto de la empresa VEPICA el cual consta de un arreglo fotovoltaico de 45 kWp conformado por 195 paneles de silicio policristalino. Se le consultó sobre datos relevantes del proyecto y los criterios de decisión que tomaron para escoger determinado tipo de tecnología en celdas solares. Los resultados de la entrevista se encuentran reflejados en el Anexo II.

En una entrevista que se le realizó a los Lic. Leonardo Barrios y Maylidmar Hurtado ambos funcionarios de FUNDELEC indicaron que la tecnología más usada en el país son las



celdas solares de silicio policristalino, y que se está estudiando la factibilidad de realizar una fábrica de celdas de silicio en Venezuela. Además dieron a conocer que en el Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas (INZIT), se están fabricando celdas de Cobre-Galio-Indio-Selenio (CIGS) pero no para uso comercial sino para desarrollo e investigación de esta tecnología.

#### **4.1.3 Análisis preliminar de las distintas tecnologías en celdas solares.**

En esta sección se elabora un análisis preliminar que contraste el uso de distintas tecnologías en celdas solares a nivel mundial y en el país. El resultado será mostrado mediante el uso de gráficas que permitan visualizar de manera sencilla las semejanzas y diferencias.

#### **Materiales**

Como se ha mencionado anteriormente el Silicio es segundo elemento más abundante en la Tierra después del oxígeno, esto permite que la comercialización de las celdas de silicio cristalino se encuentre entre las tecnologías más comerciales, además de su bajo impacto ambiental, caso contrario con las demás tecnologías que a pesar de que su fabricación es más sencilla, los materiales de estas no son tan abundantes como el Silicio. El silicio usado para las celdas solares es el silicio 6N de pureza o silicio solar, significa que debe ser 99.999999% puro para poder ser empleado en el campo fotovoltaico. Este requisito no es problemático ya que el silicio grado electrónico empleado en la fabricación de dispositivos de estado sólido es 11N (99.9999999999 % de pureza), el silicio que no cumplan con estos requerimientos se considera residuo y se emplea para la fabricación de celdas solares fotovoltaicas siempre y cuando cumplan con los requisitos de silicio solar. En Venezuela, existen depósitos de cuarzo y Cuarzita en los estados Carabobo y Anzoátegui, de estos se podría refinar silicio con grado solar. Para el año 2011, la producción mundial de silicio policristalino alcanzó los valores de 235.000 toneladas métricas, y se espera que para el año 2015 a alrededor de 491.000 toneladas métricas. [59]

En el caso de las celdas de capa delgada de Teluro de Cadmio, el Cadmio que es un elemento escaso, que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre. No se halla en



estado libre y sólo existe un mineral que lo contiene en cantidad apreciable, el sulfuro de cadmio (CdS). Este mineral se encuentra casi siempre asociado a la esfalerita (ZnS) en una proporción del 0.2 al 0.4%. De esta manera, el cadmio se recupera principalmente como un subproducto de la minería, fundición y refinación del zinc, y en menor grado de la del plomo y cobre. Se estima que las reservas de cadmio disponibles a nivel mundial son cerca de 6 millones de toneladas, cálculo basado en la identificación de 1,9 billones de toneladas de reservas de zinc que contienen un 0,3% de cadmio aproximadamente [49]. La producción mundial de Cadmio para el año 2012 fue de 23.000 toneladas métricas. [51]

El principal consumidor de Cadmio es el mercado de las baterías, el resto se distribuye en: pigmentos, revestimientos, estabilizadores para plásticos, aleaciones ferrosas y otros usos especializados incluyendo los dispositivos fotovoltaicos. El porcentaje de cadmio consumido a nivel mundial para la producción de baterías NiCd ha ido en aumento, mientras que los porcentajes para el otro extremo han disminuido gradualmente debido a las preocupaciones ambientales y de salud.[50][51]

El Galio no se encuentra en estado puro en la naturaleza en mayor parte es un subproducto del tratamiento de la bauxita y el resto es parte de los residuos del procesamiento del zinc, solo una parte del galio presente en la bauxita y minerales de zinc es recuperable y los factores que controlan la recuperación son prioritarios. Por lo tanto, una estimación de las reservas actuales comparable a la definición de las reservas de otros minerales no se puede hacer. Las reservas mundiales de bauxita son tan grandes que la mayor parte de ellas no se explotará durante muchas décadas, por lo que la mayor parte del galio en la bauxita no se puede considerar disponibles en el corto plazo [51]. En Venezuela se explota bauxita, por lo tanto se podría invertir en procesos para extraer el galio y aprovecharlo para producir celdas solares de CIGS.

El Indio también se encuentra en su mayoría como subproducto del zinc, u otros tipos de metales, principalmente, Cobre, Plomo, Estaño y metales preciosos. Al igual que el Cadmio, el mayor suministro de Indio proviene de la minería del Zinc. Las pantallas planas de cristal líquido (LCD) para los monitores de las computadoras y televisores de pantalla plana son la principal aplicación del Indio (como una aleación de óxido de indio y estaño),



consumiendo más del 50% del mercado de Indio y que probablemente seguirá dominando el uso del elemento. Casi todo el Indio es utilizado en la industria electrónica, incluyendo las pantallas LCD, mientras que las celdas solares y otras aplicaciones han logrado que incremente la demanda de Indio.[50]

De acuerdo a Pérez, P (19xx), el Cobre se halla principalmente en la zona de oxidación de los yacimientos de cobre en asociación con la Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), la Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), la Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), la Limonita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), la Malaquita ( $\text{Cu}_2[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_2$ ) y la Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Hidrotermal: raras veces, siendo siempre de baja temperatura [52]. Las reservas mundiales de Cobre se encuentran aproximadamente por el orden de los 680.000 toneladas métricas [51]. En Venezuela se encuentran reservas de cobre en diferentes yacimientos.

El Telurio y el Selenio son productos de la minería y producción del Cobre, también se pueden encontrar depósitos de Oro y Plata con grandes contenidos de Selenio y Telurio [50]. Las reservas mundiales del Telurio se encuentran aproximadamente en 24.000 toneladas métricas, mientras que el Selenio ronda por el orden de las 98.000 toneladas métricas[51]. En Venezuela como se ha mencionado anteriormente se encuentran yacimientos de cobre y también se poseen yacimientos de oro.

El Silanose utiliza para la fabricación de semiconductores, el silano es un gas precursor de silicio en las operaciones de deposición de silicio policristalino por interconexión o enmascarado, el crecimiento de silicio epitaxial, la deposición química en fase gas (CVD) de sílice, nitruro de silicio y siliciuros metálicos refractarios. El Silano se emplea también en la fabricación de silicio amorfo para las células solares [54]

En la figura 4.15 se muestra los recursos minerales disponibles en Venezuela, se puede observar que tenemos reservas de Cobre, Aluminio (Bauxita) del cual se puede extraer Galio, Zinc del cual se puede extraer el Cadmio y el Indio [51] y Oro, del en los depósitos de los mismos es posible extraer Selenio y Telurio [51]. Sería necesario un estudio para determinar si se pueden extraer dichos recursos de los depósitos de los recursos disponibles en el país.

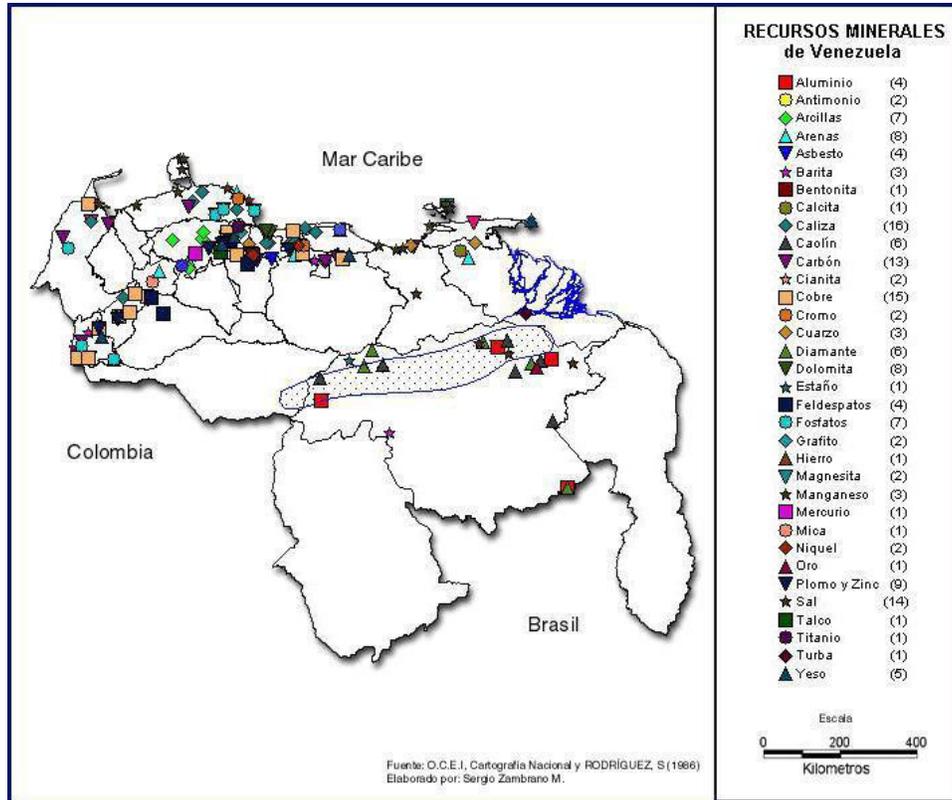


Figura 4.15 Recursos Minerales de Venezuela. Fuente: S. Zambrano [53].

En la figura 4.15 se observa que Venezuela es un país con muchas riquezas minerales, no solo petróleo, y vale la pena invertir en el procesamiento de los mismos para poder comerciar el producto, no solo la materia prima.

### Proceso de Fabricación

Si hacemos una comparación de los procesos de fabricación, nos damos cuenta que las celdas solares de silicio tienen un proceso más complejo, ya que comienza con el refinamiento del silicio clase solar (99.999999 % de pureza), cristalización para la obtención de los lingotes, y posteriormente el corte de las celdas donde se pierde aproximadamente 20 % del silicio en forma de polvo.

Las tecnologías de capa delgada, tiene un proceso de fabricación más simple, sin embargo, no es una tecnología con tanto tiempo en el mercado como la tecnología de silicio, y es por tanto necesario invertir tiempo en investigación y desarrollo si se desea producir esta clase de celdas a gran escala.

Por otra parte, en la tabla 4.3 se observa el costo de generar un vatio pico en dólares americanos, libre de impuestos, para el año 2013, datos proporcionados por PVInsight, una importante firma de asesores financieros en el campo de energía fotovoltaica.

**TABLA 4.3**

**Costo de generación en US-\$/Wp de las distintas tecnologías en celdas solares fotovoltaicas.**

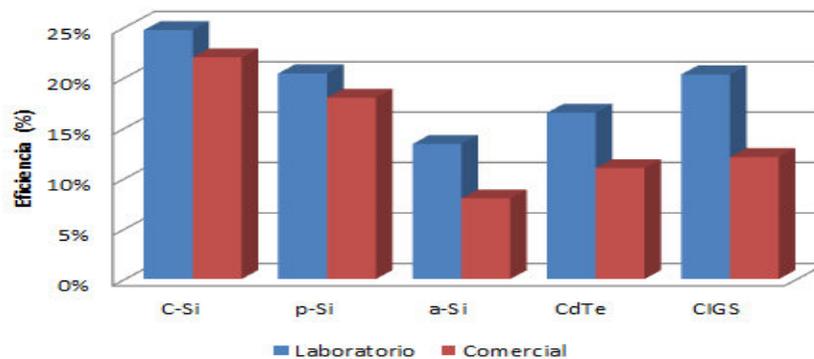
Tecnología\Precio (US-\$/Wp)	Alto	Bajo	Promedio
Silicio	0.99	0.55	0.675
Capa delgada	0.94	0.52	0.673

**Fuente: Solar PV Modules Weekly Spot Price [48]**

Como se puede observar en la tabla 4.4 actualmente el promedio del precio para generar un vatio pico en ambas tecnologías es similar, por lo tanto, la comparación mediante el factor económico pierde relevancia al momento de determinar el más adecuado para el potencial de fabricación de Venezuela, es sin embargo, necesario un análisis económico más exhaustivo, en el cual estos cálculos económicos se lleven a cabo para el caso particular de Venezuela.

**Eficiencia**

En la figura 4.16 se muestra una comparación del record de eficiencia tanto comercial y en laboratorio alcanzado para el año 2010 [6] de las distintas tecnologías en celdas solares.



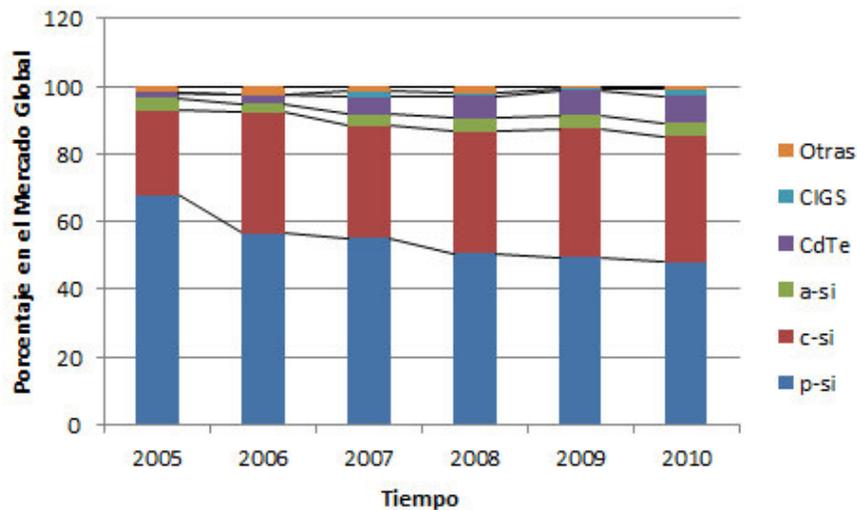
**Figura 4.16 Record de eficiencia alcanzado por las distintas tecnologías de celdas solares. Fuente: EPIA**

[6]

En la figura 4.16 se observa que las mayores eficiencias son logradas por las celdas de silicio monocristalino y policristalino, otro dato apreciable es la diferencia entre las eficiencias alcanzadas en laboratorio y la comercial en las celdas de capa delgada, esto evidencia que aun deben mejorarse los procesos de producción con el fin de lograr elevados niveles de producción con altos niveles de eficiencia.

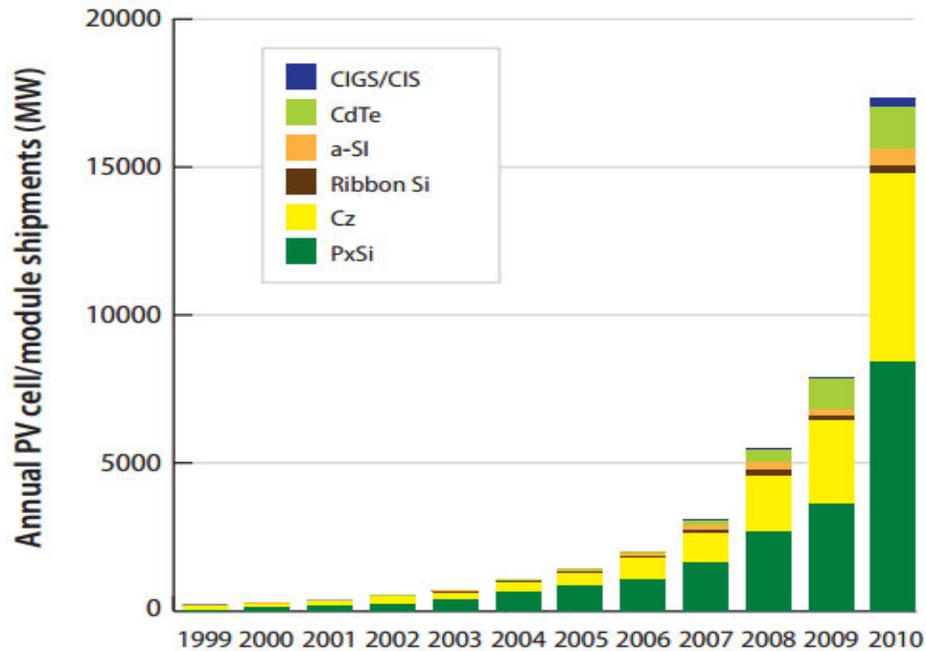
## Mercado

El mercado mundial de las celdas solares ha estado atravesando cambios significativos en la última década, esto debido a que muchos gobiernos han adoptado políticas que favorecen la generación de energía limpia por las ventajas que esta proporciona. El mercado mundial lo dominan las celdas de silicio, sin embargo, los avances logrados en las celdas de capa delgada, su bajo costo y su alta y rápida capacidad de producción han hecho que tomen terreno en el mercado mundial. En la figura 4.16 se muestra la variación del porcentaje del mercado global de las principales tecnologías en celdas solares entre 2005 y 2010 usando datos proporcionados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos.



**Figura 4.17** Porcentaje de mercado por tecnologías en celdas solares fotovoltaicas. Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013)

En la figura 4.17 observa como entre 2005 y 2010 las celdas de capa delgada han tomado mayor porcentaje en el mercado global desplazando poco a poco de manera continúa a las celdas de silicio policristalino. Por otra parte en la figura 4.18 se muestra la evolución en la producción global en celdas solares tecnologías entre 2000 y 2010.



**Figura 4.18 Envíos anuales a nivel mundial de cada tipo de módulo fotovoltaico. Fuente: U.S Department Market Report 2010 [5]**

En la figura 4.18 se observa el crecimiento que ha tenido la generación fotovoltaica en la última década. Resalta el hecho que entre 2009 y 2010, tanto las tecnología de silicio como de capa delgada incrementaron cerca del 100 % su nivel de producción.

En Venezuela predomina el uso de celdas de silicio, principalmente el uso celdas de silicio policristalino. Las celdas de silicio policristalino tienen menor eficiencia que las celdas de silicio monocristalino, pero lo compensa el costo inferior. La eficiencia implica que para generar la misma potencia bajo un mismo valor de irradiancia, el área empleado por la celda de silicio policristalino será mayor.

La tecnología de capa delgada ha tenido en los últimos años un crecimiento sostenido en su volumen de producción y ventas a nivel mundial, sin embargo, según funcionarios el Lic. Leonardo Barrios esto se debe a que en los años 2006-2007 existió un alza considerable en los precios del silicio policristalino, dando espacio a la tecnología de capa delgada. Sin embargo esta situación ya se normalizó y el precio del silicio policristalino disminuyó, de hecho, los precios de las celdas de silicio y de capa delgada se encuentran en el mismo orden, ambos por debajo de 1 US-\$/W<sub>p</sub> [48].



## Aplicaciones

A nivel mundial se pueden clasificar el uso de celdas solares en 2 grandes grupos, que son:

- Sistemas Conectados a la red
- Sistemas Aislados.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red carecen de batería, y al momento de carecer de radiación solar el sistema toma la energía de la red, incluso en varios países se emplean políticas en donde la energía que se genera a través de los paneles es entregada a la red y de esta manera obtienes una retribución económica por parte de la compañía de servicio eléctrico. En Venezuela según el Ing. Adrián Suarez, se pueden ver este tipo de sistemas, como es el caso del proyecto de la empresa Vepica, que carece de sistema de baterías, sin embargo, son pocos los casos.

Los sistemas aislados, son sistemas que no están conectados a la red, y emplean un sistema de baterías para proporcionar la energía en los momentos de carencia de radiación solar. A su vez esta categoría se puede dividir en 3 grupos que son:

- Aplicaciones Industriales: Como es el caso la alimentación de estaciones repetidoras de señal para dispositivos móviles.
- Electrificación rural: Alimentación de poblaciones rurales inaccesible para líneas de transmisión o a una distancia considerable de un punto de conexión.
- Bienes de consumo: Como es el caso de juguetes, calculadoras, cargadores de batería, entre otros. Además del empleo en iluminación vial o en plantas potabilizadoras del agua.

En la tabla 4.4 se muestra la diversidad de aplicaciones por grupos, en las que se puede emplear cada tipo tecnología de celdas solares, y posteriormente

**TABLA 4.4**  
**Diversidad de aplicaciones de las celdas solares.**

Tipo de aplicación	Aplicación
Sistemas conectados a la red	1. Residencial y comercial
	2. Industrial a gran escala. (Plantas de Generación)
Sistemas Aislados	3. Aplicaciones industriales
	4. Electrificación Rural
	5. Bienes y Consumo.

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

En la tabla 4.5 se presenta la comparación en la diversidad de aplicaciones, en esta se puede apreciar como las celdas solares más versátiles son las celdas de capa delgada de telurio de cadmio (CdTe) y de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS). Una característica resaltante de las celdas de capa delgada, es la capacidad de emplear un sustrato flexible lo que permite instalar celdas en muchos dispositivos móviles, como calculadoras, celulares, e incluso vestimenta, característica que no goza las celdas de silicio cristalino debido a su rigidez.

**TABLA 4.5**  
**Comparación de diversidad de aplicaciones por tipo de celda.**

Tipo de Celda	1	2	3	4	5
Silicio Monocristalino	+	+	+	+	-
Silicio Policristalino	+	+	+	+	-
CdTe	+	+	+	+	+
CIGS	+	+	+	+	+
Silicio amorfo	+	-	+	+	+

(+): Cumple, (-): no cumple.

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

En Venezuela, según el Lic. Leonardo Barrios funcionario de La Fundación para el Desarrollo del Servicio Eléctrico (FUNDELEC), el uso de sistemas fotovoltaicos se limita

casi en su totalidad en sistemas aislados, el criterio para la electrificación de zonas rurales es estar a por lo menos 10 km del punto de alimentación más cercano. En la Universidad de Carabobo se han realizados proyectos de grado que consiste en el diseño sistemas de generación fotovoltaicos para la electrificación de zonas rurales, como es el caso de la tesis de Vázquez, J – Gudiño, J (2005) de la Universidad de Carabobo, en el cual se diseño un sistema para la electrificación de una zona rural del Estado Carabobo, empleando energía fotovoltaica. Además de lo antes mencionado, ciertas alcaldías han empleado el uso de celdas solares para la iluminación vial, como es el caso de la alcaldía de Guacara, en la cual la iluminación de la Av. Piar es a través de luces alimentadas por paneles solares.

### Efecto de la Temperatura.

Es ampliamente aceptado que la eficiencia de las celdas solares fotovoltaicas disminuye debido a un incremento de la temperatura, y la refrigeración es necesaria en condiciones de alta iluminación, como lo son luz solar concentrada, o condiciones de trópico o espaciales.

La temperatura juega un factor crítico y es el más influyente en la disminución de la eficiencia fotovoltaica y en su potencia de salida. Esto es debido a la contracción de la banda prohibida al incrementar la temperatura, lo que produce que el voltaje de circuito abierto disminuya, y ya que es directamente proporcional, la eficiencia. El efecto de la temperatura en la curva característica I-V de la celda se muestra en la figura 4.19.

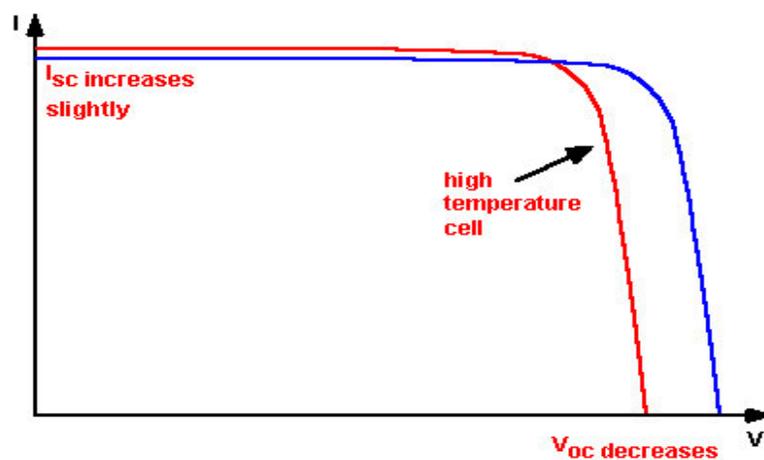


Figura 4.19 Variación de la característica I-V de una celda solar debido a cambios en la temperatura.

Fuente: S. Bowden y C. Honsberg [58]



A pesar de que la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) aumenta, se aprecia un decremento en el voltaje de vacío, esto es debido a que a alta temperatura, en la medida que más luz incidente es absorbida, se incrementa la cantidad de portadores de carga desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, y esto incrementa la cantidad de portadores intrínsecos en la unión PN de la celda, lo cual causa el decremento en el voltaje de vacío. [40]

La influencia de la temperatura tiene un alto impacto en las celdas de silicio monocristalino en comparación con las celdas de silicio policristalino y las celdas de capa delgada. La eficiencia de la celda solar disminuye un 15% en las celdas de silicio monocristalino y hasta un 5 % en las celdas de capa delgada [40].

En la tabla 4.4 se muestran los decrementos en la eficiencia nominal de las distintas tecnologías en celdas solares a 55 grados Celsius, 30 grados por encima de la temperatura estándar, estas condiciones de operación se pueden apreciar en ambientes cuya temperatura ambiente es superior a 30 grados Celsius según estudios realizados por la empresa First Solar. Esta temperatura ambiente es común en Venezuela.

**TABLA 4.6**  
**Variación de eficiencia nominal debido a efectos de temperatura.**

Tipo de Celda	Eficiencia nominal @55 grados Celsius
Silicio Monocristalino	0.85 [56]
Silicio Policristalino	0.86 [57]
CdTe	0.92 [56]
CIGS	0.85 [56]
Silicio amorfo	0.93 [56]

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

En la tabla 4.6 se observa que las celdas de capa delgada de telurio de cadmio y de Silicio amorfo tienen un bajo coeficiente de temperatura, en comparación a celdas de silicio cristalino y de cobre-indio-galio-selenio. Debido a que en Venezuela la temperatura ambiente promedio es elevada (alrededor de los 30 °C) convendría el uso de tecnología de



capa delgada de Teluro de Cadmio o de silicio amorfo siempre y cuando se logre desarrollar mejoras en los niveles de eficiencia de los mismos manteniendo o disminuyendo los costos de manufactura.

#### **4.2 Análisis de diferentes procesos de fabricación de una celda solar para su futura fabricación en Venezuela.**

En esta sección se detallara todos lo relacionado a la fabricación de las diferentes tecnologías de celdas solares, tales como, proceso de fabricación, materiales y equipos.

##### **4.2.1 Identificación de las diferentes etapas en el proceso de fabricación de cada tipo de celda.**

Esta sección se centra en los procesos de fabricación de cada tipo de celda a fin de identificar y/o estimar las fases de los procesos y los equipos requeridos en cada fase. Además se busca identificarla materia prima o semiprosesada se incorpora en cada una de estas etapas. Para ello se contará con la información recopilada en la sección 4.1.

A continuación se presentan los resultados de la investigación por cada tipo de celda solar en análisis:

##### **4.2.1.1 Celdas Solares de Silicio Monocristalino**

###### **Materiales**

A continuación se listan los materiales necesarios para la fabricación de una celda solar de silicio monocristalino, y posteriormente ensamblar las mismas en un módulo fotovoltaico:

- Óxido de Silicio: es el utilizado para obtener el silicio de grado metalúrgico. Se reduce en un horno eléctrico.
- Semilla de cristal: utilizada para la formación del lingote por el método de Czochralski.
- Silano ( $\text{SiH}_4$ ): se utiliza para la formación del silicio policristalino.
- Disco Sierra- Cinta: con abrasivos de diamante, este realiza el corte del lingote de silicio monocristalino en obleas.



- Ácido Nítrico y Ácido Fluorhídrico: son utilizados en conjunto para la limpieza de la oblea de silicio monocristalino después del corte. Un sustituto de estos puede ser el Hidróxido de Potasio [43].
- Líquido de corte: agua de alta pureza utilizado al momento de realizar el corte del lingote.
- Capa anti reflectante
- Encapsulante
- Cubierta frontal y posterior
- Filtro para impresión de serigrafía: es utilizado para aplicar una de las técnicas de formación de los contactos eléctricos.
- Cables.
- Caja de conexiones.
- Marco.

En el Anexo III se presenta una lista de proveedores a nivel mundial para adquirir los materiales.

### **Equipos**

Los equipos para la fabricación de las celdas de silicio se presentan a continuación:

- Horno eléctrico
- Convertidor de Tetracloruro de silicio a Triclorosilano (STC-TCS converter)
- Equipo para el crecimiento del lingote por el método de Czochralski
- Equipo para el corte del lingote y para el corte de la oblea de silicio
- Equipo de transporte y almacenamiento de lingotes
- Equipo de limpieza de Agua de alta pureza
- Equipos para la deposición: para la formación de las uniones equipo de deposición química de vapor, y para la formación de los contactos equipo de deposición física de vapor

## Proceso de Fabricación

En la figura 4.20 se puede observar el esquema del proceso de fabricación de las celdas solares de silicio monocristalino, para la formación de las uniones existen diversas técnicas de impurificación, por ejemplo las mencionadas por Matsumoto. Y [43], las cuales son la difusión de gases, depósito físico o la implantación de iones, y para la formación de los contactos eléctricos pueden variar entre, la evaporación, depósito por baño químico y la serigrafía.

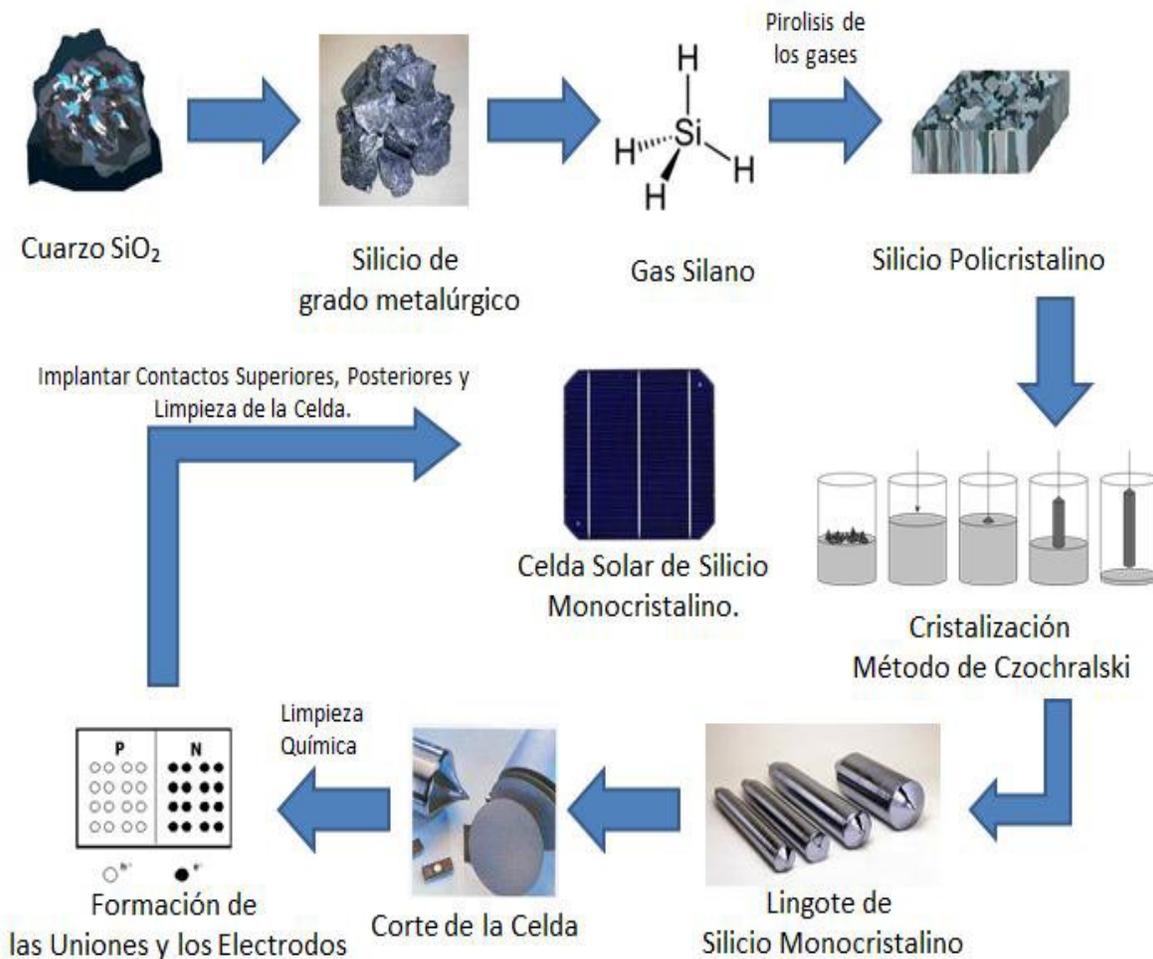


Figura 4.20 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Silicio Monocristalino. Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).



A partir de la figura se puede dividir el proceso de fabricación en las siguientes etapas, presentadas en la tabla 4.7.

**TABLA 4.7**  
**Etapas de fabricación de las celdas de Silicio Monocristalino.**

Etapas	Descripción	Materiales	Equipos
1	Reducción del Óxido de Silicio, para obtener Silicio de grado Metalúrgico	● Óxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	Horno Eléctrico
2	Pirolisis de los gases para obtener el silicio policristalino	● Silano (SiH <sub>4</sub> )	Convertidor de Tetracloruro de Silicio a TricloroSilano
3	Cristalización mediante el método de Czochralski para obtener el lingote de silicio monocristalino	● Semilla de cristal	Equipo para el crecimiento del lingote y Equipos para el transporte y almacenamiento de los lingotes
4	Corte de la celda	● Líquido de corte	Disco de Sierra-Cinta
5	Limpieza de residuos en la oblea de silicio monocristalino después del corte	● Ácido Nítrico ● Acido Fluorhídrico	Equipo de limpieza
6	Formación de las uniones mediante la Deposición Física de Vapor		Equipo de DFV (deposición física de vapor)
7	Formación de los contactos eléctricos por Deposición Química de Vapor		Equipo de DQV (deposición química de vapor)
8	Conexión de las celdas laminado, instalación de la caja de conexiones, y enmarcado.	● Cables ● Caja de conexiones ● Marco ● Contacto frontal y posterior ● Encapsulante	

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).



### **4.2.1.2 Celdas Solares de Silicio Policristalino**

#### **Materiales**

A continuación se listan los materiales necesarios para la fabricación de una celda solar de silicio policristalino, y posteriormente ensamblar las mismas en un módulo fotovoltaico:

- Óxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ): materia prima para obtener el silicio de grado metalúrgico.
- Silano ( $\text{SiH}_4$ ): este gas es utilizado para formar el silicio policristalino.
- Disco Sierra-Cinta: realiza el corte del lingote de silicio.
- Ácido Fluorhídrico y Ácido Nítrico: son utilizados en conjunto para la limpieza de impurezas al momento de corte de las obleas.
- Líquido de corte: agua de alta pureza utilizado al momento de realizar el corte del lingote.
- Cables.
- Encapsulante
- Contacto frontal y posterior
- Caja de conexiones.
- Marco.

#### **Equipos**

Para la fabricación de las celdas de silicio policristalino se necesitan los siguientes equipos:

- Horno de fundición
- Equipo de recorte del lingote de silicio policristalino y el corte de la oblea
- Equipo para el transporte y almacenamiento de lingotes
- Equipos para deposición
- Convertidor de Tetracloruro de Silicio a TricloroSilano (STC-TCS Converter)
- Equipo de Inspección
- Equipo para la limpieza
- Equipo para conexionado
- Equipo de Laminación

### Proceso de Fabricación

El proceso de Fabricación de las celdas de silicio policristalino se detalla en la figura 4.21.



Figura 4.21 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Silicio Policristalino. Fuente: Arráz O. y Santos A. (2013).

TABLA 4.8  
Etapas de fabricación de las celdas de Silicio Policristalino

Etapas	Descripción	Materiales	Equipos
1	Reducción del Óxido de Silicio, para obtener Silicio de grado Metalúrgico	● Óxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	Horno Eléctrico
2	Pirolisis de los gases para obtener el silicio policristalino	● Silano (SiH <sub>4</sub> )	Convertidor de Tetracloruro de Silicio a TricloroSilano
3	Corte del lingote de silicio policristalino en lingotes mas pequeños	● Líquido de corte	Equipo de corte y equipos de transporte y almacenamiento



TABLA 4.8

## Etapas de fabricación de las celdas de Silicio Policristalino. (Continuación)

Etapas	Descripción	Materiales	Equipos
4	Corte de las celdas	-	Disco Sierra-Cinta
5	Limpieza de las obleas debido a residuos presentes en esta	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ácido Nítrico</li> <li>● Acido Fluorhídrico</li> </ul>	Equipo de limpieza
6	Formación de las uniones por deposición física de vapor	-	Equipo de DFV (deposición física de vapor)
7	Formación de los contactos eléctricos por deposición química de vapor	-	Equipo de DQV (deposición química de vapor)
8	Limpieza de las celdas	-	Equipo de limpieza
9	Inspección	-	Equipo de inspección
10	Conexionado	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Cables</li> <li>● Caja de conexiones</li> <li>● Marco</li> <li>● Contacto frontal y posterior</li> </ul>	-
11	Laminación	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Encapsulante</li> </ul>	Equipo de laminación

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

**4.2.1.3 Celdas Solares de Silicio Amorfo****Materiales**

La lista de materiales necesarios para producir una celda solar de silicio amorfo es la siguiente:

- Vidrio: debe tener propiedades adecuadas para soportar la temperatura del proceso de deposición y con bajo índice de reflexión.



- Óxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ): materia prima para obtener el silicio de grado metalúrgico
- Oxido conductor transparente (TCO): que será una capa conductora que sirve de contacto posterior y debe tener un muy bajo índice de reflexión. Para el caso de las celdas de silicio amorfo es el Óxido de Estaño[39]
- Cables.
- Encapsulante
- Caja de conexiones.
- Marco.

## Equipos

Para la fabricación de las celdas de silicio amorfo se necesitan los siguientes equipos:

- Equipos de revestimiento y deposición
- Equipo de limpieza
- Horno Eléctrico
- Equipo de refrigeración
- Equipo laser para realizar los patrones
- Equipos de recorte y grabación
- Equipo para la prueba I-V: Simulador Solar
- Equipo de inspección
- Equipo de Laminación
- Equipo de unión ultrasónica

## Proceso de Fabricación

El proceso de fabricación de las celdas solares de silicio amorfo se detalla en la figura 4.22, el método para la formación de las capas activas es la deposición química de vapor y para la formación de las capas conductoras es la deposición física de vapor, esto de acuerdo al proceso de fabricación de la empresa Green Solar [45]:

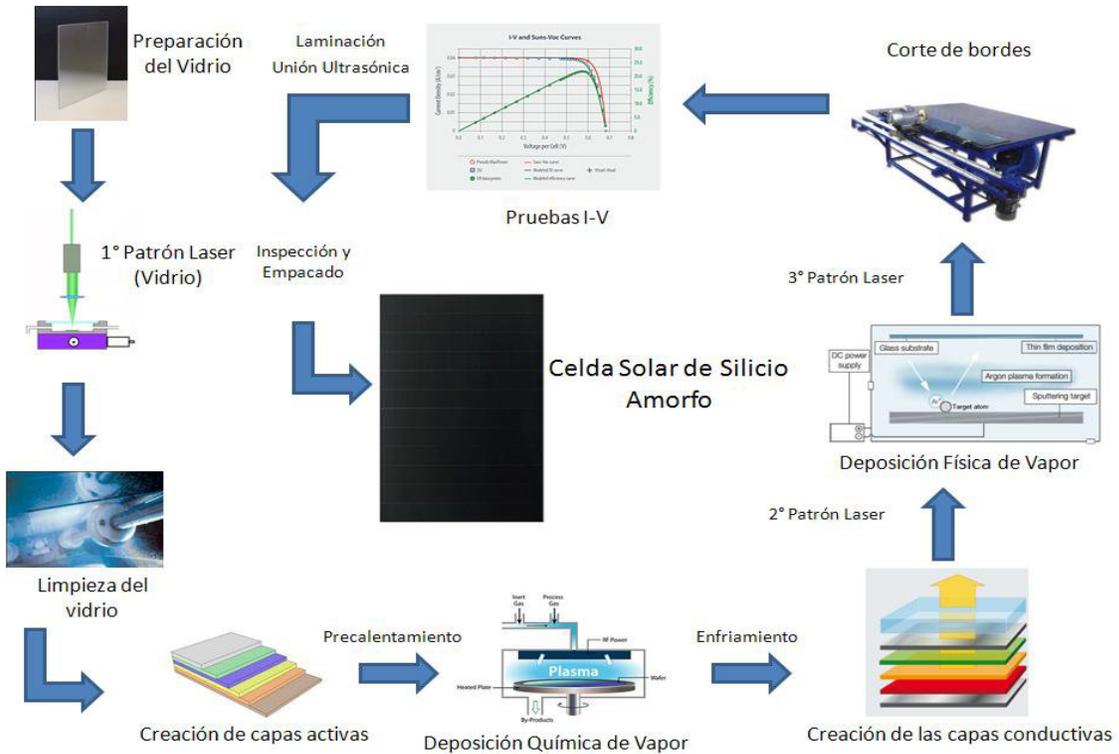


Figura 4.22 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Silicio Amorfo. Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

TABLA 4.9

Etapas de fabricación de las celdas de silicio amorfo

Etapa	Proceso	Descripción	Materiales	Equipos
1	Preparación del vidrio	Preparación del vidrio	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Vidrio</li> <li>● Oxido conductor transparente (TCO)</li> </ul>	
2		Primer trazado láser para formar contactos para futura conectividad de las celdas en el módulo		Equipo para el Patrón Mecánico o laser
3		Limpieza del vidrio por presencia de residuos después de realizado el patrón laser	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Liquido de limpieza</li> </ul>	Equipo de limpieza



TABLA 4.9

## Etapas de fabricación de las celdas de silicio amorfo (Continuación)

Etapa	Proceso	Descripción	Materiales	Equipos
4	Creación de capas activas	Pre calentamiento		Horno Eléctrico
5		Formación de los capas activas por deposición química de vapor		Equipo de DQV (deposición química de vapor)
6		Enfriamiento		Equipo de refrigeración
7	Creación de capas conductivas	Segundo trazado láser para formar contactos para futura conectividad de las celdas en el modulo		Equipo para el Patrón Mecánico o laser
8		Formación de las capas conductivas por deposición física de vapor		Equipo de DFV (deposición física de vapor)
9		Tercer trazado láser sobre el vidrio para el aislamiento de la celda		Equipo para el Patrón Mecánico o laser
10	Creación de capas conductivas	Tratamiento de los bordes para el correcto		Equipo de recorte y grabación
11		Pruebas I-V antes de realizar el encapsulado y laminado		Equipo para la prueba: Simulador Solar
12	Encapsulado y Producto terminado	Unión ultrasónica de las uniones y laminación del panel	• Encapsulante	Equipo de laminación y de unión ultrasónica
13		Pruebas I-V al modulo terminado		Equipo para la prueba: Simulador Solar
14		Conexión de los cables, inspección y empaquetado	• Cables • Caja de conexiones • Marco	Equipo de inspección

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).



#### **4.2.1.4 Celdas Solares de Teluro de Cadmio**

##### **Materiales**

La lista de materiales necesarios para producir una celda solar de capa delgada de teluro de cadmio, y posteriormente un módulo fotovoltaico es la siguiente:

- Vidrio: Debe tener propiedades adecuadas para soportar la temperatura del proceso de deposición y con bajo índice de reflexión.
- Oxido conductor transparente (TCO): que será una capa conductora que sirve de contacto posterior y debe tener un muy bajo índice de reflexión. Se acostumbra a usar Oxido de Indio Estaño (ITO) [41].
- Sulfuro de Cadmio (CdS): Parte de la capa absorbente, un semiconductor tipo n, en polvo para poder hacer la deposición por pulverización catódica por corriente directa. (Sputtering DC). Debido a lo contaminante y peligroso que es el sulfuro de Cadmio, K.Matsunaga [42] propone sustituirlo por Sulfuro de Indio (InS) siendo este más amigable al entorno.
- Teluro de Cadmio (CdTe): Elemento principal, parte de la capa absorbente, un semiconductor tipo p, en polvo para poder hacer la deposición por pulverización catódica por corriente directa. (Sputtering DC).
- Ácido Nítrico-fosfórico: Para el tratamiento químico de la capa de CdTe con el fin de limpiar imperfecciones y residuos de óxidos que contaminen la capa.
- Contacto Posterior: puede ser de diversos materiales, puede ser con una pasta de grafito y plata C/Ag o una capa de Teluro de Zinc dopado con Cobre [41].
- Encapsulante.
- Cables.
- Caja de conexiones.
- Marco.

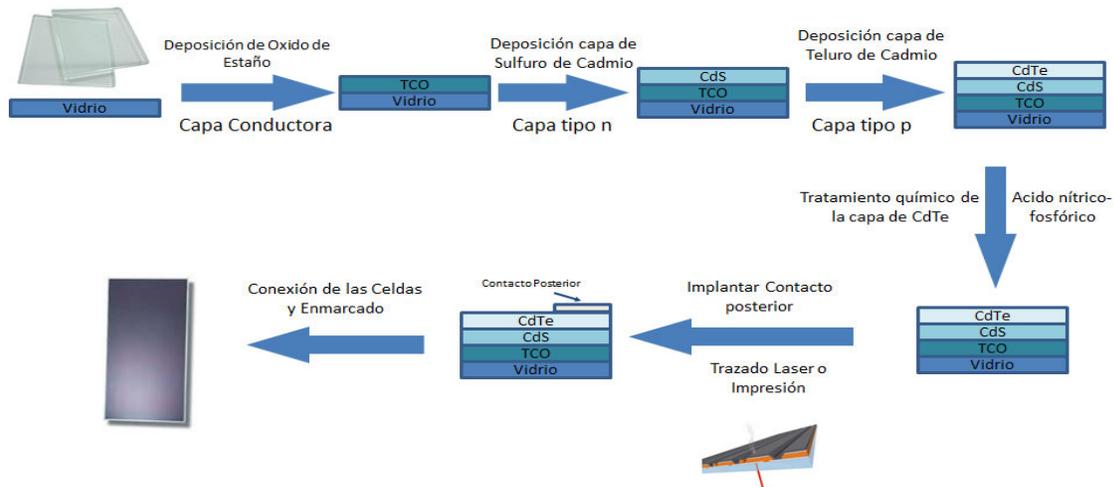
##### **Equipos**

A continuación se presenta el equipo necesario para la producción de una celda solar de Teluro de Cadmio.

- Equipo para realizar deposición por pulverización catódica (Sputtering): Este se encargará de hacer la deposición de las capas que componen la celda.
- Equipo para el proceso de etching: el cual hará la limpieza de la superficie con el ácido.
- Equipo para Impresión de materiales: Este se encargará de implantar el contacto posterior
- Equipo para el Patrón Mecánico o láser: Este se encargará de hacer los cortes para poder hacer las conexiones entre los contactos de las diferentes celdas que integran el módulo.
- Equipo para la inspección. Un simulador solar para determinar las características físicas, y variables eléctricas de la celda.

### Proceso de Fabricación

En la figura 4.23 se observa el esquema del proceso de fabricación de las celdas solares de telurio de cadmio, el proceso de deposición puede variar según la técnica que se emplee, los más comunes son el proceso de deposición física de vapor.



**Figura 4.23 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Teluro de Cadmio. Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

A partir de la figura se divide el proceso de fabricación en las siguientes etapas, presentadas en la tabla 4.10.



TABLA 4.10

## Etapas de fabricación de las celdas de Teluro de Cadmio.

Etapas	Descripción	Materiales	Equipos
1	Deposición de la capa conductora en el sustrato de vidrio, la misma será usada de contacto frontal de la celda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Blanco de Oxido de Indio-Estaño</li> </ul>	Equipo para realizar deposición por pulverización Catódica por corriente directa (Sputtering DC).
2	Trazado de patrón laser, para formar aislamiento entre celda y celda		Equipo para el trazado del patrón láser
3	Deposición de las capas semiconductoras, compuestas por una capa de Sulfuro de Cadmio (CdS) y una capa de Teluro de Cadmio (CdTe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Blanco de Sulfuro de Cadmio (CdS)</li> <li>Blanco de Teluro de Cadmio (CdTe)</li> </ul>	Equipo para realizar deposición por pulverización Catódica por corriente directa (Sputtering DC).
4	Tratamiento Químico de la capa conductora, con el fin de eliminar residuos de óxidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ácido Nítrico-fosfórico</li> </ul>	Equipo para el proceso de etching
5	Trazado de patrón mecánico, para formar contactos para la conectividad de las celdas		Equipo para el Patrón Mecánico
6	Implantar contacto posterior.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pasta de grafito y plata (C/Ag).</li> <li>Blanco de Teluro de Zinc dopado con Cobre.</li> </ul>	Equipo para Impresión de materiales ó Equipo de deposición por pulverización catódica por corriente directa (Sputtering DC)
7	Trazado laser para formar contactos para futura conectividad de las celdas en el módulo		Equipo para el Patrón Mecánico o láser
8	Conexión de las celdas laminado, instalación de la caja de conexiones, y enmarcado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Encapsulante.</li> <li>Cables.</li> <li>Caja de conexiones.</li> <li>Marco.</li> </ul>	
9	Revisión de los parámetros de la celda.		Equipo para la inspección: Simulador Solar.

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).



### **4.2.1.5 Celdas Solares de Cobre Indio Galio Selenio (CIGS)**

#### **Materiales**

La lista de materiales necesarios para producir una celda solar de capa delgada de cobre indio galio selenio (CIGS), y posteriormente un módulo fotovoltaico es la siguiente:

- Vidrio: Debe tener propiedades adecuadas para soportar la temperatura del proceso de deposición y con bajo índice de reflexión. K.Matsunaga [42] recomienda un vidrio con bajo índice de alcalinidad.
- Blancos de Molibdeno: Para depositarlo como la capa del contacto posterior de la celda solar. Presenta buena adherencia, alto índice de conductividad y resistencia a la oxidación y corrosión. El espesor por celda es aproximadamente 0.4 micrómetros
- Blanco de CIG: Esta representa la capa activa de la celda luego del proceso de Selenización.
- Selenio: Aplicado mediante alta temperatura al precursor de cobre-indio-galio.
- Sulfuro de Cadmio (CdS): Parte de la capa absorbente, un semiconductor tipo n, en polvo para poder hacer la deposición por pulverización catódica por corriente directa.(Sputtering DC). Debido a lo contaminante y peligroso que es el sulfuro de Cadmio, K.Matsunaga [42] propone sustituirlo por Sulfuro de Indio (InS) siendo este más amigable al entorno.
- Capa de Contacto frontal: K.Matsunaga [42] propone el uso de oxido de Zinc dopado con aluminio en su proceso de fabricación, se podría sustituir por Oxido de Indio Estaño, que es otro oxido conductor transparente.
- Encapsulante.
- Cables.
- Caja de conexiones.
- Marco.

#### **Equipos**

El equipo necesario para la producción de una celda solar de cobre indio galio selenio y posteriormente, el ensamblaje del módulo se presenta a continuación:

- Equipo para realizar deposición por pulverización catódica (Sputtering): Este se encargará de hacer la deposición de las capas que componen la celda.
- Equipo de baño químico: Para depositar la capa de sulfuro de Indio.
- Equipo para deposición química de vapor: para realizar el proceso de deposición del selenio en el precursor de Cobre-Indio-Galio.
- Equipo para el proceso de etching: el cual hará la limpieza de la superficie con el ácido.
- Equipo para el Patrón Mecánico y láser: Este se encargará de hacer los cortes para poder hacer las conexiones entre los contactos de las diferentes celdas que integran el módulo.
- Equipo para la inspección. Un simulador solar para determinar las características físicas, y variables eléctricas de la celda.

### Proceso de Fabricación

En la figura 4.24 se observa el proceso de fabricación de las celdas de CIGS, se ha usado como modelo el empleado por la empresa HONDA descrito por K.Matsunaga [42]. Al igual que en la celdas de Teluro de Cadmio, el método de deposición puede cambiar, en este caso se emplea una técnica de deposición por pulverización catódica por corriente directa (Sputtering DC) para el precursor de Cadmio-Indio-Galio y la capa de oxido de zinc, y se usa una deposición química para la capa de sulfuro de indio. El primer patrón láser se emplea para el aislamiento de las celdas, mientras que el patrón mecánico se emplea para la posterior interconexión de las celdas en un módulo.

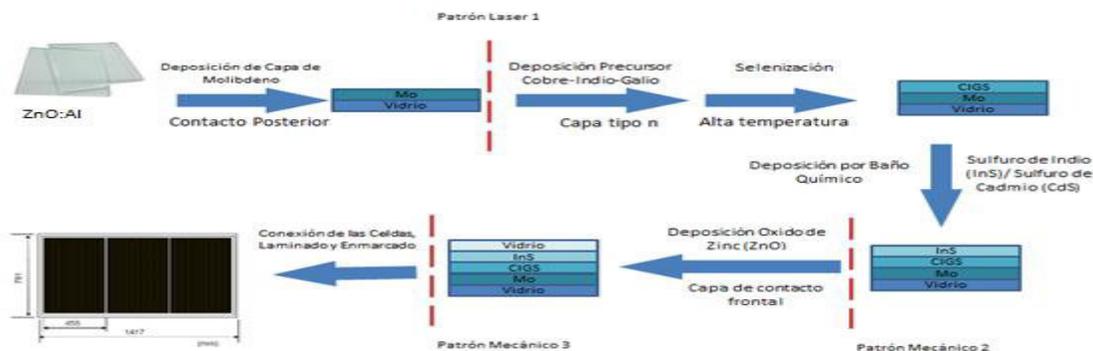


Figura 4.24 Etapas del Proceso de Fabricación de las celdas de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS).

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).



A partir de la figura se puede dividir el proceso de fabricación en las siguientes etapas, presentadas en la tabla 4.11.

**TABLA 4.11**  
**Etapas de fabricación de las celdas de CIGS.**

Etapas	Descripción	Materiales	Equipos
1	Deposición de la capa que será el contacto posterior de la celda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Blanco de Molibdeno.</li> </ul>	Equipo para realizar deposición por pulverización Catódica por corriente directa (Sputtering DC).
2	Trazado de patrón laser, para formar aislamiento entre celda y celda, solo afecta a la capa de molibdeno		Equipo para el trazado del patrón láser
3	Deposición de precursor de Cobre Indio Galio	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Blanco de Sulfuro de Cadmio (CIG)</li> </ul>	Equipo para realizar deposición por pulverización Catódica por corriente directa (Sputtering DC).
4	Proceso de selenización sobre el precursor de CIG para conformar la capa semiconductor	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Selenio</li> </ul>	Equipo para realizar Deposición Química de Vapor
5	Deposición de la Capa Absorbente	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Sulfuro de Cadmio (CdS)</li> <li>ó</li> <li>● Sulfuro de Indio (InS)</li> </ul>	Equipo para deposición por baño químico.
6	Trazado de patrón mecánico, para formar contactos para la conectividad de las celdas		Equipo para el Patrón Mecánico
7	Deposición de una capa de oxido conductor transparente, que será usada de contacto frontal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Oxido de Indio Estaño.</li> <li>o</li> <li>● Oxido de Zinc dopado con aluminio</li> </ul>	Equipo para realizar deposición por pulverización Catódica por corriente directa (Sputtering DC).
8	Trazado de patrón mecánico, para formar contactos para la conectividad de las celdas		Equipo para el Patrón Mecánico

**TABLA 4.11**  
**Etapas de fabricación de las celdas de CIGS, (Continuación)**

Etapas	Descripción	Materiales	Equipos
9	Conexión de las celdas laminado, instalación de la caja de conexiones, y enmarcado.	<ul style="list-style-type: none"><li>● Encapsulante (EVA).</li><li>● Cables.</li><li>● Caja de conexiones.</li><li>● Marco.</li></ul>	
10	Revisión de los parámetros de la celda.		Equipo para la inspección: Simulador Solar.

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

#### **4.2.2 Disponibilidad de recursos para la fabricación de la celda solar en Venezuela.**

En esta sección se verifica la disponibilidad de los materiales, reactivos y equipos necesarios para la elaboración de la celda solar en el país a través de la ubicación y contacto con empresas proveedoras de los materiales, reactivos y equipos necesarios para la elaboración de la celda, a fin de estimar disponibilidad de los mismos.

En el punto 4.2.1 se listó los materiales y los equipos necesarios para construir cada tipo de celda solar, especificando los necesarios por etapa. Debido a que en Venezuela no se fabrican celdas solares es necesario adquirir la mayoría de los materiales y equipos para la fabricación de la celda.

En el Anexo III se muestra una lista de proveedores a nivel mundial donde se pueden adquirir dichos materiales y equipos, se recomienda realizar otra investigación donde se estudie de manera más específica los costos de cada material de la celda a construir. La lista de proveedores que se presenta es para los materiales y equipos de la celda a seleccionar producto del análisis comparativo del punto 4.3.1.

En Venezuela, según información proporcionada por el Lic. Leonardo Barrios, funcionario de FUNDAELEC, en Venezuela existe una fábrica de ensamblaje de módulos fotovoltaicos, sin embargo no se produce la celda. Actualmente se está llevando un proyecto en FUNDAELEC, donde se estudia la factibilidad de fabricar celdas solares a

partir de obleas de silicio en el país. Todos los módulos que ingresan al país son importados.

#### 4.2.3 Estimación de costos de la fabricación de cada tipo de celda solar.

Los costos son estimados de acuerdo a información suministrada por instituciones encargadas de consolidar información sobre el mercado de sistemas fotovoltaicos a nivel mundial.

En la figura 4.25 se observa cómo están relacionados la eficiencia y el costo de fabricación de las celdas solares. Según S. Mehta [55], actualmente las celdas solares de silicio son superiores a las celdas solares de capa delgada, a pesar de que estas celdas solares de silicio tienen un costo más elevado, aun son más eficientes que las otras tecnologías. Buscando que en el futuro las celdas solares que se produzcan sean a un menor costo y de alta eficiencia.

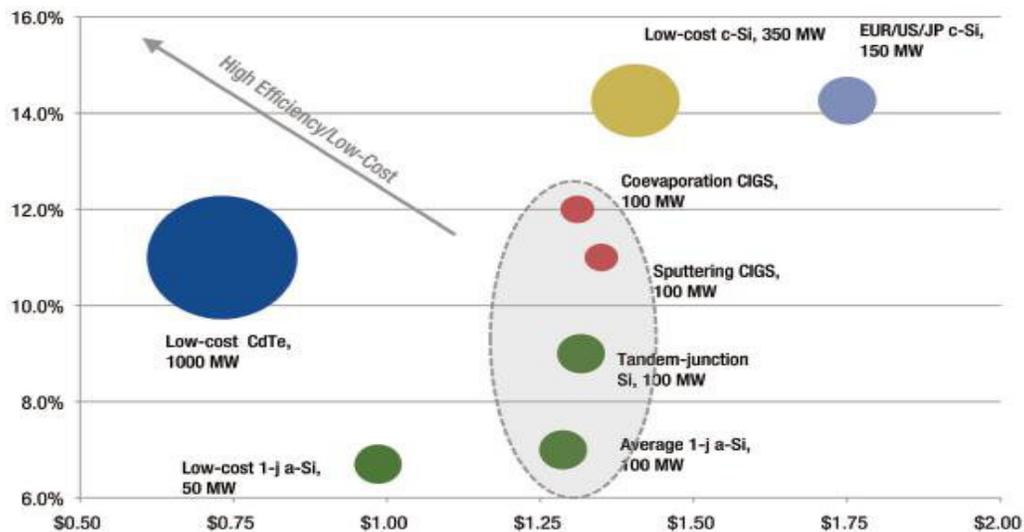


Figura 4.25 Costos de Fabricación VS Eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas solares. Fuente: S. Mehta[55]

También en la figura 4.25 se aprecia que las celdas de Teluro de Cadmio presentan un costo aproximado de 0,75\$ con una eficiencia entre 10-12%, siendo el proceso de fabricación más económico, mientras que las celdas de silicio monocristalino tiene un costo de fabricación entre 1,25-1,5 \$ y una eficiencia aproximada de 14%, teniendo las eficiencias

más altas, mientras que las celdas de capa delgada CIGS y silicio amorfo, se producen a un costo por encima de 1,25\$ como en el caso de las de silicio monocristalino, para que estas tecnologías puedan emerger deben estar orientadas a ser mas eficientes y disminuyendo su costo de fabricación.

En la figura 4.26 se aprecia el costo de fabricación por módulo y la producción en Megavatios de las diferentes tecnologías de celdas solares.

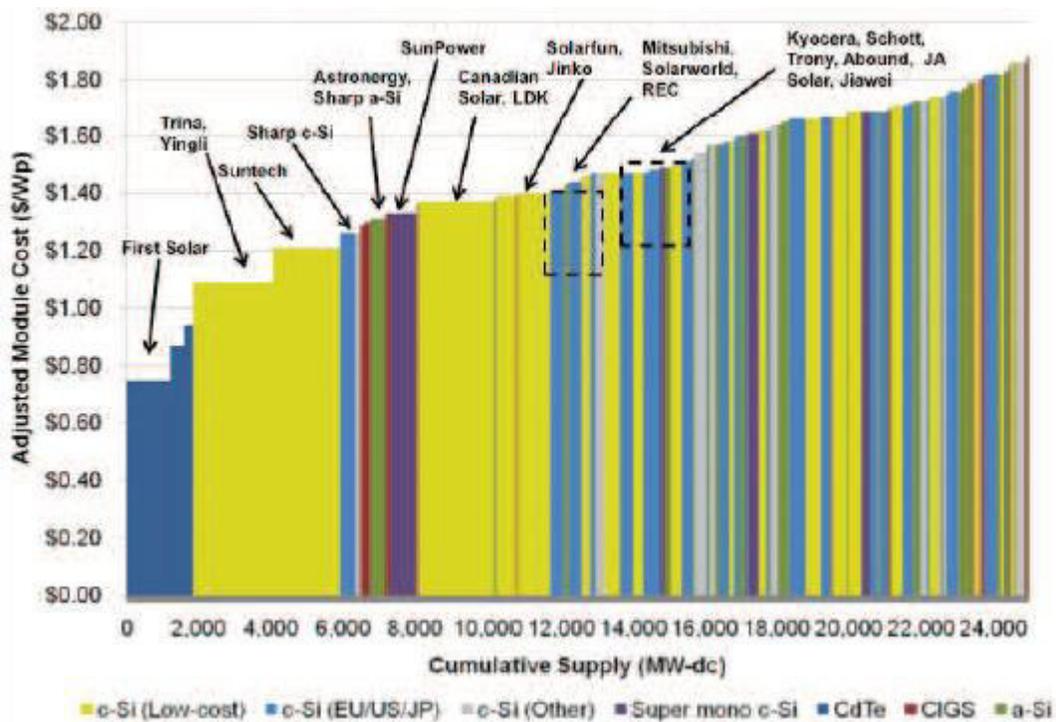


Figura 4.26 Costo de fabricación de módulos VS producción en MW. Fuente: S. Mehta[55]

Como se observa en la figura 4.26 las celdas de silicio cristalino poseen la mayor producción en megavatios, cabe destacar que las celdas de telurio de cadmio a pesar de ser una tecnología emergente, la empresa First solar, principal productora de esta tecnología, posee niveles de producción comparables a las empresas productoras de silicio cristalino a nivel mundial, lo cual es un indicativo de la competitividad de esta tecnología siempre y cuando se invierta en investigación y desarrollo para el mejoramiento de la misma. Además

en la figura se pueden observar el costo del modulo de las distintas tecnologías en celdas solares, lo mismo se presenta en la tabla 4.12.

**TABLA 4.12****Costo del modulo de las distintas tecnologías de celdas solares, Año 2010. Fuente: S. Mehta [55]**

Tecnología	Costo(US-\$/Wp)
Silicio Cristalino	<ul style="list-style-type: none"><li>● Mínimo:1.10</li><li>● Máximo:1.84</li><li>● Promedio:1.47</li></ul>
Teluro de Cadmio	<ul style="list-style-type: none"><li>● Mínimo:0.75</li><li>● Máximo:1.82</li><li>● Promedio:1.285</li></ul>
Silicio Amorfo	<ul style="list-style-type: none"><li>● Mínimo:1.30</li><li>● Máximo:1.83</li><li>● Promedio:1.565</li></ul>
CIGS	<ul style="list-style-type: none"><li>● Mínimo:1.28</li><li>● Máximo:1.32</li><li>● Promedio:1.30</li></ul>

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

En la tabla anterior se muestra que de las tecnologías en capa delgada las celdas de teluro de cadmio son las que poseen el menor costo de producción promedio, y además poseen el menor costo de producción entre todos los tipos de celdas. La tecnología de silicio amorfo posee el mayor costo promedio entre las tecnologías de capa delgada y un costo superior al de la tecnología de silicio cristalino. Manteniendo esta tendencia de costos, apunta a que el menor costo del módulo en tecnología de capa delgada al cual se le hace referencia en la tabla 4.3, es un módulo de celdas solares de teluro de cadmio.

Sin embargo, es importante considerar que cuando se trata de silicio cristalino se toma en cuenta la tecnología de silicio monocristalino y de silicio policristalino, y el costo de producción promedio se ve afectado, ya que el costo de producción de las celdas de silicio policristalino es inferior al de las celdas de silicio monocristalino.

Además, los precios de la tabla anterior corresponden al año 2010, si se comparan por los datos proporcionados por la firma PVInsight mostrados en el punto 4.1.3, se muestra una disminución importante en los costos de fabricación.

En la figura 4.27 se muestra una comparación en los precios de las principales tecnologías de capa delgada, proporcionada por la firma PVInsight, en ella se puede observar la drástica reducción en los costos de manufactura de las celdas de telurio de cadmio (CdTe) y las celdas de Cobre-Indio-Galio-Selenio, para el año 2012 se puede apreciar como las celdas de silicio amorfo son las tecnologías de mayor costo de producción, por encima del 1 \$-US/Wp

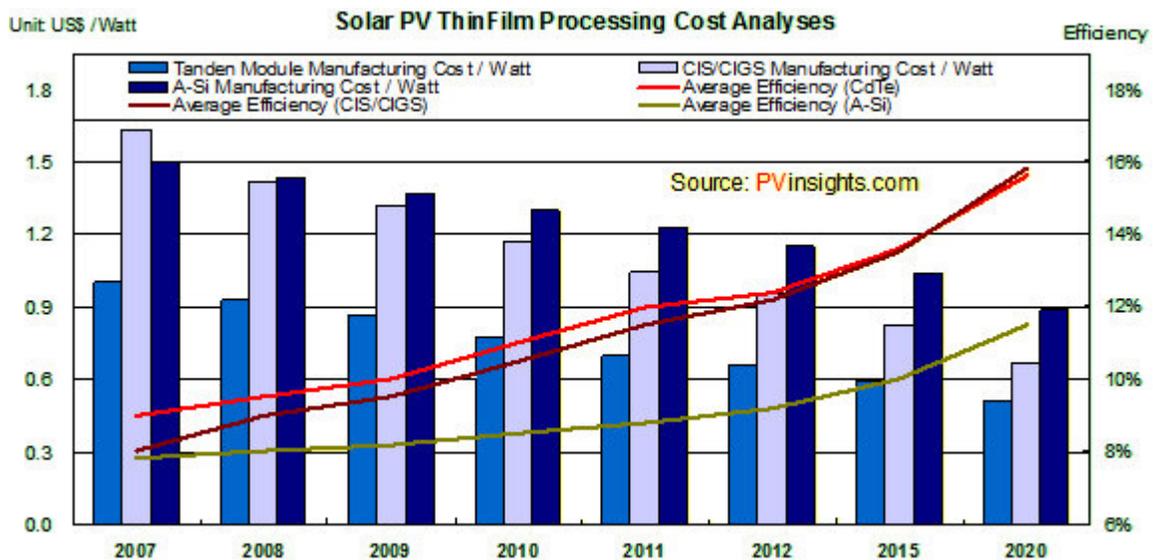


Figura 4.27 Costo de fabricación de módulos de capa delgada. Fuente: Solar PV Modules Weekly Spot Price [48].

Por último es importante comparar los costos de fabricación de los dos tipos de silicio cristalino, para ello, se usarán valores proporcionados por la firma PVInsight los cuales se muestran a continuación en la tabla 4.13.

Por último es importante comparar los costos de fabricación de los dos tipos de silicio cristalino, para ello, se usarán valores proporcionados por la firma PVInsight los cuales se muestran a continuación en la tabla 4.13.



TABLA 4.13

**Costo de fabricación de las celdas de silicio cristalino. Fuente: Solar PV Modules Weekly Spot Price [48]**

Celda	Alto (US-\$)	Bajo (US-\$)	Promedio (US-\$)
156 mm MultiSolarCell	2.19	1.36	1.645
156 mm MonoSolarCell	2.60	1.79	2.191

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

Al comparar estas 2 celdas, se puede observar que las celdas solares de silicio policristalino tienen un costo inferior a las celdas solares de silicio monocristalino. Esto quiere decir que el menor costo de fabricación al cual se le hace referencia en la tabla 4.3 es un módulo de silicio policristalino.

### **4.3 Diseño propuesto y procedimiento para la elaboración de un módulo de celda solar en Venezuela.**

En esta sección se emplea la herramienta propuesta en el Anexo I para realizar el análisis comparativo de las diversas tecnologías en celdas solares, y además se presentan los criterios de diseño del módulo fotovoltaico compuesto con celdas solares de la tecnología escogida mediante este análisis.

#### **4.3.1 Análisis comparativo para seleccionar el tipo de celda que compondrá el módulo a diseñar.**

Se tomaron aquellas celdas con una vida útil mayor a 10 años, y que estuvieran en una etapa comercial, por lo tanto las celdas sensibilizadas con pigmentos y las celdas orgánicas no forman parte del análisis.

Las alternativas a considerar serán:

Alternativa #1: Celdas de Silicio Monocristalino. (c-Si)

Alternativa #2: Celdas de Silicio Policristalino. (p-Si)

Alternativa #3: Celdas de Silicio Amorfo (a-Si)



Alternativa #4: Celdas de Solares de Teluro de Cadmio (CdTe)

Alternativa #5: Celdas de Cobre-Indio-Galio-Selenio. (CIGS)

Los factores que se tomarán en cuenta para el análisis serán:

- Costo de la energía: Se tomará en cuenta el costo de fábrica de las distintas tecnologías, para ello se tomará en cuenta el análisis hecho en 4.2.3. En el análisis tiene una ponderación de 6, ya que se busca una tecnología de bajo costo, para que busque competir con los bajos costos de generación del país.
- Eficiencia: Se tomará en cuenta los valores de eficiencia comercial de las celdas solares, para ello se tomará en cuenta el análisis hecho en el 4.1.3. Tiene una ponderación de 7 y lo consideramos el criterio de selección de mayor importancia, esto debido a que se espera que las celdas producidas tengan la capacidad transformar la mayor cantidad de radiación solar en energía útil.
- Complejidad del proceso de fabricación: Se tomará en cuenta la cantidad de etapas necesarias en el proceso de fabricación y la complejidad de las mismas, se tomará en cuenta el análisis hecho el punto 4.2. Tiene una ponderación de 5, ya que al estar incursionando en un campo nuevo se buscan procesos de fabricación sencillos de implementar.
- Efecto de la temperatura: Para ello se evaluará el rendimiento de la celda bajo diversas condiciones de temperatura, para ello se tomará en cuenta el análisis hecho en 4.1.3. Tiene una ponderación de 2, a pesar de que en Venezuela la temperatura ambiente promedio es alta, la disminución en los niveles de eficiencia debido a los efectos de la temperatura, no representa un cambio significativo que afecte el criterio de selección, al menos no con los niveles de eficiencia actuales.
- Diversidad de aplicaciones: Se tomará en cuenta la diversidad y la versatilidad de aplicaciones que poseen las celdas. Tiene una ponderación de 1, ya que en Venezuela se está interesado principalmente en una sola aplicación y es la implementación de sistemas fotovoltaicos en lugares aislados de la red.
- Madurez de la tecnología: En este punto se tomará en cuenta el tiempo invertido en investigación y desarrollo y la evolución en el mercado y su porcentaje en el



mercado global, se tomará en cuenta el análisis hecho en 4.1.3. Tiene una ponderación de 4, ya que se busca una tecnología que sea sencillo el intercambio tecnológico y que tenga mucha presencia en el mercado para que se facilite la adquisición de equipos necesarios para el proceso de fabricación. Además en este punto también se tomará en cuenta el potencial que tiene la celda para incrementar sus valores de eficiencia en un futuro.

- **Materiales:** En este punto se tratará la disponibilidad de materiales, se tomará en cuenta el análisis hecho en 4.1.3. Tiene un ponderación de 3, ya que la disponibilidad de estos está sujeta a la selección de la celda y se busca que los materiales tengan una alta reserva para que su producción sea sustentable en el tiempo.

A continuación se presenta el análisis de cada uno de los factores y las ponderaciones correspondientes a cada una de las tecnologías.

### **Costo de la Energía**

Para determinar el costo de los módulos de las distintas tecnologías de celdas solares, se usa la información presentada en el punto 4.1.3 y en el 4.2.3. La data de los costos de fabricación más reciente, presentada en la tabla 4.3, no diferencia entre los diferentes tipos de celdas solares, solo en 2 grupos, módulos de silicio, y módulos de capa delgada. Sin embargo, usando la información presentada en el punto 4.2.3, y asumiendo que las tendencias en los precios se han mantenido, podemos asumir las siguientes aseveraciones sobre los datos presentados en la tabla 4.3:

- El costo más bajo de producción de las celdas de capa delgada corresponde a las celdas de telurio de cadmio (CdTe), el mayor corresponde a las celdas de silicio amorfo, y el promedio a las celdas de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS).
- El menor costo de producción corresponde a los módulos de silicio policristalino, y el mayor a las celdas de silicio monocristalino.

En base a esto, se realizará una relación lineal que sea función de los costos de fabricación, en donde los módulos de mayor costo, correspondiente a los módulos de silicio



monocristalino, tiene una puntuación de 1, y los módulos de menor costo, correspondientes a los módulos de telurio de cadmio, tiene una puntuación de 10. En la tabla 4.14 se muestra el análisis comparativo de los costos de fabricación de las distintas tecnologías en módulos solares.

**TABLA 4.14**  
**Comparación de costos de fabricación**

Tipo de celdas	Costo de fabricación [US-\$/Wp]	Puntuación
Silicio Monocristalino	0.99	1
Silicio Policristalino	0.55	9
CdTe	0.52	10
CIGS	0.673	7
Silicio amorfo	0.94	2

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

Las celdas solares de telurio de cadmio tiene 10 puntos ya que son las celdas de menor costo de fabricación, sin embargo, su costo estará sujeto a la disponibilidad del telurio, mineral que no es muy abundante en el planeta, lo cual es un factor que puede afectar en un análisis futuro.

Le siguen las celdas de silicio policristalino con una puntuación de 9, ya que son las celdas de silicio más económicas, y tomando como referencia la tabla 4.3, estas le siguen en precio a las celdas de telurio de cadmio (CdTe), considerando que ambos tipos de celdas son las más económicas dentro de sus categorías.

Las celdas de cobre-indio-galio-selenio (CIGS) tienen una puntuación de 7 ya que son considerablemente más costosas de fabricar que las celdas de capa delgada de telurio de cadmio, si tomamos de referencia los precios de la tabla 4.12, tiene un costo de producción promedio inferior a las celdas de silicio, sin embargo, eso era antes de la baja en el precio del silicio policristalino, factor que disminuyó el costo de las celdas de silicio como se puede ver en la tabla 4.3. Lo anteriormente expuesto redujo el costo de las celdas de silicio monocristalino por debajo de 1 US-\$/Wp sin embargo en comparación a otras tecnologías es aun el costo más elevado, esto debido a la complejidad del proceso de fabricación, es por ello que tiene una puntuación de 1.



Por último las celdas de silicio amorfo, tienen una puntuación de 2, debido a que, a pesar de que son celdas de un material tan abundante como el silicio, el uso de técnicas para incrementar los valores de eficiencia, y reducir la degradación por la exposición prolongada al sol, han hecho estas celdas costosas de producir, en la figura 4.23 se aprecia que estas celdas no han tenido la drástica reducción en los costos de fabricación como otras las tecnologías de capa delgada.

## **Eficiencia**

Usando de referencia los valores de eficiencia comercial presentados en la tabla 4.1, y aplicando una relación lineal, donde el mayor valor de eficiencia, correspondiente a las celdas de silicio monocristalino, le corresponde 10, y al menor valor de eficiencia correspondiente a las celdas de silicio amorfo le corresponde 1, se obtiene las siguientes puntuaciones para cada tipo de celda, presentadas en la tabla 4.15.

**TABLA 4.15**  
**Comparación de Valores de eficiencia comercial**

<b>Tipo de celdas</b>	<b>Eficiencia Comercial</b>	<b>Puntuación</b>
Silicio Monocristalino	22%	10
Silicio Policristalino	18%	7
CdTe	14.4%	5
CIGS	12.1%	4
Silicio amorfo	8%	1

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

Las celdas de silicio monocristalino son las celdas más eficientes en el mercado, esto quiere decir ocupando una misma área, estas celdas son capaces de producir más energía que cualquier otra tecnología fotovoltaica.

## **Complejidad del proceso de fabricación.**

El proceso de fabricación de las celdas solares de capa delgada es más sencillo que el de las celdas solares de silicio, ya que consiste en la deposición consecutiva de capas sobre un sustrato de vidrio, sin embargo, como se presentó en el punto 4.2, cada proceso de fabricación tiene sus diferencias.



El proceso más sencillo es el de las celdas de silicio amorfo, ya que no posee materiales tóxicos que compliquen el manejo, es por ello que tiene una puntuación de 10.

Le siguen las celdas de telurio de cadmio (CdTe) y Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS), ambas con 8, en el caso de las celdas de telurio de cadmio, por el entrenamiento y medidas de seguridad requeridas para el manejo del cadmio. Y en el caso de las celdas de Cobre-Indio-Galio-Selenio, debido a que durante el proceso de la creación de las capas activas, es necesario un proceso de selenización al precursor de Cobre-Indio-Galio (CIG), complicando de esta manera el proceso.

Las celdas de silicio, requiere un proceso más complejo ya que contempla la obtención del silicio grado solar (99.999999% de pureza), y posteriormente el diseño de una capa antireflectante y la texturización de la celda para incrementar los valores de eficiencia.

Las celdas de silicio monocristalino son las más complejas de fabricar, debido a que es necesario aplicar el proceso de Czochralski, el cual es lento y requiere alto grado de precisión al momento de llevarlo a cabo, es por ello que tiene una puntuación de 1.

Las celdas de silicio policristalino, no requiere el empleo del proceso de Czochralski, sin embargo si el empleo de una capa anti reflectante y un proceso de texturización de la celda, es por ello que tiene una puntuación de 5.

### **Efecto de Temperatura.**

Tomando como referencia los datos de eficiencia nominal a una temperatura de 55 grados Celsius, presentados en la tabla 4.6, y usando una relación lineal, podemos asignarle la siguiente puntuación a cada tipo de celda, tomando como máximo las celdas de silicio amorfo con una puntuación de 10, y como mínimo, las celdas de silicio monocristalino, y Cobre-Indio-Galio-Selenio, con una puntuación de 1. En la tabla 4.16 se presentan los resultados obtenidos.

TABLA 4.16

## Comparación de efectos de temperatura

Tipo de Celda	Eficiencia nominal a 55 grados Celsius	Puntuación
Silicio Monocristalino	0.85	1
Silicio Policristalino	0.86	2
CdTe	0.92	9
CIGS	0.85	1
Silicio amorfo	0.93	10

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

Las celdas de telurio de cadmio (CdTe) y las celdas de silicio amorfo (a-Si) son las que obtuvieron mayor puntuación. Tomando en cuenta que en Venezuela la temperatura ambiente es elevada, es aconsejable el empleo de estas celdas, siempre y cuando mejoren sus niveles de eficiencia.

### Diversidad de Aplicaciones.

Debido a la diversidad de aplicaciones que posee una celda solar, en la tabla 4.17 se presenta una estructura para la ponderación de cada una de las tecnologías, que sea función de las aplicaciones posibles.

TABLA 4.17 Diversidad de aplicaciones

Tipo de aplicación	Aplicación	Ponderación
Sistemas conectados a la red	1. Residencial y comercial	1
	2. Industrial a gran escala. (Plantas de Generación)	2
Sistemas Aislados	3. Aplicaciones industriales	2
	4. Electrificación Rural	4
	5. Bienes y Consumo.	1

Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

Esta ponderación, es debido a que en Venezuela la principal utilidad que se le da a los sistemas fotovoltaicos, es el de alimentar sistemas aislados, principalmente aquellas zonas



rurales que no tienen acceso a la red. Siguiendo esta clasificación la puntuación de cada celda se presentan en la tabla 4.18.

**TABLA 4.18**

**Comparación de diversidad de aplicaciones por tipo de celda.**

Tipo de Celda	1	2	3	4	5	Puntos
Silicio Monocristalino	+	+	+	+	-	9
Silicio Policristalino	+	+	+	+	-	9
CdTe	+	+	+	+	+	10
CIGS	+	+	+	+	+	10
Silicio amorfo	+	-	+	+	+	8

(+): Cumple, (-): no cumple.

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

En la tabla 4.18 se puede apreciar como las celdas solares más versátiles son las celdas de capa delgada de telurio de cadmio (CdTe) y de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS), le siguen las celdas de silicio cristalino, que al ser las de mayor eficiencia, no requieren tanto espacio como la tecnología de película delgada para generar un mismo valor de potencia. Una característica que destaca de las celdas de capa delgada, es la capacidad de emplear un sustrato flexible lo que permite instalar celdas en muchos dispositivos móviles, como calculadoras, celulares, e incluso vestimenta, característica que no goza las celdas de silicio cristalino debido a su rigidez.

### **Madurez de la tecnología.**

Para realizar la ponderación se emplearán los siguientes criterios:

- El porcentaje en el mercado global tendrá un peso porcentual de 70%, debido a que este factor influirá en la cantidad de proveedores y equipos disponibles de determinada tecnología de celda solar. Para realizar la ponderación se usará una relación lineal tomando como referencia los datos del porcentaje del mercado global para 2010, presentados en la tabla 4.1.



- La evolución en el mercado global en la última década tendrá un peso porcentual de 10 %, esto permitirá visualizar una tendencia en el empleo de determinado tipo de celda. Para realizar la ponderación se usará una relación lineal usando de referencia la variación en los porcentajes de mercado global, desde el 2001 hasta el 2010, de las distintas tecnologías presentados en la tabla 4.1 y el análisis hecho en el punto 4.1.3.
- Estado de desarrollo tecnológico del tipo de celda, para ello se analizará la figura 4.2, este parámetro influye en la cantidad de información disponible sobre determinado tipo de celda, facilitando de esta manera el intercambio tecnológico. Además es un indicativo del tiempo empleado en investigación y desarrollo para optimizar los valores de eficiencia y durabilidad de la celda. Por lo anteriormente expuesto este factor tiene un peso porcentual de 20%.

En la tabla 4.19 se presentan los resultados del análisis de la madurez tecnológica de las distintas tecnologías en celdas solares.

**TABLA 4.19**  
**Madurez de la tecnología de Celdas Solares**

Tipo de Celda	Porcentaje en el mercado global (70%)	Evolución en el mercado (10)%	Estado de desarrollo tecnológico (20%)	Puntuación Total
Silicio Monocristalino	8	8	10	8
Silicio Policristalino	10	1	8	8
CdTe	2	10	2	3
CIGS	1	7	4	2
Silicio amorfo	1	6	6	2

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

Se observa como los valores de puntuación más alto se presentan en las celdas de silicio, y este resultado es de esperarse, ya que éstas dominan el 85% del mercado global, además de estar en el mercado por más de 50 años. Entre las celdas de capa delgada es importante



destacar la creciente evolución en el mercado que han tenido las celdas de telurio de cadmio (CdTe), esta al igual que las celdas solares de Cobre-Galio-Indio-Selenio (CIGS), son unas de las tecnologías emergentes que, de continuar la tendencia, la producción a gran escala ayudaría a reducir aún más los costos de producción y permitiría una mayor inversión en investigación y desarrollo mejorando los niveles de eficiencia de estas tecnologías.

Otro aspecto de importancia que se aprecia en la tabla 4.19, es la baja puntuación en la evolución en el mercado que tiene las celdas de silicio policristalino con respecto a otras tecnologías, y está perdida en la presencia del mercado, se debe al bajo costo de manufactura de las celdas de capa delgada, y las drásticas variaciones en el precio del silicio de grado solar.

### **Materiales.**

Para llevar a cabo la ponderación de cada una de las tecnologías, se tomará en cuenta las reservas mundiales que tienen de los materiales. En Venezuela existen yacimientos en los cuales si se aplican los procesos de extracción correspondiente se podría contar con cada uno de los elementos necesarios para construir cualquier tipo de celda, este factor no se tomará en cuenta para el análisis.

En el punto 4.1.3 se hace un análisis de los materiales principales necesarios para producir los diferentes tipos de celdas solares, y se presentan las reservas a nivel mundial de cada uno de los elementos y los niveles de producción. La puntuación de cada celda dependerá de las reservas a nivel mundial de los elementos principales que la componen, con un peso porcentual de 50% debido a que este factor influirá la sustentabilidad de la producción en el tiempo. La producción anual de dichos materiales a nivel mundial, corresponderá al otro 50% de la puntuación, debido a que es necesario materiales con altos niveles de producción que garanticen en cierta medida el bajo costo de los mismos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.20.

TABLA 4.20

**Comparación de las reservas de los materiales que componen las distintas celdas solares.**

Tipo de Celda	Materiales	Reservas Mundiales aproximadas (toneladas métricas) [51]	Producción anual 2012. (toneladas métricas) [51]	Puntuación
Silicio Monocristalino	Silicio policristalino	Muy grandes, no se posee una cifra.	235.000	8
Silicio Policristalino	Silicio policristalino	Muy grandes, no se posee una cifra.	235.000	8
CdTe	Cadmio	500.000	23.000	4
	Telurio	24.000	ND	
CIGS	Cobre	680.000	17.000	1
	Indio	ND	670	
	Galio	ND	273	
	Selenio	98.000	2000 <sup>1</sup>	
Silicio amorfo	Silicio	Reservas de Silicio (muy grandes no estimadas)	7.600.000	10

ND: No disponible.

<sup>1</sup> Excluyendo la producción en USA.**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

En la tabla 4.20 se observa como los materiales necesarios para fabricar las celdas solares de capa delgada de telurio de cadmio y de cobre-indio-galio-selenio, tienen niveles de producción y reservas limitadas en comparación al silicio. Tomando en cuenta la abundancia y los niveles de producción las celdas de silicio son la opción más confiable, y principalmente las celdas de silicio amorfo, ya que no es necesario el silicio policristalino, y por lo tanto los niveles de producción son más altos.

### **Análisis de Resultados**

A continuación se empleará la herramienta presentada en el anexo I para realizar la comparación entre las diversas tecnologías en celdas solares con el fin de determinar la más



conveniente para el potencial de fabricación de Venezuela y la elaboración del módulo fotovoltaico. En la tabla 4.21 se presentan los resultados.

**TABLA 4.21**  
**Instrumento para la realización del análisis comparativo**

Factores	Ponderación	c-Si	p-Si	a-Si	CdTe	CIGS
		Puntos	Puntos	Puntos	Puntos	Puntos
Costo de la energía	6	1	9	2	10	7
Eficiencia	7	10	7	1	5	4
Complejidad del proceso de fabricación	5	1	5	10	8	8
Efecto de la Temperatura	2	1	2	10	9	1
Diversidad de Aplicaciones	1	9	9	8	10	10
Madurez de la tecnología	4	8	8	2	3	2
Materiales	3	8	8	10	4	1
<b>Total</b>		<b>148</b>	<b>197</b>	<b>135</b>	<b>187</b>	<b>133</b>

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

La tabla 4.21 selecciona a las celdas de silicio policristalino como la celda más conveniente para el potencial de fabricación de Venezuela, seguido de las celdas de telurio de Cadmio. Entre las tecnologías de capa delgada, se presenta como más conveniente las celdas solares de telurio de cadmio (CdTe) seguido de las celdas de silicio amorfo, y por último las celdas solares de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS).

A continuación se presentarán los criterios de diseño de los módulos de silicio policristalino, y la descripción de como está compuesto.



### 4.3.2 Diseño del Módulo

Un módulo fotovoltaico consiste en la interconexión de múltiples celdas solares individuales, la mayoría de las veces en serie, con la finalidad de incrementar los valores de voltaje y potencia de salida de una única celda solar.

En esta sección se describirán los parámetros del módulo a diseñar, el cual estará compuesto por celdas de silicio policristalino. Además, se presentará la conectividad de las celdas que componen el módulo, los planos del mismo en el Anexo IV y V, la lista de materiales y el costo estimado de fabricación.

#### Parámetros del Modulo

El voltaje de operación de un módulo fotovoltaico es escogido típicamente para que sea compatible con baterías de 12v. Una celda solar tiene un voltaje de aproximadamente 0.6 V a una temperatura de 25 °C y un nivel de irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup> (condiciones estándares de prueba), como se puede observar en la ficha técnica de una celda de silicio policristalino fabricada por la empresa “Q-Cells.”, presentada en el anexo VI. Las celdas solares son típicamente conectadas en serie de tal forma de llegar al voltaje deseado.

Sin embargo, hay que tomar en cuenta, para el diseño del módulo, una reducción en el voltaje debido a efectos de temperatura en el módulo, y que la batería requiere un voltaje de carga de al menos 15 V. Una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> es capaz de calentar la celda unos 30 °C por encima de la temperatura del aire circundante [59].

Las características del módulo a diseñar fueron escogidas en función a los valores comunes de potencia y voltaje a máxima potencia de los módulos comerciales (presentados en el anexo VII). Las características del módulo a diseñar se presentan a continuación:

- Voltaje a máxima potencia: Al menos 15V, necesario para cargar una batería de 12V.
- Potencia de salida 100 W, a temperatura de operación según la temperatura ambiente de Valencia 30 °C.



El módulo será conformado por celdas solares de silicio policristalino, modelo 4.04, marca Q-Cells, la ficha técnica de esta celda se presenta en el anexo VI, y los parámetros eléctricos de la celda se presentan en la tabla 4.22.

**TABLA 4.22**

**Parámetros Eléctricos de la celda de silicio policristalino, Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3 4.04**

Parámetros	
Potencia Nominal	4.04 W
Corriente de cortocircuito. (Isc)	8.45 A
Voltaje de Vacío (Voc)	0.618 V
Eficiencia	16.60 %

Bajo condiciones estándar: 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, AM 1.5 G.

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

En la tabla 4.23 se presentan los coeficientes de temperatura de las variables presentadas en la tabla anterior.

**TABLA 4.23**

**Coefficientes de temperatura de la celda de silicio policristalino, Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3 4.04.**

Parámetro	
Corriente	+0.05%/C
Voltaje	-0.33 %/C
Potencia	-0.42 %/C

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

Determinación de los parámetros de la celda solar.

Debido a que el módulo solar es la interconexión de múltiples celdas solares, el comportamiento del módulo se comporta de la misma manera que el de la celda solar, por lo tanto lo podemos representar con la misma curva IV, y podemos partir el circuito equivalente de la celda presentado en el capítulo 2.

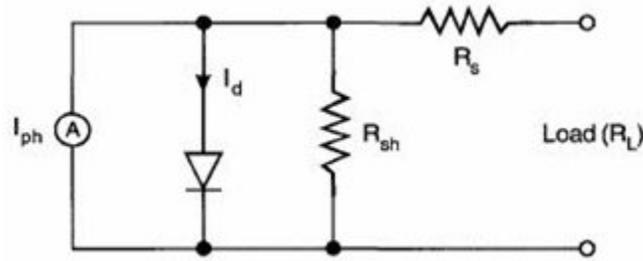


Figura 4.28 Circuito equivalente de una celda solar. Fuente: D. Carranza [13].

Y a partir del circuito equivalente se puede deducir la ecuación que define el comportamiento de la celda solar, presentada en el capítulo 2 en la ecuación 2.3

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Sin embargo este es un modelo ideal, que parte la ecuación real presentada en la ecuación 4.1.

$$I = I_{ph} - I_o \left[ e^{\frac{q(V-IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \left( \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (4.1)$$

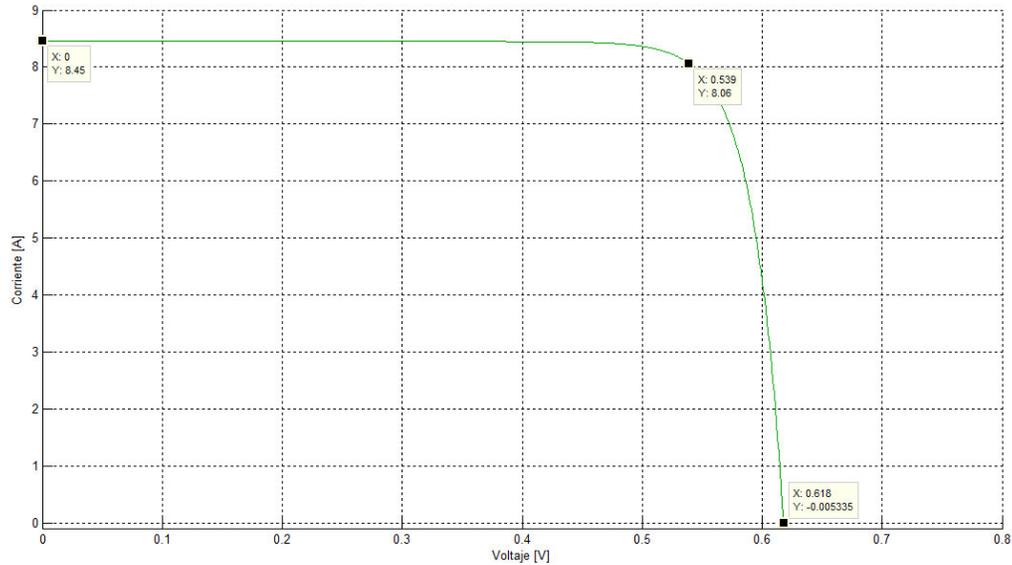
En donde se considera un diodo ideal ( $n=1$ ), una resistencia en serie igual a cero ( $R_s = 0$ ), una resistencia shunt que tiende a infinito ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ ), y una corriente fotogenerada igual a la corriente de cortocircuito ( $I_{ph}=I_{sc}$ ). Los parámetros  $q$  y  $k$  son constantes, de carga del electrón y de Boltzmann respectivamente.

El único parámetro desconocido es la corriente de saturación inversa, sin embargo se puede deducir a partir de la condición del circuito en circuito abierto, donde el voltaje es igual al voltaje de vacío ( $V = V_{oc}$ ) y la corriente es igual a cero ( $I = 0$ ). Se tiene entonces la siguiente ecuación.

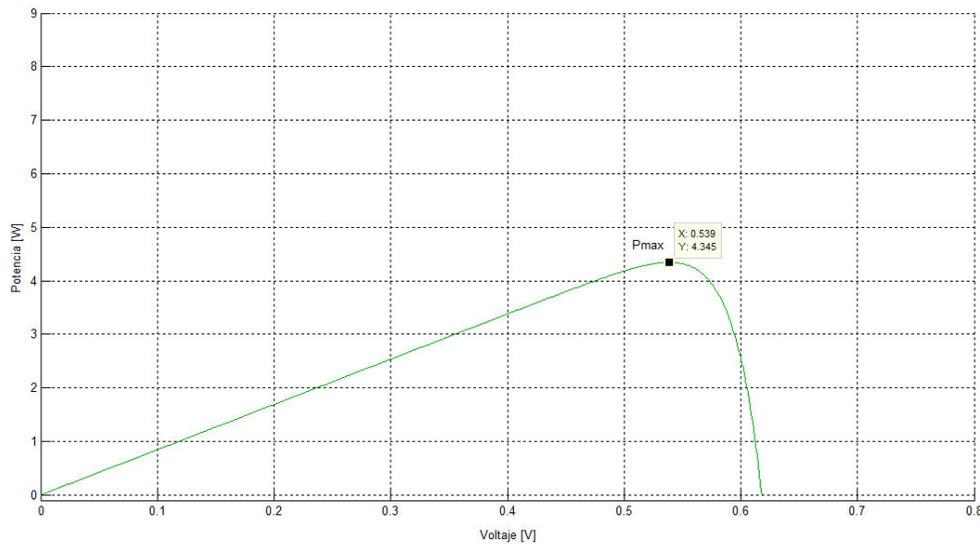
$$I_o = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}} - 1} \quad (4.2)$$

$$I_o = 2.961 \times 10^{-10} \text{ A}$$

A partir de este modelo, se uso una herramienta computacional para determinar la curva característica IV de la celda (figura 4.29a) y curva de la potencia en función del voltaje (figura 4.29b). Estas gráficas se presentan a continuación.



(a)



(b)

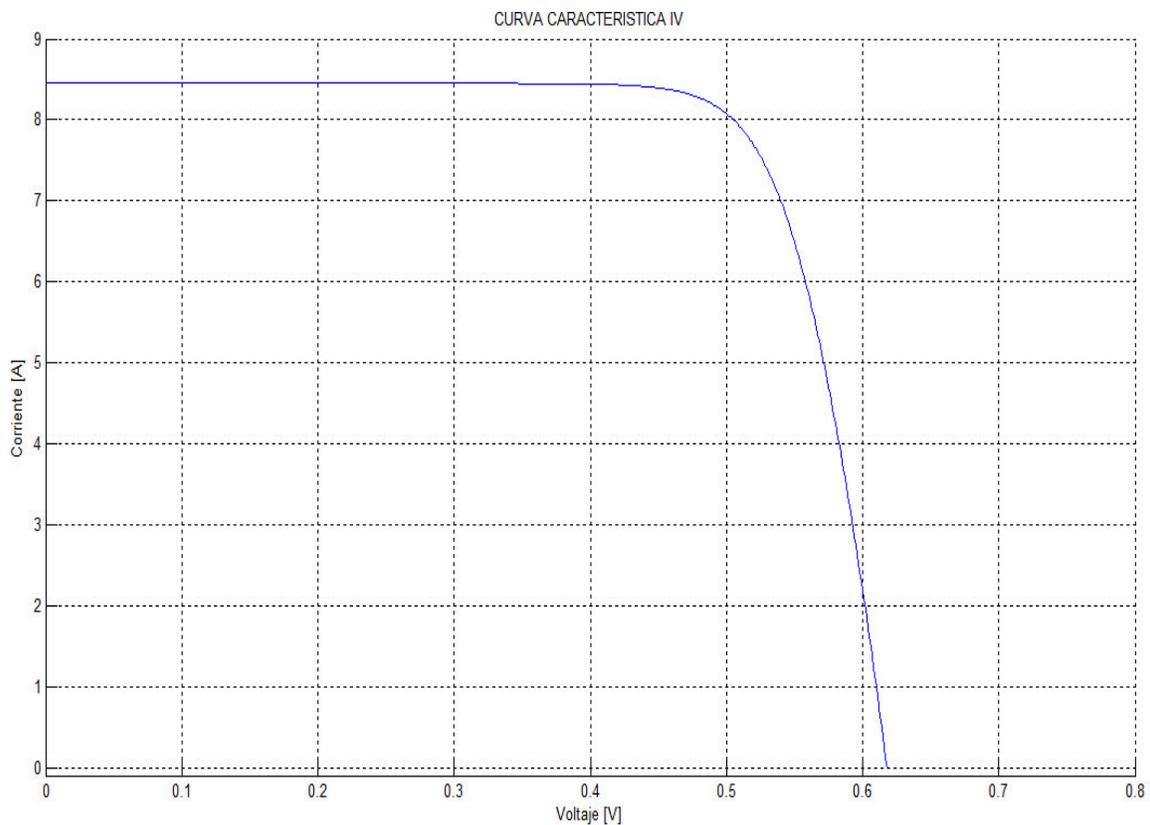
**Figura 4.29** Curvas características aplicando modelo ideal (a) Curva IV (b) Curva P vs V. Fuente: Arráz O. y Santos A. (2013).

Sin embargo la potencia a máxima potencia es 4.345 W y no coincide con la proporcionada con el fabricante es por ello que se usará el modelo propuesto por Dominique Bonkougou [38]. En este modelo se asume que el valor de la corriente

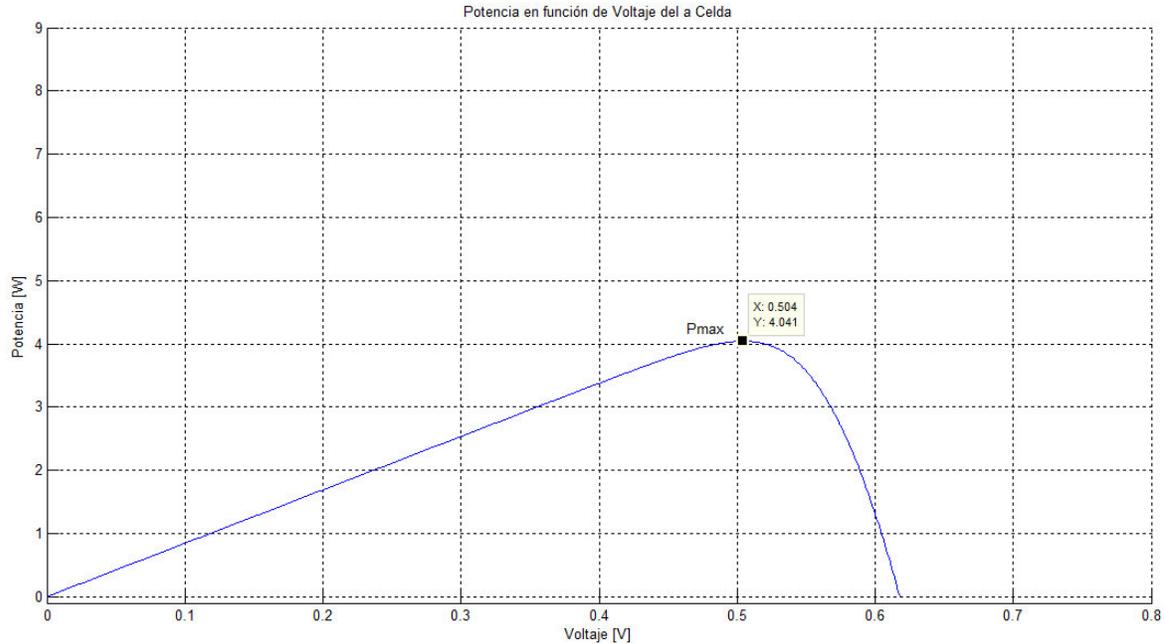
fotogenerada es igual al de la corriente de cortocircuito, se considera la resistencia en serie, y no considera la resistencia shunt debido a que el efecto de esta es despreciable en las celdas de silicio monocristalino y policristalino [38]. La ecuación entonces que de la siguiente forma:

$$I = I_{ph} - I_o \left[ e^{\frac{q(V-IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (4.2)$$

Para determinar la resistencia en serie, se uso un proceso iterativo usando la herramienta computacional, hasta que la potencia máxima coincidiera con la proporcionada por el fabricante bajo las mismas características. Las gráficas obtenidas se presentan en las figuras 4.30.



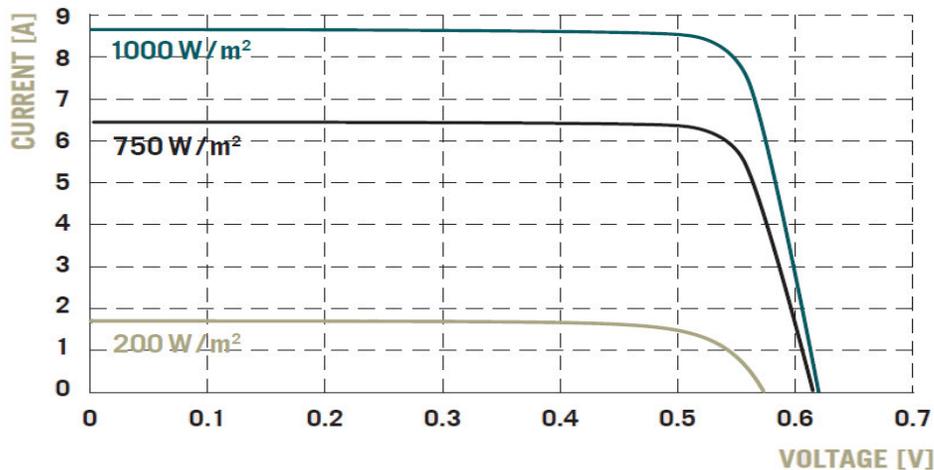
(a)



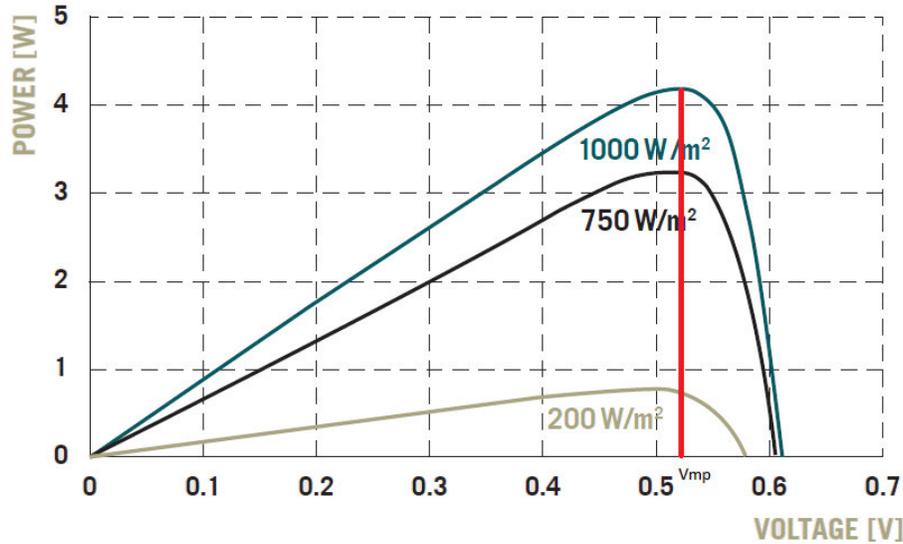
(b)

Figura 4.30 Curvas características del modelo con  $R_s$  (a) Curva IV (b) Curva P vs V. Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).

El valor de la resistencia en serie fue de  $4.7 \times 10^{-3} \text{ ohm}$  y el voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ) fue 0.504 V. Estas curvas se asemejan con las curvas proporcionadas por el fabricante, sin embargo, se recomienda mejorar la herramienta computacional empleada con el fin de obtener resultados más precisos. La curva IV de la celda Q-Cells Modelo 4.04, se presenta en la figura 4.31(a) y la curva de Potencia en función del voltaje se presenta en la figura 4.31 (b).



(a)



(b)

**Figura 4.31 (a) Curva IV (b) Curva P vs V. Fuente: Datasheet Celda Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3**

### Cálculo de número de celdas en serie.

Una vez obtenida la ecuación que representa el comportamiento de la celda y los parámetros de la misma, procedemos a obtener la ecuación que rige al módulo. Considerando que todas las celdas son iguales, podemos asumir que el módulo tendrá el mismo comportamiento de la celda pero, con un mayor voltaje de salida. En la ecuación 4.3 se presenta la ecuación que describe la curva IV del módulo fotovoltaico.

$$I = N_p \left\{ I_{ph} - I_o \left[ e^{\frac{q \left( \frac{V}{N_s} - \frac{IR_s}{N_p} \right)}{nkT}} - 1 \right] \right\} \quad (4.3)$$

Donde:

$N_p$  = Número de celdas en paralelo. En este caso una.

$N_s$  = Número de celdas en serie.

$I_o$  es la corriente de salida de la celda [A];

$V$  es el voltaje total del circuito. [V];

$I_o$  es la corriente de saturación inversa de una sola celda [A];

$I_L$  es la corriente fotogenerada de una sola celda, sin embargo  $I_L = I_{sc}$ ;

$n$  es el factor de idealidad, para la mayoría de las celdas es 1;

$q$  es la carga de un electrón:  $1.602 \times 10^{-19}$  coulomb;



$k$  es la constante de Boltzmann,  $1.380 \times 10^{-23}$  joule/K;

$T$  es temperatura en grados Kelvin

Sin embargo, en las condiciones de operación, la temperatura del módulo estará 30 grados Celsius por encima de la temperatura ambiente [59]. En el caso de la ciudad de Valencia la temperatura ambiente es 30 °C, por lo tanto la temperatura de operación del módulo será 60 °C (333 °K). Estas condiciones, afectan las variables eléctricas de la celda, según los coeficientes de temperatura presentados en la tabla 4.23. Los valores de los parámetros eléctricos de la celda bajo las condiciones de temperatura de operación se presentan en la tabla 4.24.

**TABLA 4.24**

**Parámetros Eléctricos de la celda Solar de silicio policristalino, Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3 4.04**

Parámetro	Valores.
Corriente de cortocircuito. ( $I_{sc}$ )	8.5979 A
Voltaje de Vacío ( $V_{oc}$ )	0.5466 V
Voltaje a Máxima potencia ( $V_{mpp}$ )	0.43 V

Irradiancia: 1000 W/m<sup>2</sup>, Temperatura: 60 °C.

**Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).**

Además, la corriente de saturación se ve también afectada por los valores de temperatura [60], la ecuación 4.4 permite determinar el valor de la misma bajo las nuevas condiciones de temperatura.

$$I_o(T) = I_o \left( \frac{T}{T_{nom}} \right)^3 e^{\left[ \left( \frac{T}{T_{nom}} - 1 \right) \frac{qEg}{nkT} \right]} \quad (4.4)$$

Donde,

$T$  es el nuevo valor de temperatura en grados Kelvin (333 °K);

$T_{nom}$  es el valor nominal al que fue calculada la corriente de saturación inversa en grados kelvin (298 °K);

$Y$   $Eg$  es el valor necesario para que un electrón se traslade desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, para el silicio es 1.12 eV.



El valor obtenido fue:

$$I_o = 2.961 \times 10^{-10} \text{ A}$$

Ahora bien, la conexión de las celdas que componen el módulo es tipo serie, debido a que permite incrementar los valores de voltaje del módulo. El voltaje total del módulo ( $V_t$ ) será la suma del voltaje de operación de cada celda individualmente ( $V_c$ ), se tiene entonces:

$$V_t = V_{c1} + V_{c2} + \dots + V_{cn} \quad (4.5)$$

Asumiendo que todas las celdas tienen características iguales y por lo tanto sus voltajes son iguales, se tiene que:

$$V_t = nV_c \quad (4.6)$$

Donde  $V_c$  es el voltaje en el punto de máxima potencia bajo las condiciones de operación y  $n$  es la cantidad de celdas que componen el módulo. Partiendo de la ecuación (4.6), se puede calcular el número de celdas en serie que debe poseer el módulo.

$$n = \frac{V_t}{V_c} = 150.43 = 34.8835 \cong 35 \quad (4.7)$$

Se necesitan al menos 35 celdas solares en serie para lograr un voltaje de al menos 15 v. Como factor de seguridad se usarán 36 celdas, además que es el valor que típicamente se emplea para la elaboración del módulos fotovoltaicos. A partir de este número se calculará la corriente total generada por el módulo, para determinar posteriormente la potencia y comprobar que cumpla con los valores de potencia deseada. Para ello se empleará la ecuación 4.3.

$$I = N_p \left\{ I_{ph} - I_o \left[ e^{\frac{q \left( \frac{V}{N_s} - \frac{I R_s}{N_p} \right)}{nkT}} - 1 \right] \right\} \quad (4.3)$$

Sin embargo, por el carácter no lineal de la ecuación, se emplearon medios computacionales para determinar los valores de potencia y corriente generada usando los parámetros de la tabla 4.22. En la figura 4.32 se muestra las curvas características del módulo operando a 60 °C y operando a la temperatura en condiciones estándar a 25 °C.

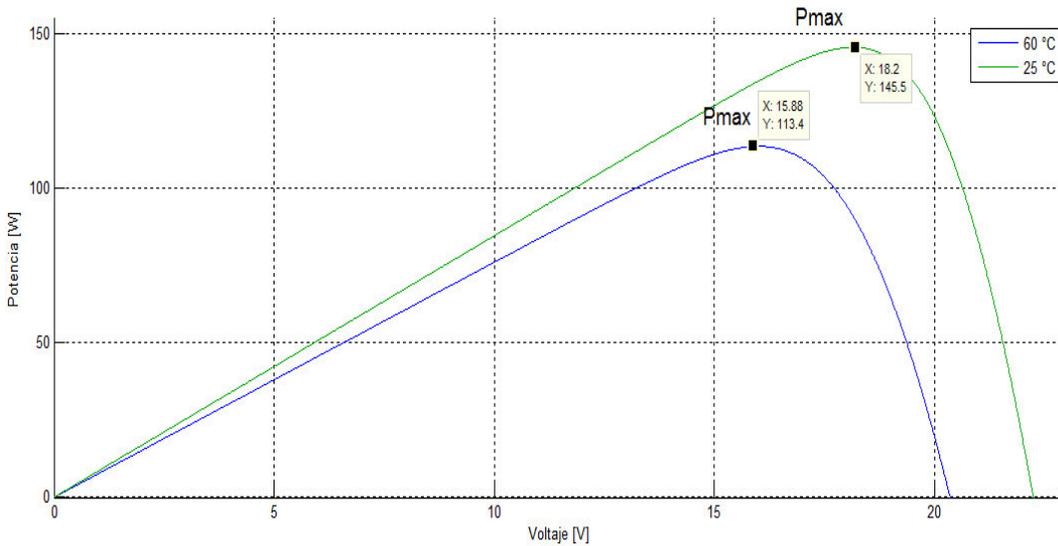
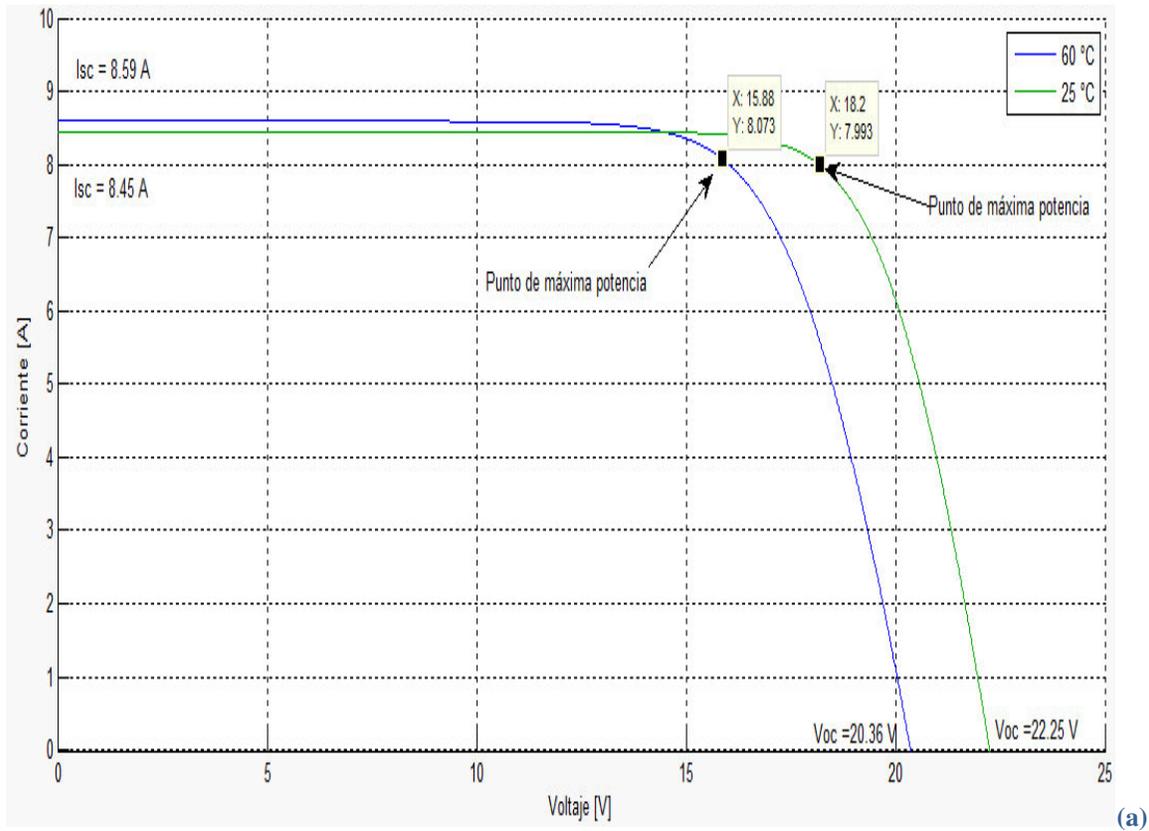


Figura 4.32 Curvas características del módulo diseñado. (a) Curva IV (b) Curva P vs V. Fuente: Arráez O. y Santos A. (2013).



En la figura 4.32 se puede el efecto que tiene la temperatura sobre las variables de potencia del módulo, sin embargo, operando a una temperatura de 60 °C el módulo es capaz de producir 113.4 W a un voltaje de salida de 15.88 V y una corriente a máxima potencia de 8.073 A. Por lo tanto cumple con las condiciones iniciales de diseño.

### Ensamblaje del módulo

La mayoría de los módulos fotovoltaicos de silicio consta de las siguientes partes:

- Una superficie transparente en la parte superior.
- Un encapsulante.
- Un capa posterior.
- Y un marco alrededor del borde exterior.

La superficie transparente de la parte superior debe tener una alta transparencia, para ser usado en un módulo fotovoltaico. Para celdas de silicio, la superficie superior debe altos niveles de transmisión de luz en el rango de longitud de onda de 350 nanómetros a 1200 nanómetros. Además la reflexión debe ser baja. Además de las propiedades de reflexión y transmisión la superficie superior debe ser impermeable al agua, tener una buena resistencia contra impactos, rigidez, poder permanecer estable bajo prolongadas exposiciones a rayos ultravioletas y tener una resistencia térmica baja. Existen muchas opciones que sirven para este propósito, incluyendo acrílicos, polímeros y vidrios. Vidrio templado, con bajo contenido en hierro es comúnmente usado para este propósito [58], sin embargo otros materiales como el polímero Teflón cumple con estas características.

El encapsulante es usado para proveer adhesión entre las celdas solares, la superficie superior, y la capa posterior del módulo fotovoltaico. El encapsulante debe ser estable a altas temperaturas y elevadas y prolongadas exposiciones a rayos ultravioletas. Además debe ser ópticamente transparente, y tener una baja resistencia térmica. El etil vinil acetato (EVA) es el material más común usado como encapsulante [58]. El EVA viene en delgadas láminas que son insertadas entre las celdas solares, la superficie superior y la capa posterior. Luego es calentado a 150 °C para fijar juntas las piezas del módulo.

La capa posterior debe tener una baja resistencia térmica y debe prevenir el ingreso de agua, o vapor de agua al módulo. En la mayoría de los módulos, una delgada lámina de polímero, típicamente Tedlar, es usado como capa posterior. [58]

Por último el componente final es un marco que cubra los bordes exteriores del módulo. Normalmente este marco esta hecho de aluminio, y debe ser libre de proyecciones que puedan resultar en estancamientos de agua o polvo. En la figura 4.TT se muestra la composición típica de un módulo de silicio.

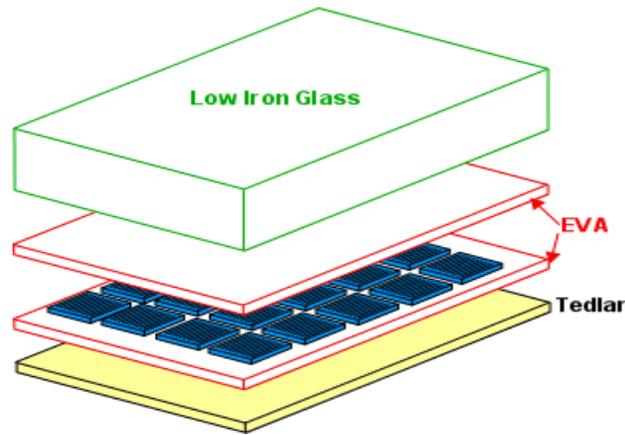


Figura 4.33 Composición típica de un módulo de silicio. Fuente: S. Bowden, C. Honsberg [58].

### Planos del módulo.

Haciendo uso de las fichas técnicas de la celda solar escogida, y las fichas técnicas de módulos comerciales se realizó un plano del módulo fotovoltaico diseñado, compuesto por 36 celdas de silicio, en una estructura de 9x4 celdas.

Las celdas son cuadradas con una medida de 156 milímetros de ancho por 156 milímetros de largo, con un espesor de  $160 \pm 30$  micrómetros. El plano de la celda se presenta en el anexo IV

El módulo tiene unas medidas de 742 x 1652 milímetros con un espesor de 35 milímetros y una separación entre celda y celda de 10 milímetros. El plano del módulo se presenta en el anexo V.



### Análisis de costo.

En esta sección se estimará el costo de fabricación del módulo de silicio policristalino. Para ello se usó información de proveedores online, considerando una tasa de cambio oficial de 6.3 Bs/\$. Para aquellos productos en los cuales no se precisa el costo de envío, se tomará como 30% del valor de compra, como es en el caso del vidrio y el marco del panel. La lista de componente y el costo de los mismos se presenta en la tabla 4. 25.

**TABLA 4.25**  
**Lista de Componentes**

Componente	Unidad	Costo en Bolívares	Costo en dólares US
40 Celdas solares de silicio policristalino 156x156mm + 200 pies de cable de bus, 16 metros de cable de bus, una caja de conexiones con cable,	1	615,069	97.63
2 lámina de EVA de 67x 37.6 pulgadas. y 1 Lámina de Tedlar para cubierta Posterior de 65.5 X 38.5 pulgadas	1	521,325 <sup>1</sup>	82.75
Vidrio templado bajo en hierro 32-3/4" x 52-1/4" + Marco para panel solar de 52-3/8" x 33"	1	1023,75 <sup>2</sup>	162.5
<b>Total</b>		2160,44	342.92

1 Costo de envío: 382.725 Bs. Costo del producto: 138.6 Bs

2 Se estima un 30 % del valor del producto como costo de envío.

**Fuente: Información en línea.**

En el análisis de costo no se tomará en cuenta la mano de obra, ya que se contempla que este módulo sea ensamblado en la Universidad de Carabobo. Es necesario el empleo de un horno capaz de elevar la temperatura al 150 °C para fijar las láminas del encapsulante.

En el trabajo de grado de **Vásquez y Gudiño (2005)** el costo del módulo de silicio policristalino BP solar 3160, capaz de producir 150 W en condiciones estándar, tenía un costo de 782.22 dólares, lo que produce una relación de 5.21 US-\$/Wp. Hoy en día el costo de fabricación de un módulo de silicio policristalino se estima por debajo de 1 US-\$/Wp, y el costo de fabricación de un módulo de 150 W en Venezuela se encuentra alrededor de 1923.894 Bs, obteniendo un costo por vatio pico de 12.825 Bs. Sin embargo, según el ingeniero Adrián Suarez, gerente de desarrollo y proyectos en una firma que trabaja en el



área fotovoltaica, el precio de venta de un panel de silicio de 230 Wp es de Bs 12340 + IVA, dando un costo de 53.65 Bs/Wp. Por lo tanto, tomando como referencias los precios obtenidos en esta investigación, el costo de producción de un módulo fotovoltaico en el país es inferior al costo de adquisición actual del mismo. El costo de fabricar el módulo en el país constituye una disminución de 76.1 % con respecto al costo de adquisición

La descripción del proceso de ensamblaje del módulo no es descrito en este proyecto, se recomienda usar un manual de ensamblaje de celdas solares en un módulo solar. En el Anexo IX se presenta las los ensayos y prácticas recomendadas para calificar los módulos fotovoltaicos.



## Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

La presente investigación consistió en el diseño de un módulo solar para ser fabricado en Venezuela que sea producto de un análisis comparativo de las distintas tecnologías de celdas solares existentes, que sirva para sentar las bases para futuras investigaciones en el área de la energía solar fotovoltaica.

Después de analizar y estudiar los objetivos planteados para este Trabajo de Grado, considerando la metodología establecida, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- En Venezuela las aplicaciones más comunes para este tipo de energía han sido para iluminación de avenidas y autopistas, y otras como lo es el suministro de energía a comunidades aisladas a la red eléctrica nacional.
- La tecnología más utilizada en el país es la de silicio policristalino, y es la recomendada producto del análisis comparativo hecho en esta investigación. Esto debido a su madurez tecnológica, su bajo costo y sus valores de eficiencia se encuentran entre 14 y 18%, siendo los segundos más altos del mercado después de las celdas de Silicio Monocristalino.
- Durante la investigación se pudo observar que cierta información no es de dominio público, como los son: cantidad de materiales, costo de materiales, costo de fabricación, entre otros. Por lo tanto, se consolidaron los análisis con información suministrada por entes gubernamentales, empresas consultoras que disponían información pública y los catálogos de productos de las empresas que trabajan con celdas y módulos solares, para así obtener la información necesaria para la estimación de costos.



- El análisis comparativo realizado entre las diversas tecnologías en celdas solares permite concluir lo siguiente:
  - Las celdas solares de telurio de cadmio son las que poseen menor costo de fabricación, con un valor estimado de 0.52 \$-US/Wp. Sin embargo, su costo estará sujeto a la disponibilidad del telurio, mineral que no es muy abundante en el planeta. Las celdas solares de silicio policristalino le siguen, con un costo de fabricación de 0.55 \$-US/Wp. Las celdas solares más costosas de producir son las celdas solares de silicio monocristalino, con un costo de fabricación de 0.99 \$-US/Wp. Sin embargo, la tendencia de los costos de producción de las celdas solares ha sido disminuir gradualmente cada año.
  - Las celdas de silicio monocristalino son las celdas más eficientes en el mercado con un valor de eficiencia comercial de hasta 22%, seguidas por las celdas de silicio policristalino con una eficiencia comercial de hasta 18%. Las celdas solares de silicio amorfo son las celdas con el menor valor de eficiencia.
  - El proceso de fabricación de las celdas solares de capa delgada es más sencillo que el de las celdas solares de silicio, ya que consiste en la deposición consecutiva de capas sobre un sustrato, comúnmente vidrio. Las celdas de silicio monocristalino son las más complejas de fabricar, debido a que es necesario emplear el proceso de Czochralski, el cual es lento y requiere alto grado de precisión al momento de llevarlo a cabo.
  - Las celdas de telurio de cadmio (CdTe) y las celdas de silicio amorfo (a-Si) son las que menos ven afectada sus valores de eficiencia debido a incrementos en la temperatura. Tomando en cuenta que en Venezuela la temperatura ambiente es elevada, es aconsejable el empleo de estas celdas, siempre y cuando mejoren sus niveles de eficiencia.



- Las celdas solares más versátiles son las celdas de capa delgada de telurio de cadmio (CdTe) y de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS) que por capacidad de emplear un sustrato flexible, permite instalar celdas en muchos dispositivos móviles, como calculadoras, celulares, e incluso vestimenta. Sin embargo, en función de las aplicaciones en Venezuela es más aconsejable el uso de las celdas de silicio, debido a sus niveles de eficiencia superiores.
- Las celdas que poseen una mayor madurez tecnológica son las celdas de silicio monocristalino y policristalino, las mismas dominan actualmente alrededor del 85% del mercado global de módulos fotovoltaicos y son las celdas con más tiempo en el mercado. Las celdas de capa delgada sin embargo, se encuentran en etapa de crecimiento tecnológico, y resultan una tecnología a la cual se le ha de hacer un seguimiento de su evolución.
- Las celdas solares de silicio poseen las mayores reservas de materia prima necesaria para su fabricación. Las celdas solares de telurio de cadmio y de cobre-indio-galio-selenio son susceptibles a un aumento en sus precios debido a una futura escases de alguno de los materiales que las conforman.
- Entre las tecnologías de capa delgada, se presenta como más conveniente las celdas solares de telurio de cadmio (CdTe) seguido de las celdas de silicio amorfo, y por último las celdas solares de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS).
- El diseño del módulo propuesto cumple con las condiciones fijadas de voltaje de salida y potencia, aun en condiciones de operación con temperatura de 35 grados Celsius por encima de la temperatura nominal de 25 grados Celsius especificada por el fabricante.



- Los valores de temperatura elevados, afectan negativamente la potencia de salida del módulo, es por ello que al momento de diseñar el módulo es necesario sobredimensionar en número de celdas para obtener los niveles de voltaje y potencia deseados.
- Es necesario el uso de herramientas computacionales y métodos de resolución de ecuaciones no lineales para determinar los parámetros del modelo real del módulo fotovoltaico.
- En el caso de las celdas de silicio policristalino, haciendo uso del modelo que toma en cuenta la resistencia en serie, y desprecia la resistencia en paralelo del circuito equivalente de la celda solar, se pudo replicar la curva característica I-V especificada por el fabricante, y posteriormente modelar el comportamiento del módulo a diferentes temperaturas.
- El costo de producción de un módulo fotovoltaico en el país es inferior al costo de adquisición actual del mismo. El costo de fabricar el módulo en el país constituye una disminución de 73.16 % con respecto al costo de adquisición en el país.
- Este diseño se concreta en un módulo compuesto por 36 celdas de silicio, en una estructura de 9x4 celdas, con unas medidas de 742 x 1652 milímetros con un espesor de 35 milímetros y una separación entre celda y celda de 10 milímetros. Además posee un voltaje de salida de 15.88 V y una potencia de 113.4 W a una temperatura de operación de 60 grados Celsius.



## Recomendaciones

- Desarrollar políticas en materia de energía solar con el fin de incentivar el empleo de esta tecnología, e impulsar el mercado y el desarrollo de la misma en el país.
- Realizar un estudio para determinar la factibilidad de empleo de módulos fotovoltaicos en sistemas integrados a la red con el fin de crear un sistema de generación distribuida y disminuir la demanda del sistema.
- Realizar un análisis de costo más preciso de los procesos de fabricación de las distintas celdas solares, donde se tome en cuenta el costo de fabricación por cada etapa del proceso, y además, se estime el capital de inversión necesario para llevar a cabo el proceso de producción de las distintas tecnologías en celdas solares.
- Diseñar un software que permita determinar con precisión los parámetros de una celda y de un módulo fotovoltaico, en donde se considere el modelo real de la celda solar.
- Realizar un seguimiento de las celdas solares de capa delgada, en especial a las celdas de telurio de cadmio (CdTe), esto debido a su rápida evolución en los últimos años.
- Realizar un estudio más profundo para determinar los efectos producidos por el encapsulante y la cubierta frontal y posterior sobre la eficiencia del módulo fotovoltaico.
- Hacer un análisis de costo más detallado de los materiales necesarios para producir el módulo a fin de determinar con más precisión el precio de fabricación, determinar cuáles de estos productos pueden ser producidos en el país.



- Se recomienda promover el acercamiento entre entes del estado, empresas privadas y universidades con el fin de obtener los materiales necesarios para el ensamblaje del módulo diseñado.
- Elaborar una investigación con la ingeniería básica y de detalle de éste proyecto, donde se describa el proceso de ensamblaje de un módulo fotovoltaico, basado en el diseño propuesto en esta investigación.
- Establecer una metodología académica que determine las bases necesarias para la implementación a futuro de una cátedra o asignatura en la Facultad de Ingeniería acerca del desarrollo de energías alternativas.
- Establecer alianzas entre la Universidad de Carabobo y el sector industrial para impulsar e incentivar las investigaciones en Energías Renovables.



## Bibliografía y Referencias

[1] FUNDAELEC “Programa Sembrando luz”, [Online] Disponible en:<http://www.fundelec.gob.ve/sites/default/files/FOLLETO%20PSL%202012.pdf> Visto por última vez en: Octubre 2012.

[2] OkSolar “Radiación solar mundial” [Online] Disponible en: [http://www.oksolar.com/abctech/world\\_solar\\_radiation.pdf](http://www.oksolar.com/abctech/world_solar_radiation.pdf) Visto por última vez en: Noviembre 2012.

[3] F. Rodríguez y E. Uribe “Diseño y construcción de un prototipo académica de generación eólica para su instalación en el Laboratorio de Máquinas de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo” Universidad de Carabobo. 2008. Venezuela.

[4] Y. Román y E. Nicolliello. “Sistemas de Alimentación de Energía con Paneles Solares para la Iluminación de un salón de clases en la Facultad de Ingeniería”. Universidad de Carabobo. 2005. Venezuela

[5] U.S Department of Energy. (Noviembre 2011). 2010 Solar Technologies MarketReport. Disponible en:<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51847.pdf> visto por última vez en: Octubre 2012.

[6] EuropeanPhotovoltaicIndustryAssociation (EPIA) (Febrero 2011) “Solar Generation 6”. [Online] Disponible en:<http://www.epia.org/publications/epiapublications.html> visto por última vez en: Octubre, 2012.

[7] E, Monagas “Análisis cuantitativo de la línea de investigación Eficiencia Energética y Calidad de Energía de la Universidad de Carabobo” Universidad de Carabobo. 2011. Venezuela.



- [8] G. Bjorklund y T. Baer “Organic Thin-Film Solar Cell Research Conducted at Stanford University”. [Online] Disponible en:<http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=31368>
- [9] L. Asensio “Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones”. Universidad Politécnica de Cartagena. 2011. Colombia
- [10] H. Poggi-Varaldo y A Martínez, “Libro de Ciencia y Tecnología No2”. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. 2009. México.
- [11] J. Wysocki y P. Rappaport “Effect of Temperature on Photovoltaic Solar Energy Conversion” Journal of Applied Physics (IEEE). Marzo 1960. Nueva Jersey, Estados Unidos.
- [12] A. Ibrahim (2011) “Analysis of electrical characteristics of photovoltaic single crystal silicon solar cells at outdoor measurements” Tanta University. Egipto DOAJ.
- [13] D. Carranza. “Proceso de Caracterización V-I de Celdas Solares con LabView”. Instituto Politécnico Nacional. 2004. México.
- [14] M. Barrera. “Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y silicio cristalino para aplicaciones espaciales” Universidad Nacional de General San Martín. 2009. Argentina.
- [15] C.J. Chen (2011). “Physics of solar energy” Hoboken, NJ, USA. [Online] Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10494662?ppg=209>
- [16] A. Luque y S. Hegedus. “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”. Editorial Wiley. Cap. 16, pp. 704-746 2003.
- [17] U.S. Department of Energy. “Solar Innovation Timeline”. [Online] Disponible en: <http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/timeline.html> Visto por última vez: Abril 2013.
- [18] Science Daily. “Floating Solar Panels: Solar Installations on Water”. [Online] Disponible en: <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/02/110225123026.htm> Visto por última vez: Noviembre 2011.



[19] El Mundo, Ciencia “Un avión solar logra realizar el primer vuelo nocturno de la historia”. [Online] Disponible en:

<http://www.elmundo.es/elmundo/2010/07/08/ciencia/1278567948.html> Visto por última vez: Noviembre 2011.

[20] NationalRenewableEnergyLaboratory [Online] Disponible en:[http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg) Visto por última vez en: Octubre 2012.

[21] R. Murillo González “Evaluación de la inserción de sistemas fotovoltaicos a la red pública de Costa Rica”. Universidad de Costa Rica. 2005. Costa Rica.

[22] P. J, Reddy “Sciencetechnology of photovoltaics”. p41. Hyderabad, IND: BS Publications. <http://site.ebrary.com/id/10415260?ppg=41> Visto por última vez: Diciembre 2012.

[23] A. Figueroa “Análisis, diseño y construcción de un seguidor solar para celdas fotovoltaicas”. Universidad Mayor.2010. Chile.

[24] M. Martínez “Materiales y Materias Primas: Silicio” [Online] Disponible en:[http://www.inet.edu.ar/programas/capacitacion/materiales/guias/materias/11\\_Silicio.pdf](http://www.inet.edu.ar/programas/capacitacion/materiales/guias/materias/11_Silicio.pdf). Visto por última vez en: Noviembre 2012

[25] J. E. Flores-Mena, L. A. Juárez Moran, J. Díaz Reyes y H. Coyotecatl Azucena. “Caracterización eléctrica de una celda solar de silicio Monocristalino” [Online] Disponible en:<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx/8nr2/4EladioNano.pdf>. Visto por última vez en: Noviembre 2012

[26] SolarWorld “Conjunto del Panel Solar” [Online] Disponible en:<http://www.solarworld-usa.com/solar-for-home/solar-101/making-solar-panels/solar-panel-assembly.aspx>. Visto por última vez: Noviembre 2012.

[27] J.Hernández, E. Romero y G. Gordillo. “Tecnología de celdas y módulos solares : estado actual y perspectivas” Mundo Eléctrico(Bogotá) Vol 19 Nro.60 Jul-Oct 2005 p65-71



- [28] L.D. Partain y L.M. Fraas” Wiley series in microwave and optical engineering: Solar cells and their applications (2nd edition)”. p157. Hoboken, NJ, USA. [Online] Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10411608?ppg=157>. Visto por última vez: Enero 2013
- [29] L. Peña “Células Solares Transparentes: desarrollo actual y aplicaciones” Universidad Politécnica de Cartagena. 2011. Colombia
- [30] K. Liao, S. Yambem, A. Haldar, N. Alley y S. Curran (2010)“Designs and architectures for the next generation of organic solar cells” Houston University. Estados Unidos. Dublin City University. Irlanda [Online] Disponible en: DOAJ. Visto por última vez en: Noviembre 2012.
- [31] F.Dinçer, M.Meral. “Critical factors that affecting efficiency of solar cells” University of YuzuncuYil, Turquía. [Online] Disponible en: DOAJ.Año: 2010
- [32] Standard IEEE Std 929- 2000 “IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems”. 2000. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Nueva Jersey, EstadosUnidos.
- [33] Standard IEEE Std 1262- 1995 “IEEE Recommended Practice for Qualification of Photovoltaic (PV) Modules” Diciembre 1995. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Nueva Jersey, EstadosUnidos.
- [35] P. Fono y K. A. Ray. “IEEE Standard definitions of terms for Solar Cells”. TheInstitute of Electrical and ElectronicsEngineers. 1969. Estados Unidos.
- [36] J. Vázquez y J. Gudiño “Análisis Técnico económico para la generación de energía eléctrica a través de celdas solares de una zona rural del estado Carabobo” Universidad de Carabobo. 2005. Venezuela
- [37] Redacción Económica (2012, Noviembre). Navarro: Tarifas eléctricas siempre están en revisión. Periódico La Verdad. Obtenido el 15 de febrero del 2013 desde: <http://www.laverdad.com/economia/15917-navarro-tarifas-electricas-siempre-estan-en-revision.html>



- [38] D. Bonkougou, Z. Koalaga y D. Njomo “Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013. Burkina Faso
- [39] A. Goetzberger, C. Hebling, H. Schock “Photovoltaic materials, history, status and outlook”. Materials Science and Engineering. 1-46 (2003). Disponible en: <http://nano.teicrete.gr/Microelectronics/Photovoltaic%20materials,%20history,%20status%20and%20outlook.pdf> Visto por última vez: Febrero 2013
- [40] V.V Tyagi, Rahim, A.A Nurul, N.A Rahim, Selvaraj, A.L Jeyraj “Progress in solar PV technology: Research and achievement”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 20, Elsevier, Año: 2013.
- [41] L.R Cruz, W.A Pinheiro, C.L Ferreira, J.NDuenow, R.GDhere “Thin film CdS/CdTe solar cells produced in a CSS in-line system”. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Año: 2012.
- [42] K.Matsunaga, T. Komaru, Y. Nakayama, T.Kume, Y. Suzuki “Mass-production technology for CIGS modules” Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 93 (6) Elsevier, Año: 2009.
- [43] Y. Matsumoto “Celdas Solares de Silicio: Fundamento y Tendencia” Universidad de Quintana Roo. 2011. México.
- [44] C. Radue, E.E van Dyk “A comparison of degradation in three amorphous silicon PV module technologies”. Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 94 (3). Elsevier Año: 2010.
- [45] Green Solar “Green Solar Equipment Manufacturing Ltd”. [Online] Disponible en: [http://www.greensolar.hu/sites/default/files/brochures/GScatalog\\_EN\\_20110209.pdf](http://www.greensolar.hu/sites/default/files/brochures/GScatalog_EN_20110209.pdf) Visto por última vez: Abril 2013. Hungría.
- [46] Y. Nakata “Dynamics of innovation in solar cell industry: Divergence of solar cell technologies”. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Año: 2010.



- [47] L. Eldada “CdTe, CIGS and a-Si thin film PV technologies: factors impacting LCOE”  
Proceedings of SPIE, Volume 8110 (1) SPIE. Año: 2011.
- [48] Solar PV Modules Weekly Spot Price. Disponible en: <http://pvinsights.com/index.php>  
Visto por última vez: Abril 2013.
- [49] M. García “Biosorción de cadmio con raspo de uva. Aproximación a la monitorización  
del proceso mediante sensores químicos”. Universidad Politécnica de Catalunya. 2009.  
España
- [50] U.S. Department of the Interior, U.S Geological Survey “Byproduct Mineral  
Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells”. [Online] Disponible en:  
<http://pubs.usgs.gov/circ/1365/Circ1365.pdf> . Visto por última vez: Abril 2013
- [51] U.S. Department of the Interior, U.S Geological Survey “Mineral Commodity  
Sumaries 2013”. [Online] Disponible en:  
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf> . Visto por última vez: Abril  
2013.
- [52] Museo Geológico Virtual de Venezuela. Código Geológico de Venezuela. Pdvsa-  
Intevep 1997. Minerales de Venezuela. [Online] Disponible  
en:<http://www.pdv.com/lexico/museo/minerales/listado.htm>. Visto por última vez: Abril  
2013.
- [53] Mapa de los Recursos Minerales de Venezuela. O.C.E.J Cartografía Nacional y  
Ródriguez S (1986). Elaborado por: Sergio Zambrano M. [Online] Disponible en:  
<http://www.pdv.com/lexico/museo/minerales/localizacion.htm> Visto por última vez: Abril  
2013.
- [54] Air Liquide “Enciclopedia de los Gases” [Online]. Disponible en:  
<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?languageid=9&GasID=57&CountryID=19#MajorApplications> Visto por última vez: Abril 2013.



- [55] S. Mehta “PV Technology, Production and Cost Outlook: 2010-2015”. GTM Research. Año: 2010. Estados Unidos.
- [56] H Mohring, “Outdoor measurements and comparison of thin film solar cell technologies” [Online], ZSW, Abril 2012 Disponible en: <http://www.swissphotonics.net/libraries.files/Mohring.pdf>. Visto por última vez: Abril 2013.
- [57] First Solar “First Solar Modules Outperform Conventional Solar Modules” [Online] Disponible en: <http://firstsolar.com/en/Innovation/Advanced-Thin-Film-Modules> Visto por última vez: Abril, 2013.
- [58] S. Bowden, C. Honsberg “PVCDROM” [Online]. Disponible en: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>. Visto por última vez en: Abril 2013.
- [59] L. Rodríguez “Web CURSOLAR”. Grupo IDEA, Universidad de Jaén. España. [Online] Disponible en: <http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm> visto por última vez: Mayo, 2013.
- [60] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli y A. Masmoudi “MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell”. International Journal of Renewable Energy Research. Año: 2012. Túnez

## **ANEXO I**

Instrumento para la realización del análisis comparativo

Factores	Ponderación	Alternativa #1	Alternativa #2	Alternativa #3
		Puntos	Puntos	Puntos
Costo de la energía	6			
Eficiencia	7			
Complejidad del proceso de fabricación	5			
Efecto de la Temperatura	2			
Diversidad de Aplicaciones	1			
Madurez de la tecnología	4			
Materiales	3			
Total				

## **ANEXO II**

**Entrevista Ing. Adrian Suarez.**

**Soluciones Energéticas Alternativas C.A.**

**Gerente de Desarrollo & Proyectos.**

**1. ¿Cuánta es la potencia instalada en módulos fotovoltaicos en el proyecto VEPICA?**

El sistema consta de un arreglo fotovoltaico de 45kWp

**2. ¿Cuántos paneles y cuál fue el modelo panel que se instaló, y porque lo escogieron?**

El proyecto estuvo conformado por 195 paneles solares de Silicio policristalino marca JA Solar de 230Wp c/u. Se escogieron por razones económicas, la tecnología silicio policristalino tiene buen rendimiento y éste no se ve desmejorado con el tiempo, el fabricante garantiza 80% de eficiencia después de 20 años. Además a pesar de que la tecnología de silicio monocristalino es más eficiente, es más costosa. El ser más eficiente significa que para generar una misma potencia las celdas solares de silicio policristalino necesitarán ocupar una mayor área o serán necesarios más paneles. Como el espacio no es problema en Venezuela, se escogió los paneles de silicio policristalino.

**3. ¿Cuántas tecnologías revisaron para escoger el panel que escogieron?**

2 la más comerciales, la de silicio monocristalino y la de silicio policristalino

**4. ¿Cuál fue la variable definitoria en la selección de los paneles?**

Los costos de los paneles.

**5. ¿Cuál fue el costo estimado de los paneles, del sistema y de la instalación?**

El precio de cada panel de 230Wp está en BsF 12340 + IVA. El precio del vatio pico instalado de un sistema Off-Grid es de aproximadamente Bs.F 80.

**6. ¿Cómo ha sido la evolución en los costos de la energía solar en los últimos 10 años en el país?**

Debido a que no hay apoyo en divisas preferenciales para la adquisición de los módulos para particulares, el costo de estos sistemas se ha incrementado en el país en los últimos años.

**7. ¿Cuántas personas están involucrados en el trabajo?**

Fueron 1 Ingeniero, 2 técnicos electricistas y 4 obreros instaladores.

**8. ¿Cuánto duró la instalación?**

10 días (Estaba previsto para 7 pero tuvimos ciertos retrasos por la lluvia).

**9. ¿Cuánto se estima el costo de mantenimiento?**

Este costo es prácticamente cero ya que el único mantenimiento contemplado es la limpieza de los paneles la cual se realiza con agua, jabón y un trapo. La frecuencia es bimensual para este caso, la misma puede variar dependiendo de la cantidad de polvo que tenga el aire de la zona donde se encuentre el sistema.

**10. ¿Qué carga estará tomando el sistema fotovoltaico, con respecto a la proporcionada a la red?**

La potencia del sistema representa un 8% de la demanda estimada del edificio.

**11. ¿Cuál es el tiempo de retorno de inversión de instalar el sistema fotovoltaico?**

Depende, ya que si se calcula considerando las pérdidas que te produce un corte de energía eléctrica, podrías incluso obtener un retorno de inversión en cuestión de semanas en ciertas zonas.

**12. ¿El MPPEE y/o FUNDAELEC saben del proyecto, que opinión tienen ellos acerca esta iniciativa?**

Corpoelec y el MPPPEE saben del proyecto.

**13. ¿El gobierno presta algún tipo de ayuda o financiamiento para estimular el desarrollo de proyectos en energía renovable?**

No, ninguno.

**14. ¿Qué ventajas tiene instalar un sistema fotovoltaico en lugares con acceso a la red, tomando en cuenta el bajo costo de la energía en el país?**

La principal ventaja es el respaldo eléctrico que puede brindar sin tener que incurrir en los costos de mantenimiento, ruido, contaminación, logística de reposición de combustible y riesgo de almacenamiento del mismo que representan las plantas eléctricas. Por otro lado, si el retorno de la inversión se compara con el costo de oportunidad por no tener electricidad, puede que la inversión sea rentable, tomando en cuenta que la electricidad más cara es la que no se tiene cuando se necesita.

**15. ¿Qué normas o estándares toman en cuenta ustedes para la instalación de sistemas fotovoltaicos, alguna organización en el país se encarga de normalizar la instalación de estos sistemas?**

En el Código Eléctrico Nacional en la sección 690 hay unas prácticas recomendadas para sistemas fotovoltaicos pero no es más que una copia del NEC (National Electric Code) de USA.

**16. ¿Las compras de los paneles se hizo a través de algún distribuidor en el país o tuvieron que gestionar con alguna empresa en el exterior para importar los módulos?**

Los paneles fueron importados, de hecho, nosotros servimos de distribuidores para otros proyectistas que emplean esta tecnología.

**17. ¿Qué otras partes del sistema fotovoltaico tuvieron que importar?**

El Inversor DC/AC, fue el elemento que más tardó en entregar.

**18. ¿En su opinión, cree que instalar una fábrica de paneles fotovoltaicos en Venezuela ayudaría a reducir los costos del sistema fotovoltaico?**

Claro, considerando el problema de divisas, sin embargo es un proyecto muy costoso sería necesario un estudio para determinar factibilidad.

**19. ¿En orden de importancia, cuál serían las variables que considera que hay que tomar en cuenta al momento de escoger una tecnología de celda solar para su fabricación en Venezuela?**

Es muy importante tomar en cuenta la eficiencia de la celda y la madurez en el mercado que tenga la tecnología ya que eso permitirá adquirir información sobre los procesos de fabricación y adquirir los equipos y materiales con mayor facilidad.

## **ANEXO III**

### **Lista de Proveedores de Materiales**

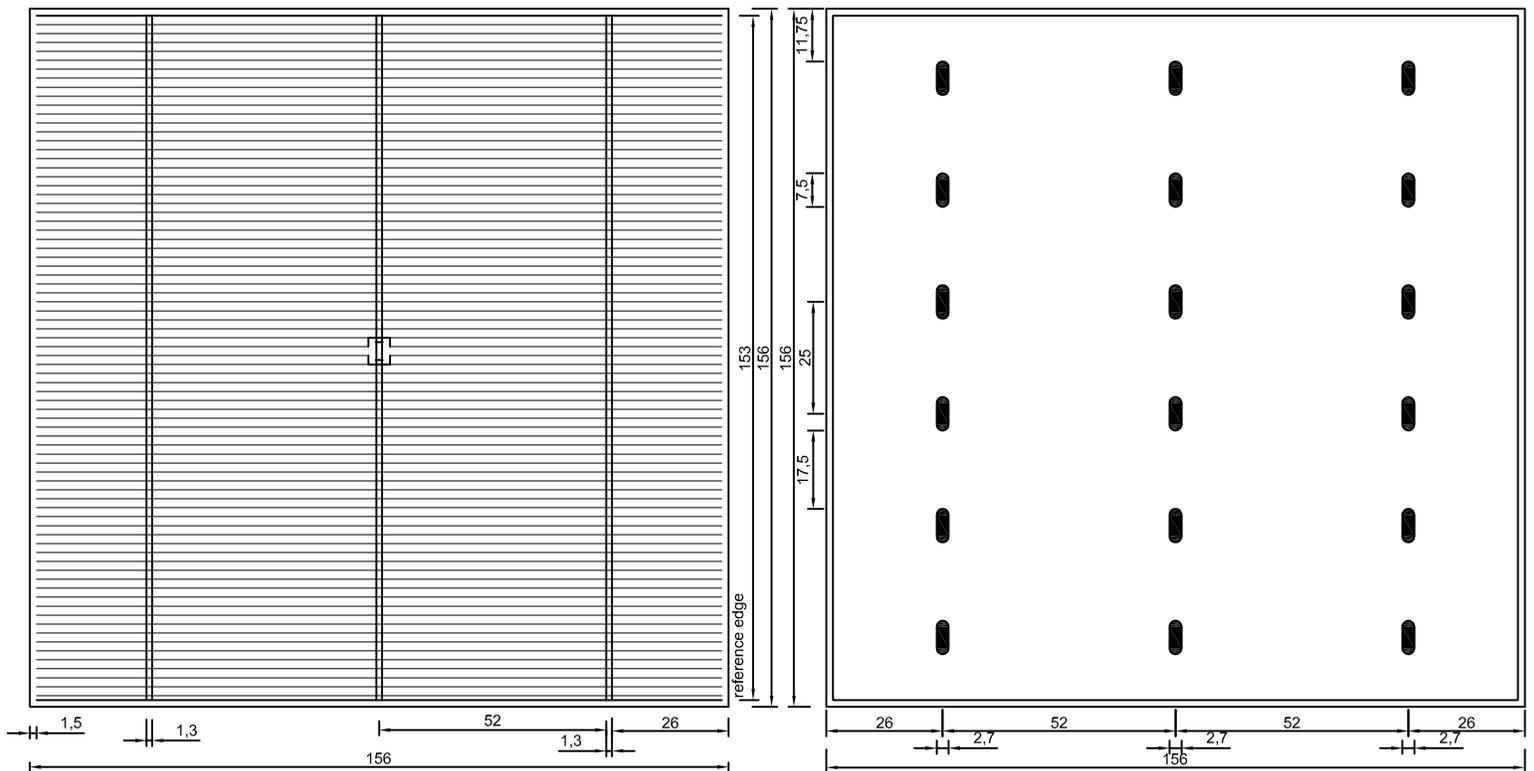
**Proveedores de materiales para la elaboración de celdas de silicio policristalino a nivel mundial.**

<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Dirección</b>	<b>Página Web</b>	<b>Teléfono</b>	<b>E-mail</b>	<b>Materiales</b>
Activ Solar	Austria	Wipplingerstr asse 35/4, A- 1010 Vienna. Austria	<a href="http://www.activsolar.com">www.activsolar.com</a>	+43 1 253316150	info@activsolar.com	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silano</li> <li>• Silicio de Grado solar</li> </ul>
Evonik Industries	Alemania	Rellinghauser Straße 1-11, 45128 Essen. Germany	<a href="http://corporate.evonik.com/">http://corporate.evonik.com/</a>	+49 201 17701	info@evonik.com	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silano</li> <li>• Sellador</li> </ul>
Elkem	Noruega	Hoffsveien 65B, P.O. Box 5211, Majorstuen, NO-0303 Oslo, Norway	<a href="http://www.elkem.com/">http://www.elkem.com/</a>	+47 22 450100	sales.solar@elkem.no	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Silicio de grado metalúrgico</li> <li>• Silicio de grado solar</li> </ul>
Asahi Diamond Industrial Co., Ltd	Japón	The New Otani Garden Court, 11thFloor 4-1, Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102- 0094. Japan	<a href="http://www.asahidia.co.jp/">http://www.asahidia.co.jp/</a>	+81 332226320	webmaster@asahidia.co.jp	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disco Sierra-Cinta</li> </ul>
DuPont	Colombia	DuPont Colombia Calle 113 #7- 21 Torre A Piso 14 Oficina Teleoport Bogotá – Colombia	<a href="http://www2.dupont.com/Colombia_Country_Site/es_CO/">http://www2.dupont.com/Colombia_Country_Site/es_CO/</a>	+571 629- 2202	<a href="http://www2.dupont.com/Colombia_Country_Site/es_CO/contact.html">http://www2.dupont.com/Colombia_Country_Site/es_CO/contact.html</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encapsulante</li> <li>• Cubierta frontal</li> <li>• Cubierta trasera</li> </ul>
BASF The Chemical	Alemania	Carl-Bosch- Strasse 38,	<a href="http://www.basf.com/">http://www.basf.com/</a>	+49 621 600	global.info@basf.com	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acido nítrico</li> <li>• Líquido de</li> </ul>

Company		67056 Ludwigshafen , Germany				corte
Alternasol Sarl	Francia	65, Route de l'Europe, 33910 Saint- Denis-de-Pile, France	<a href="http://www.alternasol-afrique.fr/">http://www.alternasol-afrique.fr/</a>	+33 685 932722	contact@alternasol.fr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cables</li> </ul>
Jiangsu Akcome Solar Science & Technology Co., Ltd.	China	Jintang Rd, Zhangjiagang Economic Development Area, Zhangjiagang, Jiangsu,P.R. China	<a href="http://www.akcome.com/">http://www.akcome.com/</a>	+86 512 82557666	alu@akcome.com	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caja de conexión</li> <li>• Marco</li> <li>• Conectores</li> </ul>
Creativ SRL	Argentina	Sector Industrial Planificado de General Rodriguez, Planta CREATIV General Rodriguez (1748), Buenos Aires. Argentina	<a href="http://www.creativ.com.ar/">http://www.creativ.com.ar/</a>	+54 115 9181100	comercial@creativ.com.ar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tira de cobre y Tira de aluminio</li> </ul>
Acton Technologies, Inc	Estados Unidos	100 Thompson Street, P.O.Box 726, Pennsylvania 18640. USA	<a href="http://www.actontech.com/">http://www.actontech.com/</a>	+1 570 6540612	usa@actontech.com	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acido Fluorhídrico</li> <li>• Acido Nítrico</li> </ul>

## **ANEXO IV**

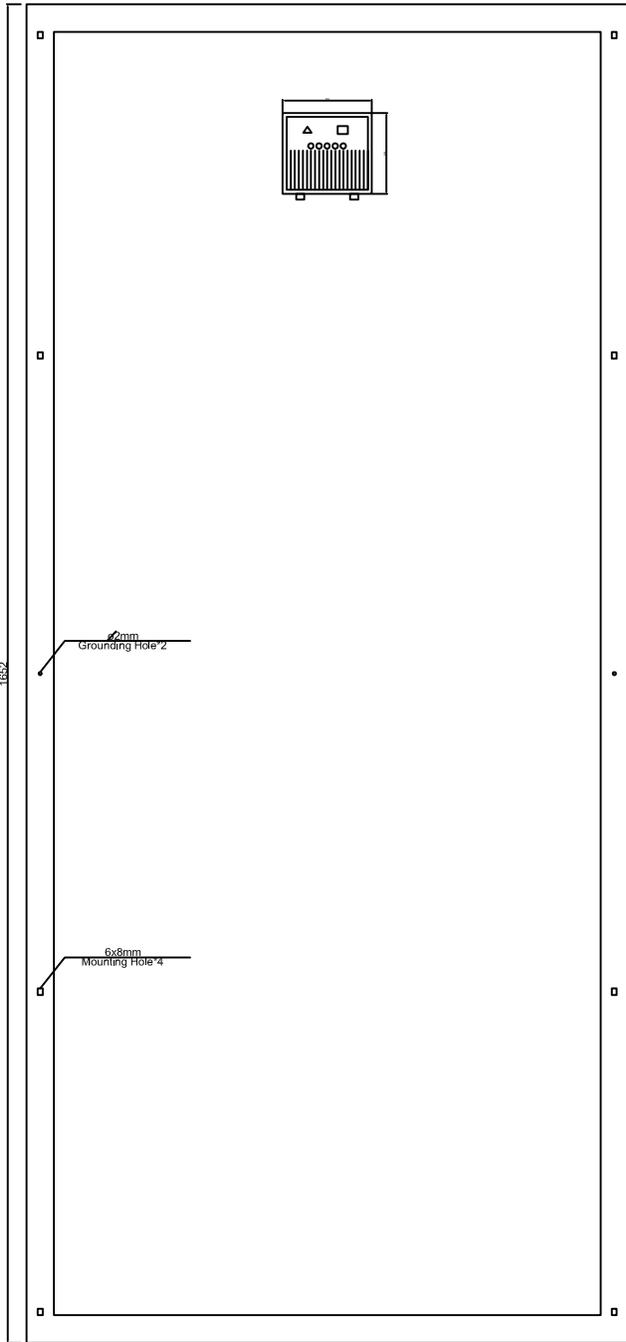
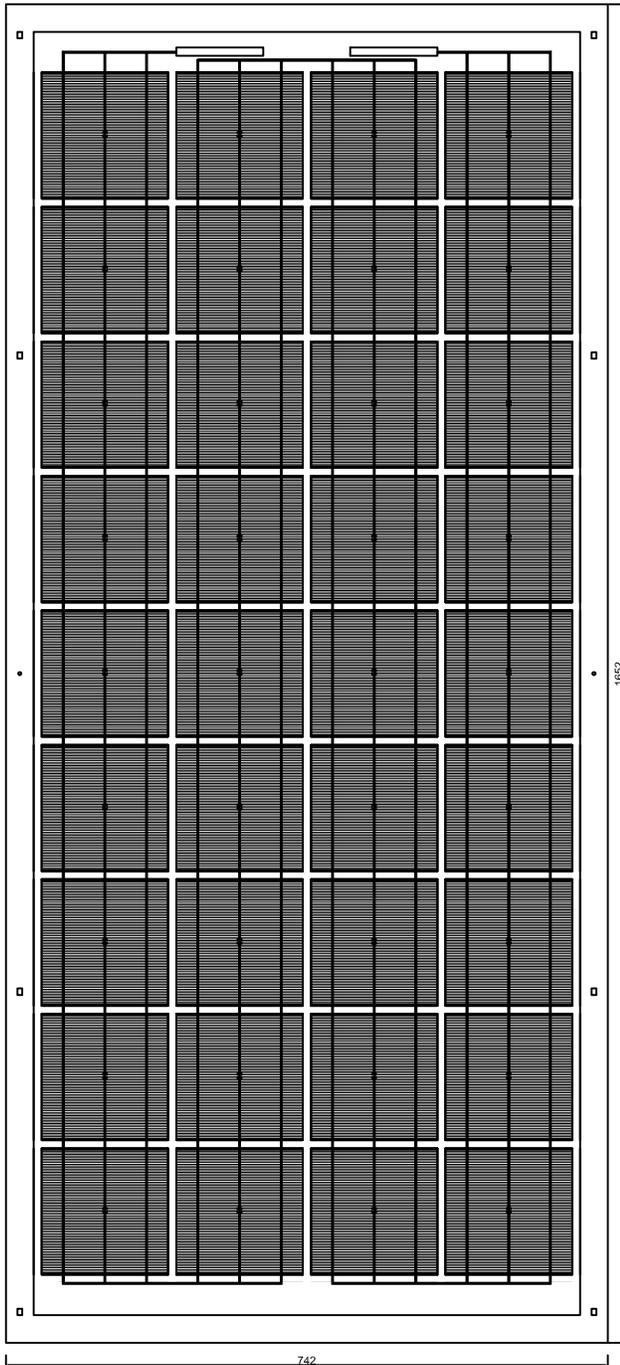
**Plano de la celda solar usada en el diseño del módulo**



<p>Proyecto: Diseño de un módulo solar para ser fabricado en Venezuela que sea producto de un análisis comparativo de las distintas tecnologías de celdas solares existentes</p>	
<p>Responsables: - Árraez, Oswaldo. - Santos, Antonio.</p>	<p>Fecha: 12/05/2013</p>
<p>Revisado por: Monagas, Eva.</p>	<p>Aprobado por: Eficiencia Energética y Calidad de Energía</p>

## **ANEXO V**

**Plano del módulo diseñado**



<p>Proyecto: Diseño de un módulo solar para ser fabricado en Venezuela que sea producto de un análisis comparativo de las distintas tecnologías de celdas solares existentes</p>	
<p>Responsables: - Árraez, Oswaldo. - Santos, Antonio.</p>	<p>Fecha: 12/05/2013</p>
<p>Revisado por: Monagas, Eva.</p>	<p>Aprobado por: Eficiencia Energética y Calidad de Energía</p>

## **ANEXO VI**

**Ficha Técnica de la celda Q-Cells Modelo Q6LPT3-G3.**

**Q.CELLS**  
YIELD SECURITY

- ✓ ANTI PID TECHNOLOGY (APT)
- ✓ HOT-SPOT PROTECT (HSP)
- ✓ TRACEABLE QUALITY (TRA.Q™)



**POLYCRYSTALLINE SOLAR CELL**

# Q6LPT3-G3

More power for modules

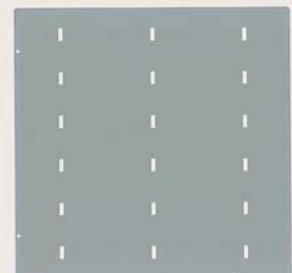
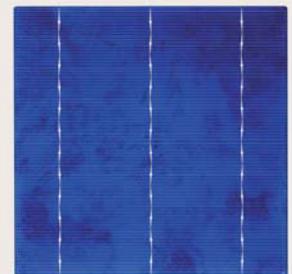
**Q6LPT3-G3** is the consequent advancement of our polycrystalline solar cell generation and achieves efficiencies up to 18.0%. Apart from being the most powerful polycrystalline solar cell on the market, **Q6LPT3-G3** is also the safest and is PID-resistant<sup>1</sup> and Hot-Spot free. The new cell design allows for highest modul output making **Q6LPT3-G3** the most reliable choice for your modules.

## YOUR EXCLUSIVE YIELD SECURITY

- Anti PID Technology (APT)<sup>1</sup>: **Prevention of potential-induced degradation ensuring secure yields.**
- Hot-Spot Protect (HSP): **Performance safety and increased fire safety.**
- Traceable Quality (Tra.Q™): **First traceable and forgery proof solar cell on the market.**
- Positive sorting +0.2/-0%: **Extra output.**

## ONE MORE ADVANTAGE FOR YOU

- **NEW!** Efficiencies up to 18.0%: **For the most powerful modules.**
- **NEW!** Optimized front surface layout for thinner solder wire: **Up to 0.8% more module power.**
- Comprehensive support for further processing and module certification: **Protection from the beginning.**



<sup>1</sup> APT test conditions: Cells at -1000 V against grounded, with conductive metal foil covered module surface, 25 °C, 168 h (TÜV test conditions)

MECHANICAL SPECIFICATION		TECHNICAL DRAWING
<b>Product</b>	Polycrystalline solar cell	
<b>Format</b>	156 <sup>+0.5</sup> mm x 156 <sup>+0.5</sup> mm Diameter: 220 <sup>+0.5</sup> mm	
<b>Average thickness (Si)</b>	160 <sup>+30</sup> μm / 180 <sup>+30</sup> μm / 200 <sup>+30</sup> μm	
<b>Front contacts (-)</b>	3 x 12 soldering pads (silver), 1.3 <sup>+0.2</sup> mm wide Acid textured surface, Blue anti-reflecting coating (silicon nitride)	
<b>Back contacts (+)</b>	3 x 6 soldering pads, 2.7 mm <sup>±0.3</sup> mm wide (silver), Aluminum backside metallization	

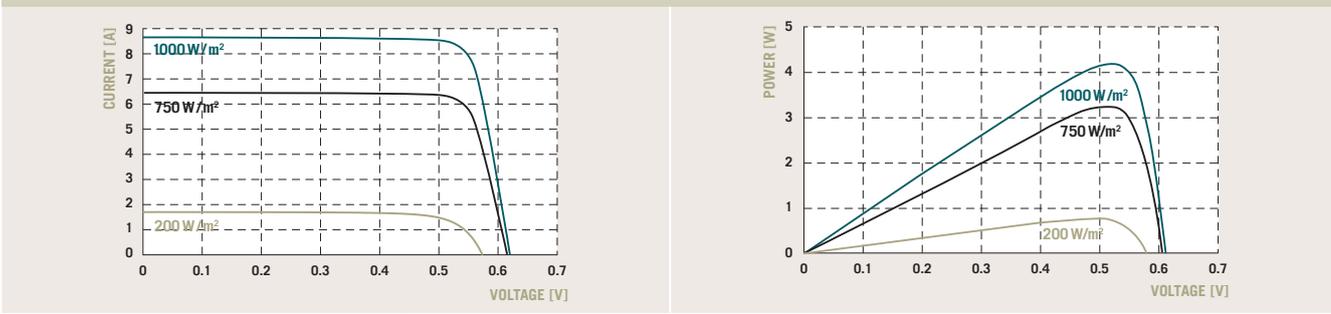
### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS, STC: 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, AM 1.5 G (IEC 60904-3 ED.2)

POWER CLASS		4.04	4.09	4.14	4.19	4.23	4.28	4.32	4.38
<b>∅ Nominal Power*</b>	<b>P<sub>MPP</sub></b> [W]	≥4.04	≥4.09	≥4.14	≥4.19	≥4.23	≥4.28	≥4.32	≥4.38
<b>∅ Short Circuit Current</b>	<b>I<sub>SC</sub></b> [A]	8.45	8.49	8.53	8.56	8.59	8.62	8.65	8.67
<b>∅ Open Circuit Voltage</b>	<b>V<sub>OC</sub></b> [mV]	618	622	625	628	631	634	636	638
<b>∅ Efficiency*</b>	<b>η</b> [%]	≥16.60	≥16.8	≥17.0	≥17.2	≥17.4	≥17.6	≥17.8	≥18.0

\* Measurement tolerances: ±1.5% rel. (P<sub>MPP</sub>); ±0.2% abs. (η); ±5% rel. (I<sub>SC</sub>, V<sub>OC</sub>)

### TYPICAL CURRENT-VOLTAGE AND POWER-VOLTAGE CURVES



SPECTRAL RESPONSE	INTENSITY DEPENDENCE			TEMPERATURE COEFFICIENTS		
	INTENSITY W/m <sup>2</sup>	V <sub>MPP</sub> *	I <sub>MPP</sub> *	Power		
	1000	1.000	1.00	Power	-0.42%/K	
	800	0.995	0.80	Current	+0.05%/K	
	500	0.979	0.50	Voltage	-0.33%/K	
	PROCESSING RECOMMENDATION					
	400	0.971	0.40	Solder joint	Copper ribbons coated with 10 – 15 μm: 62% Sn / 36% Pb / 2% Ag	
	300	0.957	0.30		Cells per bypass diode	Maximum 20 per bypass diode
	200	0.936	0.20			
100	0.893	0.10				

\* Ratio of V<sub>MPP</sub> (I<sub>MPP</sub>) at reduced intensity to V<sub>MPP</sub> (I<sub>MPP</sub>) at 1000 W/m<sup>2</sup>

### STORAGE REMARK

- With the sealing foil around the cell boxes damaged, broken or opened, we recommend:
- to keep the cells at room temperature and in a dry and clean atmosphere.
  - to process the cells within 10 days after opening the seal.

### QUALIFICATIONS AND CERTIFICATES



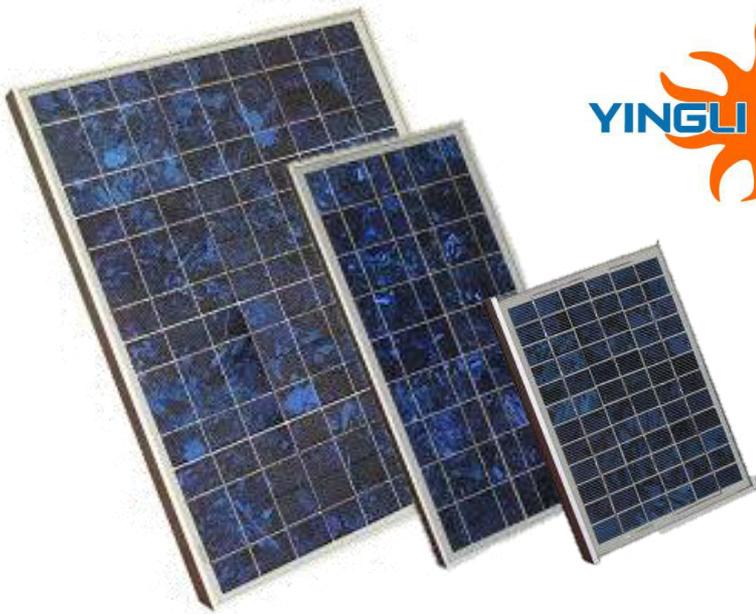

Hanwha Q.CELLS is certified according to:  
 ISO 9001:2008 (Quality Management)  
 Germany (VDE): 5008771/QM/UM/12.10  
 Malaysia (SIRIM): MY-AR 5278  
 ISO 14001:2009 (Environmental Management)  
 Germany (VDE): 5008771/QM/UM/12.10

### PARTNER

Specifications subject to technical changes © Hanwha Q.CELLS GmbH Q6LPT3-G3\_2013-01\_Rev03\_EN

## **ANEXO VII**

### **Ficha Técnica Módulo Comercial**



**10 Watt Panel – 06001JP01**

**20 Watt Panel – 06001JP02**

**30 Watt Panel – 06001JP03**

**40 Watt Panel – 06001JP04**

**60 Watt Panel – 06001JP05**

**85 Watt Panel – 06001JP06**

**130 Watt Panel – 06001JP07**

The Yingli range of polycrystalline solar panels are superb value for money, offering a free 12V power source for both professional and DIY applications. The panels are constructed with a heavy duty anodised aluminium frame that provides high wind resistance and convenient mounting access. Cells are laminated between high transmissivity, low iron, 3mm tempered glass and a sheet of TPT material and finally two sheets of EVA to prevent moisture entering the module.

### CHARACTERISTICS

- Installation holes for standard bracket systems and mounting are located to the rear of the frame. Please see accessories on our web site for more mounting systems.
- Bypass diodes on panels 30W and above to improve shadow tolerance.
- Waterproof versatile junction box provides flexibility of connections.
- 60W, 85W and 130W panels come fitted with approximately 1m length positive and negative cables fitted with Type 3 Multi-contact connectors. Please see accessories on our web site for suitable extension cables.
- Cables are easy to remove and replace if necessary.
- 10W to 40W panels are supplied complete with approximately 1m of 2-core cable, see picture to right.
- Panels will require blocking diodes if not used with a regulator.
- Thirty-six polycrystalline cells are connected in series for normal 12V charging.
- Panels are manufactured in accordance with IEC 61215 and come with 25 years limited output warranty.



#### **Dear Customer**

*Thank you for buying a Solar Panel from us. We aim to make solar simple and safe, so please take the time to read this leaflet and any other information that comes with your panel and/or charge controller before installation.*

*Fran Tattersall  
Director*

Please see information below for additional technical details.

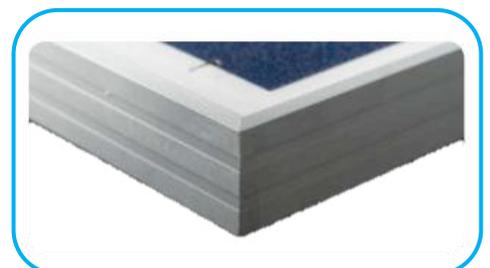
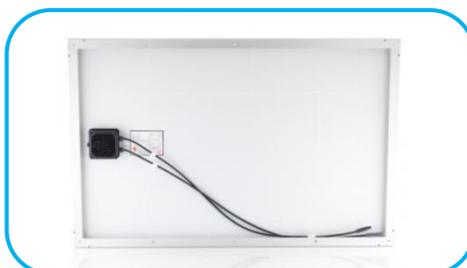
<b>Electrical Characteristics</b>	<b>10W</b>	<b>20W</b>	<b>30W</b>	<b>40W</b>	<b>60W</b>	<b>85W</b>	<b>130W</b>
Typical maximum power (Wp)	10	20	30	40	60	85	130
Open circuit voltage (Voc)	21.0	22.0	21.0	22.0	22.0	22.0	22.0
Short circuit current (Isc)	0.66	1.24	2.00	2.50	3.80	5.60	8.44
Optimum operating voltage (Vmp)	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
Optimum operating current (Imp)	0.57	1.14	1.70	2.30	3.40	4.86	7.43

### Standard Parameters

Nominal operating cell temperature (NOCT)	46 <sup>+/-</sup> 20°C
Current temperature coefficient (Isc)	+0.10%/°C
Voltage temperature coefficient (Voc)	-0.38%/°C
Power temperature coefficient (9Wp)	+0.47%/°C
Edge grounding	<=1ohm
Wind resistance	2400Pa
Maximum system voltage	1000V

*This information represents the output of typical panels in 12V configuration. This data is based on measurements made in accordance with Standard Test Conditions (STC) 1000W/m<sup>2</sup>, AM 1.5 with a cell temperature of 25°C.*

<b>Standard Parameters</b>	<b>10W</b>	<b>20W</b>	<b>30W</b>	<b>40W</b>	<b>60W</b>	<b>85W</b>	<b>130W</b>
Weight	1.3Kg	2.3Kg	3.9Kg	4.3Kg	6.5Kg	8.4Kg	16Kg
Length of panel (mm)	350	525	745	540	770	1010	1470
Fixing holes distance (mm)	170	265	373	280	290	510	870
Width of panel (mm)	285	350	350	660	660	660	680
Fixing holes distance (mm)	251	315	315	626	626	626	648
Depth of panel (mm)	25	25	25	25	35	35	50
Polycrystalline cells	36	36	36	36	36	36	36



## ELECTRICAL SAFETY



- Observe polarities when connecting solar panels and batteries.
- Photovoltaic panels produce electricity immediately when exposed to light, so it is recommended that you cover the front of the solar panel if outdoors when installing to help avoid potential for shocks.
- The voltage and current produced from individual PV modules is generally low, but touching live wiring or terminals can cause shock and burns. This danger increases when modules are connected together for higher voltage and current.
- Battery charging can produce flammable gasses and vapours. Always ensure the batteries are in a vented environment.
- Do not allow water to come into contact with wire connections, charge regulator or battery at any time.
- Do not short circuit either the panel or the battery.

## HANDLING PRECAUTIONS

This product has been designed to be robust under normal conditions. However, we recommend that the module is carefully handled and stored at all times and that the following precautions are taken:

- Avoid handling the front surface of the PV modules.
- Forceful impacts to the front or back surfaces can cause irreparable damage
- The modules should be kept flat and should never be twisted or bent.
- Never disassemble the module.
- Drilling or welding the frame is not recommended.
- Never use a device that concentrates the light on the solar panel as this could seriously damage the solar cells.
- Always use electrically insulated tools.
- Always use a suitable charge regulator to prevent overcharging and for reverse current protection.

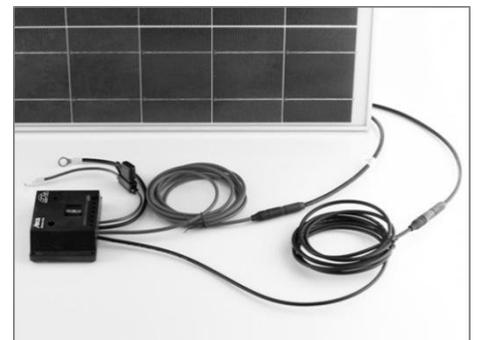
## JUNCTION BOX and WIRING

The modules are designed for 12V applications and as such output cables should be appropriate for voltage and outdoor applications. After connections have been made, coat exposed terminal connections with silicon to protect from corrosion, or other suitable method.

The junction box is fixed with a high quality silica gel which ensures ageing resistance and high sealing performance.

- When wiring to the charge regulator first connect the regulator to the battery and then connect the controller to the panel. It is good practice to fit a fuse between the controller and the battery.

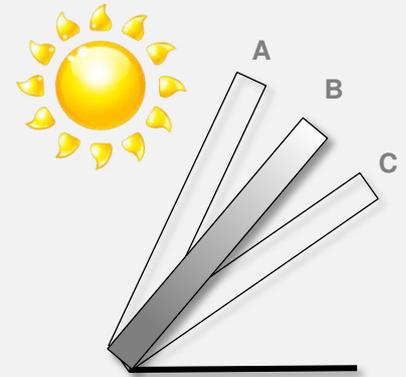
Refer to the instructions that come with your charge controller for more information.



**INSTALLATION**

The position of your solar panel should be considered carefully, allowing for the physical requirements of its mounting, together with its proximity to where you will fit the charge regulator.

- You should leave a minimum clearance gap of 10mm beneath the panel, for heat dissipation from the panel.
- Solar panels can be mounted at any angle and are commonly mounted horizontally for practical reasons, particularly on motor caravans. However, by mounting them at an angle and directed at the sun can improve efficiency. The optimum angle equates to the angle of latitude for your particular location, which for the UK would be 50° (see diagram right).
- Minimising the distance between the regulator and the battery will help reduce any voltage drop.
- After installation and during use, always be mindful of the sunlight reaching the panel and when parked up or moored and ensure that the panel will not be shaded.
- It is good practice to keep the panel clean from dirt and debris at all times and it should be cleaned using a mild solution of soap and water.
- Select Solar supplies a wide range of mounting and cable accessories; please see our web site for full details.



**10mm CLEARANCE**

**A** – 65° optimum angle for winter if adjustable

**B** – 50° optimum angle if fixed position

**C** – 35° optimum angle for summer if adjustable

**ACCESSORIES**

Please see web site for full details.



Select Solar Ltd  
Unit 5 Blakehill Business Park  
Chelworth Road  
Cricklade  
Swindon  
Wiltshire  
SN6 6JD

Telephone: 0845 0031 353

## **ANEXO VIII**

**Ensayos para el funcionamiento de Módulos Fotovoltaicos conectados en paralelo a la red eléctrica.**

A continuación se presenta el estándar 929-2000 IEEE que establece recomendaciones que se deben seguir al momento de instalar un módulo fotovoltaico en paralelo con la red eléctrica. Esta práctica se recomienda para aportar un valor a un amplio espectro de personal involucrado con la utilidad de interconexión de Sistemas fotovoltaicos, incluyendo ingenieros de servicios públicos, diseñadores e instaladores de sistemas fotovoltaicos y propietarios de sistemas fotovoltaicos. Las recomendaciones de interconexión normalizados incluidos en esta práctica son utilizadas para reducir al mínimo la ingeniería y otros aspectos de la interconexión. [32]

Para la realización de estos ensayos se deben establecer características del módulo a instalar, como por ejemplo la potencia. Se dice que es un sistema pequeño cuando maneja una potencia menor o igual a 10 kW y los sistemas intermedios y grandes manejan potencias mayores a 10 kW. Entre las pruebas a realizar se encuentran:

#### Calidad de Energía

- Rangos normales de operación
- Parpadeo de tensión
- Frecuencia
- Distorsión de la forma de onda
- Factor de potencia

#### Funciones de Seguridad y Protecciones

- Respuesta a condiciones anormales
- Inyección de corriente directa
- Aterramiento
- Interfaz de interruptor de desconexión

## **ANEXO IX**

**Ensayos de calificación de módulos fotovoltaicos.**

El IEEE Std 1262-1995 establece las prácticas recomendadas para calificar la calidad los módulos fotovoltaicos. En él se encuentran procedimientos y especificaciones recomendadas para las pruebas de calificación de los módulos fotovoltaicos. [33]

Requisitos de evaluación para los módulos fotovoltaicos:

- Especímenes de ensayo: un mínimo de nueve especímenes de prueba son necesarios de cada tipo de módulo a ser construido.
- Pruebas iniciales e inspecciones: se escoge un módulo que sirva como control para el ensayo y se coloca en un ambiente controlado, mientras los otros módulos son inspeccionados.
- Asignación de módulos a las secuencias de prueba: después de que todos los módulos hayan pasado las pruebas iniciales y las inspecciones, estos son asignados a las pruebas a excepción del módulo de control.
- Pruebas finales e inspecciones: después de completar las inspecciones, todos los módulos pasan a una inspección visual y la prueba de desempeño eléctrico.
- Evaluación de los resultados de las pruebas de calificación: todos los módulos que son sometidos a prueba deben pasar todas las inspecciones, si existe algún módulo que no pase la prueba, se debe repetir el programa de cualificación con nuevos módulos.

Procedimientos para la inspección:

- Inspección Visual: este determina la condición física del módulo y se documenta la información para comparaciones o futuras inspecciones.
- Prueba de rendimiento eléctrico: se utiliza para determinar el rendimiento de cada módulo y para determinar la potencia de salida.
- Prueba de continuidad puesta a tierra: esta prueba verifica la continuidad eléctrica que existe entre las partes conductoras y la puesta a tierra. Si no existen partes conductoras accesibles, esta prueba puede ser omitida.

- Prueba de aislamiento eléctrico (en seco): esta prueba se realiza para asegurar que el módulo se encuentra aislado eléctricamente de las partes conductoras y para brindar seguridad al usuario.
- Prueba de aislamiento y resistencia a la humedad: esta prueba se realiza con el propósito de evaluar el aislamiento eléctrico del módulo bajo condiciones de humedad y para verificar que la mayoría de las partes constituyentes del módulo no se puedan enfrentar a la humedad, que puede generar como consecuencia corrosión o fallas de la conexión a tierra o pueda ser un riesgo para el usuario.
- Ciclo térmico: se utiliza esta prueba para determinar que los módulos tengan una adecuada resistencia por causa de expansión térmica de los componentes y los materiales.
- Prueba de aislamiento eléctrico (humedad): el propósito de esta prueba es asegurarse del aislamiento eléctrico de los circuitos del módulo cuando estos estén en presencia de humedad.
- Prueba de Humedad y Congelación: prueba que determina la resistencia del módulo en condiciones de humedad, condensación, y congelamiento y el resultado de la expansión de los materiales.
- Robustez de los terminales: determina que los terminales y los accesorios que se encuentran en el módulo se encuentran en buenas condiciones durante su ensamblaje o cuando se esté manipulando el módulo.
- Prueba de giro: en esta prueba se detectan los defectos que el módulo pueda tener cuando es colocado en una superficie no plana.
- Prueba de cargas mecánicas: esta prueba se asegura que el módulo pueda soportar cargas estáticas o dinámicas en condiciones normales de viento o nieve.
- Prueba de susceptibilidad (cortes en la superficie): esta prueba se asegura de que el módulo es capaz de soportar un objeto cortante a través de la superficie de esté sin ocasionar un riesgo de una descarga eléctrica.

- Prueba de calor húmedo: determina la habilidad del módulo de soportar los efectos a largo plazo de la humedad (temperaturas aproximadas de 85 °C con humedad del 85 %).
- Prueba de diodos térmicos: verifica la idoneidad del diseño térmico y su confiabilidad a largo plazo de los diodos.
- Prueba de impacto de granizo: verifica que el módulo soporta el impacto de granizo sin recibir daño.
- Prueba de resistencia térmica: evalúa la habilidad del módulo de soportar los efectos a largo plazo de puntos calientes asociados a rupturas de las celdas o fallas a los circuitos.
- Ensayo de acondicionamiento ultravioleta: este ensayo se realiza con el fin de observar las condiciones del módulo en presencia de radiación ultravioleta en una región espectral por debajo de los 400 nanómetros.
- Prueba de exposición al aire libre: evalúa la capacidad del módulo de soportar la exposición de este en el aire libre y por si se encuentran fallas que no se pueden detectar en el laboratorio.