



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

**TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Caracterización del desempeño de láminas solares

Trabajo de fin de titulación

Autora:

Castro Apolo, Andrea Beatriz

Director:

Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA – ECUADOR

2013



CERTIFICACIÓN: ACEPTACIÓN DE PROYECTO DE FIN DE TITULACIÓN

Loja, mayo de 2013

Ing.
Jorge Luis Jaramillo Pacheco
Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones

Dejo constancia de haber revisado y estar de acuerdo con el proyecto de fin de titulación, titulado: "Caracterización del desempeño de láminas solares".

Presentado por:
Andrea Beatriz Castro Apolo

Particular que comunico para los fines legales pertinentes.

Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco

Visto Bueno Dirección Escuela

F).....
Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco
DIRECTOR DE LA TITULACIÓN DE ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

Mayo de 2013



ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS EN TESIS DE GRADO

Yo, Andrea Beatriz Castro Apolo declaro ser autora del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

Andrea Beatriz Castro Apolo

1104180235



DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro a mis padres, por ser un ejemplo de superación, trabajo, respeto y amor; a mis hermanos por animarme siempre a ser mejor y apoyarme en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, porque de una u otra forma estuvieron presentes durante todo este tiempo, siempre con una palabra de aliento, lo que me permitió seguir adelante y alcanzar mis objetivos; a mis amigas del colegio, mis amigos "Los del A", y más amigos de toda la vida, por sus muestras de cariño, consideración, y apoyo constante.

Andrea Beatriz Castro Apolo



AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por iluminarme con su sabiduría durante toda mi formación académica, por permitirme llegar hasta este punto y culminar con éxito mi carrera profesional. A mis padres y hermanos, por ser mi pilar fundamental y apoyo en todo momento, porque con sus consejos y respaldo han forjado en mí la mejor versión de mi misma. A mi familia en general, por siempre estar pendientes de mí y demostrarme que con amor, trabajo y fe, todo es posible.

De igual manera, quiero extender mi agradecimiento a los docentes de la titulación de electrónica y telecomunicaciones, quienes supieron compartir con nosotros sus conocimientos y experiencias profesionales, y, de manera especial quiero expresar mi gratitud al Ing. Jorge Luis Jaramillo por su apoyo y guía incondicional durante el proceso de desarrollo de este trabajo.

Y a mis amigos, por brindarme su apoyo siempre, a mis muchachos “los del A”, son una parte indispensable en mi vida; y, en especial, quisiera agradecer a Daniel Uchuary, quien me colaboró desinteresadamente durante el desarrollo de este trabajo de fin de titulación.

Andrea Beatriz Castro Apolo



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN: ACEPTACIÓN DE PROYECTO DE FIN DE TITULACIÓN	I
ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS EN TESIS DE GRADO.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
CAPÍTULO 1	14
EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA	14
1.1 INTRODUCCIÓN	14
1.2 LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	14
1.3 GENERACIONES EN LA TECNOLOGÍA SOLAR	15
1.3.1 <i>Células solares de primera generación.....</i>	<i>15</i>
1.3.2 <i>Células solares de segunda generación.....</i>	<i>15</i>
1.3.3 <i>Células solares de tercera generación.....</i>	<i>15</i>
1.3.4 <i>Evolución de las características técnico económicas de la tecnología solar</i>	<i>16</i>
1.4 TECNOLOGÍA SOLAR DISPONIBLE EN EL MERCADO.....	17
1.4.1 <i>Cargadores solares.....</i>	<i>17</i>
1.4.2 <i>Ventiladores solares.....</i>	<i>18</i>
1.4.3 <i>Iluminación solar</i>	<i>19</i>
1.5 PROSPECTIVA DE LA TECNOLOGÍA SOLAR	20
1.5.1 <i>Tecnología DSC y arquitectura</i>	<i>21</i>
1.5.2 <i>Tecnología DSC y electrónica portable.....</i>	<i>22</i>
CAPÍTULO 2	24
CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	24
2.1 INTRODUCCIÓN	24
2.2 MODELO ELÉCTRICO DE UN MÓDULO PV	24
2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE UN MÓDULO PV	26
2.3.1 <i>Principales parámetros de la característica I-V.....</i>	<i>26</i>
2.3.2 <i>Efecto de la variación de la radiación solar incidente en la característica I-V</i>	<i>27</i>
2.3.3 <i>Efecto de la variación de la temperatura en la característica I-V.....</i>	<i>28</i>
2.3.4 <i>Efecto del contenido espectral de la luz en la característica I-V.....</i>	<i>29</i>
2.4 OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA I-V DE UN MÓDULO PV	29
CAPÍTULO 3	32
PLANIFICACIÓN METODOLÓGICA DE LA OBTENCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA I-V DE LA LÁMINA SOLAR POWERFILM DE 28W	32
3.1 INTRODUCCIÓN	32
3.2 FORMULACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA I-V DE LAS LÁMINAS SOLARES FLEXIBLES	32
3.2.1 <i>Generalidades de las láminas solares PowerFilm</i>	<i>32</i>
3.2.2 <i>Diseño y construcción de un soporte mecánico.....</i>	<i>34</i>
3.2.3 <i>Definición del procedimiento para la adquisición de data.....</i>	<i>35</i>
CAPÍTULO 4	37
OBTENCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA I-V DE LA LÁMINA SOLAR POWERFILM DE 28W Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
4.1 INTRODUCCIÓN	37
4.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA LÁMINA POWERFILM SOLAR R-28	37



4.2.1	<i>Obtención de la característica IV base</i>	37
4.2.2	<i>Obtención de la característica IV para diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal</i>	41
4.2.2.1	Característica IV para 10° de inclinación	41
4.2.2.2	Característica IV para 20° de inclinación	44
4.2.2.3	Característica IV para 30° de inclinación	46
4.2.2.4	Característica IV para 40° de inclinación	49
4.2.2.5	Característica IV para 50° de inclinación	51
4.2.2.6	Característica IV para 60° de inclinación	54
4.2.2.7	Análisis de resultados	56
4.3	CURVA CARACTERÍSTICA IV PARA CONEXIONES DE LÁMINAS SOLARES POWERFILM R-28, EN SERIE Y EN PARALELO	57
4.3.1	<i>Curva IV de una conexión de láminas solares en serie</i>	60
4.3.2	<i>Curva IV de una conexión de láminas solares en paralelo</i>	63
	TRABAJOS FUTUROS	67
	CONCLUSIONES	68
	REFERENCIAS	71
	ANEXOS	74
	ANEXO 1	75
	CARACTERÍSTICA IV DE LA LÁMINA SOLAR PARA VARIOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN CON RESPECTO DE LA HORIZONTAL	75
	ANEXO 2	78
	PAPER: CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LÁMINAS SOLARES	78



LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Izq: celda solar convencional de silicio; Der: distribución de las diferentes capas de la celda	15
Fig.1.2. Lámina delgada de tercera generación	16
Fig.1.3. Cargador solar para móviles.....	17
Fig.1.4. Cargador solar universal 5000.....	18
Fig.1.5. Cargador solar y eólico portable.....	18
Fig.1.6. Ventilador solar portable.....	19
Fig.1.7. Solarise	19
Fig.1.8. Linterna Solar completa.....	20
Fig.1.9. Módulo de células de colorante DSC	20
Fig.1.10. Módulo de células de colorante de G24i	21
Fig.1. 11. Primera instalación del mundo con células sensibilizadas con colorante en un edificio público de Alemania.....	22
Fig.1.12. Integración de ventanas inteligentes, basadas en células solares sensibilizadas con colorante, en un edificio	22
Fig.2.1. Circuito equivalente (básico) de un módulo PV.....	24
Fig.2.2. Circuito equivalente básico de una celda solar	25
Fig.2.3. Circuito equivalente mejorado de una celda solar.....	25
Fig.2.4. Curva característica I-V de un módulo PV	26
Fig.2.5. Característica I-V de un módulo PV, para variaciones de radiación incidente	27
Fig.2.6. Característica P-V de un módulo PV, para variaciones de radiación incidente	28
Fig.2.7. Característica I-V de un módulo PV, para variaciones de la temperatura de trabajo	28
Fig.2.8. Característica P-V de un módulo PV, para variaciones de la temperatura de trabajo	29
Fig.3.1. Lámina solar PowerFilm de 28W	32
Fig.3.2. Utilización de una lámina solar delgada para provisión de energía a un dispositivo móvil celular	33
Fig.3.3. Utilización de una lámina solar delgada para provisión de energía a una batería de 12V	33
Fig.3.4. Sección transversal de una lámina solar delgada	34
Fig.3.5. Modelo 3D del soporte mecánico	34
Fig.3.6. Soporte mecánico construido para experimentación de las láminas solares PowerFilm	35
Fig.3.7. Esquema del circuito eléctrico propuesto para variación de la carga y obtención de los pares (I,V) de la curva I-V de la lámina solar	36
Fig.3.8. Implementación del circuito eléctrico propuesto para variación de la carga y obtención de los pares (I,V) de la curva I-V de la lámina solar	36
Fig.3.9. Resistores cerámicos de alta potencia utilizados como carga para la obtención de los pares (I,V) de la curva I-V de la lámina solar	36
Fig.4.1. Estación experimental para la obtención de la curva IV de la lámina solar, con ángulo de inclinación de 20° respecto de la horizontal.....	38
Fig.4.2. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 20° respecto de la horizontal.....	40
Fig.4.3. Obtención de la curva IV de las láminas solares, con diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal	41
Fig.4.4. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal.....	43



Fig.4.5. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 20° respecto de la horizontal.....	46
Fig.4.6. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 30° respecto de la horizontal.....	48
Fig.4.7. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 40° respecto de la horizontal.....	51
Fig.4.8. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 50° respecto de la horizontal.....	53
Fig.4.9. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 60° respecto de la horizontal.....	56
Fig.4.10. Curvas IV de la lámina solar, obtenidas con diferentes ángulos de inclinación respecto de la horizontal, en el intervalo de 10 a 60 grados	57
Fig.4.11. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo	60
Fig.4.12. Esquema de conexión en serie de las láminas solares	61
Fig.4.13. Curva IV de dos láminas solares, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en serie, en el valle de Catamayo.....	63
Fig.4.14. Esquema de conexión en paralelo de las láminas solares	64
Fig.4.15. Curva IV de dos láminas solares, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo	66



LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Especificaciones técnicas de la lámina solar PowerFilm R-28	37
Tabla 4.2. Condiciones meteorológicas en el día del experimento.....	38
Tabla 4.3. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal	38
Tabla 4.4. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal.....	40
Tabla 4.5. Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 10° respecto de la horizontal	41
Tabla 4.6. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal	41
Tabla 4.7. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal.....	43
Tabla 4.8. Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 20° respecto de la horizontal	44
Tabla 4.9. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal	44
Tabla 4.10. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal.....	46
Tabla 4.11. Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 30° respecto de la horizontal	46
Tabla 4.12. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal	46
Tabla 4.13. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 30° respecto de la horizontal.....	48
Tabla 4.14. Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 40° respecto de la horizontal	49
Tabla 4.15. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 40° respecto de la horizontal	49
Tabla 4.16. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 40° respecto de la horizontal.....	51
Tabla 4.17. Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 50° respecto de la horizontal	51
Tabla 4.18. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 50° respecto de la horizontal	51
Tabla 4.19. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 50° respecto de la horizontal.....	53
Tabla 4.20. Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 60° respecto de la horizontal	54
Tabla 4.21. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 60° respecto de la horizontal	54
Tabla 4.22. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 60° respecto de la horizontal.....	56
Tabla 4.23. Tabla resumen de los valores de MPP de las curvas I-V obtenidas para diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal	57
Tabla 4.24. Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo.....	58



Tabla 4.25. Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo	58
Tabla 4.26. Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo	60
Tabla 4.27. Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28 conectadas en serie, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo	61
Tabla 4.28. Parámetros definitorios de la característica I-V de dos láminas solares PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en serie, en el valle de Catamayo	63
Tabla 4.29. Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo	64
Tabla 4.30. Parámetros definitorios de la característica I-V de dos láminas solares PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo	66



RESUMEN

En el presente trabajo se define y valida un procedimiento sencillo de implementar, para la obtención de la característica intensidad-tensión (IV) de una lámina solar flexible, como primer paso en el análisis del desempeño de un sistema de generación de energía basado en su utilización. Para ello, se describe una aproximación a la evolución de la tecnología fotovoltaica y las expectativas prospectivas sobre aplicaciones potenciadas por energía solar. También, se presenta el modelo eléctrico de funcionamiento de un módulo fotovoltaico (PV), se explica la utilización de la característica IV para evaluar su desempeño, y se analiza la influencia de la variación de la radiación solar incidente, de la temperatura, y, del contenido espectral de la luz en la característica IV. Además, se describe la planificación metodológica de la obtención de la característica de las láminas solares PowerFilm de 28W, considerando el diseño de una estructura mecánica para soporte de la lámina, y, el procedimiento para el registro de data. Finalmente, se muestra el proceso de obtención de esta curva, para distintos ángulos de inclinación respecto de la horizontal, y, para una configuración stand alone, en serie, y, en paralelo.



INTRODUCCIÓN

El creciente costo económico y ambiental de los combustibles fósiles, ha promovido el desarrollo de las fuentes renovables como alternativas energéticas. La energía solar es una de las fuentes de energía renovable más utilizada actualmente, sobre todo porque presenta una mayor eficiencia con respecto a otras energías como la eólica o la piezoelectricidad.

En los últimos años, el desarrollo de células de Grätzel permitió reducir el volumen y peso de los dispositivos de captación de energía solar, abriendo una oportunidad especial al diseño y fabricación de aplicaciones portables de provisión de energía. En este contexto, este trabajo de fin de titulación pretende definir y probar un procedimiento simple para la obtención de la característica intensidad-tensión (IV) de las láminas solares flexibles, como primer paso para juzgar sobre el desempeño de un sistema de generación de energía potenciado por láminas solares.

Este trabajo de investigación se estructuró en cuatro capítulos. En el primer capítulo se describe una aproximación a la evolución de la tecnología fotovoltaica y las expectativas prospectivas sobre aplicaciones potenciadas por energía solar.

En el segundo capítulo se presenta el modelo eléctrico de funcionamiento de un módulo fotovoltaico (PV), se explica la utilización de la característica IV para evaluar el desempeño de un módulo PV, y se analiza la influencia de la variación de la radiación solar incidente, de la temperatura, y, del contenido espectral de la luz en la característica IV.

En el tercer capítulo se describe la planificación metodológica de la obtención de la curva característica de las láminas solares PowerFilm de 28W, considerando el diseño de una estructura mecánica para soporte de la lámina, y, el procedimiento para el registro de data.

En el cuarto capítulo se describe el proceso de obtención de esta curva característica, para distintos ángulos de inclinación respecto de la horizontal, y, para una configuración stand alone, en serie, y, en paralelo.



OBJETIVOS

Objetivo General

- Definir y valorar un procedimiento de sencilla implementación para la obtención de la característica IV de una lámina solar flexible.

Objetivos Específicos

- Establecer la línea base sobre la energía solar y la evolución de la tecnología fotovoltaica.
- Explicar el modelo eléctrico de funcionamiento de un módulo PV y la curva característica IV que lo define.
- Planificar la metodología de obtención de la curva característica IV de una lámina solar PowerFilm de 28W.
- Obtener la curva característica IV de la lámina solar PowerFilm de 28W para diferentes ángulos de inclinación con respecto de la horizontal, y para una conexión en serie y en paralelo.



CAPÍTULO 1

EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

1.1 INTRODUCCIÓN

El creciente costo económico y ambiental de los combustibles fósiles, ha promovido el desarrollo de las fuentes renovables como alternativas energéticas. Los esfuerzos no sólo se orientan en el mejoramiento y optimización constante de la tecnología, sino que también incluye un fuerte componente de transformación cultural en el uso de la energía en la sociedad [1].

La energía solar es una de las fuentes de energía renovable más utilizada actualmente, sobre todo porque presenta una mayor eficiencia con respecto a otras energías como la eólica o la piezoelectricidad. El uso de energía solar incluye la captura, la conversión y, el almacenamiento de energía [2].

Tres generaciones de tecnología se han desarrollado para la captura y conversión de energía solar: paneles, láminas solares, y, celdas de Grätzel. La segunda y tercera generación de tecnología solar, han apostado a la flexibilidad de instalación, a una mayor cobertura de área, y, a un mejor rendimiento energético, incluso a altas temperaturas y a baja radiación. Todo esto influye en una mayor capacidad de generación de energía.

Este capítulo describe el estado del arte en el aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones portables, como resultado de los éxitos alcanzados por la segunda y tercera generación de tecnología solar.

1.2 LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El Sol es el origen de todas las formas de energía que el ser humano ha utilizado a lo largo de la historia, incluyendo la llamada energía solar. Sería poco racional no aprovechar esta fuente energética gratuita, limpia, y, prácticamente inagotable. Desde una perspectiva tecnológica, aún se debe resolver una serie de problemas para que el aprovechamiento de la energía solar sea eficiente y confiable, antes de que la energía solar se convierta en una fuente de escala mundial.

Se ha logrado emplear la energía solar para generar calor, producir electricidad, e, iluminar espacios arquitectónicos. El calor se obtiene mediante captadores o colectores térmicos (energía solar térmica), la electricidad a través de módulos fotovoltaicos (energía solar fotovoltaica), y, la iluminación a través de inyectores solares [2].

La conversión fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, es decir en la conversión de la energía proveniente del Sol en energía eléctrica. Esta conversión se



realiza en las denominadas células solares, que conectadas en serie o en paralelo, suministran la tensión y la corriente requeridas por las demanda.

Entre las ventajas de la energía solar fotovoltaica se menciona, entre otros, la no generación de contaminantes atmosféricos, un impacto visual reducido, bajos requerimientos de espacio físico, y, la ausencia de ruidos en el punto de utilización [3].

1.3 GENERACIONES EN LA TECNOLOGÍA SOLAR

1.3.1 Células solares de primera generación

Las células solares de primera generación, se introdujeron comercialmente a principios de 1980, y, aún se usan.

El funcionamiento de las células solares se basa en la diferencia de potencial que surge en una juntura semiconductor p-n, cuando el material es radiado con energía proveniente del Sol. En una célula convencional de silicio, la juntura se obtiene al trabajar con silicio cristalino de alta pureza, y, con silicio “dopado” o contaminado con impurezas de diferente tipo (Ver Fig.1.1) [4].

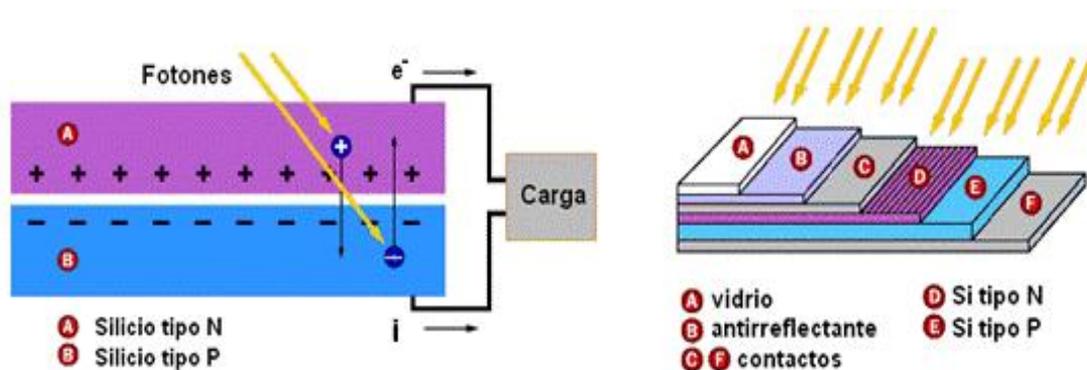


Fig. 1.1. Izq: celda solar convencional de silicio; Der: distribución de las diferentes capas de la celda.
Disponible en: <http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vida%20y%20tierra/celdasolar/index.htm>

1.3.2 Células solares de segunda generación

La segunda generación de tecnología solar, se inició a finales de los años 1990 con la introducción de la tecnología de láminas delgadas, que se construyen apilando capas muy finas de diferentes materiales semiconductores.

Las láminas delgadas tienen una eficiencia similar a los módulos de silicio de la primera generación, pero su grosor es hasta 100 veces menor, lo que influye en una reducción drástica del peso.

1.3.3 Células solares de tercera generación

La fabricación de láminas delgadas de la segunda generación, tuvo que enfrentar problemas serios. El depósito de capas semiconductoras sobre una superficie base



(generalmente vidrio), a través de un proceso a alto vacío resultó caro. Además se necesitaba de procesos adicionales para “dibujar” los contactos eléctricos necesarios.

La tercera generación de tecnología solar, también se construye a base de láminas delgadas, pero obvia las dificultades anteriores. Las capas de material semiconductor se depositan directamente sobre un metal, eliminando pasos adicionales para colocar los contactos. Además, el procedimiento elimina la fragilidad del dispositivo, proporcionando células solares con un alto grado de flexibilidad, lo que mejora la manipulación mecánica [4] (Ver Fig.1.2).

Se prevé que, una cuarta generación de células solares, unirá nanopartículas con polímeros, para lograr células más eficientes y baratas. La celda empleará varias capas que no sólo aprovecharán los diferentes tipos de luz, sino también el espectro infrarrojo.



Fig.1.2. Lámina delgada de tercera generación. Disponible en: <http://blog.is-arquitectura.es/2007/03/13/laminas-solares/>

1.3.4 Evolución de las características técnico económicas de la tecnología solar

Algunos expertos prefieren no hablar de generaciones de tecnología solar, sino de avances en la relación entre el costo de fabricación y la eficiencia de la conversión energética de las células.

En teoría, las células solares podrían alcanzar una conversión de energía solar en electricidad, de cerca del 93%. Por otra parte, se espera que el costo de fabricación descienda lo suficiente para convertir a esta tecnología en un contrincante serio de los combustibles fósiles y de la energía nuclear [5].

Las láminas solares disponibles en el mercado actual, son más baratas de fabricar que los módulos solares, absorben la energía solar de una manera eficiente, y, reducen la carga estructural sobre las construcciones en las que se montan, lo que por sí mismo constituye un ahorro adicional en la implementación de estos sistemas.



Desde la perspectiva de su incorporación en edificaciones, las láminas son atractivas, no sólo por adaptarse a superficies curvas, sino también por el menor impacto estético (en comparación con los paneles solares) por su ligereza, y, homogeneidad [6].

1.4 TECNOLOGÍA SOLAR DISPONIBLE EN EL MERCADO

La reducción de peso y el aumento de flexibilidad de la tecnología solar de segunda y tercera generación, amplió la oferta de aplicaciones, desde los tradicionales sistemas fotovoltaicos de estado sólido a aplicaciones portables.

1.4.1 Cargadores solares

En el mercado, es posible encontrar una serie de aplicaciones solares portables para actuar como cargadores, algunas en fase de experimentación, y, otras con indicadores de desempeño muy atractivos.

ClickCells, desarrollado por Nousol, proporciona energía a pequeños aparatos electrónicos (Ver Fig.1.3). Al no utilizar una batería intermedia, sino inyectar directamente la electricidad fotovoltaica, la vida del dispositivo es mayor en comparación con la de aquellos que disponen de baterías incorporadas; la vida útil se estima tan larga como la vida útil de la celda solar, cerca de 25 años [7]. Otros modelos incorporar un almacén de plugs, lo que los convierte en cargadores universales [8] (Ver Fig.1.4)



Fig.1.3. Cargador solar para móviles. Disponible en: <http://www.terra.org/articulos/art02211.html>



Fig.1.4. Cargador solar universal 5000. Disponible en: <http://www.tucargadorsolar.com/Universales/Cargador-Solar-Universal-5000.html>

Especial interés merecen los cargadores híbridos que, combinan el uso de energía solar fotovoltaica y de energía eólica para generar electricidad. Estos dispositivos apuestan a la complementariedad de las fuentes de energía [9] (Ver Fig.1.5).



Fig.1.5. Cargador solar y eólico portable. Disponible en: <http://news.soliclima.com/noticias/energia-solar/sale-al-mercado-un-cargador-solar-y-eolico-portatil>

1.4.2 Ventiladores solares

En el mercado, está disponible un ventilador eco-friendly de pequeñas dimensiones, que utiliza energía solar. La batería interna de 450 mAh, se carga a través de la exposición solar o con energía eléctrica a través de un cable USB [10] (Ver Fig.1.6).



Fig.1.6. Ventilador solar portátil. Disponible en: <http://www.tucargadorsolar.com/Productos-Solares/Ventilador-Solar-Portatil.html>

1.4.3 Iluminación solar

La empresa Solarise, introdujo al mercado una linterna solar activada a través de un panel fotovoltaico de 240 W. La linterna tiene la forma de una esfera solar, está hecha de polietileno de alta densidad HDPE, y, en su base se alojan las baterías. Esta base también sirve para recargar otros dispositivos electrónicos [11] (Ver Fig.1.7).



Fig.1.7. Solarise. Disponible en: <http://www.ison21.es/2012/05/12/solarise-luz-portable-con-energia-solar/>

Otros modelos de lámparas solares se cargan a través de paneles y dinamos, como la mostrada en la Fig.1.8 [12].



Fig.1.8. Linterna Solar completa. Disponible en: <http://www.tucargadorsolar.com/Linternas-Solares/Linterna-Solar-Completa.html>

1.5 PROSPECTIVA DE LA TECNOLOGÍA SOLAR

Los dispositivos de silicio de estado sólido dominaron la tecnología solar, durante muchos años, en base a la experiencia y a la disponibilidad de materiales en la industria de semiconductores. En los últimos años, el esfuerzo se ha centrado en el diseño y aprovechamiento de dispositivos basados en semiconductores inorgánicos u orgánicos mesoscópicos.

El prototipo de la nueva generación de dispositivos fotovoltaicos, es la célula solar sensibilizada con colorante dye solar cell (DSC), desarrollada en 1988 por Michael Grätzel del EPFL, en Suiza. En esta célula se logró la absorción óptica y la separación de carga, asociando un sensibilizador (como material de absorción de luz), y, un semiconductor de ancha banda prohibida (gap) de morfología nanocrystalina.

Las células de Grätzel pueden construirse empleando substratos flexibles, por lo que pueden ser utilizados en dispositivos domésticos, aplicaciones decorativas o arquitectónicas, etc. [13] (Ver Fig.1.9).

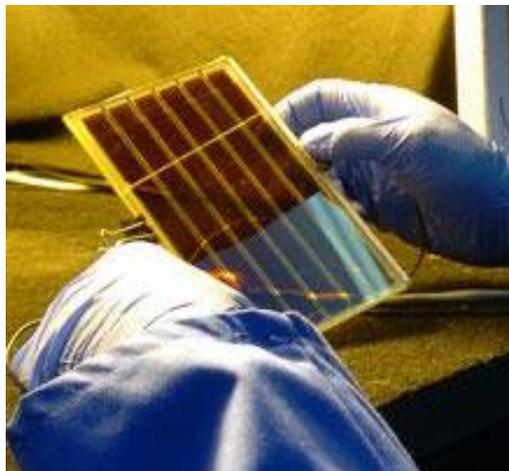


Fig.1.9. Módulo de células de colorante DSC. Disponible en: <http://www.consoliderhope.uji.es/celulaGratzel.php>



En contraste con la tecnología fotovoltaica tradicional, la tecnología DSC emplea procesos de producción más simples, que requieren de menos energía. Esto reduce el impacto ambiental y reduce costos. Además, la tecnología DSC es menos sensible al ángulo de la radiación solar, por lo que se puede instalar en paredes verticales y en lugares poco iluminados. La tecnología DSC puede ser transparente y utilizar diferentes colores, lo que mejora las opciones de integración arquitectónica [14].

1.5.1 Tecnología DSC y arquitectura

La utilización de tecnología DSC en arquitectura, tiene como objetivo el harvesting de la energía solar que “cae” sobre las estructuras durante el día. En un inicio, se pretende capturar energía suficiente para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo de energía. A futuro, esta tecnología deberá proporcionar suficiente energía para garantizar un suministro permanente en las edificaciones.

Empresas como G24 Innovations, han desarrollado células solares tintadas para interiores, que alcanzan 26% de eficiencia [15]. Esta tecnología podría ser empleada para reemplazar baterías u otro tipo de aprovisionamiento de energía para dispositivos móviles, en el hogar o en la oficina (Ver Fig.1.10).



Fig.1.10. Módulo de células de colorante de G24i. Disponible en:<http://www.dforcesolar.com/energia-solar/celda-solar-tintada-con-nuevo-record-de-eficiencia/>

En otra aplicación, las células DSC forman parte de construcciones basadas en BIPV (módulos fotovoltaicos integrados en edificios). Estos módulos reemplazan ventanas, techos, y, muros, y, son usados para generar electricidad cuando la demanda del edificio está en su tope [16] [17] (Ver Fig.1.11).

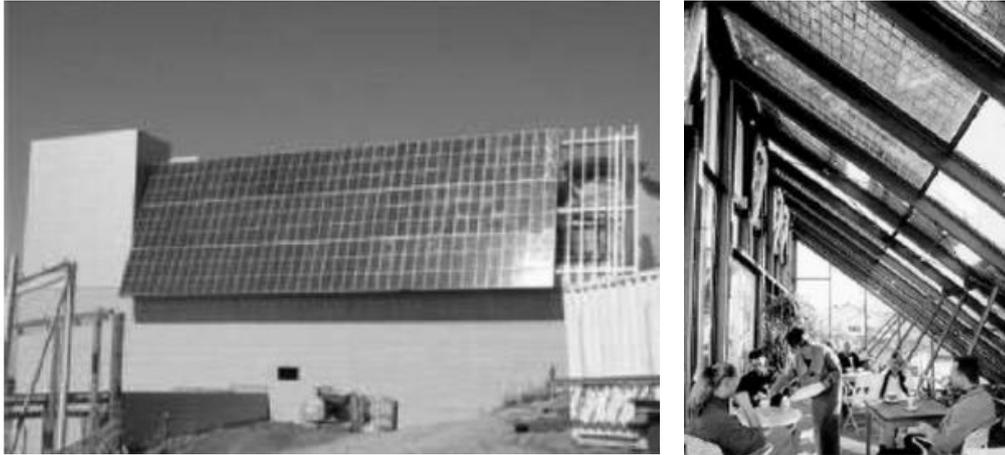


Fig.1. 11. Primera instalación del mundo con células sensibilizadas con colorante en un edificio público de Alemania. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/77609288/CELULAS-SOLARES-CON-SEMICONDUCTORES-ORGANICOS>

También se contempla la incorporación de células a ventanas inteligentes. El enfriamiento de edificios en verano, consume una fracción significativa de la energía total. Ventanas inteligentes podrían regular el paso de luz y calor, cambiando dinámicamente la transmisividad [18] (Ver Fig.1.12).



Fig.1.12. Integración de ventanas inteligentes, basadas en células solares sensibilizadas con colorante, en un edificio. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/77609288/CELULAS-SOLARES-CON-SEMICONDUCTORES-ORGANICOS>

1.5.2 Tecnología DSC y electrónica portable

Diferentes centros de investigación dirigen sus esfuerzos a reducir los costos de fabricación, elevar la eficiencia, y, mejorar la estabilidad a las células, precondiciones indispensables para su incorporación efectiva a productos electrónicos portables de mercado.



Se trabaja en optimizar aplicaciones de células en teléfonos móviles y otros aparatos electrónicos de bajo consumo de energía. También son prospectivas las investigaciones en el uso de células para la alimentación de microsistemas y redes de sensores autosuficientes en términos de energía [16].



CAPÍTULO 2

CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

La capacidad de aprovechar la energía solar, depende de la radiación solar incidente sobre la superficie del módulo PV, y, de las características constructivas del módulo [19].

En campo, se caracteriza el desempeño de un módulo PV a través de su curva característica, o, curva corriente tensión I-V. Esta curva representa las posibles combinaciones de I y V en un módulo PV, bajo condiciones de radiación solar incidente y temperatura ambiente acordes con lo establecido por estándares internacionalmente aceptados [20].

El conocimiento de la curva I-V de un módulo PV dado, es esencial para la instalación y evaluación de aplicaciones.

En este capítulo, se describe el modelamiento eléctrico del funcionamiento de un módulo PV, y, se explica cómo la variación de aspectos ambientales influye en la característica I-V del módulo.

2.2 MODELO ELÉCTRICO DE UN MÓDULO PV

En una aproximación muy básica, un módulo PV (conformado por una sola celda) puede ser representado como una fuente de corriente (fotocorriente), cuyo valor depende de la radiación incidente (Ver Fig.2.1) [21].

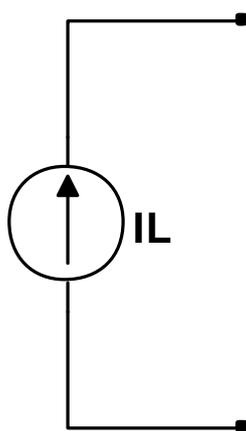


Fig.2.1. Circuito equivalente (básico) de un módulo PV. Disponible en:
http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

La presencia de una juntura p-n en la celda solar, puede modelarse como un diodo conectado en paralelo con la fuente de corriente (Ver Fig.2.2). Este diodo es el responsable de la tensión generada por la celda, que cambia ante la variación de la carga [21].

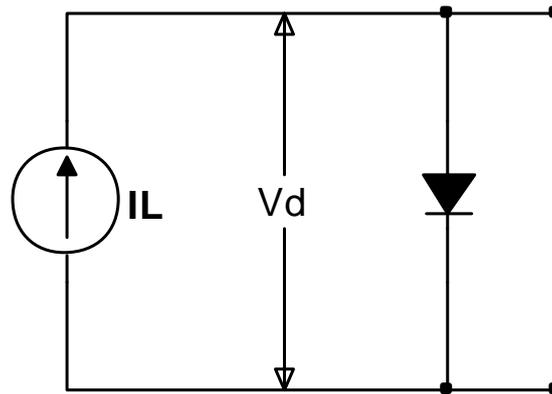


Fig.2.2. Circuito equivalente básico de una celda solar. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

El modelo obtenido, puede ser mejorado, considerando que en la celda se presentan pérdidas en forma de calor, y, que el diodo de la juntura no debe ser considerado ideal (Ver Fig.2.3) [21].

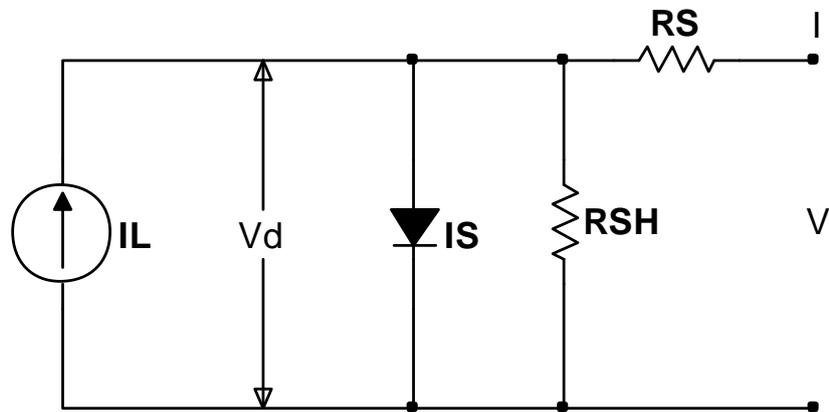


Fig.2.3. Circuito equivalente mejorado de una celda solar. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

En la Fig.2.3, I_L representa la fuente de corriente; I_S , representa la corriente de saturación inversa del diodo o **corriente oscura**. V , representa la tensión del diodo formado por la juntura de la celda, y, su valor depende tanto de la juntura como de la temperatura de funcionamiento de la celda. R_S aparece como consecuencia de la resistencia eléctrica presente en el material de la celda, por el cual fluye la corriente. R_{SH} considera las corrientes de fuga a través de la celda, alrededor de los bordes del dispositivo, y, entre los contactos de distinta polaridad.

Al conectar una carga a los terminales del módulo, se mantendrá una diferencia de potencial V , y, una corriente I a través de la celda.

Si se desprecia el efecto de las resistencias R_S y R_{SH} del modelo equivalente, se puede afirmar que cuando la celda es iluminada, la fotocorriente se divide entre el diodo y la resistencia de carga, en una proporción dependiente de la iluminación y de la carga. Para resistencias altas en la carga, una mayor parte de la fotocorriente fluye a través del diodo, lo que resulta en una diferencia de potencial mayor en los terminales de la celda, con una corriente menor.



Un modelo de las pérdidas en la celda, en forma de calor, se obtiene al considerar R_S y R_{SH} . R_S se presenta con fuerza para altas densidades de corriente, como la presente como resultado de una gran concentración de luz incidente. R_{SH} es un problema en dispositivos rectificadores de pobre calidad. Para que la celda sea lo más eficiente posible, R_S debe ser lo más pequeña, y, R_{SH} lo más grande posible. En forma ideal, $R_S = 0$, y, $R_{SH} \rightarrow \infty$ [21].

2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE UN MÓDULO PV

El desempeño característico de un módulo PV, se representa a través de la característica I-V (Ver Fig.2.4), que representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje, bajo condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El par concreto de corriente y voltaje, en el que el módulo PV trabajará, está determinado por la carga a la que éste está conectado [20].

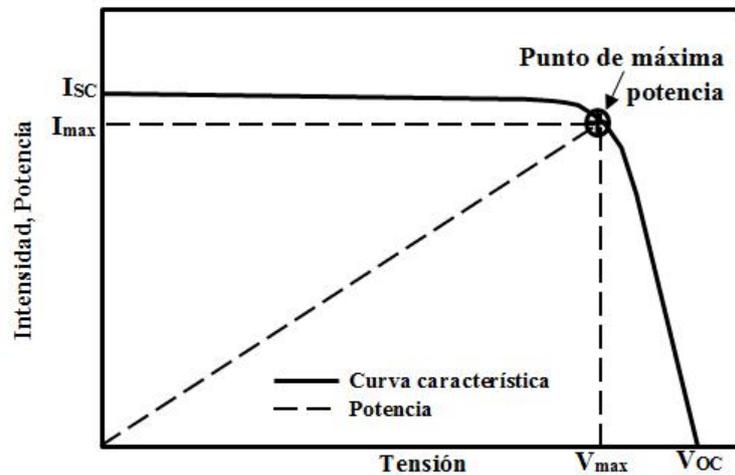


Fig.2.4. Curva característica I-V de un módulo PV. Disponible en: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf

2.3.1 Principales parámetros de la característica I-V

Se conoce como **corriente de cortocircuito** (I_{cc} o I_{sc}) a la máxima corriente a través del módulo PV, bajo condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondiente a un voltaje igual a cero entre sus terminales.

Se denomina **voltaje (tensión) de circuito abierto** (V_{ca} o V_{oc}) al máximo voltaje a la salida del módulo PV, bajo condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondiente a una corriente igual a cero a través de él.

Se llama **potencia máxima** (P_{max}), a la máxima potencia en el módulo PV, bajo condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V (**corriente en el punto de máxima potencia** I_{pmp} y **voltaje en el punto de máxima potencia** V_{pmp}).

Se conoce como **factor de forma** (FF), al valor del cociente entre P_{max} y el producto $I_{sc} \cdot V_{oc}$ (ver expresión (1)). El FF se expresa en tanto por ciento o en tanto



por 1. Un valor FF del 100%, corresponde a un hipotético perfil de cuadrado. La calidad del módulo PV es mejor, mientras más alto sea el valor FF [20].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

Generalmente, las células dentro del módulo PV se asocian en serie, con el fin de obtener valores de voltaje óptimos para la conexión a distintas cargas. El voltaje total del módulo dependerá, entonces, del número de células asociadas en serie. Mientras tanto, la corriente obtenida del módulo PV depende básicamente del tipo y tamaño de las células, suponiendo que no hay células conectadas en paralelo en el interior del módulo [20].

2.3.2 Efecto de la variación de la radiación solar incidente en la característica I-V

El V_{ca} varía en función de los niveles de radiación incidente. Para niveles bajos de radiación, V_{ca} cae bruscamente. La I_{cc} y la P_{max} , cambian casi proporcionalmente con la variación del nivel de radiación solar incidente (Ver Fig.2.5 y Fig.2.6) [21].

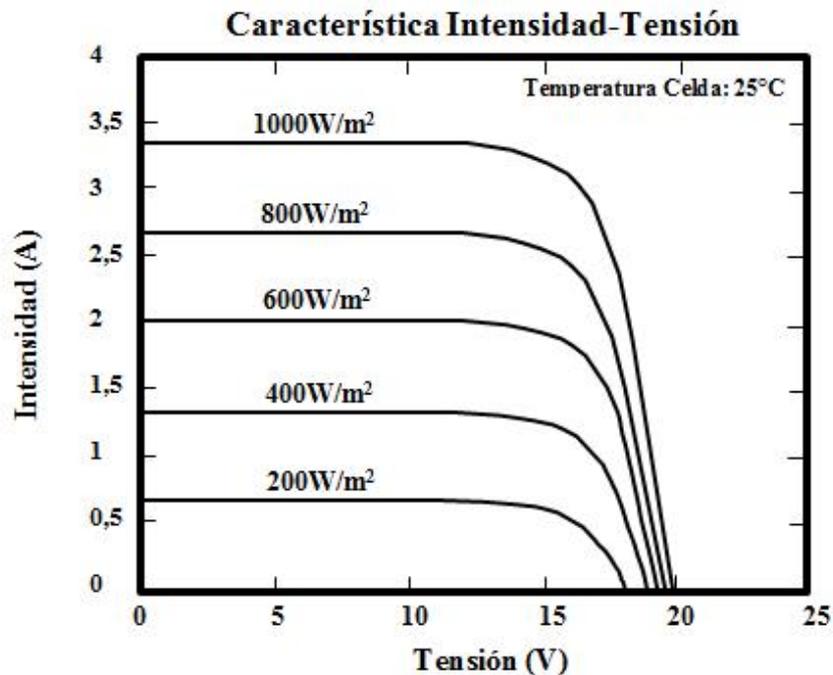


Fig.2.5. Característica I-V de un módulo PV, para variaciones de radiación incidente. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

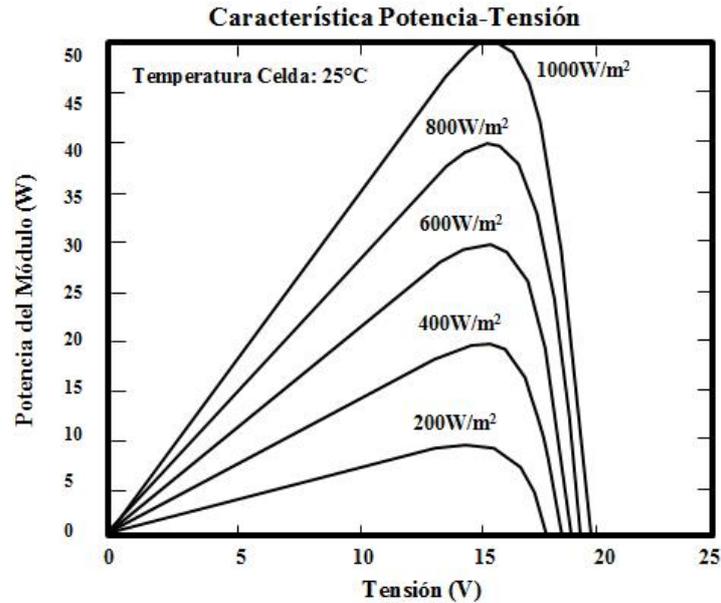


Fig.2.6. Característica P-V de un módulo PV, para variaciones de radiación incidente. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

2.3.3 Efecto de la variación de la temperatura en la característica I-V

Las celdas solares poseen un coeficiente de temperatura inverso para el V_{ca} , básicamente debido a las características de la juntura p-n. Esto provoca que tanto V_{ca} como V_{pmp} , se reduzcan notoriamente, de forma proporcional, al aumentar la temperatura de la celda (Ver Fig.2.7 y Fig.2.8) [21].

La I_{CC} varía de manera proporcional con la temperatura, pero esta variación es tan pequeña, que se puede considerar la I_{CC} como constante ante variaciones de temperatura en un amplio rango.

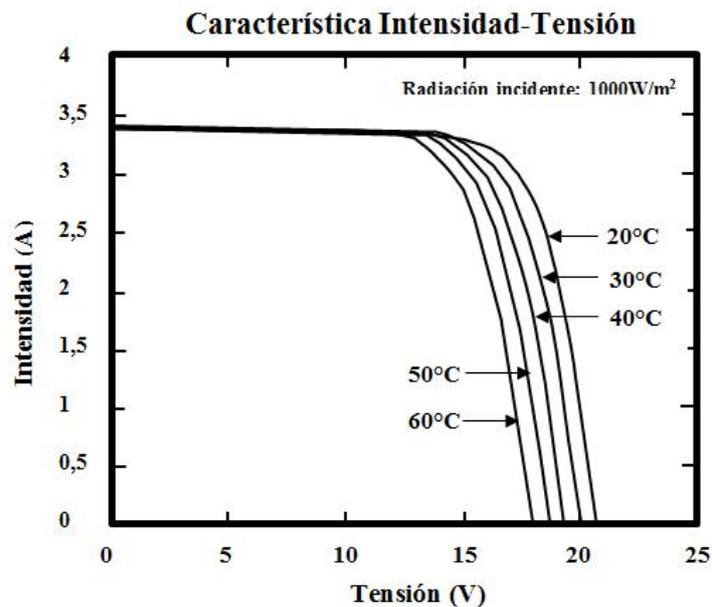


Fig.2.7. Característica I-V de un módulo PV, para variaciones de la temperatura de trabajo. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

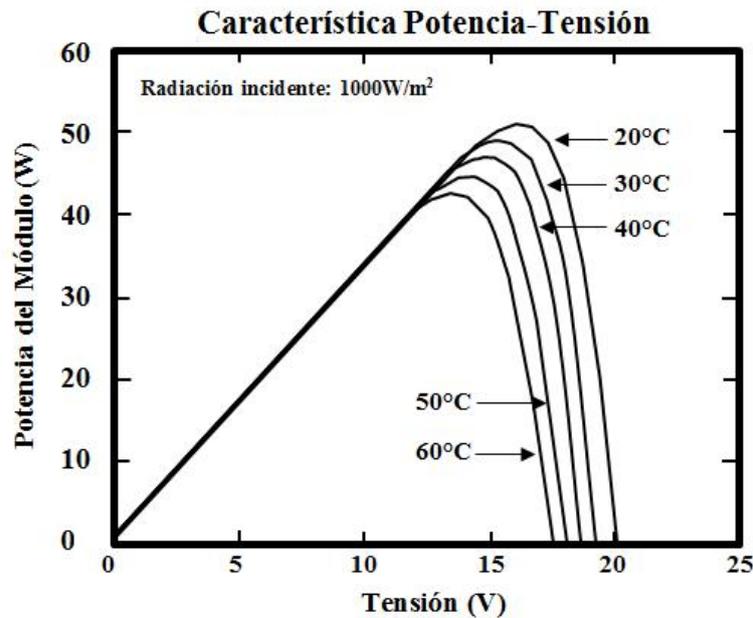


Fig.2.8. Característica P-V de un módulo PV, para variaciones de la temperatura de trabajo. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

2.3.4 Efecto del contenido espectral de la luz en la característica I-V

Dependiendo de la hora y de la época del año, el espectro de luz solar presenta desviaciones respecto al espectro estándar en la superficie terrestre.

Para considerar el espectro, al momento de tomar la característica I-V, se puede realizar una corrección, multiplicando I_{cc} por el **factor espectral**, obtenido de la comparación del espectro estándar y del espectro en condiciones experimentales. Esta corrección, muy pequeña, se utiliza cuando se requiere elevada precisión [20].

2.4 OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA I-V DE UN MÓDULO PV

La respuesta de un módulo PV a la radiación incidente, depende de la intensidad, de los materiales empleados en la fabricación del módulo, y, en especial, de las células que lo forman.

El conocimiento de la respuesta, de la característica I-V, de un módulo PV, es necesario para comparar calidad, eficacia, y, estabilidad eléctrica. Esta característica se obtiene conectando el módulo a un resistor cuya resistencia varía entre cero e infinito, mientras se registra los valores I y V , bajo **condiciones específicas CEM o STC** [22]. Estas condiciones son de uso generalizado y universal, y, prevén una irradiancia de 1000W/m^2 , una distribución espectral equivalente a AM 1.5G, con una incidencia normal, y, a una temperatura de la célula de 25°C (normas E490, G159, y, G173 de la Comisión Eléctrica Internacional, relacionadas a dispositivos fotovoltaicos) [23].



Normalmente, los parámetros característicos de los módulos PV (incluidos en las hojas de especificaciones técnicas del fabricante) han sido obtenidos bajo condiciones CEM. Sin embargo, la experiencia muestra que pocas veces los módulos PV alcanzan estas condiciones, por lo que es necesario determinar otras que representen el comportamiento del módulo de manera más realista [20], como las que se obtienen utilizando el método de **extrapolación a condiciones CEM**. El método consiste en corregir los valores de I_{cc} y V_{ca} , a los niveles deseados de irradiancia y temperatura, que se obtienen a partir de las ecuaciones (2) y (3), y, posteriormente trasladar toda la curva I-V hasta los valores corregidos (de I_{cc} y V_{ca}).

$$I_{cc2} = I_{cc1} \cdot \frac{E_2}{E_1} + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

$$V_{ac2} = V_{ac1} \cdot m \cdot \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (3)$$

En dónde,

I_{cc1} , V_{ac1} , T_1 , y , E_1 , son la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto, la temperatura, y, la irradiancia en las condiciones experimentales
 I_{cc2} , V_{ac2} , T_2 , y , E_2 , son los parámetros en las condiciones a las que se desea corregir la curva.

m , es el factor de idealidad del diodo (entre 1 y 1.2)

α y β , son los coeficientes de temperatura proporcionados por el fabricante de los módulos PV

k , es la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$), y,

e , es la carga del electrón ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

Una vez corregidos los valores de I_{cc} y V_{ca} , cada punto de la curva I-V se traslada la cantidad necesaria de acuerdo a las expresiones (4), (5), (6), y, (7).

$$I_2 = I_1 + \Delta I_{cc} \quad (4)$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V_{ca} \quad (5)$$

$$\Delta I_{cc} = I_{cc2} - I_{cc1} \quad (6)$$

$$\Delta V_{ca} = V_{ca2} - V_{ca1} \quad (7)$$

En campo, se reconoce a las **condiciones normales de operación** de los módulos PV (CON), definidas para una irradiancia de 800W/m^2 , una velocidad del viento de 1 m/s, una temperatura ambiente de 20°C , y, una temperatura de operación nominal de la célula (TONC). El TONC viene incluido en las hojas técnicas de los módulos, y, para un módulo de silicio monocristalino suele estar en torno a los 47°C .

Dado que las CON hacen referencia a la temperatura ambiente (no a la temperatura del módulo), se hace necesario relacionar ambas, a través de la expresión (8) [20]:

$$T_c = T_a + \frac{\text{NOCT}-20}{800} \cdot E \quad (8)$$



En dónde:

T_c , es la temperatura de la célula o módulo.

T_a , es la temperatura ambiente.

NOCT, es la temperatura de operación nominal de la célula.

E , es la irradiancia



CAPÍTULO 3

PLANIFICACIÓN METODOLÓGICA DE LA OBTENCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA I-V DE LA LÁMINA SOLAR POWERFILM DE 28W

3.1 INTRODUCCIÓN

Al diseñar o montar un circuito electrónico, es necesario conocer las características de trabajo de cada uno de los módulos a utilizar. Generalmente, son los fabricantes los que proporcionan esa información por medio de curvas características, tanto de potencia como de intensidad-tensión IV.

La curva IV de un módulo PV, es su característica fundamental y define el funcionamiento de éste. En este sentido, es de suma importancia el conocimiento de la característica previo el diseño de una aplicación en concreto.

En este capítulo, se describe la planificación metodológica de la obtención de la curva característica I-V de una lámina solar PowerFilm R-28.

3.2 FORMULACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA I-V DE LAS LÁMINAS SOLARES FLEXIBLES

3.2.1 Generalidades de las láminas solares PowerFilm

Los módulos solares integrados PowerFilm, se clasifican en el grupo de filmes delgados de plástico, y, están fabricados a través de un proceso patentado, que permite obtener un producto enrollable (ver Fig.3.1) [24].

En comparación con los paneles solares comunes, los filmes delgados son más flexibles y livianos, lo que los convierte en soluciones óptimas para aplicaciones portables (ver Fig.3.2 y Fig.3.3).

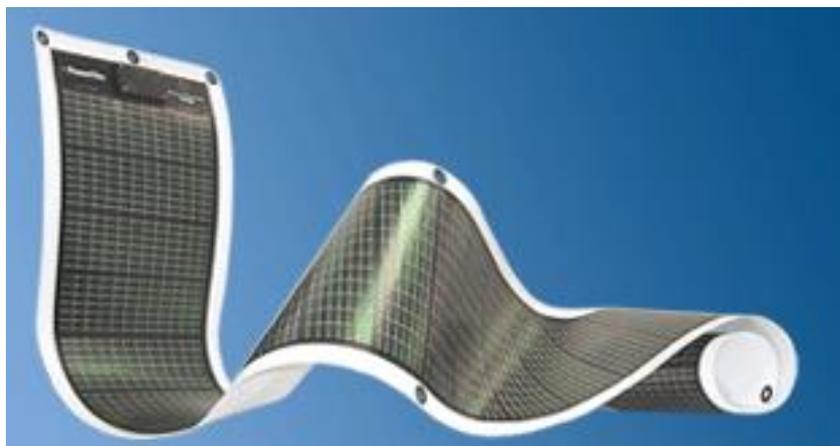


Fig.3.1. Lámina solar PowerFilm de 28W. Disponible en: <http://store.sundancesolar.com/porosepoposo.html>

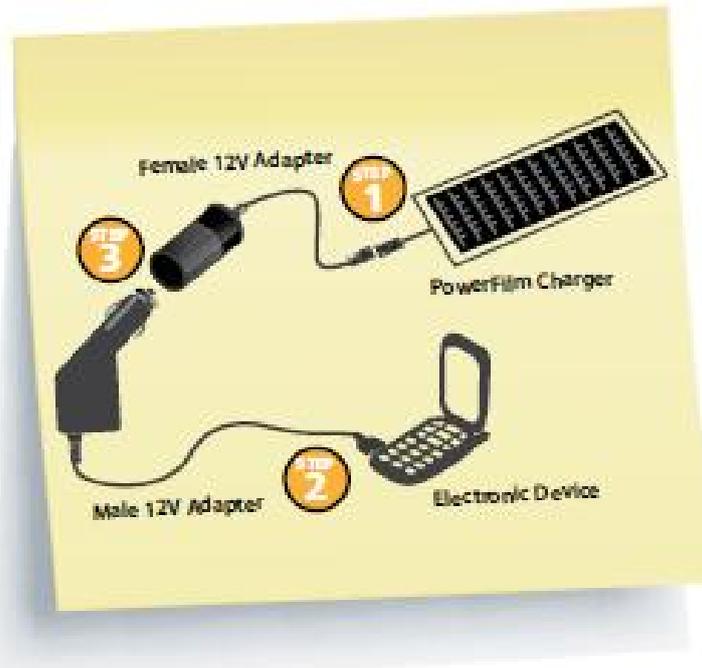


Fig.3.2. Utilización de una lámina solar delgada para provisión de energía a un dispositivo móvil celular.
 Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/73184175/PowerFilm-ProductLine-2011>

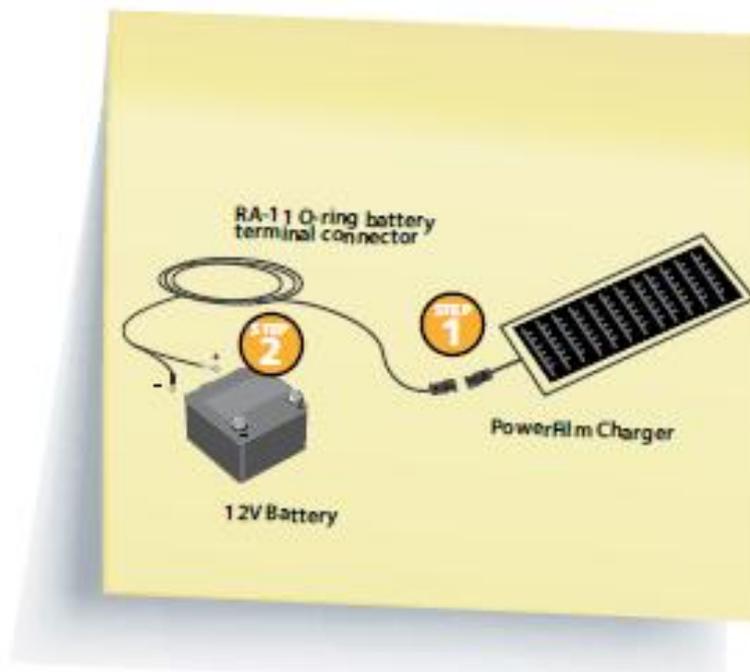


Fig.3.3. Utilización de una lámina solar delgada para provisión de energía a una batería de 12V.
 Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/73184175/PowerFilm-ProductLine-2011>

Las láminas solares delgadas se obtienen depositando una capa absorbente de luz solar, hecha de silicio amorfo, sobre un sustrato de plástico flexible (ver Fig.3.4) [25]. Las células solares individuales se aíslan mediante un proceso de trazado por láser.

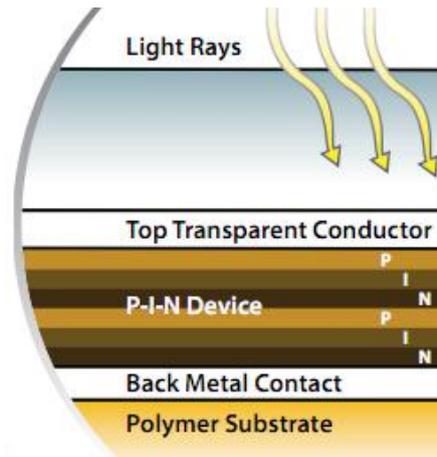


Fig.3.4. Sección transversal de una lámina solar delgada. Disponible en: http://www2.tec.ilstu.edu/students/PV_study/CD%20Final/PV%20Product%20Information/powerfilm.pdf

3.2.2 Diseño y construcción de un soporte mecánico

Por cuanto la mayor eficiencia de transformación de energía solar en eléctrica en los módulos PV, se logra para un ángulo de 90° , entre el eje de la lámina y la dirección de la radiación solar incidente, se decidió diseñar y construir un soporte mecánico que permita ajustar el ángulo de inclinación de la lámina respecto del horizonte, en función de la hora del día.

El diseño propuesto incluyó una plataforma rectangular sobre la que se asegura la lámina (ver Fig.3.5). La plataforma se desliza sobre un eje vertical y otro horizontal, para permitir regular la posición respecto al horizonte, entre 0° y 60° , valores suficientes para mantener la perpendicularidad requerida, considerando la ubicación geográfica de la estación experimental.



Fig.3.5. Modelo 3D del soporte mecánico. Elaborado en SolidWorks por la autora



Originalmente, se planteó construir la estructura en aluminio, pero al considerar la resistencia de la estructura a la influencia del viento y el costo final, se optó por una variante en hierro, cubierta de por una capa de pintura anticorrosiva para inhibir la oxidación (ver Fig.3.6).



Fig.3.6. Soporte mecánico construido para experimentación de las láminas solares PowerFilm

3.2.3 Definición del procedimiento para la adquisición de data

Los fabricantes de módulos solares caracterizan el desempeño de sus productos, a través de una serie de curvas I-V, obtenidas para distintos niveles de radiación. Como regla, los fabricantes suelen proporcionar la curva I-V para una radiación de 1000W/m^2 , como punto de referencia.

A partir de la información de la curva I-V, se puede construir curvas de potencia. Cada curva I-V, contiene un punto de máxima potencia (MPP por las siglas en inglés), en el que se representan las condiciones óptimas de operación, con el mayor rendimiento posible.

En el marco de este proyecto, se ha propuesto obtener las curvas características, a través de experimentos sencillos que emulen las condiciones en las que los fabricantes realizan esas mediciones. Se planteó conectar la lámina PowerFilm Solar R-28 a una carga variable, y, registrar los datos correspondientes a tensión e intensidad de corriente eléctrica manteniendo uniforme las condiciones de radiación y temperatura. La variación de carga y el registro de los pares (I,V) se realizó utilizando un circuito descrito en [26]. Para mantener las condiciones de radiación y temperatura,



se procuró realizar la adquisición de data a la misma hora en días secuenciales de iguales características climatológicas.

El montaje eléctrico a realizar se muestra en la Fig.3.7, así como su implementación en baquelita (Ver Fig.3.8).

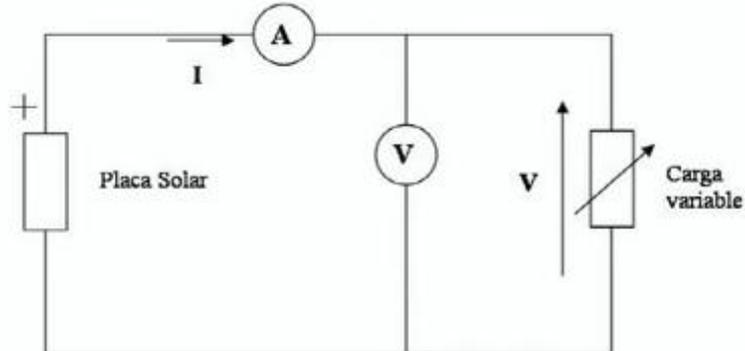


Fig.3.7. Esquema del circuito eléctrico propuesto para variación de la carga y obtención de los pares (I,V) de la curva I-V de la lámina solar. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=YIP1qFJa5tA>

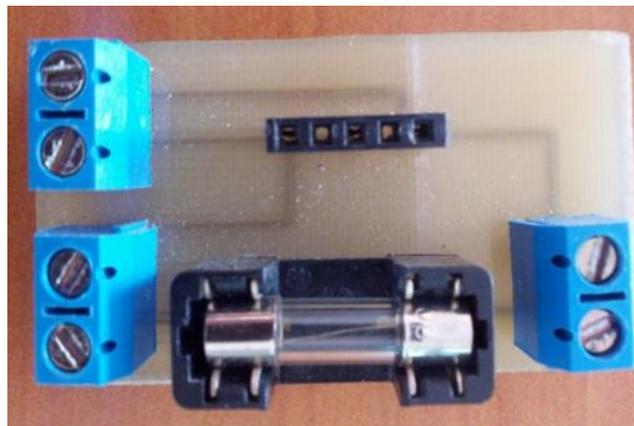
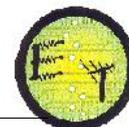


Fig.3.8. Implementación del circuito eléctrico propuesto para variación de la carga y obtención de los pares (I,V) de la curva I-V de la lámina solar

Considerando que la lámina solar proporciona una potencia de aproximadamente 20W, como carga se utilizó resistores cerámicos con una capacidad de disipación de potencia de 20W a 30W (Ver Fig.3.9).



Fig.3.9. Resistores cerámicos de alta potencia utilizados como carga para la obtención de los pares (I,V) de la curva I-V de la lámina solar



CAPÍTULO 4

OBTENCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA I-V DE LA LÁMINA SOLAR POWERFILM DE 28W Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El ángulo de inclinación óptimo para la captación de energía en una aplicación solar, es función de muchos factores, entre ellos la radiación incidente y el cielo solar [27]. Sin embargo, se puede aproximar a que el mayor rendimiento de una lámina solar se consigue cuando se forma un ángulo recto entre la lámina y el rayo de luz solar. En estas condiciones, la energía receptada por la lámina es la máxima posible, bajo las condiciones dadas. Lograr esta perpendicularidad, es importante en latitudes alejadas de la línea ecuatorial.

En este capítulo, se describe el proceso de obtención de la curva característica I-V de una lámina solar PowerFilm R-28, bajo condiciones semicontroladas de radiación solar y temperatura, para diversos ángulos de inclinación respecto a la horizontal (de 10° a 60°), en la búsqueda de compensar la posición geográfica de la ciudad de Loja. El experimento se completa con la obtención de la curva característica de una conexión en serie y otra en paralelo de dos láminas del mismo tipo, inclinadas en el ángulo considerado óptimo.

4.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA LÁMINA POWERFILM SOLAR R-28

4.2.1 Obtención de la característica IV base

Las especificaciones técnicas de la lámina solar PowerFilm R-28, se resumen en la Tabla 4.1. La obtención de la curva característica de la lámina, se realizó en función de la metodología explicada en un trabajo anterior [26]. Como primera curva, y, a manera de ensayo, se obtuvo la característica VI de la lámina con una inclinación de 20° respecto a la horizontal. El valor del ángulo se fijó de forma arbitraria. La estación montada para el experimento se muestra en la Fig.4.1.

Tabla 4.1.

Especificaciones técnicas de la lámina solar PowerFilm R-28

Parámetro	Valor
Voltaje de operación solar (V)	15,4
Corriente de operación solar (A)	1,8
Peso (lb/Kg)	1,8/0,816
Dimensiones lámina enrollada (in/mm)	4x14,5 101,6x368,3
Dimensiones lámina desenrollada (in/mm)	14,5x79,75 368,3x2025,6



Fig.4.1. Estación experimental para la obtención de la curva IV de la lámina solar, con ángulo de inclinación de 20° respecto de la horizontal

De acuerdo a la metodología, se registró valores de tensión, intensidad, y, potencia. El experimento se realizó el 5 de diciembre de 2012, entre las 11h00 y 12h00. De acuerdo a las estaciones hidrometeorológicas del Departamento de Geología y Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL, los valores de radiación solar y temperatura promedio fueron los mostrados en la Tabla 4.2. Estos valores se obtuvieron del procesamiento de una serie de valores registrados cada diez minutos, dentro de la hora de observación. La Tabla 4.3, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 4.2.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m^2]	979,57
Temperatura [$^{\circ}C$]	21,29

Tabla 4.3.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,68	2,68	7,18
4,86	2,43	11,81
7,56	2,29	17,32
9,31	2,17	20,16
10,88	2,053	22,33
12,37	1,96	24,29
13,00	1,86	24,14

**Tabla 4.3.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal. Continuación...

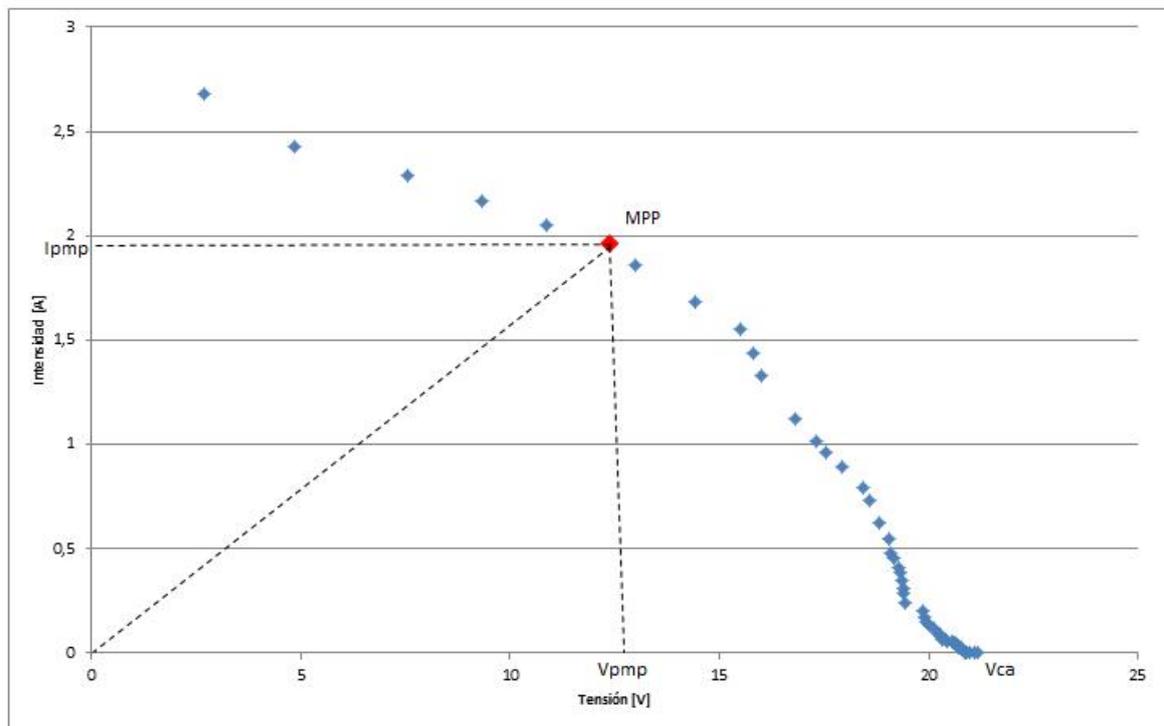
V [V]	I [A]	P [W]
14,40	1,68	24,20
15,50	1,55	24,03
15,80	1,44	22,69
16,00	1,33	21,33
16,81	1,12	18,84
17,30	1,02	17,61
17,55	0,96	16,83
17,91	0,90	16,04
18,42	0,79	14,56
18,60	0,74	13,67
18,80	0,63	11,78
19,03	0,54	10,35
19,09	0,48	9,11
19,15	0,46	8,73
19,28	0,41	7,91
19,31	0,38	7,41
19,35	0,35	6,69
19,38	0,31	6,06
19,40	0,29	5,62
19,45	0,24	4,61
19,85	0,20	3,94
19,89	0,17	3,44
19,95	0,15	2,95
20,01	0,14	2,72
20,12	0,12	2,42
20,20	0,09	1,85
20,27	0,08	1,71
20,30	0,08	1,62
20,33	0,07	1,37
20,38	0,06	1,26
20,45	0,06	1,19
20,54	0,06	1,12
20,6	0,05	0,99
20,62	0,05	0,94
20,65	0,04	0,89
20,67	0,04	0,85
20,69	0,03	0,71
20,71	0,03	0,60
20,73	0,03	0,52
20,78	0,02	0,50
20,80	0,02	0,43

**Tabla 4.3.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
20,85	0,01	0,13
20,90	0,005	0,10
20,97	0,003	0,05
21,10	0,002	0,03
21,15	0,001	0,03

Al graficar los datos, se obtuvo una curva IV semejante a la descrita en la bibliografía [20] (ver Fig.4.2). En la Tabla 4.4, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV, como la corriente de corto circuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmp}), y, la tensión el punto de máxima potencia (V_{pmp}).

**Fig.4.2.** Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 20° respecto de la horizontal**Tabla 4.4.**

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
I_{cc}	---
V_{ca}	21,15V
MPP	24,29W
I_{pmp}	1,96A
V_{pmp}	12,37V



4.2.2 Obtención de la característica IV para diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal

Con el objetivo de determinar la inclinación óptima respecto de la horizontal, se obtuvo la característica IV de la lámina en el intervalo de 10° a 60° , cada 10° (ver Fig.4.3).



Fig.4.3. Obtención de la curva IV de las láminas solares, con diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal

4.2.2.1 Característica IV para 10° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 10° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 16 de enero de 2013. La Tabla 4.5, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 4.6, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 4.5.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 10° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m^2]	1125,40
Temperatura [$^\circ\text{C}$]	23,83

Tabla 4.6.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,62	2,62	6,89
5,47	2,74	14,96



Tabla 4.6.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal. Continuación...

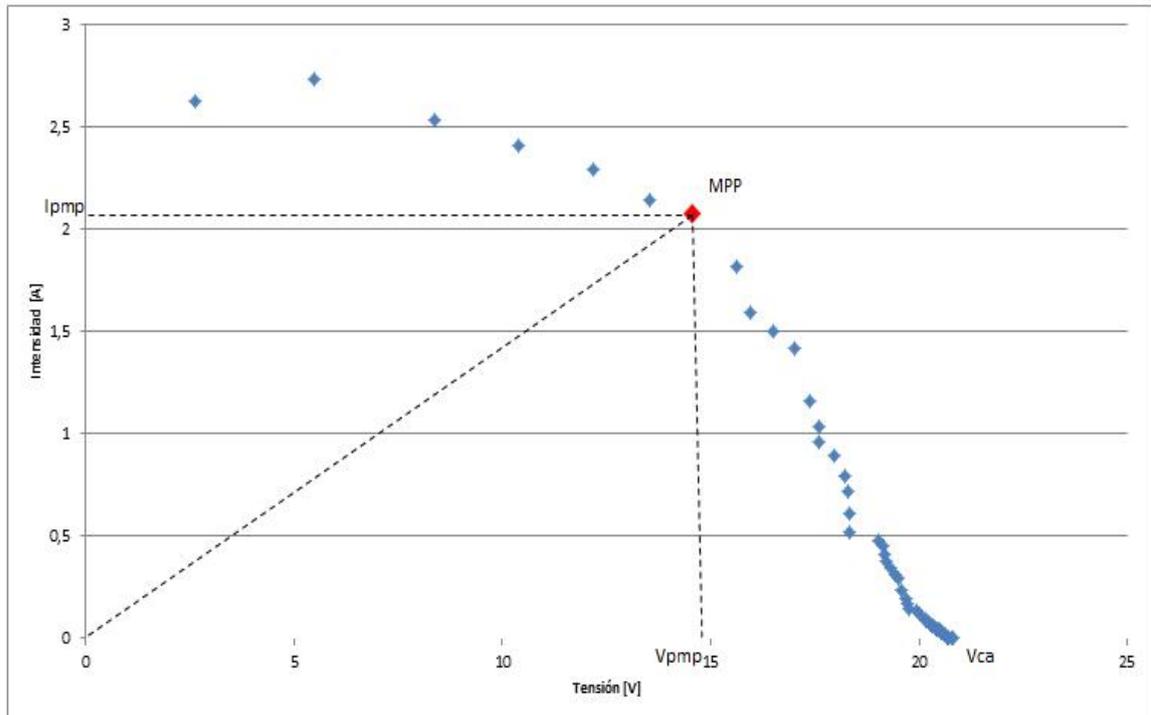
V [V]	I [A]	P [W]
8,37	2,54	21,23
10,38	2,41	25,06
12,16	2,29	27,90
13,53	2,15	29,06
14,55	2,08	30,24
15,63	1,82	28,51
15,93	1,59	25,38
6,51	1,50	24,78
17,01	1,42	24,11
17,36	1,16	20,09
17,58	1,03	18,18
17,60	0,96	16,93
17,96	0,90	16,13
18,22	0,79	14,43
18,30	0,72	13,24
18,31	0,61	11,18
18,32	0,52	9,59
19,01	0,48	9,03
19,13	0,46	8,71
19,18	0,41	7,83
19,21	0,38	7,34
19,30	0,34	6,65
19,44	0,31	6,10
19,50	0,29	5,68
19,56	0,24	4,67
19,67	0,20	3,87
19,70	0,17	3,37
19,75	0,15	2,89
19,95	0,14	2,71
20,00	0,12	2,40
20,14	0,09	1,84
20,16	0,08	1,69
20,22	0,08	1,60
20,25	0,07	1,36
20,30	0,06	1,25
20,35	0,06	1,18
20,37	0,05	1,10
20,40	0,05	0,97
20,41	0,05	0,93
20,44	0,04	0,87
20,48	0,04	0,84

**Tabla 4.6.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
20,51	0,03	0,70
20,53	0,03	0,59
20,55	0,03	0,52
20,58	0,02	0,49
20,63	0,02	0,43
20,67	0,01	0,13
20,69	0,005	0,10
20,72	0,003	0,05
20,77	0,002	0,03
20,80	0,001	0,03

La Fig.4.4 muestra la característica IV para 10° de inclinación., mientras que la Tabla 4.7, resume los parámetros definitorios de la curva.

**Fig.4.4.** Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal**Tabla 4.7.**

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,80V
MPP	30,24W
Ipmp	2,08A
Vpmp	14,55V



4.2.2.2 Característica IV para 20° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 20° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 17 de enero de 2013. La Tabla 4.8, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 4.9, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 4.8.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1073,40
Temperatura [°C]	23,46

Tabla 4.9.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,98	2,98	8,91
5,48	2,74	15,02
7,91	2,64	20,86
10,73	2,50	26,78
12,11	2,28	27,67
13,49	2,14	28,89
14,10	2,01	28,40
15,60	1,82	28,40
16,12	1,61	25,99
16,54	1,50	24,87
17,00	1,42	24,08
17,63	1,18	20,72
17,85	1,05	18,74
18,08	0,99	17,86
18,37	0,92	16,87
18,46	0,80	14,82
18,67	0,74	13,78
18,80	0,63	11,78
18,98	0,54	10,29
19,20	0,48	9,22
19,25	0,47	9,04
19,50	0,41	8,09
19,58	0,39	7,62
19,63	0,35	6,88
19,70	0,32	6,26
19,82	0,30	5,86
19,95	0,24	4,85
20,01	0,20	4,00
20,10	0,17	3,51

**Tabla 4.9.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
20,14	0,15	3,00
20,20	0,14	2,78
20,27	0,12	2,46
20,30	0,09	1,87
20,34	0,08	1,72
20,38	0,08	1,63
20,40	0,07	1,38
20,42	0,06	1,26
20,46	0,06	1,20
20,50	0,05	1,11
20,57	0,05	0,98
20,60	0,05	0,94
20,64	0,04	0,89
20,67	0,04	0,85
20,70	0,03	0,71
20,72	0,03	0,60
20,74	0,03	0,52
20,75	0,02	0,49
20,78	0,02	0,43
20,81	0,01	0,13
20,84	0,005	0,10
20,88	0,003	0,05
20,90	0,002	0,03
20,93	0,001	0,03

La Fig.4.5 muestra la característica IV para 20° de inclinación., mientras que la Tabla 4.10, resume los parámetros definitorios de la curva.

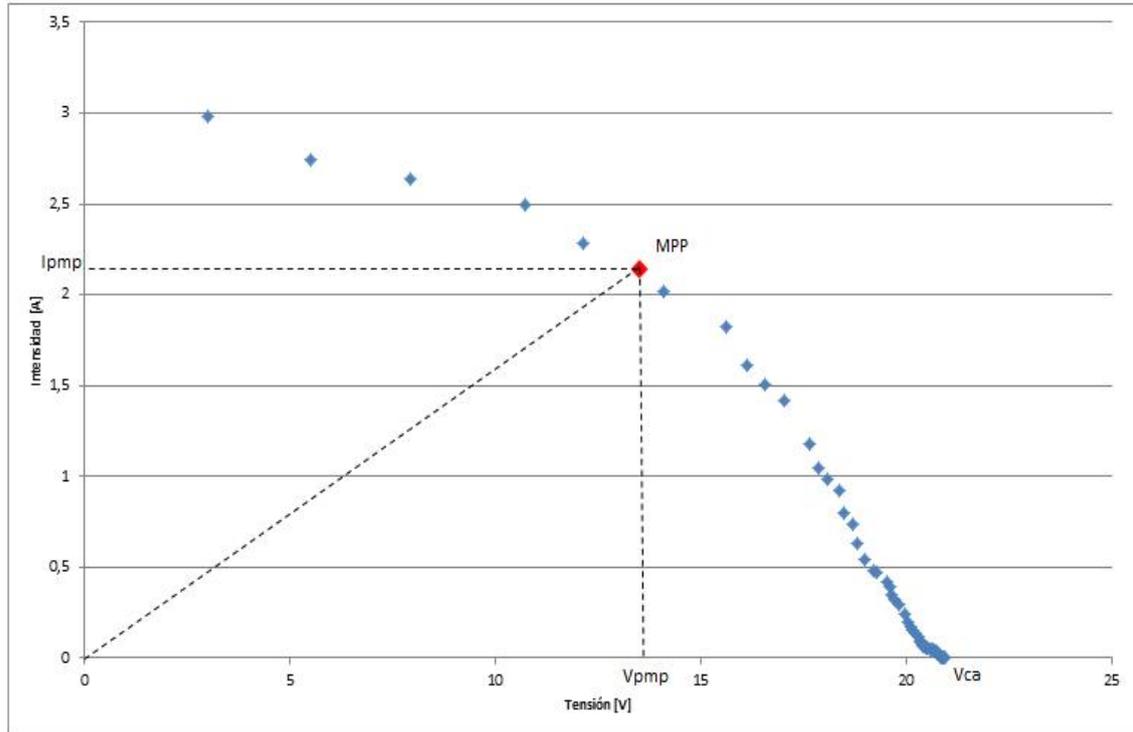


Fig.4.5. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 20° respecto de la horizontal

Tabla 4.10.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
I _{cc}	---
V _{ca}	20,93V
MPP	28,89W
I _{pmp}	2,14A
V _{pmp}	13,49V

4.2.2.3 Característica IV para 30° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 30° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 16 de enero de 2013. La Tabla 4.11, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 4.12, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 4.11.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 30° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1125,40
Temperatura [°C]	23,83

Tabla 4.12.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,60	2,60	6,76



Tabla 4.12.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal. Continuación...

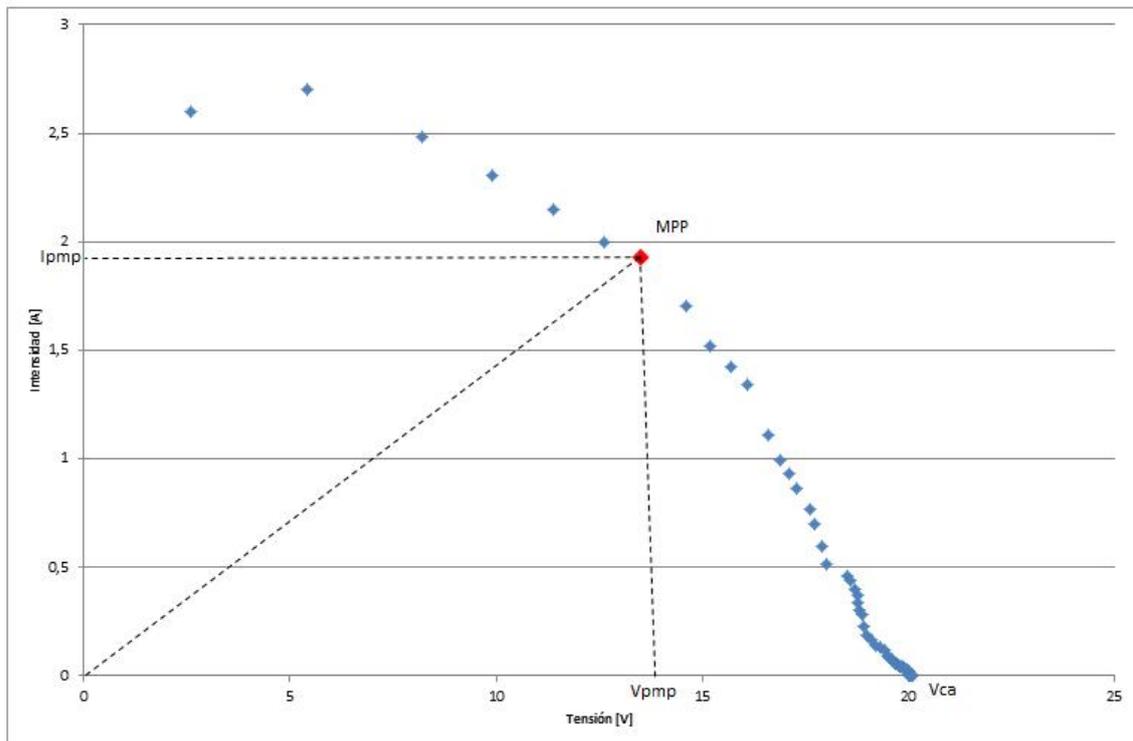
V [V]	I [A]	P [W]
5,40	2,70	14,58
8,20	2,48	20,38
9,90	2,30	22,79
11,40	2,15	24,52
12,60	2,00	25,20
13,50	1,93	26,04
14,60	1,70	24,87
15,20	1,52	23,10
15,70	1,43	22,41
16,10	1,34	21,60
16,60	1,11	18,37
16,90	0,99	16,80
17,10	0,93	15,98
17,30	0,87	14,96
17,60	0,77	13,47
17,70	0,70	12,38
17,90	0,60	10,68
18,00	0,51	9,26
18,50	0,46	8,56
18,60	0,44	8,24
18,70	0,40	7,44
18,75	0,37	6,99
18,78	0,34	6,30
18,80	0,30	5,70
18,86	0,28	5,31
18,90	0,23	4,36
19,00	0,19	3,61
19,10	0,17	3,17
19,20	0,14	2,73
19,30	0,13	2,53
19,40	0,12	2,25
19,50	0,09	1,73
19,54	0,08	1,59
19,60	0,07	1,51
19,62	0,06	1,27
19,67	0,06	1,17
19,70	0,06	1,11
19,75	0,05	1,03
19,77	0,05	0,91
19,80	0,04	0,87
19,85	0,04	0,82

**Tabla 4.12.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,88	0,04	0,79
19,90	0,03	0,66
19,95	0,03	0,55
19,97	0,02	0,49
19,98	0,02	0,46
19,99	0,02	0,40
20,00	0,01	0,12
20,01	0,004	0,09
20,04	0,003	0,05
20,08	0,001	0,03
20,10	0,001	0,03

La Fig.4.6 muestra la característica IV para 30° de inclinación., mientras que la Tabla 4.13, resume los parámetros definitorios de la curva.

**Fig.4.6.** Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 30° respecto de la horizontal**Tabla 4.13.**

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 30° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,10V
MPP	26,04W
Ipmp	1,93A
Vpmp	13,50V



4.2.2.4 Característica IV para 40° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 40° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 17 de enero de 2013. La Tabla 4.14, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 4.15, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 4.14.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 40° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1073,40
Temperatura [°C]	23,46

Tabla 4.15.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 40° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,80	2,80	7,84
5,00	2,50	12,50
7,20	2,40	17,28
9,70	2,26	21,88
110	2,08	22,83
12,50	1,98	24,80
13,00	1,86	24,14
14,40	1,68	24,20
15,00	1,50	22,50
15,50	1,41	21,84
15,80	1,32	20,80
16,80	1,12	18,82
17,30	1,02	17,61
17,50	0,96	16,73
17,70	0,89	15,66
17,90	0,78	13,93
18,10	0,72	12,95
18,40	0,61	11,29
18,60	0,53	9,88
18,70	0,47	8,74
18,80	0,46	8,62
19,00	0,40	7,68
19,10	0,38	7,25
19,20	0,34	6,58
19,28	0,31	6,00
19,30	0,29	5,56
19,33	0,24	4,56

**Tabla 4.15.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 40° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,40	0,19	3,76
19,50	0,17	3,31
19,54	0,14	2,83
19,60	0,13	2,61
19,63	0,12	2,31
19,80	0,09	1,78
19,85	0,08	1,64
19,90	0,08	1,55
19,93	0,07	1,32
19,97	0,06	1,21
20,00	0,06	1,14
20,02	0,05	1,06
20,05	0,05	0,93
20,10	0,04	0,90
20,11	0,04	0,84
20,13	0,04	0,81
20,14	0,03	0,68
20,16	0,03	0,56
20,18	0,02	0,50
20,20	0,02	0,47
20,22	0,02	0,41
20,25	0,006	0,12
20,27	0,005	0,09
20,29	0,003	0,05
20,30	0,001	0,03
20,34	0,001	0,03

La Fig.4.7 muestra la característica IV para 40° de inclinación., mientras que la Tabla 4.16, resume los parámetros definitorios de la curva.

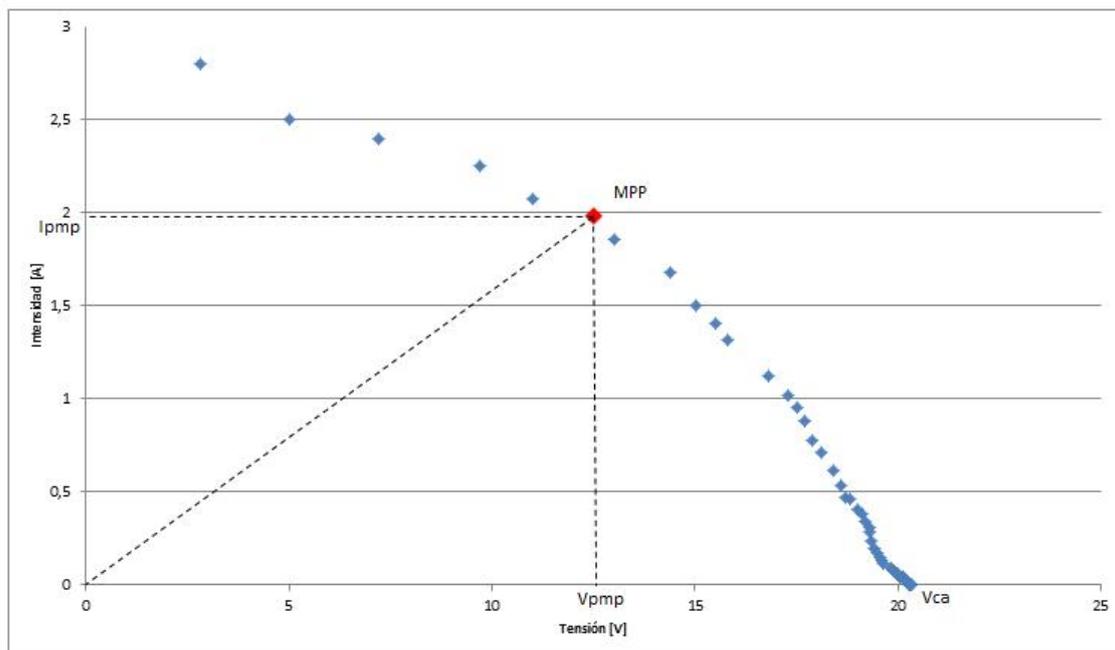


Fig.4.7. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 40° respecto de la horizontal

Tabla 4.16.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 40° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
I _{CC}	---
V _{ca}	20,34V
MPP	24,80W
I _{pmp}	1,98A
V _{pmp}	12,50V

4.2.2.5 Característica IV para 50° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 50° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 18 de enero de 2013. La Tabla 4.17, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 4.18, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 4.17.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 50° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1047,90
Temperatura [°C]	21,18

Tabla 4.18.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 50° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
1,95	1,95	3,82
3,74	1,87	6,99
5,54	1,85	10,23



Tabla 4.18.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 50° respecto de la horizontal. Continuación...

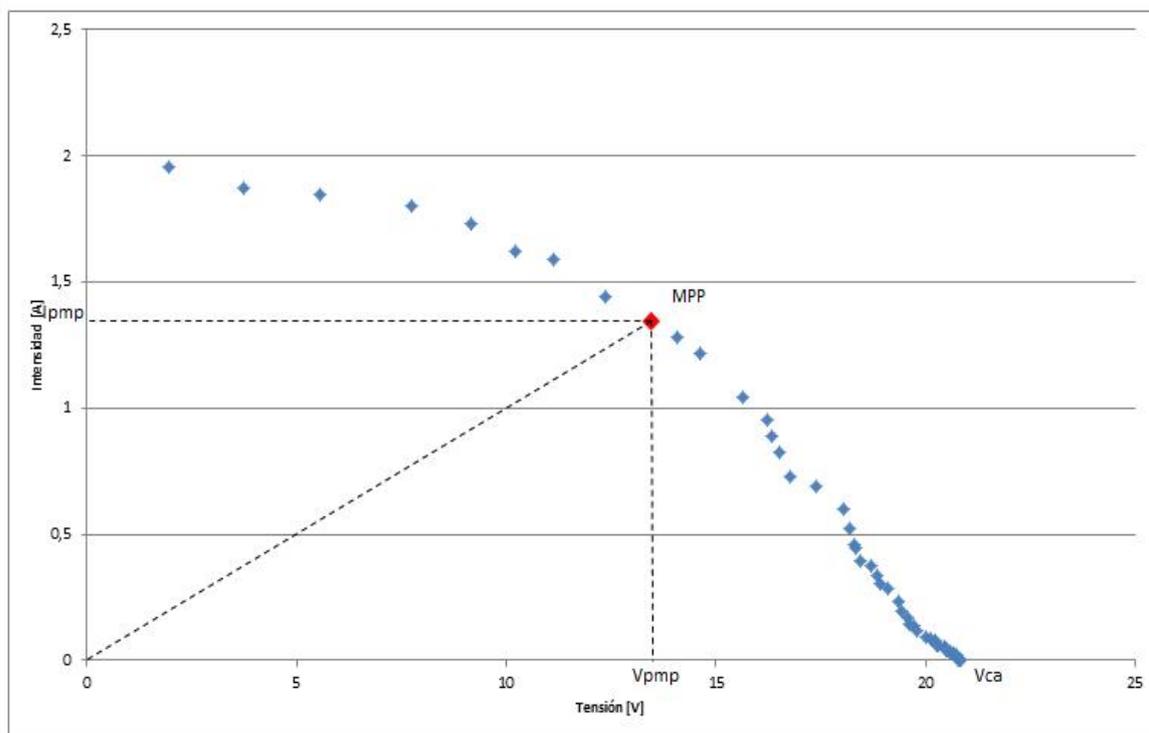
V [V]	I [A]	P [W]
7,74	1,80	13,93
9,17	1,73	15,87
10,22	1,62	16,58
11,13	1,59	17,70
12,35	1,44	17,80
13,45	1,35	18,09
14,07	1,28	18,00
14,62	1,22	17,81
15,63	1,04	16,29
16,22	0,95	15,48
16,32	0,89	14,55
16,52	0,83	13,65
16,78	0,73	12,24
17,40	0,69	11,97
18,05	0,60	10,86
18,20	0,52	9,46
18,30	0,46	8,37
18,33	0,45	8,19
18,43	0,39	7,23
18,71	0,37	6,96
18,83	0,34	6,33
18,92	0,31	5,77
19,10	0,29	5,44
19,36	0,24	4,57
19,42	0,19	3,77
19,55	0,17	3,32
19,61	0,15	2,85
19,70	0,13	2,64
19,78	0,12	2,34
20,00	0,09	1,82
20,10	0,08	1,68
20,22	0,08	1,60
20,25	0,07	1,36
20,27	0,06	1,25
20,30	0,06	1,18
20,44	0,05	1,11
20,46	0,05	0,97
20,47	0,05	0,93
20,49	0,04	0,87
20,53	0,04	0,84
20,58	0,03	0,71

**Tabla 4.18.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 50° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
20,60	0,03	0,59
20,65	0,03	0,52
20,70	0,02	0,49
20,73	0,02	0,43
20,75	0,01	0,13
20,76	0,004	0,10
20,79	0,003	0,05
20,81	0,002	0,03
20,83	0,001	0,03

La Fig.4.8 muestra la característica IV para 50° de inclinación., mientras que la Tabla 4.19, resume los parámetros definitorios de la curva.

**Fig.4.8.** Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 50° respecto de la horizontal**Tabla 4.19.**

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 50° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,83V
MPP	18,09W
Ipmp	1,35A
Vpmp	13,45V



4.2.2.6 Característica IV para 60° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 60° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 18 de enero de 2013. La Tabla 4.20, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 4.21, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 4.20.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 60° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m^2]	1047,90
Temperatura [$^{\circ}C$]	21,18

Tabla 4.21.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 60° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
1,60	1,60	2,56
3,20	1,60	5,12
4,78	1,59	7,62
6,84	1,59	10,88
8,27	1,56	12,90
9,44	1,50	14,15
10,20	1,46	14,86
11,72	1,37	16,03
12,63	1,26	15,95
13,50	1,23	16,57
14,00	1,17	16,33
15,30	1,02	15,61
16,00	0,94	15,06
16,30	0,89	14,52
16,50	0,83	13,61
16,70	0,73	12,13
17,40	0,69	11,97
17,80	0,59	10,56
18,10	0,51	9,36
18,70	0,47	8,74
18,90	0,46	8,71
19,20	0,41	7,84
19,23	0,38	7,35
19,28	0,34	6,64
19,30	0,31	6,01
19,60	0,29	5,73
19,70	0,24	4,73
19,75	0,20	3,90
19,80	0,17	3,41

**Tabla 4.21.**

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 60° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,84	0,15	2,92
19,90	0,14	2,69
19,98	0,12	2,39
20,10	0,09	1,84
20,20	0,08	1,70
20,22	0,08	1,60
20,27	0,07	1,36
20,30	0,06	1,25
20,35	0,06	1,18
20,40	0,05	1,10
20,44	0,05	0,97
20,47	0,05	0,93
20,50	0,04	0,88
20,60	0,04	0,85
20,63	0,03	0,71
20,68	0,03	0,59
20,70	0,03	0,52
20,75	0,02	0,49
20,80	0,02	0,43
20,86	0,01	0,13
20,80	0,005	0,10
20,83	0,003	0,05
20,86	0,002	0,03
20,90	0,001	0,03

La Fig.4.9 muestra la característica IV para 10° de inclinación., mientras que la Tabla 4.22, resume los parámetros definitorios de la curva.

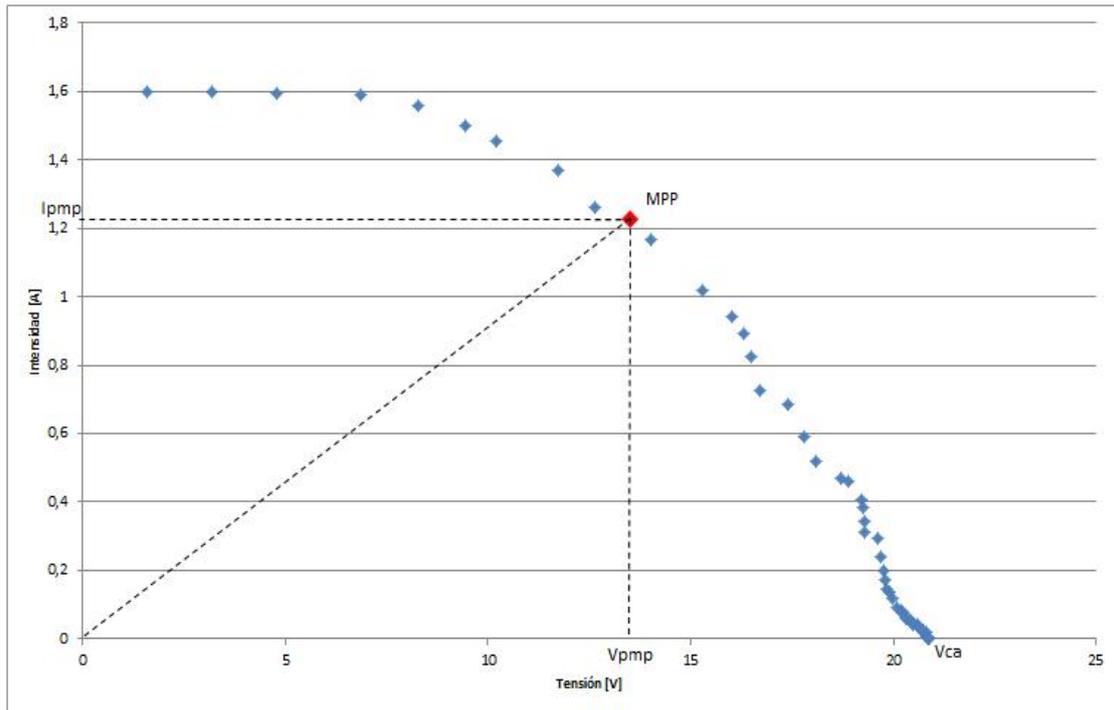


Fig.4.9. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 60° respecto de la horizontal

Tabla 4.22.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 60° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,90V
MPP	16,57W
Ipmp	1,23A
Vpmp	13,50V

4.2.2.7 Análisis de resultados

La selección del ángulo óptimo de inclinación respecto de la horizontal, se basa en la comparación de las características IV obtenidas. El papel más importante en la comparación la tiene el valor de MPP, que representa el par I-V óptimo de operación. La Fig.4.10, muestra las seis características IV obtenidas, en un sistema común de coordenadas. La Tabla 4.23 resume los valores de MPP obtenidos en los experimentos. El mejor resultado, se obtuvo para una inclinación de 10° respecto de la horizontal.

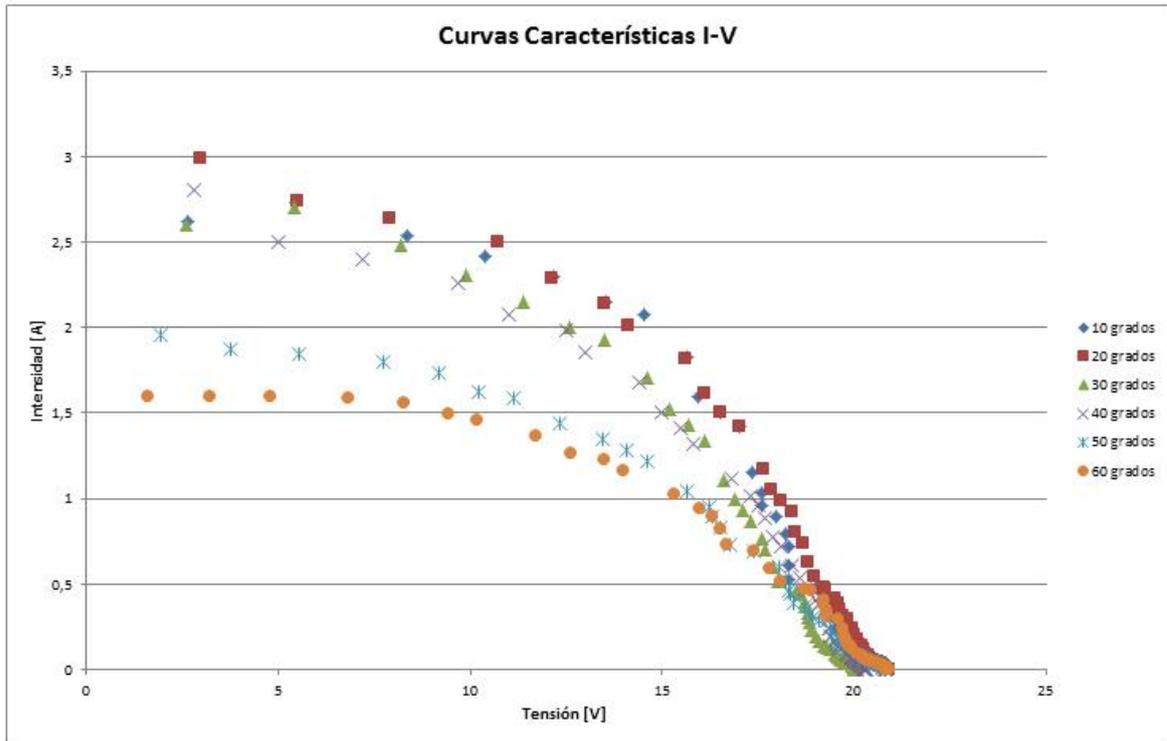


Fig.4.10. Curvas IV de la lámina solar, obtenidas con diferentes ángulos de inclinación respecto de la horizontal, en el intervalo de 10 a 60 grados

Tabla 4.23.

Tabla resumen de los valores de MPP de las curvas I-V obtenidas para diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal

Ángulo de inclinación	MPP
10°	30,24W
20°	28,89W
30°	26,04W
40°	24,80W
50°	18,09W
60°	16,57W

4.3 CURVA CARACTERÍSTICA IV PARA CONEXIONES DE LÁMINAS SOLARES POWERFILM R-28, EN SERIE Y EN PARALELO

El conocimiento de la performance de las láminas solares, se complementó con la obtención de la curva IV para una conexión de dos láminas en serie, y, otra en paralelo. El ángulo de inclinación se fijó en 10° respecto de la horizontal.

Debido a la variabilidad del clima en las fechas programadas para los experimentos, se decidió realizar éstos en el valle de Catamayo, cercano a la ciudad de Loja. La data se obtuvo el 15 de marzo de 2013, entre las 10h30 y las 13h30. La Tabla 4.24, resume las condiciones meteorológicas promedio en la zona, de acuerdo al Atlas Solar Ecuatoriano editado por el MEER [28]. Como primer experimento programado, se obtuvo la característica IV de una única lámina solar. La Tabla 4.25, muestra los resultados obtenidos, semejantes a los obtenidos en la ciudad de Loja. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

**Tabla 4.24.**

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	4500
Temperatura [°C]	29

Tabla 4.25.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

V [V]	I [A]	P [W]
2,62	2,62	6,86
4,87	2,44	11,86
7,07	2,36	16,66
9,46	2,20	20,81
11,20	2,11	23,67
12,61	2,00	25,24
13,42	1,92	25,73
14,51	1,69	24,57
15,15	1,52	22,95
15,67	1,42	22,32
16,10	1,34	21,60
16,89	1,13	19,02
17,20	1,01	17,40
17,50	0,96	16,73
17,88	0,89	15,98
18,23	0,78	14,26
18,48	0,73	13,50
18,62	0,62	11,56
18,78	0,54	10,08
18,81	0,47	8,85
18,83	0,46	8,65
18,87	0,40	7,58
18,96	0,38	7,19
19,08	0,34	6,50
19,10	0,31	5,88
19,22	0,29	5,51
19,43	0,24	4,60
19,67	0,20	3,87
19,80	0,17	3,41
19,90	0,15	2,93
19,94	0,14	2,70
19,96	0,12	2,39
20,00	0,09	1,82
20,07	0,08	1,68
20,12	0,08	1,59



Tabla 4.25.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
20,20	0,07	1,35
20,25	0,06	1,24
20,27	0,06	1,17
20,38	0,05	1,10
20,45	0,05	0,97
20,49	0,05	0,93
20,50	0,04	0,88
20,52	0,04	0,84
20,55	0,03	0,70
20,58	0,03	0,59
20,59	0,03	0,52
20,60	0,02	0,49
20,61	0,02	0,42
20,62	0,01	0,13
20,65	0,004	0,08
20,67	0,003	0,05
20,69	0,002	0,03
20,70	0,001	0,03

Al graficar los datos, se obtuvo la curva IV que se muestra en la Fig.4.11. En la Tabla 4.26, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV, como la corriente de corto circuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmp}), y, la tensión el punto de máxima potencia (V_{pmp}).

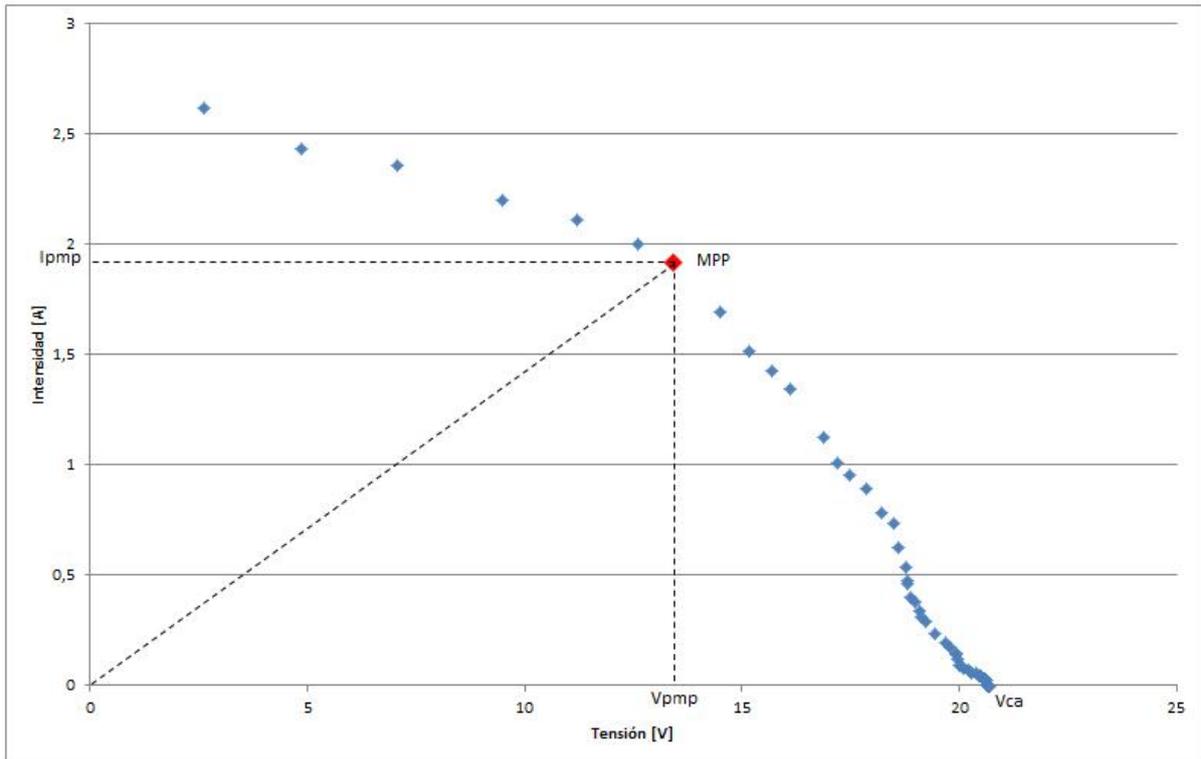


Fig.4.11. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

Tabla 4.26.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

Parámetro	Valor
I _{cc}	---
V _{ca}	20,70V
MPP	25,73W
I _{pmp}	1,92A
V _{pmp}	13,42V

4.3.1 Curva IV de una conexión de láminas solares en serie

Como segundo experimento se programó la obtención de la curva IV de una conexión en serie de dos láminas solares. La Fig.4.12 muestra el esquema de conexión de las láminas solares. La Tabla 4.27 resume los resultados obtenidos para la curva IV.

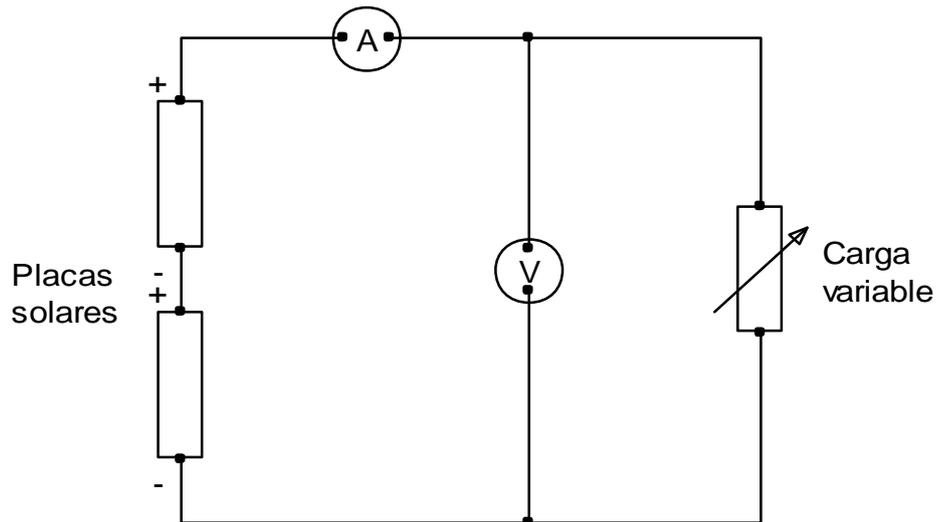


Fig.4.12. Esquema de conexión en serie de las láminas solares

Tabla 4.27.

Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28 conectadas en serie, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

V [V]	I [A]	P [W]
2,98	2,98	8,88
5,38	2,69	14,47
7,84	2,61	20,49
10,91	2,54	27,68
12,90	2,43	31,40
14,90	2,37	35,24
16,23	2,32	37,63
18,88	2,20	41,59
20,84	2,08	43,43
22,26	2,02	45,05
23,67	1,97	46,69
26,50	1,77	46,82
27,65	1,63	44,97
28,40	1,55	44,07
29,12	1,46	42,40
30,23	1,31	39,73
31,29	1,24	38,70
32,11	1,07	34,37
32,72	0,93	30,59
33,91	0,85	28,75
34,29	0,84	28,68
34,94	0,74	25,97
35,00	0,70	24,50
35,18	0,63	22,10
35,21	0,57	20,00
35,31	0,53	18,61
36,06	0,44	15,86



Tabla 4.27.

Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28 conectadas en serie, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
37,00	0,37	13,69
37,20	0,32	12,03
37,40	0,28	10,36
37,50	0,26	9,57
37,60	0,23	8,47
38,20	0,17	6,63
38,35	0,16	6,13
38,37	0,15	5,77
38,39	0,13	4,88
38,40	0,12	4,47
38,42	0,11	4,22
38,50	0,10	3,93
38,57	0,09	3,46
38,72	0,09	3,33
38,93	0,08	3,16
38,98	0,08	3,04
39,17	0,07	2,56
39,27	0,05	2,14
39,38	0,05	1,89
39,43	0,05	1,79
39,50	0,04	1,56
39,57	0,01	0,47
39,88	0,007	0,28
40,15	0,005	0,20
40,60	0,003	0,12
40,80	0,003	0,12

Al graficar los datos, se obtuvo la curva IV que se muestra en la Fig.4.13. En la Tabla 4.28, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV.

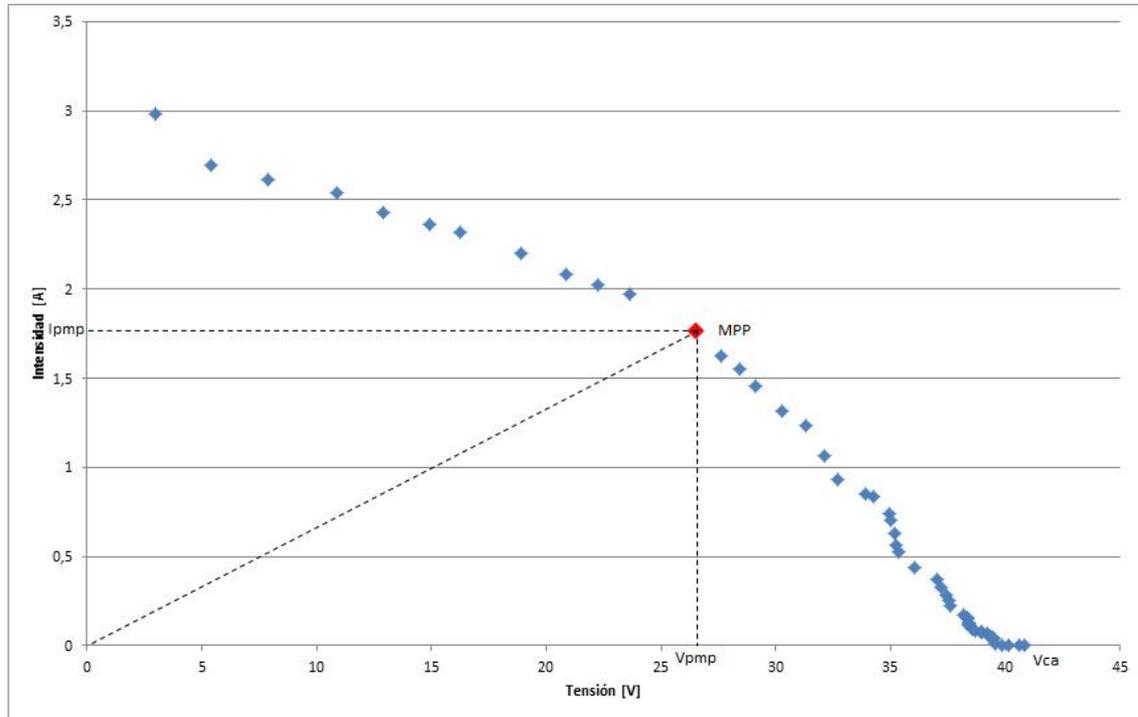


Fig.4.13. Curva IV de dos láminas solares, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en serie, en el valle de Catamayo

Tabla 4.28.

Parámetros definitorios de la característica I-V de dos láminas solares PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en serie, en el valle de Catamayo

Parámetro	Valor
I _{cc}	---
V _{ca}	40,80V
MPP	46,82W
I _{pmp}	1,77A
V _{pmp}	26,50V

La curva IV de la conexión en serie de dos láminas solares mostró un incremento en el valor de V_{ca}. Este voltaje se duplicó respecto al observado en la característica IV de una sola lámina. La intensidad de corriente se mantuvo constante.

4.3.2 Curva IV de una conexión de láminas solares en paralelo

Como tercer experimento se programó la obtención de la curva IV de una conexión en paralelo de dos láminas solares. La Fig.4.14 muestra el esquema de conexión de las láminas solares. La Tabla 4.29 resume los resultados obtenidos para la curva IV.

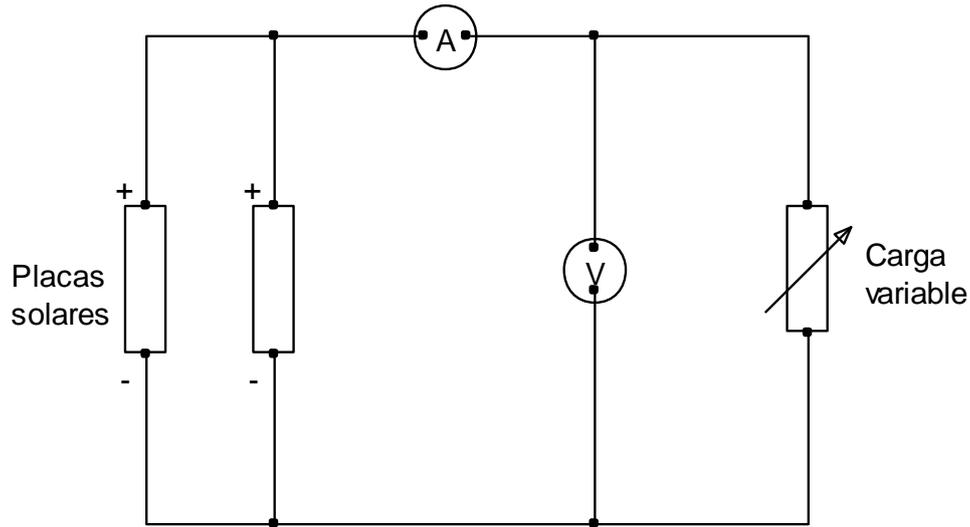


Fig.4.14. Esquema de conexión en paralelo de las láminas solares

Tabla 4.29.

Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo

V [V]	I [A]	P [W]
4,70	4,70	22,09
8,51	4,26	36,21
11,56	3,85	44,54
14,05	3,27	45,91
15,02	2,83	42,57
15,80	2,51	39,63
16,10	2,30	37,03
16,81	1,96	32,97
17,05	1,71	29,07
17,21	1,56	26,93
17,55	1,46	25,67
17,89	1,19	21,34
18,09	1,06	19,25
18,30	1,00	18,30
18,32	0,92	16,78
18,50	0,79	14,69
18,67	0,74	13,78
18,71	0,62	11,67
18,75	0,54	10,04
18,84	0,47	8,87
18,94	0,46	8,75
18,97	0,40	7,66
19,14	0,38	7,33
19,17	0,34	6,56
19,18	0,31	5,93
19,21	0,29	5,51
19,33	0,24	4,56

**Tabla 4.29.**

Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,42	0,19	3,77
19,45	0,17	3,29
19,47	0,14	2,81
19,53	0,13	2,59
19,54	0,12	2,29
19,75	0,09	1,77
19,76	0,08	1,63
19,80	0,08	1,54
19,82	0,07	1,30
19,83	0,06	1,19
19,84	0,06	1,12
19,87	0,05	1,05
19,89	0,05	0,92
19,90	0,04	0,88
19,92	0,04	0,83
19,95	0,04	0,80
19,98	0,03	0,67
19,99	0,03	0,56
20,01	0,02	0,49
20,18	0,02	0,47
20,27	0,02	0,41
20,35	0,01	0,13
20,48	0,004	0,07
20,52	0,003	0,05
20,57	0,002	0,03
20,60	0,001	0,03

Al graficar los datos, se obtuvo la curva IV que se muestra en la Fig.4.15. En la Tabla 4.30, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV.

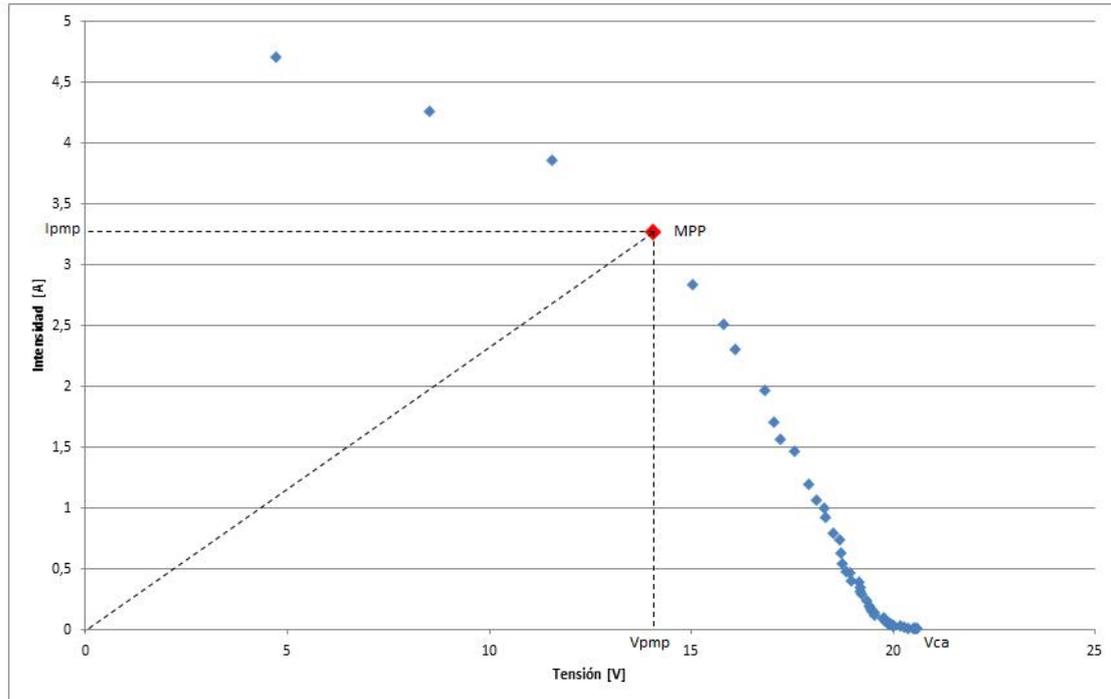


Fig.4.15. Curva IV de dos láminas solares, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo

Tabla 4.30.

Parámetros definitorios de la característica I-V de dos láminas solares PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,60V
MPP	45,91W
Ipmp	3,27A
Vpmp	14,05V

La curva IV de la conexión en paralelo de dos láminas solares mostró un incremento en la intensidad de corriente. Esta alcanzó el doble del valor obtenido con una sola lámina. La tensión se mantuvo constante.



TRABAJOS FUTUROS

Conocida la curva IV de una lámina solar, es posible determinar la potencia óptima, y, a partir de ella diseñar sistemas potenciados por energía solar de alto desempeño. En trabajos futuros, la sección de energía y electrónica del DCCE, impulsará proyectos que apunten a desarrollar aplicaciones portables potenciadas por energía solar.



CONCLUSIONES

- El Sol es el origen de todas las formas de energía que el ser humano ha utilizado a lo largo de la historia, incluyendo la llamada energía solar que puede aprovecharse directamente, o bien ser convertida a otra forma.
- El calor se captura mediante captadores o colectores térmicos (energía solar térmica), la electricidad a través de módulos fotovoltaicos (energía solar fotovoltaica), y, la luz para iluminación a través de inyectores solares.
- La conversión fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, es decir en la conversión de la energía proveniente del Sol en energía eléctrica. Esta conversión se realiza en las denominadas células solares, que conectadas en serie o en paralelo, suministran la tensión y la corriente requeridas por las demanda.
- Las células solares de primera generación, se introdujeron comercialmente a principios de 1980, y, aún se usan.
- La segunda generación de tecnología solar, se inició a finales de los años 1990 con la introducción de la tecnología de láminas delgadas, que se construyen apilando capas muy finas de diferentes materiales semiconductores.
- La tercera generación de tecnología solar, también se construye a base de láminas delgadas, pero obvia las dificultades de la segunda generación.
- Se prevé que, una cuarta generación de células solares, unirá nanopartículas con polímeros, para lograr células más eficientes y baratas.
- La reducción de peso y el aumento de flexibilidad de la tecnología solar de segunda y tercera generación, amplió la oferta de aplicaciones, desde los tradicionales sistemas fotovoltaicos de estado sólido a aplicaciones portables.
- El prototipo de la nueva generación de dispositivos fotovoltaicos, es la célula solar sensibilizada con colorante dye solar cell (DSC), desarrollada en 1988 por Michael Grätzel del EPFL, en Suiza.
- En una célula de Grätzel se logra la absorción óptica y la separación de carga, asociando un sensibilizador (como material absorbedor de luz), y, un semiconductor de ancha banda prohibida (gap) de morfología nanocrystalina.
- Las células de Grätzel pueden construirse empleando sustratos flexibles, por lo que serán ampliamente utilizados en dispositivos domésticos, aplicaciones decorativas o arquitectónicas, etc.
- El desempeño de un módulo PV se caracteriza a través de su curva característica, o, curva corriente tensión I-V que representa las posibles combinaciones de I y V, bajo condiciones de radiación solar incidente y temperatura ambiente acordes con lo establecido por estándares internacionalmente aceptados.
- Un módulo PV (conformado por una sola celda) puede ser representado como una fuente de corriente, cuyo valor depende de la radiación incidente.
- La presencia de una juntura p-n en la celda solar, puede modelarse como un diodo conectado en paralelo con la fuente de corriente, el mismo que es el responsable de la tensión generada por la celda, que cambia ante la variación de la carga.
- El modelo de la celda puede ser mejorado, considerando que en la celda se presentan pérdidas en forma de calor, y, que el diodo de la juntura no debe ser considerado ideal.



- Generalmente, las células dentro del módulo PV se asocian en serie, con el fin de obtener valores de voltaje óptimos para la conexión a distintas cargas. El voltaje total del módulo dependerá, entonces, del número de células asociadas en serie. Mientras tanto, la corriente obtenida del módulo PV depende básicamente del tipo y tamaño de las células, suponiendo que no hay células conectadas en paralelo en el interior del módulo.
- El V_{ca} varía en función de los niveles de radiación incidente. Para niveles bajos de radiación, V_{ca} cae bruscamente. La I_{cc} y la P_{max} , cambian casi proporcionalmente con la variación del nivel de radiación solar incidente.
- Las celdas solares poseen un coeficiente de temperatura inverso para el V_{ca} , básicamente debido a las características de la juntura p-n. Esto provoca que tanto V_{ca} como V_{pmp} , se reduzcan notoriamente, de forma proporcional, al aumentar la temperatura de la celda. La I_{cc} varía de manera proporcional con la temperatura, pero esta variación es tan pequeña, que se puede considerar la I_{cc} como constante ante variaciones de temperatura en un amplio rango.
- Dependiendo de la hora y de la época del año, el espectro de luz solar presenta desviaciones respecto al espectro estándar en la superficie terrestre.
- El conocimiento de la respuesta, de la característica IV, de un módulo PV, es necesario para comparar calidad, eficacia, y, estabilidad eléctrica. Esta característica se obtiene conectando el módulo a un resistor cuya resistencia varía entre cero e infinito, mientras se registra los valores I y V , bajo *condiciones específicas CEM o STC*.
- Estas condiciones son de uso generalizado y universal, y, prevén una irradiancia de $1000W/m^2$, una distribución espectral equivalente a AM 1.5G, con una incidencia normal, y, a una temperatura de la célula de $25^{\circ}C$ (normas E490, G159, y, G173 de la Comisión Eléctrica Internacional, relacionadas a dispositivos fotovoltaicos).
- Los módulos solares integrados PowerFilm, se clasifican en el grupo de filmes delgados de plástico más flexibles y livianos, lo que los convierte en soluciones óptimas para aplicaciones portables.
- Las láminas solares delgadas se obtienen depositando una capa de silicio amorfo absorbente de luz solar, sobre un sustrato de plástico flexible. Las células solares individuales se aíslan mediante un proceso de trazado por láser.
- Los fabricantes de módulos solares caracterizan el desempeño de sus productos, a través de una serie de curvas IV, obtenidas para distintos niveles de radiación, a partir de esta información se puede construir curvas de potencia. Cada curva IV, contiene un punto de máxima potencia (MPP por las siglas en inglés), en el que se representan las condiciones óptimas de operación, con el mayor rendimiento posible.
- En el marco de este proyecto, se planteó conectar la lámina PowerFilm Solar R-28 a una carga variable, y, registrar los datos correspondientes a tensión e intensidad de corriente eléctrica manteniendo uniforme las condiciones de radiación y temperatura, al procurar la adquisición de data a la misma hora en días secuenciales, de iguales características climatológicas.
- Un soporte mecánico permitió ajustar el ángulo de inclinación de la lámina respecto del horizonte, en función de la hora del día, para formar un ángulo de 90° , entre el eje de la lámina y la dirección de la radiación solar incidente.



- Considerando que la lámina solar proporciona una potencia de aproximadamente 20W, como carga se utilizó resistores cerámicos con una capacidad de disipación de potencia de 20W a 30W.
- Los resultados muestran la aplicabilidad de la metodología propuesta para la obtención de la curva característica IV de la lámina solar.
- Para determinar la inclinación óptima respecto de la horizontal, se obtuvo la característica IV de la lámina en el intervalo de 10° a 60°, cada 10°. La selección del ángulo óptimo de inclinación se basó en la comparación de las características obtenidas. El mejor resultado, se obtuvo para una inclinación de 10° respecto de la horizontal.
- Debido a la variabilidad del clima en las fechas programadas para los experimentos, se decidió continuar con la programación en el valle de Catamayo, cercano a la ciudad de Loja, logrando resultados semejantes a los obtenidos en la ciudad de Loja.
- La curva IV de la conexión en serie de dos láminas solares mostró un incremento en el valor de V_{ca} . Este voltaje se duplicó respecto al observado en la característica IV de una sola lámina. La intensidad de corriente se mantuvo constante.
- La curva IV de la conexión en paralelo de dos láminas solares mostró un incremento en la intensidad de corriente. Esta alcanzó el doble del valor obtenido con una sola lámina. La tensión se mantuvo constante.

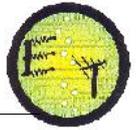


REFERENCIAS

- [1] Oñate, D. “Cálculo de sistemas fotovoltaicos”. [Online]. Disponible en: <<http://www.diegonate.es>> [Consulta marzode2012].
- [2] Centro de Estudios de la Energía Solar. “La Energía Solar”. [Online]. Disponible en: <<http://www.censolar.es/menu2.htm>> [Consulta mayo de 2012].
- [3] No se reconoce autor. “Energía Solar Fotovoltaica”. [Online]. Disponible en: <<http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/energia-solar-fotovoltaica.html>> [Consulta mayo de 2012].
- [4] Gonzales Arias, A. “Celdas Solares”. [Online]. Disponible en: <<http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vida%20y%20tierra/celdasolar/index.htm>> [Consulta mayo de 2012].
- [5] No se reconoce autor. “Paneles solares: así evolucionan”. [Online]. Disponible en: <http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/10/15/188572.php> [Consulta mayo de 2012].
- [6] Dazne, A. “Láminas Solares”[Online]. Disponible en: <<http://blog.is-arquitectura.es/2007/03/13/laminas-solares/>> [Consulta mayo de 2012].
- [7] Terra. “Energía Solar Fotovoltaica” [Online]. Disponible en: <<http://www.terra.org/articulos/art02211.html>> [Consulta junio de 2012].
- [8] Tu Cargador Solar. “Cargador Solar Universal 5000” [Online]. Disponible en: <<http://www.tucargadorsolar.com/Universales/Cargador-Solar-Universal-5000.html>> [Consulta junio de 2012].
- [9] Soliclíma, energía solar. “Energía Solar” [Online]. Disponible en: <<http://news.soliclíma.com/noticias/energia-solar/sale-al-mercado-un-cargador-solar-y-eolico-portatil>> [Consulta junio de 2012].
- [10] Tu Cargador Solar. “Ventilador Solar Portátil” [Online]. Disponible en: <<http://www.tucargadorsolar.com/Productos-Solares/Ventilador-Solar-Portatil.html>> [Consulta junio de 2012].
- [11] Ison21. “Solarise, luz portable con energía solar” [Online]. Disponible en: <<http://www.ison21.es/2012/05/12/solarise-luz-portable-con-energia-solar/>> [Consulta junio de 2012].
- [12] Tu Cargador Solar. “Linterna Solar Completa” [Online]. Disponible en: <<http://www.tucargadorsolar.com/Linternas-Solares/Linterna-Solar-Completa.html>> [Consulta junio de 2012].
- [13] HOPE. “Células solares de colorante (Dye Solar Cells)”[Online]. Disponible en: <<http://www.consoliderhope.uji.es/celulaGraztel.php>> [Consulta junio de 2012].
- [14] DYESOL. “DSC Applications” [Online]. Disponible en: <<http://www.dyesol.com/index.php?page=DSC+Applications>> [Consulta junio de 2012].



- [15] DForceSolar. "Celda Solar Tintada con nuevo Record de Eficiencia" [Online]. Disponible en: <<http://www.dforcesolar.com/energia-solar/celda-solar-tintada-con-nuevo-record-de-eficiencia/>> [Consulta junio de 2012].
- [16] Scribd. "Células Solares de Semiconductores Orgánicos Traslúcidos" [Online]. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/77609288/CELULAS-SOLARES-CON-SEMICONDUCTORES-ORGANICOS>> [Consulta julio de 2012].
- [17] Peña, L. "Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones" [Online]. Disponible en: <<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1869/1/pfm271.pdf>> [Consulta julio de 2012].
- [18] Bisquert, J. "Células solares de titanio nanoestructurado sensitivizado. Alternativas para la generación fotovoltaica" [Online]. Disponible en: <<http://www.fotovoltaica.com/solarcell.pdf>> [Consulta julio de 2012].
- [19] No se reconoce autor. "Característica de Corriente-Voltaje de un Módulo Fotovoltaico". [Online]. Disponible en: <http://www.uprag.edu/uploads/ELEC/Caracteristica__Corriente.pdf> [Consulta agosto de 2012].
- [20] Fernández Ferichola, J. "Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivo Portátil" [Online]. Disponible en: <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf> [Consulta agosto de 2012].
- [21] Castillo Miranda, J. "Sistema Fotovoltaico para Aplicaciones Móviles de Tracción Eléctrica" [Online]. Disponible en: <http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf> [Consulta agosto de 2012].
- [22] Scribd. "EVE, La energía solar fotovoltaica en el País Vasco" [Online]. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/40217710/energia-solar-fotovoltaica-en-el-Pais-Vasco-EVE>> [Consulta agosto de 2012].
- [23] ASTM. "Normas de la ASTM para determinar el rendimiento fotovoltaico" [Online]. Disponible en: <<http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/Q307/q307julemery.html>> [Consulta agosto de 2012].
- [24] FLEXSOLARCELLS. "Tecnología de las Celdas Solares Enrollables". [Online]. Disponible en: <http://www.celdassolaresflexibles.com/index_files/Rollable_Series/Tech_Information_RS.php> [Consulta diciembre de 2012].
- [25] POWERFILM. "Thin Flexible Solar Panels - Thin Film Electronics". [Online]. Disponible en: <http://www2.tec.ilstu.edu/students/PV_study/CD%20Final/PV%20Product%20Information/powerfilm.pdf> [Consulta febrero de 2013]
- [26] Saiz Jimenez, J. Universidad Politécnica de Valencia "Medición de la curva tensión intensidad de una placa solar fotovoltaica" [Online]. Disponible en: <<http://www.youtube.com/watch?v=YIP1qFJa5tA>> [Consulta diciembre de 2012].



- [27] CUBASOLAR. "Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente". [Online]. Disponible en: <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar08/HTML/articulo03.htm>> [Consulta marzo de 2013].
- [28] CONELEC. "ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA". [Online]. Disponible en: <http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf> [Consulta abril de 2013].



ANEXOS



ANEXO 1

CARACTERÍSTICA IV DE LA LÁMINA SOLAR PARA VARIOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN CON RESPECTO DE LA HORIZONTAL



VALORES DE TENSIÓN, CORRIENTE Y POTENCIA PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN																	
10°			20°			30°			40°			50°			60°		
V [V]	I [A]	P [W]	V [V]	I [A]	P [W]	V [V]	I [A]	P [W]	V [V]	I [A]	P [W]	V [V]	I [A]	P [W]	V [V]	I [A]	P [W]
2,62	2,62	6,89	2,98	2,98	8,91	2,60	2,60	6,76	2,80	2,80	7,84	1,95	1,95	3,82	1,60	1,60	2,56
5,47	2,74	14,96	5,48	2,74	15,02	5,40	2,70	14,58	5,00	2,50	12,50	3,74	1,87	6,99	3,20	1,60	5,12
8,37	2,54	21,23	7,91	2,64	20,86	8,20	2,48	20,38	7,20	2,40	17,28	5,54	1,85	10,23	4,78	1,59	7,62
10,38	2,41	25,06	10,73	2,50	26,78	9,90	2,30	22,79	9,70	2,26	21,88	7,74	1,80	13,93	6,84	1,59	10,88
12,16	2,29	27,90	12,11	2,28	27,67	11,40	2,15	24,52	11,0	2,08	22,83	9,17	1,73	15,87	8,27	1,56	12,90
13,53	2,15	29,06	13,49	2,14	28,89	12,60	2,00	25,20	12,50	1,98	24,80	10,22	1,62	16,58	9,44	1,50	14,15
14,55	2,08	30,24	14,10	2,01	28,40	13,50	1,93	26,04	13,00	1,86	24,14	11,13	1,59	17,70	10,20	1,46	14,86
15,63	1,82	28,51	15,60	1,82	28,40	14,60	1,70	24,87	14,40	1,68	24,20	12,35	1,44	17,80	11,72	1,37	16,03
15,93	1,59	25,38	16,12	1,61	25,99	15,20	1,52	23,10	15,00	1,50	22,50	13,45	1,35	18,09	12,63	1,26	15,95
16,51	1,50	24,78	16,54	1,50	24,87	15,70	1,43	22,41	15,50	1,41	21,84	14,07	1,28	18,00	13,50	1,23	16,57
17,01	1,42	24,11	17,00	1,42	24,08	16,10	1,34	21,60	15,80	1,32	20,80	14,62	1,22	17,81	14,00	1,17	16,33
17,36	1,16	20,09	17,63	1,18	20,72	16,60	1,11	18,37	16,80	1,12	18,82	15,63	1,04	16,29	15,30	1,02	15,61
17,58	1,03	18,18	17,85	1,05	18,74	16,90	0,99	16,80	17,30	1,02	17,61	16,22	0,95	15,48	16,00	0,94	15,06
17,60	0,96	16,93	18,08	0,99	17,86	17,10	0,93	15,98	17,50	0,96	16,73	16,32	0,89	14,55	16,30	0,89	14,52
17,96	0,90	16,13	18,37	0,92	16,87	17,30	0,87	14,96	17,70	0,89	15,66	16,52	0,83	13,65	16,50	0,83	13,61
18,22	0,79	14,43	18,46	0,80	14,82	17,60	0,77	13,47	17,90	0,78	13,93	16,78	0,73	12,24	16,70	0,73	12,13
18,30	0,72	13,24	18,67	0,74	13,78	17,70	0,70	12,38	18,10	0,72	12,95	17,40	0,69	11,97	17,40	0,69	11,97
18,31	0,61	11,18	18,80	0,63	11,78	17,90	0,60	10,68	18,40	0,61	11,29	18,05	0,60	10,86	17,80	0,59	10,56
18,32	0,52	9,59	18,98	0,54	10,29	18,00	0,51	9,26	18,60	0,53	9,88	18,20	0,52	9,46	18,10	0,51	9,36
19,01	0,48	9,03	19,20	0,48	9,22	18,50	0,46	8,56	18,70	0,47	8,74	18,30	0,46	8,37	18,70	0,47	8,74
19,13	0,46	8,71	19,25	0,47	9,04	18,60	0,44	8,24	18,80	0,46	8,62	18,33	0,45	8,19	18,90	0,46	8,71
19,18	0,41	7,83	19,50	0,41	8,09	18,70	0,40	7,44	19,00	0,40	7,68	18,43	0,39	7,23	19,20	0,41	7,84
19,21	0,38	7,34	19,58	0,39	7,62	18,75	0,37	6,99	19,10	0,38	7,25	18,71	0,37	6,96	19,23	0,38	7,35
19,30	0,34	6,65	19,63	0,35	6,88	18,78	0,34	6,30	19,20	0,34	6,58	18,83	0,34	6,33	19,28	0,34	6,64
19,44	0,31	6,10	19,70	0,32	6,26	18,80	0,30	5,70	19,28	0,31	6,00	18,92	0,31	5,77	19,30	0,31	6,01
19,50	0,29	5,68	19,82	0,30	5,86	18,86	0,28	5,31	19,30	0,29	5,56	19,10	0,29	5,44	19,60	0,29	5,73
19,56	0,24	4,67	19,95	0,24	4,85	18,90	0,23	4,36	19,33	0,24	4,56	19,36	0,24	4,57	19,70	0,24	4,73
19,67	0,20	3,87	20,01	0,20	4,00	19,00	0,19	3,61	19,40	0,19	3,76	19,42	0,19	3,77	19,75	0,20	3,90
19,70	0,17	3,37	20,10	0,17	3,51	19,10	0,17	3,17	19,50	0,17	3,31	19,55	0,17	3,32	19,80	0,17	3,41
19,75	0,15	2,89	20,14	0,15	3,00	19,20	0,14	2,73	19,54	0,14	2,83	19,61	0,15	2,85	19,84	0,15	2,92
19,95	0,14	2,71	20,20	0,14	2,78	19,30	0,13	2,53	19,60	0,13	2,61	19,70	0,13	2,64	19,90	0,14	2,69
20,00	0,12	2,40	20,27	0,12	2,46	19,40	0,12	2,25	19,63	0,12	2,31	19,78	0,12	2,34	19,98	0,12	2,39
20,14	0,09	1,84	20,30	0,09	1,87	19,50	0,09	1,73	19,80	0,09	1,78	20,00	0,09	1,82	20,10	0,09	1,84
20,16	0,08	1,69	20,34	0,08	1,72	19,54	0,08	1,59	19,85	0,08	1,64	20,10	0,08	1,68	20,20	0,08	1,70
20,22	0,08	1,60	20,38	0,08	1,63	19,60	0,07	1,51	19,90	0,08	1,55	20,22	0,08	1,60	20,22	0,08	1,60
20,25	0,07	1,36	20,40	0,07	1,38	19,62	0,06	1,27	19,93	0,07	1,32	20,25	0,07	1,36	20,27	0,07	1,36
20,30	0,06	1,25	20,42	0,06	1,26	19,67	0,06	1,17	19,97	0,06	1,21	20,27	0,06	1,25	20,30	0,06	1,25
20,35	0,06	1,18	20,46	0,06	1,20	19,70	0,06	1,11	20,00	0,06	1,14	20,30	0,06	1,18	20,35	0,06	1,18



20,37	0,05	1,10	20,50	0,05	1,11	19,75	0,05	1,03	20,02	0,05	1,06	20,44	0,05	1,11	20,40	0,05	1,10
20,40	0,05	0,97	20,57	0,05	0,98	19,77	0,05	0,91	20,05	0,05	0,93	20,46	0,05	0,97	20,44	0,05	0,97
20,41	0,05	0,93	20,60	0,05	0,94	19,80	0,04	0,87	20,10	0,04	0,90	20,47	0,05	0,93	20,47	0,05	0,93
20,44	0,04	0,87	20,64	0,04	0,89	19,85	0,04	0,82	20,11	0,04	0,84	20,49	0,04	0,87	20,50	0,04	0,88
20,48	0,04	0,84	20,67	0,04	0,85	19,88	0,04	0,79	20,13	0,04	0,81	20,53	0,04	0,84	20,60	0,04	0,85
20,51	0,03	0,70	20,70	0,03	0,71	19,90	0,03	0,66	20,14	0,03	0,68	20,58	0,03	0,71	20,63	0,03	0,71
20,53	0,03	0,59	20,72	0,03	0,60	19,95	0,03	0,55	20,16	0,03	0,56	20,60	0,03	0,59	20,68	0,03	0,59
20,55	0,03	0,52	20,74	0,03	0,52	19,97	0,02	0,49	20,18	0,02	0,50	20,65	0,03	0,52	20,70	0,03	0,52
20,58	0,02	0,49	20,75	0,02	0,49	19,98	0,02	0,46	20,20	0,02	0,47	20,70	0,02	0,49	20,75	0,02	0,49
20,63	0,02	0,43	20,78	0,02	0,43	19,99	0,02	0,40	20,22	0,02	0,41	20,73	0,02	0,43	20,80	0,02	0,43
20,67	0,01	0,13	20,81	0,01	0,13	20,00	0,01	0,12	20,25	0,006	0,12	20,75	0,01	0,13	20,86	0,01	0,13
20,69	0,005	0,10	20,84	0,005	0,10	20,01	0,004	0,09	20,27	0,005	0,09	20,76	0,004	0,10	20,80	0,005	0,10
20,72	0,003	0,05	20,88	0,003	0,05	20,04	0,003	0,05	20,29	0,003	0,05	20,79	0,003	0,05	20,83	0,003	0,05
20,77	0,002	0,03	20,90	0,002	0,03	20,08	0,001	0,03	20,30	0,001	0,03	20,81	0,002	0,03	20,86	0,002	0,03
20,80	0,001	0,03	20,93	0,001	0,03	20,10	0,001	0,03	20,34	0,001	0,03	20,83	0,001	0,03	20,90	0,001	0,03

Vca: voltaje de circuito abierto
MPP: punto de máxima potencia



ANEXO 2

PAPER: CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LÁMINAS SOLARES

Caracterización del desempeño de láminas solares a través de la obtención de la característica IV

A. Castro, J. Jaramillo

Abstract— Se define y valida un procedimiento sencillo de implementar, para la obtención de la característica IV de una lámina solar flexible, como primer paso en el análisis del desempeño de un sistema de generación de energía basado en su utilización.

Keywords— energía renovable, energía solar, tecnología fotovoltaica, módulo PV, modelamiento del funcionamiento de un módulo PV, lámina solar, curva característica IV de una lámina solar.

I. INTRODUCCIÓN

El creciente costo económico y ambiental de los combustibles fósiles, ha promovido el desarrollo de las fuentes renovables como alternativas energéticas [1]. La energía solar es una de las fuentes de energía renovable más utilizada actualmente, sobre todo porque presenta una mayor eficiencia con respecto a otras energías como la eólica o la piezoelectricidad [2].

En los últimos años, el desarrollo de células de Grätzel permitió reducir el volumen y peso de los dispositivos de captación de energía solar, abriendo una oportunidad especial al diseño y fabricación de aplicaciones portables de provisión de energía.

En este contexto, este documento pretende definir y probar un procedimiento simple para la obtención de la característica IV de las láminas solares flexibles, como primer paso para juzgar sobre el desempeño de un sistema de generación de energía potenciado por láminas solares.

II. LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El Sol es el origen de todas las formas de energía que el ser humano ha utilizado a lo largo de la historia, incluyendo la llamada energía solar. Sería poco racional no aprovechar esta fuente energética gratuita, limpia, y, prácticamente inagotable.

Se ha logrado emplear la energía solar para generar calor, producir electricidad, e, iluminar espacios arquitectónicos. El calor se obtiene mediante captadores o colectores térmicos (energía solar térmica), la electricidad a través de módulos fotovoltaicos (energía solar fotovoltaica), y, la iluminación a través de inyectores solares [2].

La conversión fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, es decir en la conversión de la energía proveniente del Sol en energía eléctrica. Esta conversión se realiza en las denominadas células solares, que conectadas en serie o en paralelo, suministran la tensión y la corriente requeridas por las demanda.

Entre las ventajas de la energía solar fotovoltaica se menciona, entre otros, la no generación de contaminantes atmosféricos, un impacto visual reducido, bajos requerimientos de espacio físico, y, la ausencia de ruidos en el punto de utilización [3].

III. EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SOLAR

A. Generaciones de tecnología solar

Las células solares de primera generación, se introdujeron comercialmente a principios de 1980, y, aún se usan. Su funcionamiento se basa en la diferencia de potencial que surge en una juntura semiconductor p-n, cuando el material es radiado con energía proveniente del Sol.

La segunda generación de tecnología solar, se inició a finales de los años 1990, con la introducción de la tecnología de láminas delgadas, que se construyen apilando capas muy finas de diferentes materiales semiconductores. La fabricación de láminas delgadas tuvo que enfrentar problemas serios. El depósito de capas semiconductoras sobre una superficie base (generalmente vidrio), a través de un proceso a alto vacío resultó caro. Además se necesitaba de procesos adicionales para “dibujar” los contactos eléctricos necesarios.

La tercera generación de tecnología solar, también se construye a base de láminas delgadas, pero obvia las dificultades anteriores. Las capas de material semiconductor se depositan directamente sobre un metal, eliminando pasos adicionales para colocar los contactos. Además, el procedimiento elimina la fragilidad del dispositivo, proporcionando células solares con un alto grado de flexibilidad, lo que mejora la manipulación mecánica.

Se prevé que, una cuarta generación de células solares, usará nanopartículas con polímeros, para lograr células más eficientes y baratas. La celda empleará varias capas que no sólo aprovecharán los diferentes tipos de luz, sino también el espectro infrarrojo [4].

B. Evolución de las características técnico económicas de la tecnología solar

Algunos expertos prefieren no hablar de generaciones de tecnología solar, sino de avances en la relación entre el costo de fabricación y la eficiencia de la conversión energética de las células [5].

Las láminas solares disponibles en el mercado actual, son más baratas de fabricar que los módulos solares, absorben la energía solar de una manera eficiente, y, reducen la carga estructural sobre las construcciones en las que se montan, lo

que por sí mismo constituye un ahorro adicional en la implementación de estos sistemas.

Desde la perspectiva de su incorporación en edificaciones, las láminas son atractivas, no sólo por adaptarse a superficies curvas, sino también por el menor impacto estético (en comparación con los paneles solares), por su ligereza, y, homogeneidad [6].

C. Desarrollo prospectivo de la tecnología solar

Los dispositivos de silicio de estado sólido dominaron la tecnología solar, durante muchos años, en base a la experiencia y a la disponibilidad de materiales en la industria de semiconductores. La reducción de peso y el aumento de flexibilidad de la tecnología solar de segunda y tercera generación, amplió la oferta de aplicaciones, desde los tradicionales sistemas fotovoltaicos de estado sólido a aplicaciones portables [7], [8], [9], [10], [11], [12].

El prototipo de la nueva generación de dispositivos fotovoltaicos, es la célula solar sensibilizada con colorante dye solar cell (DSC), desarrollada en 1988 por Michael Grätzel del EPFL, en Suiza. En esta célula se logró la absorción óptica y la separación de carga, asociando un sensibilizador (como material de absorción de luz), y, un semiconductor de ancha banda prohibida (gap) de morfología nanocrystalina.

Las células de Grätzel pueden construirse empleando sustratos flexibles, por lo que pueden ser utilizados en dispositivos domésticos, aplicaciones decorativas o arquitectónicas, etc. [13].

En contraste con la tecnología fotovoltaica tradicional, la tecnología DSC emplea procesos de producción más simples, que requieren de menos energía. Esto reduce el impacto ambiental y reduce costos. Además, la tecnología DSC es menos sensible al ángulo de la radiación solar, por lo que se puede instalar en paredes verticales y en lugares poco iluminados. La tecnología DSC puede ser transparente y utilizar diferentes colores, lo que mejora las opciones de integración arquitectónica [14], [15], [16], [17], [18].

Diferentes centros de investigación dirigen sus esfuerzos a reducir los costos de fabricación, elevar la eficiencia, y, mejorar la estabilidad a las células, precondiciones indispensables para su incorporación efectiva a productos electrónicos portables de mercado.

Se trabaja en optimizar aplicaciones de células en teléfonos móviles y otros aparatos electrónicos de bajo consumo de energía. También son prospectivas las investigaciones en el uso de células para la alimentación de microsistemas y redes de sensores autosuficientes en términos de energía [16].

IV. MODELO ELÉCTRICO DE UN MÓDULO PV

En una aproximación muy básica, un módulo PV (conformado por una sola celda) puede ser representado como

una fuente de corriente (fotocorriente), cuyo valor depende de la radiación incidente [19]. La presencia de una junta p-n en la celda solar, puede modelarse como un diodo conectado en paralelo con la fuente de corriente. Este diodo es el responsable de la tensión generada por la celda, que cambia ante la variación de la carga [19]. El modelo obtenido, puede ser mejorado, considerando que en la celda se presentan pérdidas en forma de calor, y, que el diodo de la junta no debe ser considerado ideal (Ver Fig.1) [19].

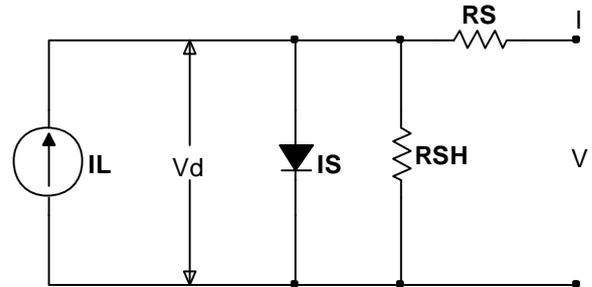


Fig.1. Circuito equivalente mejorado de una celda solar. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

En la Fig.1, I_L representa la fuente de corriente; I_S representa la corriente de saturación inversa del diodo o **corriente oscura**. V , representa la tensión del diodo formado por la junta de la celda, y, su valor depende tanto de la junta como de la temperatura de funcionamiento de la celda. R_S aparece como consecuencia de la resistencia eléctrica presente en el material de la celda, por el cual fluye la corriente. R_{SH} considera las corrientes de fuga a través de la celda, alrededor de los bordes del dispositivo, y, entre los contactos de distinta polaridad.

Al conectar una carga a los terminales del módulo, se mantendrá una diferencia de potencial V , y, una corriente I a través de la celda.

Si se desprecia el efecto de las resistencias R_S y R_{SH} del modelo equivalente, se puede afirmar que cuando la celda es iluminada, la fotocorriente se divide entre el diodo y la resistencia de carga, en una proporción dependiente de la iluminación y de la carga. Para resistencias altas en la carga, una mayor parte de la fotocorriente fluye a través del diodo, lo que resulta en una diferencia de potencial mayor en los terminales de la celda, con una corriente menor.

Un modelo de las pérdidas en la celda, en forma de calor, se obtiene al considerar R_S y R_{SH} . R_S se presenta con fuerza para altas densidades de corriente, como la presente como resultado de una gran concentración de luz incidente. R_{SH} es un problema en dispositivos rectificadores de pobre calidad. Para que la celda sea lo más eficiente posible, R_S debe ser lo más pequeña, y, R_{SH} lo más grande posible. En forma ideal, R_S 0, y, R_{SH} [19].

V. CURVA CARACTERÍSTICA DE UN MÓDULO PV

El desempeño característico de un módulo PV, se representa a través de la característica I-V (Ver Fig.2 y Fig.3), que representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje,

bajo condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El par concreto de corriente y voltaje, en el que el módulo PV trabajará, está determinado por la carga a la que éste está conectado [20].

A. Principales parámetros de la característica I-V

Se conoce como **corriente de cortocircuito** (I_{cc} o I_{sc}) a la máxima corriente a través del módulo PV, bajo condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondiente a un voltaje igual a cero entre sus terminales.

Se denomina **voltaje (tensión) de circuito abierto** (V_{ca} o V_{oc}) al máximo voltaje a la salida del módulo PV, bajo condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondiente a una corriente igual a cero a través de él.

Se llama **potencia máxima** (P_{max}), a la máxima potencia en el módulo PV, bajo condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V (**corriente en el punto de máxima potencia** I_{pmp} y **voltaje en el punto de máxima potencia** V_{pmp}) [20].

B. Efecto de la variación de la radiación solar incidente en la característica I-V

El V_{ca} varía en función de los niveles de radiación incidente. Para niveles bajos de radiación, V_{ca} cae bruscamente. La I_{cc} y la P_{max} , cambian casi proporcionalmente con la variación del nivel de radiación solar incidente (Ver Fig.2 y Fig.3) [19].

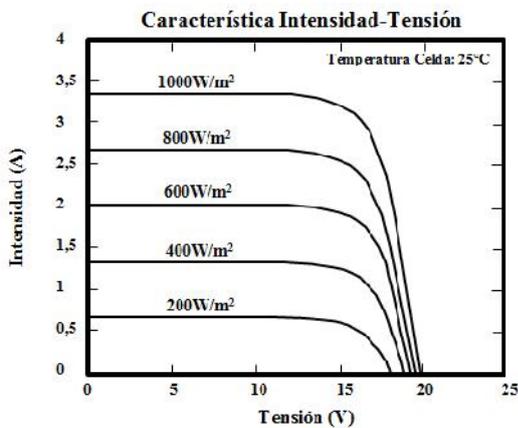


Fig.2. Característica I-V de un módulo PV, para variaciones de radiación incidente. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

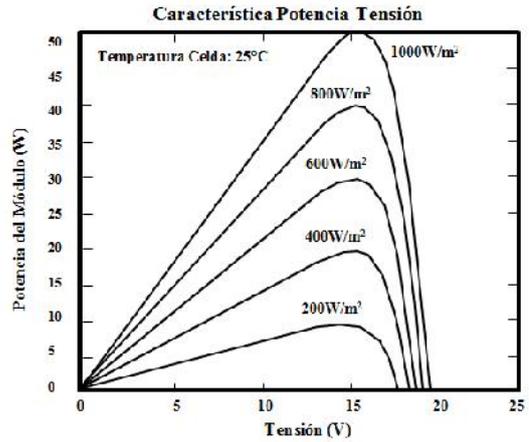


Fig.3. Característica P-V de un módulo PV, para variaciones de radiación incidente. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

C. Efecto de la variación de la temperatura en la característica I-V

Las celdas solares poseen un coeficiente de temperatura inverso para el V_{ca} , básicamente debido a las características de la juntura p-n. Esto provoca que tanto V_{ca} como V_{pmp} , se reduzcan notoriamente, de forma proporcional, al aumentar la temperatura de la celda (Ver Fig.4 y Fig.5) [19].

La I_{CC} varía de manera proporcional con la temperatura, pero esta variación es tan pequeña, que se puede considerar la I_{CC} como constante ante variaciones de temperatura en un amplio rango.

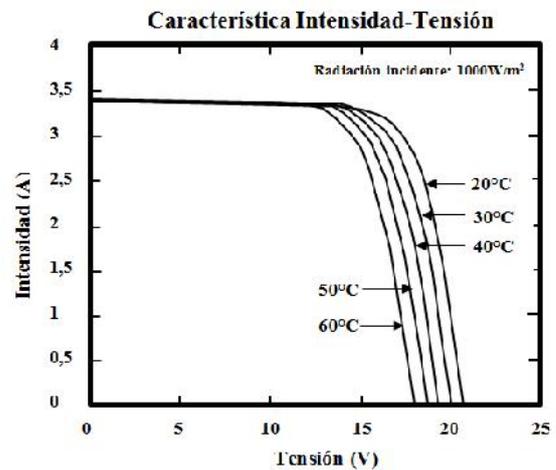


Fig.4. Característica I-V de un módulo PV, para variaciones de la temperatura de trabajo. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

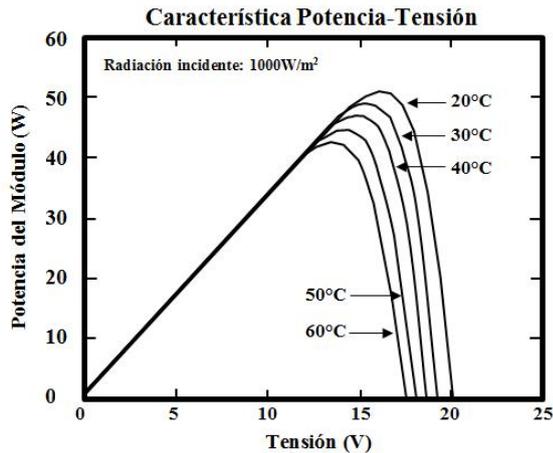


Fig.5. Característica P-V de un módulo PV, para variaciones de la temperatura de trabajo. Disponible en: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf

D. Efecto del contenido espectral de la luz en la característica I-V

Dependiendo de la hora y de la época del año, el espectro de luz solar presenta desviaciones respecto al espectro estándar en la superficie terrestre.

Para considerar el espectro, al momento de tomar la característica I-V, se puede realizar una corrección, multiplicando I_{cc} por el **factor espectral**, obtenido de la comparación del espectro estándar y del espectro en condiciones experimentales. Esta corrección, muy pequeña, se utiliza cuando se requiere elevada precisión [20].

VI. OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA I-V DE UN MÓDULO PV

La respuesta de un módulo PV a la radiación incidente, depende de la intensidad, de los materiales empleados en la fabricación del módulo, y, en especial, de las células que lo forman.

El conocimiento de la respuesta, de la característica I-V, de un módulo PV, es necesario para comparar calidad, eficacia, y, estabilidad eléctrica. Esta característica se obtiene conectando el módulo a un resistor cuya resistencia varía entre cero e infinito, mientras se registra los valores I y V, bajo **condiciones específicas CEM o STC** [21]. Estas condiciones son de uso generalizado y universal, y, prevén una irradiancia de $1000W/m^2$, una distribución espectral equivalente a AM 1.5G, con una incidencia normal, y, a una temperatura de la célula de $25^\circ C$ (normas E490, G159, y, G173 de la Comisión Eléctrica Internacional, relacionadas a dispositivos fotovoltaicos) [22].

A. Generalidades de las láminas solares PowerFilm

Los módulos solares integrados PowerFilm, se clasifican en el grupo de filmes delgados de plástico, y, están fabricados a través de un proceso patentado, que permite obtener un producto enrollable [23].

En comparación con los paneles solares comunes, los filmes delgados son más flexibles y livianos, lo que los convierte en soluciones óptimas para aplicaciones portables.

Las láminas solares delgadas se obtienen depositando una capa absorbente de luz solar, hecha de silicio amorfo, sobre un sustrato de plástico flexible [24]. Las células solares individuales se aíslan mediante un proceso de trazado por láser.

B. Diseño y construcción de un soporte mecánico

Por cuanto la mayor eficiencia de transformación de energía solar en eléctrica en los módulo PV, se logra para un ángulo de 90° , entre el eje de la lámina y la dirección de la radiación solar incidente, se decidió diseñar y construir un soporte mecánico que permita ajustar el ángulo de inclinación de la lámina respecto del horizonte, en función de la hora del día.

El diseño propuesto incluyó una plataforma rectangular sobre la que se asegura la lámina. La plataforma se desliza sobre un eje vertical y otro horizontal, para permitir regular la posición respecto al horizonte, entre 0° y 60° , valores suficientes para mantener la perpendicularidad requerida, considerando la ubicación geográfica de la estación experimental.

Originalmente, se planteó construir la estructura en aluminio, pero al considerar la resistencia de la estructura a la influencia del viento y el costo final, se optó por una variante en hierro, cubierta de por una capa de pintura anticorrosiva para inhibir la oxidación (ver Fig.6).



Fig.6. Soporte mecánico construido para experimentación de las láminas solares PowerFilm.

C. Definición del procedimiento para la adquisición de data

Los fabricantes de módulos solares caracterizan el desempeño de sus productos, a través de una serie de curvas I-V, obtenidas para distintos niveles de radiación. Como regla, los fabricantes suelen proporcionar la curva I-V para una radiación de 1000W/m^2 , como punto de referencia.

A partir de la información de la curva I-V, se puede construir curvas de potencia. Cada curva I-V, contiene un punto de máxima potencia (MPP por las siglas en inglés), en el que se representan las condiciones óptimas de operación, con el mayor rendimiento posible.

En el marco de este proyecto, se ha propuesto obtener las curvas características, a través de experimentos sencillos que emulen las condiciones en las que los fabricantes realizan esas mediciones. Se planteó conectar la lámina PowerFilm Solar R-28 a una carga variable, y, registrar los datos correspondientes a tensión e intensidad de corriente eléctrica manteniendo uniforme las condiciones de radiación y temperatura. La variación de carga y el registro de los pares (I, V) se realizó utilizando un circuito descrito en [25]. Para mantener las condiciones de radiación y temperatura, se procuró realizar la adquisición de data a la misma hora en días secuenciales de iguales características climatológicas.

Considerando que la lámina solar proporciona una potencia de aproximadamente 20W, como carga se utilizó resistores cerámicos con una capacidad de disipación de potencia de 20W a 30W

D. Obtención de la característica IV base

Las especificaciones técnicas de la lámina solar PowerFilm R-28, se resumen en la Tabla 1. La obtención de la curva característica de la lámina, se realizó en función de la metodología explicada anteriormente [25]. Como primera curva, y, a manera de ensayo, se obtuvo la característica VI de la lámina con una inclinación de 20° respecto a la horizontal. El valor del ángulo se fijó de forma arbitraria.

Tabla 1.
Especificaciones técnicas de la lámina solar PowerFilm R-28

Parámetro	Valor
Voltaje de operación solar (V)	15,4
Corriente de operación solar (A)	1,8
Peso (lb/Kg)	1,8/0,816
Dimensiones lámina enrollada (in/mm)	4x14,5 101,6x368,3
Dimensiones lámina desenrollada (in/mm)	14,5x79,75 368,3x2025,6

De acuerdo a la metodología, se registró valores de tensión, intensidad, y, potencia. El experimento se realizó el 5 de diciembre de 2012, entre las 11h00 y 12h00. De acuerdo a las estaciones hidrometeorológicas del Departamento de Geología y Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL, los valores de radiación solar y temperatura promedio fueron los mostrados en la Tabla 2. Estos valores se obtuvieron del procesamiento de una serie de valores registrados cada diez minutos, dentro

de la hora de observación. La Tabla 3, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 2.
Condiciones meteorológicas en el día del experimento

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m^2]	979,57
Temperatura [$^\circ\text{C}$]	21,29

Tabla 3.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,68	2,68	7,18
4,86	2,43	11,81
7,56	2,29	17,32
9,31	2,17	20,16
10,88	2,053	22,33
12,37	1,96	24,29
13,00	1,86	24,14
14,40	1,68	24,20
15,50	1,55	24,03
15,80	1,44	22,69
16,00	1,33	21,33
16,81	1,12	18,84
17,30	1,02	17,61
17,55	0,96	16,83
17,91	0,90	16,04
18,42	0,79	14,56
18,60	0,74	13,67
18,80	0,63	11,78
19,03	0,54	10,35
19,09	0,48	9,11
19,15	0,46	8,73
19,28	0,41	7,91
19,31	0,38	7,41
19,35	0,35	6,69
19,38	0,31	6,06
19,40	0,29	5,62
19,45	0,24	4,61
19,85	0,20	3,94
19,89	0,17	3,44
19,95	0,15	2,95
20,01	0,14	2,72
20,12	0,12	2,42
20,20	0,09	1,85
20,27	0,08	1,71
20,30	0,08	1,62

Tabla 3.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
20,33	0,07	1,37
20,38	0,06	1,26
20,45	0,06	1,19
20,54	0,06	1,12
20,6	0,05	0,99
20,62	0,05	0,94
20,65	0,04	0,89
20,67	0,04	0,85
20,69	0,03	0,71
20,71	0,03	0,60
20,73	0,03	0,52
20,78	0,02	0,50
20,80	0,02	0,43
20,85	0,01	0,13
20,90	0,005	0,10
20,97	0,003	0,05
21,10	0,002	0,03
21,15	0,001	0,03

Al graficar los datos, se obtuvo una curva IV semejante a la descrita en la bibliografía [20] (ver Fig. 7). En la Tabla 4, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV, como la corriente de corto circuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmp}), y la tensión el punto de máxima potencia (V_{pmp}).

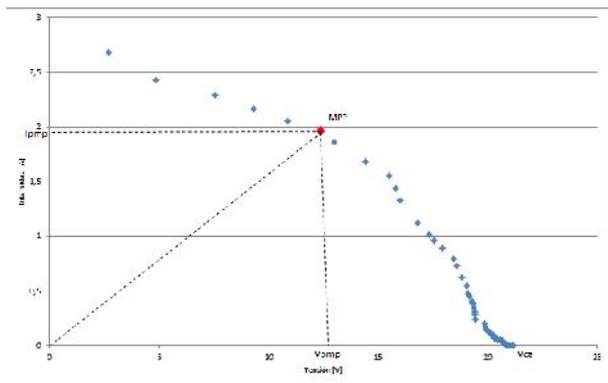


Fig.7. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 20° respecto de la horizontal

Tabla 4.
Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
I_{cc}	---
V_{ca}	21,15V

Tabla 4.
Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal. Continuación...

Parámetro	Valor
MPP	24,29W
I_{pmp}	1,96A
V_{pmp}	12,37V

E. Obtención de la característica IV para diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal

Con el objetivo de determinar la inclinación óptima respecto de la horizontal, se obtuvo la característica IV de la lámina en el intervalo de 10° a 60°, cada 10°.

Característica IV para 10° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 10° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 16 de enero de 2013. La Tabla 5, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 6, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 5.
Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 10° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m^2]	1125,40
Temperatura [$^{\circ}C$]	23,83

Tabla 6.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,62	2,62	6,89
5,47	2,74	14,96
8,37	2,54	21,23
10,38	2,41	25,06
12,16	2,29	27,90
13,53	2,15	29,06
14,55	2,08	30,24
15,63	1,82	28,51
15,93	1,59	25,38
6,51	1,50	24,78
17,01	1,42	24,11
17,36	1,16	20,09
17,58	1,03	18,18
17,60	0,96	16,93
17,96	0,90	16,13
18,22	0,79	14,43
18,30	0,72	13,24
18,31	0,61	11,18

Tabla 6.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
18,32	0,52	9,59
19,01	0,48	9,03
19,13	0,46	8,71
19,18	0,41	7,83
19,21	0,38	7,34
19,30	0,34	6,65
19,44	0,31	6,10
19,50	0,29	5,68
19,56	0,24	4,67
19,67	0,20	3,87
19,70	0,17	3,37
19,75	0,15	2,89
19,95	0,14	2,71
20,00	0,12	2,40
20,14	0,09	1,84
20,16	0,08	1,69
20,22	0,08	1,60
20,25	0,07	1,36
20,30	0,06	1,25
20,35	0,06	1,18
20,37	0,05	1,10
20,40	0,05	0,97
20,41	0,05	0,93
20,44	0,04	0,87
20,48	0,04	0,84
20,51	0,03	0,70
20,53	0,03	0,59
20,55	0,03	0,52
20,58	0,02	0,49
20,63	0,02	0,43
20,67	0,01	0,13
20,69	0,005	0,10
20,72	0,003	0,05
20,77	0,002	0,03
20,80	0,001	0,03

La Fig.8 muestra la característica IV para 10° de inclinación., mientras que la Tabla 7, resume los parámetros definitorios de la curva.

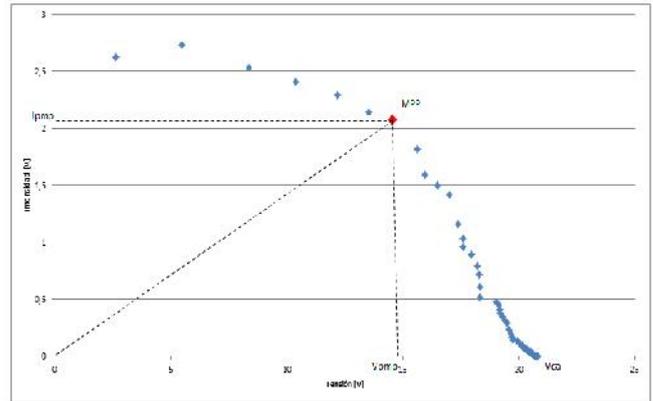


Fig.8. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal

Tabla 7.
Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,80V
MPP	30,24W
I _{mp}	2,08A
V _{mp}	14,55V

Característica IV para 20° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 20° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 17 de enero de 2013. La Tabla 8, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 9, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 8.
Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1073,40
Temperatura [°C]	23,46

Tabla 9.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,98	2,98	8,91
5,48	2,74	15,02
7,91	2,64	20,86
10,73	2,50	26,78
12,11	2,28	27,67
13,49	2,14	28,89
14,10	2,01	28,40
15,60	1,82	28,40
16,12	1,61	25,99
16,54	1,50	24,87

Tabla 9.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
17,00	1,42	24,08
17,63	1,18	20,72
17,85	1,05	18,74
18,08	0,99	17,86
18,37	0,92	16,87
18,46	0,80	14,82
18,67	0,74	13,78
18,80	0,63	11,78
18,98	0,54	10,29
19,20	0,48	9,22
19,25	0,47	9,04
19,50	0,41	8,09
19,58	0,39	7,62
19,63	0,35	6,88
19,70	0,32	6,26
19,82	0,30	5,86
19,95	0,24	4,85
20,01	0,20	4,00
20,10	0,17	3,51
20,14	0,15	3,00
20,20	0,14	2,78
20,27	0,12	2,46
20,30	0,09	1,87
20,34	0,08	1,72
20,38	0,08	1,63
20,40	0,07	1,38
20,42	0,06	1,26
20,46	0,06	1,20
20,50	0,05	1,11
20,57	0,05	0,98
20,60	0,05	0,94
20,64	0,04	0,89
20,67	0,04	0,85
20,70	0,03	0,71
20,72	0,03	0,60
20,74	0,03	0,52
20,75	0,02	0,49
20,78	0,02	0,43
20,81	0,01	0,13
20,84	0,005	0,10
20,88	0,003	0,05
20,90	0,002	0,03

Tabla 9.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 20° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
20,93	0,001	0,03

La Fig.9 muestra la característica IV para 20° de inclinación., mientras que la Tabla 10, resume los parámetros definitorios de la curva.

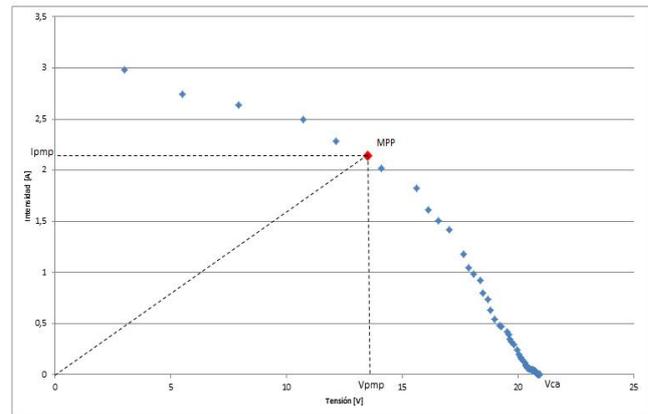


Fig.9. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 20° respecto de la horizontal

Tabla 10.
Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,93V
MPP	28,89W
Ipmp	2,14A
Vpmp	13,49V

Característica IV para 30° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 30° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 16 de enero de 2013. La Tabla 11, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 12, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 11.
Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 30° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1125,40
Temperatura [°C]	23,83

Tabla 12.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,60	2,60	6,76
5,40	2,70	14,58

Tabla 12.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
8,20	2,48	20,38
9,90	2,30	22,79
11,40	2,15	24,52
12,60	2,00	25,20
13,50	1,93	26,04
14,60	1,70	24,87
15,20	1,52	23,10
15,70	1,43	22,41
16,10	1,34	21,60
16,60	1,11	18,37
16,90	0,99	16,80
17,10	0,93	15,98
17,30	0,87	14,96
17,60	0,77	13,47
17,70	0,70	12,38
17,90	0,60	10,68
18,00	0,51	9,26
18,50	0,46	8,56
18,60	0,44	8,24
18,70	0,40	7,44
18,75	0,37	6,99
18,78	0,34	6,30
18,80	0,30	5,70
18,86	0,28	5,31
18,90	0,23	4,36
19,00	0,19	3,61
19,10	0,17	3,17
19,20	0,14	2,73
19,30	0,13	2,53
19,40	0,12	2,25
19,50	0,09	1,73
19,54	0,08	1,59
19,60	0,07	1,51
19,62	0,06	1,27
19,67	0,06	1,17
19,70	0,06	1,11
19,75	0,05	1,03
19,77	0,05	0,91
19,80	0,04	0,87
19,85	0,04	0,82
19,88	0,04	0,79
19,90	0,03	0,66

Tabla 12.
Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,95	0,03	0,55
19,97	0,02	0,49
19,98	0,02	0,46
19,99	0,02	0,40
20,00	0,01	0,12
20,01	0,004	0,09
20,04	0,003	0,05
20,08	0,001	0,03
20,10	0,001	0,03

La Fig.10 muestra la característica IV para 30° de inclinación., mientras que la Tabla 13, resume los parámetros definitorios de la curva.

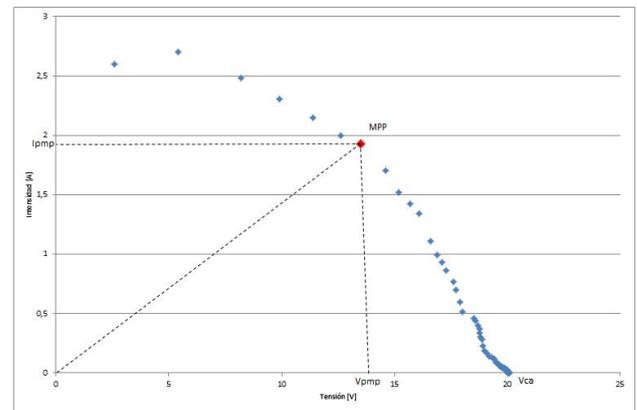


Fig.10. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 30° respecto de la horizontal

Tabla 13.
Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 30° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,10V
MPP	26,04W
Ipmp	1,93A
Vpmp	13,50V

Característica IV para 40° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 40° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 17 de enero de 2013. La Tabla 14, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 15, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 14.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 40° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1073,40
Temperatura [°C]	23,46

Tabla 15.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 40° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
2,80	2,80	7,84
5,00	2,50	12,50
7,20	2,40	17,28
9,70	2,26	21,88
110	2,08	22,83
12,50	1,98	24,80
13,00	1,86	24,14
14,40	1,68	24,20
15,00	1,50	22,50
15,50	1,41	21,84
15,80	1,32	20,80
16,80	1,12	18,82
17,30	1,02	17,61
17,50	0,96	16,73
17,70	0,89	15,66
17,90	0,78	13,93
18,10	0,72	12,95
18,40	0,61	11,29
18,60	0,53	9,88
18,70	0,47	8,74
18,80	0,46	8,62
19,00	0,40	7,68
19,10	0,38	7,25
19,20	0,34	6,58
19,28	0,31	6,00
19,30	0,29	5,56
19,33	0,24	4,56
19,40	0,19	3,76
19,50	0,17	3,31
19,54	0,14	2,83
19,60	0,13	2,61
19,63	0,12	2,31
19,80	0,09	1,78
19,85	0,08	1,64
19,90	0,08	1,55
19,93	0,07	1,32

Tabla 15.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 40° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,97	0,06	1,21
20,00	0,06	1,14
20,02	0,05	1,06
20,05	0,05	0,93
20,10	0,04	0,90
20,11	0,04	0,84
20,13	0,04	0,81
20,14	0,03	0,68
20,16	0,03	0,56
20,18	0,02	0,50
20,20	0,02	0,47
20,22	0,02	0,41
20,25	0,006	0,12
20,27	0,005	0,09
20,29	0,003	0,05
20,30	0,001	0,03
20,34	0,001	0,03

La Fig.11 muestra la característica IV para 40° de inclinación., mientras que la Tabla 16, resume los parámetros definitorios de la curva.

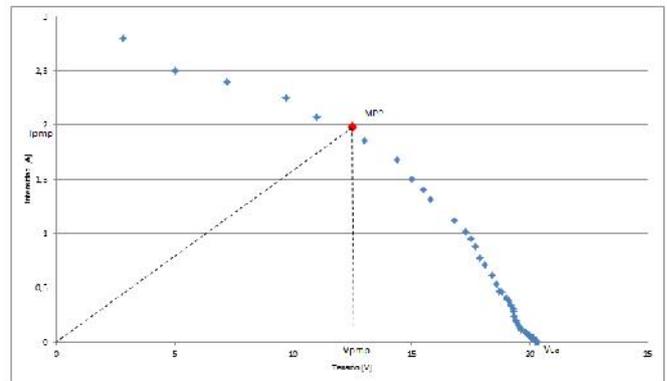


Fig.11. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 40° respecto de la horizontal

Tabla 16.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 40° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,34V
MPP	24,80W
Ipm	1,98A
Vpmp	12,50V

Característica IV para 50° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 50° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 18 de enero de 2013. La Tabla 17, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 18, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 17.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 50° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1047,90
Temperatura [°C]	21,18

Tabla 18.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 50° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
1,95	1,95	3,82
3,74	1,87	6,99
5,54	1,85	10,23
7,74	1,80	13,93
9,17	1,73	15,87
10,22	1,62	16,58
11,13	1,59	17,70
12,35	1,44	17,80
13,45	1,35	18,09
14,07	1,28	18,00
14,62	1,22	17,81
15,63	1,04	16,29
16,22	0,95	15,48
16,32	0,89	14,55
16,52	0,83	13,65
16,78	0,73	12,24
17,40	0,69	11,97
18,05	0,60	10,86
18,20	0,52	9,46
18,30	0,46	8,37
18,33	0,45	8,19
18,43	0,39	7,23
18,71	0,37	6,96
18,83	0,34	6,33
18,92	0,31	5,77
19,10	0,29	5,44
19,36	0,24	4,57
19,42	0,19	3,77
19,55	0,17	3,32

Tabla 18.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 50° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,61	0,15	2,85
19,70	0,13	2,64
19,78	0,12	2,34
20,00	0,09	1,82
20,10	0,08	1,68
20,22	0,08	1,60
20,25	0,07	1,36
20,27	0,06	1,25
20,30	0,06	1,18
20,44	0,05	1,11
20,46	0,05	0,97
20,47	0,05	0,93
20,49	0,04	0,87
20,53	0,04	0,84
20,58	0,03	0,71
20,60	0,03	0,59
20,65	0,03	0,52
20,70	0,02	0,49
20,73	0,02	0,43
20,75	0,01	0,13
20,76	0,004	0,10
20,79	0,003	0,05
20,81	0,002	0,03
20,83	0,001	0,03

La Fig.12 muestra la característica IV para 50° de inclinación., mientras que la Tabla 19, resume los parámetros definitorios de la curva.

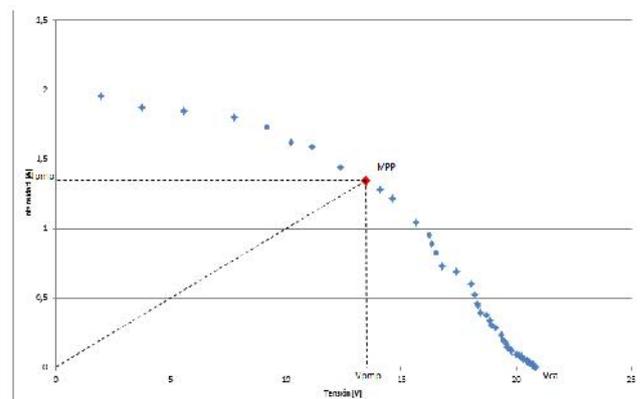


Fig.12. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 50° respecto de la horizontal

Tabla 19.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 50° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
I _{cc}	---
V _{ca}	20,83V
MPP	18,09W
I _{pmp}	1,35A
V _{pmp}	13,45V

Característica IV para 60° de inclinación

La data para la construcción de la característica IV de la lámina, con 60° de inclinación, se recogió entre las 12h30 y las 14h00 del 18 de enero de 2013. La Tabla 20, muestra las condiciones meteorológicas de ese día. La Tabla 21, muestra los resultados obtenidos para la curva IV. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 20.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 60° respecto de la horizontal

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	1047,90
Temperatura [°C]	21,18

Tabla 21.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 60° respecto de la horizontal

V [V]	I [A]	P [W]
1,60	1,60	2,56
3,20	1,60	5,12
4,78	1,59	7,62
6,84	1,59	10,88
8,27	1,56	12,90
9,44	1,50	14,15
10,20	1,46	14,86
11,72	1,37	16,03
12,63	1,26	15,95
13,50	1,23	16,57
14,00	1,17	16,33
15,30	1,02	15,61
16,00	0,94	15,06
16,30	0,89	14,52
16,50	0,83	13,61
16,70	0,73	12,13
17,40	0,69	11,97
17,80	0,59	10,56
18,10	0,51	9,36
18,70	0,47	8,74
18,90	0,46	8,71
19,20	0,41	7,84

Tabla 21.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 60° respecto de la horizontal. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,23	0,38	7,35
19,28	0,34	6,64
19,30	0,31	6,01
19,60	0,29	5,73
19,70	0,24	4,73
19,75	0,20	3,90
19,80	0,17	3,41
19,84	0,15	2,92
19,90	0,14	2,69
19,98	0,12	2,39
20,10	0,09	1,84
20,20	0,08	1,70
20,22	0,08	1,60
20,27	0,07	1,36
20,30	0,06	1,25
20,35	0,06	1,18
20,40	0,05	1,10
20,44	0,05	0,97
20,47	0,05	0,93
20,50	0,04	0,88
20,60	0,04	0,85
20,63	0,03	0,71
20,68	0,03	0,59
20,70	0,03	0,52
20,75	0,02	0,49
20,80	0,02	0,43
20,86	0,01	0,13
20,80	0,005	0,10
20,83	0,003	0,05
20,86	0,002	0,03
20,90	0,001	0,03

La Fig.13 muestra la característica IV para 10° de inclinación., mientras que la Tabla 22, resume los parámetros definitorios de la curva.

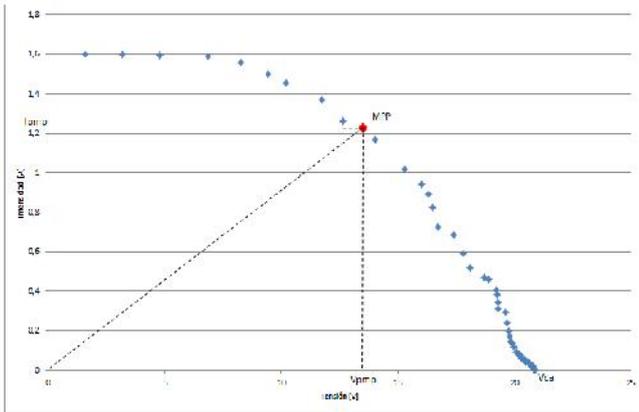


Fig.13. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 60° respecto de la horizontal

Tabla 22.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 60° respecto de la horizontal

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,90V
MPP	16,57W
I _{mp}	1,23A
V _{pmp}	13,50V

Análisis de resultados

La selección del ángulo óptimo de inclinación respecto de la horizontal, se basa en la comparación de las características IV obtenidas. El papel más importante en la comparación la tiene el valor de MPP, que representa el par I-V óptimo de operación. La Fig.14, muestra las seis características IV obtenidas, en un sistema común de coordenadas. La Tabla 20 resume los valores de MPP obtenidos en los experimentos. El mejor resultado, se obtuvo para una inclinación de 10° respecto de la horizontal.

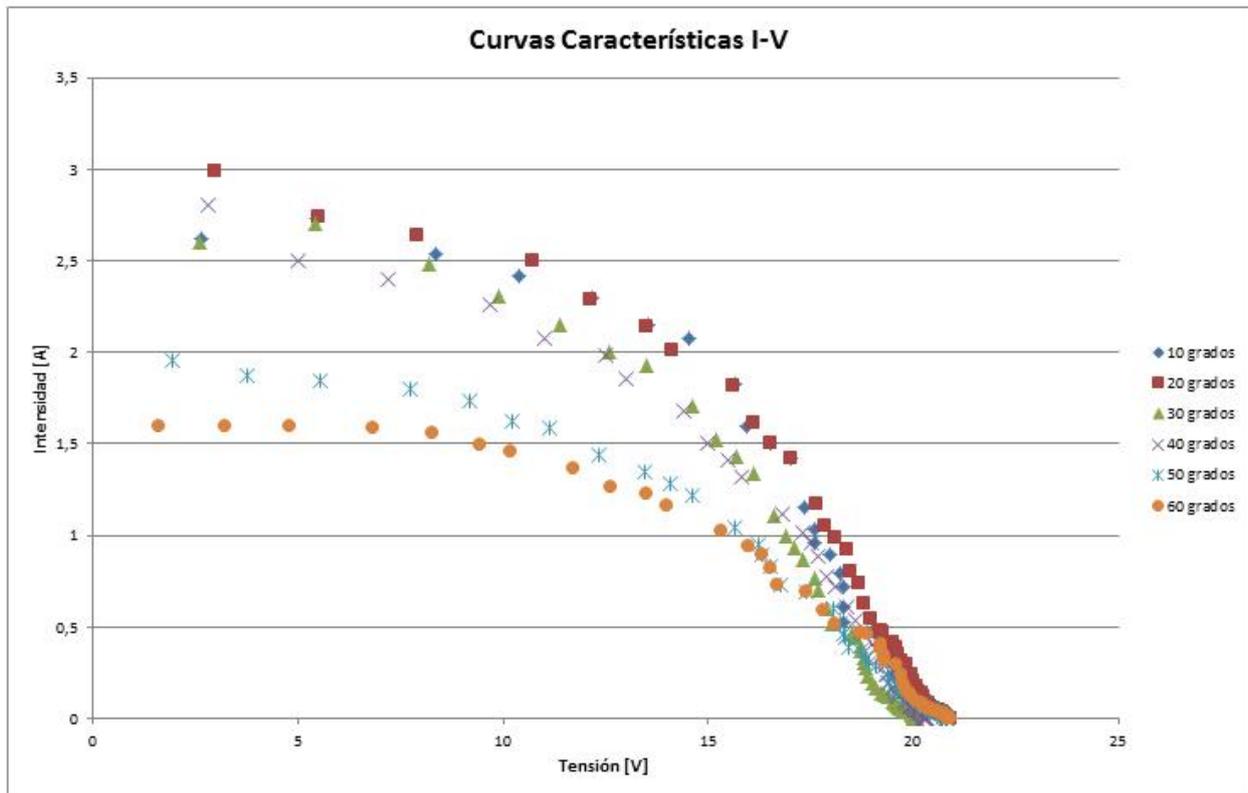


Fig.14. Curvas IV de la lámina solar, obtenidas con diferentes ángulos de inclinación respecto de la horizontal, en el intervalo de 10 a 60 grados

Tabla 20.

Tabla resumen de los valores de MPP de las curvas I-V obtenidas para diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal

Ángulo de inclinación	MPP
10°	30,24W
20°	28,89W
30°	26,04W

Tabla 20.

Tabla resumen de los valores de MPP de las curvas I-V obtenidas para diversos ángulos de inclinación respecto de la horizontal. Continuación...

Ángulo de inclinación	MPP
40°	24,80W
50°	18,09W
60°	16,57W

F. Curva característica IV para conexiones de láminas solares PowerFilm r-28, en serie y en paralelo

El conocimiento de la performance de las láminas solares, se complementó con la obtención de la curva IV para una conexión de dos láminas en serie, y, otra en paralelo. El ángulo de inclinación se fijó en 10° respecto de la horizontal.

Debido a la variabilidad del clima en las fechas programadas para los experimentos, se decidió realizar éstos en el valle de Catamayo, cercano a la ciudad de Loja. La data se obtuvo el 15 de marzo de 2013, entre las 10h30 y las 13h30.

La Tabla 21, resume las condiciones meteorológicas promedio en la zona, de acuerdo al Atlas Solar Ecuatoriano editado por el MEER [26]. Como primer experimento programado, se obtuvo la característica IV de una única lámina solar. La Tabla 22, muestra los resultados obtenidos, semejantes a los obtenidos en la ciudad de Loja. El trío de datos marcados en color, corresponden al punto máximo de potencia.

Tabla 21.

Condiciones meteorológicas en el día del experimento para obtener la característica VI de una lámina solar con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

Condiciones meteorológicas	Valor
Radiación solar [W/m ²]	4500
Temperatura [°C]	29

Tabla 22.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

V [V]	I [A]	P [W]
2,62	2,62	6,86
4,87	2,44	11,86
7,07	2,36	16,66
9,46	2,20	20,81
11,20	2,11	23,67
12,61	2,00	25,24
13,42	1,92	25,73
14,51	1,69	24,57
15,15	1,52	22,95
15,67	1,42	22,32
16,10	1,34	21,60
16,89	1,13	19,02
17,20	1,01	17,40
17,50	0,96	16,73
17,88	0,89	15,98
18,23	0,78	14,26
18,48	0,73	13,50
18,62	0,62	11,56
18,78	0,54	10,08

Tabla 22.

Característica IV de una lámina PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
18,81	0,47	8,85
18,83	0,46	8,65
18,87	0,40	7,58
18,96	0,38	7,19
19,08	0,34	6,50
19,10	0,31	5,88
19,22	0,29	5,51
19,43	0,24	4,60
19,67	0,20	3,87
19,80	0,17	3,41
19,90	0,15	2,93
19,94	0,14	2,70
19,96	0,12	2,39
20,00	0,09	1,82
20,07	0,08	1,68
20,12	0,08	1,59
20,20	0,07	1,35
20,25	0,06	1,24
20,27	0,06	1,17
20,38	0,05	1,10
20,45	0,05	0,97
20,49	0,05	0,93
20,50	0,04	0,88
20,52	0,04	0,84
20,55	0,03	0,70
20,58	0,03	0,59
20,59	0,03	0,52
20,60	0,02	0,49
20,61	0,02	0,42
20,62	0,01	0,13
20,65	0,004	0,08
20,67	0,003	0,05
20,69	0,002	0,03
20,70	0,001	0,03

Al graficar los datos, se obtuvo la curva IV que se muestra en la Fig.15. En la Tabla 23, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV, como la corriente de corto circuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmp}), y, la tensión el punto de máxima potencia (V_{pmp}).

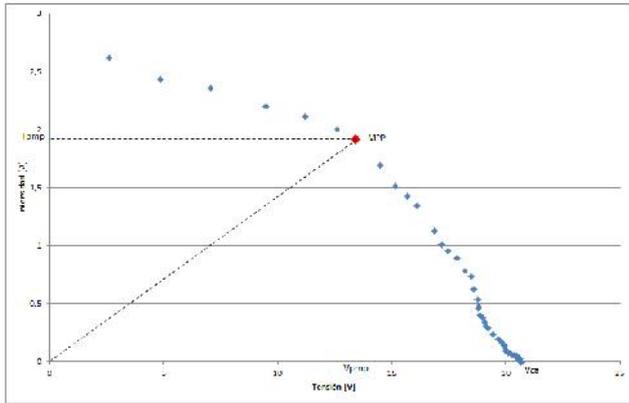


Fig.15. Curva IV de la lámina solar, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

Tabla 23.

Parámetros definitorios de la característica I-V de la lámina solar PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,70V
MPP	25,73W
I _{pm}	1,92A
V _{pm}	13,42V

Curva IV de una conexión de láminas solares en serie

Como segundo experimento se programó la obtención de la curva IV de una conexión en serie de dos láminas solares. La Fig. 16 muestra el esquema de conexión de las láminas solares. La Tabla 24 resume los resultados obtenidos para la curva IV.

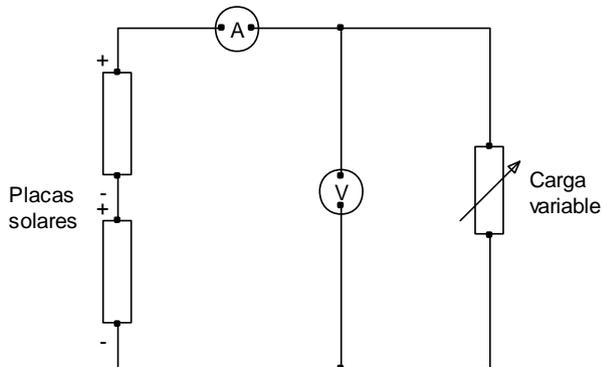


Fig.16. Esquema de conexión en serie de las láminas solares

Tabla 24.

Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28 conectadas en serie, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo

V [V]	I [A]	P [W]
2,98	2,98	8,88
5,38	2,69	14,47
7,84	2,61	20,49
10,91	2,54	27,68
12,90	2,43	31,40

Tabla 24.

Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28 conectadas en serie, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
14,90	2,37	35,24
16,23	2,32	37,63
18,88	2,20	41,59
20,84	2,08	43,43
22,26	2,02	45,05
23,67	1,97	46,69
26,50	1,77	46,82
27,65	1,63	44,97
28,40	1,55	44,07
29,12	1,46	42,40
30,23	1,31	39,73
31,29	1,24	38,70
32,11	1,07	34,37
32,72	0,93	30,59
33,91	0,85	28,75
34,29	0,84	28,68
34,94	0,74	25,97
35,00	0,70	24,50
35,18	0,63	22,10
35,21	0,57	20,00
35,31	0,53	18,61
36,06	0,44	15,86
37,00	0,37	13,69
37,20	0,32	12,03
37,40	0,28	10,36
37,50	0,26	9,57
37,60	0,23	8,47
38,20	0,17	6,63
38,35	0,16	6,13
38,37	0,15	5,77
38,39	0,13	4,88
38,40	0,12	4,47
38,42	0,11	4,22
38,50	0,10	3,93
38,57	0,09	3,46
38,72	0,09	3,33
38,93	0,08	3,16
38,98	0,08	3,04
39,17	0,07	2,56
39,27	0,05	2,14
39,38	0,05	1,89

Tabla 24.
Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28 conectadas en serie, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, en el valle de Catamayo. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
39,43	0,05	1,79
39,50	0,04	1,56
39,57	0,01	0,47
39,88	0,007	0,28
40,15	0,005	0,20
40,60	0,003	0,12
40,80	0,003	0,12

Al graficar los datos, se obtuvo la curva IV que se muestra en la Fig.17. En la Tabla 25, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV.

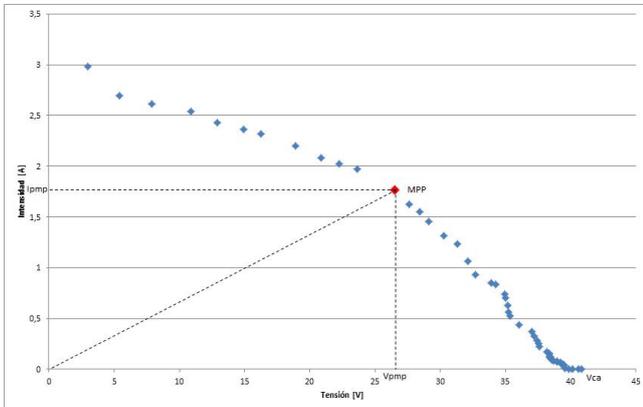


Fig.17. Curva IV de dos láminas solares, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en serie, en el valle de Catamayo

Tabla 25.
Parámetros definitorios de la característica I-V de dos láminas solares PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en serie, en el valle de Catamayo

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	40,80V
MPP	46,82W
I _{mp}	1,77A
V _{mp}	26,50V

La curva IV de la conexión en serie de dos láminas solares mostró un incremento en el valor de Vca. Este voltaje se duplicó respecto al observado en la característica IV de una sola lámina. La intensidad de corriente se mantuvo constante.

Curva IV de una conexión de láminas solares en paralelo

Como tercer experimento se programó la obtención de la curva IV de una conexión en paralelo de dos láminas solares. La Fig. 18 muestra el esquema de conexión de las láminas solares. La Tabla 26 resume los resultados obtenidos para la curva IV.

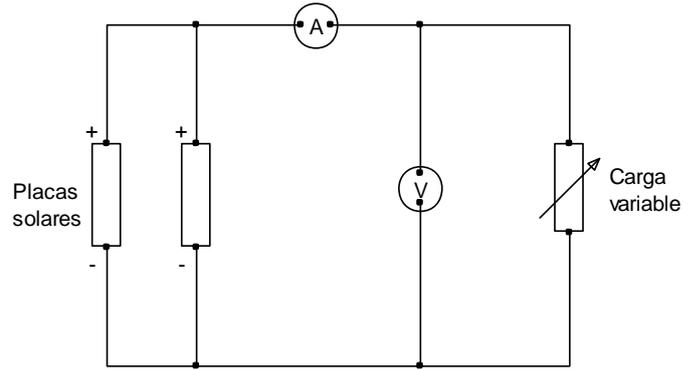


Fig.18. Esquema de conexión en paralelo de las láminas solares

Tabla 26.
Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo

V [V]	I [A]	P [W]
4,70	4,70	22,09
8,51	4,26	36,21
11,56	3,85	44,54
14,05	3,27	45,91
15,02	2,83	42,57
15,80	2,51	39,63
16,10	2,30	37,03
16,81	1,96	32,97
17,05	1,71	29,07
17,21	1,56	26,93
17,55	1,46	25,67
17,89	1,19	21,34
18,09	1,06	19,25
18,30	1,00	18,30
18,32	0,92	16,78
18,50	0,79	14,69
18,67	0,74	13,78
18,71	0,62	11,67
18,75	0,54	10,04
18,84	0,47	8,87
18,94	0,46	8,75
18,97	0,40	7,66
19,14	0,38	7,33
19,17	0,34	6,56
19,18	0,31	5,93
19,21	0,29	5,51
19,33	0,24	4,56
19,42	0,19	3,77
19,45	0,17	3,29
19,47	0,14	2,81

Tabla 26.

Característica IV de dos láminas PowerFilm R-28, con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo. Continuación...

V [V]	I [A]	P [W]
19,53	0,13	2,59
19,54	0,12	2,29
19,75	0,09	1,77
19,76	0,08	1,63
19,80	0,08	1,54
19,82	0,07	1,30
19,83	0,06	1,19
19,84	0,06	1,12
19,87	0,05	1,05
19,89	0,05	0,92
19,90	0,04	0,88
19,92	0,04	0,83
19,95	0,04	0,80
19,98	0,03	0,67
19,99	0,03	0,56
20,01	0,02	0,49
20,18	0,02	0,47
20,27	0,02	0,41
20,35	0,01	0,13
20,48	0,004	0,07
20,52	0,003	0,05
20,57	0,002	0,03
20,60	0,001	0,03

Al graficar los datos, se obtuvo la curva IV que se muestra en la Fig.19. En la Tabla 27, se muestra el significado de los parámetros que definen la característica IV.

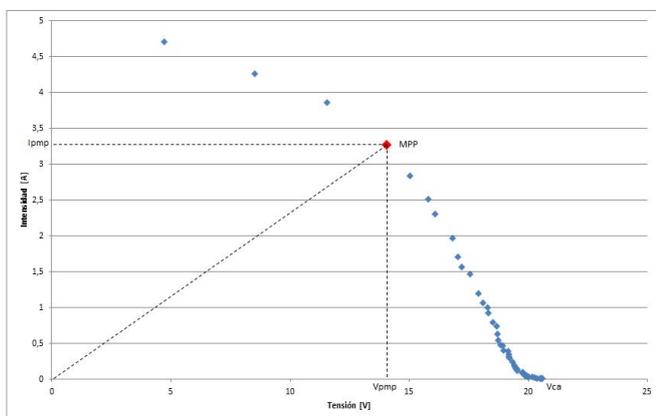


Fig.19. Curva IV de dos láminas solares, obtenida con una inclinación de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo

Tabla 27.

Parámetros definitorios de la característica I-V de dos láminas solares PowerFilm R-28, obtenida con un ángulo de 10° respecto de la horizontal, para una combinación en paralelo, en el valle de Catamayo

Parámetro	Valor
Icc	---
Vca	20,60V
MPP	45,91W
Ipmp	3,27A
Vpmp	14,05V

La curva IV de la conexión en paralelo de dos láminas solares mostró un incremento en la intensidad de corriente. Esta alcanzó el doble del valor obtenido con una sola lámina. La tensión se mantuvo constante.

VII. TRABAJOS FUTUROS

Conocida la curva IV de una lámina solar, es posible determinar la potencia óptima, y, a partir de ella diseñar sistemas potenciados por energía solar de alto desempeño. En trabajos futuros, la sección de energía y electrónica del DCCE, impulsará proyectos que apunten a desarrollar aplicaciones portables potenciadas por energía solar.

VIII. CONCLUSIONES

- El Sol es el origen de todas las formas de energía que el ser humano ha utilizado a lo largo de la historia, incluyendo la llamada energía solar que puede aprovecharse directamente, o bien ser convertida a otra forma.
- El calor se captura mediante captadores o colectores térmicos (energía solar térmica), la electricidad a través de módulos fotovoltaicos (energía solar fotovoltaica), y, la luz para iluminación a través de inyectores solares.
- La conversión fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, es decir en la conversión de la energía proveniente del Sol en energía eléctrica. Esta conversión se realiza en las denominadas células solares, que conectadas en serie o en paralelo, suministran la tensión y la corriente requeridas por las demanda.
- Las células solares de primera generación, se introdujeron comercialmente a principios de 1980, y, aún se usan.
- La segunda generación de tecnología solar, se inició a finales de los años 1990 con la introducción de la tecnología de láminas delgadas, que se construyen apilando capas muy finas de diferentes materiales semiconductores.
- La tercera generación de tecnología solar, también se construye a base de láminas delgadas, pero obvia las dificultades de la segunda generación.
- Se prevé que, una cuarta generación de células solares, unirá nanopartículas con polímeros, para lograr células más eficientes y baratas.
- La reducción de peso y el aumento de flexibilidad de la tecnología solar de segunda y tercera generación, amplió la oferta de aplicaciones, desde los tradicionales sistemas fotovoltaicos de estado sólido a aplicaciones portables.

- El prototipo de la nueva generación de dispositivos fotovoltaicos, es la célula solar sensibilizada con colorante dye solar cell (DSC), desarrollada en 1988 por Michael Grätzel del EPFL, en Suiza.
- En una célula de Grätzel se logra la absorción óptica y la separación de carga, asociando un sensibilizador (como material absorbedor de luz), y, un semiconductor de ancha banda prohibida (gap) de morfología nanocrystalina.
- Las células de Grätzel pueden construirse empleando sustratos flexibles, por lo que serán ampliamente utilizados en dispositivos domésticos, aplicaciones decorativas o arquitectónicas, etc.
- El desempeño de un módulo PV se caracteriza a través de su curva característica, o, curva corriente tensión I-V que representa las posibles combinaciones de I y V, bajo condiciones de radiación solar incidente y temperatura ambiente acordes con lo establecido por estándares internacionalmente aceptados.
- Un módulo PV (conformado por una sola celda) puede ser representado como una fuente de corriente, cuyo valor depende de la radiación incidente.
- La presencia de una juntura p-n en la celda solar, puede modelarse como un diodo conectado en paralelo con la fuente de corriente, el mismo que es el responsable de la tensión generada por la celda, que cambia ante la variación de la carga.
- El modelo de la celda puede ser mejorado, considerando que en la celda se presentan pérdidas en forma de calor, y, que el diodo de la juntura no debe ser considerado ideal.
- El Vca varía en función de los niveles de radiación incidente. Para niveles bajos de radiación, Vca cae bruscamente. La Icc y la Pmax, cambian casi proporcionalmente con la variación del nivel de radiación solar incidente.
- Las celdas solares poseen un coeficiente de temperatura inverso para el Vca, básicamente debido a las características de la juntura p-n. Esto provoca que tanto Vca como Vpmp, se reduzcan notoriamente, de forma proporcional, al aumentar la temperatura de la celda. La Icc varía de manera proporcional con la temperatura, pero esta variación es tan pequeña, que se puede considerar la Icc como constante ante variaciones de temperatura en un amplio rango.
- Dependiendo de la hora y de la época del año, el espectro de luz solar presenta desviaciones respecto al espectro estándar en la superficie terrestre.
- El conocimiento de la respuesta, de la característica I-V, de un módulo PV, es necesario para comparar calidad, eficacia, y, estabilidad eléctrica. Esta característica se obtiene conectando el módulo a un resistor cuya resistencia varía entre cero e infinito, mientras se registra los valores I y V, bajo *condiciones específicas CEM o STC*.
- Estas condiciones son de uso generalizado y universal, y, prevén una irradiancia de 1000W/m², una distribución espectral equivalente a AM 1.5G, con una incidencia normal, y, a una temperatura de la célula de 25°C (normas E490, G159, y, G173 de la Comisión Eléctrica Internacional, relacionadas a dispositivos fotovoltaicos).
- Los módulos solares integrados PowerFilm, se clasifican en el grupo de filmes delgados de plástico más flexibles y livianos, en comparación con los paneles solares comunes, lo que los convierte en soluciones óptimas para aplicaciones portables.
- Las láminas solares delgadas se obtienen depositando una capa absorbente de luz solar, hecha de silicio amorfo, sobre un sustrato de plástico flexible. Las células solares individuales se aíslan mediante un proceso de trazado por láser.
- Se decidió diseñar y construir un soporte mecánico que permita ajustar el ángulo de inclinación de la lámina respecto del horizonte, en función de la hora del día, para formar un ángulo de 90°, entre el eje de la lámina y la dirección de la radiación solar incidente.
- Originalmente, se planteó construir la estructura en aluminio, pero al considerar la resistencia de la estructura a la influencia del viento y el costo final, se optó por una variante en hierro, cubierta de por una capa de pintura anticorrosiva para inhibir la oxidación.
- Los fabricantes de módulos solares caracterizan el desempeño de sus productos, a través de una serie de curvas I-V, obtenidas para distintos niveles de radiación, a partir de esta información se puede construir curvas de potencia. Cada curva I-V, contiene un punto de máxima potencia (MPP por las siglas en inglés), en el que se representan las condiciones óptimas de operación, con el mayor rendimiento posible.
- En el marco de este proyecto se planteó conectar la lámina PowerFilm Solar R-28 a una carga variable, y, registrar los datos correspondientes a tensión e intensidad de corriente eléctrica manteniendo uniforme las condiciones de radiación y temperatura al procurar realizar la adquisición de data a la misma hora en días secuenciales de iguales características climatológicas.
- Considerando que la lámina solar proporciona una potencia de aproximadamente 20W, como carga se utilizó resistores cerámicos con una capacidad de disipación de potencia de 20W a 30W.
- Los resultados muestran la aplicabilidad de la metodología propuesta para la obtención de la curva característica IV de la lámina solar.
- Para determinar la inclinación óptima respecto de la horizontal, se obtuvo la característica IV de la lámina en el intervalo de 10° a 60°, cada 10°. La selección del ángulo óptimo de inclinación se basó en la comparación de las características obtenidas. El mejor resultado, se obtuvo para una inclinación de 10° respecto de la horizontal.
- Debido a la variabilidad del clima en las fechas programadas para los experimentos, se decidió continuar con la programación en el valle de Catamayo, cercano a la ciudad de Loja, logrando resultados semejantes a los obtenidos en la ciudad de Loja.
- La curva IV de la conexión en serie de dos láminas solares mostró un incremento en el valor de Vca. Este voltaje se duplicó respecto al observado en la característica IV de una sola lámina. La intensidad de corriente se mantuvo constante.

- La curva IV de la conexión en paralelo de dos láminas solares mostró un incremento en la intensidad de corriente. Esta alcanzó el doble del valor obtenido con una sola lámina. La tensión se mantuvo constante.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Oñate, D. “Cálculo de sistemas fotovoltaicos”. [Online]. Disponible en: <<http://www.diegonate.es>> [Consulta marzode2012].
- [2] Centro de Estudios de la Energía Solar. “La Energía Solar”. [Online]. Disponible en: <<http://www.censolar.es/menu2.htm>> [Consulta mayo de 2012].
- [3] No se reconoce autor. “Energía Solar Fotovoltaica”. [Online]. Disponible en: <<http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/energia-solar-fotovoltaica.html>> [Consulta mayo de 2012].
- [4] Gonzales Arias, A. “Celdas Solares”. [Online]. Disponible en: <<http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vida%20y%20tierra/celdasolar/index.htm>> [Consulta mayo de 2012].
- [5] No se reconoce autor. “Paneles solares: así evolucionan”. [Online]. Disponible en: <http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/10/15/188572.php> [Consulta mayo de 2012].
- [6] Dazne, A. “Láminas Solares” [Online]. Disponible en: <<http://blog.is-arquitectura.es/2007/03/13/laminas-solares/>> [Consulta mayo de 2012].
- [7] Terra. “Energía Solar Fotovoltaica” [Online]. Disponible en: <<http://www.terra.org/articulos/art02211.html>> [Consulta junio de 2012].
- [8] Tu Cargador Solar. “Cargador Solar Universal 5000” [Online]. Disponible en: <<http://www.tucargadorsolar.com/Universales/Cargador-Solar-Universal-5000.html>> [Consulta junio de 2012].
- [9] Soliclima, energía solar. “Energía Solar” [Online]. Disponible en: <<http://news.soliclima.com/noticias/energia-solar/sale-al-mercado-un-cargador-solar-y-eolico-portatil>> [Consulta junio de 2012].
- [10] Tu Cargador Solar. “Ventilador Solar Portátil” [Online]. Disponible en: <<http://www.tucargadorsolar.com/Productos-Solares/Ventilador-Solar-Portatil.html>> [Consulta junio de 2012].
- [11] ISON21. “Solarise, luz portable con energía solar” [Online]. Disponible en: <<http://www.ison21.es/2012/05/12/solarise-luz-portable-con-energia-solar/>> [Consulta junio de 2012].
- [12] Tu Cargador Solar. “Linterna Solar Completa” [Online]. Disponible en: <<http://www.tucargadorsolar.com/Linternas-Solares/Linterna-Solar-Completa.html>> [Consulta junio de 2012].
- [13] HOPE. “Células solares de colorante (Dye Solar Cells)” [Online]. Disponible en: <<http://www.consoliderhope.uji.es/celulaGraztel.php>> [Consulta junio de 2012].
- [14] DYESOL. “DSC Applications” [Online]. Disponible en: <<http://www.dyesol.com/index.php?page=DSC+Applications>> [Consulta junio de 2012].
- [15] DForceSolar. “Celda Solar Tintada con nuevo Record de Eficiencia” [Online]. Disponible en: <<http://www.dforcesolar.com/energia-solar/celda-solar-tintada-con-nuevo-record-de-eficiencia/>> [Consulta junio de 2012].
- [16] Scribd. “Células Solares de Semiconductores Orgánicos Traslúcidos” [Online]. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/77609288/CELULAS-SOLARES-CON-SEMICONDUCTORES-ORGANICOS>> [Consulta julio de 2012].
- [17] Peña, L. “Células solares transparentes: desarrollo actual y aplicaciones” [Online]. Disponible en: <<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1869/1/pfm271.pdf>> [Consulta julio de 2012].
- [18] Bisquert, J. “Células solares de titanio nanoestructurado sensitivizado. Alternativas para la generación fotovoltaica” [Online]. Disponible en: <<http://www.fotovoltaica.com/solarcell.pdf>> [Consulta julio de 2012].
- [19] Castillo Miranda, J. “Sistema Fotovoltaico para Aplicaciones Móviles de Tracción Eléctrica” [Online]. Disponible en: <http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/MemoriaJPCastillo.pdf> [Consulta agosto de 2012].
- [20] Fernández Ferichola, J. “Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivo Portátil” [Online]. Disponible en: <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf> [Consulta agosto de 2012].
- [21] Scribd. “EVE, La energía solar fotovoltaica en el País Vasco” [Online]. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/40217710/energia-solar-fotovoltaica-en-el-Pais-Vasco-EVE>> [Consulta agosto de 2012].
- [22] ASTM. “Normas de la ASTM para determinar el rendimiento fotovoltaico” [Online]. Disponible en: <<http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/Q307/q307julemyr.html>> [Consulta agosto de 2012].
- [23] FLEXSOLARCELLS. “Tecnología de las Celdas Solares Enrollables”. [Online]. Disponible en: <http://www.celdassolaresflexibles.com/index_files/Rollable_Series/Tech_Information_RS.php> [Consulta diciembre de 2012].
- [24] POWERFILM. “Thin Flexible Solar Panels - Thin Film Electronics”. [Online]. Disponible en: <http://www2.tec.ilstu.edu/students/PV_study/CD%20Final/PV%20Product%20Information/powerfilm.pdf> [Consulta febrero de 2013].
- [25] Saiz Jimenez, J. Universidad Politécnica de Valencia “Medición de la curva tensión intensidad de una placa solar fotovoltaica” [Online]. Disponible en: <<http://www.youtube.com/watch?v=YIP1qFJa5tA>> [Consulta diciembre de 2012].
- [26] CONELEC. “ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA”. [Online]. Disponible en: <http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf> [Consulta abril de 20]

