



**Institución Universitaria**

# **Análisis técnico para la implementación de sistemas de generación eléctrica con paneles solares de Grätzel en Colombia**

**Carlos Giovanni Robayo Leal**

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2016



# **Análisis técnico para la implementación de sistemas de generación eléctrica con paneles solares de Grätzel en Colombia**

**Carlos Giovanni Robayo Leal**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Automatización y Control Industrial**

Director:

Sergio Ignacio Serna Garcés, M.Sc.

Línea de Investigación:

Electrónica y Comunicaciones

Grupo de Investigación:

Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

Junio de 2016



*Camila*

*Gracias por tu existencia; es el detonante de mi felicidad, de mi esfuerzo y de mis ganas de buscar lo mejor para ti. Aún a tu corta edad, me has enseñado y me sigues enseñando las mejores cosas de la vida.*

*Andrea*

*Te agradezco por ayudarme a encontrar el lado dulce de la vida. Fuiste la motivación y la voz de aliento que me impulsó a terminar con éxito este proyecto de tesis.*

*A Carlos Arturo y a Mery*

*Quienes me enseñaron a luchar para lograr lo que solo con esfuerzo se alcanza.*

*A mis hermanos*

*Con quienes quiero compartir esta y la próxima vida.*

*A Sergio Ignacio*

*Quien se tomó el trabajo transmitirme muchos de sus conocimientos y quien me ha encaminado con su sabiduría.*

*Muchas gracias*



## Resumen

En esta tesis se realizó inicialmente la comparación entre los sistemas actuales de generación de energía con paneles solares y una nueva tecnología que utiliza celdas de Grätzel; se propuso una metodología de caracterización para estos últimos y finalmente se diseñó y simuló el sistema de generación y control. La comparación mostró la posibilidad técnica de implementar sistemas con celdas de Grätzel teniendo en cuenta la similitud de estas con los sistemas actuales. En la revisión del estado del arte se encontró la inexistencia de estudios del sistema completo de generación de energía con celdas de Grätzel que involucrara tanto las celdas como los componentes de control y de consumo, y en donde se tuvieran en cuenta los factores que ocasionan pérdidas en la potencia suministrada. Se caracterizaron celdas de Grätzel reales y se comprobó el modelo de la etapa de generación; se incluyó el control del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) como técnica de optimización para el funcionamiento del sistema. Las conclusiones del trabajo determinaron la viabilidad técnica de la implementación de estos sistemas en las zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia.

*Palabras clave: Celdas de Grätzel, celdas solares, control de paneles, convertidor conmutado, Dióxido de Titanio, seguimiento del punto de máxima potencia, zonas no interconectadas.*

## Abstract

In this thesis, the comparison between the actual systems of energy generation and a new technology that uses Grätzel cells, was initially made. A methodology of characterization for these systems was proposed. The comparison showed the possibility of implementing systems with Grätzel cells considering the similarity of these with current systems. In the state-of-the-art review, it was found the inexistence of studies of the entire energy generation systems with Grätzel cells involving both the cells as the control and consumption components where the factors causing losses in the power provided were considered. Real Grätzel cells were characterized and the model of generation phase was verified. The Maximum Power Point Tracking control (MPPT), was included as a technique of optimization for the system performance. The conclusions of work determined the technical feasibility of these systems implementation at non-interconnected zones (ZNI) of Colombia.

*Keywords: Grätzel cells, solar cells, control panels, switching converter, Titanium Dioxide, tracking the maximum power point, non-interconnected areas.*



# Contenido

<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Sistemas de generación fotovoltaica con Celdas de Grätzel.....</b>	<b>9</b>
1.1 Características eléctricas I-V y P-V de celdas DSSC .....	14
1.2 Acondicionamiento de la energía generada por el panel .....	17
1.3 Convertidor conmutado DC/DC .....	18
1.3.1 Convertidor elevador tipo Boost.....	21
1.3.2 Convertidor reductor tipo Buck.....	25
1.3.3 Otras estructuras reductoras-elevadoras .....	27
1.3.4 Conexión a la red AC con convertidor DC-AC .....	29
1.4 Estrategias de búsqueda del punto de máxima potencia.....	32
1.4.1 Descripción del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT	32
<b>2. Antecedentes.....</b>	<b>35</b>
2.1 Caracterización de paneles DSSC .....	37
2.2 Control de paneles DSSC .....	38
2.2.2 Estrategias de MPPT para DSSC .....	39
<b>3. Problema de investigación .....</b>	<b>41</b>
3.2 Pregunta de investigación .....	41
3.3 Objetivo general .....	42
3.4 Objetivos específicos .....	42
<b>4. Análisis comparativo de paneles a base de silicio y paneles DSSC .....</b>	<b>43</b>
4.1 Fundamentos generales.....	44
4.1.1 Radiación solar .....	44
4.1.2 Temperatura .....	46
4.1.3 Eficiencia de los paneles solares .....	47
4.2 Características de funcionamiento paneles a base de silicio y paneles DSSC .	49
4.3 Costo de operación y producción de paneles a base de silicio y paneles DSSC	56
4.4 Aplicaciones de paneles a base de silicio y paneles DSSC .....	58
4.4.1 Arreglos de Paneles Solares.....	59
4.4.2 Reconfiguración de arreglos de paneles fotovoltaicos .....	61
4.4.3 Sistema de generación real con celdas de Grätzel. ....	61

4.5	Viabilidad Técnica de paneles DSSC.....	65
<b>5.</b>	<b>Método de caracterización de paneles DSSC .....</b>	<b>68</b>
5.1	Metodología del sistema de caracterización.....	69
5.1.1	Dispositivos y equipos.....	71
5.1.2	Medidor de radiación solar .....	72
5.1.3	Software del sistema .....	75
<b>6.</b>	<b>Control del sistema DSSC.....</b>	<b>81</b>
6.1	Características de operación de DSSC.....	81
6.2	Comprobación del modelo eléctrico .....	83
6.2.1	Revisión de la dependencia de la temperatura .....	86
6.3	Sistema completo de generación con DSSC.....	87
6.3.1	Diseño del convertidor.....	89
6.3.2	Simulación panel DSSC-Convertidor DC/DC.....	91
6.3.3	Sistema de generación con MPPT .....	92
<b>7.</b>	<b>Análisis de resultados y conclusiones.....</b>	<b>100</b>
7.1	Análisis de resultados .....	101
7.2	Conclusiones .....	104
7.3	Actividades futuras de investigación .....	106
<b>Anexo 1. Código Matlab para solucionar la ecuación de los paneles solares .....</b>		<b>116</b>
<b>Anexo 2. Resumen de datos de caracterización de celdas DSSC G4S.....</b>		<b>119</b>
<b>Anexo 3. Familia de curvas de caracterización de celdas DSSC G4S.....</b>		<b>133</b>

## Lista de figuras

Figura 1-1. Esquema general de trabajo de una DSSC .....	10
Figura 1-2. Algunas celdas solares sensibilizadas con colorante .....	10
Figura 1-3. Principio de operación de las celdas solares basadas en $TiO_2$ .....	12
Figura 1-4. (a) Curvas típicas de salida P-V e I-V para DSSC. (b) Circuito eléctrico equivalente.....	15
Figura 1-5. Influencia de los factores ambientales en las características eléctricas de DSSC: (a) influencia de la variación de la radiación sobre la curva I-V de una DSSC; (b) variación de la característica I-V de una DSSC al variar la temperatura. ....	16
Figura 1-6. Regulador lineal básico .....	18
Figura 1-7. Salida convertidor DC/DC básico. (a) Circuito de conmutación. (b) Circuito eléctrico equivalente (c) Tensión de salida. ....	20
Figura 1-8. Circuito de un convertidor DC/DC tipo Boost.....	21
Figura 1-9. Circuito equivalente de un convertidor DC/DC Boost .....	22
Figura 1-10. Intervalos de funcionamiento de un convertidor DC/DC tipo Boost: (a) Tensión en la bobina L; (b) Corriente en la bobina L; (c) Topología ON-OFF. ....	25
Figura 1-11. (a) Circuito equivalente de un convertidor DC/DC tipo Buck; (b) Intervalos de funcionamiento.....	26
Figura 1-12. Forma de onda de un convertidor Buck.....	27
Figura 1-13. Topología del Convertidor Cuk .....	28
Figura 1-14. Topología del Convertidor SEPIC.....	29
Figura 1-15. Señal portadora y señal de referencia sinusoidal .....	30
Figura 1-16. Convertidor DC-AC con neutro.....	30
Figura 1-17. Sistema de generación solar típico con MPPT .....	34
Figura 2-1. Modelo Eléctrico DSSC utilizado por Chae.....	37
Figura 2-2. Modelo Eléctrico DSSC utilizado por Kyaw .....	38
Figura 4-1. Modelo eléctrico resumido de un panel solar de silicio y DSSC.....	47
Figura 4-2. Área efectiva del Factor de Forma .....	48
Figura 4-3. Principio de operación de las celdas solares a base de silicio. ....	50
Figura 4-4. Modelo eléctrico de celdas solares a base de silicio.....	51
Figura 4-5. Modelo eléctrico DSSC utilizado por Chae .....	52
Figura 4-6. Curva de salida de un panel DSSC real de laboratorio (Stathatos, 2012).....	53

Figura 4-7. Gráficas de comportamiento eléctrico simulado en Matlab como solución a la ecuación del modelo eléctrico para celdas reales de silicio y DSSC: (a) Gráfica V-I general de salida de una celda a base de silicio; (b) Gráfica V-I general de salida de una celda DSSC; (c) Gráfica V-P general de salida de una celda a base de silicio; (d) Gráfica V-P general de salida de una celda DSSC.....	54
Figura 4-8. (a) Cargador Notebook, (b) Mochilas solares, (c) estación de carga solar móvil.....	59
Figura 4-9. Arreglo de celdas en el panel solar.....	60
Figura 4-10. Sistema de potencia híbrido con fuentes renovables (Ramos-Paja, González, & Serna-Garcés, 2015).....	63
Figura 5-1. Diagrama de despliegue del sistema de caracterización de paneles fotovoltaicos.....	70
Figura 5-2. Módulo de carga BK Precision 8514.....	71
Figura 5-3. Medidor de radiación solar Mac-Solar.....	73
Figura 5-4. Esquema de flujo de datos de la aplicación.....	76
Figura 5-5. Algoritmo de caracterización de paneles solares.....	78
Figura 5-6. Interfaz del aplicativo en LabView.....	79
Figura 5-7. Programa del aplicativo en LabView.....	80
Figura 6-1. Celdas solares DSSC del fabricante G4S.....	82
Figura 6-2. Curvas de salida I-V de paneles DSSC G4S.....	82
Figura 6-3. Modelo eléctrico de la celda solar DSSC.....	83
Figura 6-4. Modelo eléctrico resultante de la celda solar DSSC.....	84
Figura 6-5. Dependencia de la temperatura de la salida I-V para DSSC.....	87
Figura 6-6. Topología del sistema de generación fotovoltaica con control de MPPT.....	88
Figura 6-7. Simulación del panel DSSC G4S con el convertidor DC/DC.....	91
Figura 6-8. Simulación del sistema con potencia solar de $600 \text{ W/m}^2$ .....	92
Figura 6-9. Topología del circuito MPPT P&O.....	93
Figura 6-10. Simulación del sistema completo de generación y control de energía solar con DSSC a $1000 \text{ W/m}^2$ .....	94
Figura 6-11. Simulación del sistema completo de generación y control de energía solar con DSSC a $600 \text{ W/m}^2$ .....	95
Figura 6-12. Señal cambiante de radiación solar ingresada en la celda DSSC.....	95
Figura 6-13. Señal de corriente de salida del sistema 1.....	96
Figura 6-14. Señal de voltaje de salida del sistema 2.....	96
Figura 6-15. Potencia de salida del sistema 3.....	97
Figura 7-1. Curva de salida V-I general para el panel DSSC.....	102

## Lista de tablas

Tabla 4-1. Disponibilidad anual de energía por regiones en Colombia. ....	45
Tabla 4-2. Potencia fotovoltaica instalada en algunos países de Europa durante 2014 (MWpico).....	46
Tabla 4-3, Valores de los parámetros eléctricos de celdas reales de Grätzel y de silicio.	54
Tabla 4-4. Cargas típicas y su consumo de energía eléctrica diaria (Mediciones propias). .....	62
Tabla 4-5. Resumen de las tablas de eficiencia de paneles solares versión 45 (Barkhouse, y otros, 2015) .....	65
Tabla 5-1. Rango de valores de operación del medidor solar Mac-Solar .....	73
Tabla 5-2. Características del medidor de radiación solar Mac-Solar .....	74
Tabla 6-1. Muestras representativas de DSSC G4S.....	84
Tabla 6-2. Comparación de la corriente de salida del panel real con el modelo eléctrico.	86
Tabla 6-3. Datos de la simulación contra el diseño del sistema DSSC-Convertidor DC/DC .....	92
Tabla 6-4. Resumen de resultados obtenidos con y sin control MPPT .....	99
Tabla 7-1. Valores máximos de salida del panel.....	102
Tabla 7-2. Valores obtenidos en la simulación con paneles DSSC.....	103



# Introducción

Esta tesis se enfoca en determinar la viabilidad técnica de la generación de energía eléctrica en zonas no interconectadas en Colombia empleando paneles de Grätzel. Para ello, se caracterizaron eléctricamente los paneles, se identificaron las aplicaciones en las que se pueden utilizar, así mismo las técnicas de control que se implementan en los dispositivos de procesamiento de potencia asociados. Para la caracterización eléctrica se plantea un método automático de obtención de la curva  $V$  vs  $P$ , que posteriormente puede ser utilizada en el diseño y en la simulación de la estructura panel – convertidor – controlador – carga, con el fin de determinar su funcionamiento bajo condiciones de radiación solar típicas en Colombia.

Se investigan las posibilidades técnicas de la generación eléctrica con esta nueva tecnología, y para esto se desarrolla inicialmente un marco teórico que abarca tanto los paneles solares a base de silicio como los paneles solares a base de dióxido de titanio  $TiO_2$  (las celdas de Grätzel), las estrategias de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT), los tipos de conexión de los distintos paneles solares y los elementos de toma y análisis de datos para el sistema de generación; luego se hace un análisis de la información existente que sintetiza los antecedentes de las tecnologías de generación solar tratadas. Posteriormente, se desarrollan los objetivos propuestos comenzando con un análisis comparativo de las aplicaciones, las características de funcionamiento y técnicas de control de los paneles fotovoltaicos de silicio usados en la actualidad y de los paneles con celdas de Grätzel.

Con los puntos anteriores, se propone una metodología de caracterización de las celdas de Grätzel, se diseña y simula un sistema de control de generación y consumo que garantiza su correcto funcionamiento al interactuar con otros sistemas eléctricos.

Las fuentes de energía alternativa han tomado un gran auge en los últimos tiempos, las pilas de combustible, los aerogeneradores y los paneles fotovoltaicos. Las pilas de combustible, a base de hidrógeno, tienen como ventajas la ausencia de polución y la predictibilidad de la energía almacenada en el combustible, lo que las hace ideales para aplicaciones de precisión como los automóviles eléctricos, su gran desventaja es la ineficiencia en la transformación del hidrógeno. Los aerogeneradores son usados principalmente en aplicaciones estacionarias residenciales, estos dispositivos se encuentran en un amplio rango de potencia y son usados en grandes granjas de generación eólicas conectadas directamente a la red, las cuales requieren de grandes extensiones de campo abierto y presentan riesgos debido a su tamaño y peso; otros sistemas eólicos de baja potencia son utilizados en sectores urbanos o en instalaciones aisladas de las redes eléctricas.

Los paneles fotovoltaicos son usados en aplicaciones residenciales y de inyección a la red, requieren de áreas extensas debido a su baja eficiencia de conversión, aproximadamente entre un 12% y 14%, y su potencia máxima es altamente sensible al sombreado parcial de la superficie de los paneles. Los principales retos al afrontar esta tecnología tienen que ver con la optimización de su punto de trabajo frente a perturbaciones ambientales y de la carga (Ramos, Saavedra, & Arango, 2012).

La energía solar constituye una fuente de energía limpia, abundante y renovable. Se estima que la Tierra recibe cada año una cantidad de energía del Sol equivalente a 10000 veces el consumo mundial de energía (ChenZ, 2007). El funcionamiento de las celdas solares fotovoltaicas está basado en el efecto fotoeléctrico, descrito por Heinrich Hertz en 1887 y posteriormente, la explicación teórica de Einstein en 1905, con la que obtuvo el Premio Nobel de Física en 1921. En una celda solar, la luz absorbida excita los electrones y estos, a su vez, brincan de la banda de valencia hasta la banda de conducción de un semiconductor permitiendo su circulación por un circuito externo.

La primera celda solar fotovoltaica fue construida por Charles Fritts en 1884. Estaba formada por selenio cubierto de una fina capa de oro con una eficiencia del 1%. Sin embargo, en 1954, los Laboratorios Bell construyeron la primera celda solar comercial, basada en silicio (Chapin, Fuller, & Pearson, 1954), desde entonces la investigación en celdas solares no ha cesado y se siguen dando importantes avances. Actualmente en los



laboratorios se han hecho investigaciones de tres generaciones diferenciadas de celdas solares que aportan distintas soluciones al problema de utilizar el sol como fuente de energía (Green M. A., 2002).

La mayoría de las celdas solares que existen en el mercado están basadas en obleas de silicio, que son llamadas tecnología de primera generación; esta ya es una tecnología madura. Los dispositivos de silicio hechos en laboratorios se están acercando al límite de eficiencia teórica, que está entre el 31% y el 41%. (Shockley & Queisser, 1961).

Durante la década de los 80 apareció la llamada tecnología fotovoltaica de segunda generación, cuya principal característica consiste en la sustitución de las obleas de silicio de amplia superficie, por capas delgadas del semiconductor. Algunos de los materiales utilizados con más éxito en las celdas de segunda generación han sido telurio de cadmio, CdTe, silicio amorfo, a-Si, seleniuro de cobre-indio, CIS y seleniuro de cobre-indio-galio CIGS. Para la construcción de estas celdas se aplica una capa fina del material sobre un sustrato de vidrio o cerámica; tienen las mismas limitaciones de eficiencia teórica que las de la primera generación pero se producen a un menor costo. Sin embargo, hasta el momento no se ha conseguido alcanzar con este tipo de celdas la eficiencia que se consigue con las celdas convencionales de silicio. En un futuro cercano esta tecnología promete obtener eficiencias más altas y con costos de producción más bajos (Ababei, Yuvarajan, & Schulz, 2010). Existe una tendencia entre los fabricantes hacia la tecnología de la segunda generación, pero la comercialización de estos dispositivos no se ha extendido, solo existen unos cuantos fabricantes en Europa que serán mencionados más adelante.

Para evolucionar más en esta área, la eficiencia de conversión debe ser aumentada sustancialmente. El límite máximo en la conversión de la luz solar en electricidad es del 93% según las leyes termodinámicas, en contraste con el límite superior para la eficiencia de conversión de una celda solar de primera generación que es a lo sumo del 41%. Lo anterior hace pensar que el rendimiento de las celdas solares podría aumentarse alrededor de dos veces si fueran entendidos y mejorados diferentes conceptos fundamentales concernientes a su diseño para obtener un producto de tercera generación con un bajo costo y alto rendimiento. Esto podría suponer un gran impacto económico haciendo que la

conversión fotovoltaica fuera una de las opciones más baratas para la producción de energía.

Se denominan celdas solares de tercera generación aquellas que permiten eficiencias de conversión eléctrica mayores que las actuales y a un costo de producción mucho menor. Esta es una tecnología en fase de experimentación, por lo que se están aplicando diferentes estrategias con el fin de conseguir aumentos sustanciales en su eficiencia. Una de estas estrategias es la fabricación de celdas multifunción, es decir, celdas construidas utilizando varias celdas de unión simple con distintos semiconductores y así obtener la conversión óptima de fotones de un rango amplio de longitudes de onda (Green, Photovoltaic principles, 2002).

Otras celdas de tercera generación son las celdas solares sensibilizadas con colorante, Dye Sensitized Solar Cells, DSSC por sus siglas en inglés, celdas de Grätzel, son construidas con materiales orgánicos y su base es el dióxido de titanio  $TiO_2$ ; estas celdas son el objeto de estudio de esta Tesis.

Colombia es un país privilegiado en recursos energéticos, pero el suministro de electricidad en zonas apartadas del país sigue siendo un problema para las poblaciones allí asentadas. Hasta ahora el suministro energético en estos lugares se ha basado en tecnologías convencionales que usan fuentes de energía fósil y que producen dióxido de carbono acarreado consigo problemas medioambientales cada vez más graves como la contaminación del aire y del suelo, el aumento de los gases de efecto invernadero y la perforación de la capa de ozono. Las opciones de generación no convencional como la solar, la eólica y la biomasa, en esas zonas apartadas del país, se usan de forma marginal, desaprovechando el enorme potencial de generación de energía sostenible que existe en estos lugares. Una de las mayores oportunidades para el suministro de energía con tecnología solar es en las Zonas no Interconectadas, ZNI, ya que la ubicación geográfica de Colombia facilita la operación de estos sistemas.

En cuanto a legislación colombiana con respecto a la generación de energía fotovoltaica, se cuenta con incentivos tributarios y políticas de financiación de proyectos para promover estas y otras fuentes no convencionales de energía. Por ejemplo existe el decreto 2143

del 4 de noviembre de 2015 en el que se contemplan los siguientes cuatro incentivos tributarios para los proyectos de energías renovables:

- Una deducción del impuesto de renta del 50 por ciento en las inversiones en proyectos de energía renovable por un plazo de cinco años.
- La posibilidad de declarar una depreciación acelerada de los activos relacionados con energía renovable.
- Se exime de la aplicación del IVA a los bienes asociados a proyectos con energías renovables. Y
- La exención del gravamen arancelario.

El ministerio de Minas y Energía indica que con los beneficios tributarios se busca aumentar la rentabilidad de los proyectos, permitiendo que sean atractivos para la inversión.

El decreto 2143 recién aprobado desarrolla la Ley 1715 aprobada en mayo del año pasado para promover los proyectos de energías renovables distintos a los proyectos de gran hidráulica. En Colombia, hasta la fecha apenas se han realizado instalaciones de tecnología solar y eólica de conexión a red. Por otro lado, la primera fuente de energía en el mix de electricidad colombiano es la hidráulica, con aproximadamente el 70 por ciento de la generación, mientras que el resto del mix es cubierto principalmente por las fuentes fósiles.

En el país existe el Plan de Expansión de Referencia en Generación 2015-2029. En este documento se contempla una nueva instalación de energía solar distribuida de 238 megavatios hasta 2029.

En la actualidad, la potencia fotovoltaica de conexión a red es de menos de tres megavatios en Colombia. La potencia de las instalaciones fotovoltaicas aisladas (unos seis megavatios) es todavía mayor que la de las de conexión a red. Las mayores instalaciones fotovoltaicas realizadas hasta la fecha son proyectos en el segmento comercial. Entre dichos proyectos se encuentran varias instalaciones de varios cientos de kilovatios en Bogotá. Por otro lado, hasta agosto de 2015 se habían inscrito en el Registro de Proyectos

de Generación cinco proyectos solares con una potencia en conjunto cercana a 85 megavatios.

En esta tesis se trabaja con el SI (sistema internacional de medidas). Está compuesta por siete capítulos según la distribución que se describe a continuación:

En el Capítulo 1 se hace una reseña histórica de los tipos de paneles solares comerciales convencionales y se adentra en el conocimiento que existe de los paneles DSSC y sus características eléctricas. En este capítulo se resumen además, las particularidades de otros elementos imprescindibles en un sistema de generación de energía solar como son los convertidores de voltaje DC/DC y los DC-AC, de los cuales se describen los modos de funcionamiento y sus propiedades en las distintas topologías. Este acercamiento muestra porque deben ser controlados de forma efectiva para hacer un seguimiento preciso del punto de máxima potencia. Por último, se describen los algoritmos y las técnicas de control que permiten posicionar un sistema de generación en su punto de funcionamiento óptimo.

En el Capítulo 2 se habla sobre los antecedentes, se resume el Estado del Arte de los paneles DSSC, de su caracterización, del control de su operación y de las estrategias de búsqueda del punto de máxima potencia MPPT. Se muestran entonces sus curvas características, sus parámetros comerciales y la influencia que ejercen sobre ellos las variables ambientales como temperatura y radiación solar.

En el Capítulo 3 se trata el planteamiento del problema de investigación, el cual se define con base en los capítulos anteriores y la dificultad que se pretende solucionar con esta tesis. Además se describen los objetivos encaminados a la solución de la pregunta: ¿es viable, técnicamente, la implementación de celdas DSSC en las ZNI de Colombia y bajo qué condiciones? y a la forma en que se pretende dar respuesta incluyendo la investigación, el modelaje y la metodología propuesta que permita cumplir los objetivos propuestos.

Continuando con el desarrollo del informe, en el Capítulo 4, se hace un análisis comparativo entre paneles de silicio y paneles de DSSC, además de validar la posibilidad que los nuevos paneles de Grätzel sean viables técnicamente tal como lo son los de la tecnología actual del mercado.

En el Capítulo 5 se habla del método de caracterización de paneles DSSC y se presenta una solución de software que permite conocer el comportamiento de un sistema de generación con celdas de Grätzel (que son las mismas DSSC).

Por último, el Capítulo 6 trabaja el control del sistema DSSC, se realiza el modelado de las células solares con la pretensión de conseguir un modelo que sea lo suficientemente completo como para recoger todos los parámetros influyentes en el rendimiento de una célula solar DSSC y lo suficientemente simple como para que el sistema se pueda controlar.

La memoria de esta tesis culmina con el análisis de los resultados en el Capítulo 7, los trabajos futuros y las conclusiones, donde se plantean las líneas de investigación que quedan abiertas para actuaciones posteriores partiendo de lo más relevante de este trabajo de investigación.



# 1. Sistemas de generación fotovoltaica con Celdas de Grätzel

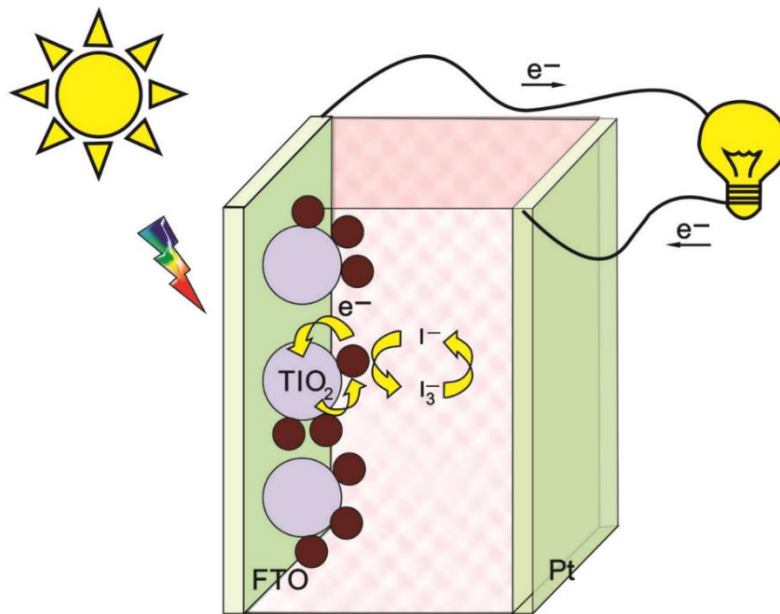
Las celdas de Grätzel fueron inventadas por el científico suizo Michael Grätzel, en el año 1991 (O'Regan, 1991). Esta tecnología que se basa en la utilización de colorantes orgánicos, inicialmente de frutas como la cereza, la mora y la fresa, depositados en un sustrato de dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  y vidrios conductivos que bajo la incidencia de la luz solar producen electricidad (Choi, Griep, & Karna, 2011), (yang-Sian, Lee, Sheng-You, & Chen-hing, 2007) y tienen la gran ventaja que el costo de producción del dióxido de titanio es menor que el costo de los semiconductores necesarios para producir una celda solar a base de silicio.

Entre las opciones de celdas solares de tercera generación, están las celdas solares sensibilizadas mediante un colorante DSSC, Dye Sensitized Solar Cells. Esta alternativa propuesta por Michael Grätzel, implica la absorción de un colorante sobre la superficie del semiconductor de dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$ , que actúa como captador de la energía solar. La excitación inducida por el fotón tiene lugar en el colorante, que transfiere un electrón al semiconductor iniciando el ciclo de corriente.

A diferencia de las celdas solares a base de silicio, el colorante en las celdas de Grätzel extiende el rango de absorción de luz hacia longitudes de onda mayores, hacia la zona del visible, el esquema general de trabajo de este tipo de celdas se muestra en la Figura 1-1.

La principal ventaja que ofrece este tipo de celdas es que sus costos de fabricación son mucho menores que los de las celdas convencionales basadas en silicio. Además pueden imprimirse fácilmente sobre superficies flexibles y pueden construirse paneles portátiles, semitransparentes, de colores y decorativos.

Figura 1-1. Esquema general de trabajo de una DSSC



Aunque esta es una tecnología relativamente nueva ya existen aplicaciones comerciales que se abastecen de energía solar por medio de celdas DSSC y por sus características de flexibilidad, variedad de colores y de formas. El futuro de estas celdas se encuentra en nuevas aplicaciones que pasan por la decoración o por su integración en elementos arquitectónicos, como se ve en la Figura 1-2 y debido al uso de materiales transparentes podrán diseñarse y construirse, por ejemplo, ventanas de colores que, mientras dejan pasar la luz, la aprovechan para generar electricidad.

Figura 1-2. Algunas celdas solares sensibilizadas con colorante



La tecnología fotovoltaica tiene ventajas importantes si es comparada con las tecnologías de generación de electricidad convencionales. Se pueden diseñar soluciones fotovoltaicas



para una gran variedad de aplicaciones y pueden ser usadas de forma centralizada o para la generación de energía distribuida, también pueden funcionar independientes de la red eléctrica, lo que es una gran ventaja para las comunidades rurales en las ZNI que carecen de infraestructura básica y en donde se tiene la tarea de garantizar un abastecimiento de electricidad autónomo independiente de la red eléctrica pública, teniendo en cuenta que no hay ninguna limitación técnica en cuanto a la potencia eléctrica que pueden producir las celdas solares, pues sólo se limita por el número de módulos instalados. No se ha encontrado hasta el momento ningún sistema documentado con celdas DSSC en las ZNI de Colombia.

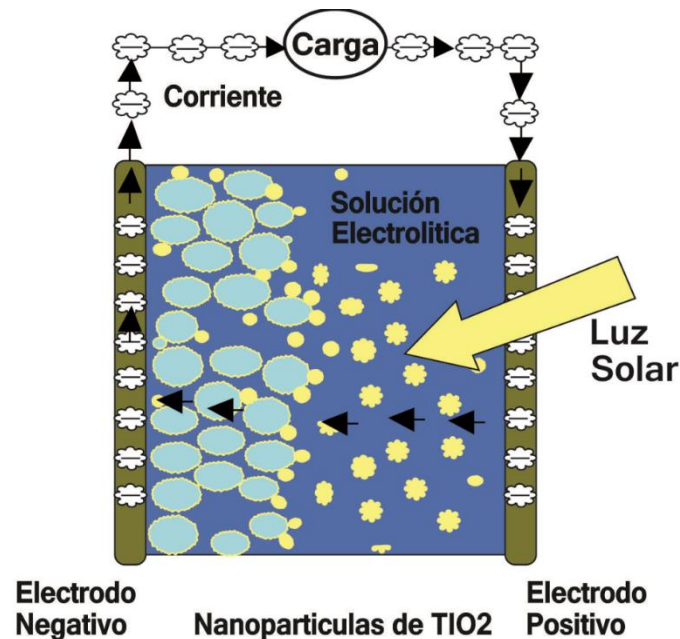
En general el funcionamiento de las celdas solares de Grätzel o DSSC es el siguiente: la luz solar pasa a través de un electrodo transparente y un tinte sensible a la luz impregnado en el electrodo contrario la absorbe; en ese momento los electrones pasan a un estado excitado y pueden saltar desde el tinte hasta la banda de conducción de las moléculas del  $\text{TiO}_2$ . En el electrodo contrario el electrón se difunde desde el  $\text{TiO}_2$  hacia el vidrio conductor y desde allí es llevado de regreso al electrodo inicial a través del circuito; después de haber perdido un electrón la molécula del tinte se encuentra oxidada, es decir, tiene un electrón menos que antes. La molécula del tinte recupera su estado inicial cuando el electrón se inyecta nuevamente por medio del electrodo inicial. De esta manera el proceso se transforma en un ciclo que genera una corriente eléctrica (O'Regan & Grätzel, 1991); el proceso se representa gráficamente en la Figura 1-3

En su forma más básica, este tipo de celda está compuesta por un electrolito de tinte fotosensible, una capa de nano-cristales de dióxido de Titanio y dos placas de vidrio, electrodo y contra-electrodo, las cuales están recubiertas con material conductor transparente. Industrialmente, el contra-electrodo está recubierto por un catalizador, por ejemplo Pt, platino, para acelerar la reacción con el electrolito. La capa de  $\text{TiO}_2$ , que tiene un tamaño de partícula entre 5 y 20 nanómetros aproximadamente, se recubre sobre el otro electrodo, es encapsulado entonces el  $\text{TiO}_2$  con el líquido electrolito entre las placas de vidrio conductor (Tinihaha, Huranus, & Darma, 2010).

Un proceso clave en el mecanismo de este tipo de celda es la inyección electrónica desde el colorante hasta la banda de conducción del semiconductor. Este proceso puede ocurrir

por medio de dos mecanismos diferentes dependiendo del tipo de celda, existen celdas DSSC de tipo I y de tipo II.

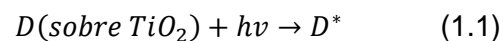
Figura 1-3. Principio de operación de las celdas solares basadas en TiO<sub>2</sub>



En las celdas solares DSSC de tipo I, la inyección electrónica se lleva a cabo mediante un mecanismo indirecto; la radiación solar produce la excitación del colorante y, posteriormente, se produce la inyección del electrón excitado desde el colorante hasta la banda de conducción del semiconductor.

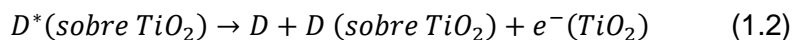
En las celdas DSSC de tipo II, la inyección electrónica se hace en un solo paso, donde la radiación produce una transición directa del electrón desde el colorante hasta la banda de conducción del semiconductor (Prezhdo, Duncan, & Prezhdo, 2007).

El principio de funcionamiento de una DSSC de tipo I es el siguiente: Al incidir luz sobre el foto-electrodo la radiación es absorbida por el colorante  $D$  (el TiO<sub>2</sub> es transparente a la luz visible) que pasa a su estado excitado ( $D^*$ ) como lo indica la ecuación 1.1:

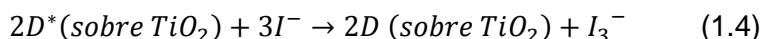
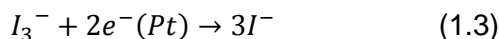


Donde  $h\nu$  representa la energía del fotón.

A partir del estado excitado del colorante ( $D^*$ ) se produce la inyección electrónica hasta los estados en la banda de conducción del  $TiO_2$  y a su vez los electrones se difunden a través de las nano-partículas hasta el sustrato conductor como lo indica la ecuación 1.2:



El circuito se cierra externamente en el contra-electrodo donde los electrones reducen la energía de  $I_3^-$  a  $I^-$ , de esta forma se repondrán los electrones en el nivel desocupado en el colorante, cerrando el ciclo de corriente como se ve en la ecuación 1.3 y en la ecuación 1.4:



Durante este ciclo se producen procesos no deseados que suponen una pérdida de eficiencia de la celda solar.

Para obtener buenas eficiencias de conversión de energía solar en energía eléctrica, es necesario que los procesos de inyección mostrados en la ecuación (1.2) y de regeneración en la ecuación (1.4) estén cinéticamente favorecidos con respecto a procesos de nuevas mezclas (Chen, Lee, Tsai, & Ting, 2007).

Con el  $TiO_2$  se absorbe además una pequeña fracción de los fotones solares de la región ultravioleta del espectro (Bisquert, Cahen, Hodes, Ruhle, & Zaban, 2004). La placa usada como electrodo se sumerge en una mezcla de tinte fotosensible de Rutenio o Polipiridina, también llamados sensibilizadores moleculares; posteriormente se hace una placa separada con una fina capa del electrolito repartido en una hoja conductora, por lo general es de metal de platino, luego las dos placas se unen y son selladas para prevenir la fuga del electrolito. La construcción las placas es bastante simple y existen kits disponibles para construirlas (Solaronix, 2007).

La principal desventaja para la producción de las DSSC es el uso del electrolito líquido porque tiene problemas de estabilidad con la temperatura; pues si es baja, el electrolito se puede congelar, poniendo fin a la producción de energía y aumentando la posibilidad de daño físico, y si son temperaturas altas, hacen que el líquido se expanda, por lo que el sellado de los paneles puede romperse. Otra desventaja es que el Rutenio es un material costoso y la fabricación de vidrio o de plástico para el contacto son necesarios para producir una DSSC; un tercer inconveniente es que la solución de electrolito contiene compuestos orgánicos volátiles, los solventes deben ser cerrados con cuidado, ya que son peligrosos para la salud humana y el medio ambiente. Esto, junto con el hecho que los disolventes penetran los plásticos han demorado la integración de estos componentes en estructuras flexibles (Science Daily, 2008), con lo que se muestra que el cambio del electrolito líquido a uno sólido sería un avance importante.

En uno de los métodos de fabricación de celdas DSSC es impregnada una película de platino con dióxido de titanio de 3  $\mu\text{m}$  de espesor usado un adhesivo termo-endurecible como el Surlyn, esta acción es repetida cinco veces a una temperatura de 125 °C durante diez minutos, luego se deposita en una solución de colorante por más de doce horas para que absorba el suficiente colorante y se plastifican luego todos los componentes a 450 °C durante 30 minutos. Por último se limpia varias veces la superficie con etanol.

## 1.1 Características eléctricas I-V y P-V de celdas DSSC

Una celda solar puede ser modelada como una fuente de corriente que depende de la radiación solar y la temperatura (Kyoung, y otros, 2012), la relación entre la temperatura y la radiación produce características no lineales de corriente-voltaje. Curvas típicas I-V y P-V en la salida de celdas solares DSSC se muestran en la Figura 1-4 (a).

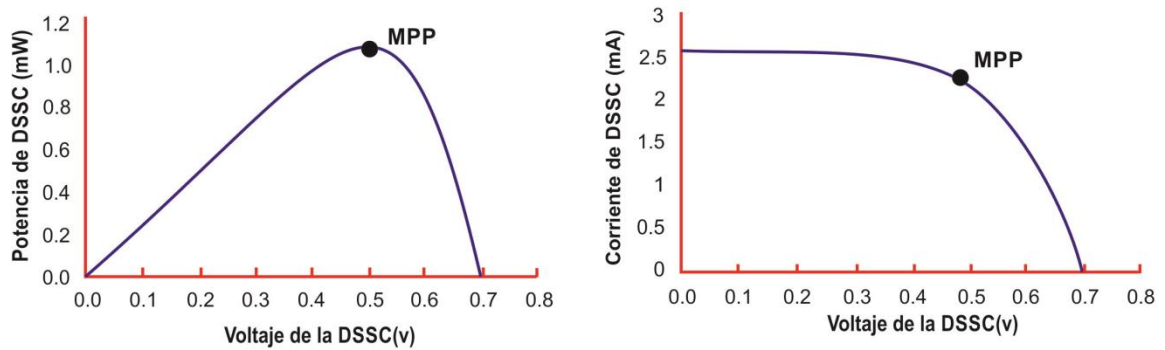
El modelo eléctrico teórico genérico que representa estos dispositivos es el mismo que el de los celdas solares convencionales (Aboul & Ahmed, 2008), (en secciones posteriores se profundizará en el tema), este es mostrado en la Figura 1-4 (b).

La aplicación de las leyes de Kirchoff al circuito nos lleva a las expresiones siguientes:

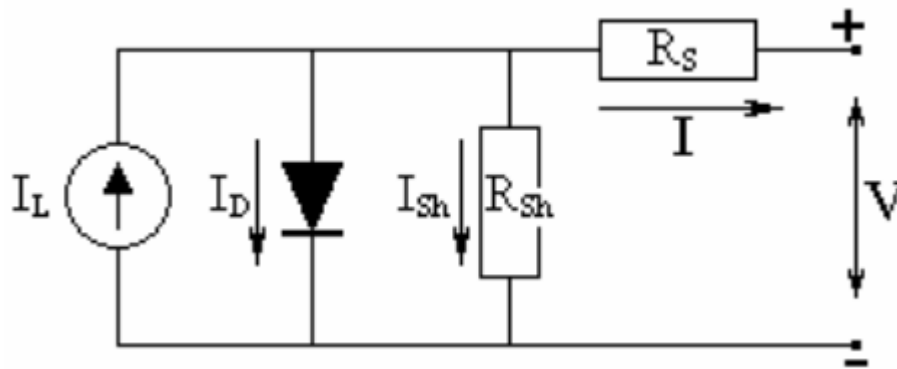
$$I = I_l - I_D - I_{sh} \quad (1.5)$$

$$I = I_l - I_o(e^{((V + IR_s)/AkT)} - 1) - V + IR_s/R_{sh} \quad (1.6)$$

Figura 1-4. (a) Curvas típicas de salida P-V e I-V para DSSC. (b) Circuito eléctrico equivalente



(a)



(b)

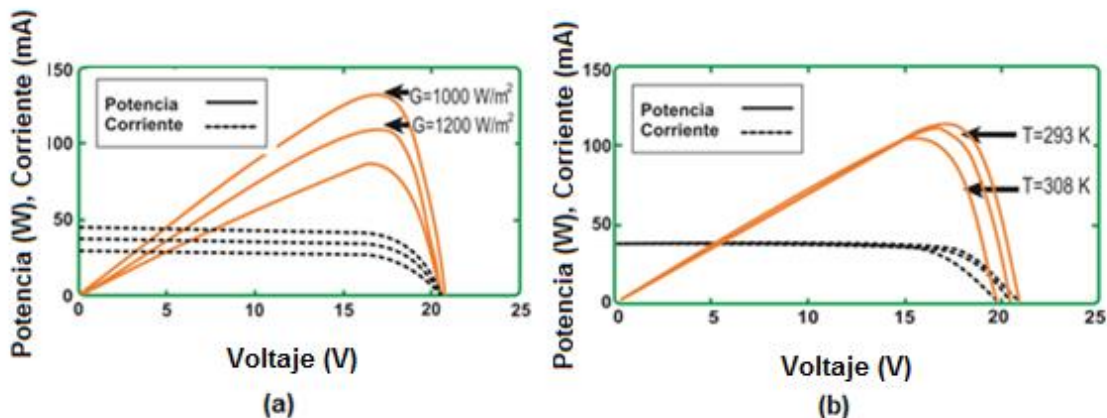
Esta última ecuación representa entonces el comportamiento de salida de la celda solar, en donde la circulación de electrones en un solo sentido se representa con un diodo en el que  $AkT$  representan el área, la constante de Boltzmann y la temperatura respectivamente; una fuente de corriente en paralelo representa la corriente fotogenerada, las corrientes de fuga de las distintas uniones se representan con una

resistencia en serie  $R_s$  y la caída de potencial proporcional a la intensidad que circula debida a la resistencia de los contactos y cables de conexión es representada por una resistencia en paralelo  $R_{sh}$ .

La curva característica I-V del generador fotovoltaico se ve afectada por factores ambientales tales como la intensidad de iluminación de la radiación solar ( $G$ ), la temperatura ( $T$ ) y la distribución espectral de la luz solar. En general, la radiación afecta principalmente la corriente, de forma que se puede considerar que la corriente de cortocircuito (ISC) del generador fotovoltaico es proporcional a la radiación. En la Figura 1-5 (a) se muestra la influencia de la variación de la radiación sobre la curva I-V para un módulo DSSC a una temperatura constante de  $50^\circ\text{C}$ .

La temperatura afecta principalmente los valores de voltaje de la característica I-V y tiene su mayor influencia en el voltaje de circuito abierto (VOC), aunque también modifica el valor del punto de máxima potencia, que en la Figura 1-5 (b) muestra la variación de la característica I-V de un generador fotovoltaico DSSC al variar la temperatura manteniendo la radiación constante ( $1000\text{ W/m}^2$ ).

Figura 1-5. Influencia de los factores ambientales en las características eléctricas de DSSC: (a) influencia de la variación de la radiación sobre la curva I-V de una DSSC; (b) variación de la característica I-V de una DSSC al variar la temperatura.



Existen tres coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  que representan la variación de los parámetros fundamentales de la característica I-V del generador fotovoltaico. Así,  $\alpha$  expresa la

variación de la corriente de cortocircuito con la temperatura,  $\beta$  la variación del voltaje de circuito abierto y  $\gamma$  la variación de potencia del MPP.

En general, los fabricantes de módulos o paneles fotovoltaicos incluyen en sus fichas técnicas tres coeficientes, los siguientes valores suelen ser comunes:

$$\alpha = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} \approx 0,05\% \quad \beta = \frac{\partial V_{OC}}{\partial T} \approx -0,21\% \quad \gamma = \frac{\partial P_{MPP}}{\partial T} \approx -0,27\% \quad (1.7)$$

Los valores presentados en (1.7) son típicos para dispositivos DSSC expresados en porcentaje.

Las condiciones climatológicas de referencia y de uso más generalizado, están dadas por:

- Radiación solar:  $1000 \text{ W/m}^2$
- Distribución espectral AM 1.5G.
- Incidencia: normal.
- Temperatura de la célula  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Normalmente los parámetros característicos de los módulos o células incluidos en las fichas de especificaciones técnicas de los fabricantes vienen definidos en estas condiciones. Sin embargo, pocas veces los módulos fotovoltaicos trabajan en estas condiciones, ya que un nivel de radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  puede alcanzarse si acaso al mediodía, además, los módulos adquieren temperaturas de más de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 1.2 Acondicionamiento de la energía generada por el panel

Un panel solar es una fuente de voltaje cuya potencia entregada depende de condiciones ambientales como la radiación solar y la temperatura, las cuales tienen una gran variación de la intensidad en el transcurso del día, que afectan tanto al voltaje como a la corriente suministrada. Para esto es necesario acondicionar la señal de salida del panel de tal forma que no degrade la operación del sistema ni deteriore los equipos que actúan como carga cuando el sistema es conectado formando un circuito. El acondicionamiento de esta fuente depende de la utilización que se haga del suministro de energía; si la energía va a ser

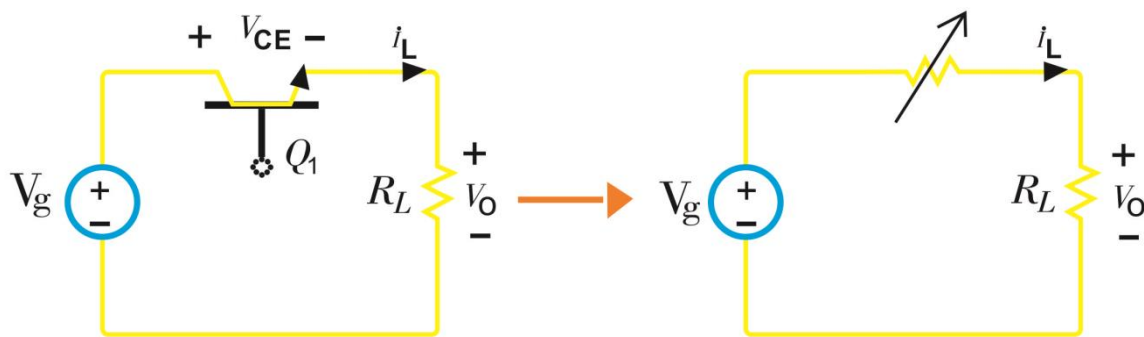
consumida por equipos o aparatos que consumen corriente alterna se requiere un convertidor DC/AC también llamado Inversor de Corriente o simplemente Inversor; si por el contrario, el destino de la energía es para consumir o almacenar corriente directa, se requiere un convertidor DC/DC que permite elevar o reducir el nivel de voltaje y lo mantenga constante mientras el panel tenga la capacidad de mantener la corriente que se le exige o en caso contrario detenga el suministro. Se resumirán en los próximos párrafos estos dos tipos de convertidores y su relación con los paneles solares convencionales y los DSSC.

### 1.3 Convertidor conmutado DC/DC

Es un dispositivo que transforma corriente continua de una tensión a otra; este enciende y apaga su salida con cierta frecuencia de conmutación para controlar la tensión que entrega; para que el dispositivo sea eficiente las frecuencias de conmutación deben ser altas para reducir el rizado de la señal de salida de tal forma que sea posible reducir la capacitancia de los condensadores que se deben utilizar, para mejorar el volumen, el peso y el precio del dispositivo. En esta sección se describirán algunas topologías de convertidores DC/DC.

Para convertir una tensión continua a otra de valor más bajo se puede utilizar el circuito básico mostrado en la Figura 1-6.

Figura 1-6. Regulador lineal básico





El voltaje de salida se registra en la ecuación (1.8):

$$V_O = i_L * R_L \quad (1.8)$$

Donde la corriente de carga está controlada por el transistor Q1. Ajustando la corriente de base del transistor se puede controlar la tensión de salida en el rango comprendido entre 0 y  $V_g$ . Se puede ajustar la corriente de base para compensar las variaciones de la tensión de alimentación o las variaciones de la carga y, de esta manera, regular la salida. Este tipo de circuito se denomina convertidor DC/DC lineal o regulador lineal, porque el transistor opera en la región lineal, en lugar de la zona de saturación o de corte. De hecho, el transistor se comporta como una resistencia variable.

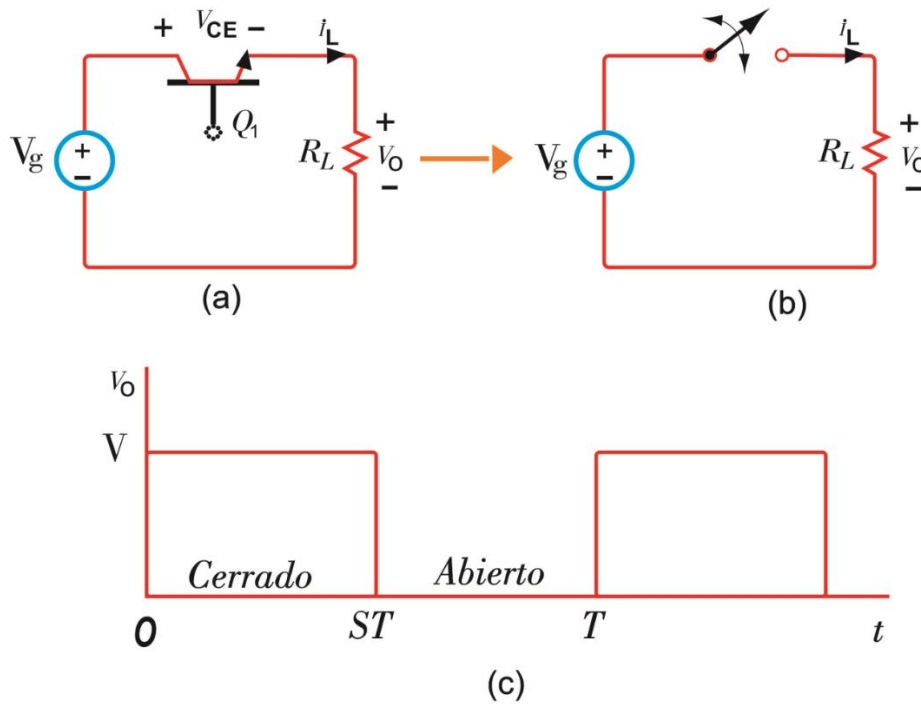
Aunque esta es una manera sencilla de reducir una tensión de alimentación continua y regula la salida, la baja eficiencia de este circuito es una desventaja importante en las aplicaciones de potencia. La pérdida de potencia en el transistor es la causante de la ineficiencia de este circuito, por ejemplo, si la tensión de salida es una cuarta parte de la tensión de entrada, la resistencia de carga absorberá una cuarta parte de la potencia del generador, lo que representa una eficiencia del 25%. El transistor absorbe el 75% de la potencia restante entregada por el generador pues las tensiones de salida menores producen eficiencias todavía más pequeñas.

Una alternativa más eficiente al regulador lineal es el convertidor conmutado, en el cual el transistor funciona como un interruptor electrónico de estado sólido al estar completamente activado o completamente desactivado (saturación o corte para un transistor bipolar BJT). Este método, denominado Modulación por Ancho de Pulsos (PWM), consiste en emplear un periodo de conmutación  $T$  constante compuesto de un tiempo en que se encuentra activo TON y uno en el que se encuentra inactivo TOFF, así  $T = TON + TOFF$ , de forma que variando el tiempo de conducción TON sea posible controlar la tensión media de salida como se muestra en la Figura 1-7.

El parámetro ciclo de servicio o ciclo trabajo  $\delta$  (Duty Cycle) es la fracción entre 0 y 1 que, en el periodo  $T$ , el interruptor está cerrado ( $\delta = 1$  si está cerrado todo el intervalo  $T$ ) y está definido por la ecuación (1.9), siendo  $f$  la frecuencia de conmutación en hercios para  $T$  en segundos,

Si se supone que el interruptor que da la salida de tensión de la Figura 1-7 (c) es ideal, la salida será igual a la entrada cuando esté cerrado y nula cuando esté abierto. La media o componente continua de la salida se muestra en la ecuación (1.10):

Figura 1-7. Salida convertidor DC/DC básico. (a) Circuito de conmutación. (b) Circuito eléctrico equivalente (c) Tensión de salida.



$$\delta = \frac{T_{ON}}{T_{ON}+T_{OFF}} = \frac{T_{ON}}{T} = T_{ON} * f \quad (1.9)$$

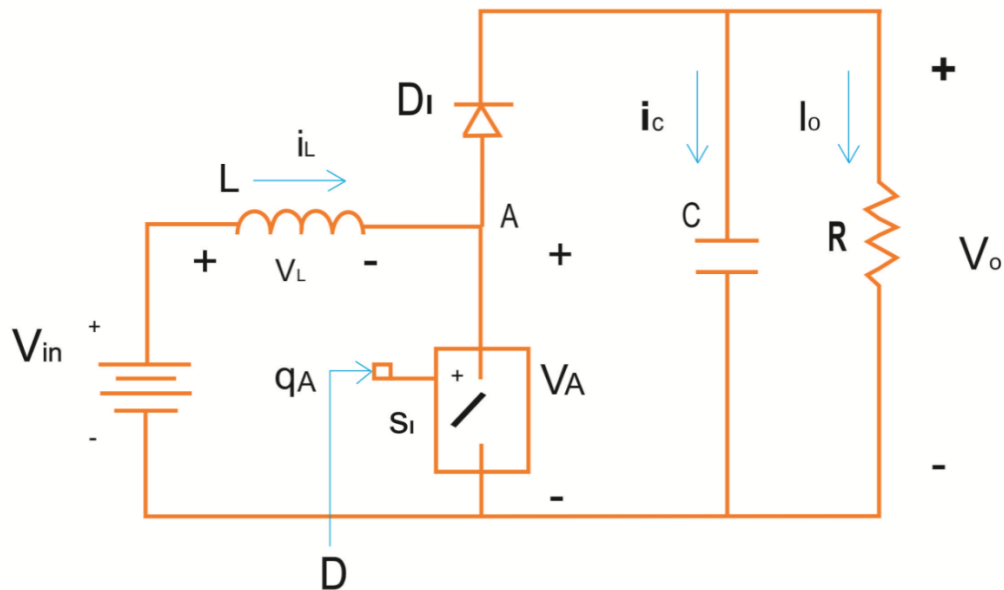
$$V = \frac{1}{T} \int_0^T v_0(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} V_g dt = \delta V \quad (1.10)$$

La componente continua de la salida se controla ajustando el ciclo de trabajo  $\delta$ . La potencia absorbida por el interruptor ideal es cero, de modo que cuando el interruptor está abierto no pasa corriente por él y cuando está cerrado no cae tensión en el mismo, por lo tanto, la carga absorbe toda la potencia y la eficiencia de energía es un 100%.

### 1.3.1 Convertidor elevador tipo Boost

El convertidor tipo Boost (o elevador) es un convertidor de potencia en el cual la salida es una tensión continua mayor que la entrada, pero la corriente de salida es menor que la de entrada; la Figura 1-8 esquematiza el circuito eléctrico equivalente de este tipo de convertidores.

Figura 1-8. Circuito de un convertidor DC/DC tipo Boost



Dónde:

$V_o$ : Voltaje de la resistencia

$V_L$ : Voltaje en el inductor

$D$ : Ciclo de trabajo

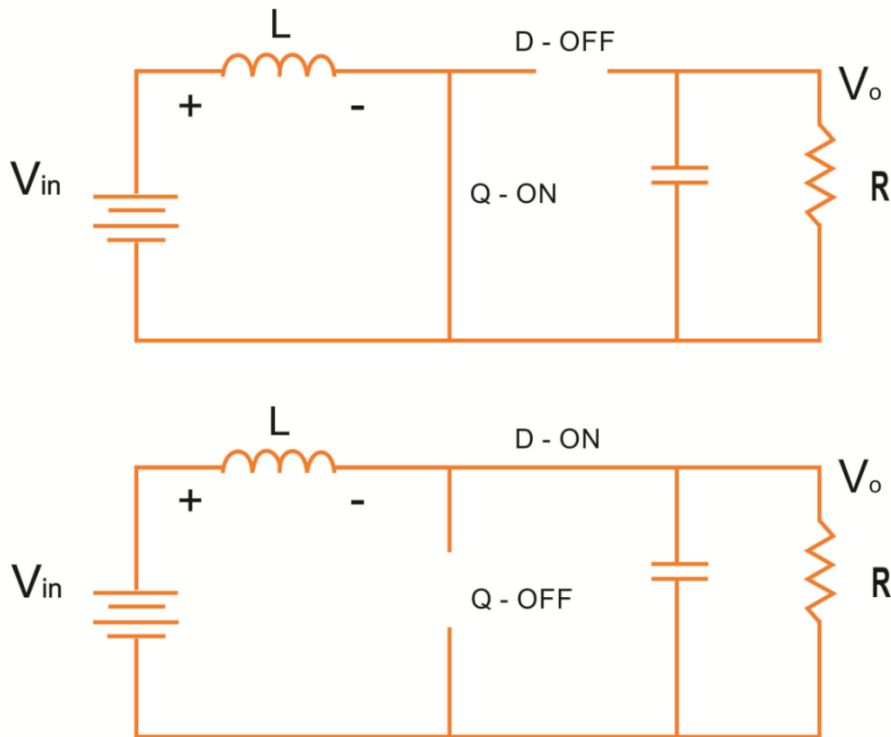
$V_{in}$ : Voltaje de la fuente

$V_A$ : Voltaje en el switch

El principio de funcionamiento del convertidor Boost está basado en los dos estados distintos que puede tener el sistema y que dependen del interruptor  $S$ . Cuando el interruptor está cerrado (ON) la bobina  $L$  almacena energía de la fuente, en ese momento la carga es alimentada por el condensador  $C$ . Cuando el interruptor está abierto (OFF) el

único camino para la corriente es a través del diodo D, circula por el condensador hasta que se carga completamente mientras continua la alimentación a la carga. Ambos estados se representan en la Figura 1-9

Figura 1-9. Circuito equivalente de un convertidor DC/DC Boost



El voltaje de salida operando en condiciones estacionarias, en el caso de un convertidor ideal, se puede calcular de la siguiente forma:

Cuando el interruptor  $S$  está cerrado, el voltaje de entrada ( $V_{in}$ ) aparecerá entre los extremos del inductor y ocasionará un cambio de corriente ( $I_L$ ) a través del mismo durante un período ( $t$ ), según la fórmula dada en la ecuación (1.11):

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_{in}}{L} \quad (1.11)$$

Al final de este cambio, el incremento en corriente a través del inductor se presenta en la ecuación (1.12):

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{D \cdot T} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} \quad (1.12)$$

En donde D es el ciclo de trabajo, que representa la fracción del periodo T durante el cual el conmutador S está conectado. Por lo tanto, D varía entre cero (S siempre OFF) y uno (S siempre ON).

Cuando el interruptor S está abierto, la corriente del inductor fluye a través de la carga. Si se considera que no hay caída de tensión en el diodo y se tiene un condensador suficientemente grande en voltaje para mantenerlo constante, la evolución de  $I_L$  es:

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (1.13)$$

Por lo tanto, la variación de  $I_L$  durante el periodo en que el interruptor está abierto es:

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_0^{(1-D)T} \frac{(V_i - V_o)}{L} dt = \frac{(V_i - V_o)(1-D)T}{L} \quad (1.14)$$

Si se considera que el convertidor opera en condiciones estacionarias, la cantidad de energía almacenada en cada uno de sus componentes, debe ser la misma al principio y al final del ciclo completo de conmutación. La energía almacenada en el inductor está dada por:

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \quad (1.15)$$

De este modo la corriente de inductor tiene que ser la misma al principio y al final del ciclo de conmutación, lo que puede ser expresado como:

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (1.16)$$

Sustituyendo  $\Delta I_{L_{on}}$  y  $\Delta I_{L_{off}}$  por sus expresiones, queda:

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (1.17)$$

Esto puede simplificarse en:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (1.18)$$

Lo que nos dice que el ciclo de trabajo es:

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (1.19)$$

De esta expresión, se puede deducir que el voltaje de salida es siempre mayor que el de entrada, ya que el factor activo D está entre cero y uno y que se incrementa con D, De acuerdo con la teoría, hasta el infinito según D se acerca a uno. Es por esto que normalmente a este convertidor a veces se le llama "step-up converter"

### 1.3.1.1 Modo de conducción continuo y discontinuo (CCM y DCM)

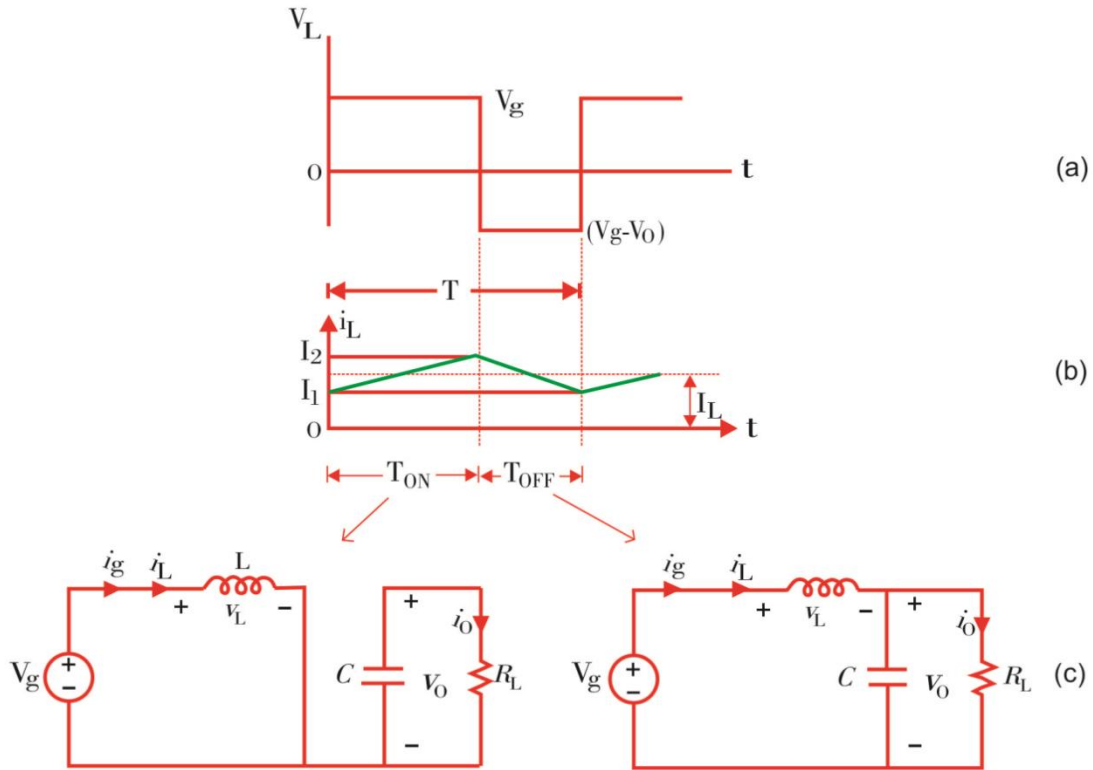
En la Figura 1-10, se muestran las formas de onda para la tensión y la corriente por la inductancia para los intervalos de conducción y de no conducción del interruptor, donde la corriente por el inductor  $i_L$  nunca se anula:

- Durante el intervalo de conducción del interruptor, la corriente por la bobina crece linealmente. Aquí, el diodo se encuentra polarizado inversamente y el resultado es una tensión  $V_L = V_g$  positiva y constante en el inductor que hace que la corriente crezca de forma lineal. Esta situación se mantiene mientras el interruptor está cerrado.
- Durante el intervalo de no conducción del interruptor, el diodo de libre circulación conduce la corriente de la bobina. Aquí la tensión del inductor es  $V_L = V_g - V_o$ , donde  $V_o > V_g$  y por lo tanto, la intensidad decrece linealmente con pendiente:

$$m = \frac{V_g - V_o}{L} \quad (1.20)$$

El funcionamiento en el modo de conducción discontinua se establece cuando la corriente por la inductancia se anula durante el intervalo de no-conducción del interruptor.

Figura 1-10. Intervalos de funcionamiento de un convertidor DC/DC tipo Boost: (a) Tensión en la bobina L; (b) Corriente en la bobina L; (c) Topología ON-OFF.



### 1.3.2 Convertidor reductor tipo Buck

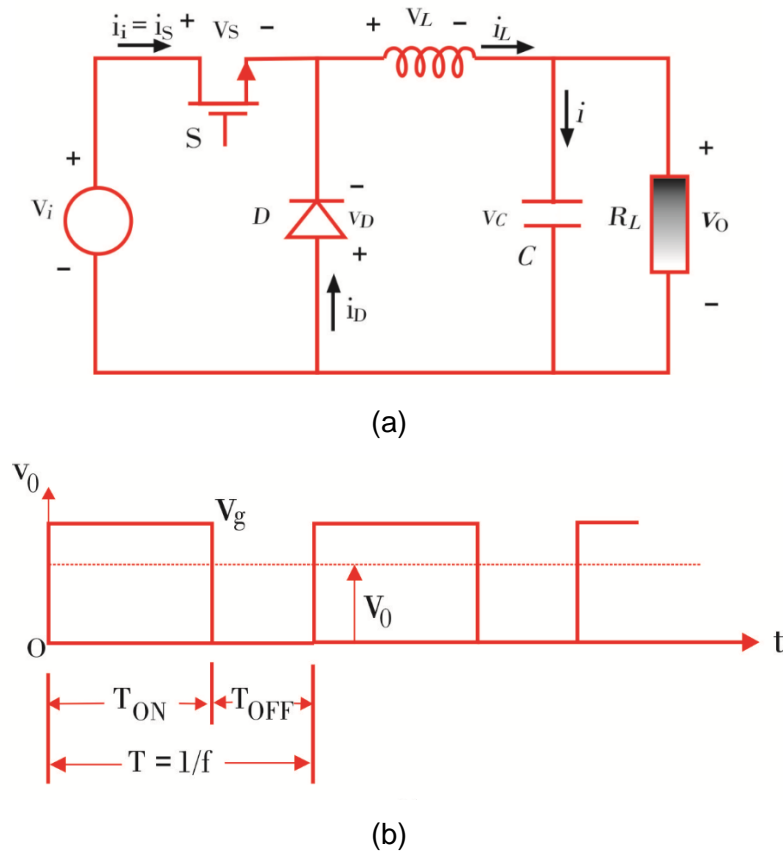
Este convertidor proporciona una tensión media de salida menor que la tensión de entrada. En la Figura 1-11, (a) muestra la topología de este convertidor, la cual incluye un diodo de libre circulación y un filtro de salida formado por una inductancia L y un condensador C.

El convertidor funciona de la siguiente forma:

- En el periodo de conducción del interruptor, la fuente  $V_g$  suministra energía tanto a la carga como a los elementos del filtro paso bajo LC.
- Durante el intervalo de no-conducción del interruptor, la corriente del inductor L circula a través del diodo de libre circulación, transfiriendo parte de su energía hacia la carga.

- Dependiendo de la corriente por la inductancia, el convertidor presenta dos modos distintos de funcionamiento (Erickson & Maksimovic, 2001).
- Modo de conducción continuo (CCM, Continuous Conduction Mode). En este modo, la corriente que circula a través de la inductancia nunca se anula durante todo el periodo de conmutación  $T$ .

Figura 1-11. (a) Circuito equivalente de un convertidor DC/DC tipo Buck; (b) Intervalos de funcionamiento



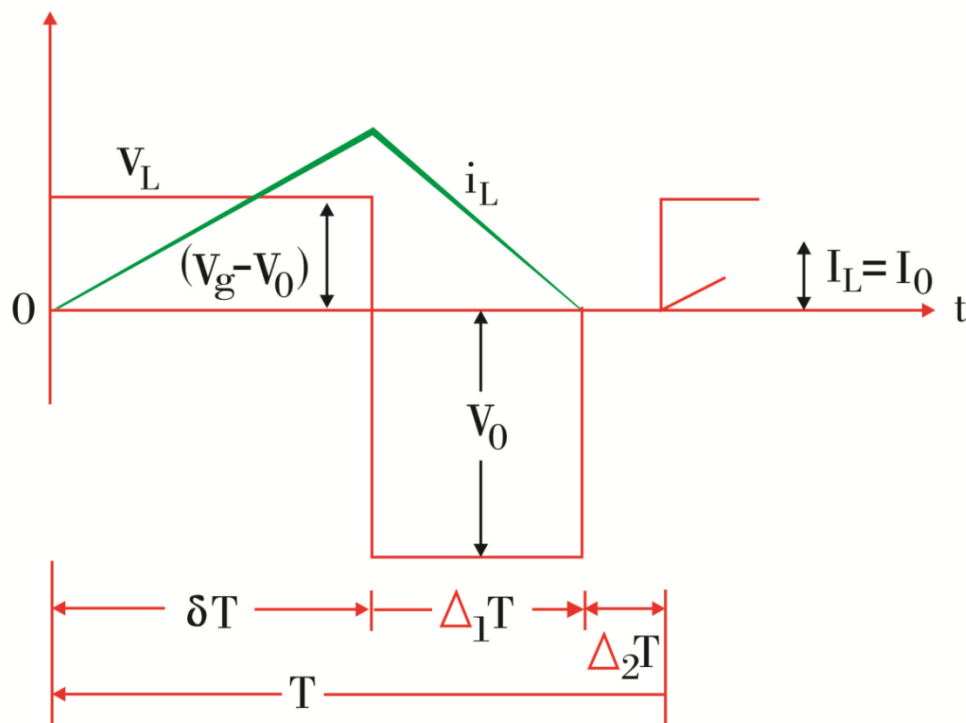
Al obtener la expresión de la tensión de salida del convertidor funcionando en el modo de conducción discontinuo, se utiliza el mismo razonamiento que para el modo continuo, es decir, dividiendo su funcionamiento en dos intervalos: el intervalo de conducción del interruptor y el intervalo de no-conducción, posteriormente éstos se relacionan mediante las condiciones finales e iniciales de uno y otro respectivamente.



En la Figura 1-12 se muestra la corriente por el inductor, suponiéndose que se hace cero durante el intervalo  $\Delta 2T$ :

- Durante el intervalo de conducción del interruptor ( $0 < t < T_{ON}$ ), la corriente por la inductancia crece linealmente. En este caso desde un valor inicial cero.
- Durante el intervalo de no conducción del interruptor ( $T_{ON} < t < T$ ), la corriente por la inductancia decrece linealmente y al final del intervalo  $\Delta 1T$  se hace cero, permaneciendo en dicho valor durante  $\Delta 2T$ .

Figura 1-12. Forma de onda de un convertidor Buck

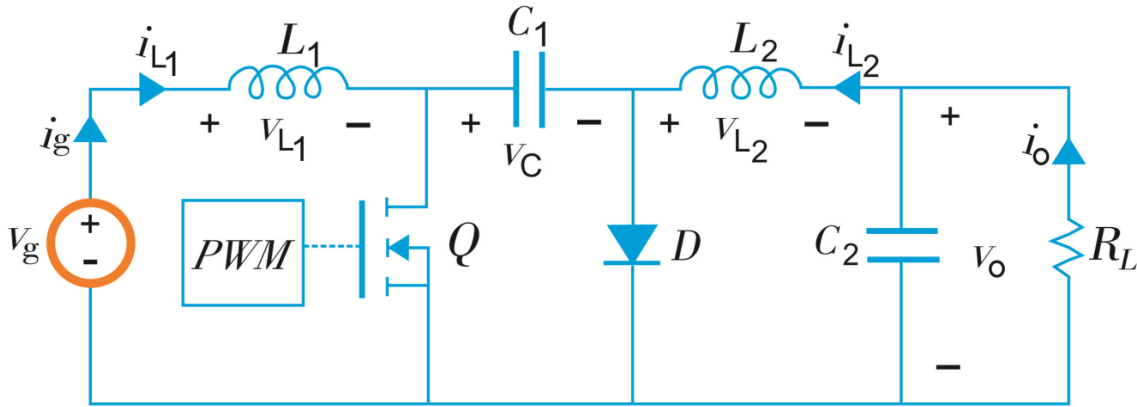


### 1.3.3 Otras estructuras reductoras-elevadoras

Existen otras estructuras de convertidores DC/DC como el Convertidor Cuk (Muhammad H, 2004), mostrado en la Figura 1-13, que también permiten obtener una tensión de salida mayor o menor que la tensión de entrada.

Siguiendo el mismo razonamiento que para los convertidores anteriores, su funcionamiento puede ser dividido en dos intervalos:

Figura 1-13. Topología del Convertidor Cuk

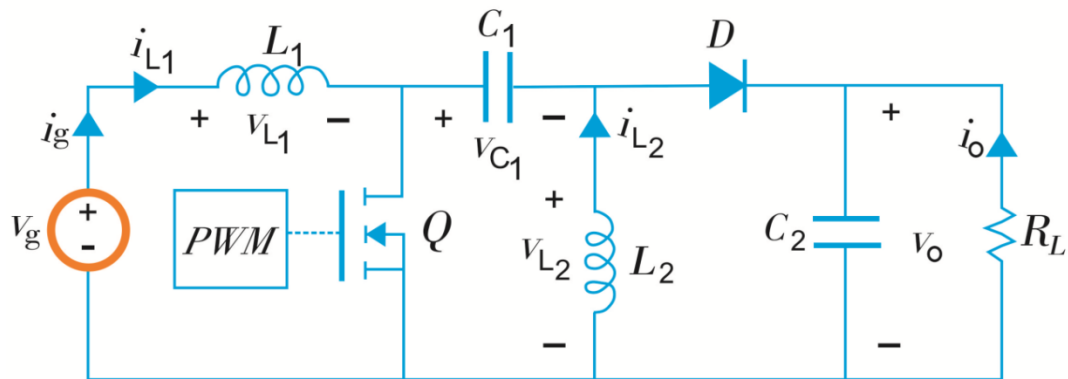


- En el periodo de conducción del interruptor la fuente  $V_g$  suministra energía al inductor  $L_1$ ; mientras que el inductor  $L_2$  también almacena energía debido a la tensión  $V_{C1}$ . El diodo queda polarizado inversamente debido a la tensión de  $C_1$ . Las corrientes  $i_{L2}$  e  $i_{L2}$  circulan a través del interruptor con pendientes positivas.
- Durante el intervalo de no-conducción del interruptor,  $i_{L1}$  e  $i_{L2}$  circulan a través del diodo en sentido decreciente.

En este convertidor la transferencia de energía entre la fuente y la carga se hace a través del condensador  $C_1$ , ya que su principal ventaja radica, en que la corriente suministrada por la fuente primaria es continuada debido a la conexión en serie de  $L_1$  y  $V_g$ .

- Otro convertidor conocido es el SEPIC, Single-ended primary inductance converter (Erickson & Maksimovic, 2001) mostrado en la Figura 1-14, al igual que los dos anteriores también permite obtener una tensión de salida mayor o menor que la tensión de entrada, pero sin invertir la tensión de salida respecto de la entrada.
- En el periodo de conducción del interruptor, la fuente  $V_g$  suministra energía al inductor  $L_1$ ; mientras que el inductor  $L_2$  también almacena energía debido a la tensión  $V_{C1}$ . El diodo queda polarizado inversamente debido a la tensión de  $C_1$  y  $C_2$ . Las corrientes  $I_{L1}$  e  $I_{L2}$  circulan a través del interruptor con pendientes positivas.
- Durante el intervalo de no-conducción del interruptor, la energía almacenada en  $L_1$ ; y  $L_2$  es liberada sobre la carga.

Figura 1-14. Topología del Convertidor SEPIC



En este convertidor, al igual que ocurría en el de Cuk, la transferencia de energía entre la fuente y la carga se hace a través del condensador  $C_1$ ; así mismo la corriente suministrada por la fuente primaria es continuada debido a la conexión en serie de  $L_1$  y  $V_g$ . Una ventaja del convertidor SEPIC es la posibilidad de implementar topologías aisladas mediante un transformador, debido a que  $L_2$  puede ser sustituida por la inductancia magnetizante asociada con un transformador de aislamiento.

### 1.3.4 Conexión a la red AC con convertidor DC-AC

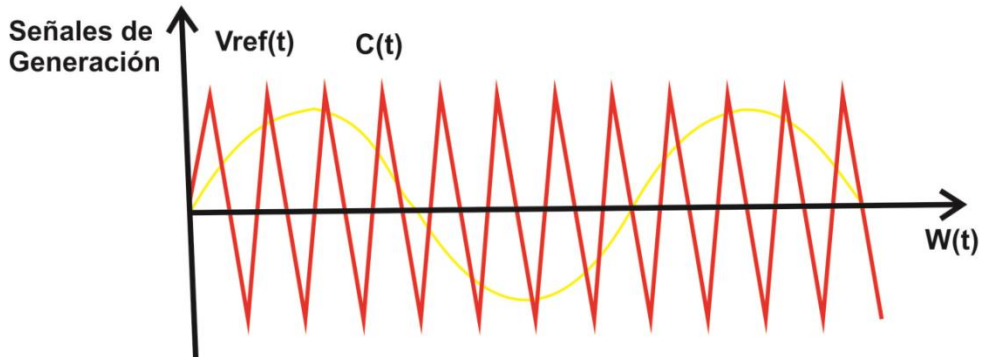
La función de un convertidor DC-AC, también llamado Inversor, es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna (AC), con la magnitud y frecuencia deseadas.

El voltaje variable de la salida se puede obtener cambiando el nivel DC del voltaje de entrada, manteniendo constante la ganancia del inversor. Si el voltaje de DC de entrada es fijo y no es controlable, se puede obtener un voltaje variable a la salida cambiando la ganancia del inversor, que se puede definir como la relación entre el voltaje de salida AC y el voltaje de entrada DC.

La forma de la onda del voltaje de salida de los inversores ideales debe ser sinusoidal. Sin embargo, la de los inversores prácticos no son sinusoidales, ya que contienen ciertos armónicos. Los inversores usan dispositivos controlados de encendido y apagado y pueden ser transistores BJT, MOSFET, IGBT o GTO (Mohan, 2003).

En este tipo de inversores, para obtener la señal de modulación se tiene una señal portadora  $C(t)$  de forma triangular o diente de sierra y una señal de referencia sinusoidal  $V_{ref}(t)$  como se puede ver en la Figura 1-15:

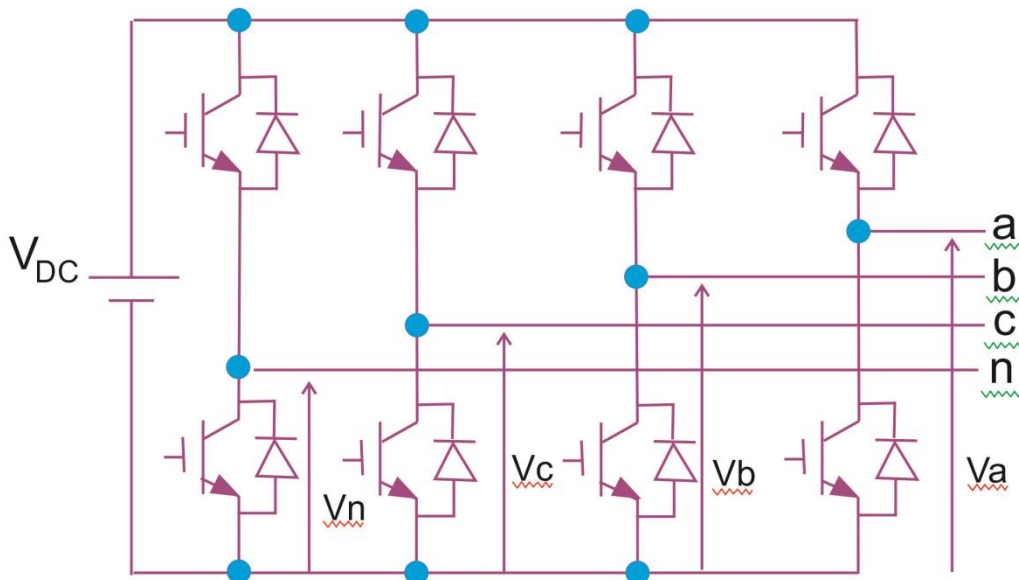
Figura 1-15. Señal portadora y señal de referencia sinusoidal



Uniendo estas dos señales se obtiene la señal moduladora.

A continuación se hace un análisis del convertidor trifásico DC-AC con neutro, el cual es mostrado en la Figura 1-16.

Figura 1-16. Convertidor DC-AC con neutro



Para el análisis del circuito anterior se utilizarán voltajes promedios, que vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$\overline{V_{an}} = \overline{V_a} - \overline{V_n} = m_A * \frac{V_{DC}}{2} * \sin(\omega t + \vartheta) \quad (1.21)$$

$$\overline{V_{bn}} = \overline{V_b} - \overline{V_n} = m_A * \frac{V_{DC}}{2} * \sin(\omega t + \vartheta - \frac{2}{\pi}) \quad (1.22)$$

$$\overline{V_{cn}} = \overline{V_c} - \overline{V_n} = m_A * \frac{V_{DC}}{2} * \sin(\omega t + \vartheta + \frac{2}{\pi}) \quad (1.23)$$

Donde

V<sub>a</sub>: Voltaje en la fase a

V<sub>b</sub>: Voltaje en la fase b

V<sub>c</sub>: Voltaje en la fase c

V<sub>n</sub>: Voltaje en el neutro

V<sub>DC</sub>: Voltaje directo

m<sub>A</sub>: Índice de modulación

Simplificando las ecuaciones anteriores se tiene que el voltaje en el convertidor en la fase a es:

$$\overline{V_{an}} = V_{AC} = m_a * \frac{V_{DC}}{2} \quad (1.24)$$

Donde m<sub>a</sub> es la señal moduladora, que posee la parte senoidal. En general el voltaje en el convertidor para cualquiera de sus fases es

$$V_{AC} = m * \frac{V_{DC}}{2} \quad (1.25)$$

Donde m es la señal moduladora, desfasada 120° entre fases.

La corriente I<sub>DC</sub> puede ser obtenida por el balance de la potencia, en estado estable la potencia de entrada en el convertidor es igual a la potencia de salida, por lo tanto la corriente I<sub>DC</sub> es:

$$I_{DC} = \frac{P_{AC}}{V_{DC}} \quad (1.26)$$

## **1.4 Estrategias de búsqueda del punto de máxima potencia.**

Como la potencia suministrada por un panel solar varía dependiendo de las condiciones ambientales es necesario establecer algoritmos de control del ciclo de trabajo del convertidor que permitan extraer la máxima potencia posible del panel en cualquier condición de temperatura, radiación solar y necesidad de la carga. Esto puede lograrse con algoritmos denominados Algoritmos de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia MPPT, Maximum Power Point Tracker y su objetivo es ajustar el punto de trabajo de operación del convertidor para que el sistema trabaje en el punto de máxima potencia (MPP). Un MPPT convencional funciona mediante la detección de la corriente y el voltaje del panel. Con los valores de voltaje y corriente se calcula la potencia y en consecuencia el ciclo de servicio del convertidor se ajusta para que la salida del panel coincida con el punto de máxima potencia.

### **1.4.1 Descripción del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT**

Una instalación fotovoltaica básica consiste en un panel conectado directamente a una carga. En este caso, el punto de funcionamiento del sistema está en la intersección de la característica de salida de corriente y de voltaje I-V, que se ve afectada de forma no lineal por el nivel de radiación solar y la temperatura, y dado que estas condiciones están lejos de ser constantes, el panel difícilmente estará trabajando en su punto de máxima potencia (MPP).

Para solucionar esto, se han trabajado distintos métodos de seguimiento del punto de máxima potencia. Se debe tener en cuenta que en las DSSC la radiación afecta principalmente la corriente y la temperatura afecta principalmente a la tensión (Chae, Lee, Kim, Lee, & Kim, 2010). Además la curva de P-V puede verse afectada por otros factores tales como el ángulo de incidencia del sol, el vector de velocidad del viento, la presión atmosférica y la humedad del ambiente. Se debe diseñar entonces un algoritmo apropiado que permita hacer un seguimiento eficiente del MPP, insertando un controlador entre el

panel fotovoltaico y la carga, utilizando sensores para el voltaje y la corriente y un convertidor de DC/DC manipulado por circuitos adicionales, por ejemplo con modulación de ancho de pulso PWM en el ciclo de trabajo, y así generar el MPPT como se muestra en la Figura 1-17.

Los convertidores DC/DC con esta función son llamados rastreadores del punto de máxima potencia. El papel del circuito MPPT es hacer que la salida del panel coincida, de la mejor forma posible, con las exigencias de la carga de modo que el sistema fotovoltaico opere a la máxima potencia y la carga reciba la potencia constante que requiere.

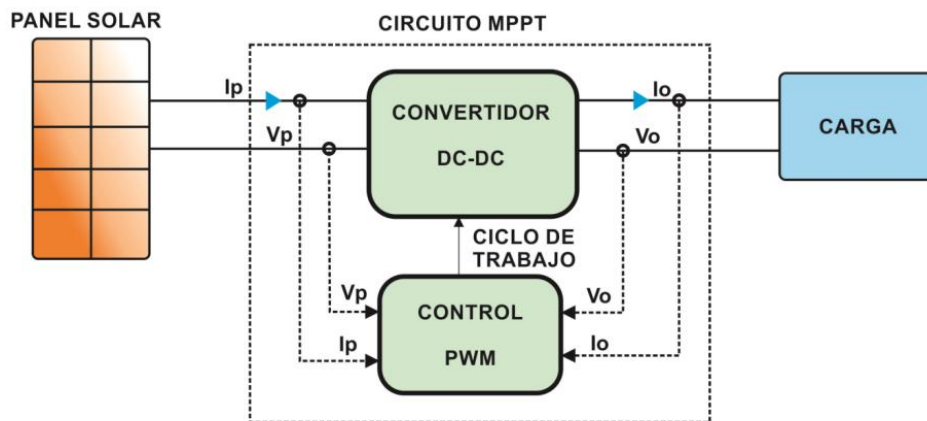
El convertidor DC/DC en la Figura 1-17 crea una transformación de impedancia, es decir, la emulación de una resistencia variable por medio del ciclo de trabajo, de tal manera que la impedancia de entrada, visto por el panel fotovoltaico hacia el convertidor, corresponde al MPP del panel para cualquier impedancia de la carga, esto se consigue mediante el control de la longitud del intervalo de tiempo del interruptor principal del convertidor, esto para el método de modulación PWM, típicamente a una frecuencia constante. La relación del intervalo de tiempo y el período es el ciclo de trabajo del convertidor.

El primer paso en el funcionamiento del MPPT es la detección de la corriente y la tensión del panel solar mediante sensores de corriente y tensión respectivamente; estos valores se ingresan en un bloque que calcula la MPP en un ciclo de muestreo particular, el bloque de MPPT proporciona los valores de referencia para la corriente  $I_0$  y el voltaje  $V_0$ . En la mayoría de los casos se selecciona sólo una variable, normalmente la tensión; posteriormente, el valor de potencia medida se compara con el valor actual de MPP y si hay una diferencia entre ambos, el ciclo de trabajo del convertidor se ajusta para reducir la diferencia. Las pérdidas sufridas por el circuito MPPT deben ser pequeñas para conseguir una eficiencia máxima para el sistema en general.

Entre las técnicas más conocidas de controladores MPPT se encuentran el de Perturbar y observar P&O, el de Conductancia Incremental IC, los Modos Deslizantes o combinaciones de estos; por ejemplo, con el fin de regular el voltaje del PV y mitigar las perturbaciones en la carga, se puede implementar un control por modos deslizante (SMC) donde se regula la corriente de entrada del convertidor Boost a través de la corriente del inductor. El diseño del sistema se realiza mediante 3 controladores en cascada, donde el

algoritmo P&O provee la señal de referencia a un controlador PI, y la salida de este genera la corriente de referencia al control en modos deslizantes, encargado de regular la corriente de entrada (E Bianconi, 2013).

Figura 1-17. Sistema de generación solar típico con MPPT





## 2. Antecedentes

En este capítulo se pretende resumir el estado del arte acerca del estudio de las celdas DSSC haciendo énfasis en aquellas investigaciones que pretenden mejorar su desempeño y tienen como objetivo maximizar la extracción de energía, para lo cual se tiene en cuenta la caracterización de los paneles y el proceso de control con algoritmos de MPPT. De esta forma será posible continuar con la investigación y se podrá validar la viabilidad técnica de la implementación de estos dispositivos en las ZNI de Colombia. Inicialmente se revisará la historia para luego nombrar algunas tendencias actuales en la generación de energía solar por medio de las celdas DSSC. Es conviene conocer también cuál ha sido la evolución de los distintos elementos que componen este tipo de celdas solares para poder determinar, de forma más precisa, las virtudes y las limitaciones de las mismas.

A finales de la década de los 60, se descubrió que los colorantes orgánicos en sistemas de iluminación pueden generar electricidad en electrodos de óxido en células electroquímicas (Gerischer, Michel, E, & Tributsch, 1968). En un esfuerzo para entender y simular los procesos primarios en la fotosíntesis, se estudió en la Universidad de California en Berkeley, el fenómeno con clorofila extraída de la espinaca; sobre la base de tales experimentos de generación de energía eléctrica, se demostró el principio de las DSSC (Tributsch, 1971).

En las últimas décadas y como consecuencia de la exitosa utilización de las celdas solares de segunda generación, basadas en estructuras de silicio, se inició la investigación acerca de nuevos materiales, que con un menor costo de producción, cumplieran los objetivos de suministro de energía sin necesidad de conexión con la red eléctrica. Para lograr esto se tuvo en cuenta el proceso de fotosíntesis que usan las plantas, que toman la luz del sol y la convierten en energía; con este principio se creó la primera celda solar DSSC, basada en TiO<sub>2</sub> y en colorantes orgánicos. Esta publicación la hace Michael Grätzel en 1991 (O'Regan & Grätzel, 1991), donde se describe una celda fotovoltaica producida con

materiales y procesos de bajo costo. El dispositivo se basa en una película ópticamente transparente de dióxido de titanio, cuyas partículas presentan unos pocos nanómetros de tamaño, recubiertas de una capa de tinte sensible a la luz que facilita la transferencia de carga en la recolección de electrones que han sido excitados por el sol, que debido a la gran área superficial del TiO<sub>2</sub> y las características de reacción espectrales del colorante orgánico, el dispositivo muestra una alta recolección de energía con una eficiencia entre 7.1% y 7.9% y con densidades de corriente por encima de 12 mA/cm<sup>2</sup>.

Desde 1991 se han hecho cantidades de estudios con el objetivo de mejorar las prestaciones de estas celdas solares. En mayo de 2013, la empresa Dyesol de Australia le cuenta al mundo: “Se excede rigurosa prueba de durabilidad en PV DSSC en un 400%”. En su intervención en la conferencia de la Sociedad Europea de Materiales de Investigación en Estrasburgo, Francia, el Director Científico de Dyesol, Empresa comercializadora de DSSC, explicó cómo se logró la certificación de la norma internacional IEC 61646 que es una prueba de estabilidad de células solares al exponerlas a una temperatura constante de 85°C durante más de 1000 horas. En Julio de ese mismo año se anuncia en la revista Nature (Julian, y otros, 2013), el nuevo récord de eficiencia en células DSSC. Así mismo, el profesor Michael Grätzel describe un nuevo proceso para crear un pigmento en estado sólido para la recolección de luz. Las células fabricadas con esta técnica han establecido un nuevo récord mundial de eficiencia del 15% para una célula solar de colorante en estado sólido (Solid State DSSC ssDSSC). Este resultado sobrepasa todos los registros públicos certificados anteriores y catapulta la producción de los dispositivos DSSC al siguiente nivel, teniendo en cuenta que es relativamente barato, proporciona una eficiencia competitiva y tiene una salida constante de energía, incluso con poca luz, bien sea al amanecer, al atardecer, en días nublados, en interiores con luz artificial, a la sombra o con luz indirecta.

Dado los últimos adelantos en cuanto a la eficiencia y duración de los paneles solares DSSC, es oportuno aplicar el conocimiento y complementarlo teniendo en cuenta los otros elementos que integran el sistema, que son las etapas de control, de potencia y de carga. Por esto se propone una metodología de caracterización que es necesaria para el diseño de la operación de sistemas de conversión de energía solar con estas celdas.

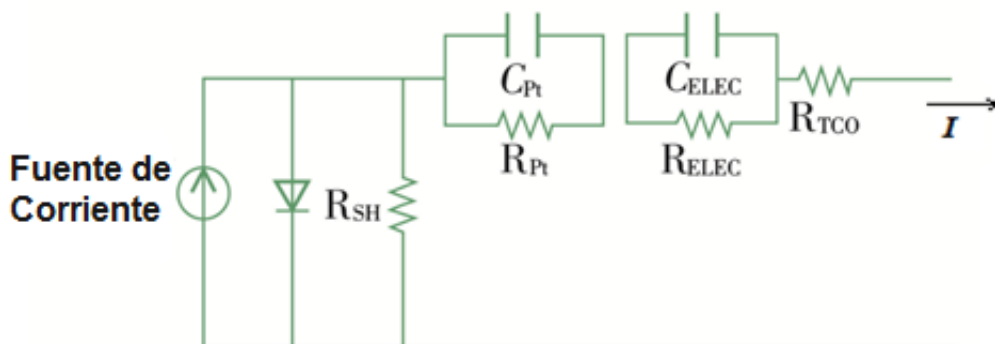
## 2.1 Caracterización de paneles DSSC

Son varios los trabajos que se han realizado para caracterizar paneles fotovoltaicos DSSC; en (Magsi, Macdonald, & Shterengas, 2011) se desarrollan experimentos y se hacen mediciones utilizando LabView junto con una tarjeta de adquisición de datos. Los resultados arrojados proponen perspectivas para mejorar la eficiencia de la nueva tecnología pero no se presentan resultados concluyentes.

En (Aboul & Ahmed, 2008), se utiliza la solución analítica de las ecuaciones de transporte en semiconductores para el diodo simple, de donde se saca un modelo eléctrico de células DSSC, incluyendo el efecto de la conductividad y la resistencia serie de la celda. Se extraen resultados experimentales bajo diferentes niveles de iluminación y se toman los parámetros de la celda en términos de la intensidad de iluminación. Los resultados muestran un modelo aceptable con los datos experimentales para las características de corriente-voltaje-eficiencia y factor de llenado.

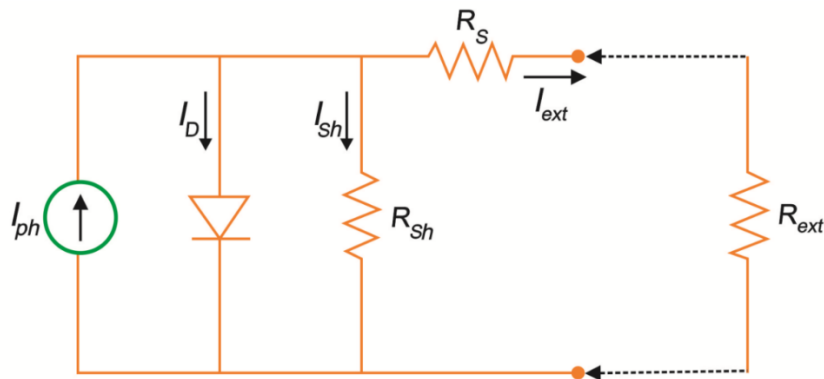
En (Chae, Lee, Kim, Lee, & Kim, 2010), se desarrolla un sistema DSSC en Microsoft Visual C++ que ha sido modelado en PSIM. El bloque de DLL en el PSIM se vincula a una rutina C externa y se calcula la salida. El resultado de la simulación da cuenta del modelo eléctrico de las celdas DSSC mostrado en la Figura 2-1.

Figura 2-1. Modelo Eléctrico DSSC utilizado por Chae



En (Kyaw, Bora, & Dutta, 2012) se determina el modelo equivalente de las DCCS por medio de sus componentes químicas, el modelo resultante se muestra en la Figura 2-2:

Figura 2-2. Modelo Eléctrico DSSC utilizado por Kyaw



La definición de los componentes de este modelo se mostró en la sección 1.1. En el capítulo cuatro de esta tesis se mostrará un modelo eléctrico genérico para las celdas solares de primera y segunda generación o celdas a base de silicio.

## 2.2 Control de paneles DSSC

Como consecuencia de la exitosa utilización de fuentes de corriente directa (DC), se ha aumentado cada vez más la investigación acerca del modelado y la simulación de los convertidores conmutados DC/DC para mejorar los diseños de estos dispositivos y poder optimizar el suministro de energía de corriente directa, como es la conversión en paneles solares para alimentar a los componentes electrónicos que lo requieran.

En (Chrin & Bunlaksananusorn, 2007), se trabaja el modelado y la simulación de convertidores DC/DC en el entorno Simulink, con un convertidor reductor, utilizando tres sistemas de control diferentes que son: el modo de control de voltaje, el control en modo de corriente y el control de corriente media. Los modelos resultantes son no lineales y pueden ser utilizados para simular el rendimiento del convertidor. Se obtuvieron resultados que están acordes con sus homólogos simulados, lo que confirma la validez de los modelos desarrollados.

En (Bifaretti, Brown, Carlo, & Reale, 2007) se propone un algoritmo de control de celdas solares DSSC utilizando convertidores electrónicos de potencia DC/DC. Los experimentos dan cuenta de la respuesta en frecuencia, esta se compara, por medio de pruebas de

simulación, con la respuesta obtenida con un modelo eléctrico. Por otra parte, se propone un algoritmo de control de corriente de conmutación DC/DC adecuado para reducir la pérdida de energía debido a la conversión de potencia.

En (Kyoung, y otros, 2012) diseñan un DSSC virtual en PSIM donde se simulan factores de radiación, temperatura y los efectos de sombra. Todo esto se prueba con un convertidor de 100W y se obtiene el rendimiento de celdas solares expuestas a estos factores.

### **2.2.2 Estrategias de MPPT para DSSC**

La investigación acerca de algoritmos de MPPT para DSSC no ha avanzado mucho debido a que se aplican las técnicas ya existentes para paneles solares comunes. En ese sentido, en un gran número de artículos sobre este tema, se describen desarrollos y considerables esfuerzos para mejorar las topologías de MPPT.

Como se explicó en la sección 1.4, los algoritmos MPPT utilizan como entrada dos variables, el voltaje producido por el panel y corriente demandada por la carga, aunque algunos algoritmos usan sólo una de las dos variables. De acuerdo con la estrategia de control para buscar el punto de máxima potencia, hay dos categorías de métodos MPPT: directa e indirecta (Salas, Olias, Barrado, & Lazaro, 2006).

En la búsqueda indirecta están: Apropiación de Curva (Takashima, Tanaka, Amano, & Ando, 2000), tabla de Consulta (Ibrahim, 1999), Tensión en Circuito Abierto (Masoum & Dehbonei, 1998), Generador de Corriente de Corto Circuito (Alghuwainem, 1994), Tensión Constante (Yu, y otros, 2002) y Prueba de Circuito Abierto (Salameh, Dagher, & Lynch, 1991).

Estos métodos se basan en el análisis de una base de datos que incluye curvas típicas P-V para diferentes radiaciones y temperaturas o en el uso de funciones matemáticas para estimar el MPP a partir de datos empíricos (Salas, Olias, Barrado, & Lazaro, 2006).

Las técnicas de MPPT directas son más precisas en el seguimiento del punto de máxima potencia y ofrecen una mejor eficiencia (Berrera, Dolara, Faranda, & Leva, 2009), varían en términos de la simplicidad de ejecución, del costo, de la velocidad de convergencia, de los sensores requeridos, de la eficacia y de la necesidad de parametrización (Faranda &

Leva, 2008); por lo tanto, hay que seleccionar juiciosamente el circuito MPPT adecuado y tomar las decisiones correctas para el diseño y así servir mejor a la aplicación en cuestión. Como ejemplos de búsqueda directa se deben mencionar: Realimentación de Tensión/Corriente (Maheshappa, Nagaraju, & Murthy, 1998), Aproximación Cuadrática (Chao, Lin, Pai, Ko, & Chang, 2009), Perturbación y Observación (Salameh, Dagher, & Lynch, 1991), Conductancia Incremental (Husseini, Muta, Hoshino, & Osakada, 1995), Capacitancia Parásita (Branbrilla, Gambarara, Garutti, & Ronchi, 1999), y Oscilaciones Forzadas (Tse, Chung, Hui, & Ho, 2001); la ventaja de estos últimos es que no se requiere información previa de las características fotovoltaicas.

Algunos métodos MPPT se basan en la aproximación de que la tensión en el punto de máxima potencia se encuentra alrededor del 76% de la tensión de circuito abierto (Pandey, Dasgupta, & Mukerjee, 2007).

Para la determinación de la técnica de MPPT a utilizar se debe tener en cuenta el nivel deseado de voltaje o corriente; por ejemplo, en aplicaciones portátiles, donde el nivel de voltaje es muy bajo, se prefieren métodos indirectos MPPT debido a su bajo costo. Si se desea la mejor eficiencia y versatilidad total, con respecto al perfil de carga o a los cambios en los parámetros de P y V, los métodos directos son la opción principal (Salas, Olias, Barrado, & Lazaro, 2006).

También es posible ofrecer flexibilidad en la implementación del seguidor de MPP utilizando un microcontrolador para implementar el algoritmo de MPPT (Rizzo, Piegari, & Tricoli, 2009).

Se ha detectado que entre los métodos directos el de Perturbar y Observar (P&O) es la técnica que ofrece la mejor eficiencia (Berrera, Dolara, Faranda, & Leva, 2009).

### **3. Problema de investigación**

En Colombia, los territorios definidos por las regiones Caribe y Andina se encuentran ampliamente conectados a la red de distribución eléctrica, pero las demás regiones (Pacífica, Amazonia, Orinoquia, y las zonas insulares de San Andrés, Providencia y Santa Catalina) que conforman el 66% del territorio colombiano, se consideran ZNI, donde el acceso de las redes de distribución eléctrica es complicado, y las soluciones energéticas se basan en combustibles derivados del petróleo con costos generalmente elevados y cuyo procesamiento genera contaminantes atmosféricos y gases que contribuyen al efecto invernadero. Sin embargo, una de las fortalezas que presenta Colombia es que por ser un país tropical, tiene una buena cantidad de días de sol por año, con un promedio diario cercano a  $4,5 \text{ kWh/m}^2$ , propicio para un adecuado aprovechamiento. Esta ventaja geográfica debería ser aprovechada para ensayar y, posteriormente, aplicar masivamente algunas tecnologías solares que han aparecido en los últimos años en todo el mundo; como es el caso de las celdas de Grätzel, que por ser más económicas, pueden equilibrar sus deficiencias técnicas y derivar en un costo de producción menor por kWh.

#### **3.2 Pregunta de investigación**

Bajo cuáles condiciones técnicas es posible implementar en las ZNI de Colombia sistemas de conversión de energía solar en energía eléctrica, utilizando celdas solares sensibilizadas por colorante DSSC también llamadas celdas de Grätzel?

### 3.3 Objetivo general

Determinar la viabilidad técnica de implementar sistemas de generación eléctrica con paneles fotovoltaicos basados en dióxido de titanio (celdas de Grätzel) en Colombia, verificando la posibilidad de generación y utilización de energía eléctrica eficiente, eficaz y a bajo costo.

### 3.4 Objetivos específicos

- Realizar un análisis comparativo de las aplicaciones, características de funcionamiento, técnicas de control y costo de operación de los paneles fotovoltaicos basados en silicio contra los paneles basados en dióxido de titanio, que permita determinar las ventajas y las desventajas de la nueva tecnología con respecto a la ya existente.
- Proponer una metodología de caracterización de paneles fotovoltaicos de dióxido de titanio de tal forma que se pueda determinar, teóricamente, la eficiencia y saber cuánta energía se puede extraer de determinada área en términos de voltaje, corriente y potencia.
- Diseñar y simular un sistema de control y de potencia para paneles fotovoltaicos basados en dióxido de titanio que garantice su correcto funcionamiento y la eficiencia del proceso al interactuar con otros sistemas eléctricos.



## **4. Análisis comparativo de paneles a base de silicio y paneles DSSC**

La transformación de la energía que está disponible de forma natural en el medio ambiente, para el aprovechamiento humano, ha puesto en vela a muchos investigadores desde el siglo pasado, sus investigaciones han dado como resultado dispositivos generadores de energía que hoy en día benefician a distintas comunidades y que se comercializan para muchas aplicaciones de consumo eléctrico, las cuales abarcan desde redes personales, hasta el suministro eléctrico de grandes ciudades.

En este capítulo se hace una comparación de dos tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar, las celdas solares a base de silicio y las celdas solares de Grätzel cuya base es el dióxido de titanio; la investigación se enfoca en la aplicación práctica y deja de lado los detalles químicos de los materiales que las componen.

Se verá que los tipos de celdas solares estudiadas están basadas en dos materiales abundantes en el planeta. El primero, es uno de los materiales más comunes sobre la superficie terrestre: el silicio, cuyas aplicaciones en celdas solares son ampliamente conocidas y el segundo, el dióxido de titanio, atractivo por su bajo costo de producción y cuyas aplicaciones en celdas solares están en un incipiente desarrollo.

Se va a considerar que la viabilidad técnica de las celdas de Grätzel está directamente relacionada con la viabilidad de las celdas a base de silicio, teniendo en cuenta la similitud

en tres aspectos fundamentales: las características eléctricas, las estrategias de control y las aplicaciones utilizadas por ambos tipos de sistemas:

- Con respecto a las características eléctricas se construirán las relaciones de voltaje – corriente y voltaje – potencia de las celdas de Grätzel y de la tecnología conocida de silicio para comparar el comportamiento eléctrico.
- Se pretende conocer si los métodos y estrategias de control clásicos de paneles solares son aplicables a la tecnología con celdas de Grätzel o si se requieren técnicas nuevas.
- En cuanto a las aplicaciones se va determinar qué tipo de cargas de uso corriente se pueden alimentar en instalaciones reales de tipo residencial y comercial con ambos tipos de tecnologías.

Por último y de acuerdo a la investigación de casos exitosos de sistemas de generación eléctrica con paneles de silicio en ZNI de Colombia, concluiremos si se podrían utilizar o no sistemas con celdas de Grätzel.

## 4.1 Fundamentos generales

Existen elementos básicos que se deben considerar para poder indagar sobre las características de funcionamiento de los distintos tipos de paneles solares, ellos son los perfiles de radiación solar, la temperatura, los arreglos de celdas en los paneles y la eficiencia de conversión de la energía solar. De los anteriores dependen las características de las curvas  $V/P$ ,  $I/P$  y  $V/I$  en la salida de los paneles solares.

### 4.1.1 Radiación solar

Es la energía electromagnética emitida por los procesos de fusión del hidrógeno contenido en el sol. La intensidad de la distribución espectral que llega a la superficie terrestre depende de la composición de la atmósfera. A nivel del suelo la energía solar se encuentra

dentro del intervalo de longitud de onda de 0,2 a 2,5 micrómetros. La denominada luz ultravioleta está entre 0,2 a 0,38 micrómetros, la cual contiene aproximadamente el 6,4% de la energía total comprendida en el espectro; de 0,38 a 0,78 micrómetros está la luz visible, la cual aporta aproximadamente el 48% de la energía total del espectro; de 0,78 a 10 micrómetros el infrarrojo, que contiene el restante 45,6% de la energía (Fahrenbruch & Buhe, 1983). La zona útil para las celdas fotovoltaicas DSSC empieza en 0,15 micrómetros y comprende todo el infrarrojo. La intensidad máxima de la energía solar está comprendida entre 0,5 y 0,55 micrómetros.

Para conocer los valores absolutos y promedio de potencia solar que se puede aprovechar según los valores anteriores, existe el “Atlas de radiación solar de Colombia” (IDEAM, Unidad de Planeación Minero Energética, 2005), el cual contiene una serie de mapas que indican el valor promedio diario, mensual y anual de radiación solar, brillo y radiación ultravioleta por metro cuadrado en Colombia; con él es posible identificar las zonas que pueden ser más productivas en el aprovechamiento de este tipo de energía con tecnologías que usen sistemas fotovoltaicos.

La Tabla 4-1 muestra la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones en Colombia (IDEAM, Unidad de Planeación Minero Energética, 2005), donde se evidencia que la Guajira y las Costa Atlántica presentan las mejores posibilidades para implementar soluciones de generación de energía eléctrica a partir de paneles solares. Esta disponibilidad de energía eléctrica es comparable con la mayoría de regiones en Suramérica, algunos territorios en África Central, Sudeste Asiático, Norteamérica y Australia. Se ubican en el segundo cuartil a nivel mundial de regiones con las mayores disponibilidades de energía eléctrica a partir de energía solar. Las restantes cuatro regiones, se encuentran en el tercer cuartil (Solargis, 2015) (Powell, 2015).

Tabla 4-1. Disponibilidad anual de energía por regiones en Colombia.

REGIÓN	kWh/m <sup>2</sup> /año
Guajira	2.190
Costa Atlántica	1.825
Orinoquia	1.643
Amazonía	1.551
Andina	1.643
Costa Pacífica	1.278

Europa es de las regiones a nivel mundial con menor potencial para el aprovechamiento de energía solar. Sin embargo, su potencia fotovoltaica instalada en 2014 era de las más altas (véase Tabla 4-2) (Ellabbana, Abu-Rubb, & Blaabjerg, 2014). Estando Colombia muy por encima del potencial que tiene Europa en energía solar, resulta evidente el desaprovechamiento que estamos haciendo en nuestro país de este recurso energético. Lo que nos permite pensar que soluciones basadas en energía solar no solo son necesarias por cuestiones ambientales, sino que son una gran oportunidad para dejar de depender de recursos energéticos finitos. Por supuesto que esto exige otro tipo de esfuerzos, como la inversión inicial en infraestructura y la no disponibilidad del recurso energético en las noches y algunos momentos del día.

Tabla 4-2. Potencia fotovoltaica instalada en algunos países de Europa durante 2014 (MWpico).

PAÍS	2014
Alemania	38.301
Italia	18.450
Francia	5.600
Reino Unido	5.230
España	4.787
Bélgica	3.105
Grecia	2.603
República Checa	2.061
Rumania	1.293
Holanda	1.100

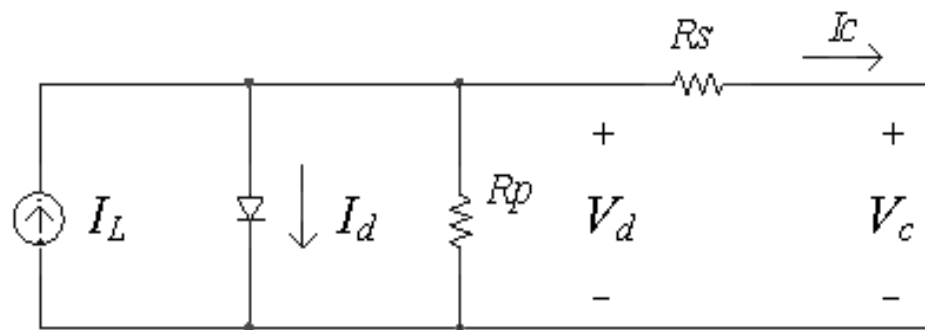
#### 4.1.2 Temperatura

Al igual que con la radiación solar, se tienen registros históricos de la variación de la temperatura en Colombia, con los que es posible determinar los límites y la tendencia de la temperatura a través del tiempo; estos datos facilitan el estudio de las celdas solares con respecto a este parámetro.

Es importante tener en cuenta la temperatura en el momento de obtener y analizar los resultados de las muestras tomadas, ya que la generación de energía en los paneles depende de la temperatura en la superficie de las celdas. El modelo eléctrico de un panel solar, ya sea DSSC o de silicio, tiene, entre otros elementos, un diodo cuya corriente  $I_d$  es

dependiente de la temperatura. El modelo eléctrico se muestra en la Figura 4-1. Se pueden obtener entonces las ecuaciones (4.1) y (4.2) que muestran como es esta dependencia (Hanmina, y otros, 2009), (Boke, 2007).

Figura 4-1. Modelo eléctrico resumido de un panel solar de silicio y DSSC.



$$I_C = I_L - I_d \left( e^{\frac{qV_d}{m k T}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (4.1)$$

$$V_C = V_d - I_C \cdot R_S \quad (4.2)$$

En la Figura 4.1,  $I_L$  es proporcional a la intensidad de iluminación de la luz solar,  $m$  es el factor de idealidad del diodo (1 para un diodo ideal),  $I_d$  es la corriente de saturación inversa que depende de la temperatura,  $q$  es la carga elemental,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta (Shuhui & Huiying, 2010).

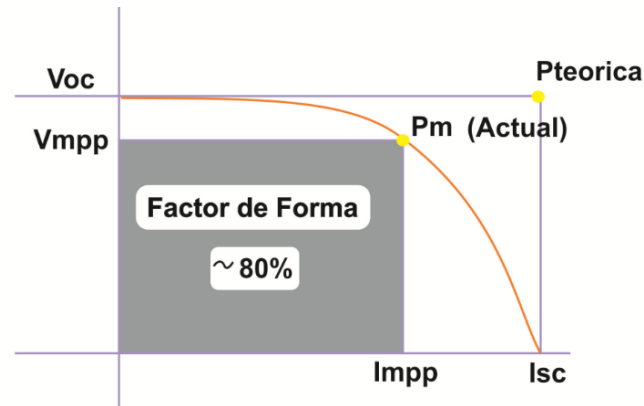
### 4.1.3 Eficiencia de los paneles solares

La eficiencia de una celda solar de cualquier generación o tipo se refiere a la habilidad que tiene la celda para transformar la energía solar en energía eléctrica para que pueda ser utilizada; intervienen factores internos como los materiales que la componen y las relaciones entre ellos y factores externos como el control del punto de máxima potencia o la topología del sistema eléctrico en el cual se está utilizando la energía.

Para determinar la eficiencia se define inicialmente el Factor de Forma (FF) de una celda o panel solar como el cociente entre la potencia real ( $V_{mpp} \times I_{mpp}$ ) de las celdas solares y la potencia de corto-circuito ( $V_{oc} \times I_{sc}$ ), véase Figura 4-2 y ecuación (4.3). Las celdas solares

típicas tienen un factor de forma mayor a 0,7, las celdas con bajo FF (llamadas celdas de grado B) por lo general del 0,4 al 0,65 son bastante ineficientes.

Figura 4-2. Área efectiva del Factor de Forma



$$FF = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (4.3)$$

El FF es usado para definir la eficiencia de una celda solar según la ecuación (4.4).

$$\eta = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{P_m} \quad (4.4)$$

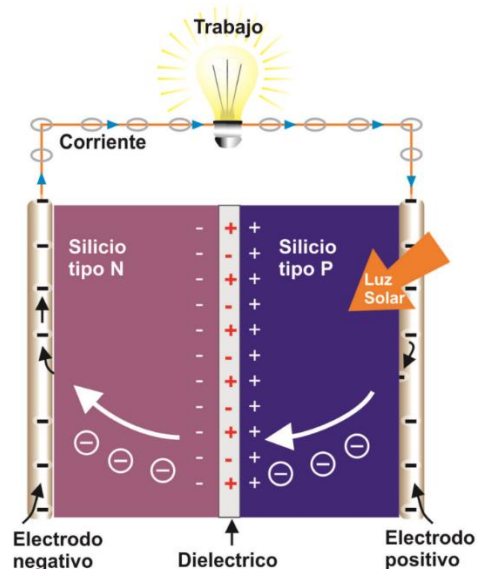
Donde  $\eta$  es la eficiencia de conversión y  $P_m$  es la potencia máxima real del panel de acuerdo a la Figura 4-2.

Desde el año de 1993 la revista científica Wiley Online Library publica periódicamente en el artículo Solar cell efficiency tables (que se encuentra en la versión 45) el progreso en el aumento de la eficiencia de conversión de energía fotovoltaica para una amplia gama de tecnologías de células y módulos fotovoltaicos (Barkhouse, y otros, 2015). Desde la versión 33 de estas tablas los resultados se actualizan de acuerdo al espectro de referencia aceptado a nivel internacional (International Electrotechnical Commission (IEC) 60904-3, Ed. 2, 2008), asegurando una información fidedigna y estandarizada.

## 4.2 Características de funcionamiento paneles a base de silicio y paneles DSSC

En las celdas solares a base de silicio, cuando un semiconductor basado en este material es expuesto a la luz, los fotones de energía arrancan electrones creando huecos en el material. El objetivo de la celda fotovoltaica es obligar a los electrones y a los huecos a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él, creando así una diferencia de potencial; para lograr esto se crea un campo eléctrico permanente con una unión p-n entre dos capas dopadas de silicio. La capa superior de la celda se compone entonces de silicio dopado de tipo n (exceso de electrones), la capa inferior de la celda se compone de silicio dopado de tipo p (deficiencia de electrones), la red cristalina queda cargada positivamente en el momento de la creación de la unión p-n. Los electrones libres de la capa n entran en la capa p y se recombinan con los huecos de esta región; de esta manera existirá durante toda la vida de la unión una carga positiva en la región n a lo largo de ésta, porque faltan electrones y una carga negativa en la región en p a lo largo de la unión porque los huecos han desaparecido. La existencia del campo eléctrico entre ambas, es decir de n hacia p, hace que la celda se comporte como un diodo que sólo permite el flujo de corriente en una dirección: los electrones pueden moverse de la región p a la n, pero no en la dirección opuesta y por el contrario los huecos no pasan más que de n hacia p; en resumen la celda solar de silicio es el equivalente de un generador de energía a la que se ha añadido un diodo. Los electrones son liberados por la acción de la radiación solar y circulan a través del circuito cerrado (Chapin, Fuller, & Pearson, 1954), como muestra la Figura 4-3.

Figura 4-3. Principio de operación de las celdas solares a base de silicio.



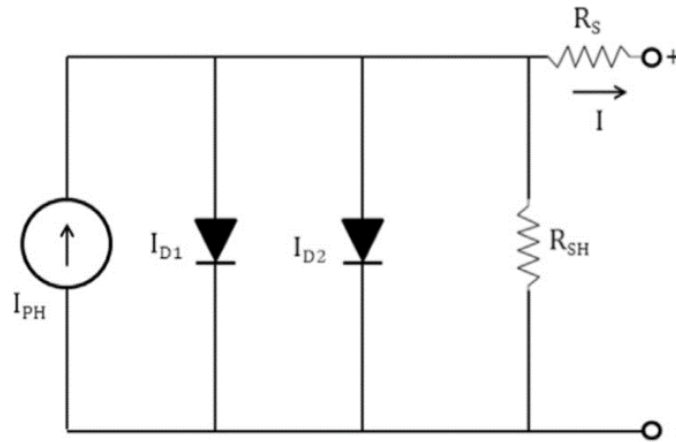
Como ya se vio, en el caso de las celdas solares DSSC Figura 1-3, son fabricadas con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), la luz solar pasa a través de un electrodo transparente y llega a un tinte sensible impregnado en el electrodo opuesto. Cuando una molécula del tinte absorbe la luz, un electrón pasa a tener un estado excitado y puede saltar desde el tinte a la banda de conducción por medio de los nano-poros del  $\text{TiO}_2$ . En el segundo electrodo, el electrón se difunde desde el  $\text{TiO}_2$  hacia el vidrio conductor y desde allí es llevado mediante un campo conductor hacia el electrodo opuesto; después de haber perdido un electrón, la molécula del tinte se encuentra oxidada, es decir, tiene un electrón menos que antes; la molécula del tinte recupera su estado inicial cuando el electrón es reinyectado a través del primer electrodo. De esta manera el proceso se transforma en un ciclo que genera una corriente eléctrica (O'Regan & Grätzel, 1991). A diferencia de los paneles solares con un tipo de unión semiconductor como los de silicio, la unión de las DSSC es de tipo química fotoeléctrica sólida-líquida.

En el modelamiento eléctrico de los paneles, tanto de la tecnología a base de silicio como de la tecnología a base de  $\text{TiO}_2$ , los distintos autores representan ese comportamiento con circuitos similares. Inicialmente la Figura 4-4 muestra el modelo eléctrico de celdas solares a base de silicio (Yadav, Tripathi, Pandey, & Kumar, 2015), en este modelo se observan dos diodos que representan la dirección de la corriente eléctrica cuando, en presencia de



radiación solar, se produce el efecto de recombinación de los pares electrón-hueco; la resistencia en serie y la resistencia en paralelo representan las pérdidas que se producen por los contactos de los semiconductores con las distintas superficies de la celda. El diodo uno conduce la corriente que surge debido a la difusión de los portadores minoritarios en la región neutra de la célula solar donde se recombinan; las pérdidas en la región de agotamiento se describen por el diodo dos, que incorpora las pérdidas de recombinación de la carga inducida en la región de agotamiento. Con la ecuación (4.5) se determina la característica de corriente-voltaje de la celda.

Figura 4-4. Modelo eléctrico de celdas solares a base de silicio



$$I = I_{PH} - I_{D1} - I_{D2} - (V + IR_S)/R_{SH} \tag{4.5}$$

Donde  $I_{PH}$  representa la fotocorriente,  $R_S$  representa la resistencia en serie y  $R_{SH}$  representa la resistencia shunt. La densidad de corriente de los diodos es expresada por  $I_{D1}$  y por  $I_{D2}$  que pueden representarse con un solo diodo según (4.6):

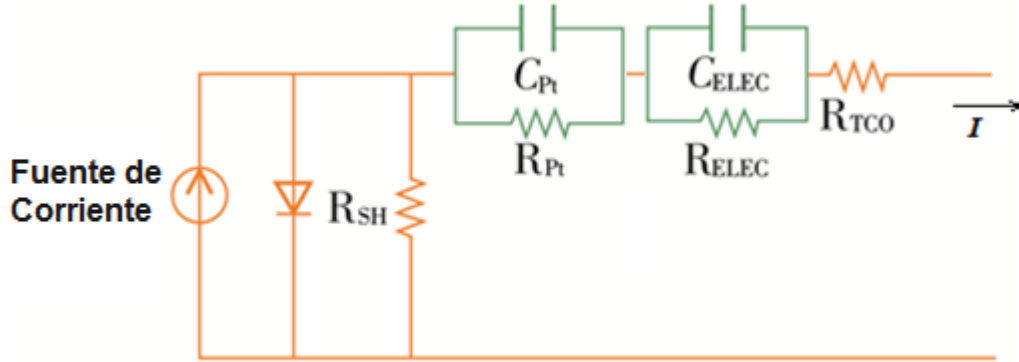
$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \tag{4.6}$$

Así las cosas, es posible tener la ecuación que representa el comportamiento del panel solar de silicio (véase (4.7)) (Jiang, Huang, & Hsiao, 2005).

$$I = I_{PH} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_S)}{nkT_k} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \tag{4.7}$$

El modelo eléctrico de los paneles solares de las DSSC (Chae, Lee, Kim, Lee, & Kim, 2010) visto en el capítulo 2 para DSSC es mostrado nuevamente en la Figura 4-5.

Figura 4-5. Modelo eléctrico DSSC utilizado por Chae



En el circuito anterior  $R_{TCO}$  representa la resistencia al paso de la corriente en la superficie de la capa conductora transparente,  $C_{Pt}$  y  $R_{Pt}$  corresponden a la impedancia por la transferencia de electrones en la superficie de la capa de platino,  $C_{ELEC}$  y  $R_{ELEC}$  corresponden a la impedancia asociada a la transferencia de electrones en los iones del electrolito,  $R_{SH}$  es la resistencia en derivación por la transferencia inversa de electrones. Los valores de  $C_{Pt}$  y  $C_{ELEC}$  están en el rango de  $10 \mu F/cm^2$  a  $1 F/cm^2$ , valores lo suficiente altos como para ignorar estos capacitores teniendo en cuenta que las DSSC producen corriente continua. Las ecuaciones (4.8) y (4.9) representan el circuito equivalente genérico de las DSSC (Chae, Lee, Kim, Lee, & Kim, 2010), en donde las resistencias en serie resultantes son llamadas  $R_S$ .

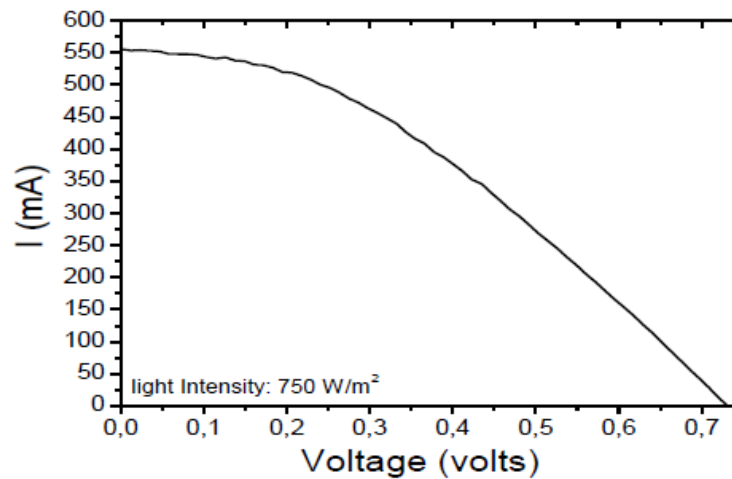
$$I = I_{Source} - I_D - I_{SH} \quad (4.8)$$

$$I = I_{Source} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V+IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V+IR_S}{R_{SH}} \quad (4.9)$$

Como se observa, los modelos eléctricos, ecuaciones (4.7) y (4.9), que rigen el comportamiento de ambos tipos de panel tienen exactamente la misma forma. Por lo tanto, con datos de paneles reales, Silicio BP-585 y DSSC de laboratorio (Stathatos, 2012) (para

una radiación de  $750 \text{ W}/\text{c}^2$  de acuerdo a la Figura 4-6), se tabulan los parámetros (véase Tabla 4-3) y se construyen las gráficas V-I en Matlab que se muestran en la Figura 4-7 y que tienen básicamente la misma forma para la salida de los paneles; las gráficas construidas en Matlab utilizan la función Lambert W tal como se muestra en el Anexo 1 de esta tesis: “Anexo 1. Código Matlab para solucionar la ecuación de los paneles solares”.

Figura 4-6. Curva de salida de un panel DSSC real de laboratorio (Stathatos, 2012).



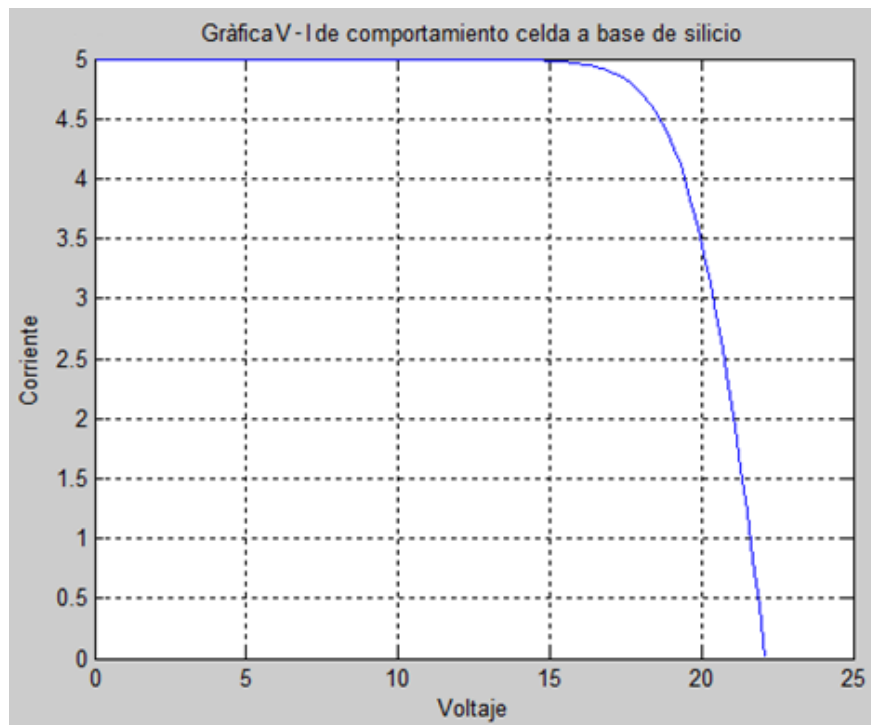
Esta similitud en el comportamiento eléctrico, permite la utilización de mecanismos de control iguales a la hora de gestionar la energía eléctrica producida por ambos tipos de paneles (Ababei, Yuvarajan, & Schulz, 2010). De esta forma, es posible afirmar que los sistemas de control empleados en los paneles de silicio pueden utilizarse, con mínimas adecuaciones, en los paneles DSSC.

Por lo tanto, solo nos resta analizar la eficiencia de conversión y los costos de operación y producción con el fin de establecer la viabilidad técnica de la implementación de soluciones a partir de paneles DSSC.

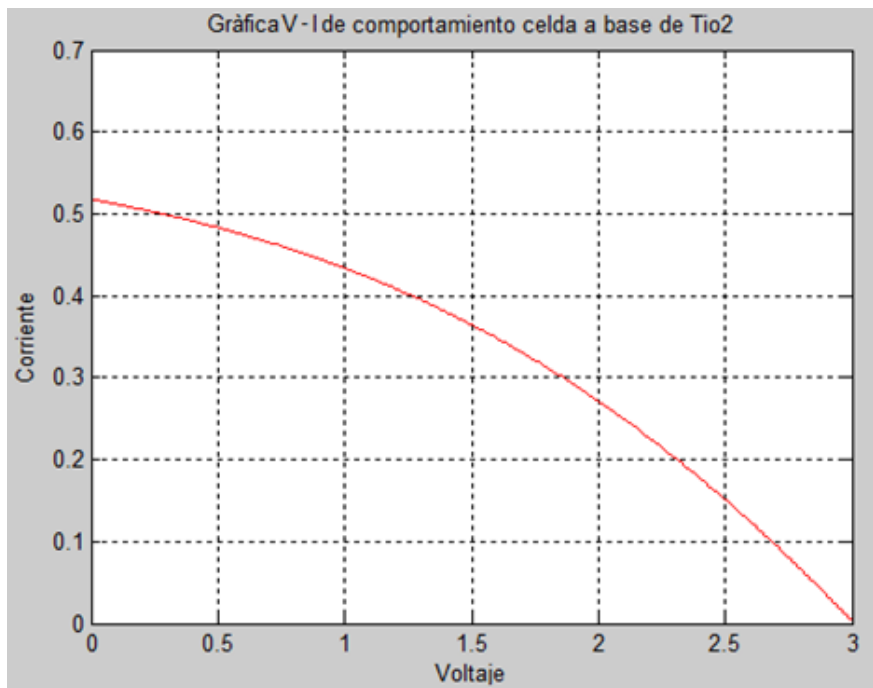
Tabla 4-3, Valores de los parámetros eléctricos de celdas reales de Grätzel y de silicio.

Parámetro	Definición	Valor panel silicio	Valor celda de Grätzel
<b>Io</b>	Corriente inicial en el diodo del modelo	9,38E-10	2,58E-03
<b>Vtd</b>	Voltaje en la juntura del diodo dependiente de la temperatura	0.9868	0.9869
<b>Rser</b>	R en serie del modelo	0.2645	1.3
<b>Rpar</b>	R en paralelo del modelo	9,31E+07	95
<b>Iph</b>	Corriente en el punto de máxima potencia	5	0.55
<b>Voc</b>	Voltaje máximo de la celda	22.1	3

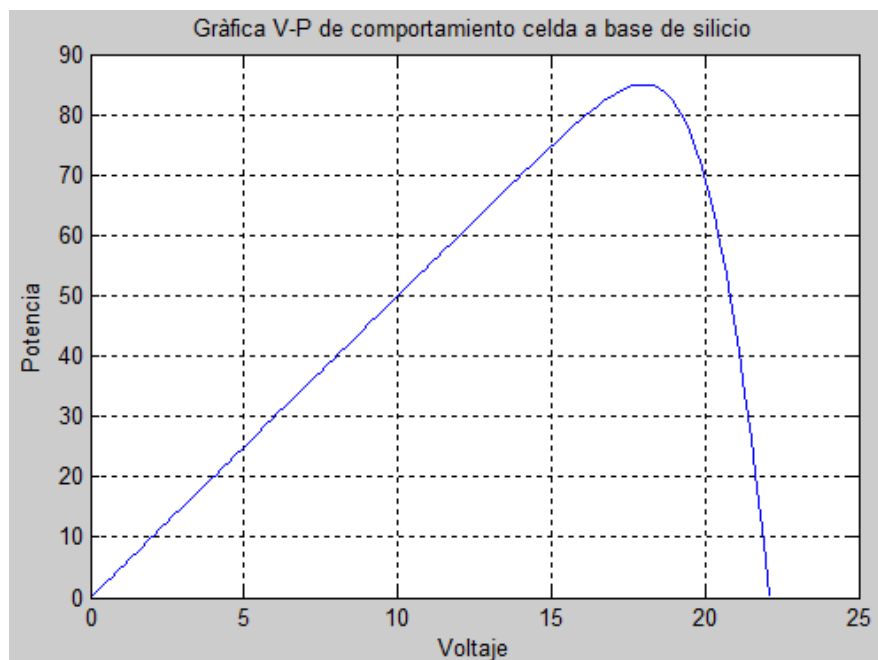
Figura 4-7. Gráficas de comportamiento eléctrico simulado en Matlab como solución a la ecuación del modelo eléctrico para celdas reales de silicio y DSSC: (a) Gráfica V-I general de salida de una celda a base de silicio; (b) Gráfica V-I general de salida de una celda DSSC; (c) Gráfica V-P general de salida de una celda a base de silicio; (d) Gráfica V-P general de salida de una celda DSSC.



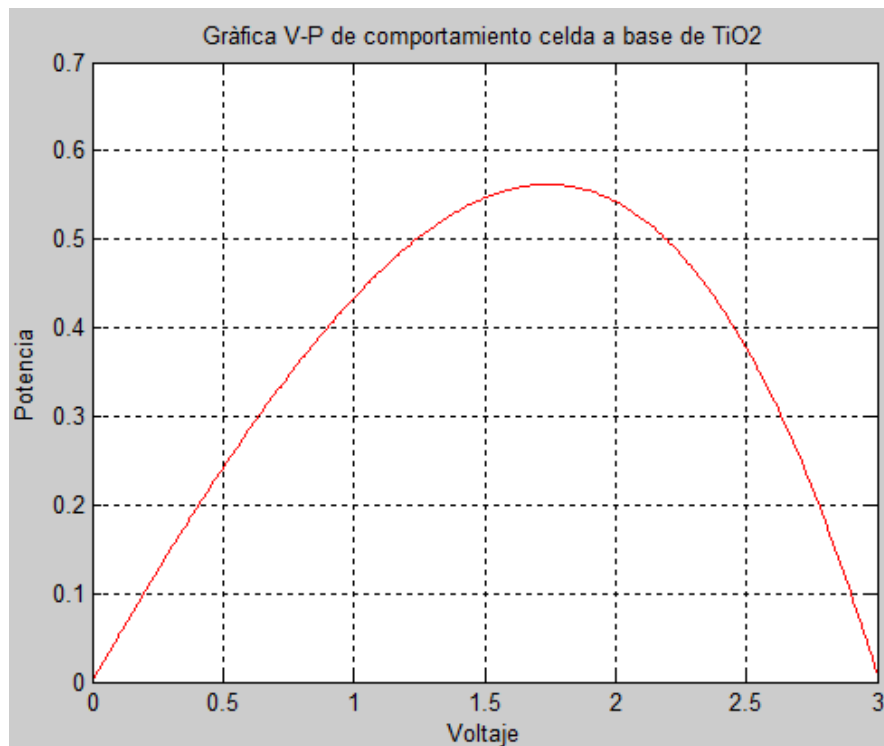
(a)



(b)



(c)



(d)

### 4.3 Costo de operación y producción de paneles a base de silicio y paneles DSSC

Los costos en los que se debe incurrir durante la vida útil de los sistemas de generación solar para que se conserven en buenas condiciones incluyen la limpieza adecuada y periódica de los paneles fotovoltaicos así como de los otros equipos del sistema y el llenado oportuno del agua de las baterías cuando se trata de baterías de Pb-ácido abiertas. Dichos costos de mantenimiento son muy bajos y representan igualmente un bajo porcentaje del costo total del sistema a lo largo de toda su vida útil (Rodríguez, González, Rincón, & Logreira, 2012). Dichos costos de mantenimiento son muy similares para las dos tecnologías de celdas solares si se tiene en cuenta que los equipos adicionales del sistema son los mismos y que la limpieza de los paneles de Grätzel también es necesaria.

Otros costos en los que se debe incurrir son las baterías llegan al fin de su vida útil. Generalmente, esto sucede después de 3 - 5 años de uso, pero depende en buena medida del mantenimiento y de los ciclos de carga/descarga a los que fue sometida la batería. En este punto el costo para ambos sistemas no tendría ninguna diferencia.

Con la perspectiva de costos de operación similar en ambas tecnologías, es oportuno recalcar la diferencia en los costos de producción, ya que es ahí donde adquieren importancia las celdas de Grätzel. En la fabricación de celdas fotovoltaicas a base de silicio se utiliza silicio metalúrgico, puro al 98%, el cual es obtenido de pedazos de piedras de cuarzo; el silicio se purifica mediante procedimientos químicos hasta lograr esa alta pureza en la que se denomina silicio de grado solar; la temperatura a la que se funde el silicio para lograr esta pureza está alrededor de los 1500 °C durante varias horas. En el caso de las celdas de Grätzel el TiO<sub>2</sub> se utiliza como semiconductor, mientras que un complejo de Rutenio suele utilizarse como tinte sensible; en el proceso de fabricación para la unión de estos dos componentes se utiliza un tratamiento térmico a una temperatura cercana a los 125 °C durante diez minutos y se realiza un plastificando de todos los componentes a cerca de 450 °C durante 30 minutos.

Se ha dicho que ambas tecnologías utilizan como base materiales abundantes en el planeta, sin embargo se menciona en los párrafos anteriores que en la fabricación de las celdas a base de silicio se requiere mucha más energía que en la fabricación de celdas de Grätzel; de esta forma se justifica el bajo costo de producción que menciona el inventor de esta nueva tecnología (O'Regan & Grätzel, 1991). Por lo demás es lógico pensar que al ser las celdas de Grätzel elementos flexibles y de poco peso también será menos costoso su transporte e instalación con respecto a las celdas a base de silicio que son rígidas y pesadas.

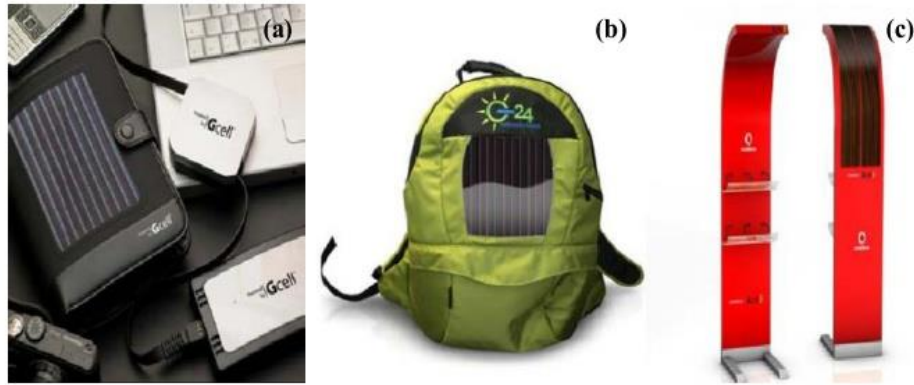
## 4.4 Aplicaciones de paneles a base de silicio y paneles DSSC

Entre la gran cantidad de aplicaciones que a través de los años han utilizado las celdas solares a base de silicio como generadoras de energía, se pueden destacar las granjas de generación que proporcionan varios cientos de megavatios para atender la demanda de ciudades enteras. Por otra parte las celdas solares DSSC incursionan incipientemente en la industria mundial; por el momento se está fabricando celdas de este tipo para incrustar en maletas personales y de viaje, publicidad en paradas de autobús, fachadas, muros, ventanas, decoración de interiores, granjas de efecto invernadero y aplicaciones a la medida para proyectos como edificios inteligentes. La Figura 4-8 muestra algunos de estos productos. Las compañías que hasta el momento ofrecen estos nuevos productos son:

- Konarka, EEUU, produce DSSC sobre sustrato flexible.
- G24i Innovations, Gales, Produce DSSC flexible.
- Dyesol, Australia, comercializa los componentes para elaboración de DSSC: colorantes, pasta de TiO<sub>2</sub>, etc; ha logrado un avance técnico mediante el aumento de la eficiencia usando un DSSC de estado sólido (ssDSC) de más del 15% a pleno sol en módulos de laboratorio.
- Solaronix, Suiza, comercializa los componentes de DSSC.
- 3Gsolar, Israel, Produce de módulos DSSC de bajo costo.
- Solarcoating Machinery GmbH, Alemania, Comercializan maquinaria para la producción de DSSC con tecnología de Konarka.
- Sony, quien incursiona con su producto decorativo Hana-Akari.
- Sharp y Fujikura entre otros



Figura 4-8. (a) Cargador Notebook, (b) Mochilas solares, (c) estación de carga solar móvil.



#### 4.4.1 Arreglos de Paneles Solares

Hasta el momento se ha estudiado como es la generación de energía a través de celdas solares, pero es necesario aclarar que para satisfacer los requerimientos de potencia de los sistemas eléctricos comunes se requiere unir varias de ellas, porque generan poca energía, y formar paneles de tal manera que se aumente ya sea la corriente, el voltaje o ambos, de acuerdo a las particularidades de la carga.

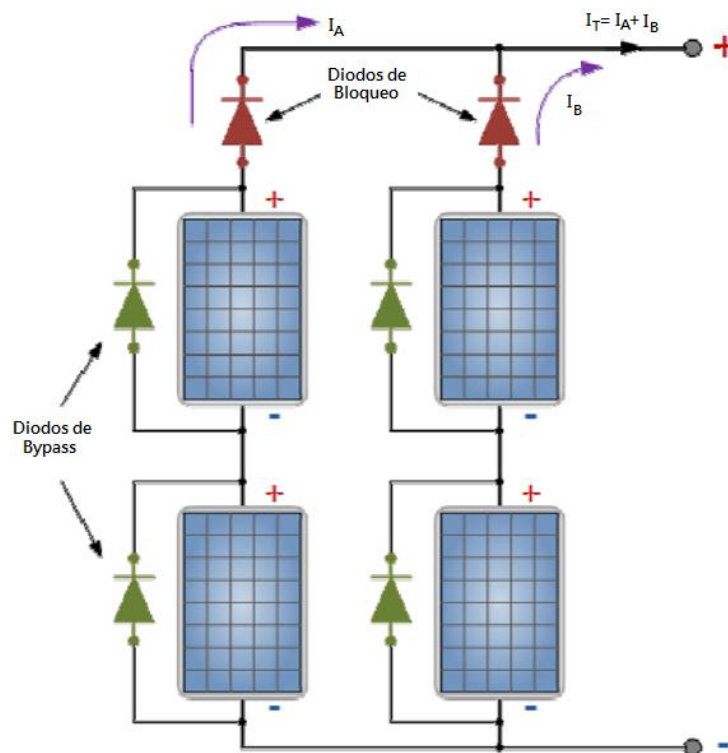
En la conexión en serie la terminal negativa de una celda se conecta a la terminal positiva de la siguiente y se obtiene como resultado el incremento de voltaje, en la conexión en paralelo la terminal negativa de la celda se conecta a la terminal negativa de la siguiente y la terminal positiva se conecta a la positiva de la siguiente celda, obteniendo como resultado el incremento de la corriente de salida.

La Figura 4-9 muestra la topología serie-paralelo de un arreglo de paneles fotovoltaicos, a los cuales se ha adicionado diodos de protección, llamados diodos de bypass, y diodos de bloqueo. La función de los diodos de bypass es la de proteger la integridad del panel o del grupo de celdas del que hace parte; si en el panel de la Figura 4-9 alguna de las celdas se encuentra sombreada, la corriente la evita pasando por su respectivo diodo de Bypass, y aunque pierda rendimiento la serie seguirá cerrada y funcionando; si no existiera dicho diodo el circuito se abriría y se perdería la potencia que genera la celda que no está

sombreada, además este diodo protege las celdas de posibles contracorrientes producidas en las demás celdas de la misma serie (Restrepo-Cuestas, Trejos-Grisales, & Ramos-Paja, 2013).

La función de protección de los diodos de bloqueo se hace evidente al no haber radiación solar (cuando sea de noche) lo que ocurrirá en el circuito será todo lo contrario a lo que se pretende, el circuito hará que se descarguen las baterías si no cuenta con diodos de bloqueo; además este diodo protege la serie de celdas del panel a las que está conectado de corrientes inversas o contracorrientes que se puedan producir desde la carga o desde otras series del panel (Wang & Hsu, 2010). Habitualmente, todos los paneles fotovoltaicos de cierta calidad, llevan incorporados en su caja de conexiones el diodo de bloqueo, aunque si el sistema está controlado por un regulador, el diodo no es necesario en lo que concierne a esta función.

Figura 4-9. Arreglo de celdas en el panel solar



#### 4.4.2 Reconfiguración de arreglos de paneles fotovoltaicos

Se llama perfil de radiación solar a la forma como los rayos solares entran y caen a la superficie de la tierra en un periodo de tiempo determinado en un lugar en particular, las condiciones ambientales propensas a modificar el perfil solar son las mismas que producen un sombreado parcial de las celdas o paneles solares, y para atacar este efecto del sombreado parcial de las celdas y de aprovechar al máximo el perfil de radiación solar predominante en cierta ubicación geográfica, se han investigado nuevas formas de interconexión entre celdas y paneles distintas a las ya tradicional SP (serie-paralelo) y SS (simple-serie). Es así como nuevas configuraciones han surgido, entre ellas la TCT (total-crosstied), BL (bridge-linked) y HC (honey-comb). Las configuraciones habituales como la SS y SP son empleadas por su simpleza y menor costo debido a la poca cantidad de cables que requieren. La configuración que obtiene los mejores rendimientos es la TCT, la cual incrementa la extracción de energía eléctrica de un mismo arreglo en 3,8% en comparación con la SP, lo sigue la configuración BL con un 2,3% (A. Bidram, 2012). La configuración HC se encuentra por debajo de TCT pero obtiene mejores resultados en potencia y factor de llenado que la BL (Y.-J. Wang and P.-C. Hsu, 2011). Aunque las configuraciones anteriores se han aplicado en arreglos de paneles a base de silicio (D.R. Clark, 1984), nada demuestra que no es posible lograr estas mejoras en la eficiencia en paneles DSSC.

#### 4.4.3 Sistema de generación real con celdas de Grätzel.

Utilizando los datos de las celdas de Grätzel obtenidos hasta el momento es posible plantear un caso de estudio en el que se dimensione un sistema fotovoltaico estimando las necesidades de energía eléctrica y el área que debe ser cubierta con paneles DSSC en una localidad ubicada en las ZNI. Lo primero es tabular los aparatos eléctricos comunes y su consumo habitual (potencia y horas de uso diario) teniendo en cuenta que para este tipo de zonas es posible plantear sistemas de consumo de energía de tipo dc dado que no existe red cableada que es la que necesariamente utiliza corriente alterna para posibilitar su transporte en la red. La tabla 4-4 muestra una posible distribución de cargas dc con la potencia y la energía consumida diaria como caso de estudio.

Para una tensión nominal del sistema de 24 V se tiene que el consumo promedio de corriente diaria sería:

$$I_{md} = \frac{976Wh}{24V \cdot día} = 40.7Ah/día \quad (4.11)$$

Tabla 4-4. Cargas típicas y su consumo de energía eléctrica diaria (Mediciones propias).

Elemento	Cantidad	Potencia	Uso	Energía
Lámparas LED	4	9 W/lámpara	4 h/día	144 Wh/día
TV/PC	1	65 W	2 h/día	130 Wh/día
Electrodomésticos	1	51 W	2 h/día	102 Wh/día
Frigorífico	1			600 Wh/día
<b>Energía total diaria</b>				976 Wh/día

Una aplicación típica para una zona no interconectada puede ser la trabajada en (Ramos-Paja, González, & Serna-Garcés, 2015) y mostrada en la Figura 4-10, en donde se hace uso de un arreglo de paneles, un banco de baterías con su sistema de carga y descarga, y la carga DC a alimentar que pueden ser o no bidireccional.

Al incluir en el caso de estudio las celdas DSSC utilizadas en el numeral 4.3 (Stathatos, 2012) que ofrecen 550 mA a 0.7 Vdc en tres tiras de 2 por 20 cm con un área total de aproximadamente 11 cm<sup>2</sup> (5 A/m<sup>2</sup> a 0.7 Vdc) se tiene que la potencia por metro cuadrado que puede suministrar esta área es la mostrada en la ecuación (4.12):

$$P = 5A/m^2 * 0.7V * 0.53 = 1.855W/m^2 \quad (4.12)$$

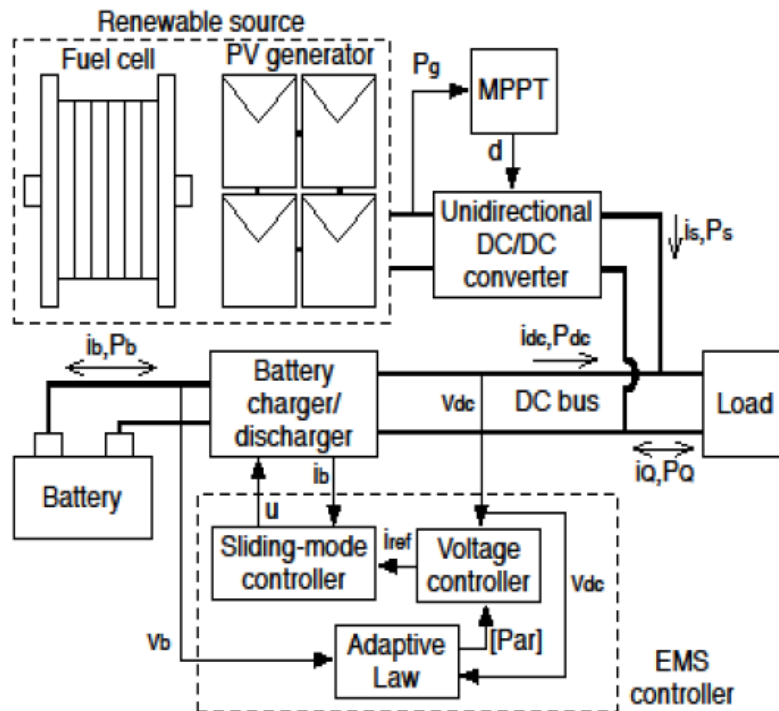
Dado que en promedio se tienen alrededor 12 horas de luz en Colombia, diariamente se podría obtener de estas celdas a energía de acuerdo a la ecuación (4.13):

$$E_{DSSC} = (12h/d) * (1.855W/m^2) = 22.26Wh/dm^2 \quad (4.13)$$

Y teniendo en cuenta que según la Tabla 4-4 se necesita 976 Wh/d, la ecuación (4.14) indica que el área que debe ser cubierta por los paneles DSSC es:

$$A_{DSSC} = \frac{976 \text{ Wh/d}}{22.26 \text{ Wh/dm}^2} = 43.84 \text{ m}^2 \quad (4.14)$$

Figura 4-10. Sistema de potencia híbrido con fuentes renovables (Ramos-Paja, González, & Serna-Garcés, 2015)



Esta área de  $43.84 \text{ m}^2$  puede ser cubierta con facilidad en el techo de la localidad misma que va a alimentar y con un retorno de la inversión medida en meses de acuerdo a (Ali, y otros, 2014).

Por último se mencionan los siguientes casos de éxito de instalaciones con paneles solares de silicio en ZNI de Colombia (IPSE, 2013), que junto con los puntos desarrollados hasta el momento abren la posibilidad de usar en el mismo sentido los paneles de Grätzel.

- Sistema Híbrido Solar – Diésel en Titumate (Chocó): Este proyecto, que fue implementado por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE, produce electricidad para la localidad con un 70% de energía proveniente del sol y un 30% con el combustible

fósil diésel, lo que hace que haya una alta reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para el ambiente. El sistema provee a 106 usuarios, entre los que se cuentan aproximadamente 600 personas y cuenta con una capacidad de 105 kWp. Entró en funcionamiento el 25 de julio de 2013.

- Sistema solar fotovoltaico en instalaciones administrativas PNN Macuira: En el Parque Nacional Natural Macuira ubicado en el municipio de Uribia, en el departamento de la Guajira, se instaló el sistema solar con capacidad de 2.66 kWp. para suministrar con energía eléctrica la sede administrativa y la sede social de la comunidad de Siapana.
- Sistema solar fotovoltaico en el corregimiento de Camarones: Sistema con energía solar para bombeo de agua de un pozo con profundidad de 100 metros, la capacidad de bombeo del sistema es de 80m<sup>3</sup> día. El sistema cuenta con un conjunto de paneles solares que captan la radiación solar y la transforman en electricidad, la cual es enviada al centro de potencia solar donde se procesa en sus controladores buscando obtener valores de voltaje adecuados para la operación del sistema.
- Sistema solar fotovoltaico en el Parque Nacional Natural Utría: Áreas administrativas, cabañas y centros de interpretación se alimentan eléctricamente con ocho sistemas solares fotovoltaicos de generación eléctrica promovidos por el Ministerio de Minas y Energía a través del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas – IPSE. El parque está ubicado en el departamento del Chocó.
- 5.Soluciones energéticas instaladas en la Sierra Nevada de santa Marta: El IPSE entregó el 5 de octubre de 2013 un proyecto fotovoltaico que brinda soluciones energéticas a las comunidades indígenas Seywiaka, Kantinurwa, Gunmaku, Rongoy, Maruamake, Simonurwa y Kankawarwa. Los paneles solares suministran luz eléctrica para salones de clase y centros médicos, gracias a lo cual ahora pueden conservar vacunas y medicamentos. Este proyecto beneficia a 2.179 personas.

## 4.5 Viabilidad Técnica de paneles DSSC

A través de este capítulo se han identificado fortalezas y debilidades de las celdas de Grätzel en comparación con las celdas solares clásicas a base de silicio; se encontró un comportamiento similar en la generación de energía de acuerdo al modelamiento eléctrico de ambas tecnologías, se conocieron y compararon las técnicas y los materiales de fabricación que permitieron comprender el bajo costo de producción de las celdas DSSC, se habló además acerca de la tabulación científica periódica de los valores de eficiencia de conversión de energía de los distintos tipos de celdas solares y se resume en la Tabla 4-5 los valores de la versión 45 para las tecnologías estudiadas (tablas de eficiencia solar *Cell Efficiency Tables*) (Barkhouse, y otros, 2015).

Tabla 4-5. Resumen de las tablas de eficiencia de paneles solares versión 45 (Barkhouse, y otros, 2015)

Clasificación	Eficiencia (%)	Área (cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Fill factor (%)	Centro de Test (Fecha)	Descripción
Si (crystalline)	25.6 ± 0.5	143.7 (da)	0.740	41.8d	82.7	AIST (2/14)	Panasonic HIT, rear junction
Si (multicrystalline)	20.8 ± 0.6	243.9 (ap)	0.6626	39.03	80.3	FhG-ISE (11/14)	FhG-ISE (11/14)
Dye	11.9 ± 0.4m	1.005 (da)	0.744	22.47n	71.2	AIST (9/12)	Sharp
Dye (minimodule)	10.0 ± 0.4m	24.19 (da)	0.718	20.46e	67.7	AIST (6/14)	Fujikura/Tokyo U

(ap) = aperture area; (da) = designated illumination area

Al comparar la eficiencia de conversión de energía de ambas tecnologías se encuentra que las celdas solares clásicas basadas en silicio son alrededor del doble de eficientes que las celdas de Grätzel; la siguiente lista pretende determinar la viabilidad técnica de estas últimas y justificar las inversiones económicas y en general los esfuerzos que se puedan hacer en su implementación como una opción distinta a la ya existente:

- Como se ha dicho, en la producción de las celdas a base de silicio se requieren temperaturas mucho mayores que en la fabricación de celdas de Grätzel, y teniendo en cuenta además los menores costos esperados de instalación y transporte se puede pensar, como lo afirma Michael Grätzel, en una opción de generación a bajo costo.
- Con nuevas técnicas de fabricación la eficiencia de los paneles de Grätzel ha aumentado año tras año, por ejemplo, en (Green, Emery, Hishikawa, Warta, & Dunlop, 2012) se evidencian valores de eficiencia para Dye del 11%, mientras que para Dye (minimodule) alcanzan el 9.9%. En (Barkhouse, y otros, 2015) (véase Tabla 4.5) las eficiencias pasan al 11.9% y 10% respectivamente. Por último, un reciente trabajo publicado en Nature (Burschka, et al., 2013) muestra que es posible obtener paneles DSSC con eficiencias cercanas al 15%.
- Hoy en día está más que demostrada la viabilidad técnica de los paneles a base de silicio, pero cuando inició la producción comercial de estos su eficiencia era mucho menor que la eficiencia actual de los paneles DSSC (Chapin, Fuller, & Pearson, 1954).
- Colombia cuenta con una ubicación geográfica privilegiada en relación a la radiación solar en la tierra con muchas horas de sol al día y con un promedio de radiación por encima de países que usan comúnmente paneles solares para generar energía (IDEAM, Unidad de Planeación Minero Energética, 2005).
- Cada solución implementada con paneles DSSC debe considerar el área total necesaria y la cantidad de paneles y demás componentes del sistema que permitan el correcto suministro de energía eléctrica en su proyecto.

Con experimentación directa en el laboratorio se comprobó la diferencia en la eficiencia de generación para celdas de áreas iguales según la teoría encontrada; esta y las demás variables fueron utilizadas para determinar la viabilidad de las celdas de Grätzel teniendo en cuenta el mercado sostenible que ya tienen las celdas a base de silicio.

Las conclusiones de este capítulo permiten avanzar en la propuesta de una metodología de caracterización de las celdas solares DSSC, ya que sus fortalezas, con respecto a las



celdas solares convencionales, las hacen atractivas y por consiguiente candidatas a ser las fuentes de generación de energía eléctrica solar preferidas en un futuro cercano.

## **5. Método de caracterización de paneles DSSC**

La producción de energía eléctrica, a partir de paneles fotovoltaicos, cada vez gana mayor importancia, esto se debe, fundamentalmente, a la necesidad que se tiene de fuentes de energía alternas a las convencionales, que permitan reducir el costo de montaje y de operación y que presenten un mínimo impacto ambiental. Por esta razón y con el objetivo de determinar teóricamente la eficiencia y saber cuánta energía se puede extraer de determinada área en términos de voltaje, corriente y potencia, se desarrolla en este capítulo un método que permite la caracterización de paneles DSSC. Se pretende que mediante el análisis y el procesamiento de los resultados se puedan diseñar sistemas con paneles solares de Grätzel en los que se maximice la extracción de energía.

Se presenta a continuación un sistema automático para la caracterización eléctrica de dichos paneles, el cual permite obtener las curvas de I-V, P-V e I-P a partir de una carga electrónica controlada por puerto serie y un programa de computador desarrollado con LabView. El sistema permite caracterizar paneles DSSC o el arreglo de estos con un voltaje de operación de hasta 18 voltios y una corriente máxima de 5 amperios. Las curvas características son almacenadas en una base de datos para futuras referencias.

En la revisión del estado del arte, se encuentran varios trabajos que se han realizado para caracterizar paneles fotovoltaicos. En (Yang & Chen, 2009), se utiliza un modelo de celda solar programado en LabView (National Instruments, 2013), basándose en las características de salida de un panel de silicio, simulando la potencia solar con diferentes puntos de radiación, la resistencia interna y el factor de forma del modelo. Los resultados verifican la característica no lineal de salida de estas celdas y confirman que la resistencia interna es un factor clave para el punto de máxima potencia y para el factor de forma de

las celdas solares. En (Ming, Liu, & Zhang, 2010), se habla del efecto del viento en la eficiencia de los paneles solares, utilizando este programa para comprobar los resultados del cálculo teórico con el análisis comparativo. En (Shuhui & Huiying, 2010) se investiga sobre las características V/I y V/P de las celdas solares y los módulos fotovoltaicos cuando operan bajo sombra desigual, también examinan la relación entre las propiedades semiconductoras y las exigencias eléctricas externas; además se grafican las características de extracción de potencia del sistema, donde se concluye que bajo condiciones de sombra irregulares los paneles presentan múltiples picos en sus características fotovoltaicas.

En (Leikai, Liang, Kunpeng, Wei, & Zhongquan, 2011), se construye un programa en Labview para describir las curvas características I-V y calcular los parámetros característicos básicos de los paneles. Los resultados demuestran que el sistema puede medir con precisión todos los parámetros de la celda solar.

En los anteriores escritos no se realiza la caracterización automática de paneles reales DSSC, tal como se propone en el presente capítulo.

La solución que se presenta para la caracterización de paneles fotovoltaicos DSSC permite determinar en forma automática las curvas P-V, I-P y I-V, de tal manera que se puede comprobar la veracidad de los datos proporcionados por los fabricantes de los paneles comerciales, sacar las características de funcionamiento de nuevos prototipos y cuantificar con mayor exactitud los parámetros de los controladores diseñados para las pruebas de laboratorio.

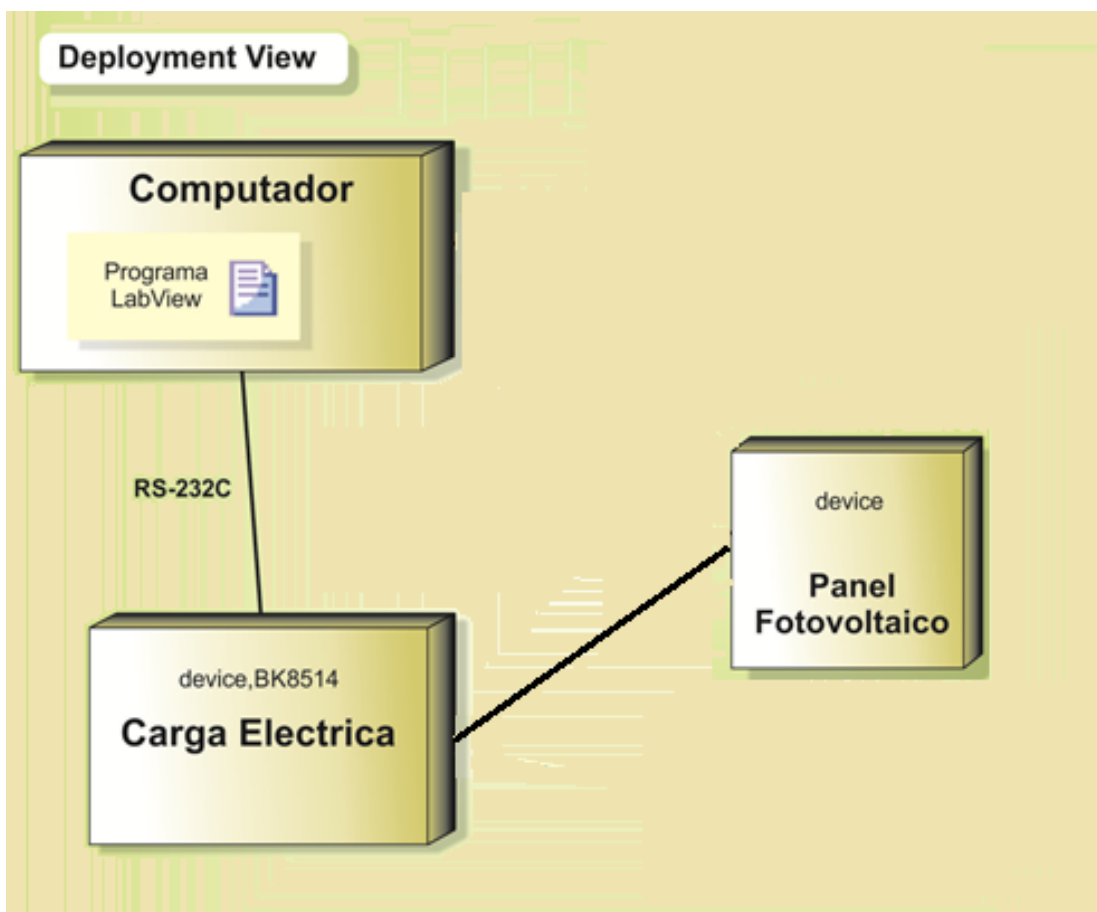
## 5.1 Metodología del sistema de caracterización

El sistema de caracterización tiene como sede de trabajo el Laboratorio de Fuentes de Energía Renovable del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, (Serna G, Arango Z, Ramos Paja, & Saavedra Montes, 2012) que cuenta con los equipos de medida y de potencia, paneles solares y software necesarios, tanto para este proyecto como para otros enfocados en las fuentes de energía renovable, que ha sido escenario de trabajos de investigación de Ingenierías, Maestrías y Doctorados de la Universidad Nacional de

Colombia, y que se proyecta como alternativa de capacitación e investigación en el tema para todo el país.

El diagrama de despliegue del sistema de caracterización de paneles fotovoltaicos puede verse en la Figura 5-1. Allí se identifican tres grandes bloques que incluyen: los paneles fotovoltaicos, la carga electrónica y el computador con la aplicación en LabView.

Figura 5-1. Diagrama de despliegue del sistema de caracterización de paneles fotovoltaicos



### 5.1.1 Dispositivos y equipos

La plataforma requiere celdas solares que son las encargadas de la generación de energía, equipos de medida para obtener la información de corriente y voltaje, sensores de radiación solar y de temperatura y la carga electrónica.

El módulo de carga utilizado es el BK PRECISION 8514 mostrado en la Figura 5-2. Este es un dispositivo de dos terminales que pueden conectarse a cualquier fuente de DC cuyos parámetros estén configurados. Este tipo de cargas electrónicas se utilizan para el diseño, la fabricación y la evaluación de las fuentes de alimentación como baterías químicas, pilas de combustible, pruebas de celdas fotovoltaicas o cualquier elemento generador similar.

La carga puede ser configurada para presentar una dinámica cambiante con conmutación de milisegundos, se puede programar de forma remota a través de una interfaz serie RS-232 como se realiza en la aplicación descrita en este capítulo, con opciones de disparo para ser sincronizado con otros eventos.

Figura 5-2. Módulo de carga BK Precision 8514



La carga puede operar bajo las siguientes modalidades:

- Voltaje constante a partir de una fuente de CC.
- Corriente, voltaje o potencia constante a partir de una fuente DC.
- Presentar una resistencia constante a la fuente DC (este comportamiento simula una resistencia que no cambia como función de la corriente o de la tensión).

Características:

- Potencia de máximo 1,200 W, operación entre 0-120 VDC, de 1 mA a 240 A.
- Operación en corriente constante (CC), resistencia constante (CR), voltaje constante (CV) y potencia constante (CP).
- Medición en alta resolución de voltaje y corriente (1 mA/1 mV) dependiendo del rango.
- Pantalla brillante y fácil de leer, con tecnología VFD.
- Generador integrado de condiciones transitorias de corriente, voltaje o potencia.
- Programable mediante la interfaz RS232, con el cable convertidor serial RS232 a TTL y con la aplicación de software incluida.
- Adaptador USB de comunicación, opcional (IT-E132).
- Modo de lista para incremento de rendimiento.
- Modo de prueba de batería.
- Captura flexible: Creación de eventos de captura en el panel frontal con una pulsación y en el panel trasero con la señal TTL o con software.

### 5.1.2 Medidor de radiación solar

El medidor de radiación solar usado es de la marca Mac-Solar, es un aparato que indica la energía debida a intensidad de la luz solar en unidades de  $W/m^2$  y la temperatura en °C entre otras. La Figura 5-3 muestra el medidor.

En este aparato la medición de la intensidad de la luz se hace con células solares de silicio mono cristalinas que reciben el abastecimiento de energía del mismo equipo. El procesador integrado en el medidor de radiación solar ejecuta una corrección automática que hace que se mantenga la precisión de la medida y los datos guardados en la memoria interna de este equipo pueden transmitirse con ayuda de un software a la interfaz de serie de un PC. Este medidor de radiación solar fue creado para su uso en el exterior y está cubierto por una carcasa de plástico resistente a las inclemencias meteorológicas.

Características:

- Permite medición in situ del rendimiento energético del sol

- Permite medición de larga duración con la memoria de valores interna
- Permite medición de rendimiento solar
- Permite medición solar comparativa
- Tiene funciones para obtener valor mínimo, máximo y Data-Hold
- Contiene dos células fotovoltaicas en serie de idénticas dimensiones para la alimentación del equipo.
- Una célula calibrada que realiza la medición.

Figura 5-3. Medidor de radiación solar Mac-Solar



La Tabla 5-1 resume el rango de valores de operación y para las diferentes variables y la resolución para cada una de ellas.

Tabla 5-1. Rango de valores de operación del medidor solar Mac-Solar

	$P_{tot}$	T	$P_n$	$U_n$	$I_n$	horas
Unidad	$W/m^2$	$^{\circ}C$	%	%	%	h
Rango	0 ... 1500	-40 ... +85	0 ... 150	0 ... 150	0 ... 150	0 ... 9999
Resolución	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1 / 1

Aplicaciones habituales:

- Con el medidor de radiación solar Mac-Solar se puede realizar una medición directa de intensidad luminosa o temperatura en una posición definida. Estos valores pueden grabarse momentáneamente con la función Hold o extraerse para la comprobación del grado de efectividad de los módulos fotovoltaicos o las instalaciones solares y térmicas, además en la pantalla aparecen las magnitudes ajustadas de intensidad luminosa y de temperatura modular.
- Simulación de temperatura, potencia, tensión y corriente de módulos fotovoltaicos. El medidor de radiación solar calcula internamente la temperatura modular por medio de las magnitudes reales como son medidas de intensidad de la luz y de temperatura y luego se ejecutan en una instalación ajustable de módulos fotovoltaicos del aparato.
- El medidor de radiación solar Mac-Solar está equipado internamente con una aritmética de valores medios y un logger de datos para mediciones de larga duración. También detecta la radiación solar total a través de su célula fotovoltaica calibrada, es decir, la radiación directa y la radiación difusa de la atmósfera. El mayor contenido energético de la radiación solar que llega a la superficie terrestre se encuentra en la banda visible e infrarroja del espectro, ya que el ultravioleta es absorbido por la atmósfera.

La Tabla 5-2 muestra las características del medidor de radiación solar Mac-Solar.

Tabla 5-2. Características del medidor de radiación solar Mac-Solar

Desviación máxima de la medida.	< 2 % ±1 rango 100 ... 1000 W/m <sup>2</sup> / AM1,5
Potencia necesaria (sleep / active mode)	0,6 / 4 Mw
Potencia nominal del módulo solar integrado	180 mW
Capacidad de la memoria de datos	64 kb
Transmisión de datos	interfaz de serie RS 232
Rango de temperatura ambiental	-20 ... +45 °C
Humedad máxima	95 % H.r.



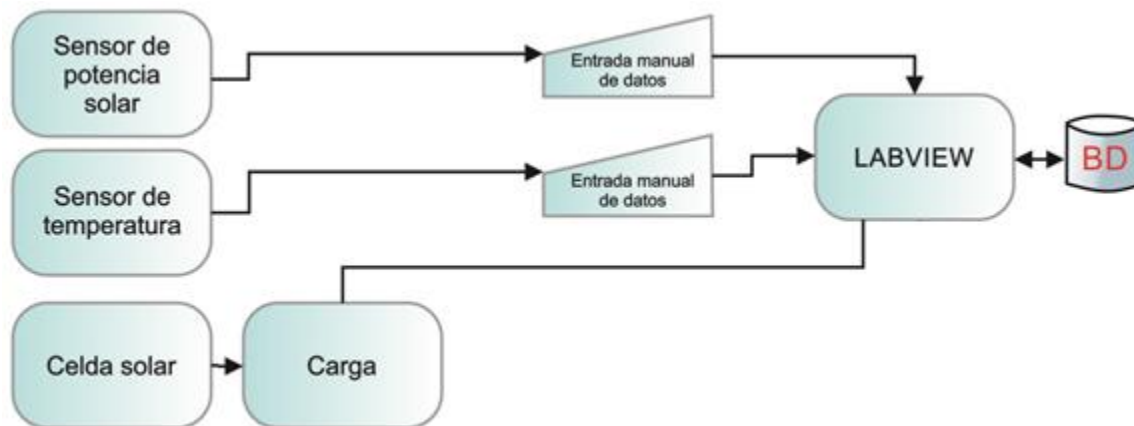
Pantalla	pantalla LCD de 13mm
	contraste ajustable
Alimentación	por célula solar propia
Dimensiones	130 x 90 x 30 mm
Peso	170 g
Comprobaciones / Normas	CE / EN 50081, 50082, 55014,
	55022, 60068, 60529, IEC68

### 5.1.3 Software del sistema

Según (National Instruments, 2013), LabView es un entorno de desarrollo gráfico utilizado por la industria y la academia para la adquisición de datos y el control de instrumentos industriales por medio de software. Con la integración de este programa, el hardware y los elementos de adquisición de datos, el sistema puede obtener los valores y dibujar la curva V/I de salida del panel haciendo un incremento automático de la corriente que consume la carga electrónica. En el programa es posible adicionar la información de los parámetros ambientales y calcular los valores de rendimiento de los paneles, utilizando las ecuaciones (4.1) y (4.2).

El esquema de flujo de datos de la aplicación es mostrado en la Figura 5-4, y en el algoritmo mostrado en la Figura 5-5 se repasan los pasos que se deben seguir, bien sea para consultas de caracterizaciones pasadas o para ingresar nuevos datos de caracterización.

Figura 5-4. Esquema de flujo de datos de la aplicación



En el algoritmo mostrado en la Figura 5-5 se evidencia la flexibilidad del programa a la hora de caracterizar los paneles solares, además de permitir almacenar la información de identificación de fabricantes y los modelos, además de las características ambientales. Con la información almacenada es posible consultar caracterizaciones anteriores. Para hacer la caracterización de cualquier panel solar se deben seguir los siguientes pasos en el orden que se muestran:

- Conectar y activar la transmisión de datos vía puerto serial RS 232 entre la carga electrónica y el computador que tiene instalado el LabView.
- Correr el programa: "Lectura Paneles V4.vi"
- Conectar los componentes del sistema: Paneles, carga electrónica y computador.
- Encender los equipos necesarios y hacer la medición de los datos ambientales en cuanto a radiación solar y temperatura
- Escoger el puerto por el que se va a comunicar el computador con la carga electrónica. (Por lo general COM1)
- Ingresar la cantidad de muestras que se van a tomar.
- Ingresar el incremento de corriente que va a tener la carga.
- Ingresar información de Marca/modelo/serial de la celda solar.
- Ingresar manualmente el valor de la potencia solar en la superficie de la celda.
- Ingresar manualmente el valor de la temperatura en la superficie de la celda.

- Activar guardar si se requiere almacenar la información tomada o desactivarlo si se va a realizar solo una prueba.
- Correr el programa.

Si se decide guardar la información, el software verificará si concuerdan los datos con tomas de muestras anteriores y luego lo informa, ya que si algún dato de identificación del panel es nuevo, entonces se iniciará la toma de muestras con una corriente inicial de cero amperios.

La Interfaz y el programa del aplicativo en LabView se muestran en las figuras 5-6 y 5-7. Se pueden observar en la Figura 5-6 los campos para ingresar los valores de las condiciones climatológicas, como son la radiación solar y la temperatura, estos datos pueden ser ingresados cuando esté corriendo la aplicación si se percibe que han cambiado significativamente; también se deben ingresar los datos de corriente de corto circuito o corriente máxima, voltaje de circuito abierto y potencia nominal del panel con el fin de configurar la carga electrónica para que se proteja de problemas por malfuncionamiento de la plataforma; se debe ingresar también los saltos de corriente deseados y la cantidad de muestras. El programa al correr entregará información creciente de la corriente, el voltaje medido y la potencia calculada. Esta información se organiza en una tabla que permitirá construir una gráfica para mostrar el voltaje contra la corriente y el voltaje contra la potencia además de la eficiencia de la celda utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.2; el valor de eficiencia obtenido debe ser multiplicado por el área de la celda en  $m^2$  para obtener el valor real dado que el valor de la radiación solar esta dado en  $W/m^2$ .

El usuario tiene la opción de guardar o no la información del panel que está caracterizando con la solución.

Figura 5-5. Algoritmo de caracterización de paneles solares

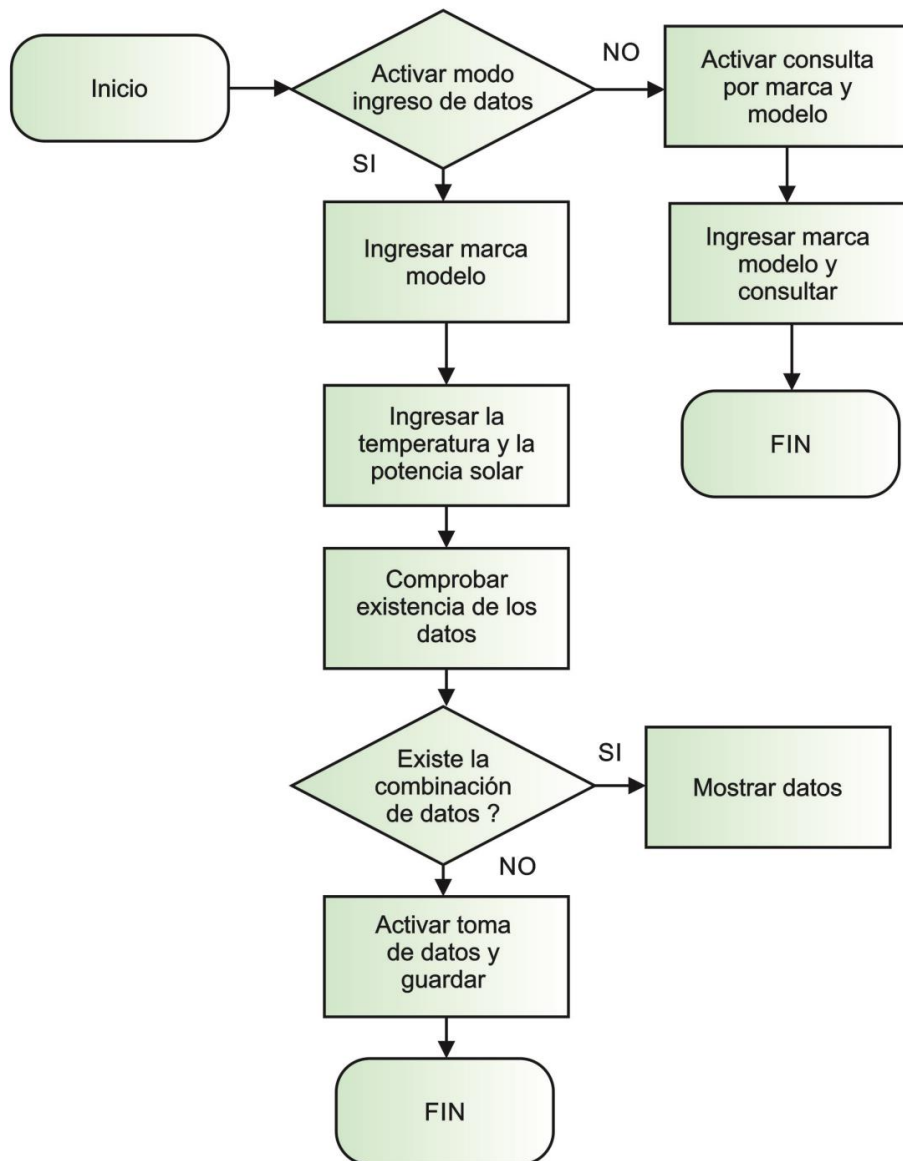


Figura 5-6. Interfaz del aplicativo en LabView

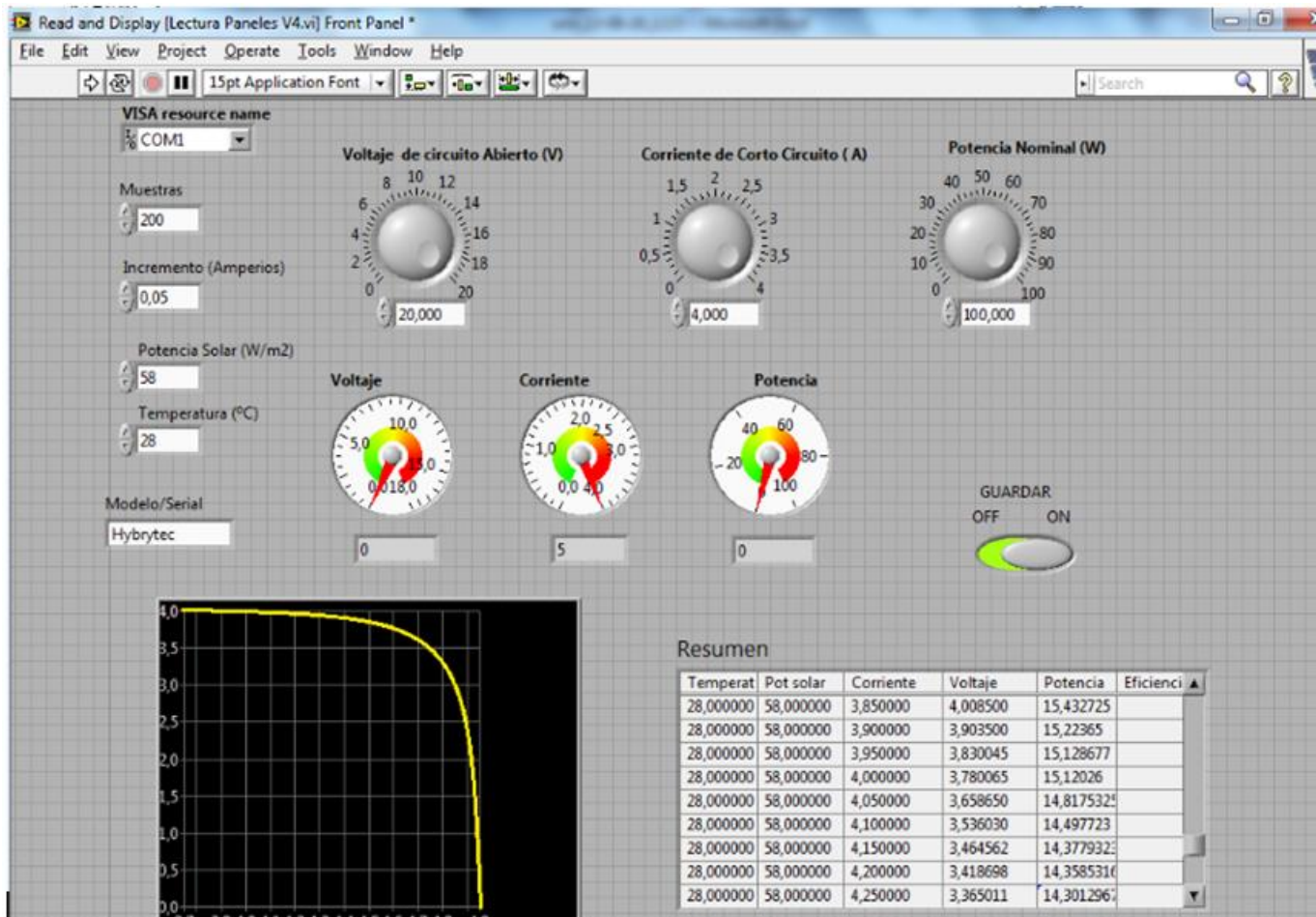
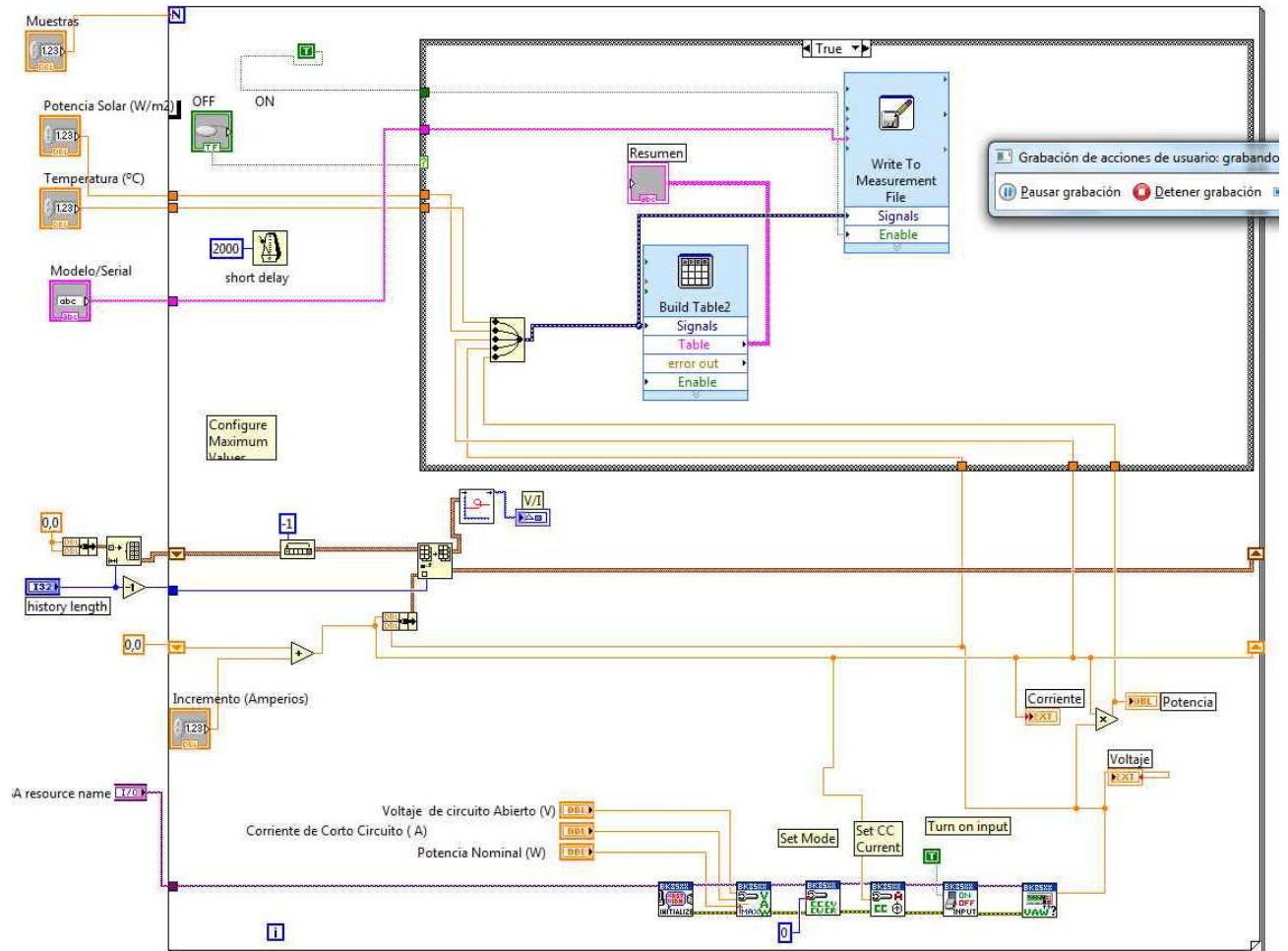


Figura 5-7. Programa del aplicativo en LabView



En el capítulo 6 se describen las celdas solares DSSC analizadas con este sistema de caracterización, los datos obtenidos son adicionados a este informe en el Anexo 2.

## 6. Control del sistema DSSC

Como cualquier otro tipo de celdas solares, las DSSC tienen la desventaja de ser sistemas no lineales variables en el tiempo a causa del cambio en las condiciones ambientales, esta situación impide la aplicación directa de las conocidas técnicas de control para sistemas lineales. En este capítulo se comprueba el modelamiento eléctrico en lazo abierto de DSSC reales y con esta información se diseña y se simula el sistema de control y de potencia para estas celdas.

### 6.1 Características de operación de DSSC

Para una correcta caracterización de celdas DSSC y debido a que el voltaje y la corriente de salida dependen de las condiciones meteorológicas se tomaron muestras de estas salidas durante varios meses, se tabularon y representaron gráficamente los resultados; con estos datos se pudo diseñar y modelar la etapa de control del sistema usando un convertidor DC/DC y un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT, se observó el rendimiento del sistema simulado con respecto a los cambios en la radiación solar.

Con las celdas mostradas en la Figura 6-1 del fabricante G4S fueron obtenidas alrededor de 5200 muestras para 10 valores distintos de potencia solar, el resumen es mostrado en el Anexo 2 y Anexo 3 de esta tesis, con el software para caracterización de celdas solares descrito en la sección 5.1. La información es abreviada en la Figura 6-2, donde se observa la dependencia de la salida I-V con respecto al cambio en la radiación solar. Las muestras seleccionadas tienen valores de radiación solar que van desde 30 hasta  $1035 \text{ W/m}^2$  las gráficas fueron suavizadas usando interpolación en Matlab; es necesario aclarar que las celdas solares utilizadas tienen un área de  $24.5 \text{ cm}^2$ , por tanto para obtener los valores de potencia reales se debe multiplicar el valor tomado con el aparato de medida de radiación solar por 0.245 (para pasar la medida de  $\text{m}^2$  a  $24.5 \text{ cm}^2$ ), ya que este aparato indica valores en unidades de  $\text{W/m}^2$ .

Figura 6-1. Celdas solares DSSC del fabricante G4S

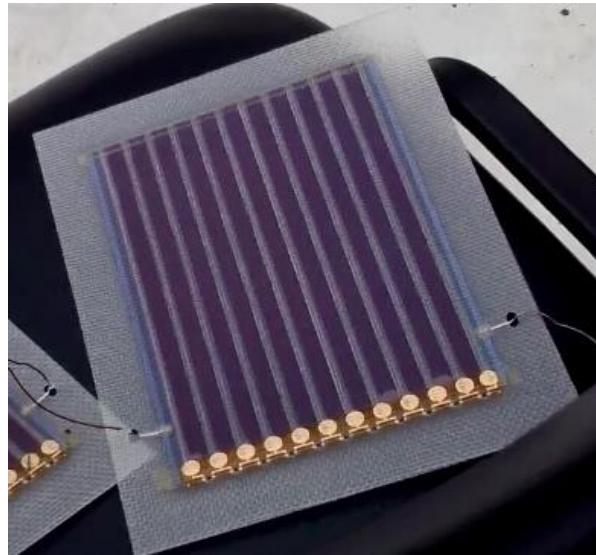
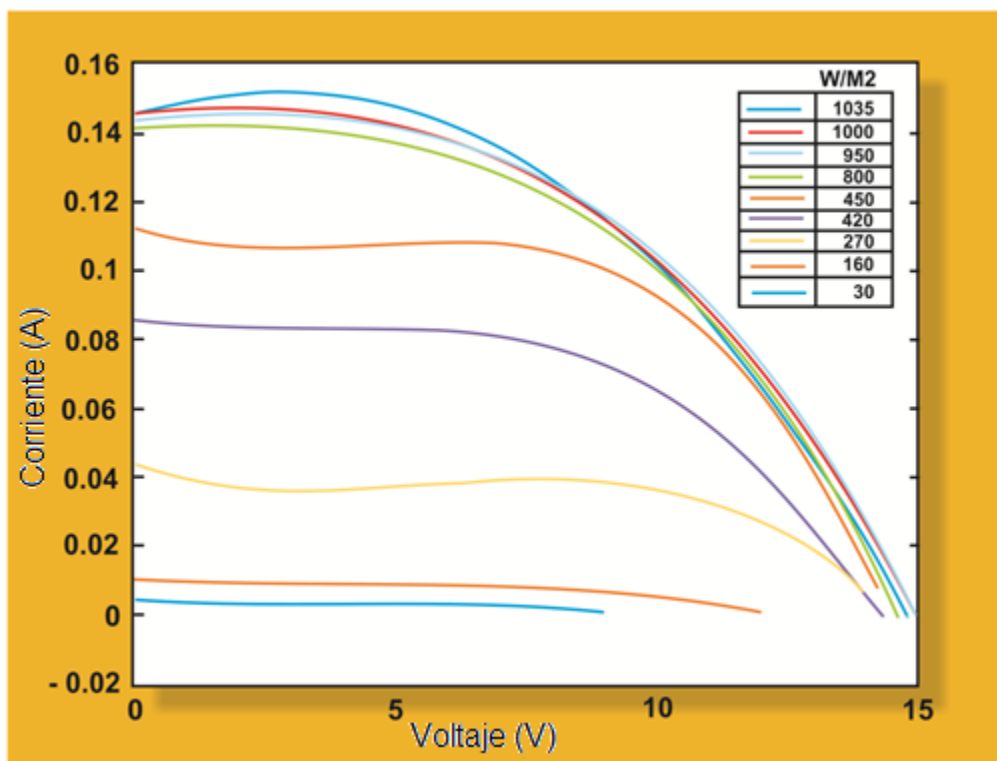


Figura 6-2. Curvas de salida I-V de paneles DSSC G4S



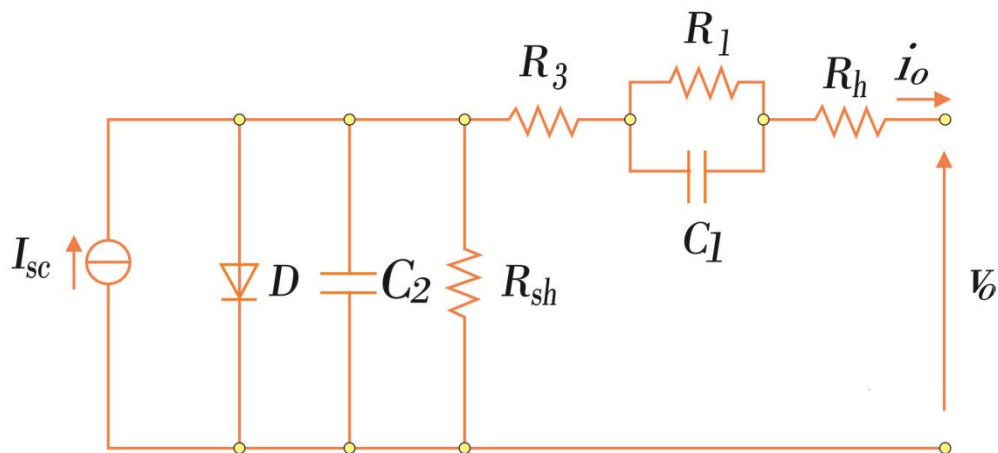


## 6.2 Comprobación del modelo eléctrico

Tomando de la sección 4.4 el modelo eléctrico de las DSSC, se hace la validación con las muestras tomadas en la sección 6.1, del resultado de esa validación se decidirá al final si se utiliza el modelo eléctrico para realizar el control MPPT.

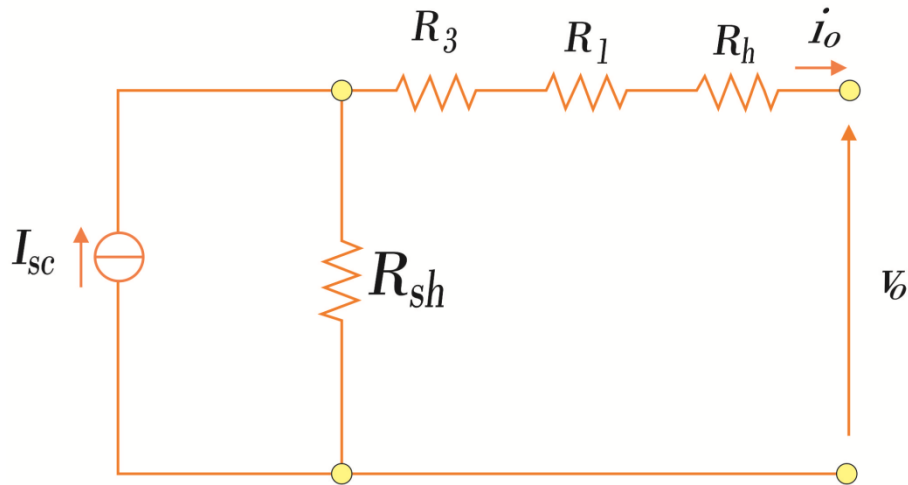
El circuito equivalente utilizado para el modelamiento de la celda DSSC (Lee, y otros, 2012), se muestra nuevamente en la Figura 6-3. El modelo presenta una fuente de energía eléctrica que depende de la radiación solar:

Figura 6-3. Modelo eléctrico de la celda solar DSSC



En la gráfica anterior  $I_{sc}$  es proporcional a la intensidad de la radiación solar y la corriente de saturación inversa del diodo  $D$  depende de la temperatura de la celda. Para determinar la representación matemática de este modelo, de tal forma que no sea tenida en cuenta la temperatura debe ser eliminado el diodo que se muestra en la Figura 6-3 (dada la ecuación de corriente del diodo:  $e^{\frac{(V+IR_s)}{A k T}} - 1$ ); y como tampoco se está analizando la respuesta transitoria por la variación del voltaje también se deben eliminar los capacitores tomándolos como circuitos abiertos según su ecuación de corriente:  $i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$ . El circuito resultante se muestra en la Figura 6-4

Figura 6-4. Modelo eléctrico resultante de la celda solar DSSC



La ecuación (6.1) representa el comportamiento matemático de la curva de salida I-V del circuito anterior:

$$i_o = kP_s R_{sh} + v_o / (R_{sh} - R_s) \quad (6.1)$$

Donde  $kP_s$  representan la fuente de corriente  $I_{sc}$  como una corriente proporcional  $k$  a la potencia solar  $P_s$  sobre el panel, y  $R_s$  representa la suma de las tres resistencias en serie del circuito.

Para comprobar la validez del modelo eléctrico en las pruebas se remplazan los valores obtenidos en la sección 6.1 (mostrados en la Figura 6-1) en la ecuación 6.1. En primer lugar, se toman tres valores representativos de las muestras obtenidas para encontrar una relación entre las resistencias  $R_{sh}$  y  $R_s$ . Los valores tomados se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Muestras representativas de DSSC G4S

Potencia Solar	Corriente	Voltaje
$1000 \text{ W/m}^2$	0	15 V
$1000 \text{ W/m}^2$	150 mA	0
$1000 \text{ W/m}^2$	100 mA	10 V

Al usar la primera muestra de la tabla anterior y despejar se tiene que  $v_o = 15$ , al hacer  $i_o = 0$  en la ecuación (6.1) se tiene:

$$kP_s R_{sh} R_s - kP_s R_{sh}^2 = 15 \quad (6.2)$$

Al usar la segunda muestra de la tabla anterior donde  $v_o = 0$  y despejar  $i_o = 0,150$  en la ecuación (6.1) se tiene:

$$kP_s R_{sh} = 0,150 \quad (6.3)$$

Al usar la tercera muestra de la tabla anterior donde  $v_o = 10$  e  $i_o = 0,100$  en la ecuación (6.1) se tiene:

$$kP_s R_{sh} R_s - kP_s R_{sh}^2 + 0.1R_{sh} - 0.1R_s = 10 \quad (6.4)$$

Al remplazar la ecuación (6.3) en la ecuación (6.2) se tiene:

$$-kP_s R_{sh}^2 = \frac{100}{R_s} \quad (6.5)$$

Al remplazar la ecuación (6.5) en la ecuación (6.4) se encuentra la siguiente relación entre la resistencia en paralelo y la resistencia en serie del modelo eléctrico:

$$R_{sh} = \frac{10R_s - 0.05R_s^2 - 100}{0.1R_s} \quad (6.6)$$

Teniendo en cuenta que la resistencia en serie es la suma de las resistencias al transporte de portadores en la superficie del electrodo, al paso de los portadores a través de los iones en el electrolito, el tinte y el TiO<sub>2</sub> al paso de los portadores a través de la superficie metálica y utilizando la metodología propuesta en (O. Herrera, 2001), pero manteniendo un valor positivo de  $R_{sh}$ ; se va a suponer un valor pequeño de  $100\Omega$  para  $R_s$ , lo que nos dará un valor para  $R_{sh}$  de  $40\Omega$  y si se remplazan estos valores en las ecuaciones (6.2) y (6.3) se hallan los límites de la constante de proporcionalidad  $k$ :

$$1.531 \times 10^{-4} \leq k \leq 2.551 \times 10^{-4} \quad (6.7)$$

Para comprobar entonces el modelo eléctrico de las celdas DSSC utilizadas para las pruebas de lazo abierto, se remplaza la ecuación (6.1) con los valores de las muestras

obtenidas para una potencia solar de  $1000 \text{ W/m}^2$ , utilizando los valores máximos de  $k$  teniendo en cuenta que la variación entre el mínimo y el máximo es lo suficientemente pequeña  $\approx 1 \times 10^{-4}$ . La Tabla 6-2 recoge los valores de las muestras reales, los valores remplazados en la ecuación (6.1), la diferencia entre los datos y el error entre las dos medidas. Se observa que en promedio la respuesta de corriente del modelo eléctrico no se aleja más del 10% (15mA). En los casos extremos de máxima corriente y voltaje mínimo  $\approx 150\text{mA}$  y 3V el modelo eléctrico comienza a alejarse de del comportamiento real en alrededor del 35%, esta situación debe ser tomada en cuenta en el momento de diseñar el control del sistema de generación con DSSC teniendo en cuenta los requerimientos de precisión y estabilidad de la carga. El modelo se valida con los datos anteriores por la cantidad de muestras tomadas y por la simulación del sistema completo que se verá en el punto 6.3, Además como se vio en el estado del arte en la sección 2.1, en (Kyaw, Bora, & Dutta, 2012) se determina el mismo modelo eléctrico equivalente por medio de las componentes químicas de las DSSC.

Tabla 6-2. Comparación de la corriente de salida del panel real con el modelo eléctrico.

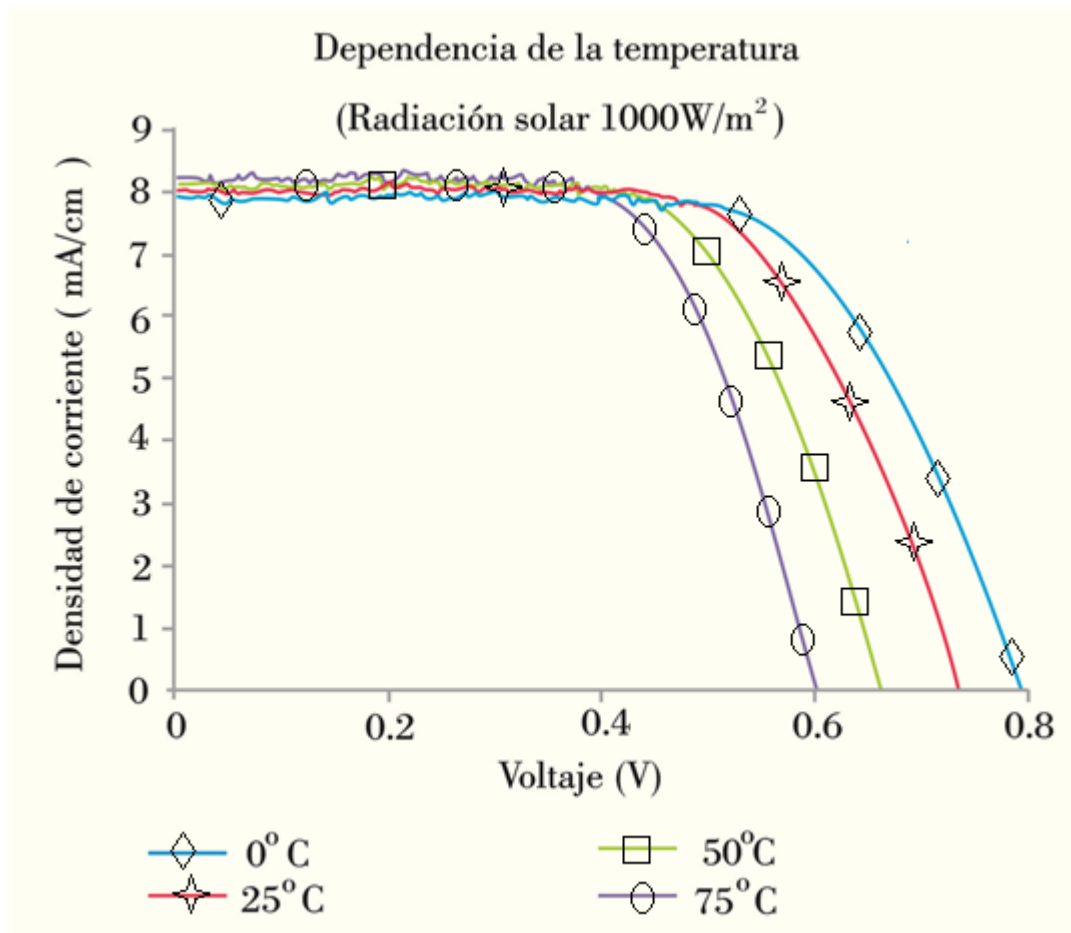
Potencia solar real	Corriente real $I_r$	Voltaje real	Corriente teórica $I_o$	Desfase de $I_o$ con la corriente real = $\text{abs}(I_o - I_r)$	error = $((I_r - I_o)/I_r) * 100\%$
0.252	0.018	14	0.0167	0.00134	7.4185
0.416	0.032	13	0.0333	0.00133	-4.1604
0.672	0.056	12	0.0500	0.00600	10.7179
0.814	0.074	11	0.0667	0.00734	9.9126
0.94	0.094	10	0.0833	0.01067	11.3496
1.008	0.112	9	0.1000	0.01200	10.7161
1.024	0.128	8	0.1167	0.01134	8.8557
0.924	0.132	7	0.1333	0.00133	-1.0086
0.828	0.138	6	0.1500	0.01200	-8.6942
0.72	0.144	5	0.1667	0.02266	-15.7394
0.584	0.146	4	0.1833	0.03733	-25.5694
0.444	0.148	3	0.2000	0.05200	-35.1338

### 6.2.1 Revisión de la dependencia de la temperatura

Como ya se ha determinado, la temperatura afecta la eficiencia y el rendimiento de una DSSC según se observa en la Figura 6-5, en donde se grafican las curvas I-V de salida de DSSC a la misma radiación solar pero con distintos valores de temperatura (Lee, y otros, 2012).

Como se observa en la gráfica, un cambio aproximado de la temperatura de 25°C hace variar la salida de voltaje en alrededor de 0,05 V y la densidad de corriente en alrededor de 0.1mA/cm<sup>2</sup>. El resultado anterior, que ha sido validado experimentalmente con las muestras tomadas, permite que sea obviado en el análisis en este capítulo la dependencia de la temperatura debido al poco cambio que está produce en la salida I-V de las celdas DSSC.

Figura 6-5. Dependencia de la temperatura de la salida I-V para DSSC



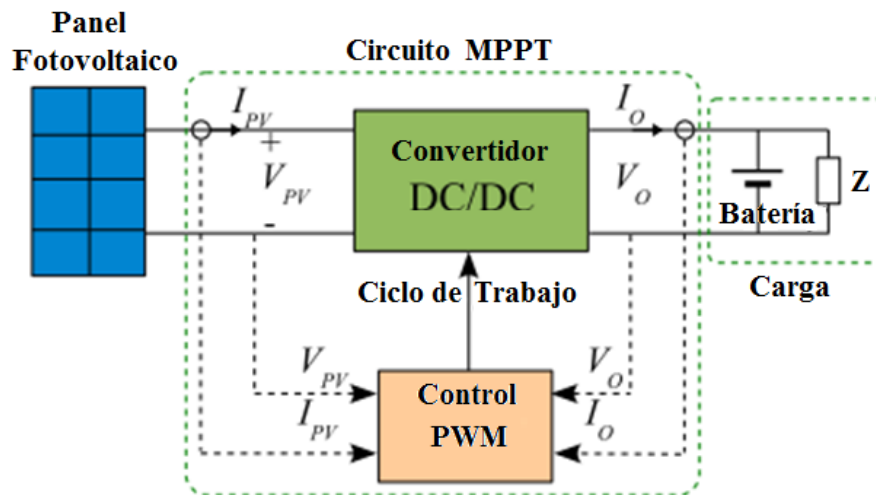
### 6.3 Sistema completo de generación con DSSC

En la instalación fotovoltaica más simple se conecta el panel fotovoltaico directamente a la carga. En este caso, el punto de funcionamiento del sistema está en la intersección de la curva I-V de salida del panel fotovoltaico, que depende de las condiciones ambientales y de los requerimientos de la carga. Debido a la afectación no lineal de la curva I-V por el nivel de radiación solar y dado que la impedancia de carga generalmente no es constante, las condiciones de operación del servicio podrían estar lejos del punto de máxima potencia

(MPP) que corresponde a la máxima eficiencia. Asegurar la máxima eficiencia es otra manera de reducir el costo de los sistemas fotovoltaicos.

Para hacer frente a esto, debe ser insertado un sistema de control apropiado entre el panel fotovoltaico y la carga que asegure el seguimiento del punto de máxima potencia MPPT. La Figura 6-6 muestra la topología del sistema requerido que fue analizado en el capítulo 1.

Figura 6-6. Topología del sistema de generación fotovoltaica con control de MPPT



El circuito de MPPT está constituido por los sensores de salida del panel  $V_{PV} - I_{PV}$  y de salida del convertidor  $V_o - I_o$ , por el convertidor DC/DC y por el controlador del ciclo de trabajo del convertidor. Los pasos a seguir para para diseñar un controlador eficiente son los siguientes:

- Determinar los requerimientos de la carga. Es necesario saber la potencia que va a consumir la carga y los valores de voltaje y corriente, si la potencia consumida por la carga fluctúa se debe conocer los límites de fluctuación de la corriente.
- Determinar el panel solar DSSC y área a utilizar. Teniendo en cuenta la potencia máxima requerida por la carga se debe escoger cuantos paneles se requieren y con qué área, para esto se deben analizar las hojas de datos de los fabricantes o se puede utilizar la el software y la metodología de caracterización desarrolladas en el capítulo 5 de esta tesis.

- Especificar el tipo de convertidor. De acuerdo a los datos obtenidos de la carga y del panel a usar se debe determinar si se requiere un convertido de corriente directa elevador o reductor, los dos fueron vistos en la sección 1.3.
- Escoger un algoritmo MPPT. De acuerdo a los requisitos necesarios de precisión del seguimiento, a la capacidad económica y a la potencia del sistema; se debe escoger un algoritmo apropiado de MPPT para controlar el ciclo de trabajo del convertidor; los algoritmos más comunes fueron estudiados en la sección 2.2.
- Simular el sistema. En este paso se comprueba el modelo que se ha diseñado y es posible realizar afinaciones que mejoren la operación el sistema. Actualmente los programas de computador para simulación de circuitos permiten simular todos los componentes de acuerdo a las referencias de fabricantes o ingresando los datos de caracterización.

En lo que sigue de este capítulo se diseñará el control para un sistema con una carga que consume una corriente máxima de  $140\text{ mA}$ , y que opera a  $4,5\text{ Vdc}$ , valores que están dentro de la capacidad de la celda DSSC G4S caracterizada en la sección 6.1 (que opera máximo a  $150\text{ mA}$  y a  $15\text{ Vdc}$  y tiene un área de  $24,5\text{ cm}^2$ ).

### 6.3.1 Diseño del convertidor

Como se tiene la necesidad de reducción del voltaje se utilizará un convertidor tipo Buck como el de la Figura 1-11(a), la idea es permitir que mientras el sistema esté en funcionamiento (durante las horas del día) la carga consuma la energía almacenada en una batería recargable que está siendo alimentada por el panel solar DSSC. El convertidor debe tener una salida de  $4,5\text{ Vdc}$  y máximo  $140\text{ mA}$  para suplir las necesidades de la carga.

Inicialmente se supone que el sistema panel-convertidor será sometido a una radiación solar de  $1000\text{ W/m}^2$ , que proporcionarán, según las muestras tomadas en la sección 6.1, el valor de MPP de  $9\text{ V}$  a  $126\text{ mA}$ . En este punto se tendrá en cuenta un solo valor de radiación solar ya que el sistema no posee aún controlador MPPT, en el momento que se agregue el controlador de MPPT se adicionará al diseño el rango posible de valores de radiación solar para completar el diseño.

El resumen de los requerimientos para el diseño del convertidor DC/DC aplicable al panel DSSC G4S es el siguiente:

- $v_i = 9V$
- $v_o = 4.5V$
- $I_{max} = 140mA$
- $I_{min} = 10mA$
- $\Delta v_o < 100mV$
- $f = 500KHz$

Primero, utilizando las ecuaciones del circuito equivalente del convertidor Buck se determinará el valor del ciclo de trabajo  $D$  suponiendo que el interruptor es ideal y despreciando la caída de tensión en el diodo, para esto utilizamos la ecuación 6.8:

$$D = \frac{v_o}{v_i} = \frac{4,5}{9} = 0,5 \quad (6.8)$$

Se determinará ahora el valor del inductor crítico  $L_c$  que proporcionará modo continuo; en el caso más desfavorable:

$$L_c = \frac{(1-D)v_o}{2fI_{o_{mon}}} = 225\mu H \quad (6.9)$$

Se añade un margen de seguridad del 25% y se toma el valor comercial más cercano:

$$L = 330\mu H \quad (6.10)$$

Ahora se puede determinar el valor del condensador:

$$C > \frac{(1-D)v_o}{8Lf^2\Delta v_o} = 34nF \quad (6.11)$$

Con el valor comercial más cercano:

$$C = 40nF \quad (6.12)$$

Con este valor de inductor y condensador, se puede calcular el rizado en la tensión de salida:

$$\Delta v_o = \frac{(1-D)v_o}{8Lf^2C} = 85mV \quad (6.13)$$



Y el rizado de la corriente del inductor:

$$\Delta i_L = \frac{(v_i - v_o)D}{Lf} = 14mA \quad (6.14)$$

Por la velocidad de conmutación que se necesita y los valores pequeños de voltaje se elige un transistor tipo mosfet como interruptor para el convertidor.

### 6.3.2 Simulación panel DSSC-Convertidor DC/DC

El software para simulación de circuitos Psim, ofrece la posibilidad de simular distintos tipos de paneles solares; basta especificar los valores de las resistencias y los capacitores que dan cuenta del tipo de celda e ingresar los parámetros S y T que representan la potencia solar y la temperatura en la superficie del panel. A continuación en la Figura 6-7 se presenta, en el software Psim, el panel DSSC G4S con los valores obtenidos en la sección 6.2, unido al convertidor diseñado en el apartado anterior.

Los valores obtenidos en la simulación: Icell, Vcell y VCarga permiten comprobar tanto el modelamiento de la celda DSSC como el diseño del convertidor Buck. La Tabla 6-3 resume los valores de diseño y simulación; se observa una diferencia mínima entre los datos.

Figura 6-7. Simulación del panel DSSC G4S con el convertidor DC/DC

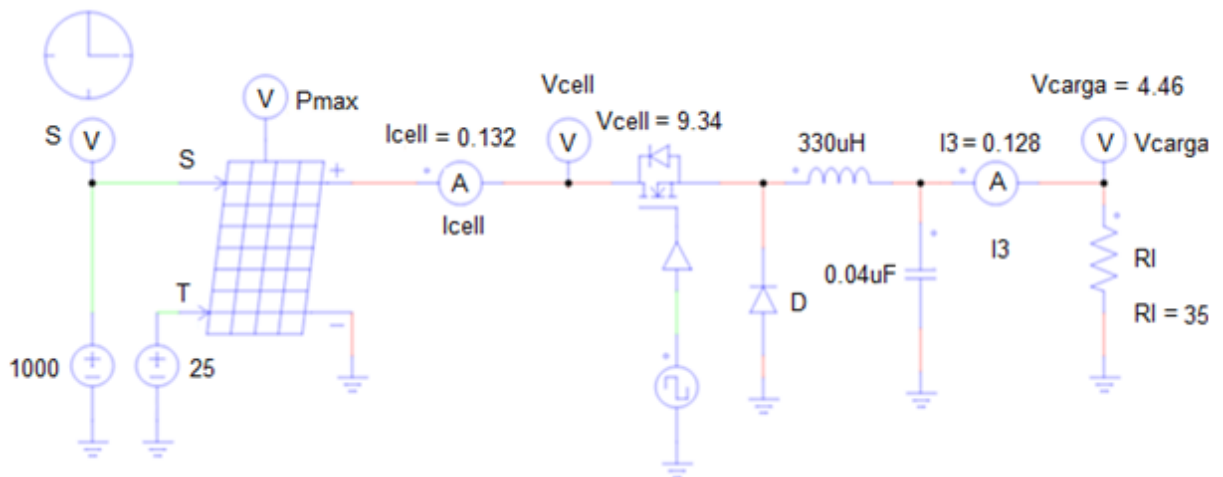
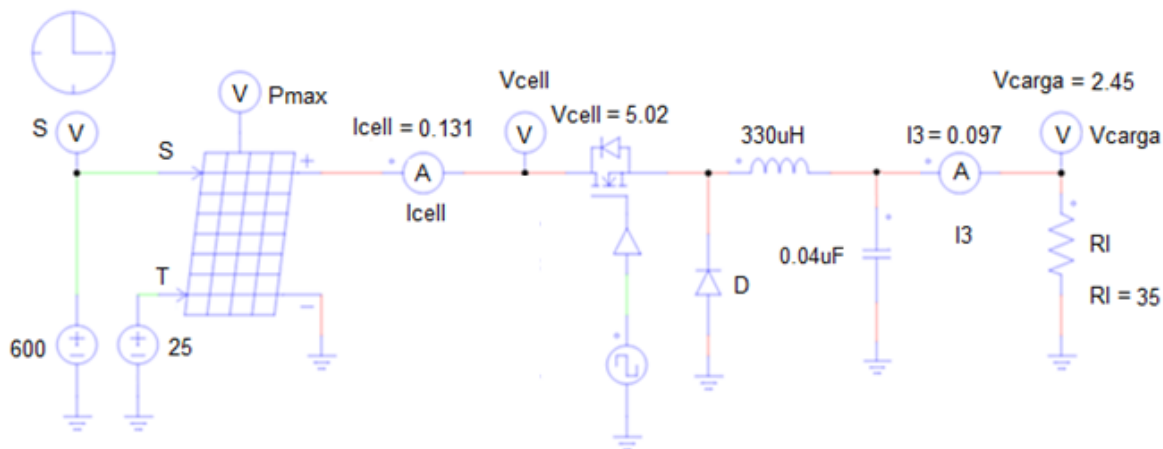


Tabla 6-3. Datos de la simulación contra el diseño del sistema DSSC-Convertidor DC/DC

Variable	v_i	v_o	I <sub>max</sub>	I <sub>min</sub>
Diseño	9 V	4.5 V	140mA	10mA
Simulación	9,34 V	4.46 V	I ≈ 130mA	

Con el objetivo de conocer el comportamiento en la simulación del sistema ante cambios ambientales, se puede observar en la Figura 6-8 lo que pasa con el circuito si se cambia la potencia solar de entrada del  $1000 \text{ W/m}^2$  por ejemplo a  $600 \text{ W/m}^2$ .

Es claro que la potencia entregada por la celda disminuye considerablemente pasando de alrededor de  $1.23 \text{ W}$  a alrededor de  $0.66 \text{ W}$  y aunque podría abastecer los requerimientos de la carga de  $0.66 \text{ W}$  no lo realiza dada la configuración del módulo de control y solo entrega cerca de  $0.27 \text{ W}$ ; se verá en la siguiente sección que es posible corregir esto y seguir el punto de máxima potencia de la celda al cambiar la velocidad de conmutación del convertidor, según la filosofía del algoritmo de MPPT.

Figura 6-8. Simulación del sistema con potencia solar de  $600 \text{ W/m}^2$ 

### 6.3.3 Sistema de generación con MPPT

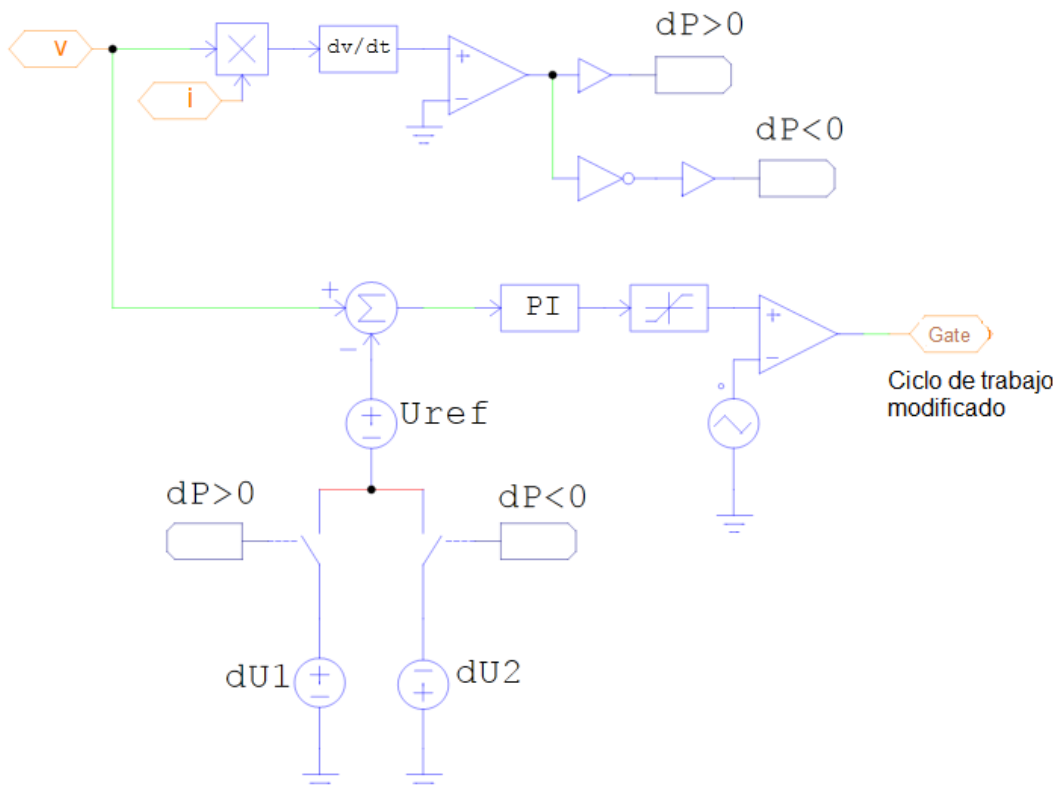
Con la premisa de que las pérdidas sufridas por el circuito MPPT deben ser pequeñas para conseguir una eficiencia máxima para el sistema en general, es utilizada en este procedimiento la técnica directa de Perturbar y Observar (P&O), esta es una técnica

sencilla y que ofrece una mejor eficiencia si se compara con otras técnicas (Barrera, Dolara, Faranda, & Leva, 2009).

El controlador MPPT P&O es utilizado para cambiar el ciclo de trabajo del convertidor, por medio de la comparación entre la entrada y una señal de referencia que puede ser sintonizada, su implementación en PSIM se muestra en la Figura 6-9.

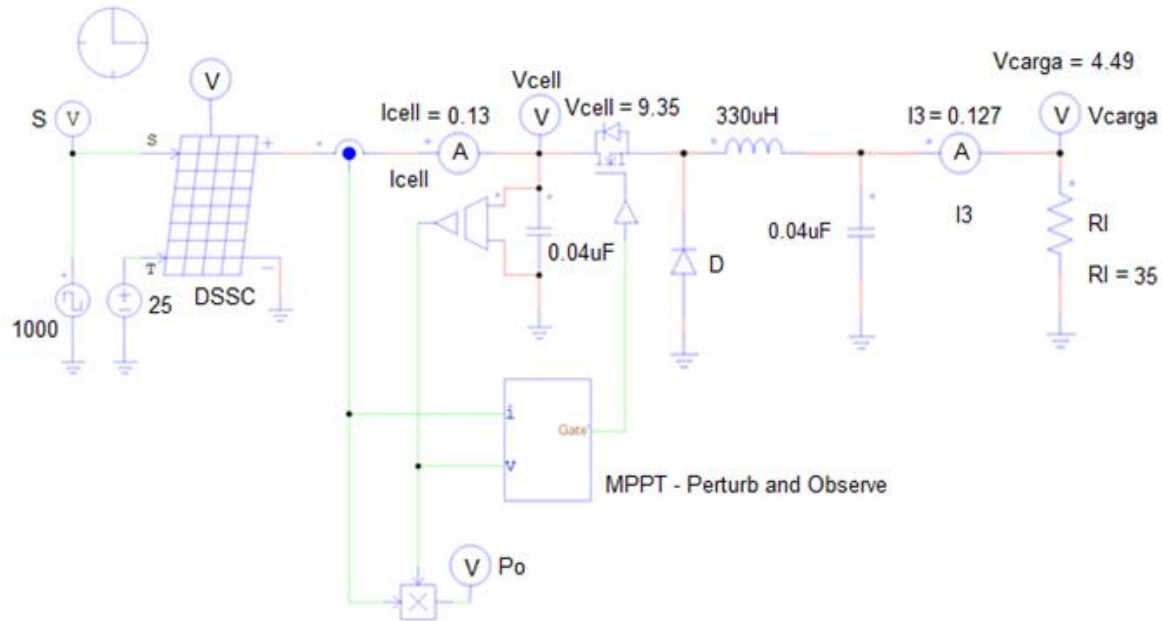
Las entradas  $i$  y  $v$  son las señales de corriente y voltaje medidas en la salida del panel solar, estas dos señales son multiplicadas para obtener la potencia del panel; esta potencia es derivada con respecto al tiempo para activar o desactivar la salida  $dP$ , dependiendo del valor positivo o negativo de la derivada (si la potencia está creciendo o decreciendo); si la potencia está disminuyendo el circuito permite realimentar un valor positivo  $dU2$  junto con la señal de voltaje en un controlador PI, que a su vez, utilizando un comparador, permite aumentar el ciclo de trabajo de una señal de referencia y enviarla a la salida (Gate); si la potencia está aumentando la acción será inversa; si no hay aumento o disminución de la potencia emitida por la celda el circuito P&O estará en reposo.

Figura 6-9. Topología del circuito MPPT P&O



La simulación del sistema completo, con el panel DSSC, el convertidor DC/DC y el control de MPPT, expuesto a una potencia solar de  $1000 \text{ W/m}^2$ , se muestra en la Figura 6-10.

Figura 6-10. Simulación del sistema completo de generación y control de energía solar con DSSC a  $1000 \text{ W/m}^2$



Para comprobar que el circuito entrega la máxima potencia que puede consumir la carga se expone también la simulación a una señal de radiación solar  $S$  de  $600 \text{ W/m}^2$ , teniendo en cuenta que aún en esta circunstancia la celda puede proveer la energía que se necesita para satisfacer las necesidades de la carga (de otra forma la energía estaría siendo entregada por la batería del sistema); el resultado de la simulación se muestra en la Figura 6-11.

Las Figura 6-12 muestra la señal de entrada para la simulación al someter el sistema controlado a potencias de radiación solar de  $1000$  y de  $600 \text{ W/m}^2$ , la Figura 6-13, la Figura 6-14 y la Figura 6-15 muestran la respuesta en voltaje, corriente y potencia en la salida de la celda.

Figura 6-11. Simulación del sistema completo de generación y control de energía solar con DSSC a  $600 \text{ W/m}^2$

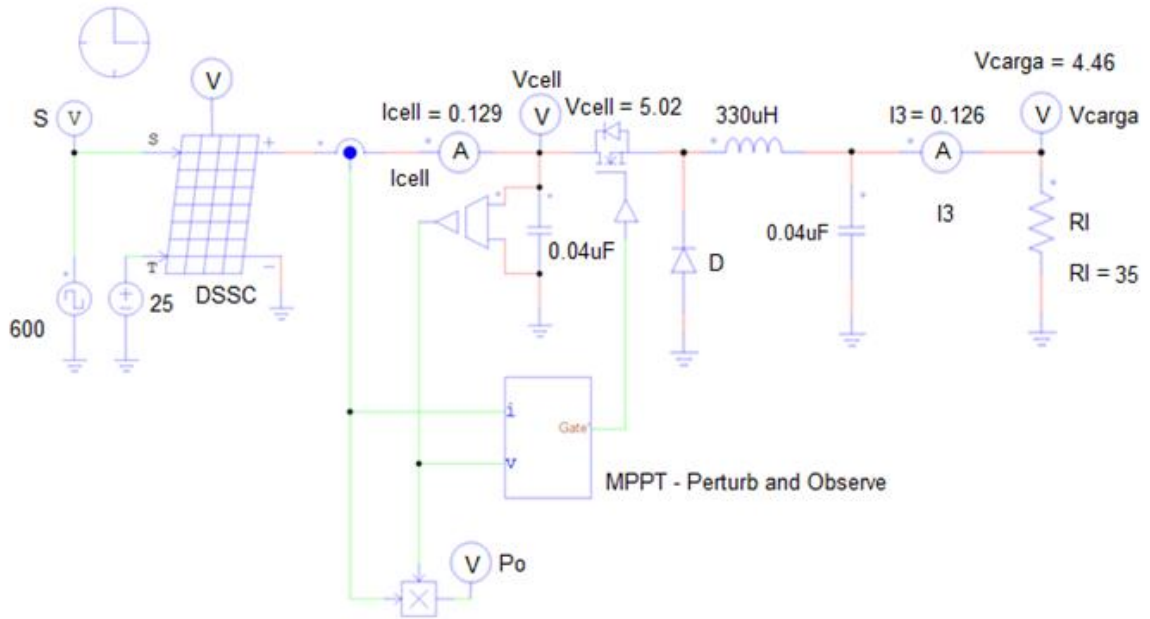


Figura 6-12. Señal cambiante de radiación solar ingresada en la celda DSSC.

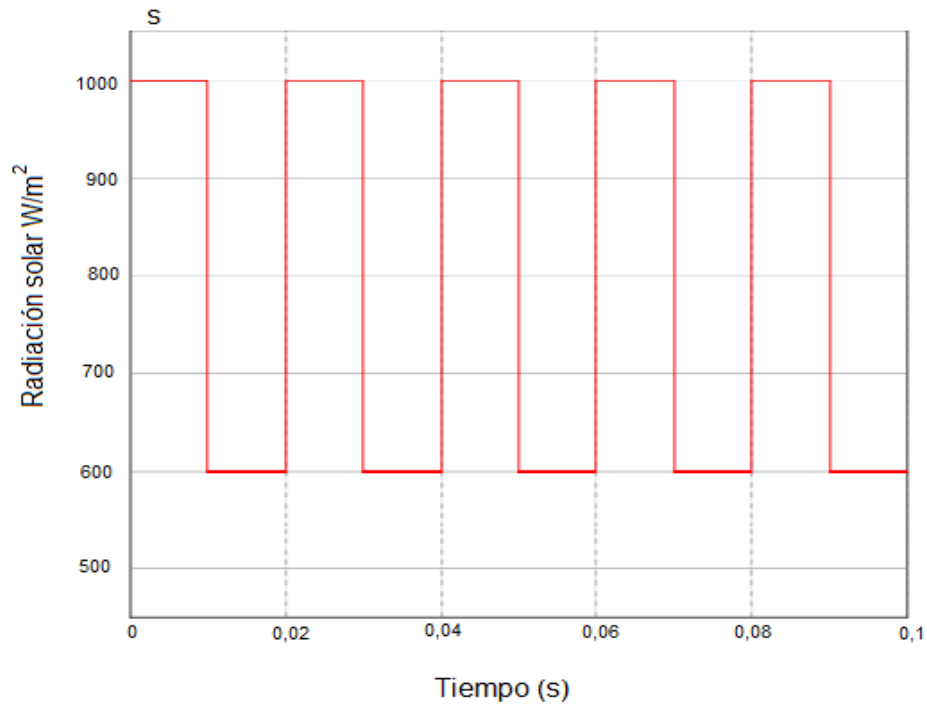


Figura 6-13. Señal de corriente de salida del sistema .

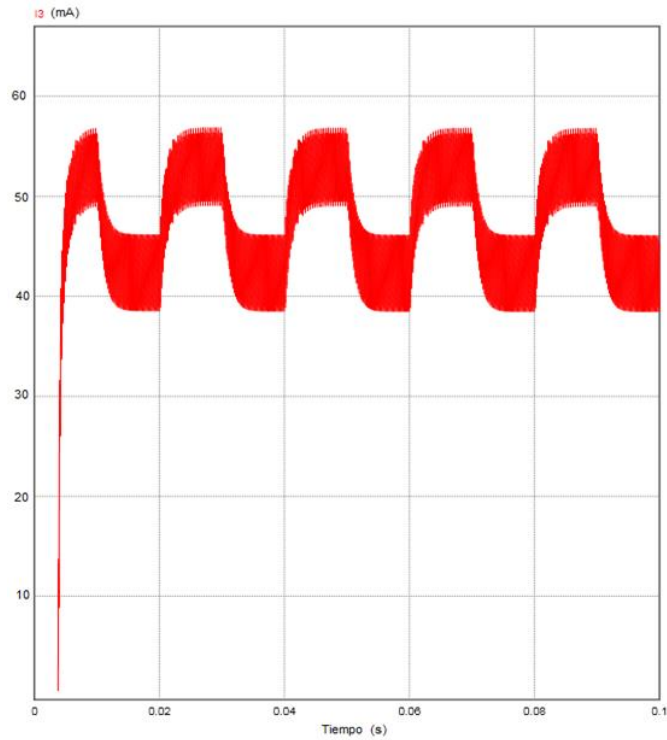


Figura 6-14. Señal de voltaje de salida del sistema .

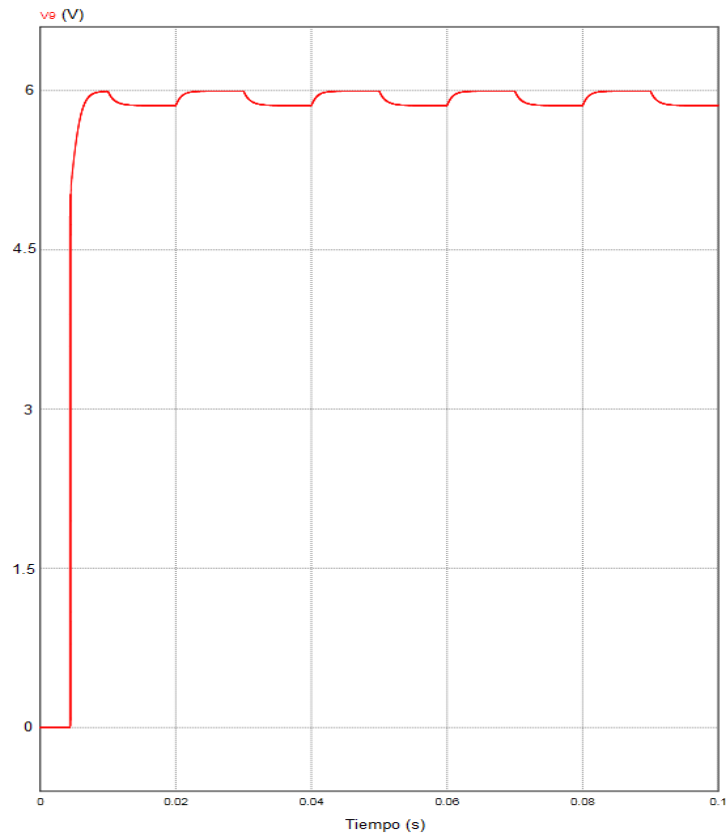
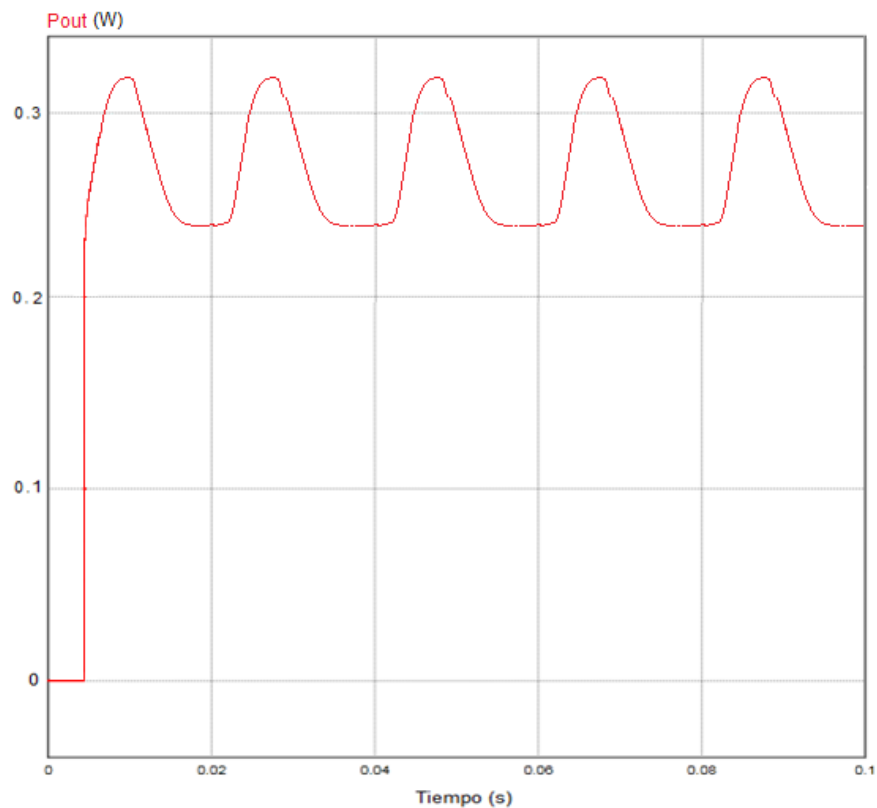


Figura 6-15. Potencia de salida del sistema .



La Tabla 6-4 resume los resultados de la simulación del sistema antes y después de tener control de MPPT, se observa, en los campos resaltados en gris, que sin MPPT se entrega a la carga una potencia de cerca de  $0.28 \text{ W}$  cuando la potencia solar es de  $600 \text{ W}/\text{m}^2$ , mientras que para la misma potencia solar pero utilizando MPPT se entrega cerca de  $0.56 \text{ W}$ , este resultado está de acuerdo a la teoría desarrollada en esta tesis con respecto al control del punto de máxima potencia y justifica la implementación de algoritmos MPPT que aumentan la eficiencia del sistema y favorecen la viabilidad técnica de la implementación de sistemas con paneles DSSC en las ZNI de Colombia. En el próximo capítulo se analizan los efectos mostrados en las simulaciones anteriores.





Tabla 6-4. Resumen de resultados obtenidos con y sin control MPPT

	Potencia Solar	Corriente celda	Voltaje celda	Potencia celda	Corriente carga	Voltaje carga	Potencia carga
<b>Sin MPPT</b>	1000 W/m <sup>2</sup>	0.132	9.34	1.2328	0.128	4.46	0.5708
	600 W/m <sup>2</sup>	0.131	5.02	0.6576	0.097	2.85	0.2764
<b>Con MPPT</b>	1000 W/m <sup>2</sup>	0.13	9.35	1.2155	0.127	4.49	0.5702
	600 W/m <sup>2</sup>	0.129	5.02	0.6475	0.126	4.46	0.5619

## 7. Análisis de resultados y conclusiones

Este documento se divide en siete capítulos, los cuales se describen a continuación:

- En el capítulo uno se resumió la investigación y los avances tecnológicos que se han realizado con respecto a los paneles DSSC y a los componentes que interactúan con ellos para completar el sistema de generación de energía eléctrica; se hizo énfasis en las características eléctricas I-V y P-V, en los tipos de conexión, en los elementos de control y en las posibles topologías de conexión como componentes generadores. Se encontró en este capítulo que se han investigado por separado los distintos elementos del sistema pero no se ha profundizado en la durabilidad y en el mantenimiento de la eficiencia en el tiempo del sistema completo.
- En el capítulo dos se hace un recuento de la forma como en la actualidad se afronta la caracterización de paneles DSSC, las estrategias actuales de seguimiento y control del punto de máxima potencia para este tipo paneles.
- En el capítulo tres se planteó el problema de investigación de acuerdo a lo visto en los capítulos anteriores; se definió además el objetivo general y los objetivos específicos de esta tesis.
- En el capítulo cuatro se llevó a cabo un análisis comparativo de los paneles a base de silicio y los paneles DSSC con la premisa del éxito mundial de los primeros y la posibilidad del éxito de los segundos a mediano plazo; esta comparación se enfocó mayormente en el modelo eléctrico de ambas tecnologías, en los pormenores del

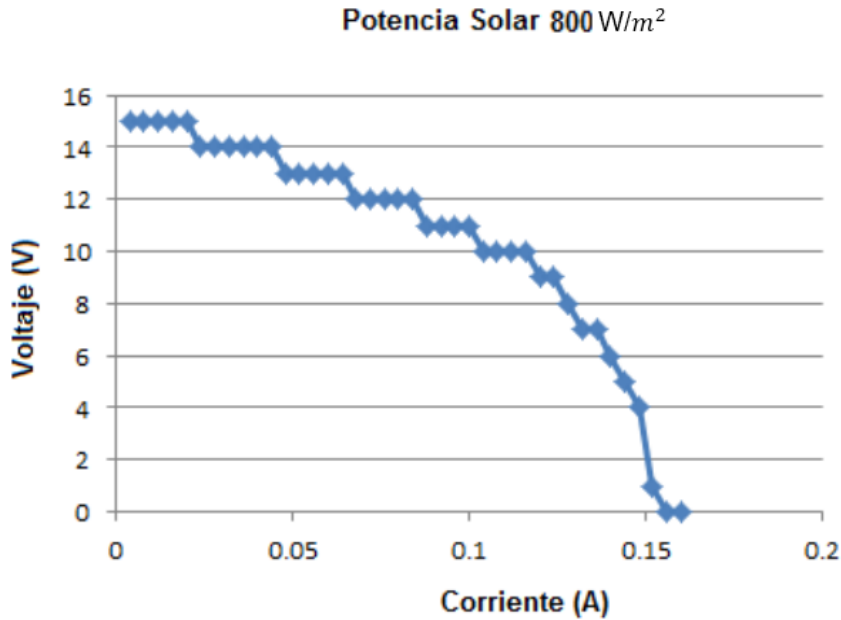
proceso de fabricación, en la eficiencia de conversión de ambos y en las técnicas de control que aplican para cada tipo.

- En el capítulo cinco se ha propuesto un método de caracterización de paneles DSSC fundamentado en las necesidades que se encontraron en los capítulos anteriores, se delimitó el método, se desarrolló un software para cumplir el objetivo, se probó y se liberó la versión número uno.
- Se encontró que las decisiones de diseño están estrechamente relacionadas con las características específicas de la aplicación, incluso habría que tener varias soluciones personalizadas de control con el fin de cumplir en mayor o menor medida con los requisitos específicos de una aplicación dada. Por ejemplo, los sistemas fotovoltaicos aislados, como los de los dispositivos portátiles o sensores inalámbricos deben tener en cuenta la simplicidad de la aplicación que afecta directamente el costo, como objetivo de diseño principal, mientras que los sistemas fotovoltaicos de mayor escala debe tener en cuenta definiciones más complejas de controladores MPPT.
- Finalmente el capítulo siete, que incluye el análisis de resultados, las conclusiones y los trabajos futuros.

## 7.1 Análisis de resultados

Las muestras tomadas a paneles DSSC con la metodología de caracterización desarrollada en el capítulo 5, y adicionadas en el Anexo 2, revelan un comportamiento estable de los paneles, los valores de salida son los mismos ante los mismos valores de las variables de entrada tales como la temperatura y la radiación solar. El comportamiento en general de la salida del panel DSSC es similar y según lo estudiado en el capítulo 4 al comportamiento de los paneles solares a base de silicio, una de las muestras tomadas al panel DSSC G4S y que confirma este comportamiento que es presentado en la Figura 7-1.

Figura 7-1. Curva de salida V-I general para el panel DSSC



El rango de valores máximos de corriente, voltaje y potencia con respecto a la radiación solar de entrada (para el panel DSSC G4S de  $24.5 \text{ cm}^2$ ) se muestran en la Tabla 7-1. Con estos valores es posible calcular cuántos paneles DSSC son necesarios para una determinada cantidad de potencia a consumir; por ejemplo es posible saber qué área de paneles se debe ocupar para dar energía a una casa con cierta cantidad de aparatos eléctricos.

Tabla 7-1. Valores máximos de salida del panel

Potencia Solar W/m <sup>2</sup>	Máxima Corriente A	Máximo Voltaje V	Máxima Potencia Consumida W
30	0.005	9	0.018
100	0.16	15	1.16
160	0.011	12	0.072
270	0.043	14	0.374
420	0.088	14	0.68
450	0.148	15	1.08
800	0.154	15	1.14
950	0.152	15	1.12
1000	0.152	15	1.134
1035	0.116	14	0.96
<b>Máximo valor</b>	<b>0.16</b>	<b>15</b>	<b>1.16</b>

Los datos fueron tomados en el laboratorio de fuentes de energía renovable del ITM, la máxima potencia solar registrada fue de  $1035 \text{ W/m}^2$  y la mayor temperatura fue de  $30 \text{ C}^\circ$ ; se pudo extraer una potencia máxima de  $1.16 \text{ W}$ , una cantidad importante si se considera el pequeño tamaño de los paneles experimentales.

Los datos de potencia solar y temperatura, como se tomaron manualmente, poseen el error del cambio que pueda tener la medida mientras son tomados automáticamente los datos de potencia, voltaje y corriente de salida en la carga eléctrica; para disminuir esta variación las muestras validas fueron aquellas en donde no se observaba mayor cambio de las condiciones ambientales, y como además las muestras automáticas no demoraban más de un minuto en ser tomadas, no se tuvo en cuenta este error en la medida para los cálculos realizados.

Con respecto a los resultados de las simulaciones realizadas se observa para la primera parte (sin control de MPPT) valores muy similares a los reales obtenidos de forma práctica, la Tabla 7-2 da cuenta de estos detalles.

Tabla 7-2. Valores obtenidos en la simulación con paneles DSSC

1000 $\text{W/m}^2$	Corriente A	Voltaje V	Potencia consumida W	Potencia escalada al panel G4S (simulada*0.254) W
Sin convertidor DC/DC	0.5	9.8	4.9	1.2446
Con convertidor DC/DC	1.06	4.26	4.5156	1.1469624

Se observa entonces potencias tomadas del panel de  $1.245 \text{ W}$  y después del convertidor DC/DC de  $1.15 \text{ W}$ , suponiendo una pérdida de potencia de cerca de  $100 \text{ mW}$  (menos del 10% que disminuirá aún más a medida que el sistema tenga valores más altos de potencia), este pequeño valor justifica el uso del convertidor ya que no presenta pérdidas representativas pero si va a ser muy útil para el control de MPPT que busca mantener el punto de operación del sistema de acuerdo a las necesidades de la carga; por ejemplo si la potencia solar es de  $1000 \text{ W/m}^2$  y la salida del sistema es de  $4,5 \text{ V}$ , el MPPT tendrá que aumentar el ciclo de trabajo para mantener esos  $4,5 \text{ V}$  cuando las condiciones ambientales

cambien y la potencia solar baje a  $600 \text{ W/m}^2$ , manteniendo también la corriente consumida por la carga; como se observó en el numeral 6.3.3.

La simulación obtenida para el sistema MPPT justifica por si misma el uso de esta técnica, ya que se observa en la Figura 6-14 que al variar la radiación solar de 600 a  $1000 \text{ W/m}^2$ , la salida del sistema se va acomodando extrayendo la máxima potencia que satisface las necesidades de la carga.

## 7.2 Conclusiones

La investigación de esta tesis ha producido resultados desde el capítulo cinco, en el que se logra identificar el potencial técnico que tienen las celdas solares DSSC con respecto a las celdas solares a base de silicio; adicionalmente a las conclusiones ya plasmadas a través de los distintos capítulos de la tesis, a continuación se hace un resumen de acuerdo a cada objetivo específico de las ventajas y desventajas encontradas:

Con respecto al objetivo específico uno: “Realizar un análisis comparativo de las aplicaciones, características de funcionamiento, técnicas de control y costo de operación de los paneles fotovoltaicos basados en silicio contra los paneles basados en dióxido de titanio, que permita determinar las ventajas y las desventajas de la nueva tecnología con respecto a la ya existente.” Es posible concluir que:

- Las DSSC tienen un menor costo de producción por no necesitar tanta energía, ya que en las celdas de silicio se utilizan calderas que deben producir temperaturas de alrededor de  $1500 \text{ C}^\circ$ , mientras que las celdas DSSC son fabricadas con máquinas que no superan los  $450 \text{ C}^\circ$ .
- Teniendo en cuenta que los paneles solares comerciales a base de silicio presentan eficiencias de alrededor de 21% y los paneles de Grätzel de laboratorio alcanzan eficiencias hasta del 15%, es posible pensar que la diferencia en el costo de producción, instalación y transporte justifiquen invertir en la creación de empresas locales para la fabricación en masa de esta nueva tecnología como solución al problema energético en ZNI.

- La tecnología DSSC presentaba el problema de que el tinte sensible no es un material biodegradable y por el contrario es tóxico para el medio ambiente y para los humanos, pero con el avance a las ssDSSC o celdas solares sensibilizadas con colorante en estado sólido, se soluciona el problema convirtiéndolas en materiales reciclables.
- Se han encontrado a través del tiempo progresos en cuanto a la calidad de los materiales que componen las celdas Grätzel, se ha mejorado por ejemplo la vida útil del plástico que envuelve la celda y se ha disminuido la velocidad de oxidación del tinte sensible; estos avances indican que está cada vez más cerca la producción comercial de estos tipos de celdas solares tal y como ocurrió en su momento con los paneles de silicio.

Con respecto al objetivo específico dos: “Proponer una metodología de caracterización de paneles fotovoltaicos de dióxido de titanio de tal forma que se pueda determinar, teóricamente, la eficiencia y saber cuánta energía se puede extraer de determinada área en términos de voltaje, corriente y potencia.” Es posible concluir que:

- La metodología propuesta utiliza la definición de Factor de Forma y de Eficiencia de celdas solares planteadas para cualquier tipo de celda solar; esto es, las celdas son tomadas como cajas negras y solo se tienen en cuenta los cambios en la salida de acuerdo a los cambios en la entrada, este enfoque permite desarrollar la tesis sin ahondar en las particularidades químicas de los componentes de las celdas solares DSSC.
- Con la toma de datos utilizando la solución de software que se desarrolló en el capítulo cinco, se obtuvieron curvas características I-V de celdas DSSC. La aplicación de software fue desarrollada en Labview y permite obtener datos de corriente y voltaje con una precisión de  $\pm 1\text{mA}$  y  $\pm 1\text{V}$ , además de caracterizar paneles solares con generación eléctrica de máximo de 5A y 18V. Se menciona la importancia del aporte de este capítulo porque gracias a él se automatiza y se agiliza, en gran medida, el estudio de las características de los paneles solares, tanto de los prototipos de laboratorio como de los paneles comerciales; también permite la comprobación de los datos de características de paneles que dan los fabricantes, hacer informes de desgaste del voltaje, la corriente, la potencia y la eficiencia, además de hacer estudios de las distintas variables que intervienen en

la generación, tales como el sombreado, la temperatura o el rizado de tensión y corriente de entrada y salida.

Con respecto al objetivo específico tres: “Diseñar y simular un sistema de control y de potencia para paneles fotovoltaicos basados en dióxido de titanio que garantice su correcto funcionamiento y la eficiencia del proceso al interactuar con otros sistemas eléctricos.” Es posible concluir que:

- En la comprobación del modelo eléctrico de las celdas solares DSSC que se realizó en el capítulo seis, se pudo determinar de forma práctica el comportamiento de las celdas ante los cambios en las variables involucradas. Con este conocimiento fue posible dar al sistema controlado los valores de los parámetros necesarios para el seguimiento del punto de máxima potencia según los cálculos hechos.

De acuerdo a la información relacionada en el Atlas de Radiación Solar para Colombia (IDEAM, Unidad de Planeación Minero Energética, 2005) y a los resultados obtenidos en esta tesis, en la cual se demuestra que métodos de caracterización perfectamente probados para paneles convencionales de silicio, y estrategias de control ampliamente utilizadas en instalaciones de paneles solares, además de los resultados obtenidos con la caracterización de celdas solares de Grätzel reales y en condiciones reales de operación, la implementación de esta tecnología en Colombia es una real opción tanto para zonas no interconectadas como para sistemas conectados a la red eléctrica.

Es de anotar que los módulos DSSC G4S utilizados no son comerciales sino de experimentación, esto debido a que no existe en el mercado actual una producción en masa, este y otros hechos posibilitan la realización de futuras actividades de investigación tomando como referencia esta tesis.

### **7.3 Actividades futuras de investigación**

De acuerdo con las conclusiones de esta tesis las actividades futuras de investigación deberían ser relativas a los siguientes puntos:



- 
- Mejorar o cambiar los componentes plásticos o polímeros que deben proteger los elementos internos de las celdas de Grätzel, de tal forma que la durabilidad de éstas, en condiciones climatologías variables, como por ejemplo las altas temperaturas durante varias horas del día, sea cada vez mayor y de esta forma, mejore el tiempo de vida útil de los paneles DSSC.
  - Definir los casos de negocio correspondientes a la implementación de las celdas de Grätzel en las ZNI.
  - Extensión de la metodología de caracterización y de las demás técnicas propuestas en esta tesis para otros componentes de los sistemas de generación como son las baterías, los convertidores y los controladores de MPP



# Bibliografía

- A. Bidram, S. M. (2012). Control and Circuit Techniques to Mitigate Partial Shading Effects in Photovoltaic Arrays. *Energy*, 532-546.
- Ababei, C., Yuvarajan, S., & Schulz, D. L. (2010). Toward integrated PV panels and power electronics using printing technologies. *Solar Energy*, 1111–1123.
- Aboul, s., & Ahmed, K. (2008). Analytical Modeling of Dye-Sensitized Solar Cells Under Different Illumination Levels. *25th NATIONAL RADIO SCIENCE CONFERENCE, Faculty of Engineering, Tanta Univ., Egypt*, 1-6.
- Alghuwainem, S. M. (1994). Matching of a dc motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current-locked loop. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- Ali, M. F., Islam, R., Afrin, N., Ali, M. F., Motonta, S., & F.Hossain, M. (2014). A New Technique to Produce Electricity Using Solar Cell in Aspect of Bangladesh: Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) and It's Prospect. *American Journal of Engineering Research*.
- Barkhouse, D., Aaron, R., Gunawan, O., Gokmen, T., Todorov, T. K., & Mitzi, D. B. (2015). Solar cell efficiency tables (Version 45). *Wiley Online Library , Progress in Photovoltaics*.
- Berrera, M., Dolara, A., Faranda, R., & Leva, S. (2009). Experimental test of seven widely-adopted MPPT algorithms. *IEEE Powertech*.
- Bifaretti, S., Brown, T. M., Carlo, A. D., & Reale, A. (2007). Effects of power converters on dye-sensitized solar cells. *Clean Electrical Power. ICCEP 2007. International Conference, IEEE*, 346-351.
- Bisquert, J., Cahen, D., Hodes, G., Ruhle, S., & Zaban, A. (2004). Physical Chemical Principles of Photovoltaic Conversion with Nanoparticulate, Mesoporous Dye-Sensitized. *Solar Cells. J. Phys. Chem. B*.
- Boke, U. (2007). A simple model of photovoltaic module electric characteristics. *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*.

- Branbrilla, A., Gambarara, M., Garutti, A., & Ronchi, F. (1999). New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking. *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), vol. 2*, 632–637.
- Burschka, J., Pellet, N., Moon, S.-J., Humphry-Baker, R., Gao, P., Nazeeruddin, M. K., & Grätzel, M. (2013). Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. *Nature*, 316-319.
- Chae, W., Lee, K., Kim, H., Lee, D., & Kim, H. (2010). A study on the PV system for simulation representing characteristics of DSSC. *Second International Conference on Computer Research and Development, Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Pusan 609-735, Republic of Korea*, 854-858.
- Chao, R. M., Lin, I. H., Pai, F. S., Ko, S. H., & Chang, C. C. (2009). Evaluation a photovoltaic energy mechatronics system with built in quadratic maximum power point tracking algorithm. *Solar Energy* 83, 2177– 2185.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*.
- Chen, Y. S., Lee, J. N., Tsai, S. Y., & Ting, C. C. (2007). Manufacture of Dye-Sensitized Nano Solar Cells and their I-V Curve Measurements. *Proceedings of ICAM2007 Nov. 26-28, Tainan, Taiwan*.
- ChenZ, L. (2007). A dyes for dye sensitized solar cell. *Curr Org Chem*.
- Chrin, P., & Bunlaksananusorn, C. (2007). Large-Signal Average Modeling and Simulation of DC-DC Converters with SIMULINK. *Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*.
- D.R. Clark, S. K. (1984). A method for estimating the performance of photovoltaic systems. *Solar Energy, Elsevie*.
- E Bianconi, J. C. (2013). Perturb and Observe MPPT algorithm 60 with a current controller based on the sliding mode. *Power Energy Systems*, 346–356.
- Ellabana, O., Abu-Rubb, H., & Blaabjergc, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 748–764.
- Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics. Second Edition*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
- Fahrenbruch, A. L., & Buhe, R. H. (1983). *Fundamentals of Solar Ceells*. Stanford: HancourdBrace Jovanovich, Publishers.

- Faranda, R., & Leva, S. (2008). Energy comparison of MPPT techniques for PV systems. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 446–455.
- Gerischer, H., Michel, B. M., E, R., & Tributsch, H. (1968). Sensitization of Charge-Injection into Semiconductors with Large Band Gap Electrochim. *Electrochimica Acta* 13, 1509-1515.
- Green, M. A. (2002). Photovoltaic principles. *Physica*.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. (2012). Solar cell efficiency tables (version 40). *Progress in Photovoltaics, Wiley Online Library*.
- Hanmina, T., Xiaobao, Z., Shikuia, Y., Xiangyana, W., Zhipenga, T., Bina, L., . . . Zhiganga, Z. (2009). An improved method to estimate the equivalent circuit parameters in DSSCs. *Solar Energy, Elsevier*, 715–720.
- Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., & Osakada, M. (1995). Maximum power point tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *Generation Transmission and Distribution* 142, 59–64.
- Ibrahim, H. E. (1999). Microcomputer controlled buck regulator for maximum power point tracker for DC pumping system operates from photovoltaic system. *IEEE Fuzzy Systems Conference*.
- IDEAM, Unidad de Planeación Minero Energética. (2005). Atlas de Radiación Solar de Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá*. Retrieved 03 03, 2015, from Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Minas y Energía, Bogota: [http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas\\_Radiacion\\_Solar/1-Atlas\\_Radiacion\\_Solar.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf)
- IPSE. (2013, 11 10). *Energización con Fuentes No Convencionales de Energía en las ZNI. Estrategias y casos exitosos*. Retrieved from <http://www.ipse.gov.co/>.
- Jeroen, V. A. (2011, 01 16). Retrieved from [www.olino.org](http://www.olino.org/): <http://www.olino.org/es/articulos/2011/01/16/tiempo-de-amortizacion-de-una-instalacion-fotovoltaica>
- Jiang, J., Huang, T., & Hsiao, C. (2005). Maximum power tracking for photovoltaic power systems. *Tamkang Journal of Science and Engineering. Volumen 8, No. 2*.
- Julian, B., Norman, P., Soo Jin, M., Robin, H. B., Peng, G., Mohammad K, N., & Michael, G. (2013). Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. *Nature*.

- Kyaw, H. H., Bora, T., & Dutta, J. (2012). One-Diode Model Equivalent Circuit Analysis for ZnO Nanorod-Based Dye-Sensitized Solar Cells : Effects of Annealing and Active Area. *IEEE TRANSACTIONS ON NANOTECHNOLOGY, VOL. 11, NO. 4*, 763-768.
- Kyoung, J. L., Jeong, H. K., Ho, S. K., Shin, D., Dong, W. Y., & Hee, J. K. (2012). A Study on a Solar Simulator for Dye Sensitized Solar Cells. *Hindawi International Journal of Photoenergy*.
- Lee, K. J., Kim, J. H., Kim, H. S., Shin, D., Yoo, D. W., & Kim, H. J. (2012). A Study on a Solar Simulator for Dye Sensitized Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*.
- Leikai, M., Liang, X., Kunpeng, Z., Wei, W., & Zhongquan, M. (2011). The Measurement of Series and Shunt Resistances of the Silicon Solar Cell Based on LabVIEW. *College of Science Shanghai University Shanghai China*.
- Magsi, K., Macdonald, E., & Shterengas, L. (2011). Calculating the Efficiency of Dye Sensitized Solar Cells with Industry Based Silicon Solar Cells. *IEEE, EEUU*.
- Maheshappa, H. D., Nagaraju, J., & Murthy, M. V. (1998). An improved maximum power point tracker using a step-up converter with current locked loop. *Renewable Energy 13 (2)*, 195–201.
- Masoum, M. A., & Dehbonei, H. (1998). Optimal power point tracking of photovoltaic system under all operating conditions. *Congress of the World Energy Council, Houston, TX*.
- Mohan, N. (2003). *First course on Power Electronics and Drives*. Minneapolis: MNPERE.
- Muhammad H, R. (2004). *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos, y Aplicaciones* (Vol. 2da Edición). New Jersey : Pearson Educación.
- National Instruments. (2013, Julio). *LabView User Manual*. Retrieved 11 17, 2012, from sitio web de National Instruments: <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>
- O. Herrera, C. Q. (2001). Medida y simulación teorica de la característica I-V de una celda solar. *Revista colombiana de fisica. Vol 33*.
- O'Regan, B., & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. *Nature*.
- Pandey, A., Dasgupta, N., & Mukerjee, A. K. (2007). A simple single-sensor MPPT solution. *IEEE Transactions on Power Electronics 22 (2)*, 698– 700.
- Parisi, M. L., Sinicropi, A., & Basosi, R. (2012). Life Cycle Assessment of Thin Film Non Conventional Photovoltaics: The case of Dye Sensitized Solar Cells. *ResearchGate*.
- Powell, R. (2015). *Journal for Star Wisdom*. Great Barring: Lindisfarne Books .

- Prezhdo, O. V., Duncan, W. R., & Prezhdo, V. V. (2007). Theoretical studies of photoinduced electron transfer in dye-sensitized TiO<sub>2</sub>. *Rev. Phys.*
- Ramos, C. A., Saavedra, A. J., & Arango, E. I. (2012). Oportunidades industriales en fuentes alternativas de energía. 3.
- Ramos-Paja, C. A., González, D., & Serna-Garcés, S. I. (2015). Hybrid linear/non-linear adaptive controller for battery charger/discharger in renewable power systems. *CICEL VII Simposio Internacional sobre Calidad de Energía Eléctrica Chile.*
- Restrepo-Cuestas, B. J., Trejos-Grisales, A., & Ramos-Paja, C. A. (2013). Modeling of PV Systems Based on Inflection Points Technique Considering Reverse Mode. *Edición especial Revista Tecnológicas, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, 237-248.*
- Rizzo, R., Piegari, L., & Tricoli, P. (2009). Hardware platform for photovoltaic MPPT algorithms implementation and validation. *IEEE Powertech.*
- Rodríguez, H., González, F., Rincón, J., & Logreira, A. (2012, 11 9). *Inversiones y gastos de AOM para la actividad de generación den Zonas No Interconectadas utilizando recursos renovables.* Retrieved from Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia: [http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/corpoema\\_zni\\_aom.pdf](http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/corpoema_zni_aom.pdf)
- Salameh, Z., Dagher, F., & Lynch, W. (1991). Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems. *Solar Energy 46 (5), 279–282.*
- Salas, V., Olias, E., Barrado, A., & Lazaro, A. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells 90, 1555– 1578.*
- Science Daily. (2008). Nueva Prueba de la eficiencia de las células solares sensibilizadas con tinte. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.*
- Serna G, S. I., Arango Z, E. I., Ramos Paja, C. A., & Saavedra Montes, A. J. (2012). Laboratorio de Fuentes de Energía Renovable. *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín.*
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics.*
- Shuhui, L., & Huiying, Z. (2010). Energy Extraction Characteristic Study of Solar Photovoltaic Cells and Modules. *IEEE.*
- Solargis, G.-S. (2015). *solargis.info*. Retrieved 2 21, 2016, from <http://solargis.info>

- Solaronix. (2007). *Instrucciones de ensamblaje de celdas solares Dye*. Retrieved from Solaronix.
- Stathatos, E. (2012). Dye Sensitized Solar Cells: A New Prospective to the Solar to Electrical Energy Conversion. Issues to be Solved for Efficient Energy Harvesting. *Journal of Engineering Science and Technology Review* 5.
- Takashima, T., Tanaka, T., Amano, M., & Ando, Y. (2000). Maximum output control of photovoltaic (PV) array. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)*.
- Tinihaha, S. L., Huranus, H. P., & Darma, J. (2010). Fabrication and Characterization of Dye-sensitized Solar Cell using Blackberry Dye and Titanium Dioxide Nanocrystals. *University of Pelita Harapan*.
- Tributsch, H. (1971). Electrochemistry of excited molecules: Photo-electrochemical reactions of chlorophylls. *Photochem Photobiol*, 261-269.
- Tse, K., Chung, H. S., Hui, S. Y., & Ho, M. T. (2001). A novel maximum power point tracking technique for PV panels. *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 1970–1975.
- Wang, J., & Hsu, P. (2010). Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules. *IEEE National Yunlin University of Science & Technology, Douliou, Yunlin 64002, Taiwan*.
- Y.-J. Wang and P.-C. Hsu. (2011). An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. *Eergy*, 3069-3078.
- Yadav, P., Tripathi, B., Pandey, K., & Kumar, M. (2015). Solar Energy Materials & Solar Cells Investigating the charge transport kinetics in poly-crystalline silicon solar cells for low-concentration illumination by impedance spectroscopy. *Elsevier, Solar Energy Materials & Solar Cells*.
- Yang, G., & Chen, M. (2009). LabVIEW Based Simulation System for the Output Characteristics of PV Cells and the Influence of Internal Resistance on It. *IEEE, Ecole Supérieure d'Electricité, Metz, France*.
- Yu, G. J., Jung, Y. S., Choy, J. Y., Choy, I., Song, J. H., & Kim, G. S. (2002). A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms. *Proceedings of the Photovoltaic Specialists Conference*.





## Anexo 1. Código Matlab para solucionar la ecuación de los paneles solares

```
clc
close all
%clear all

%%% ----- PV FULL EQUATION silicio -----
%%%  $I_{pv} = I_{ph} - I_0 \cdot (\exp((R_{ser} \cdot I_{pv} + V_{pv}) / V_{td}) - 1) - (R_{ser} \cdot I_{pv} + V_{pv}) / R_{par}$ 

Io =9.3847e-10;
Vtd =0.9868;
Rser =0.2645;
Rpar =9.3056e+03;
Iph =5;
Voc=22.1;

Vpvm=0;
Ipvm=0;

i=1;
for Vpv=0.1:0.2:Voc
    Vpvm(i)=Vpv;
```

```

    Ipv(i)=-
(lambertw(Io*Rpar*Rser*exp((Iph*Rser+Io*Rser+Vpv)*Rpar/((Rpar+Rser)*Vtd))/...
  ((Rpar+Rser)*Vtd))*Vtd*Rpar+lambertw(Io*Rpar*Rser*exp((Iph*Rser+Io*Rser+Vpv)
*...
  Rpar/((Rpar+Rser)*Vtd))/((Rpar+Rser)*Vtd)*Vtd*Rser-Iph*Rpar*Rser-
Io*Rpar*Rser...
  +Vpv*Rser)/((Rpar+Rser)*Rser);

    i=i+1;
end

%%% ----- PV FULL EQUATION DSSC -----

IoG =25.793e-3;
VtdG =0.9868;
RserG =1.3;
RparG =95;
IphG =0.55;
VocG=3;

VpvmG=0;
IpvG=0;

i=1;
for VpvG=0.01:0.01:VocG

    VpvmG(i)=VpvG;
    IpvG(i)=-
(lambertw(IoG*RparG*RserG*exp((IphG*RserG+IoG*RserG+VpvG)*RparG/((RparG+R
serG)*VtdG))/...
  ((RparG+RserG)*VtdG))*VtdG*RparG+lambertw(IoG*RparG*RserG*exp((IphG*Rse
rG+IoG*RserG+VpvG)*...
  RparG/((RparG+RserG)*VtdG))/((RparG+RserG)*VtdG)*VtdG*RserG-
IphG*RparG*RserG-IoG*RparG*RserG...
  +VpvG*RserG)/((RparG+RserG)*RserG);

    i=i+1;
end

figure(1)
plot(Vpvm,IpvG.*Vpvm,'b')
title('Gráfica V-P de comportamiento celda a base de silicio')
xlabel('Voltaje')

```

```
ylabel('Potencia')  
grid on
```

```
figure(2)  
plot(VpvmG,IpvmG.*VpvmG,'r')  
title('Gràfica V-P de comportamiento celda a base de TiO2')  
xlabel('Voltaje')  
ylabel('Potencia')  
grid on
```

```
figure(3)  
plot(Vpvm,Ipvm,'b')  
title('Gràfica I-V de comportamiento celda a base de silicio')  
xlabel('Voltaje')  
ylabel('Corriente')  
grid on
```

```
figure(4)  
plot(VpvmG,IpvmG,'r')  
title('Gràfica I-V de comportamiento celda a base de Tio2')  
xlabel('Voltaje')  
ylabel('Corriente')  
grid on
```

## Anexo 2. Resumen de datos de caracterización de celdas DSSC G4S

Temperatura	Potencia Solar	Corriente	Voltaje	Potencia Consumida
30	1035	0.004	14	0.056
30	1035	0.008	14	0.112
30	1035	0.012	14	0.168
30	1035	0.016	14	0.224
30	1035	0.02	14	0.28
30	1035	0.024	14	0.336
30	1035	0.028	14	0.392
30	1035	0.032	13	0.416
30	1035	0.036	13	0.468
30	1035	0.04	13	0.52
30	1035	0.044	13	0.572
30	1035	0.048	13	0.624
30	1035	0.052	13	0.676
30	1035	0.056	12	0.672
30	1035	0.06	12	0.72
30	1035	0.064	12	0.768
30	1035	0.068	12	0.816
30	1035	0.072	12	0.864
30	1035	0.076	11	0.836
30	1035	0.08	11	0.88
30	1035	0.084	11	0.924
30	1035	0.088	10	0.88
30	1035	0.092	10	0.92
30	1035	0.096	10	0.96
30	1035	0.1	9	0.9
30	1035	0.104	8	0.832
30	1035	0.108	6	0.648
30	1035	0.112	0	0
28	1000	0.002	15	0.03
28	1000	0.004	15	0.06
28	1000	0.006	15	0.09
28	1000	0.008	14	0.112
28	1000	0.01	14	0.14
28	1000	0.012	14	0.168

28	1000	0.014	14	0.196
28	1000	0.016	14	0.224
28	1000	0.018	14	0.252
28	1000	0.02	14	0.28
28	1000	0.022	14	0.308
28	1000	0.024	14	0.336
28	1000	0.026	14	0.364
28	1000	0.028	14	0.392
28	1000	0.03	14	0.42
28	1000	0.032	13	0.416
28	1000	0.034	13	0.442
28	1000	0.036	13	0.468
28	1000	0.038	13	0.494
28	1000	0.04	13	0.52
28	1000	0.042	13	0.546
28	1000	0.044	13	0.572
28	1000	0.046	13	0.598
28	1000	0.048	13	0.624
28	1000	0.05	13	0.65
28	1000	0.052	13	0.676
28	1000	0.054	13	0.702
28	1000	0.056	12	0.672
28	1000	0.058	12	0.696
28	1000	0.06	12	0.72
28	1000	0.062	12	0.744
28	1000	0.064	12	0.768
28	1000	0.066	12	0.792
28	1000	0.068	12	0.816
28	1000	0.07	12	0.84
28	1000	0.072	12	0.864
28	1000	0.074	12	0.888
28	1000	0.076	12	0.912
28	1000	0.078	11	0.858
28	1000	0.08	11	0.88
28	1000	0.082	11	0.902
28	1000	0.084	11	0.924
28	1000	0.086	11	0.946
28	1000	0.088	11	0.968
28	1000	0.09	11	0.99
28	1000	0.092	11	1.012
28	1000	0.094	10	0.94

28	1000	0.096	10	0.96
28	1000	0.098	10	0.98
28	1000	0.1	10	1
28	1000	0.102	10	1.02
28	1000	0.104	10	1.04
28	1000	0.106	10	1.06
28	1000	0.108	10	1.08
28	1000	0.11	10	1.1
28	1000	0.112	9	1.008
28	1000	0.114	9	1.026
28	1000	0.116	9	1.044
28	1000	0.118	9	1.062
28	1000	0.12	9	1.08
28	1000	0.122	9	1.098
28	1000	0.124	9	1.116
28	1000	0.126	9	1.134
28	1000	0.128	8	1.024
28	1000	0.13	8	1.04
28	1000	0.132	7	0.924
28	1000	0.134	7	0.938
28	1000	0.136	7	0.952
28	1000	0.138	6	0.828
28	1000	0.14	6	0.84
28	1000	0.142	6	0.852
28	1000	0.144	5	0.72
28	1000	0.146	4	0.584
28	1000	0.148	3	0.444
28	1000	0.15	0	0
28	1000	0.152	0	0
25	950	0.004	15	0.06
25	950	0.008	15	0.12
25	950	0.012	14	0.168
25	950	0.016	14	0.224
25	950	0.02	14	0.28
25	950	0.024	14	0.336
25	950	0.028	14	0.392
25	950	0.032	14	0.448
25	950	0.036	13	0.468
25	950	0.04	13	0.52
25	950	0.044	13	0.572

25	950	0.048	13	0.624
25	950	0.052	13	0.676
25	950	0.056	13	0.728
25	950	0.06	12	0.72
25	950	0.064	12	0.768
25	950	0.068	12	0.816
25	950	0.072	12	0.864
25	950	0.076	12	0.912
25	950	0.08	11	0.88
25	950	0.084	11	0.924
25	950	0.088	11	0.968
25	950	0.092	11	1.012
25	950	0.096	11	1.056
25	950	0.1	10	1
25	950	0.104	10	1.04
25	950	0.108	10	1.08
25	950	0.112	10	1.12
25	950	0.116	9	1.044
25	950	0.12	9	1.08
25	950	0.124	8	0.992
25	950	0.128	7	0.896
25	950	0.132	7	0.924
25	950	0.136	6	0.816
25	950	0.14	4	0.56
25	950	0.144	2	0.288
25	950	0.148	0	0
25	950	0.152	0	0
29	800	0.002	14	0.028
29	800	0.004	15	0.06
29	800	0.006	14	0.084
29	800	0.008	14	0.112
29	800	0.01	14	0.14
29	800	0.012	14	0.168
29	800	0.014	14	0.196
29	800	0.016	14	0.224
29	800	0.018	14	0.252
29	800	0.02	14	0.28
29	800	0.022	14	0.308
29	800	0.024	14	0.336
29	800	0.026	14	0.364
29	800	0.028	14	0.392



29	800	0.03	14	0.42
29	800	0.032	14	0.448
29	800	0.034	13	0.442
29	800	0.036	13	0.468
29	800	0.038	13	0.494
29	800	0.04	13	0.52
29	800	0.042	13	0.546
29	800	0.044	13	0.572
29	800	0.046	13	0.598
29	800	0.048	13	0.624
29	800	0.05	13	0.65
29	800	0.052	13	0.676
29	800	0.054	13	0.702
29	800	0.056	13	0.728
29	800	0.058	12	0.696
29	800	0.06	12	0.72
29	800	0.062	12	0.744
29	800	0.064	12	0.768
29	800	0.066	12	0.792
29	800	0.068	12	0.816
29	800	0.07	12	0.84
29	800	0.072	12	0.864
29	800	0.074	12	0.888
29	800	0.076	12	0.912
29	800	0.078	12	0.936
29	800	0.08	11	0.88
29	800	0.082	11	0.902
29	800	0.084	11	0.924
29	800	0.086	11	0.946
29	800	0.088	11	0.968
29	800	0.09	11	0.99
29	800	0.092	11	1.012
29	800	0.094	11	1.034
29	800	0.096	11	1.056
29	800	0.098	11	1.078
29	800	0.1	11	1.1
29	800	0.102	10	1.02
29	800	0.104	10	1.04
29	800	0.106	10	1.06
29	800	0.108	10	1.08

29	800	0.11	10	1.1
29	800	0.112	10	1.12
29	800	0.114	10	1.14
29	800	0.116	9	1.044
29	800	0.118	9	1.062
29	800	0.12	9	1.08
29	800	0.122	9	1.098
29	800	0.124	8	0.992
29	800	0.126	8	1.008
29	800	0.128	8	1.024
29	800	0.13	7	0.91
29	800	0.132	7	0.924
29	800	0.134	7	0.938
29	800	0.136	6	0.816
29	800	0.138	6	0.828
29	800	0.14	5	0.7
29	800	0.142	3	0.426
29	800	0.144	2	0.288
29	800	0.146	0	0
29	800	0.148	0	0
25	800	0.002	15	0.03
25	800	0.004	15	0.06
25	800	0.006	15	0.09
25	800	0.008	15	0.12
25	800	0.01	15	0.15
25	800	0.012	15	0.18
25	800	0.014	15	0.21
25	800	0.016	15	0.24
25	800	0.018	14	0.252
25	800	0.02	14	0.28
25	800	0.022	14	0.308
25	800	0.024	14	0.336
25	800	0.026	14	0.364
25	800	0.028	14	0.392
25	800	0.03	14	0.42
25	800	0.032	14	0.448
25	800	0.034	14	0.476
25	800	0.036	14	0.504
25	800	0.038	14	0.532
25	800	0.04	14	0.56
25	800	0.042	13	0.546

25	800	0.044	13	0.572
25	800	0.046	13	0.598
25	800	0.048	13	0.624
25	800	0.05	13	0.65
25	800	0.052	13	0.676
25	800	0.054	13	0.702
25	800	0.056	13	0.728
25	800	0.058	13	0.754
25	800	0.06	13	0.78
25	800	0.062	13	0.806
25	800	0.064	12	0.768
25	800	0.066	12	0.792
25	800	0.068	12	0.816
25	800	0.07	12	0.84
25	800	0.072	12	0.864
25	800	0.074	12	0.888
25	800	0.076	12	0.912
25	800	0.078	12	0.936
25	800	0.08	11	0.88
25	800	0.082	11	0.902
25	800	0.084	11	0.924
25	800	0.086	11	0.946
25	800	0.088	11	0.968
25	800	0.09	11	0.99
25	800	0.092	10	0.92
25	800	0.094	10	0.94
25	800	0.096	9	0.864
25	800	0.098	9	0.882
25	800	0.102	8	0.816
25	800	0.104	8	0.832
25	800	0.106	8	0.848
25	800	0.108	7	0.756
25	800	0.11	7	0.77
25	800	0.112	7	0.784
25	800	0.114	6	0.684
25	800	0.116	6	0.696
25	800	0.118	5	0.59
25	800	0.12	5	0.6
25	800	0.122	5	0.61
25	800	0.124	4	0.496

25	800	0.126	4	0.504
25	800	0.128	4	0.512
25	800	0.13	4	0.52
25	800	0.132	3	0.396
25	800	0.134	3	0.402
25	800	0.136	3	0.408
25	800	0.138	3	0.414
25	800	0.14	2	0.28
25	800	0.142	2	0.284
25	800	0.144	2	0.288
25	800	0.146	1	0.146
25	800	0.148	1	0.148
25	800	0.15	1	0.15
25	800	0.152	0	0
25	800	0.154	0	0
28	450	0.004	14	0.056
28	450	0.008	15	0.12
28	450	0.012	14	0.168
28	450	0.016	14	0.224
28	450	0.02	14	0.28
28	450	0.024	14	0.336
28	450	0.028	14	0.392
28	450	0.032	14	0.448
28	450	0.036	13	0.468
28	450	0.04	13	0.52
28	450	0.044	13	0.572
28	450	0.048	13	0.624
28	450	0.052	13	0.676
28	450	0.056	13	0.728
28	450	0.06	12	0.72
28	450	0.064	12	0.768
28	450	0.068	12	0.816
28	450	0.072	12	0.864
28	450	0.076	12	0.912
28	450	0.08	11	0.88
28	450	0.084	11	0.924
28	450	0.088	11	0.968
28	450	0.092	11	1.012
28	450	0.096	11	1.056
28	450	0.1	10	1
28	450	0.104	10	1.04

28	450	0.108	10	1.08
28	450	0.112	9	1.008
28	450	0.116	9	1.044
28	450	0.12	8	0.96
28	450	0.124	8	0.992
28	450	0.128	7	0.896
28	450	0.132	6	0.792
28	450	0.136	4	0.544
28	450	0.14	1	0.14
28	450	0.144	0	0
28	450	0.148	0	0
30	420	0.004	14	0.056
30	420	0.008	14	0.112
30	420	0.012	14	0.168
30	420	0.016	13	0.208
30	420	0.02	13	0.26
30	420	0.024	13	0.312
30	420	0.028	13	0.364
30	420	0.032	13	0.416
30	420	0.036	12	0.432
30	420	0.04	12	0.48
30	420	0.044	12	0.528
30	420	0.048	12	0.576
30	420	0.052	11	0.572
30	420	0.056	11	0.616
30	420	0.06	11	0.66
30	420	0.064	10	0.64
30	420	0.068	10	0.68
30	420	0.072	9	0.648
30	420	0.076	8	0.608
30	420	0.08	7	0.56
30	420	0.084	0	0
30	420	0.088	0	0
26	270	0.001	14	0.014
26	270	0.002	14	0.028
26	270	0.003	14	0.042
26	270	0.004	14	0.056
26	270	0.005	14	0.07
26	270	0.006	14	0.084
26	270	0.007	14	0.098

26	270	0.008	14	0.112
26	270	0.009	14	0.126
26	270	0.01	14	0.14
26	270	0.011	14	0.154
26	270	0.012	14	0.168
26	270	0.013	14	0.182
26	270	0.014	14	0.196
26	270	0.015	14	0.21
26	270	0.016	13	0.208
26	270	0.017	13	0.221
26	270	0.018	13	0.234
26	270	0.019	13	0.247
26	270	0.02	13	0.26
26	270	0.021	13	0.273
26	270	0.022	13	0.286
26	270	0.023	13	0.299
26	270	0.024	13	0.312
26	270	0.025	12	0.3
26	270	0.026	12	0.312
26	270	0.027	12	0.324
26	270	0.028	12	0.336
26	270	0.029	12	0.348
26	270	0.03	12	0.36
26	270	0.031	11	0.341
26	270	0.032	11	0.352
26	270	0.033	11	0.363
26	270	0.034	11	0.374
26	270	0.035	10	0.35
26	270	0.036	9	0.324
26	270	0.037	9	0.333
26	270	0.038	8	0.304
26	270	0.039	8	0.312
26	270	0.04	7	0.28
26	270	0.041	2	0.082
26	270	0.042	0	0
26	270	0.043	0	0
29	160	0.001	11	0.011
29	160	0.002	12	0.024
29	160	0.003	11	0.033
29	160	0.004	11	0.044
29	160	0.005	11	0.055

29	160	0.006	10	0.06
29	160	0.007	10	0.07
29	160	0.008	9	0.072
29	160	0.009	5	0.045
29	160	0.01	0	0
29	160	0.011	0	0
28	100	0.004	15	0.06
28	100	0.008	15	0.12
28	100	0.012	15	0.18
28	100	0.016	15	0.24
28	100	0.02	15	0.3
28	100	0.024	14	0.336
28	100	0.028	14	0.392
28	100	0.032	14	0.448
28	100	0.036	14	0.504
28	100	0.04	14	0.56
28	100	0.044	14	0.616
28	100	0.048	13	0.624
28	100	0.052	13	0.676
28	100	0.056	13	0.728
28	100	0.06	13	0.78
28	100	0.064	13	0.832
28	100	0.068	12	0.816
28	100	0.072	12	0.864
28	100	0.076	12	0.912
28	100	0.08	12	0.96
28	100	0.084	12	1.008
28	100	0.088	11	0.968
28	100	0.092	11	1.012
28	100	0.096	11	1.056
28	100	0.1	11	1.1
28	100	0.104	10	1.04
28	100	0.108	10	1.08
28	100	0.112	10	1.12
28	100	0.116	10	1.16
28	100	0.12	9	1.08
28	100	0.124	9	1.116
28	100	0.128	8	1.024
28	100	0.132	7	0.924
28	100	0.136	7	0.952

28	100	0.14	6	0.84
28	100	0.144	5	0.72
28	100	0.148	4	0.592
28	100	0.152	1	0.152
28	100	0.156	0	0
28	100	0.16	0	0
26	100	0.002	15	0.03
26	100	0.004	15	0.06
26	100	0.006	15	0.09
26	100	0.008	15	0.12
26	100	0.01	15	0.15
26	100	0.012	15	0.18
26	100	0.014	14	0.196
26	100	0.016	14	0.224
26	100	0.018	14	0.252
26	100	0.02	14	0.28
26	100	0.022	14	0.308
26	100	0.024	14	0.336
26	100	0.026	14	0.364
26	100	0.028	14	0.392
26	100	0.03	14	0.42
26	100	0.032	14	0.448
26	100	0.034	14	0.476
26	100	0.036	14	0.504
26	100	0.038	14	0.532
26	100	0.04	13	0.52
26	100	0.042	13	0.546
26	100	0.044	13	0.572
26	100	0.046	13	0.598
26	100	0.048	13	0.624
26	100	0.05	13	0.65
26	100	0.052	13	0.676
26	100	0.054	13	0.702
26	100	0.056	13	0.728
26	100	0.058	13	0.754
26	100	0.06	13	0.78
26	100	0.062	13	0.806
26	100	0.064	12	0.768
26	100	0.066	12	0.792
26	100	0.068	12	0.816
26	100	0.07	12	0.84



26	100	0.072	12	0.864
26	100	0.074	12	0.888
26	100	0.076	12	0.912
26	100	0.078	12	0.936
26	100	0.08	12	0.96
26	100	0.082	12	0.984
26	100	0.084	11	0.924
26	100	0.086	11	0.946
26	100	0.088	11	0.968
26	100	0.09	11	0.99
26	100	0.092	11	1.012
26	100	0.094	11	1.034
26	100	0.096	11	1.056
26	100	0.098	11	1.078
26	100	0.1	11	1.1
26	100	0.102	10	1.02
26	100	0.104	10	1.04
26	100	0.106	10	1.06
26	100	0.108	10	1.08
26	100	0.11	10	1.1
26	100	0.112	10	1.12
26	100	0.114	10	1.14
26	100	0.116	9	1.044
26	100	0.118	9	1.062
26	100	0.12	9	1.08
26	100	0.122	8	0.976
26	100	0.124	8	0.992
26	100	0.126	7	0.882
26	100	0.128	7	0.896
26	100	0.13	7	0.91
26	100	0.132	6	0.792
26	100	0.134	6	0.804
26	100	0.136	6	0.816
26	100	0.138	5	0.69
26	100	0.14	5	0.7
26	100	0.142	4	0.568
26	100	0.144	3	0.432
26	100	0.146	3	0.438
26	100	0.148	2	0.296
26	100	0.15	1	0.15

26	100	0.152	0	0
25	30	0.001	9	0.007
25	30	0.002	7	0.018
25	30	0.003	2	0.006
25	30	0.004	0	0
25	30	0.005	0	0

### Anexo 3. Familia de curvas de caracterización de celdas DSSC G4S

