

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

DOCUMENTO 1

CELDA SOLARES QUE CONTIENEN TINTES SENSIBILIZANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Código de proyecto VIE: 5402-1360-2301

Autor: Carlos Meza Benavides

Investigadores participantes: Anibal Coto (coordinador), Carlos Meza, Sergio Morales, Javier Pérez, Paola Vega.

Mayo del 2013

Tabla de Contenidos

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1. Escenario Energético Global y Relevancia de la Energía Solar | 2 |
| 1.2. Celdas Solares con Tintes Sensibilizados | 4 |
| 1.3. Caracterización Eléctrica de Celdas Solares Fotovoltaicas | 5 |
| 2. Metodología | 7 |
| 3. Resultados y discusión | 8 |
| 3.1. Modelo de celdas fotovoltaicas | 10 |
| 3.1.1. Modelos estáticos | 11 |
| 3.2. Modelo dinámico | 11 |
| 3.3. Carga electrónica | 12 |
| 3.3.1. Sistema de Instrumentación Comercial | 12 |
| 3.3.2. Carga electrónica construida y diseñada | 12 |
| 3.4. Ambiente | 13 |
| 4. Conclusiones | 19 |
| 5. Recomendaciones | 20 |
| 6. Agradecimientos | 20 |
| 7. Referencias | 20 |
| 8. Apéndice | 22 |

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Nombre del Proyecto: Celdas Solares que Contienen Tintes Sensibilizantes para la Producción de Energía

Código de proyecto VIE: 5402-1360-2301

Período de ejecución: 1 enero 2010 – 31 diciembre 2012

Participantes:

- Dr. Carlos Meza Benavides
Escuela de Ingeniería Electrónica
cmeza@itcr.ac.cr

- Dr-Ing. Paola Vega Castillo
Escuela de Ingeniería Electrónica
pvega@ietec.org

- Ing. Aníbal Coto Cortés
Escuela de Ingeniería Electrónica
acotoc@itcr.ac.cr

- Ing. Sergio Morales Hernández
Escuela de Ingeniería Electrónica
artuomoraleshz@gmail.com

- Ing. Javier Pérez Rodríguez
Escuela de Ingeniería Electrónica
japerez@itcr.ac.cr

Resumen

Este proyecto trata sobre el trabajo realizado por parte de ingenieros del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) en un nuevo tipo de celdas solares desarrollado por un grupo de trabajo de la Universidad de Costa Rica (UCR). La novedad de las celdas consiste en que utilizan tintes sensibilizantes para absorber la luz y llevarlas a un material semiconductor que realice el proceso de generación de energía eléctrica a partir de la energía solar. El grupo de trabajo del ITCR realizó la instrumentación y técnicas de medición de las curvas corriente vs. tensión ($i - v$) de las celdas solares con tintes sensibilizados sintetizados por el grupo de la UCR. El principal producto de este trabajo es la curva $i - v$ que caracteriza la celda desarrollada.

Palabras clave: celdas solares, tintes sensibilizantes, caracterización eléctrica, curva corriente vs. tensión

Abstract

This project is about the work done by a group of engineers of the Costa Rica Institute of Technology (ITCR) over a new solar cell type developed by a work group of the Costa Rica University (UCR). The novelty of the cells is the use of sensitizing tints in order to absorb light and take it to a semiconductor material that perform the generation of electric energy from solar energy. The work group of the ITCR implemented the instrumentation and measurement techniques of the current vs. voltage ($i - v$) of the solar cells with sensitizing tints synthesized by the UCR group. The main result of this work is the $i - v$ curve that characterizes the developed cell.

Key words: solar cells, sensitizing tints, electrical characterization, current vs. voltage curve

1. Introducción

1.1. Escenario Energético Global y Relevancia de la Energía Solar

Según el reporte anual de estadísticas energéticas publicado en 2012 por la Agencia Internacional de Energía en el 2010 el mundo produjo 535.5 EJ para cubrir sus necesidades energéticas [1]. Como ha sido la tendencia desde hace varios años, el 81 % de la energía producida provino de fuentes de energía no renovables y derivadas de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) y tan sólo el 2.3 % se generó a partir de fuentes hidroeléctricas. Menos de un 1 % correspondió a fuentes de energía renovable no tradicionales como la energía eólica y solar.

Existen varias razones por las cuales un escenario energético basado en combustibles fósiles es insostenible y perjudicial. La razón más palpable es posiblemente la inminente escasez de las reservas de combustibles fósiles, la cual es traída a colación cada vez que se experimenta una subida en los precios del crudo. Si bien es cierto muy posiblemente los incrementos en el costo del crudo en el pasado se han debido principalmente a factores geopolíticos más que a su escasez, el carácter finito de los combustibles fósiles no es puesto en duda. Sí existe cierta divergencia en la comunidad científica respecto a cuántos años de combustibles fósiles le quedan a la humanidad. Con la tecnología actual y explotando las reservas de petróleo conocidas y comprobadas, la humanidad tendría entre 28 a 44 años más de petróleo en el caso en el cual se consuma con la misma razón que en el 2010, lo cual es altamente improbable, dado que la razón de consumo de petróleo siempre ha aumentado [1], [21]. En el caso en el cual se tomen en cuenta las reservas de petróleo que son geológicamente posibles pero aún no comprobadas y las reservas que actualmente no se pueden extraer porque no se cuenta con la tecnología para ello, en el mejor de los casos, la humanidad podría utilizar petróleo por 80 años, esto siempre y cuando se mantenga el consumo de petróleo del 2010. Por otro lado, si se explotan intensivamente las reservas de petróleo no convencionales, tales como el petróleo pesado y el petróleo derivado de la pizarra y las arenas bituminosas, en el mejor de los casos se podría ampliar su uso 80 años más. No obstante, el proceso de extracción y tratamiento del llamado petróleo no convencional es no sólo más costoso que el petróleo convencional sino también implica impactos medioambientales significativamente mayores [14], [21]. Las otras fuentes de combustibles fósiles, esto es, el gas natural y el carbón, son mucho más abundantes. De acuerdo con los datos de [1], [21] se logró identificar que con una razón de consumo igual a aquella del 2010, la humanidad puede explotar gas natural por varias décadas (de 44 a 140 años)¹ y carbón por cientos de años (de 150 años a 3000 años).

La naturaleza contaminante de las fuentes de energía no renovables derivadas de combustibles fósiles hace urgente que éstas sean sustituidas mucho antes que se agoten. Es altamente probable que ocurran efectos negativos para la sociedad humana si se continúa emitiendo CO₂ a la razón con la cual se hace hoy en día. Si bien es cierto, no existe un consenso en la comunidad científica acerca de cuáles pueden ser las consecuencias de la acumulación de CO₂ en la atmósfera, si existen hechos científicos que demuestran que las emisiones de carbono antropogénicas han creado un desbalance nunca antes

¹Al igual que en el caso del petróleo, existe también gas natural no convencional de tratamiento y extracción más complejo y costoso que el gas natural convencional. Las reservas de gas natural no convencionales son unas 10 veces más abundantes que las convencionales [21]

visto [14]. Estudios en núcleos de glaciares han determinado que por aproximadamente 600 000 años las concentraciones de CO₂ han oscilado entre 210 y 300 ppm. Las concentraciones de CO₂ en el 2001 eran de 380 ppm [14]. El aumento sin precedentes en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera se debe que el CO₂ es naturalmente absorbido a una razón mucho menor a la cual es generado por el hombre. Según se indica en [14] la acumulación de CO₂ que se dará en los próximos 40 a 50 años permanecerá en la atmósfera por lo menos en los próximos 500 a 2000 años. Prácticamente todos los modelos climatológicos predicen efectos globales negativos tales como aumento considerable del nivel del mar o cambios en el ciclo hidrológico si se llega a alcanzar una concentración de CO₂ mayor a 550 ppm. A la razón de emisión de CO₂ de hoy en día se puede superar fácilmente los 770 ppm para el 2050 [14]. Para poder contener efectivamente las emisiones de CO₂ es necesario aumentar significativamente la contribución de las fuentes de energía libres de carbono. Algunos autores, e.g. [14], sugieren que para el 2050 debe existir una capacidad de al menos 10 TW que provenga de fuentes de energía libre de carbono.

La fuente de energía libre de carbono más abundante en la Tierra es la energía solar. Se estima que la cantidad de energía anual proveniente del Sol a la Tierra corresponde a 3×10^{24} Joules, es decir, 10 000 veces más energía del consumo actual de la población mundial [12]. En la edición del 2012 de la Valoración Energética Global [21], publicación coordinada por el *International Institute for Applied Systems Analysis*, Viena, Austria, en donde contribuyen más de una veintena de investigadores de prestigiosas universidades y centros de investigación de todo el mundo, reporta que el potencial técnico de la energía solar es entre 387 a 1037 veces mayor que la biomasa, 77 a 181 veces mayor que la energía geotérmica, 1240 a 4667 veces mayor que la energía hidroeléctrica y 47 a 124 veces mayor que la energía eólica. El potencial tecnológico no representa el potencial teórico sino aquel que es potencialmente aprovechable.

De esta forma, la generación de electricidad basada en el efecto fotoeléctrico se perfila como una de las principales fuentes energéticas alternativas. El efecto fotoeléctrico ocurre cuando un material emite electrones (i.e. produce electricidad) cuando se hace incidir sobre él radiación electromagnética (e.g. luz solar). La naturaleza intrínseca de este proceso de transformación tiene varias ventajas:

- es robusto y de una larga vida útil ya que sólo se ven involucrados movimientos mecánicos a nivel atómico,
- la radiación solar se encuentra disponible en cualquier lugar,
- es altamente escalable ya que se pueden tener sistemas que generen mW hasta sistemas que generen GW,
- durante su operación no genera ningún elemento contaminante,
- es fácilmente integrable a cualquier entorno (rural o urbano).

En lo sucesivo se denominará “generador fotovoltaico” a aquellos elementos que producen energía eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico.

Existen distintos materiales con los cuales se puede producir el efecto fotoeléctrico. Uno de los más empleados, debido principalmente a su amplia utilización en la industria electrónica, es el silicio. No obstante, existen otros materiales que también pueden servir como generadores fotovoltaicos, como por

ejemplo otros semiconductores y algunos materiales orgánicos. El interés en el estudio de nuevos materiales fotovoltaicos responde a los altos costes (energéticos y económicos) asociados a la producción de celdas de silicio.

Además del estudio de nuevos materiales fotovoltaicos, también ha habido un esfuerzo significativo en la innovación del proceso constructivo del generador fotovoltaico. De esta forma se han podido obtener reducciones energéticas y económicas significativas en el proceso constructivo y aumentos considerables en la eficiencia del proceso de transformación energética.

Con base en lo anterior, a lo largo del presente documento, se entenderá “tecnología fotovoltaica” como el material y el proceso constructivo de un generador fotovoltaico determinado.

El mayor obstáculo para aprovechar de forma masiva la energía solar es su mayor costo en comparación con las otras fuentes de energía tradicionales. La diferencia en el costo es más apreciable en el caso de la energía solar utilizada para la generación de electricidad, esto es, la energía solar fotovoltaica. La reducción del costo de la tecnología fotovoltaica ha sido uno de los principales objetivos de la comunidad científica en las últimas décadas. Existen varias estrategias para alcanzar el anterior objetivo, pero una de las más difundidas por su potencial gran impacto es el desarrollar nuevas tecnologías fotovoltaicas de menor costo.

1.2. Celdas Solares con Tintes Sensibilizados

La tecnología fotovoltaica actualmente más utilizada es aquella basada en junturas de silicio p-n. Las celdas solares fotovoltaicas semiconductores de silicio tienen la gran ventaja que se pueden aprovechar todos los procesos de diseño y manufactura, ya maduros y probados, que se utilizan para la producción de circuitos electrónicos integrados, tales como microprocesadores y chips de memoria [13]. Por otro lado, uno de los mayores inconvenientes es su dependencia de la eficiencia de conversión con la pureza del silicio, esto es, la eficiencia de conversión de energía de una celda solar fotovoltaica será mayor cuanto menor sean las impurezas del silicio con la que fue construida. Obtener silicio de alta pureza es un procedimiento costo tanto desde el punto de vista económico como energético. A raíz del mencionado inconveniente, en las últimas décadas varios grupos de investigación se han concentrado en el desarrollo de nuevas tecnologías fotovoltaicas de bajo coste.

En 1991, Grätzel y colaboradores informaron sobre la primera celda solar realmente eficiente basada en TiO_2 nanoparticulado sensibilizado con un tinte. El principio de operación es análogo a la fotosíntesis [19]. En general, consiste en una película de grosor micrométrico de TiO_2 , con tamaños de partícula nanométricos, el cual es un semiconductor de sinapsis ancha que ordinariamente no absorbe en el visible. Además, se recubre con una o más capas de un tinte, el cual se encargará de absorber la luz, y de donar los electrones excitados a la banda de conducción del TiO_2 , el cual se encuentra adherido a un electrodo transparente (generalmente óxido de indio dopado con estaño -ITO-, u óxido de estaño dopado con flúor) que los conducirá al circuito externo, para realizar trabajo. Luego serán recibidos por un contraelectrodo, normalmente un óxido conductor transparente recubierto con un catalizador, que los transferirá a un electrolito con un mediador que compensará con un electrón al tinte. Lo que hace a este tipo de celdas solares especial sobre otras, es que el grado de pureza del semiconductor no debe ser extremo, ya que el papel

del TiO_2 es sólo como conductor de los transportadores de carga mayoritarios, no de los minoritarios, por lo que defectos en la red cristalina, que en otros fotovoltaicos comunes causan grandes pérdidas por recombinación, no ocurren a tal grado en este tipo de celdas. Por otra parte, las razones del éxito de las celdas de Grätzel, en contraposición con otros intentos anteriores, se encuentra en la buena cosecha de luz alcanzada al utilizar una superficie de semiconductor muy rugosa, lo que permite acomodar más cantidad del tinte, en contacto simultáneo con el semiconductor y el electrolito redox.

Las celdas solares sensibilizadas son una opción potencialmente viable para la obtención de energía en forma renovable, a bajo costo y de naturaleza ecológica, sin embargo, aún falta investigación en todos sus componentes, entre ellos diseñar un sistema captador de la energía solar que combine el uso de cromóforos y la presencia de un átomo con fotoreactividad, así como la investigación de nuevos tintes naturales; también representan un reto. Es por ello que el proyecto de investigación llevado a cabo se concentró en el desarrollo de nuevas técnicas de diseño de celdas con tintes sensibilizados. Más específicamente, el objetivo principal del este trabajo fue diseñar y optimizar una celda solar sensibilizada por medio de la obtención por la técnica de RF-sputtering de una película ultradelgada intermedia de TiO_2 que se deposite entre el electrodo y el TiO_2 hidrolizado, y la síntesis de cromóforos como antenas receptoras de la luz solar que contenga tintes o novedosos ligandos con rutenio coordinados.

Esta es una investigación que exige interdisciplinaridad, trabajo conjunto y la suma de áreas del saber tan distintas como la química y la electrónica. La idea es sumar desde la síntesis química de materiales novedosos, el ensamblaje de las celdas, su evaluación física y electrónica, como fuente eficiente de conversión de energía solar a flujo eléctrico. El grupo de la UCR, lo constituyen investigadores con experiencia en el área de química de materiales, síntesis en química inorgánica y organometálica. El del ITCR en la caracterización de celdas solares. Estos grupos se han asociado para proponer una meta común de alta tecnología como es la construcción de una celda solar eficiente y competitiva.

El presente informe describe el trabajo realizado por el grupo del Instituto Tecnológico de Costa Rica y por lo tanto se concentra únicamente en la instrumentación y técnicas de medición de las curvas corriente vs. tensión ($i - v$) de las celdas solares con tintes sensibilizados sintetizadas por el grupo de la Universidad de Costa Rica.

1.3. Caracterización Eléctrica de Celdas Solares Fotovoltaicas

Tal y como se mencionó anteriormente, existen diferentes tecnologías de generadores fotovoltaicos que presentan características eléctricas diferentes entre sí. La diferencia de las características eléctricas tiene su origen no sólo en la tecnología del generador sino también en las condiciones ambientales que están presentes durante su operación. La temperatura y la radiación solar son las variables ambientales que determinan la cantidad de energía que produce un generador fotovoltaico y su vida útil. Teniendo en cuenta que la vida útil de un generador fotovoltaico comercial supera hoy en día los 25 años, toma especial relevancia el tener herramientas que permitan estimar cuánta energía puede producir una tecnología fotovoltaica específica.

La necesidad de caracterizar los generadores fotovoltaicos proviene de la dificultad de modelar su comportamiento eléctrico. Un generador fotovoltaico tiene características eléctricas corriente-tensión no lineales

que dependen, también de forma no lineal, de variables ambientales como temperatura y radiación solar [13], [15], [4], [11], [18]. Además, tal y como se menciona por ejemplo en [2],[25], [5], [10], [8], [6], [9] cada tecnología fotovoltaica responde eléctricamente de forma distinta a estas condiciones ambientales.

De esta forma, los dispositivos fotovoltaicos requieren de una metodología confiable de caracterización eléctrica que permita:

- predecir la generación de energía del dispositivo para unas condiciones dadas,
- comparar el desempeño energético de distintas tecnologías fotovoltaicas,
- obtener modelos que permitan optimizar la extracción de energía del generador fotovoltaico y los circuitos electrónicos de procesamiento de potencia asociados.

Por lo tanto, existe una necesidad de parte del usuario y productor de esta tecnología en conocer, al menos de forma aproximada, cuál será su desempeño energético. La caracterización de los generadores fotovoltaicos se realiza normalmente a partir de las siguientes mediciones:

- *Medición del desempeño energético:* se registra la producción máxima de energía del generador fotovoltaico. Idealmente se debería de registrar la energía producida por un generador durante toda su vida útil, no obstante, se estima que con un registro de 1 a 2 años se puede obtener una buena predicción de cómo será el desempeño energético del generador a lo largo de su vida útil.
- *Medición de la curva característica:* consiste en la obtención de la curva corriente vs. tensión ($i-v$) de un generador fotovoltaico para unas condiciones ambientales dadas y constantes. Es una medición rápida (en el orden de ms) en donde normalmente se hace un barrido de tensión y se registran los valores de corriente correspondiente. A partir de la curva $i-v$ se puede determinar características importantes de una tecnología fotovoltaica, y en algunos casos se pueden obtener predicciones de cómo puede ser su desempeño energético. Naturalmente, la predicción del desempeño energético no será tan precisa como en la medición mencionada anteriormente, no obstante, la obtención de la curva característica ofrece una forma rápida de obtener información útil del generador para compararla con otras tecnologías.

En el caso de las celdas fotovoltaicas basadas en silicio cristalino, existen varios estándares para medir su desempeño energético. Por ejemplo, la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC, por sus siglas en inglés), tiene los siguientes estándares:

- IEC 60891 ed. 2: Procedimientos para la corrección de temperatura e insolación para las mediciones de la característica $i-v$ de dispositivos fotovoltaicos basados en silicio cristalino.
- IEC 60904-1 ed. 2: Dispositivos fotovoltaicos - Parte 1: Mediciones de las características de tensión y corriente.
- IEC 60904-2: Requisitos para los dispositivos de referencia solar.
- IEC 60904-3: Principios para la medición de dispositivos fotovoltaicos.

- IEC 60904-4: Rastreo (*"traceability"*) de la celda solar de referencia primaria.
- IEC 60904-5: Determinación de la temperatura de la celda equivalente.
- IEC 60904-7: Cálculo de la discrepancia espectral solar.
- IEC 60904-8: Medición de la respuesta espectral de dispositivos fotovoltaicos.
- IEC 60904-9: Requisitos de desempeño del simulador solar.
- IEC 60904-10: Mediciones de linealidad.

No obstante, según se reporta en [24] las técnicas tradicionales de caracterización pueden incurrir en errores de medición en las nuevas tecnologías fotovoltaicas.

Dado que, el proyecto en el cual se enmarca el trabajo aquí presentado, representa la primera experiencia a nivel nacional relacionada con el desarrollo de las celdas solares, se realizaron únicamente mediciones de la curva característica. Esto porque las mediciones de desempeño energético se realizan normalmente en tecnología ya madura, pronta a ser comercializada o que ya se encuentra en el mercado. Adicionalmente, el comportamiento eléctrico a mediano y largo plazo de las celdas solares con tintes sensibilizados está fuertemente ligado a su encapsulado. En efecto, para este tipo de celdas el encapsulado de las capas activas es fundamental para proteger el dispositivo del deterioro y la influencias ambientales. No obstante, el encapsulado no representa el enfoque del presente proyecto. Por otro lado, las mediciones de la curva característica permiten obtener un primer conjunto de indicadores orientativos que permite comparar el desempeño de las distintas variaciones de celdas solares con tintes sensibilizadas que se realizaron en este proyecto.

2. Metodología

Como se mencionó anteriormente, **el presente documento se refiere únicamente al desarrollo del sistema de instrumentación que permite obtener la curva i-v de las distintas celdas solares con tintes sensibilizados desarrolladas por el grupo de investigadores del CELEQ - UCR.**

De igual forma, la metodología y enfoque que se describirán en esta sección fueron utilizados únicamente para el desarrollo del sistema de instrumentación y no para el diseño de las celdas. Esto no quiere decir que el diseño del sistema de instrumentación se realizó sin tomar en cuenta las características físico-químicas de las celdas solares en estudio. Al contrario, como se verá a lo largo del presente documento, es necesario comprender el comportamiento eléctrico de las celdas solares fotovoltaicas, no sólo de aquellas en estudio sino también de las más comúnmente utilizadas, para poder obtener un sistema de instrumentación que no registre efectos indeseables, tales como aquellos presentes cuando existen capacitancias parásitas [18].

En este punto, es importante recalcar que la caracterización eléctrica de celdas solares fotovoltaicas representa en sí misma un área de investigación actual. Tal y como se reporta en [24], las técnicas tradicionales para caracterizar celdas solares, aún en el caso de aquellas basadas en silicio, pueden

llevar a mediciones erróneas. Es por ello que el sistema de instrumentación para la caracterización de celdas solares con tintes sensibilizadas se trató no cómo la construcción de un instrumento de medición, sino como una primera incursión en un área de investigación nueva y amplia.

Como en gran parte de los casos en investigación en ciencias aplicadas, se utilizó el método de diseño iterativo, no sólo para diseñar el sistema de instrumentación, sino también para comprender el comportamiento eléctrico de las celdas solares en estudio. El ciclo metodológico de diseño consiste en las siguientes etapas

- revisión bibliográfica
- planteamiento formal del problema
- planteamiento de la solución
- simulación, análisis y verificación de la solución
- implementación, verificación y validación

Las etapas del anterior ciclo de diseño no son necesariamente realizadas de forma secuencial, en realidad, cada etapa es visitada varias veces hasta obtener una solución y conocimiento del fenómeno físico satisfactorio.

Los criterios generales utilizados para determinar cuando se termina el anterior ciclo de diseño anteriormente mencionados fueron los siguientes:

- el sistema de instrumentación para la caracterización es portátil, lo cual es necesario para caracterizar las celdas con luz artificial y luz solar,
- el método de caracterización es reproducible y aplicable para distintas tecnologías de celdas fotovoltaicas,
- los valores de corriente y tensión, i.e., la caracterización eléctrica, son registrados para su posterior procesamiento.

Finalmente, es importante señalar que aparte del objetivo principal perseguido, esto es, desarrollar el sistema de instrumentación, también se procuró desarrollar modelos matemáticos del comportamiento eléctrico de las celdas solares en estudio, lo cual no es sólo útil para el diseño del sistema de instrumentación sino también para otros sistemas electrónicos ligados a la tecnología solar en estudio, como por ejemplo, convertidores de potencia.

3. Resultados y discusión

Tal y cómo se mencionó anteriormente, en este proyecto se caracterizó las celdas solares con tintes sensibilizadas por medio de la medición de su curva característica, la cual consiste en la medición de

Cuadro 1: Resultados por componente del sistema de caracterización eléctrica (únicamente descritos resultados del grupo del ITCR)

| Componente | Resultados obtenidos |
|-------------------|--|
| Celda solar | Definición de modelos matemáticos necesarios para la validación de los resultados experimentales y el diseño de la carga electrónica |
| Carga electrónica | Análisis y diseño de carga electrónica portátil |
| Ambiente | Diseño y construcción de un ambiente controlado para la caracterización de celdas |

distintos valores de corriente, i_{pv} , y tensión, v_{pv} , de la celda tomados en todos su rango de operación. La Figura 1 muestra el diagrama de bloques del sistema de caracterización eléctrica de celdas solares. Ésta Figura se utilizará para describir la forma en que se presentarán los resultados obtenidos.

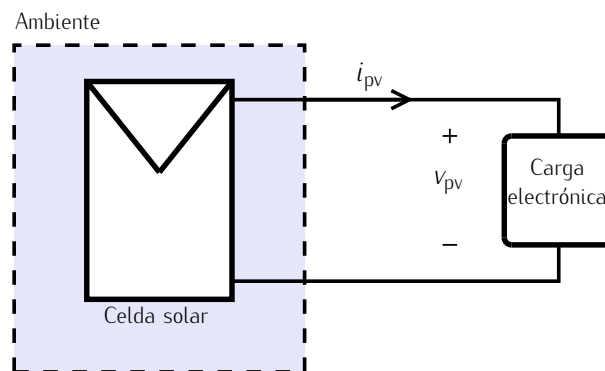


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema de caracterización eléctrica para celdas solares fotovoltaicas

Los elementos de la Figura 1 consisten en:

- **Celda solar:** la celda solar fotovoltaica en estudio.
- **Carga electrónica:** la instrumentación o circuito electrónico que extrae valores predeterminados de corriente y tensión con el fin de obtener la curva característica de la celda solar.
- **Ambiente:** las condiciones ambientales, principalmente temperatura e insolación, en las cuales se realiza la caracterización. Estas condiciones deberían de ser medidas o prefijadas.

El presente proyecto ha originado resultados para cada uno de los elementos anteriormente mencionados tal y como se puede observar en el Cuadro 1

Como es práctica común en el diseño e investigación en ingeniería, los resultados fueron obtenidos luego de un proceso cíclico iterativo. Por ejemplo, los modelos matemáticos que se presentarán no fueron

Cuadro 2: Modelos matemáticos del comportamiento eléctrico de módulos fotovoltaicos

| Nivel de abstracción | Objetivo |
|---|--|
| Subatómico, atómico, molecular | Estudio y optimización del fenómeno físico de conversión de insolación en energía eléctrica |
| Corriente y tensión en el orden de milisegundos | Estudio y optimización de los circuitos electrónicos asociados al generador fotovoltaico |
| Corriente y tensión en el orden de horas | Estudio y optimización de los algoritmos que se encargan de ubicar el punto de operación del generador fotovoltaico en el punto de máxima extracción de potencia |
| Energía generada en el orden de meses y años | Evaluación y predicción de la producción de energía de un generador fotovoltaico |

obtenidos en un primera instancia sino luego de varias iteraciones que dependieron del desarrollo de la carga electrónica, el sistema de caracterización y el control de las variables ambientales.

3.1. Modelo de celdas fotovoltaicas

El trabajo desarrollado permitió profundizar en el análisis y estudio de modelos matemáticos que describen comportamiento eléctrico de celdas fotovoltaicas. En este sentido, los autores de este trabajo consideran que existió un aporte relevante en esta área, sobretodo en la delimitación y especificación de modelos matemáticos para el diseño y optimización de los circuitos electrónicos que se utilizan con generadores fotovoltaicos. Efectivamente, en la literatura científica se pueden encontrar modelos matemáticos de generadores fotovoltaicos con distintos objetivos y niveles de abstracción, tal y como se muestra en el Cuadro 2.

El trabajo desarrollado se concentró en los modelos de corriente y tensión en el orden de milisegundos. Este nivel de abstracción ha recibido poca atención de parte de la comunidad científica. En efecto, tal y como se menciona en [16], los modelos matemáticos utilizados para optimizar los circuitos electrónicos asociados a los generadores fotovoltaicos han sido sobresimplificados, lo cual puede llevar a comportamientos no deseables [17].

En un escala de milisegundos y tomando las nuevas tecnologías fotovoltaicas altamente capacitivas [24], el modelo desarrollado consiste en dos partes, a saber,

1. Estática: no considera elementos que almacenan energía como condensadores o inductores,
2. Dinámica: modela los efectos capacitivos que pueden presentar algunas celdas fotovoltaicas, incluyendo aquellas con tintes sensibilizados.

3.1.1. Modelos estáticos

El modelo estático desarrollado representa una síntesis de los modelos matemáticos más conocidos reportados en la bibliografía ([15], [4], [11], [18]). La innovación del modelo desarrollado en este trabajo radica en el enfoque utilizado, que permite identificar las relaciones directas entre algunos términos de la expresión matemática y algunos conjuntos de parámetros, tal y como se detallará más adelante. Intencionalmente, los términos de la expresión matemática que definen el modelo no se han definido explícitamente, sino que se han identificado sus principales propiedades. Éste enfoque impide una validación experimental directa pero facilita considerablemente el análisis dinámico de todo el sistema fotovoltaico. Nótese que este modelo se construye sobre otros modelos matemáticos que han sido validados experimentalmente.

Como se mencionó anteriormente, se consideró un nivel de abstracción que representa el generador fotovoltaico como un sistema de dos puertos en donde la corriente que circula por el dispositivo, i_{pv} , y la tensión que existe entre sus terminales, v_{pv} , están relacionadas por medio de una función no lineal que depende de la temperatura del dispositivo, T , su insolación, S , y un conjunto de parámetros $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$. El conjunto de parámetros n y sus valores dependen del material y el proceso de manufactura del generador fotovoltaico. De esta forma, los valores y el número de parámetros pueden ser definidos de forma específica para una tecnología fotovoltaica distinta. La relación entre i_{pv} y v_{pv} propuesta es la siguiente

$$i_{pv} = \Lambda(S, T, \rho) - \phi(S, T, v_{pv}, \rho) \quad (1)$$

en donde $\Lambda(\cdot) \geq 0$ y $\phi(\cdot) \geq 0$ son dos funciones con las siguientes propiedades

- $\Lambda(\cdot)$ no depende de v_{pv} y para períodos de tiempo en el orden de ms, puede considerarse constante,
- $\phi(\cdot)$ es biyectiva y estrictamente creciente con respecto a v_{pv} ,
- para el rango de operación de interés $\Lambda(\cdot)$ es siempre mayor o igual a $\phi(\cdot)$.

El modelo anteriormente descrito ha facilitado considerablemente el análisis de sistemas fotovoltaicas con el fin de optimizar los circuitos electrónicos asociados a ellos. Dicho modelo se utilizó por ejemplo en la elaboración de la ponencia "*On-line estimation of the temperature dependent parameters of photovoltaic generators*" elaborada por Carlos Meza, ITCR y Romeo Ortega, SUPELEC, Francia, presentada en el "*11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*", celebrada el 3 de Julio del 2013 en Caen, Francia.

Así mismo, Dulce Cortés Artavia, en [7], realizó un estudio detallado de los modelos matemáticos de distintas celdas solares fotovoltaicas basadas en el anterior enfoque. La Ing. Cortés Artavia realizó su proyecto de final de carrera de Ingeniería en Electrónico del Instituto Tecnológico de Costa Rica en el marco del presente proyecto.

3.2. Modelo dinámico

El modelo dinámico de generadores fotovoltaicos desarrollados en el presente proyecto fue reportado en la ponencia "*Evaluation of Models for the Internal Capacitance of a PV Module for the Design and*

Simulation of Power Converters” elaborada por Carlos Meza, ITCR y Alessandro Virtuani, SUPSI, Suiza, presentado en el “22th European Photovoltaic Solar Energy Conference” en Septiembre del 2010 en Valencia, España. En los apéndices se adjunta dicho artículo.

3.3. Carga electrónica

La carga electrónica actúa como una carga variable conectada al generador fotovoltaico con el objetivo de obtener distintos pares de corriente y tensión medidos a lo largo de su rango de operación.

En el marco de este proyecto se implementaron dos soluciones,

- sistema de instrumentación comercial: se adquirió una carga electrónica comercial, más específicamente se utilizó una equipo de fuente y medición (“*source-measurement unit*”) para ubicar y medir el punto de operación de la celda en estudio.
- diseño y construcción de una carga electrónica: se decidió aprovechar el marco del proyecto para iniciar el diseño de una carga electrónica específicamente pensada para caracterizar celdas solares de nueva generación.

3.3.1. Sistema de Instrumentación Comercial

Con el fin de cumplir con el objetivo principal del grupo del ITCR, esto es, la caracterización eléctrica de celdas solares con tintes sensibilizados, se utilizó un instrumento comercial como carga electrónica. Las curvas eléctricas de las celdas solares desarrolladas por el CELEQ fueron realizadas utilizando este instrumento. Algunas de estas curvas pueden observarse en [22] o en el informe final del proyecto del grupo de la UCR-CELEQ.

3.3.2. Carga electrónica construida y diseñada

Durante el desarrollo de este proyecto se procedió a estudiar el diseño y construcción de cargas electrónicas de para medir la curva $i - v$ de celdas solares de última generación. Se decidió evaluar este tema por las siguientes razones:

- el bajo grado de adaptabilidad y configurabilidad de la instrumentación comercial disponible. Es importante destacar que este hecho ha sido notado por otros grupos de investigación, véase por ejemplo [23]
- la falta de portabilidad de los sistemas de instrumentación comerciales para la caracterización de celdas solares.

El diseño y análisis teórico de la carga electrónica permitió obtener resultados y aportes novedosos que se reportan en el informe adjunto titulado “*Characterization of Capacitive PV Modules*”, el cuál se está depurando para presentarlo como artículo en una revista internacional.

Con base en el anterior informe, Sebastián Badilla en [3] realizó una primera implementación que, si bien es cierto logró comprobar el principio de funcionamiento ideado, no cumplió con los requerimientos necesarios para utilizarlo para caracterizar las celdas en estudio. Es importante destacar que el trabajo presentado en [3] fue esencial para identificar problemáticas importantes que permitirán en el marco de otro proyecto, mejorar significativamente una segunda versión de la carga electrónica. Más específicamente, se logró identificar que las características eléctricas del transistor que funciona como regulador de corriente juega un papel relevante en el desempeño del circuito. Así mismo, es posible que una carga electrónica operando como un circuitos electrónicos conmutados puede ser más económica y sencilla de implementar que la solución estudiada.

3.4. Ambiente

Con tal de cumplir con el objetivo principal del grupo del ITCR, gran parte del tiempo y de los recursos asignados al grupo se concentró en controlar las variables ambientales (temperatura y radiación solar) de forma pasiva para un sistema de caracterización comercial. Esta actividad permitió al grupo del CELEQ-UCR obtener curvas $i - v$ de las distintas celdas solares que allí se sintetizaron.

El sistema de medición desarrollado por el ITCR permitió realizar caracterizaciones en interiores con luz artificial (lámpara de Tungsteno) y en exteriores con luz solar. En ambos casos se realizaron mediciones de temperatura y radiación solar. También se realizaron mediciones del espectro lumínico de la lámpara de Xenón y de la insolación. En la Figura 2 se puede observar una muestra de las celdas solares con tintes sensibilizados que desarrolló el grupo del CELEQ-UCR y que se caracterizaron en SESLab-ITCR. Las celdas tienen una superficie efectiva de 1cm^2 . En la Figura 3 se muestra parte del proceso de construcción de las celdas solares en estudio. Los prototipos de celdas requerían de ser ensamblados inmediatamente antes de su caracterización para evitar su degradación.

Con el objetivo de mantener la temperatura y radiación solar constantes e iguales para las distintas mediciones la curva $i - v$ en interiores se procedió a construir lo que en este documento denominaremos una “caja de caracterización”. Una primera versión de esta caja de caracterización fue desarrollada por David Rodríguez como proyecto de graduación de la carrera de Ingeniería en Electrónica [20]. Esta primera tuvo problemas sobretodo para mantener la temperatura constante debido a que estaba construida de madera, lo cual concentraba el calor en su interior. Con base en esta experiencia, la Andrea Fajardo, estudiante de la Escuela de Diseño Industrial del Instituto Tecnológico de Costa Rica diseñó una segunda versión de la caja de caracterización que, además de estar construida de metal, extrae el aire caliente por medio de dos ventiladores ubicados en los lados, tal y como se puede ver en las Figuras 4, 5 y 6. En la parte superior de esta caja se instaló una lámpara de Tungsteno. La caja posee varios niveles de altura en donde la celda en estudio se puede colocar para obtener diferentes valores de intensidad lumínica. En todas las mediciones realizadas, tal y como se indica en [22], se utilizó valores de intensidad de entre 800 W/m^2 y 900 W/m^2 .

La caja de caracterización tiene dos conectores tipo lagarto que conectan las terminales de la celda solar en estudio con el sistema de medición comercial, el cual consistió en un instrumento de fuente y medición (SMU) y una computadora que lo comando y recoge los datos. En la Figura 8 se puede observar una de las curvas experimentales obtenidas con el sistema de medición antes descrito. Las totalidad de las



Figura 2: Muestra de celdas solares con tintes sensibilizadas hechas por el CELEQ-UCR y caracterizadas en el ITCR

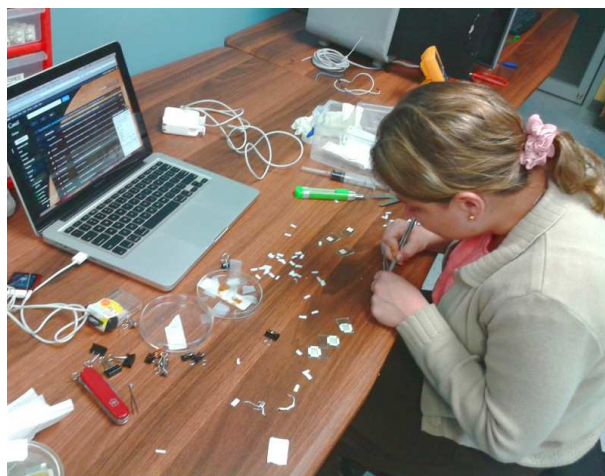


Figura 3: Ing. Karina Torres, CELEQ-UCR, terminando de construir las celdas solares sensibilizadas en el SESLab-ITCR para su caracterización

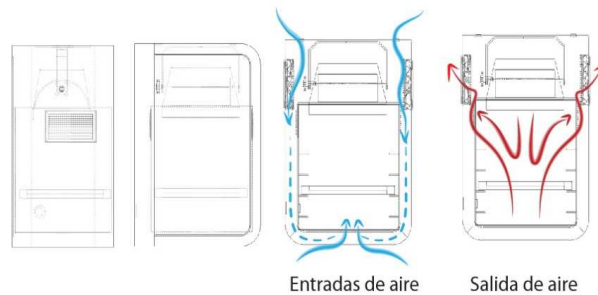


Figura 4: Diagrama ilustrativo de la caja de caracterización en donde se muestran las entradas y salidas de aire.



Figura 5: Imagen del modelo en 3D del diseño de la caja de caracterización

curvas de medición y la descripción detallada del proceso de caracterización se pueden encontrar en [22] o en el informe final del grupo de CELEQ-UCR.

También se obtuvieron curvas $i - v$ de las celdas solares con tintes sensibilizados con radiación solar medida, naturalmente, en exteriores. Para ello se conectó el equipo de medición comercial anteriormente mencionado en el kiosko "Foliage" localizado en los exteriores del SESLab-ITCR. Este kiosko está alimentado por energía solar. En la Figura 9 se muestra cómo se distribuyó el equipo en "Foliage". Tal y como se muestra en la Figura 10, para cada curva $i - v$ obtenida se midió la radiación solar existente.

Con el fin de comparar los resultados de las curvas $i - v$ obtenidas en interiores (lámpara Tungsteno) y exteriores (radiación solar) se midió también el espectro electromagnético de la fuente lumínica utilizada en cada caso. En la Figura 11 se muestra el momento en el cual se realizó la medición de la radiación solar y en la Figura 12 los espectros obtenidos en cada caso.

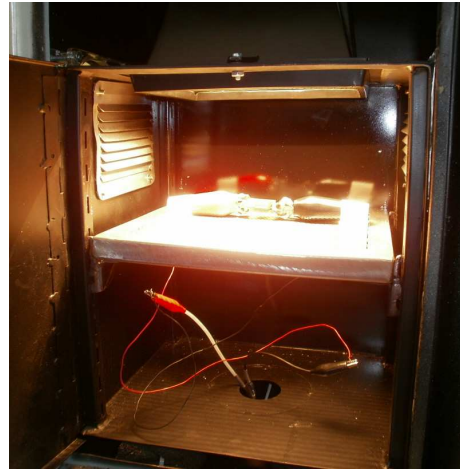
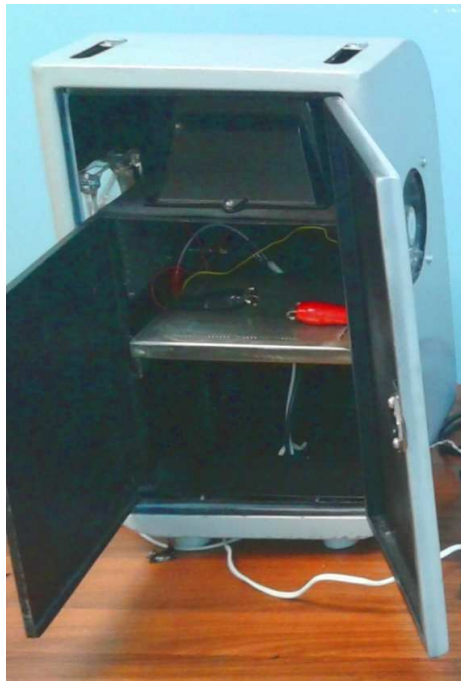


Figura 6: Caja de caracterización utilizada



Figura 7: Sistema de caracterización utilizado. En la figura se puede observar la caja de caracterización, el instrumento de fuente y medición (SMU) y la computadora que comanda y recoge los datos del SMU.

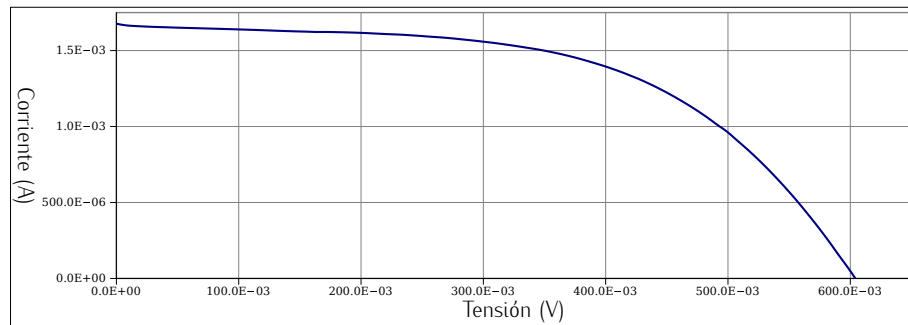


Figura 8: Curva $i - v$ de una celdas solar con tintes sensibilizados tomada con el equipo de caracterización de la Figura 7.



Figura 9: Medición de las características eléctricas en exteriores (con radiación solar). Se aprovechó el *Foliage* desarrollado en el proyecto “Construcción de una Instalación Fotovoltaica Experimental” para alimentar el equipo de medición.



Figura 10: Medición de la radiación solar (1028 W/m^2)

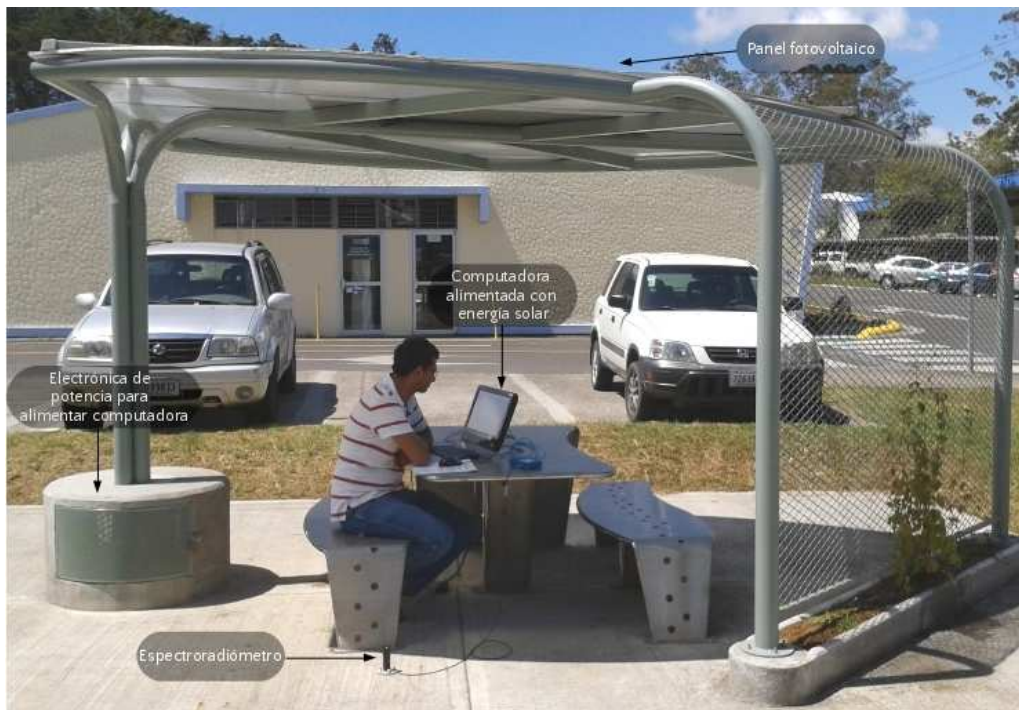


Figura 11: Medición del espectro de la radiación solar. Se aprovechó el *Foliage* desarrollado en el proyecto “Construcción de una Instalación Fotovoltaica Experimental” para alimentar el equipo de medición.

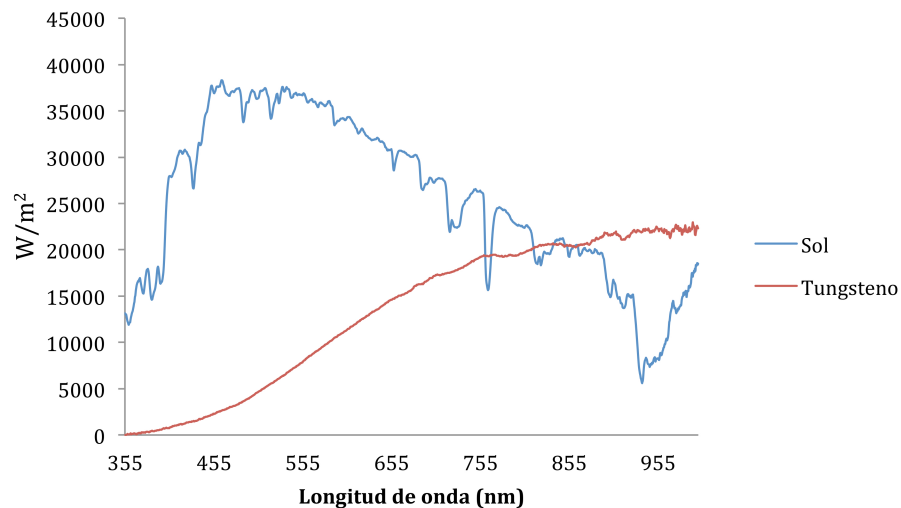


Figura 12: Curvas del espectro electromagnético de la lámpara de Tungsteno utilizada y la radiación solar

4. Conclusiones

El presente trabajo permitió al grupo de investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica conocer los desafíos más importantes a la hora de caracterizar celdas solares de última generación. Tal y como se pudo comprobar en la literatura científica consultada y la interacción con otros grupos de investigación del área, aún no existe un procedimiento consensuado que permita comparar el desempeño de celdas solares de distintas tecnologías.

Específicamente en el proceso de obtención de la curva $i - v$ de celdas solares con tintes sensibilizados se llegó a las siguientes conclusiones

- existe un compromiso entre el tiempo de variación de la temperatura y el tiempo de barrido necesario para obviar los efectos capacitivos. Esto es, un menor tiempo de caracterización permite obtener de forma más sencilla una temperatura constante, pero hará visibles los efectos de las capacitancias parásitas, los cuales son indeseables. Mayor tiempo de barrido puede ocasionar cambios de temperatura en la celda debido a la radiación incidente.
- el hecho que el espectro electromagnético de la lámpara del tungsteno difiera significativamente con el espectro electromagnético de la luz solar para longitudes de onda cercanas al infrarrojo no permite obtener resultados fiables para comparar el desempeño de celdas solares de distintas tecnologías en interiores.

5. Recomendaciones

- evaluar el diseño de una carga electrónica utilizando circuitos electrónicos conmutados,
- evaluar otras fuentes de iluminación con un espectro electromagnético similar al de la luz solar,
- evaluar otras pruebas experimentales que permitan comparar el desempeño energético de celdas solares de distintas tecnologías,
- medir otras características del comportamiento eléctrico de las celdas solares con tintes sensibilizadas que actualmente impiden su uso masivo, tales como estabilidad y vida útil,
- registrar para cada una de las muestras de los valores de corriente y tensión, la temperatura de la celda y la radiación solar que incide sobre ella.

6. Agradecimientos

Además de los investigadores que participaron en este proyecto contribuyeron también las siguientes personas

- Ing. Sebastián Badilla (egresado de la carrera de Ing. Electrónica, ITCR),
- Ing. Dulce Cortés (egresada de la carrera de Ing. Electrónica, ITCR),
- Ing. David J. Rodríguez (egresado de la carrera de Ing. Electrónica, ITCR),
- Ing. Karin Torres (egresada de la carrera de Ing. Química, UCR),
- Javier Carvajal (estudiante de Ing. Electrónica, ITCR),
- Juan Carlos Vargas (estudiante de Ing. Electrónica, ITCR).

7. Referencias

Referencias

- [1] International Energy Agency. 2012 key world energy statistics. Technical report, IEA, Paris, France, 2012.
- [2] D. Anderson, J. Bishop, and E. Dunlop. Energy rating of photovoltaic modules. In *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2000.
- [3] S. Badilla. Sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos. Technical report, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2010.

-
- [4] U. Bøke. A simple model of photovoltaic module electric characteristics. In *European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1–8, Sept. 2007.
- [5] N. Cereghetti, A. Realini, D. Chianese, and S. Rezzonico. Ieee 3rd world conference in photovoltaic energy conversion. In *Power and Energy production of PV modules*, 2003.
- [6] D. Chianese, Gabi Friesen, Paolo Pasinelli, Ivano Pola, Antonella Realini, Nerio Cereghetti, and Angelo Bernasconi. 22th european photovoltaic solar energy conference. In *Direct Performance Comparison of PV Modules*, 2007.
- [7] D. Cortes. Modelado e las características eléctricas y técnicas de obtención de parámetros para diferentes tecnologías de sistemas fotovoltaicos. Technical report, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2011.
- [8] G. Friesen, R. Gottschalg, H.G.Beyer, S. Williams, A. Guerin de Montgareuil, N. van der Borg, W.G.J.H.M. van Sark, T. Huld, B. Müller, A.C. de Keizer, and Y. Niu. 22th european photovoltaic solar energy conference. In *Intercomparison of different energy prediction methods within the European project performance – results of the 2nd Round Robin*, 2007.
- [9] G. Friesen, D. Chianese, S. Dittmann, D. Dominé, E. Burà, D. Strepparava, B. Margna, M. Denicolà, R. Meoli, and I. Pola. 25th european photovoltaic solar energy conference. In *Performance intercomparison of 13 different PV modules based on indoor and outdoor test*, 2010.
- [10] G. Friesen, D. Chianese, I. Pola, A. Realini, and A. Bernasconi. 22th european photovoltaic solar energy conference. In *Energy Rating Measurements and Predictions at ISAAC*, 2007.
- [11] J.A. Gow and C.D. Manning. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, 146(2):193–200, Mar 1999.
- [12] M. Grätzel. Photovoltaic and photoelectrochemical conversion of solar energy. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365:993–1005, 2007.
- [13] F. Lasnier. *Photovoltaic Engineering Handbook*. Taylor & Francis, 1990.
- [14] N.S. Lewis and D.G. Nocera. Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43):15729–15735, 2006.
- [15] S. Liu and R. Dougal. Dynamic multiphysics model for solar array. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17:285–294, 2002.
- [16] C. Meza, D. Biel, D. Jeltsema, and J.M.A. Scherpen. Lyapunov-based control scheme for single-phase grid-connected pv central inverters. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(2):520–529, 2012.
- [17] C. Meza, J.J. Negroni, D. Biel, and F. Guinjoan. Energy-balance modeling and discrete control for single-phase grid-connected pv central inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7):2734–2743, 2008.

- [18] C. Meza, V. Virtuani, and D. Chianese. Evaluation of models for the internal capacitance of a pv module for the design and simulation of power converters. In *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Sept. 2010.
- [19] B. O'Reagan and M. Grätzel. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal tio2 films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 353:737–740, 1991.
- [20] D.J. Rodriguez. Diseño y construcción de un sistema de adquisición de datos con ambiente controlado para la caracterización de celdas fotovoltaicas. Technical report, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2010.
- [21] H. Rogner, R.F. Aguilera, R. Bertani, S.C. Bhattacharya, M.B. Dusseault, L. Gagnon, H. Haberl, M. Hoogwijk, A. Johnson, M.L. Rogner, H. Wagner, and V. Yakushev. *Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*, chapter Energy Resources and Potentials. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2012.
- [22] K. Torres. Caracterización de la eficiencia de tintes de celdas solares sensibilizantes. Technical report, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2012.
- [23] A. Virtuani, D. Chianese, G. Friesen, G. Rigamonti, N. Peguiron, and P.R. Beljean. Results of the mpvt (multi-purpose pv module tester) project – a highly innovative and versatile solar simulator. In *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2011.
- [24] A. Virtuani, H. Müllejans, and E.D. Dunlop. Comparison of indoor and outdoor performance measurements of recent commercially available solar modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19:11–20, 2011.
- [25] B. Zinsser, G. Makrides, W. Schmitt, G.E. Georghiou, and J.H. Werner. Annual energy yield of 13 photovoltaic technologies in germany and in cyprus. In *22th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2007.

8. Apéndice

A continuación se incluye:

- el artículo de “*Evaluation of Models for the Internal Capacitance of a PV Module for the Design and Simulation of Power Converters*” que se presentón en el “*22th European Photovoltaic Solar Energy Conference*” en el 2010 en Valencia, España,
- el artículo en preparación titulado “*Charcterization of Capacitive PV modules*”.

EVALUATION OF MODELS FOR THE INTERNAL CAPACITANCE OF A PV MODULE FOR THE DESIGN AND SIMULATION OF POWER CONVERTERS

C. Meza^{1*}, A. Virtuani², and D. Chianese²

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica

2 Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI) -

Istituto per la Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito (ISAAC), Canobbio CH-6952, Switzerland

* Contact person: Tel: (506) 2550-9280, Fax: (506) 2591-6629, e-mail: emeza@ietec.org

ABSTRACT: In order to properly size and design the power electronics required to test a photovoltaic (PV) module, it is necessary to effectively model the electrical characteristics of the module. This becomes more relevant when an electronic load needs to be designed to obtain current-voltage (IV) characteristics of a PV module using a pulsed solar simulator (flasher). In order to develop efficient and reliable power electronics able to test emerging high-efficient PV technologies - showing a capacitive behavior for short IV acquisition sweep-times - it is necessary to define complete PV module models including their nonlinear static and dynamic behavior. In the present work, two simple dynamic models were obtained from the experimental data of two PV modules, one with a pronounced capacitive behavior, the second with a slightly capacitive behavior. The agreement between the simulations and the experimental data for these devices show that the models developed give a good description of the transient behavior for these PV modules.

Keywords: Capacitance, Electrical Properties, PV Module, Modeling

1 INTRODUCTION

In order to properly size and design the power electronics required to test a photovoltaic (PV) module, it is necessary to effectively model the electrical characteristics of the module. This becomes more relevant when an electronic load needs to be designed to obtain current-voltage (IV) characteristics of a PV module using a pulsed solar simulator (flasher). Flashers generate light pulses with a typical duration of 1 to 20 ms and a spectral distribution close to the sunlight (AM1.5). One of the greatest advantages compared to steady-state solar simulators is that, due to the short duration of the light pulse, it is possible to effectively maintain a controlled temperature of the device under test.

However, during one single flash, the electronic load used to test the PV module is required to scan the entire IV curve of the module. Therefore, the time constraint (~1-10 ms) for the voltage sweep forces to consider the dynamic components of the PV module, i.e. the internal capacitance of the module may induce transient effects which may significantly alter the *high-speed* IV curve, compared to the quasi steady-state (slow-speed) one. When a flasher is used to test these devices, this may lead to modules' power under- or overestimation up to $\pm 20\%$ for the PV technologies showing the more pronounced capacitive effects. Other PV technologies are affected to a lesser extent by these phenomena [1].

In the present work we consider two different PV technologies with a different capacitive behavior: a high-efficient c-Si wafer-based module (highly-capacitive) and a single-junction amorphous-Si thin film module (slowly-capacitive) and propose two different models for the description of the dynamic behavior of the internal capacitances of the PV modules which allow emulating the measured electrical characteristics.

These models will be used in order to identify new control techniques and algorithms to design a novel electronic load which should be able to eliminate the

dynamic components of the PV modules when an IV curve is traced using a flash simulator.

Thus, the main objective of the present paper is to derive a mathematical model for the dynamic electric behavior of two PV capacitive modules tested at standard test conditions (STC: 1000W/m², 25°C, AM1.5)).

EXPERIMENTAL DATA

In the present work two different PV technologies with a different capacitive behavior were considered: 1) a high-efficient c-Si wafer-based PV module, with a strong capacitive behavior (in the following the High-Capacitive Module), and 2) a single-junction amorphous-Si thin film module with a slightly pronounced capacitive behavior – (in the following the Low-Capacitive Module). As discussed in [1], in order to obtain an IV curve without measurement artifacts the former device requires an IV sweep-time duration above 100 ms, whereas for the latter sweep-times above 10 ms are usually enough.

The PV modules were tested at SUPSI-ISAAC with a PASAN IIIB flasher (10 ms pulse-duration), as light source, and the relative electronic load to test the electrical characteristics of the PV modules.

All IV curves were performed by varying the IV sweep-time (1.5, 5, and 10 ms) in forward direction (increasing voltage ramp, from short circuit-current I_{sc} to open-circuit voltage V_{oc}) and in reverse direction (viceversa). The steady-state (or static) IV curve of the modules were reconstructed by using the *multi-flash* approach. With this approach an IV curve is reconstructed by measuring single IV pair measuring points during one single flash. Approximately 20 measuring points are needed to reconstruct a good curve. A polynomial fit to the multi-flash points was then used to reconstruct the full steady-state IV curve. Experimental IV curves are shown in Fig 10 and 11.

As stated above, the main objective of the paper is to obtain a dynamical model for the electrical characteristics of these capacitive modules. The approach followed can be summarized in the following steps:

- a) To obtain the static IV mathematical relationships for the PV modules using a non-linear curve fitting regression algorithm based on the multi-flash (steady-state) IV curve;
- b) To extract the effect of the internal capacitance based on the steady-state (multi-flash) and on the single flash (*high-speed*) IV curves;
- c) To use the measured dynamic effect obtained to model the capacitive behavior.

3 MODELING THE STATIC ELECTRICAL BEHAVIOR

As mentioned above, the quasi-static IV characteristic of the modules was obtained based on a multi-flash measurements using a non-linear regression fitting algorithm. Figures 1 and 2 depict the multi-flash IV curve for the low capacitive (LC) and the high capacitive (HC) PV modules, respectively. In order to obtain a low curve fitting error different mathematical relationships need to be used for the two different modules. For instance, for the low capacitive module the following equation was used:

$$i_{ss} = K_1 - K_2 \exp(K_3 v_{pv}) - K_4 v_{pv} \quad (1)$$

where i_{pv} and v_{pv} are the PV module's current and voltage, respectively, and K_1 , K_2 , K_3 and K_4 parameters used for the curve fitting.

Regarding the high-capacitive module the following relationship was used:

$$i_{pv} = K_1 - K_2 \exp(K_3 v_{pv}) - K_4 \exp(K_5 v_{pv}) \quad (2)$$

with K_1 , K_2 , K_3 , K_4 and K_5 as fitting parameters.

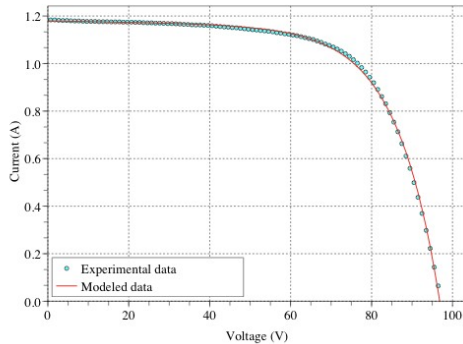


Figure 1: Experimental steady-state IV curve and modeled data curve for the low-capacitive module (LCM).

As Figs. 1 and 2 show, both equations (1) and (2)

allow obtaining a good fit of the measured static IV curves. Tables 1 and 2 show the values for the parameters used in the fitting.

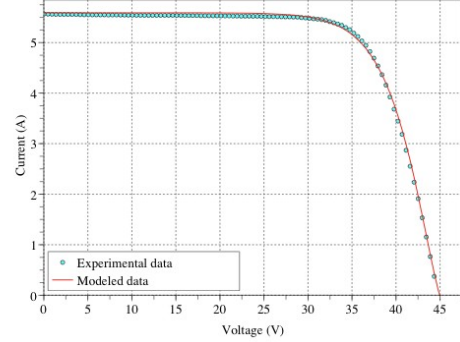


Figure 2: Experimental steady-state IV curve and modeled data curve for the high-capacitive module (HCM).

Table 1: Fitting parameters for the LC PV model of eq. (1).

| Parameter | Value |
|-----------|----------|
| K1 | 1.1796 |
| K2 | 0.000133 |
| K3 | 0.09363 |
| K4 | 0.000283 |

Table 2: Fitting parameters for the HC PV model of eq. (2).

| Parameter | Value |
|-----------|------------|
| K1 | 5.58996 |
| K2 | 3.1891E-6 |
| K3 | 0.3831 |
| K4 | -1.4102E-6 |
| K5 | 0.39992 |

Please note that, though the parameters of Tables 1 and 2 can be associated to a physical model (e.g., $K1$ can be associated to the short-circuit current of the module), their values were selected according to a curve-fitting algorithm.

4 MODELING THE CAPACITIVE EFFECTS OF THE PV MODULES

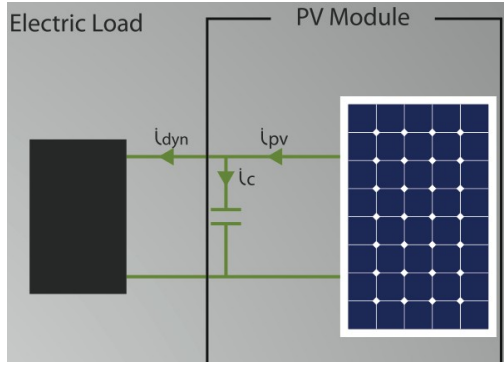


Figure 3: Block diagram of the system studied: a device under test (PV module) and the electronic load used to perform IV scans of the module..

As seen in Figure 3, when the PV module capacitance is not negligible, the electrical characteristics of the PV module can be extended from (1) or (2) in the following way:

$$i_{dyn} = i_{pv} + i_c \quad (3)$$

where i_{pv} is the “static” current of the PV module defined according to (1) or (2) depending on the module and i_c is the current circulating in the PV module’s capacitance during a transient time, i.e.:

$$i_c = C(v_{pv}) \frac{dv_{pv}}{dt} \quad (4)$$

where $C(v_{pv})$ is a capacitance that depends on v_{pv} .

The objective of this paper is to find expressions for $C(v_{pv})$ allowing to emulate the dynamic electrical behavior of capacitive PV modules.

4.1. Measured capacitive effects

The capacitance current was estimated using the experimental IV curves. This is done by subtracting the current obtained by the multi-flash (steady-state) IV curve and the one of the single-flash (short sweep-time: 1.5 ms, from I_{sc} to V_{oc}) IV measurement. The values for the currents obtained are shown in Figures 4 and 5, for the LCM and HCM devices, respectively.

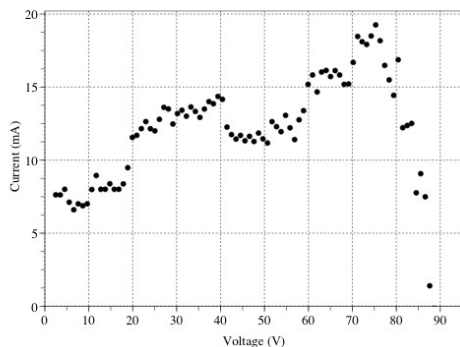


Figure 4: Current i_c circulating in the capacitor of the low capacitive module obtained by the experimental data.

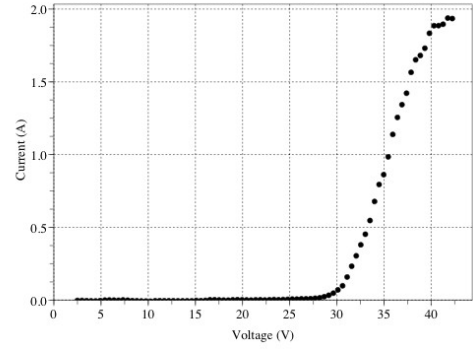


Figure 5: Current i_c circulating in the capacitor of the high capacitive module obtained by the experimental data.

3.2 Dynamic modeling

According to the measured data, for the low capacitive device (LCM), the current flowing through the PV module internal capacitance is modeled using eq. (4) - where $C(v_{pv})$ is a capacitance that depends on v_{pv} - as follows:

$$C(v_{pv}) = av_{pv} + b \quad (5)$$

where a and b are curve fitting parameters. For the case shown in Figure 4 the parameters chosen were $a=2.06e-9$ and $b=1.1848e-7$. In this way, the capacitance current shown in Figure 4 is approximated as a straight line, as can be seen in Figure 6.

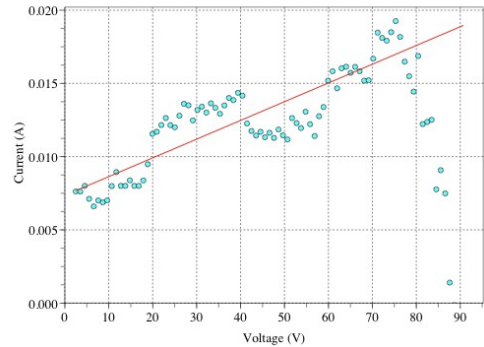


Figure 6: Measured (dots) and fitted (red line) current associated to the capacitive effect for the low capacitive PV module.

In the same way, for the high capacitive (HCM) device, a capacitive model was obtained based on the measured data of Figure 5. In this case, the mathematical expression selected to model the capacitor’s behavior is:

$$C(v_{pv}) = a \exp(bv_{pv}) - c \exp(dv_{pv}) \quad (6)$$

where a , b , c and d are curve fitting parameters. The parameters chosen to fit the data of Figure 4 were $a=3.6327E-9$, $b=0.39$, $c=3.4765E-9$, $d=0.3910136$. Figure 7 depicts the measured and the model current due to the capacitive effect.

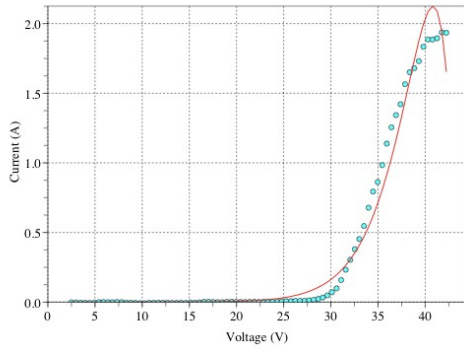


Figure 7: Measured (dots) and fitted (red line) current associated to the capacitive effect for the high capacitive PV module.

4 SIMULATED I-V CURVES

Using equations (1) to (6) a complete dynamic model to describe the behavior of the PV modules was synthesized. These models were used to simulate the behavior of the electronic load in order to obtain similar results as the measured ones (i.e., Fig. 1 and 2). The simulation results are shown in Figure 8 and 9.

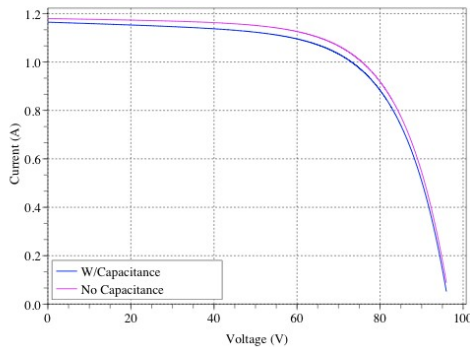


Figure 8: Simulated IV curves with (blue) and without (red) the capacitive effect for the low capacitive PV module.

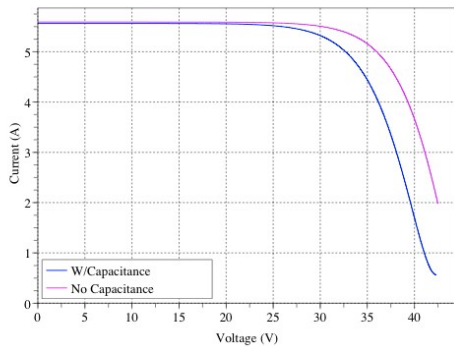


Figure 9: Simulated IV curves with (blue) and without (red) the capacitive effect for the high capacitive PV module.

The simulated IV curves (Fig. 8 and 9) are very similar to the experimentally measured IV curves, which are shown in Figures 10 and 11 for comparison. The agreement between the simulations and the experimental data for these devices show that the models developed give a good description of the transient behavior for these PV modules.

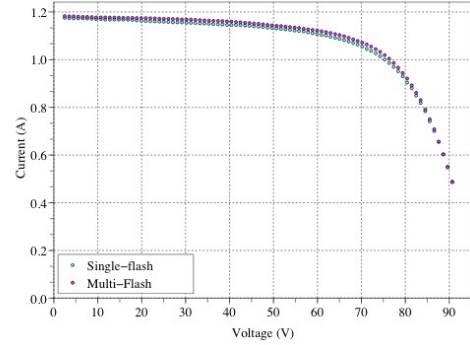


Figure 10: Measured steady-state and single flash (1.5 ms, forward sweep) IV curves for the low capacitive module (LCM). The steady-state curve was obtained by using the multi-flash approach.

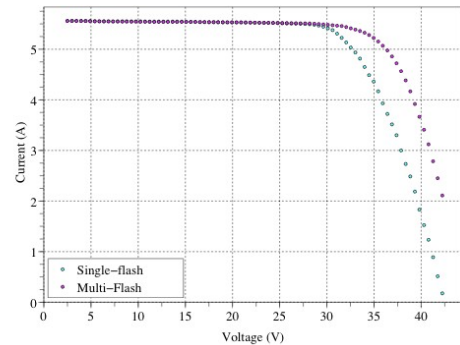


Figure 11: Measured steady-state and single flash (1.5 ms, forward sweep) IV curves for the high capacitive module (HCM). The steady-state curve was obtained by using the multi-flash approach.

5 CONCLUSIONS

In order to properly size and design the power electronics required to test a photovoltaic (PV) module, it is necessary to effectively model the electrical characteristics of the module. This becomes more relevant when an electronic load needs to be designed to obtain current-voltage (IV) characteristics of a PV module using a pulsed solar simulator (flasher). In order to develop efficient and reliable power electronics able to test emerging high-efficient PV technologies it is necessary to define complete PV module models including their nonlinear static and dynamic behavior.

These models should be simple and easy to simulate. In the present work, two simple dynamic models were obtained from the experimental data of two PV modules, one with a pronounced capacitive behavior, the second with a slightly capacitive behavior. The agreement between the simulations and the experimental data for

these devices show that the models developed give a good description of the transient behavior for these PV modules.

6 ACKNOWLEDGMENTS

This work was partly funded by the Innovation Promotion Agency (CTI-KTI) of the Swiss Confederation under grant agreement 9626.1 PFIW-IW.

REFERENCES

- [1] A. Virtuani, H. Mullejans, and E. Dunlop, *Comparison of Indoor and Outdoor Performance Measurement of Recent Commercially Available Solar Modules*, Prog. Photovolt: Res. Appl. (2010), DOI: 10.1002/pip.977;
- [2] A. Virtuani, G. Friesen, D. Chianese, G.C. Dozio, G. Rigamonti, and P.R. Beljean, "The MPVT (Multi-Purpose PV Module Tester) Project – A Highly Innovative and Versatile Solar Simulator", this conference (4AV3.114);
- [3] P. Mauk, H. Tavakolian, J. Site, "Interpretation of Thin-Film Polycrystalline Solar Cell Capacitance," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 37, No. 2, pp. 422-427, 1990.
- [4] G. Friesen, H. A. Ossenbrink, "Capacitance Effects in High-Efficiency Cells," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 48, pp. 77-83, 1997.
- [5] C. Monokroussos, R. Gottschalg, A. N. Tiwari, D. G. Infield, "Measurements Artefacts Due to the Use of Flash Simulators,"
- [6] C. Monokroussos, R. Gottschalg, A. N. Tiwari, G. Friesen, D. Chianese, S. Mau, "The Effects of Solar Cell Capacitance on Calibration Accuracy when Using a Flash Simulator," 4th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, (Hawaii, 2006).
- [7] P. Rueda, E. Fernández Lisbona, M. Diez Herrero, "Capacitance Measurements on Multi-Junction Solar Cells," 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, (Osaka, 2003).
- [8] D. Schwander, "Dynamic Solar Cell Measurement Techniques: New Small Signal Measurement Techniques," 6th European Space Power Conference, (Porto, 2002).

Characterization of Capacitive PV modules

Carlos Meza^a,

^a*Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica*

Abstract

This document analyses the dynamic behavior of capacitive PV modules in order to measure them using an electronic load.

Keywords: Solar Energy, Capacitive PV Module, Electronic Load

1. Nomenclature

| | |
|------------|---|
| i_{pv} | Current generated by the PV module. |
| v_{pv} | Voltage across the PV module terminals. |
| v_g | MOSFET Transistor(s) gate voltage. |
| v_{pv}^* | Reference voltage across the PV module terminals. |
| v_{oc} | PV module open circuit voltage. |
| i_a | Power amplifier current. |
| C_{pv} | PV module internal capacitance. |
| i_s | PV module static current. |
| K_a | Power amplifier gain (transconductance). |
| K_I | Gain of the controller's integral action. |
| K_P | Gain of the controller's proportional action. |
| K_D | Gain of the controller's derivative action. |

2. Introduction

2.1. Capacitive PV Modules

Differently from the still widely used c-Si base PV modules, new PV module technology presents a relatively high internal capacitance. This internal capacitance is most notorious when the PV module is submitted to fast changes of current and voltage, e.g., when the electrical characteristics of the PV module are extracted using a single-flash electronic load.

In this document two different module capacitance, C_{pv} , are distinguished, namely,

- constant capacitance,

Email address: cmeza@itcr.ac.cr (Carlos Meza)

- voltage dependent capacitance, i.e., $C_{pv} = C_0 \exp(bv_{pv})$, where C_0 and b are constant and positive parameters.

2.2. Electronic Load

The so-called "electronic load" allows to obtain the i-v curve of a given electronic device. In this case, the electronic load is used to obtain the electrical characteristics of PV modules. It is assumed that the electronic load is based on a linear MOSFET amplifier and therefore it can be modeled as a voltage controlled current source, as it is depicted in Fig. 1.

2.3. System under study

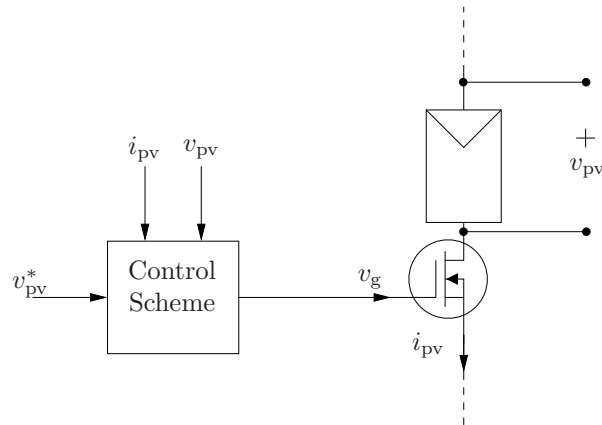


Figure 1: **CONCEPTUAL** block diagram PV Electronic Load Control System

Fig. 1 depicts a **conceptual block diagram** of system under study, i.e., the electronic load and the PV module. Notice that in the considered scheme the whole power amplifier circuitry is modeled as a unique MOSFET that acts as a controlled current sink. This is seen more clearly in Figure 2 where the simplified circuitry of the considered PV Electronic Load model is shown. Thus, it is assumed that the power amplifier operates in the linear region and that the relation between the current through the source-drain terminals (I_d) varies linearly with respect to the gate voltage, i.e.,

$$I_d = K_a v_g. \quad (1)$$

Note that in the configuration of Figure 1 $I_d = i_{pv}$ and that v_g is considered as the control signal u .

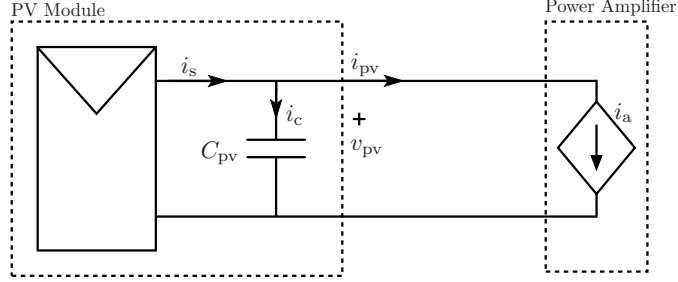


Figure 2: Schematic diagram of the considered model

2.3.1. PV static model

The used PV static model includes the main non-linear static relationship between the PV module's current and voltage. This model is mainly used for mathematical analysis purposes.

$$i_s = I_g - I_s (\exp(\alpha v_{pv}) - 1) \quad (2)$$

2.4. Assumed Control Structure

Recall that it is assumed that the current extracted from the PV module is proportional to the control signal, i.e.,

$$i_{pv} = i_a = K_a u(t) \quad (3)$$

where, for analysis convenience, K_a will be considered equal to one throughout the rest of this document.

A simple PID (**P**roportional + **I**ntegral + **D**erivative) control structure is assumed, i.e., signal $u(t)$ is defined by the following set of equations:

$$u(t) = K_P \tilde{v} + K_D \dot{\tilde{v}} + K_I x \quad (4)$$

$$\dot{x} = K_I \tilde{v} \quad (5)$$

where $\tilde{v}_{pv} = v_{pv} - v_{pv}^*$. Additionally, K_P, K_D and K_I can be time variant.

3. Problem definition

The objective pursued when measuring the electrical characteristics of PV modules is to eliminate any dynamic electrical component that won't occur in its normal outdoor operation. That is, it is necessary to obtain the so-called "static" i-v curve of the module. Referring to the model used, depicted in Fig. 3, one can easily verify that measuring the static i-v curve of a module implies eliminating the internal capacitance current i_c . Thus, the control objective can be defined as follows, To define a signal u (v_g) such that the static electrical characteristics of the PV module are obtained, i.e.,

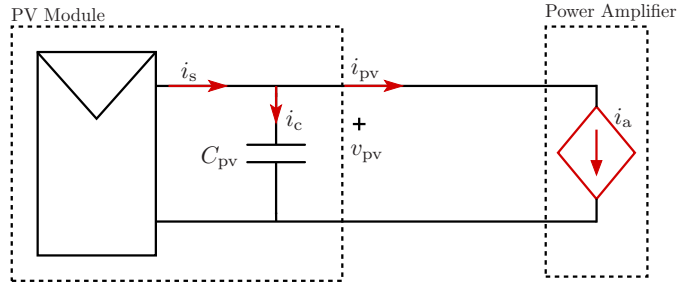


Figure 3: Schematic diagram of the considered model

- $v_{pv} = v_{pv}^*$, and
- $i_{pv} = i_s$,

where v_{pv}^* is the desired v_{pv} .

3.1. Example: a voltage ramp tracking

One of the most widely ways of sweeping a PV module i-v curve is that of forcing the electronic load to track a voltage ramp, such as the one shown in Fig. 4. The ramp parameters $(\Delta t, \Delta v_{pv})$ are defined according to the voltage range of the PV module and the available flash lamp. The controller of the power amplifier is designed in such a way that the PV module voltage tracks with no error the ramp reference signal. Notice, however, that provided a perfect

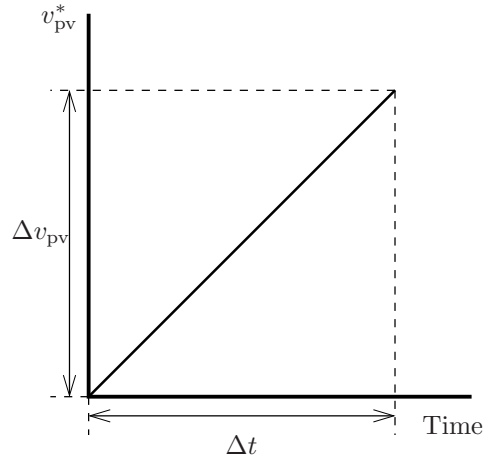


Figure 4: Voltage Ramp Reference Signal

voltage tracking this sweeping technique will always generate a current through

the internal capacitance, i_c . This is due to the fact that the current that flows through the internal capacitance is proportional to the slope of its voltage.

Typical solutions to tackle this problem includes using a larger sweep time, such that the derivative of the PV module voltage becomes neglectible. This solution, however, requires an expensive long flash time lamp. This solution is illustrated in figures 5 and 6 that show the simulation results of the obtained i-v curves and i_c for different sweep times using the system of Fig. 2 using a voltage dependent capacitance with a maximum capacitance value of $100 \mu\text{F}$.

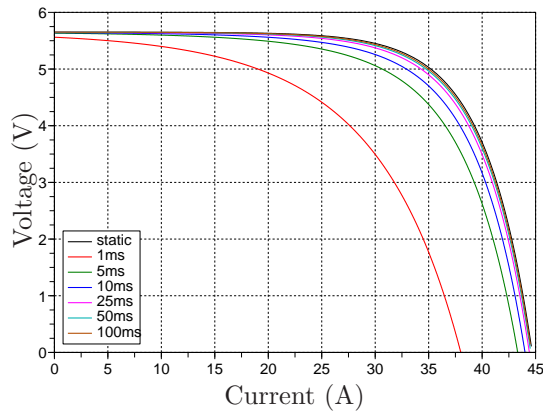


Figure 5: i-v curve obtained simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent capacitance and different sweep times (Forward).

A variation of this reference signal comprises using a reverse voltage sweep, that is starting from the maximum voltage value to zero. Figures 7 and 8 show the simulation results using this voltage reference signal.

Naturally, the capacitance effect is more evident when a fixed capacitance with the same value of the maximum dependent capacitance is used. Figures 9, 10, 11, 12, illustrate the difference between a fix and variable capacitance when the same sweep signal is used in both cases, in this case a sweep of 5 ms was used.

3.2. A general overview of the possible solutions

Fig. 13 illustrates the different approaches that can be used to eliminate the capacitive effect in the i-v measurement. Four actions are highlighted in the aforementioned diagram, namely,

- **Post-measurement correction:** Eliminate the dynamic effects of the i-v measurement after the measurement is performed.
- **During measurement correction:** Eliminate the dynamic during the actual measurement of the i-v curve.

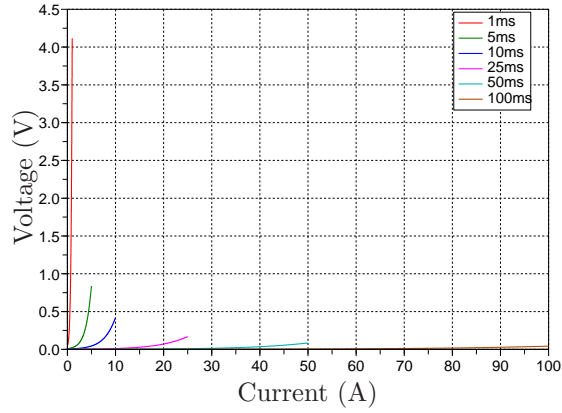


Figure 6: capacitance current obtained from simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent capacitance and different sweep times (Forward).

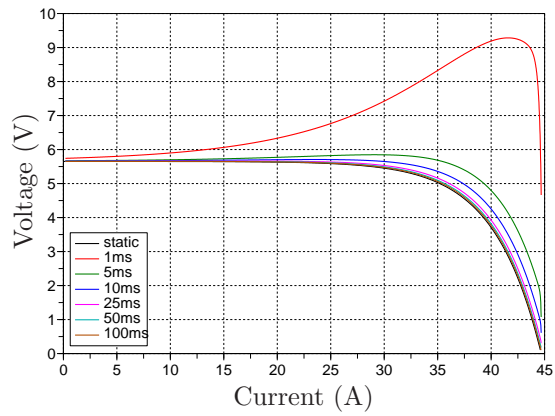


Figure 7: i-v curve obtained simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent capacitance and different sweep times (Backward).

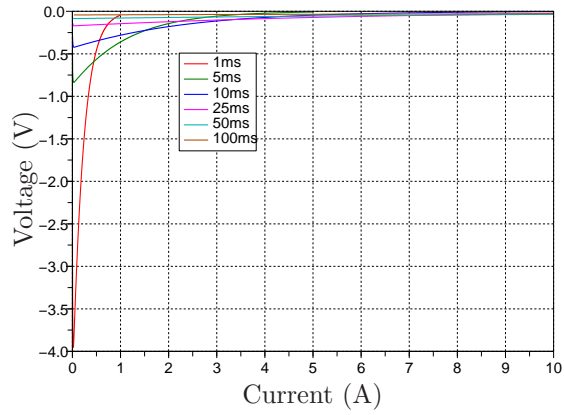


Figure 8: capacitance current obtained from simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent capacitance and different sweep times (Backward).

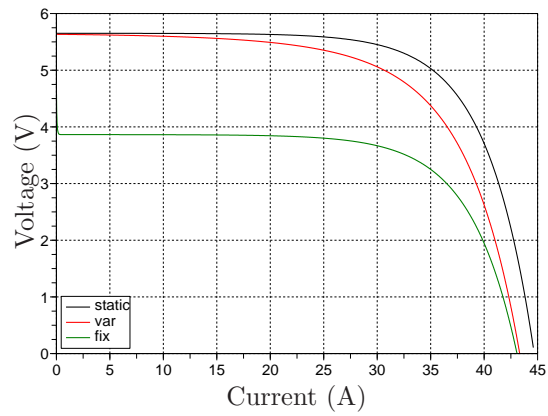


Figure 9: i-v curve obtained simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent and fix capacitance using a forward ramp signal

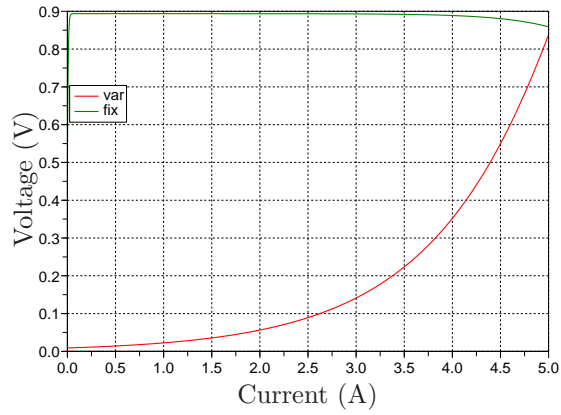


Figure 10: capacitance current obtained from simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent and fix capacitance using a forward ramp signal

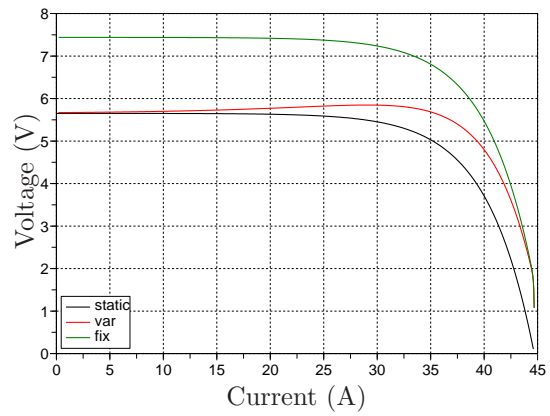


Figure 11: i-v curve obtained simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent and fix capacitance using a backward ramp signal

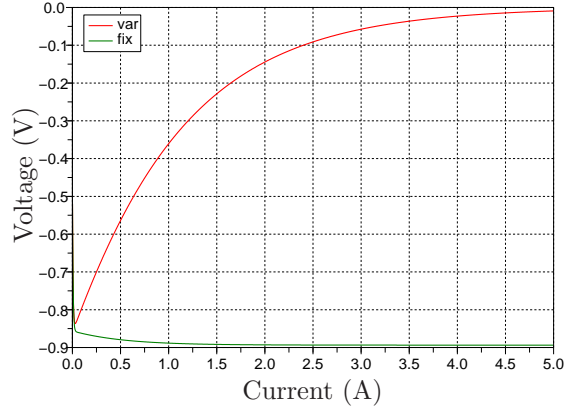


Figure 12: capacitance current obtained from simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent and fix capacitance using a backward ramp signal

- **Identification:** Identification of the PV module parameters, including its capacitance, in order to define the parameters used in one of the previous correction schemes.
- **Conservative parameters definition:** Define parameters for the correction that consider the worst-case scenario and are valid for a wide range of PV modules.

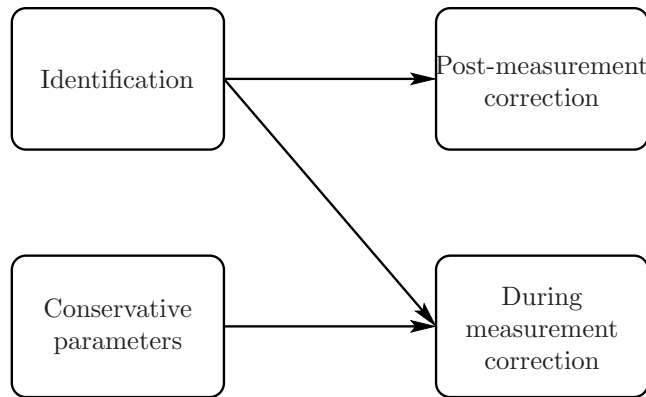


Figure 13: capacitance current obtained from simulating the system of Fig. 2 with a voltage dependent and fix capacitance using a backward ramp signal

The identification process requires some more attention. For instance, it might be interesting to obtain an identification and correction scheme that executes together during only one sweep and one flash. Nevertheless, this seems quite difficult to obtain this giving that,

- the capacitance current cannot be measured,
- it might be very difficult to determine if a module is capacitive or not using only one sweep,
- given the non-linear nature of the PV electrical characteristics identification may be a high computational demanding process.

Nevertheless, the identification scheme should not be entirely rejected given that a typical electronic load usually makes use of a desktop PC, and therefore it might be possible to use this "high-computational" power to perform an identification and/or post-measurement correction.

In the rest of this document, a possible solution to perform on-line correction is presented. Even though, some insights about how to make an identification of the PV module are given, this is not treated in detail.

4. Proposed Solution

This chapter describes a proposed solution that enables the measurement of capacitive modules using only one flash and one sweep. The idea behind the proposed solution derives from the fact that the internal capacitance current depends on the derivative of the electronic load's voltage, such as it was addressed in the previous chapter. Thus, a novel reference signal is proposed such that during some time intervals i_c becomes zero, i.e., that during some intervals the derivative of the reference signal becomes zero.

4.1. Staircase reference signal

The most straightforward way of obtaining a reference signal with zero-slope sections is using a staircase signal such as the one depicted in Fig. 14.

The zero-slope sections enable the capacitance current to become zero. Indeed, provided a perfect voltage tracking, the current in the capacitance should become zero immediately after the zero-slope section is reached. If the electrical characteristics (i.e., current and voltage) of the PV module are measured during this zero-slope section it is possible to obtain the static i-v curve of the module (see Fig. 15).

The major inconvenience of this solution is that there are time instants in which the derivative of the reference signal becomes infinite. This occurs in the edges of the staircase signal. This effect will produce undesired peaks of current (in theory infinite, see Fig. 16) which in practical terms makes it an un-implementable solution.

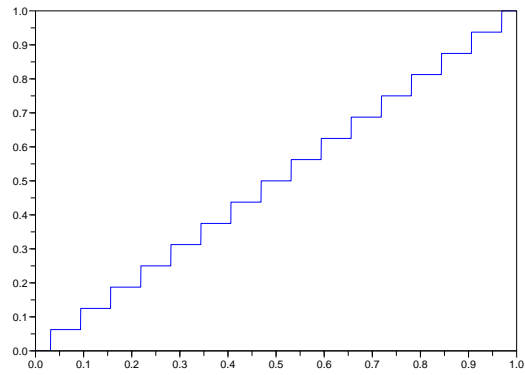


Figure 14: Staircase Voltage Reference Signal

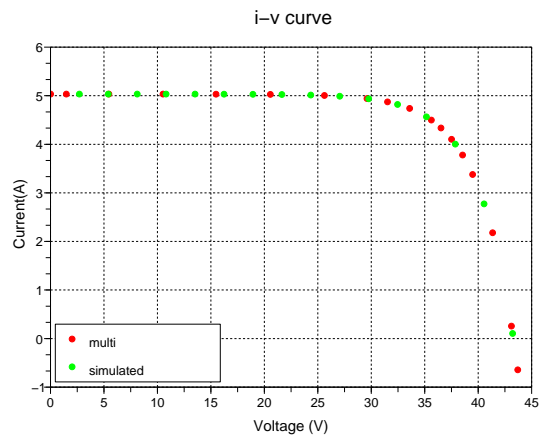


Figure 15: i-v curve obtained using the staircase voltage reference signal using only the points measured in the zero-slope sections.

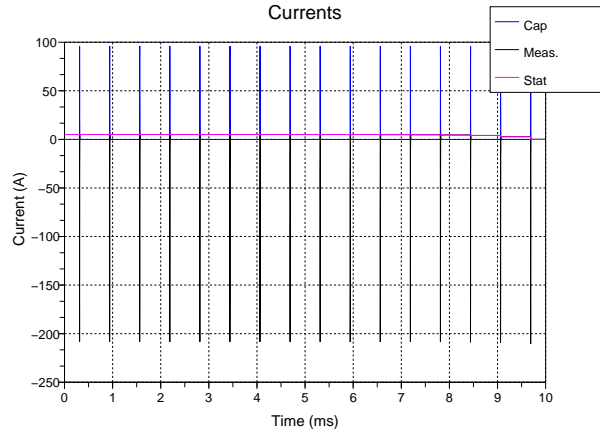


Figure 16: Internal capacitance current obtained using the staircase voltage reference signal

4.2. Proposed solution: the staircase-like reference signal

In order to limit the internal capacitance current, i_c , a variation of the staircase reference signal is proposed. This reference signal is shown in Fig. 17, where it can be seen that the slope of this signal is always bounded. The correspondent slope of this signal is shown in Fig. 18.

In the same way as done for the staircase reference signal, the i-v curve points should be taken in the zero-slope sections. Fig. 19 and Fig. 20 show the i-v curve and the internal capacitance current simulated using the reference signal of Fig. 17, notice how in this case the capacitance current is always bounded.

The proposed reference signal can also be transformed into a "backward" or "reversed" (from v_{oc} to zero) form. Fig. 21 and Fig. 22 show the i-v curve and the internal capacitance current simulated using this case.

The reference signal of Fig. 17 it is quite simple to implement as it is shown in Fig. 23. In its basic form, the generation of the signal of Fig. 17 requires a pulse generator and an integrator. Moreover, the pulses generated might also be used as synchronization signal to take the steady-state i-v measurements.

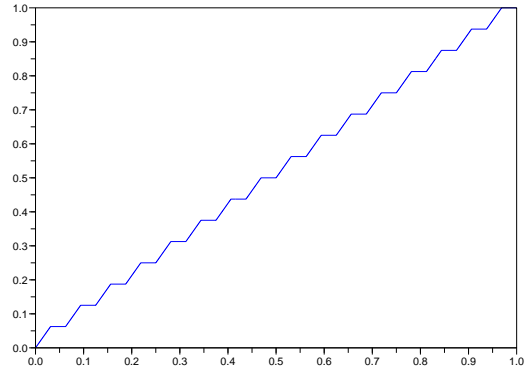


Figure 17: Staircase-like Voltage Reference Signal.

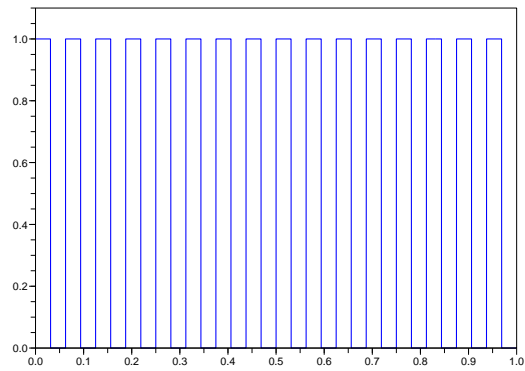


Figure 18: Derivative of the signal of Fig. 17.

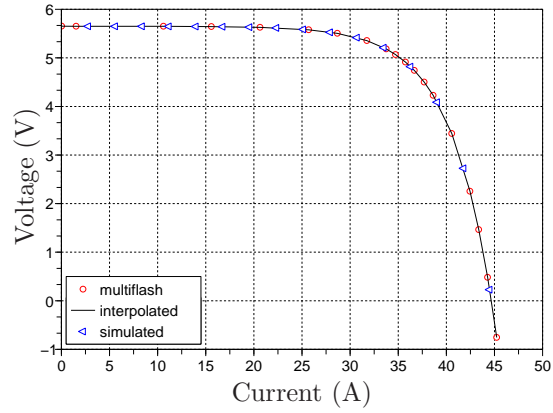


Figure 19: i-v curve obtained simulating the system of Fig. 2 with a reference signal similar to the one shown in Fig. 17.

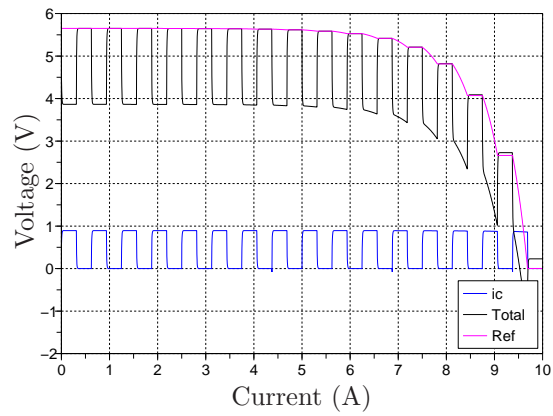


Figure 20: i_c obtained simulating the system of Fig. 2 with a reference signal similar to the one shown in Fig. 17.

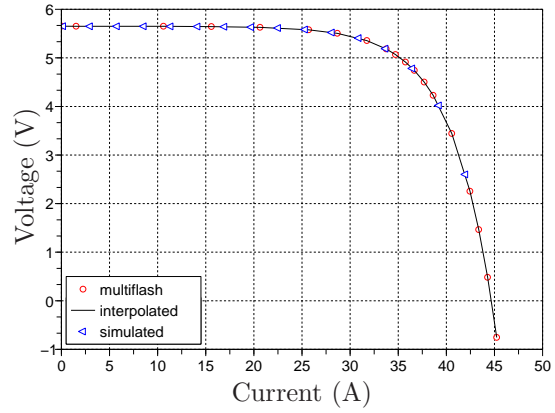


Figure 21: i-v curve obtained simulating the system of Fig. 2 with a reference signal similar to the one shown in Fig. 17.

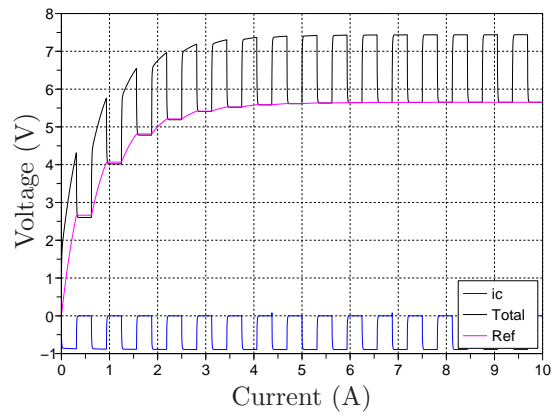


Figure 22: i_c obtained simulating the system of Fig. 2 with a reference signal similar to the one shown in Fig. 17.

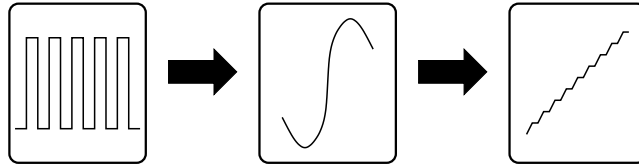


Figure 23: Block diagram that illustrates how to implement the signal of Fig. 17.

5. Recommendations for future work

5.1. Regarding the measurement of capacitive modules

It is recommended to test other solutions different from the one proposed here. According to Fig. 13 the solutions not explored in this document mainly comprise the identification + post-measurement correction. Some strategies that fit within this category are

- Dark i-v measurement + flash measurement + post-measurement correction.
- Identification using dark i-v measurement(s) + flash measurement + post-measurement correction.

The author believe that it makes more sense to implement the aforementioned strategies mainly in the available desktop PC, which in any is currently not fully exploited.

5.2. Regarding the proposed solution

Two main parameters can be identified in the proposed solution, namely,

- the amplitude of the reference signal's derivative,
- the frequency and number of pulses.

The latter changes the number of measurement taken, and the first one allows to sweep the curve faster or slower in different regions.

Notice, however, that changing the parameters of the reference signal during measurement complicates the implementation of the signal. An efficient way of changing the aforementioned reference signals parameters should be explored.

Previously no insight have been giving regarding how to define the parameters of the reference signals, e.g., no information has been giving regarding how many pulses should be used. This information depends on the PV modules electrical parameters and the size of its capacitance. In this regard there are two options to set these parameters,

- identify the parameters of the PV module,

- define a set of conservative parameters that can be used for a wide range of modules.

Via linearization of the typical electrical behavior of a PV module one can get useful relationships that will help defining the aforementioned parameters. The reader is refer to the appendix of this document where a brief discussion about the model of the system is given.

Until now, a perfect tracking has been assumed. Having a perfect voltage tracking depends on how the gains of the power amplifier controller (K_P, K_I, K_D) are defined. Fortunately, as it is briefly discussed in the appendix of this document, a wide range of values of K_P, K_I, K_D allows to obtain an adequate voltage tracking. Nevertheless, the design of these gains has to be revisited and re-analyzed for an specific implementation platform, e.g., the limits of the control signal (both in amplitude and frequency) should be taken into account. A gain scheduling strategy should be also evaluated. As stated in the appendix of this document, this gain scheduling strategy may be based on different linear models of the i-v curve.

Appendix A. Analysis and Control of the Power Amplifier

For convenience the diagram of the system under study and all the equations are re-written in this section.

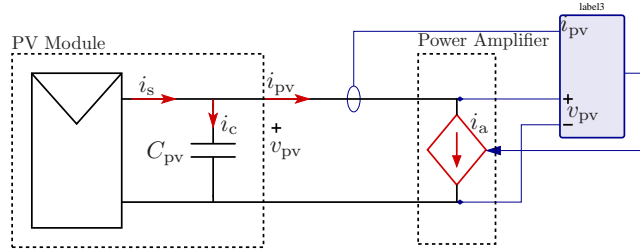


Figure A.24: Schematic diagram of the considered model

Figure 2 depicts a simplified circuit that illustrates the interaction between the controller, the electronic load and the PV module.

Notice that in the considered scheme the whole power amplifier circuitry is modeled as a unique MOSFET that acts as a controlled current sink. Thus, it is assume that the power amplifier operates in the linear region and that the relation between the current through the source-drain terminals (I_d) varies linearly with respect to the gate voltage, i.e.,

$$I_d = K_a v_g. \quad (\text{A.1})$$

Note that in the configuration of Figure A.24 $I_d = i_{pv}$ and that v_g is considered as the control signal u .

Appendix A.1. Assumed Control Structure

Recall that it is assumed that the current extracted from the PV module is proportional to the control signal, i.e.,

$$i_{\text{pv}} = K_a u(t) \quad (\text{A.2})$$

where, for analysis convenience, K_a will be considered equal to one throughout the rest of this document.

A simple PID (**P**roportional + **I**ntegral + **D**erivative) control structure is assumed, i.e., signal $u(t)$ is defined by the following set of equations:

$$u(t) = K_P \tilde{v} + K_D \dot{\tilde{v}} + K_I x \quad (\text{A.3})$$

$$\dot{x} = K_I \tilde{v} \quad (\text{A.4})$$

where $\tilde{v}_{\text{pv}} = v_{\text{pv}} - v_{\text{pv}}^*$. Additionally, K_P, K_D and K_I can be time variant.

Appendix A.2. Models and Analysis considered

Two cases are considered: the static case in which the capacitance is not considered, and the dynamic case in which the capacitance is taken into account.

Appendix A.3. Static Case

For reasons that will be clarified later we will consider two different control structures, namely, one with a P, I and D element and one without the D element.

Appendix A.3.1. P+I+D - Dynamic equations

$$I_g - I_s (\exp(\alpha v_{\text{pv}}) - 1) = K_P \tilde{v}_{\text{pv}} + K_D \dot{\tilde{v}}_{\text{pv}} + K_I x \quad (\text{A.5})$$

$$\dot{x} = K_I \tilde{v}_{\text{pv}} \quad (\text{A.6})$$

which can be also rewritten in the following way

$$\ddot{v}_{\text{pv}} = \frac{-(K_P + I_s \alpha \exp(\alpha v_{\text{pv}})) \dot{v}_{\text{pv}} - K_I \tilde{v}_{\text{pv}} + K_P \dot{v}_{\text{pv}}^* + K_D \ddot{v}_{\text{pv}}^*}{K_D} \quad (\text{A.7})$$

Appendix A.3.2. P+I - Dynamic equations

$$I_g - I_s (\exp(\alpha v_{\text{pv}}) - 1) = K_P \tilde{v}_{\text{pv}} + K_I x \quad (\text{A.8})$$

$$\dot{x} = K_I \tilde{v}_{\text{pv}} \quad (\text{A.9})$$

which can be rewritten as

$$\dot{v}_{\text{pv}} = \frac{-K_I \tilde{v}_{\text{pv}}}{K_P + I_s \alpha \exp(\alpha v_{\text{pv}})} \quad (\text{A.10})$$

Appendix A.3.3. Linearization

In order to gain some insights about the dynamic behavior of the system and the effect of the gains K_P , K_I and K_D the system is linearized around a desired point v_{pv}^* . This linearization has been done assuming regulation, i.e., with v_{pv}^* constant.

Notice that in this case, the linearization implies that

$$i_{pv}(v_{pv}) = I_g - I_s (\exp(\alpha v_{pv}) - 1) \approx i_{pv}(v_{pv}^*) + m\tilde{v} \quad (\text{A.11})$$

where

$$m = \left. \frac{d}{dv_{pv}} i_{pv} \right|_{v_{pv}=v_{pv}^*}. \quad (\text{A.12})$$

Taking into account the aforementioned remarks it can be verified that

$$\ddot{\tilde{v}}_{pv} + \left(\frac{K_P + m}{K_D} \right) \dot{\tilde{v}}_{pv} + \frac{K_I}{K_D} \tilde{v}_{pv} = 0 \quad (\text{A.13})$$

represents the error dynamics of the linearized system with a PID controller, whereas

$$\dot{\tilde{v}}_{pv} + \frac{K_I}{K_P + m} \tilde{v}_{pv} = 0 \quad (\text{A.14})$$

is the error dynamics that corresponds to a PI controller.

Both cases are locally stable for positive values of K_P , K_I and K_D and predicts sufficiently well the nonlinear behavior around a local region.

Notice that the solution of (A.14) is

$$v_{pv} = v_{pv}^* + K_1 \exp\left(\frac{-K_I}{K_P + m} t\right) \quad (\text{A.15})$$

where K_1 is a constant that depends on the initial condition.

Appendix A.4. Discussion

From the previous analysis several conclusions can be drawn, namely,

- the dynamics of the system are faster closer to $v_{pv} = 0$, i.e., when m is smaller,
- for a **regulation** scheme:
 - a derivative gain enlarges the settling time,
 - it might not be useful to have a derivative action,
 - the integral gain reduces the steady-state error and reduces the transient time,
 - for the time constraints considered it will be necessary an extremely large integral gain to have a null steady-state error,
 - it might be necessary to allow a minor steady state error and rely on a large K_P ,
 - it can be verified that K_P can be "reasonably" large in order to obtain an "acceptable" steady-state error.

Appendix A.5. Dynamic Case

The dynamic case considers the internal capacitance of the PV module, denoted in this document as C . Recall that two different capacitances are considered,

1. Constant capacitance, i.e.,

$$C = C_{\text{st}} \quad \forall t, v_{\text{pv}}. \quad (\text{A.16})$$

2. Voltage dependent capacitance, i.e.,

$$C = C_0 \exp(bv_{\text{pv}}). \quad (\text{A.17})$$

Considering either one of the previous capacitances the dynamic equations of the system yields,

$$I_g - I_s (\exp(\alpha v_{\text{pv}}) - 1) = K_P \tilde{v}_{\text{pv}} + C \dot{v}_{\text{pv}} + K_D \dot{\tilde{v}}_{\text{pv}} + K_I x \quad (\text{A.18})$$

$$\dot{x} = K_I \tilde{v}_{\text{pv}} \quad (\text{A.19})$$

which can be rewritten as

$$\ddot{v}_{\text{pv}} = \frac{-(K_P + I_s \alpha \exp(\alpha v_{\text{pv}})) \dot{v}_{\text{pv}} - K_I \tilde{v}_{\text{pv}} + K_P \dot{v}_{\text{pv}}^* + K_D \ddot{v}_{\text{pv}}^*}{C + K_D} \quad (\text{A.20})$$

Assuming a constant v_{pv}^* and C , i.e., $C = C_{\text{st}}$, (A.20) can be linearized around v_{pv}^* yielding,

$$\ddot{\tilde{v}}_{\text{pv}} + \frac{(K_P + m) \dot{\tilde{v}}_{\text{pv}}}{C_{\text{st}} + K_D} - \frac{K_I \tilde{v}_{\text{pv}}}{C_{\text{st}} + K_D} = 0 \quad (\text{A.21})$$

which is similar to (A.13).

Appendix A.6. Gain Scheduling

Notice that according to the previous analysis the linearized dynamics of the system mainly depends on m which is the slope of the i-v curve. When m is larger the transient time of the step response of the system increases. Thus, the dynamics of the system are slower when m increases and therefore "more control action" should be necessary. A variable gain scheduling depending on m might be interesting to implement, where m can be calculated only with the measurement of i_{pv} and v_{pv} .