

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

FAMILIA DE CURVAS CARACTERISTICAS PARA PANEL FOTOVOLTAICO BP-585.

Juan David Ramírez Giraldo

Ingeniería Electrónica

Asesores:

Bonie Johana Restrepo Cuestas

Luz Adriana Trejos Grisales

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2017

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

En estos momentos las fuentes de energía limpia son una alternativa creciente en el mundo, debido al impacto negativo en el ambiente de las energías derivadas de fuentes fósiles y a la creciente demanda mundial de esta. Como gran alternativa se presenta la energía solar, ampliamente desarrollada pero aun muy costosa para competir con la energía generada actualmente. Un panel solar o sistema fotovoltaico puede convertir la energía solar en electricidad directamente y ser conectada a pequeñas cargas; para aplicaciones mayores se necesitan conversores y baterías, siendo estos factores que hacen más costosa la generación de esta energía limpia.

El enfoque de la presente investigación es el análisis y la compilación de una base de datos, obtenida del panel fotovoltaico conectado a una carga programable en condiciones reales de operación. La investigación cobra sentido cuando se requieren conocer datos obtenidos del panel solar en condiciones atmosféricas reales de una determinada zona, para diseñar un sistema fotovoltaico.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

A mi amada Universidad ITM le agradezco mi formación como candidato a la ingeniería electrónica, donde pase muchos años de arduo trabajo y sacrificio personal para cumplir mis metas trazadas. Desde el primer día de clases he disfrutando de todo lo que me ha ofrecido la academia, su infraestructura y en especial mis profesores que me soportaron durante todo este tiempo.

A las profesoras Bonie y Adriana les agradezco enormemente su paciencia y dedicación en el trabajo de investigación que llevamos a cabo. A las personas que nos aportaron con sugerencias y sus equipos de laboratorio que fueron de mucha ayuda.

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

PV	Fotovoltaico.
MPP	Máximo punto de potencia
V_{cell}	Voltaje de celda PV.
I_{cell}	Corriente de celda PV.
I_{pv}	Corriente de Panel Solar Fotovoltaico
$I_{ph_{cell}}$	Corriente fotovoltaica en celda.
I_{ph}	Corriente fotovoltaica.
A_{cell}	Corriente de saturación inversa del diodo en circuito equivalente
$R_{S_{cell}}$	Resistencia Serie en la celda PV.
$R_{h_{cel}}$	Resistencia Paralelo en la celda PV.
η_{cell}	Factor de idealidad del diodo o juntura p-n ($1 < \eta < 2$ para una celda solar)
q	Carga del electrón (1.602×10^{-19} C)
k	Constante Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)
T	Temperatura de la celda PV (en grados Kelvin)
T_{amb}	Temperatura ambiente.
T_{STC}	Temperatura en condiciones estándar de prueba.
$NOCT$	Temperatura nominal de operación de la celda PV.
STC	Standard Test Conditions (condiciones estándar de prueba)
$I_{SC_{STC}}$	Corriente de cortocircuito en STC.
I_{sc}	Corriente de cortocircuito.
$I_{ph_{STC}}$	Corriente de celda PV en STC.
$V_{OC_{STC}}$	Voltaje en circuito abierto en STC.
V_{OC}	Voltaje en circuito abierto.
S	Irradiancia Solar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

S_{STC} Irradiancia Solar en STC.

N_p Numero de paneles PV conectados en paralelo

N_s Número de celdas PV conectadas en serie.

$k_{I_{SC}}$ Coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito.

$k_{V_{OC}}$ Coeficiente de temperatura del voltaje en circuito abierto.

α Fracción absorbida de la radiación incidente en la superficie de la celda PV.

τ Transmitancia del material cubriente de la celda PV.

η_C Eficiencia del panel PV.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	MARCO TEÓRICO	9
3.	METODOLOGÍA	20
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	47
	REFERENCIAS	49

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

La posibilidad de utilizar la energía solar en forma controlada y para nuestros propios fines, tanto ecológicos y económicos justifica la aparición de tantas investigaciones y desarrollo de tecnologías en la búsqueda de producción energética que pueda competir con las tecnologías existentes donde los procesos son complejos y altamente contaminantes. La ventaja de la energía solar es la transformación directa de esta en electricidad, en cambio las formas tradicionales en su mayoría pasan por un proceso de transformar un combustible (madera, carbón, petróleo, nuclear, etc.) en energía mecánica y luego por alternadores o turbinas se convierte en energía eléctrica. Si bien es cierto la eficiencia de los paneles PV están cercanos al 20% y su fabricación es costosa, a nivel mundial se está progresando enormemente en el diseño de materiales y/o procesos de producción a más bajo costo, acercándonos a el punto donde la relación costo beneficio será atractivo para los gobiernos, como en este momento sucede con Alemania a la vanguardia de la investigación e implementación de campos solares, lo sigue España y el Reino Unido.

Objetivo General:

Generar una base de datos y curvas características del comportamiento del panel BP-585 en condiciones atmosféricas reales en la ciudad de Medellín.

Objetivos Específicos:

- Analizar el comportamiento de la curva característica en sus puntos importantes.
- Plantear un esquema de pruebas, para adquirir las curvas I-V.
- Realizar la clasificación de las señales obtenidas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Analizar el conjunto de datos obtenido.

La investigación se desarrolla comenzando con el análisis de la teoría acerca de los paneles PV, el efecto fotovoltaico, la fabricación y tipos de celdas solares. Luego se diseñó el esquema de pruebas para el panel fotovoltaico BP-585, conectando una carga programable y un osciloscopio. La carga fue programada remotamente desde la computadora usando el software Matlab y el osciloscopio se conectó a la carga directamente para recopilar los datos de voltaje y corriente de cada prueba. La prueba consistía en sombrear el panel en partes específicas simulando las condiciones inherentes de sombras en un campo real.

2. MARCO TEÓRICO

En nuestro sistema solar desde el punto de vista astronómico, el sol pertenece al tipo de estrellas llamadas *enanas amarillas*, tiene una edad de aproximadamente 4.500 millones de años y una existencia calculada de unos 5.000 millones de años antes de convertirse en una estrella *Gigante Roja*, fase en la que la vida en la tierra desaparecerá. (S.A, 1986) El sol está compuesto por diferentes capas concéntricas con temperaturas decrecientes hacia el exterior, la capa más externa es la denominada fotosfera y está compuesta por gases altamente ionizados y se encuentran a una temperatura de 6.000 °K. La energía que irradia continuamente el sol está compuesta por ondas electromagnéticas con longitudes de onda en las zonas ultravioleta, visible e infrarroja del espectro, el conocimiento del espectro de emisión electromagnética del sol es de suma importancia para un desarrollo óptimo de las aplicaciones solares, especialmente en las fotovoltaicas donde se aprovecha el espectro solar de la luz visible entre (400 nm y 700 nm) y la infrarroja entre (700 nm y 1400 nm). Ver figura 1a y figura 1b.

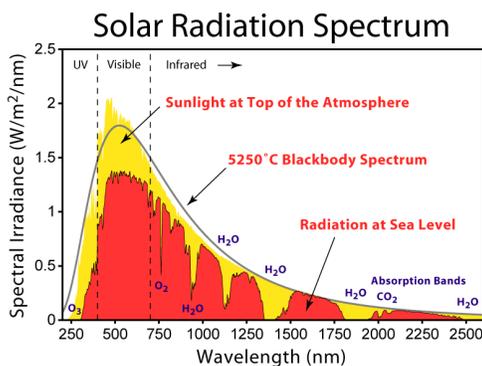


Figura 1a. Espectro de radiación solar. (Rohde, 2007)

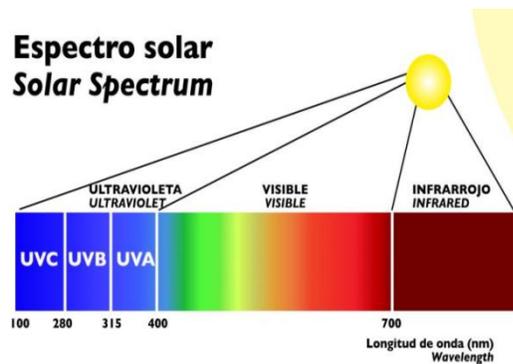


Figura 1b. Espectro solar. (Restrepo, 2016)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La energía de los fotones se mide convencionalmente en eV (electrón-voltio) y entre la longitud de onda, λ , y la energía de los fotones existe la relación: (S.A, 1986)

$$E(eV) = \frac{1.2406}{\lambda(\mu m)}$$

2.1 Efecto Fotovoltaico.

Este importante descubrimiento fue observado por primera vez en 1839 por el físico Alexandre Edmond Becquerel de origen Francés, estudió sobre el espectro solar, magnetismo, electricidad y óptica. Posteriormente en 1883 el inventor norteamericano Charles Edgar Fritts diseñó y construyó la primera celda solar con una eficiencia del 1% construida utilizando como semiconductor el selenio y con una delgada capa de oro. Por el alto costo de esta celda solar solo se utilizó para fines diferentes a la generación de energía, por ejemplo, como sensores de luz en la exposición de cámaras fotográficas.

La celda solar de silicio hoy utilizada, proviene de la patente del inventor norteamericano Russell Ohl, diseñada y fabricada en 1940 y su patente expedida en 1946. Pero para los años 1954 en los laboratorios Bell accidentalmente experimentando con semiconductores se halló que el Silicio con algunas impurezas era muy sensible a la luz.

Los dos primeros satélites artificiales geoestacionarios de URSS y USA fueron la primera aplicación práctica de los avances conseguidos en 1954 con las celdas fotovoltaicas que en ese entonces alcanzaron una eficiencia del 6 %. El satélite de la Unión Soviética fue lanzado en 1957 y los Estados Unidos hicieron lo propio un año después el 1 de febrero de 1958 con el satélite llamado Explorer 1. El diseño americano fue creado por Peter Lles en un esfuerzo con la compañía Hoffman Electronics.

A partir de allí se generó un gran interés en la producción y posterior lanzamiento de satélites geoestacionarios para el desarrollo de la creciente demanda en las comunicaciones solucionando el problema de cómo se podría alimentar de energía un satélite si no existiera las celdas solares. El estímulo logrado impulso la investigación del

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

efecto fotovoltaico en diferentes materiales buscando la manera de aumentar el nivel de eficiencia del panel solar, en 1970 se logra construir la primera celda solar con heteroestructura de Arseniuro de Galio (GaAs) aún más eficiente desarrollada en la URSS por el científico Zhore Alferov y su equipo de investigación.

Los paneles solares de alta eficiencia que son de uso aeroespacial están en el orden del 20% de eficiencia con referencia a la radiación solar en la superficie de la tierra donde por factores atmosféricos es atenuada. En el vacío del espacio la eficiencia aumenta considerablemente.

Bajo ciertas condiciones, cuando una radiación electromagnética de energía suficiente incide sobre determinados materiales, parte de la energía es absorbida generándose en el interior del material, pares de cargas positivas y negativas. Si la radiación electromagnética es la solar y el material considerado un semiconductor tal como el Silicio (Si), los pares de carga son los electrones (e^-) y huecos (h^+) que una vez producidos se mueven aleatoriamente en el volumen del material semiconductor. Si no hay ningún condicionante externo ni interno (material sin dopaje) dicho movimiento aleatorio conduce a que, finalmente, las cargas de signos opuestos se recombinen produciéndose su mutua neutralización. Por el contrario, si mediante algún procedimiento (dopaje de material) se ha creado en el interior del material un campo eléctrico local permanente, las cargas positivas y negativas serán separadas por él. Esta separación conduce al establecimiento de una diferencia de potencial entre dos zonas del material que si son conectadas entre sí mediante un circuito externo al tiempo que la radiación electromagnética (radiación solar) incide sobre el material, darán origen a una corriente eléctrica que recorrerá el circuito externo. El fenómeno descrito es llamado efecto fotovoltaico. (Boylestad, Robert. Nashelsky, 2008)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el esquema básico de una celda solar de Silicio con unión de material semiconductor p-n y asegurando que en la medida de lo posible que el área de la superficie perpendicular al sol sea máxima.

En la figura 2. Se puede observar el conductor de metal unido con el material de tipo n y el mayor espesor del material tipo p son los que aseguran que un máximo número en la de fotones lleguen a la unión. Un fotón de energía lumínica puede chocar con un electrón de la banda de valencia y transferirle la energía suficiente para que abandonen el átomo del cual pertenece. El resultado de esta interacción es la generación de electrones y de huecos libres. Este fenómeno ocurre a lado y lado de la unión. En el material de tipo p, los electrones liberados serán portadores minoritarios y se moverán relativamente libres a través de la unión, lo mismo ocurre para los huecos generados en el material de tipo n. El resultado es el incremento del flujo de los portadores minoritarios.

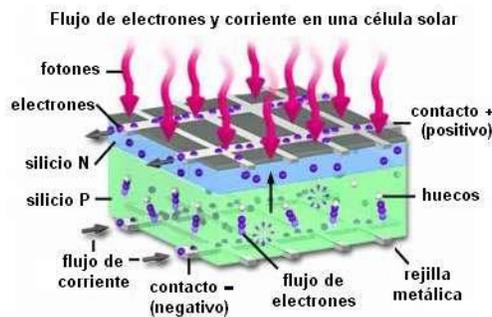


Figura 2. Efecto fotovoltaico.
(Rodríguez, 2004b)

2.2 Fabricación de una Celda Solar.

La celda solar o también llamada celda fotovoltaica es fabricada comúnmente a partir del silicio. Este es el segundo material más abundante después del oxígeno sobre la corteza terrestre, se puede extraer a partir de la arena o el cuarzo.

Para fabricar una celda solar se comienza con la producción de silicio metalúrgico que tiene una pureza de al menos un 98% obtenido de pedazos de piedra de cuarzo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

provenientes de un filón de mineral. A nivel industrial no se utilizan la arena como fuente de sílice. Ver fig3.



Figura 3. Mineral de Silicio puro.
(Rodriguez, 2004d)

El Silicio es purificado al pasar por un proceso químico de lavado y decapado utilizando la destilación de compuestos clorados de silicio hasta que la concentración de impurezas sea inferior al 0.2 partes por millón, obteniendo Silicio grado semiconductor con un grado de pureza superior al necesitado para aplicaciones fotovoltaicas.

El siguiente paso es el proceso de crecimiento cristalino que consiste en generar capas monomoleculares a partir de un germen de cristalización. Las moléculas creadas se adhieren a la cara donde su adhesión libera más energía. La semilla que provoca este fenómeno es extraída del silicio fundido, que va solidificando en un cristal inmenso o monocristal y si el tiempo no es suficiente se convierte en un material policristalino, este proceso se hace a más de 1500°C.

El proceso más usado en el momento es el diseñado por Czochralski. El silicio cristalino obtenido tiene la forma de lingotes (ver figura 4.), luego estos son cortados con un espesor de 200 micrómetros, también llamadas “obleas”, luego el material obtenido es enriquecido con un dopante (P, As, Sb, o B) según sea el caso para obtener un material tipo p o n.



Figura 4. Lingotes y obleas de Silicio
(Rodríguez, 2004c)

Al cortar los lingotes en obleas se presentan irregularidades e imperfecciones de corte ó suciedades por polvo o virutas inherentes al proceso de fabricación. Si se dejase así se puede disminuir considerablemente el rendimiento de la celda solar, luego las obleas pasan a un proceso de limpieza que puede ser por pulido, lavado con productos químicos, ultrasonido o decapado (Ver figura 5).

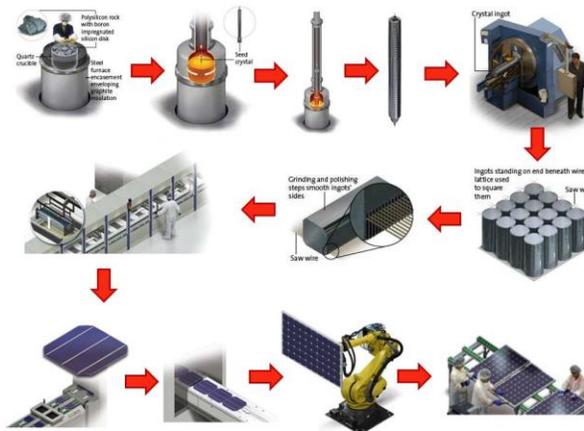


Figura 5. Proceso de fabricación de celda solar
(Cemaer's, 2015)

Finalmente, las obleas son “metalizadas” en un proceso de incrustación de cintas de metal en la superficie de esta y a su vez conectada a contactos eléctricos. (Ver figura 6)

CÉLULAS		RENDIMIENTO LABORATORIO	RENDIMIENTO DIRECTO	CARACTERÍSTICAS	FABRICACIÓN
	MONOCRISTALINO	24 %	15 - 18 %	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralsky).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	POLICRISTALINO	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocrystalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	AMORFO	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Figura 6. Tipos de celdas o células solares.

(Rodríguez, 2004a)

2.3 Modelado de un panel fotovoltaico usando la función Lambert-W

Un amplio número de modelos para la simulación de sistemas PV han sido presentados en la literatura, algunos de ellos no consideran las condiciones reales atmosféricas, algunos son muy complejos o usan un proceso de linealización que tienen un costo computacional muy elevado. El primer modelo en consideración es el modelo clásico de diodo simple para cada panel PV y aproximar al diodo bypass a un suiche ideal. Este modelo escogido sirve para cualquier campo de paneles solares con solo multiplicar $n \times m$, donde n es el número de paneles PV en una serie y m es el número de series en paralelo. La solución requiere un pequeño costo computacional y de tiempo de simulación, porque este usa ecuaciones exactas no-lineales como máximo por cada serie. Por el contrario, en el modelo complejo las resistencias en paralelo y serie no son tenidas en cuenta, de modo que la exactitud del modelo en presencia de un complejo patrón de sombreado no está garantizado (Ver figura 7)(Bastidas, Franco, Petrone, Ramos-Paja, & Spagnuolo, 2013).

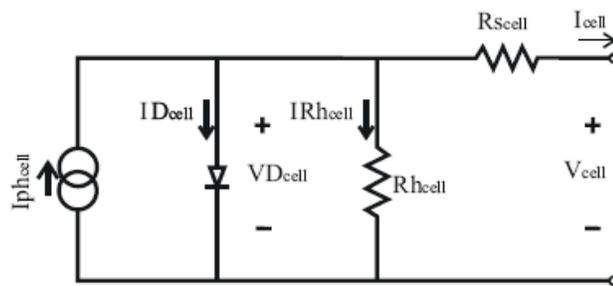


Fig. 1. Single-diode model of a PV cell.

Figura 7. Modelo de simple diodo. (Bastidas et al., 2013)

El modelo de diodo simple, mostrado en la figura 7, es ampliamente adoptado en la literatura para el modelado de las celdas PV. La fuente de corriente es el flujo de electrones producido por la colisión de los fotones en el material semiconductor y el comportamiento no lineal de la juntura p-n es modelado a través de un diodo en paralelo. La pérdida causada por la corriente de escape es representada por la resistencia en

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

paralelo y la resistencia asociada a la junta es modelada con la resistencia en serie. Usando las leyes de Kirchhoff es obtenido: Donde I_{cell} y V_{cell} son la corriente y el voltaje de la celda, respectivamente. $I_{ph_{cell}}$ Es la corriente producida por el efecto fotovoltaico (corriente PV), A_{cell} es la corriente de saturación inversa del diodo, n_{cell} es el factor idealizado de la junta p-n, $R_{S_{cell}}$ y $R_{h_{cell}}$ son la resistencia serie y paralelo respectivamente. κ Es la constante de Boltzmann, q es la carga del electrón y T es la temperatura de la celda en grados Kelvin.

Las siguientes ecuaciones:

$$B_{cell} = n_{cell} \cdot \kappa \cdot T / q \quad \text{Y} \quad V_{D_{cell}} = V_{cell} + I_{cell} \cdot R_{S_{cell}}$$

$$I_{cell} = I_{ph_{cell}} - A_{cell} \left(\exp\left(\frac{V_{D_{cell}}}{B_{cell}}\right) - 1 \right) - \frac{V_{D_{cell}}}{R_{h_{cell}}} \quad (1)$$

Un panel PV podría ser hecho de N_p arreglos de celdas conectadas en paralelo, cada una de ellas con N_s celdas conectadas en serie, entonces los parámetros del modelo (A, B, R_s y R_h) y las variables (I_{pv}, V_{pv} y I_{ph}) de un panel fotovoltaico son:

$$V_{pv} = N_s \cdot V_{cell} \quad I_{pv} = N_p \cdot I_{cell} \quad I_{ph} = N_p \cdot I_{ph_{cell}}$$

$$A = N_p \cdot A_{cell} \quad B = N_s \cdot B_{cell}$$

$$R_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{S_{cell}} \quad R_h = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{h_{cell}} \quad (2)$$

Los valores de (A, B, R_s y R_h) pueden ser calculados desde la información aportada por la hoja de datos del respectivo panel. Mientras I_{ph} es calculada desde la medición de la irradiación y la temperatura. El típico panel fotovoltaico esta hecho de un arreglo de N_s

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

celdas conectadas en serie. Sustituyendo ecuación (2) en (1) con $N_p = 1$ la corriente PV es expresada como resultado la ecuación (3).

$$I_{pv} = I_{ph} - A \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{B}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_h} \quad (3)$$

Tres parámetros dependen de las condiciones atmosféricas: $B = N_s \cdot n_{cell} \cdot k \cdot T / q$ la corriente de saturación inversa (A) con fuertes cambios en la temperatura se convierte en la ecuación (4).

$$A = \frac{I_{SC_{STC}} + k_{I_{SC}} \cdot (T - T_{STC})}{\exp\left(\left(V_{OC_{STC}} + k_{V_{OC}} \cdot (T - T_{STC})\right) / B\right) - 1} \quad (4)$$

Y la corriente PV (I_{ph}) como es proporcional al nivel de irradiancia y este además levemente se incrementa con la temperatura de la celda PV. Tenemos:

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{STC}} \left(I_{ph_{STC}} + k_{I_{SC}} \cdot (T - T_{STC}) \right) \quad (5)$$

En las ecuaciones (5) y (4) $I_{SC_{STC}}$ y $I_{ph_{STC}}$ son la corriente de cortocircuito y corriente PV en condiciones de prueba estándar (STC), respectivamente. $V_{OC_{STC}}$ Es el voltaje en circuito abierto en STC, $k_{I_{SC}}$ y $k_{V_{OC}}$ son el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito y voltaje en circuito abierto, respectivamente. T Es la temperatura de la celda PV, T_{STC} es la temperatura bajo STC (ambas en grados Kelvin). S Es la irradiancia y S_{STC} es la irradiancia en STC. Par aplicaciones prácticas, T puede ser estimada usando la temperatura ambiente T_{amb} en grados Kelvin, la temperatura nominal de operación de la celda PV ($NOCT$) en grados Kelvin, la transmitancia del material cubriente de la celda PV es τ , la fracción de la radiación incidente en la superficie de la celda PV que es absorbida α , la eficiencia del panel η_c y $S_{NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$. $NOCT$ y η_c pueden ser extraídos de la hoja de datos, aunque $\tau \cdot \alpha \approx 0.9$ como es descrito en:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$T = \frac{S}{S_{NOCT}}(NOCT - 293.15) \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau \cdot \alpha}\right) + T_{amb} \quad (6)$$

Al multiplicar ambos lados de la ecuación (3) por $\frac{R_h}{B}$ entonces β es definido como:

$$\beta = -I_{PV} \cdot \frac{R_h}{B} \left(1 + \frac{R_s}{R_h}\right) + I_{ph} \cdot \frac{R_h}{B} + A \frac{R_h}{B} - \frac{V_{PV}}{B} \quad (7)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Se comenzó recopilando información sobre el fenómeno fotovoltaico en una celda solar y como los fotones excitan la juntura P-N del silicio. Se indagó sobre las curvas características entregadas por los fabricantes de paneles solares y cuáles son las maneras de caracterizarlo. La búsqueda se realizó en bases de datos, libros y consultas en la red. Los manuales de los instrumentos de medición como el manual de la carga electrónica programable BK precision 8502 (BK PRECISION, n.d.), fue la fuente principal de información para la comprensión de cómo se programa la carga en forma manual y en forma remota, el manual del osciloscopio TEKTRONIX MSO4034B indicó como sacarle el mayor provecho a esta potente herramienta, del cual se extrajo la base de datos de cada prueba de medición. A continuación, el esquema del montaje de prueba. Ver figura 8.



Figura 8. Montaje de prueba.

3.1 Programación de la carga

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para programar la carga electrónica BK precision 8502 se conecta con la interfaz IT-E132B al computador y este debe tener instalado un software de alto nivel como en este caso el Matlab. Ver figura 9.

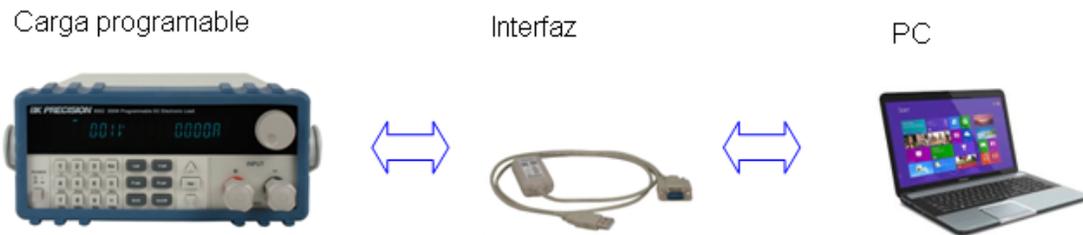


Figura 9. Esquema del montaje para la programación remota de la carga.

Para crear el algoritmo necesario se debió leer el manual de usuario de la carga programable 8502, donde se encontró que las instrucciones o comandos se escribían en código hexadecimal y se transmitía a una velocidad específica de tasa de transferencia de 38400 bps. En el algoritmo se utilizaron comandos muy útiles que sirvieron para pasar del sistema decimal al hexadecimal porque la programación es en lenguaje de alto nivel y la carga necesitaba un lenguaje de bajo nivel. El software utilizado ha sido el Matlab.

El siguiente diagrama muestra los pasos necesarios para programar la carga de forma remota.

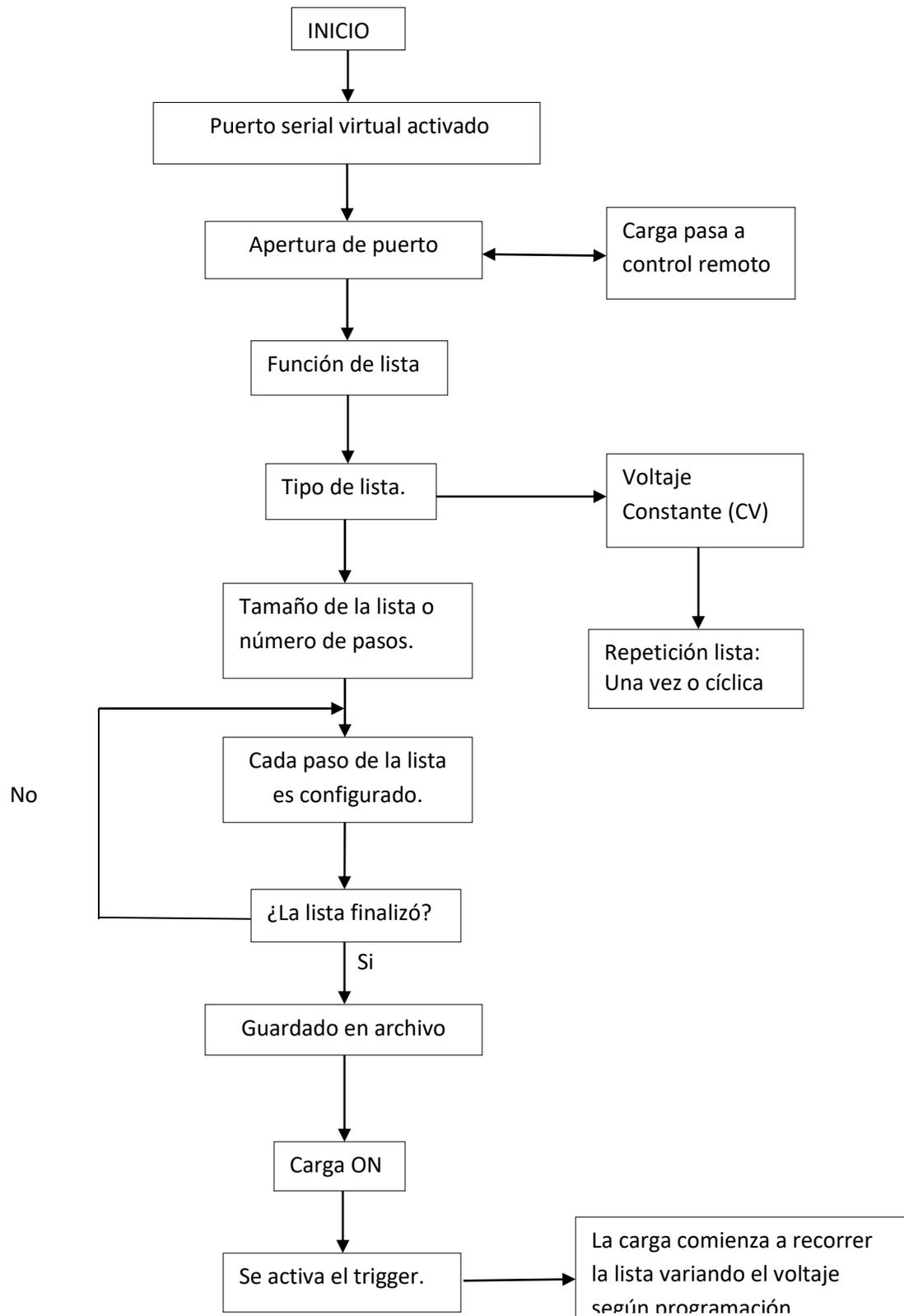


Figura 10. Diagrama de flujo programación de la carga.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2 Acondicionamiento del osciloscopio y otros equipos utilizados en las pruebas.

3.2.1 Osciloscopio utilizado: Tektronix modelo MSO4034B



Figura 11. Osciloscopio MOS4034B. (Tektronix, 2017)

Sus características principales son:

- 350 MHz de banda ancha.
- 4 canales y 16 digitales
- 2.5 Gs/s rango de muestreo.

Para las pruebas se utilizaron: el canal #1 para la punta de voltaje y esta se ajustó a 10V/div, para el canal #2 la sonda de corriente y esta se ajustó a 2A/div. Ambas con tiempo de 4s/div, se activaron las funciones de: Numero de tomas de muestras a 1000 muestras, resolución de la pantalla a Alta resolución, tipo de imagen por puntos y no se seleccionó retardo.

3.2.2 Carga programable utilizada BK precision 8502.



Figura 12. Carga programable 8502. ("bk-precision-8502," n.d.)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Sus características principales son:

- Opera entre 0V a 500V
- Opera entre 0.1mA a 15A
- Máximo poder 300W

La carga se programó de forma remota desde el PC utilizando el algoritmo antes descrito construido en el ambiente del software Matlab y estableciendo la comunicación por medio de la interfaz IT-E132B (TTL-USB).

Valores programados de la carga:

- Voltaje Máximo Permitido: 22V
- Corriente Máxima Permitida: 6.5A
- Potencia Máxima Permitida: 200W
- Modo lista activado
- Modo de Variable Constante: (CV) Voltaje Constante
- Número de pasos: 100 pasos entre 0.2V a 20V
- Tiempo entre pasos: 5 ms

3.2.3 Interfaz IT-E132B (TTL-USB)



Figura 13. Interfaz IT-E132B. (BK PRECISION, 2017)

Sus principales características:

- Un extremo es RS-232 y el otro extremo USB.
- Interfaz TTL

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Opera en el rango de 1mA a 30A

Su utilización es sencilla se conecta a la carga por la parte posterior en el puerto RS232 y el otro extremo se conecta al PC en su puerto USB. Cuando hay interacción de datos enviados o recibidos iluminan los leds indicadores Tx y Rx respectivamente.

3.2.4 Panel Solar BP585



Figura 14. Panel PV. BP-585. (Marketing, 2003)

Sus principales características son:

- Modulo Fotovoltaico Monocristalino.
- Máxima Potencia (PMax): 85W
- Máximo Voltaje (Vmp): 18V
- Máxima Corriente (Imp): 5A
- Cables para conexión AWG#10

El panel solar se encuentra integrado a un armazón de acero con forma de carruaje para facilitar el transporte por el laboratorio e instalaciones de la Universidad. Fue trasladado a la zona de parqueaderos, fue asegurado y ubicado en forma vertical con ángulo de inclinación 0° y conectado a la carga programable por medio de sus cables.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2.5 Radiómetro: MACSolar (SLM018c-2)



Figura 15. Radiómetro. MacSolar. (SOLARC, n.d.)

Sus principales características son:

- Medición de radiación solar W/m^2 .
- Medición de temperatura desde $-40^{\circ}C$ a $85^{\circ}C$

El MacSolar fue utilizado para medir la radiación en cada prueba en sus unidades de potencia y área W/m^2

3.2.6 Termómetro Laser



Figura 16. Termómetro. (Raytec, n.d.)

El termómetro se utilizó para medir la temperatura en el panel solar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Descripción de las pruebas realizadas.

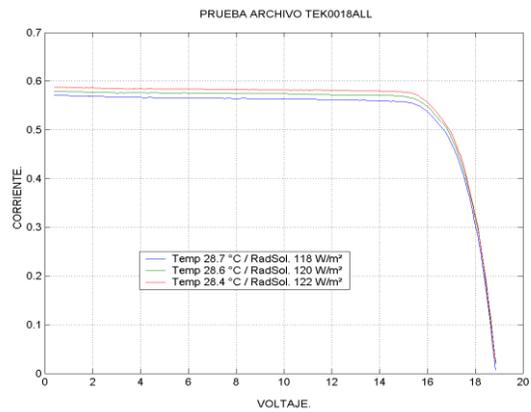
Las pruebas consisten en la exposición del panel solar BP585 a la intemperie (condiciones reales de operación). Para tomar los datos de la curva característica, se conectó el panel a la carga programable BK precision 8502: Las mediciones de irradiación fueron tomadas con el MacSolar lo más cerca posible al panel solar, con especial cuidado de no generarle algún tipo de sombra a este. También se conectan las puntas de prueba del osciloscopio tanto de corriente como la de voltaje en los bornes de la carga.

Luego de haber programado la carga de forma remota conectada al PC por la interfaz IT-E132B se procede a desconectar el PC, luego se ajusta y se calibra el osciloscopio y se comienza a tomar la primera prueba sin sombra y se espera que se estabilice la señal en el osciloscopio. Esta prueba inicial nos sirve de base para comparar las siguientes, las cuales serán con sombras progresivas totales en cada celda solar y por último será sombreada algunas celdas con sombras parciales.

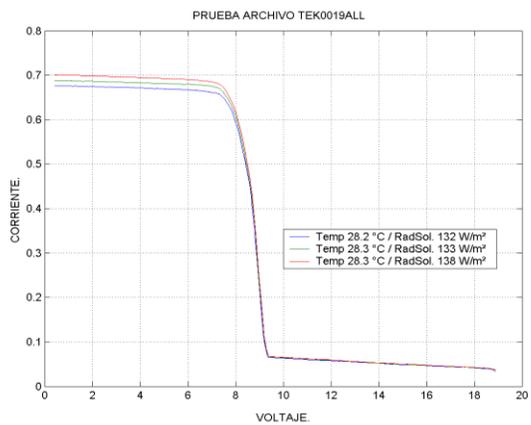
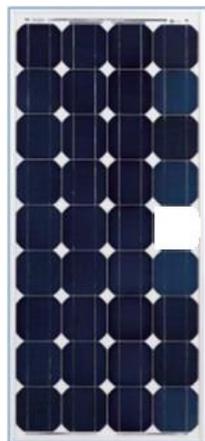
A continuación se muestran los resultados de curva característica para cada prueba, y se indican las condiciones de temperatura e irradiación a las que fueron tomadas.

4.1.1 Pruebas realizadas el 26 de octubre de 2016.

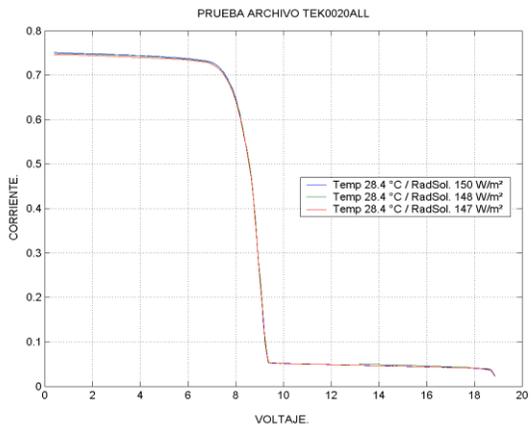
- Prueba 1.



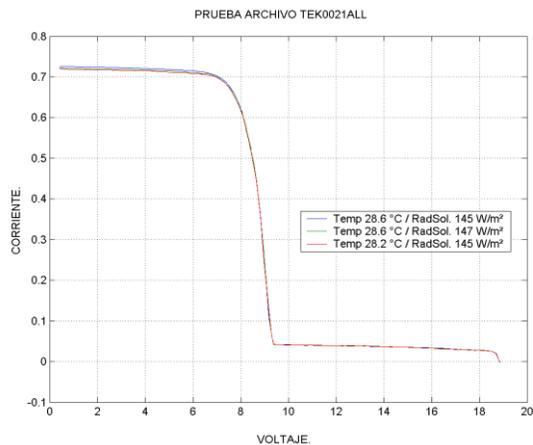
- Prueba 2.



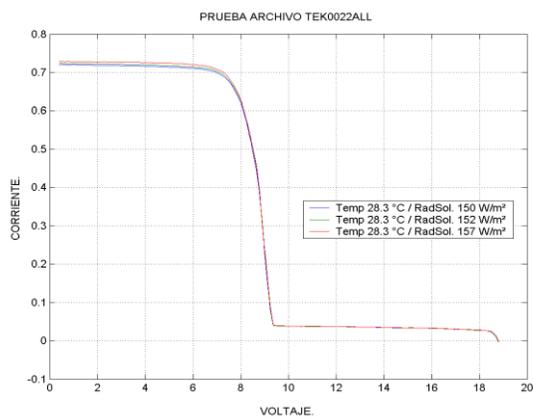
- Prueba 3.



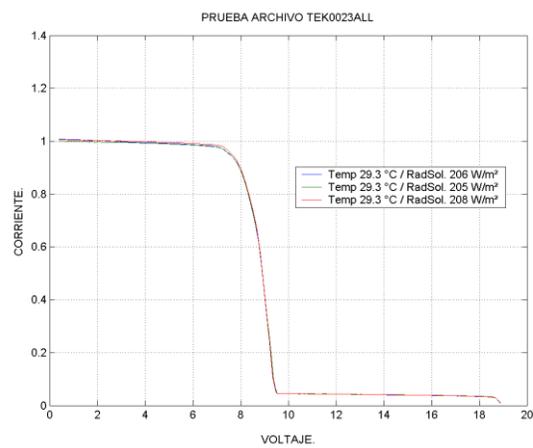
- Prueba 4.



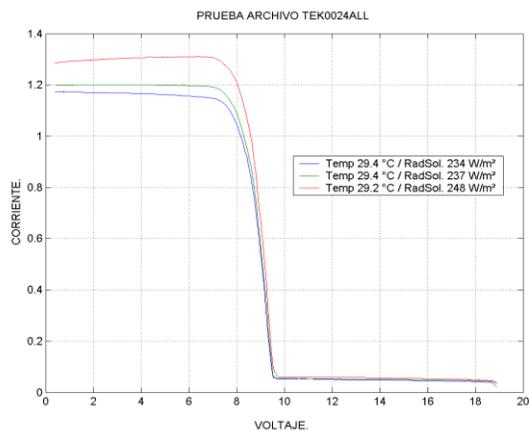
- Prueba 5.



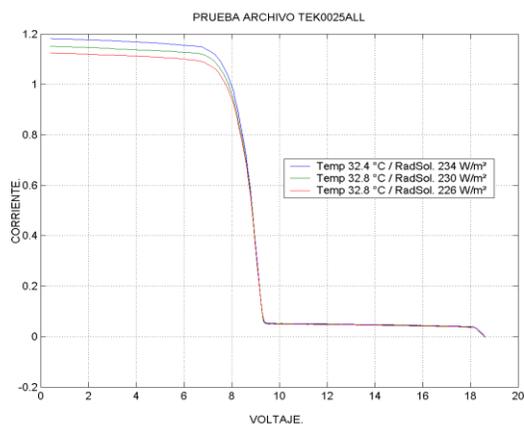
- Prueba 6.



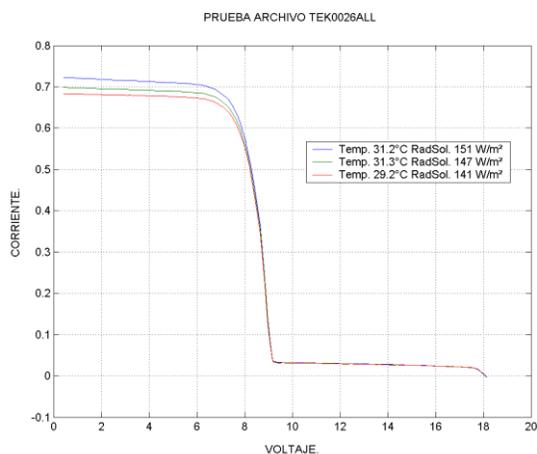
- Prueba 7.



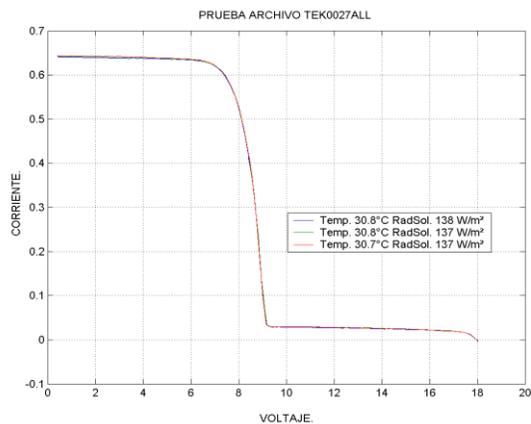
- Prueba 8.



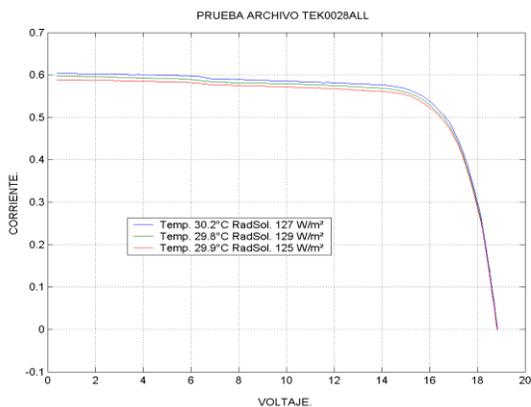
- Prueba 9.



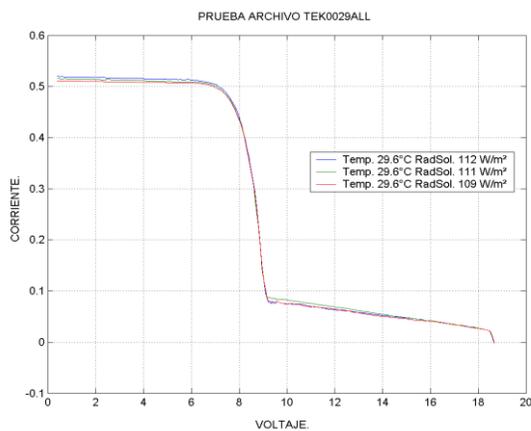
- Prueba 10.



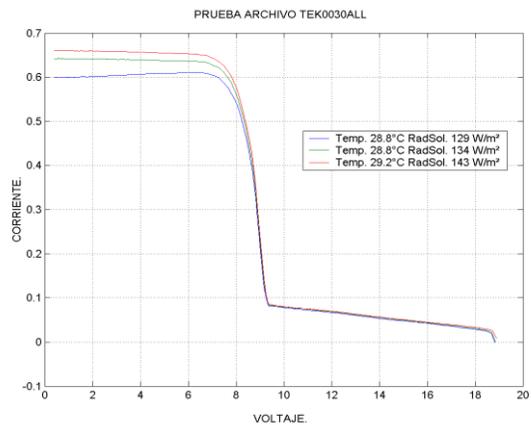
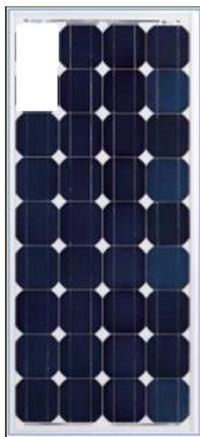
- Prueba 11.



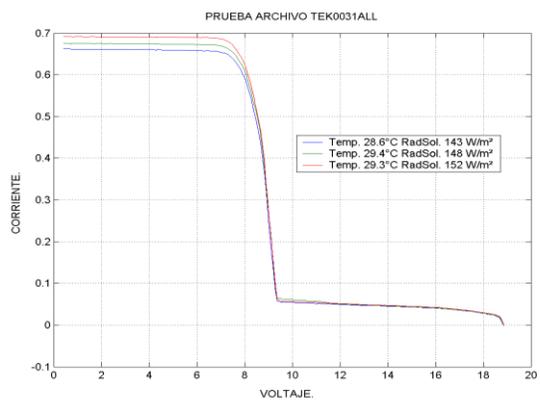
- Prueba 12.



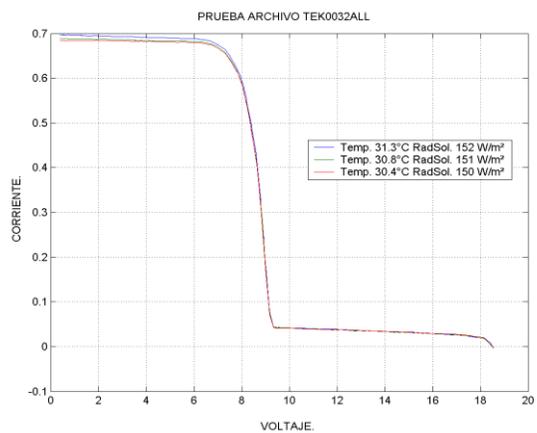
- Prueba 13.



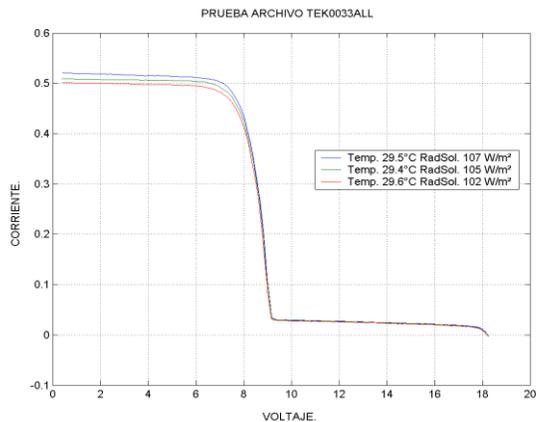
- Prueba 14.



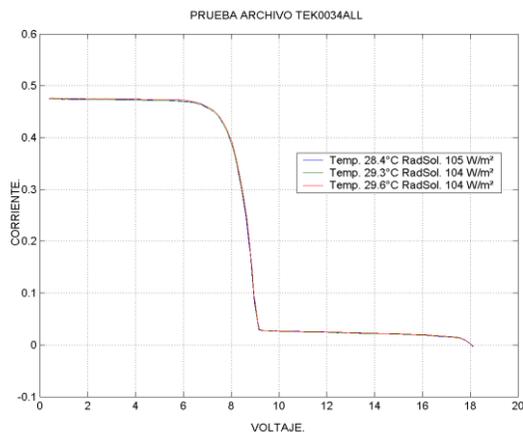
- Prueba 15.



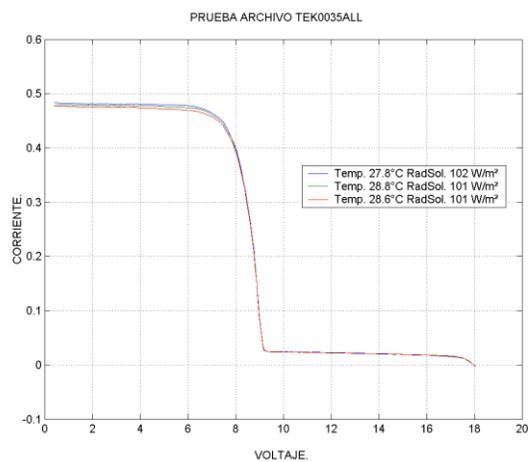
- Prueba 16.



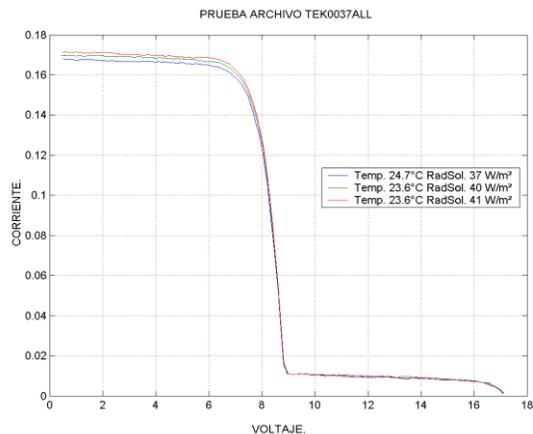
- Prueba 17.



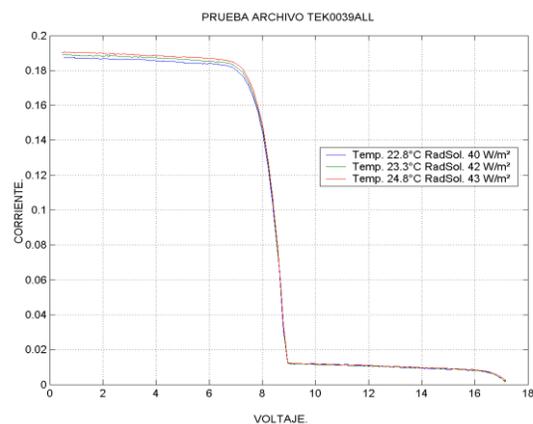
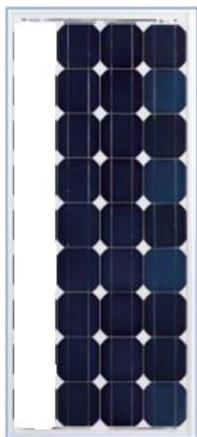
- Prueba 18.



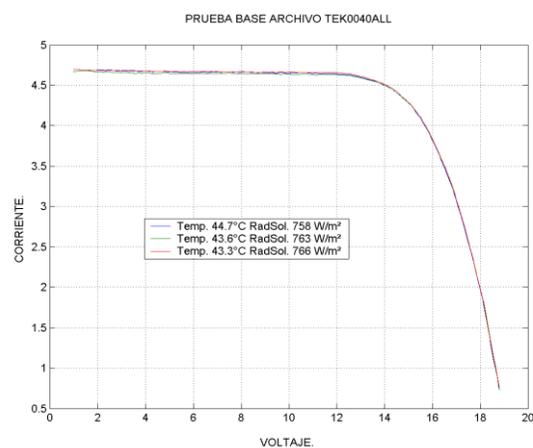
- Prueba 19.



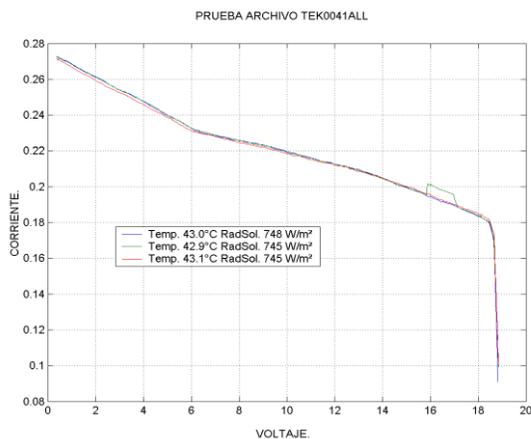
- Prueba 20.



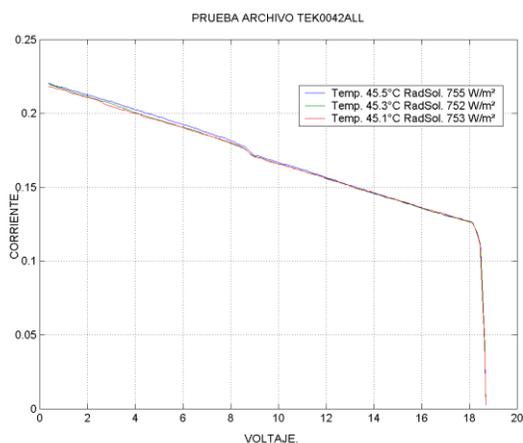
- Prueba 21.



- Prueba 22.



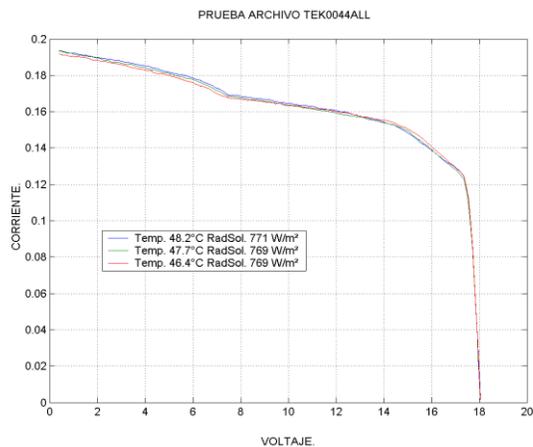
- Prueba 23.



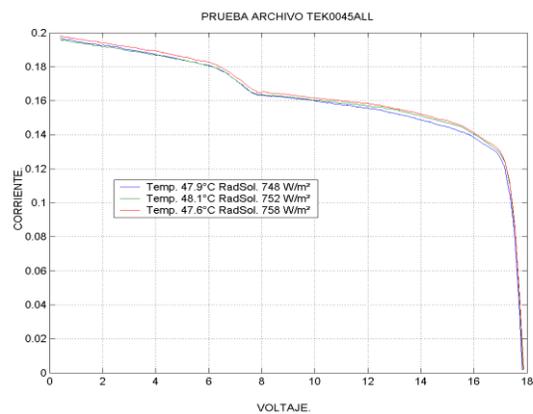
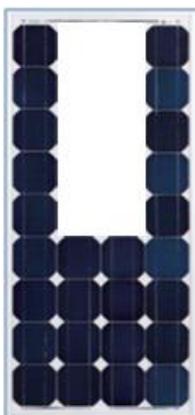
- Prueba 24.



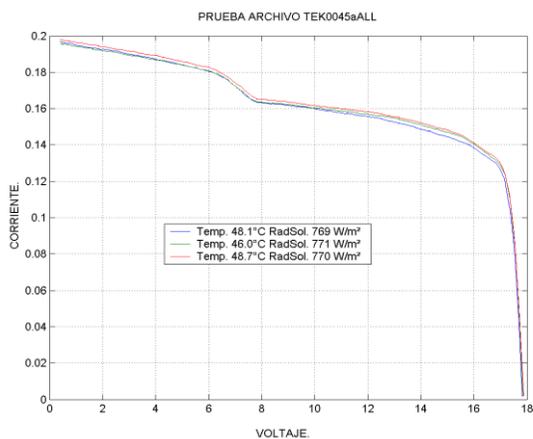
- Prueba 25.



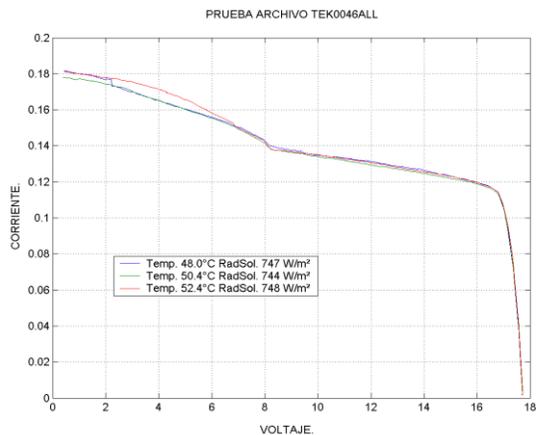
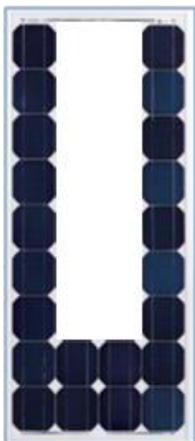
- Prueba 26.



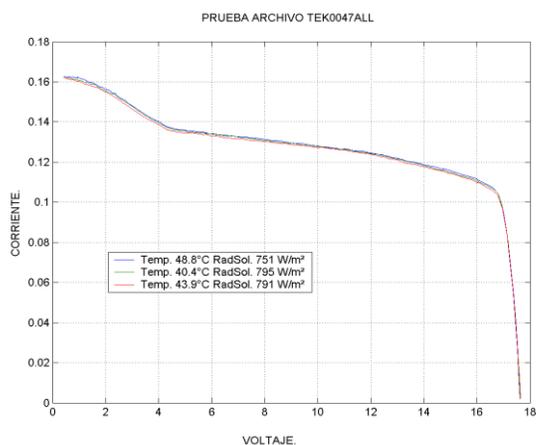
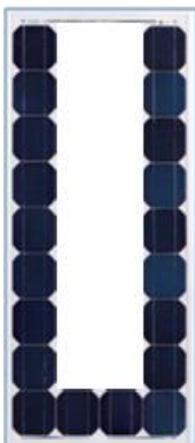
- Prueba 27.



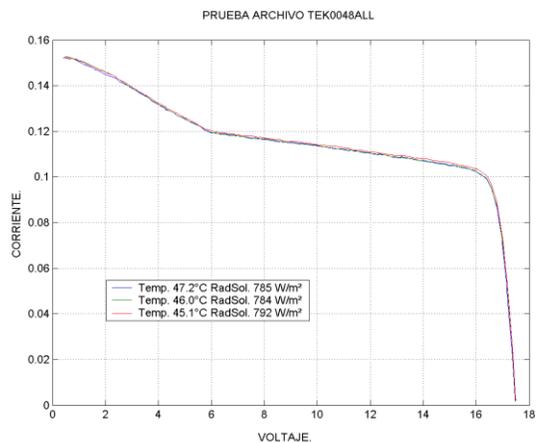
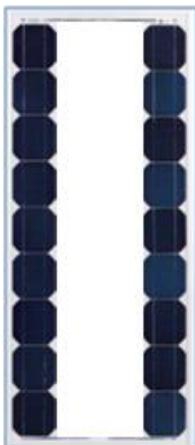
- Prueba 28.



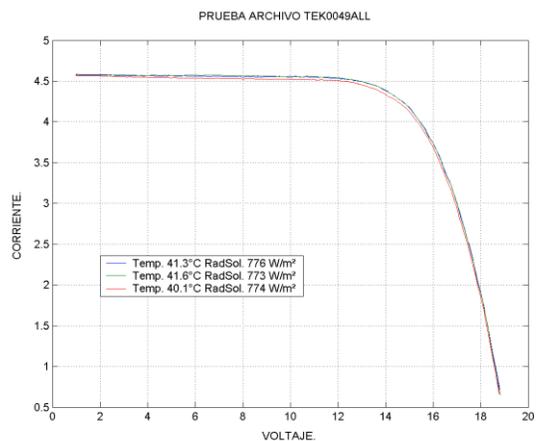
- Prueba 29.



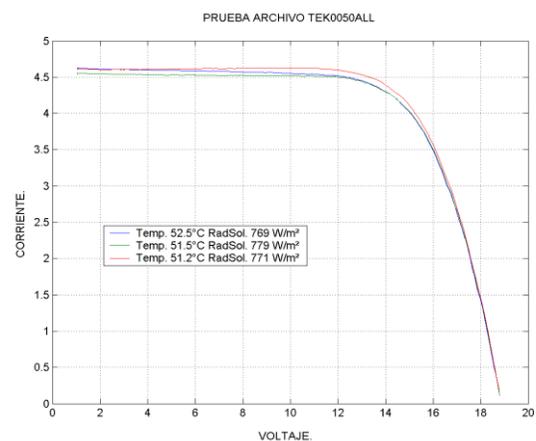
- Prueba 30.



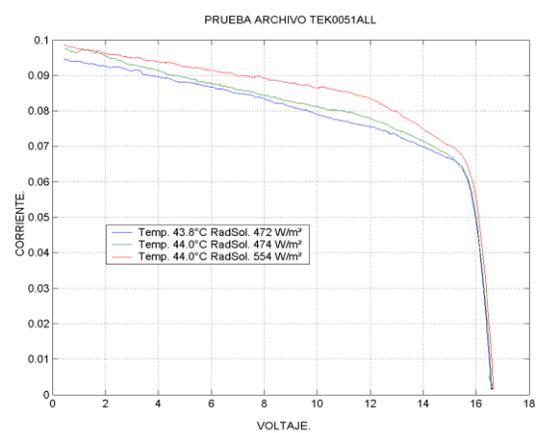
- Prueba 31.



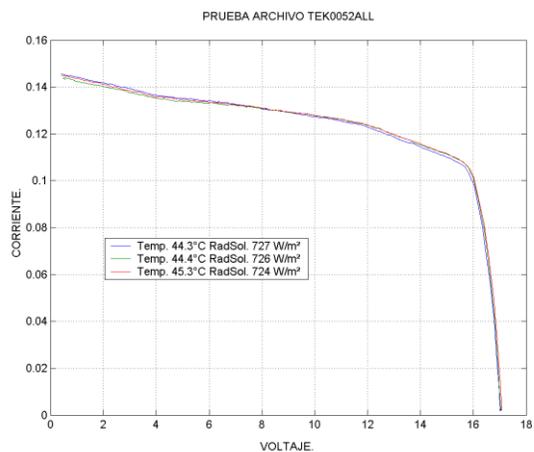
- Prueba 32.



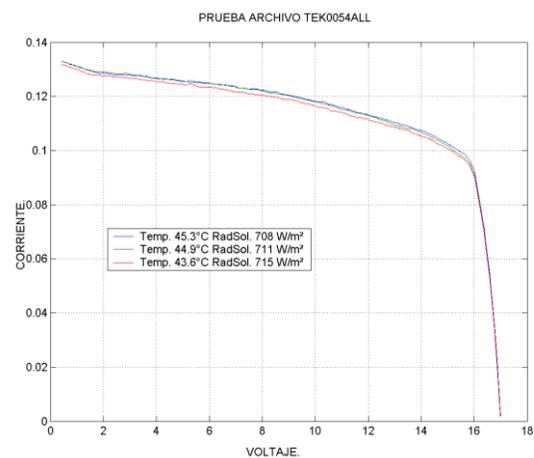
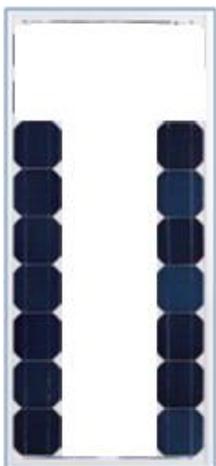
- Prueba 33.



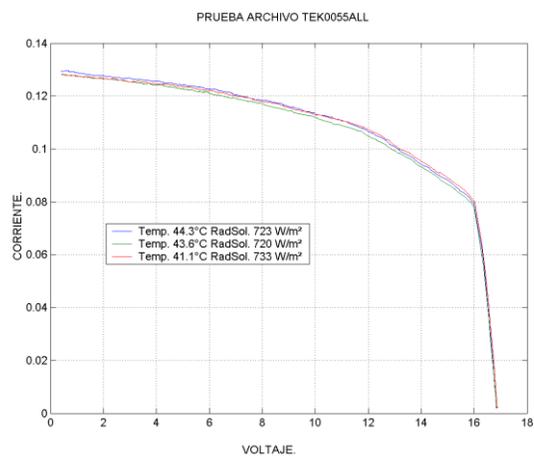
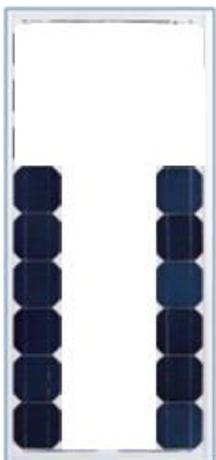
- Prueba 34.



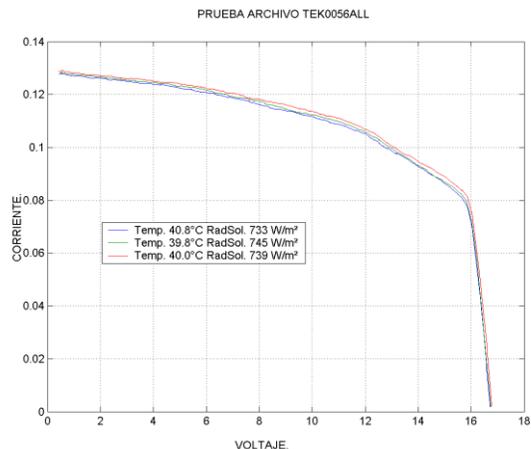
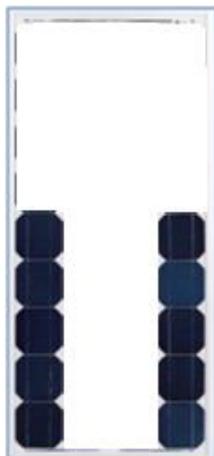
- Prueba 35.



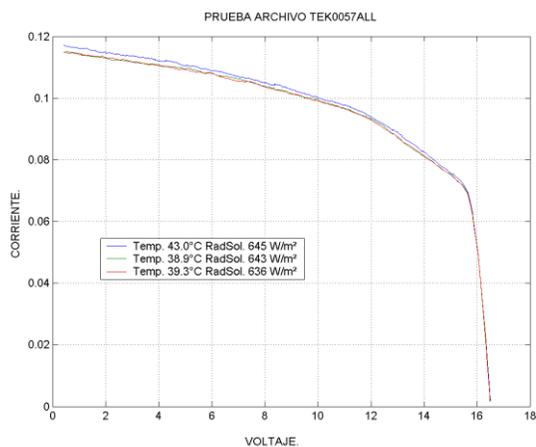
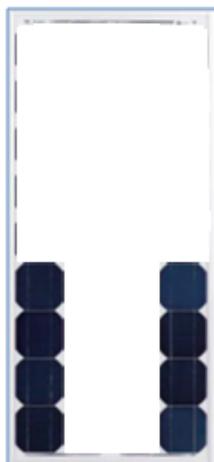
- Prueba 36.



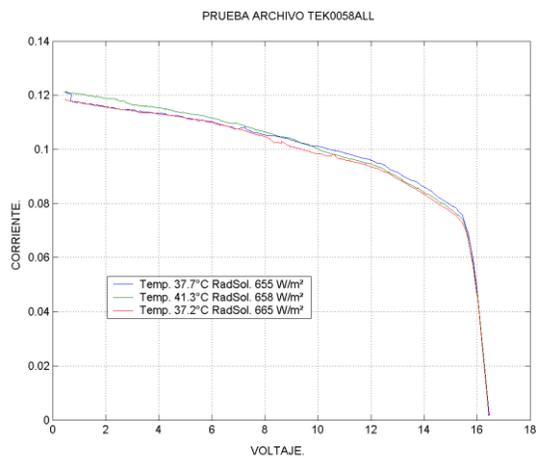
- Prueba 37.



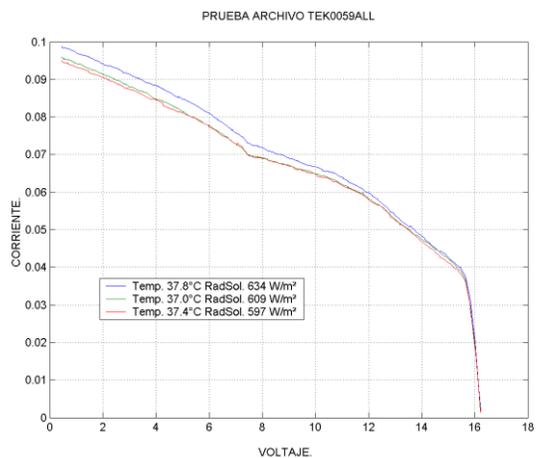
- Prueba 38.



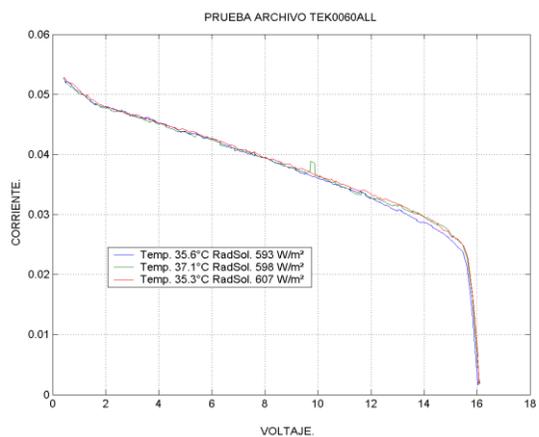
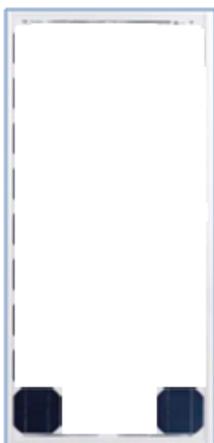
- Prueba 39.



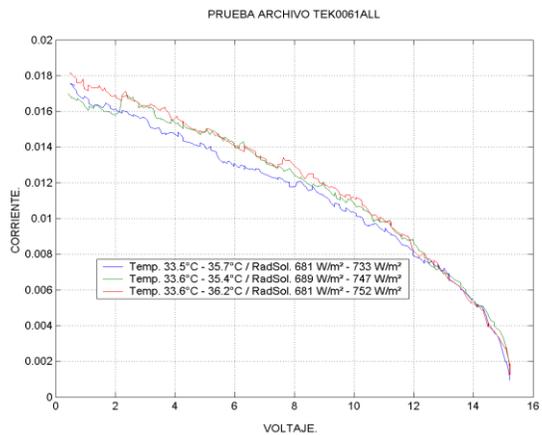
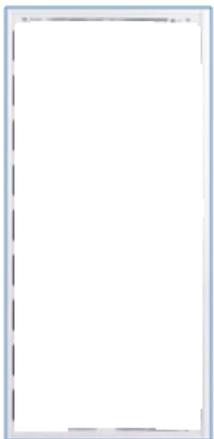
- Prueba 40.



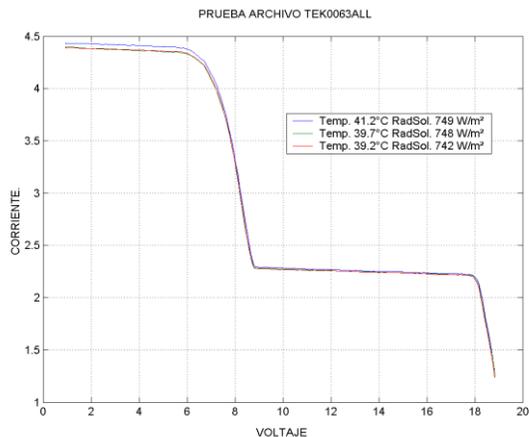
- Prueba 41.



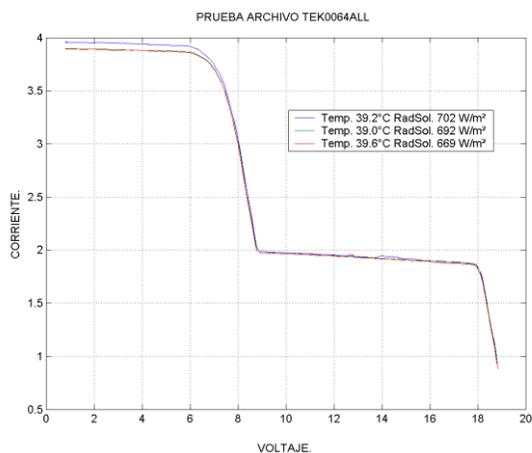
- Prueba 42.



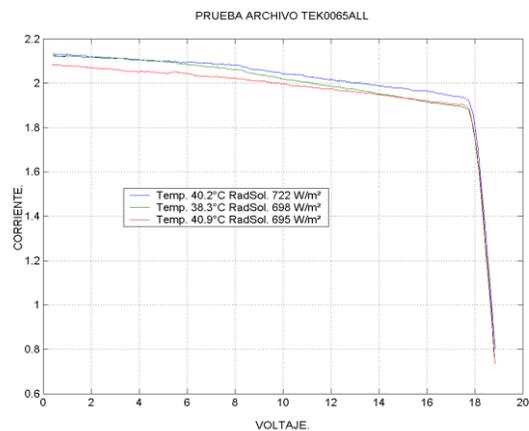
- Prueba 43. (Sombra Parcial al 50%)



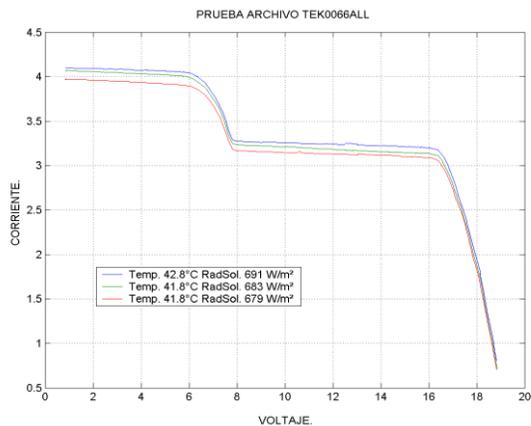
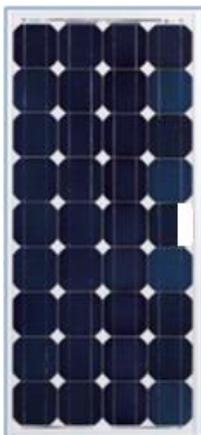
- Prueba 44. (Sombra Parcial al 50%)



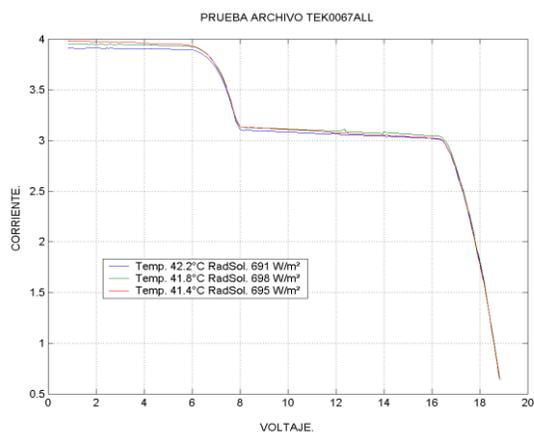
- Prueba 45. (Sombra Parcial al 50%)



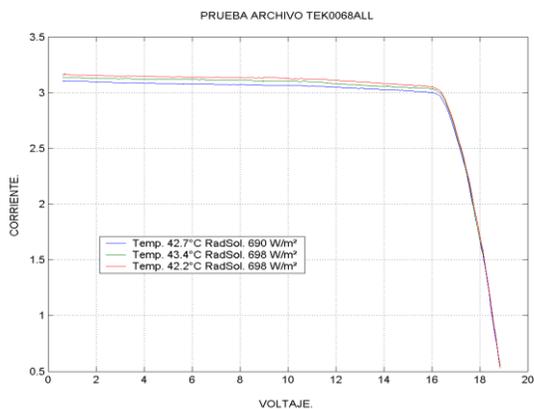
- Prueba 46. (Sombra Parcial al 33.3%)



- Prueba 47. (Sombra Parcial al 33.3%)

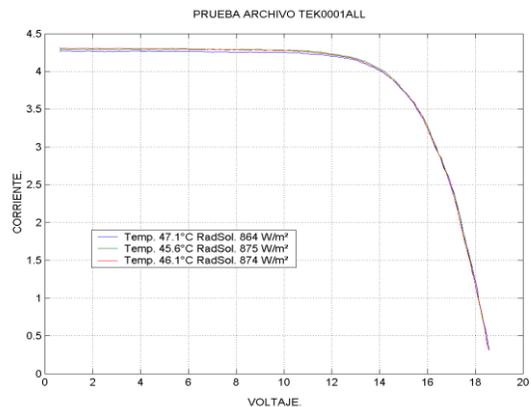


- Prueba 48. (Sombra Parcial al 33.3%)



4.1.2 Pruebas realizadas el 9 de noviembre de 2016

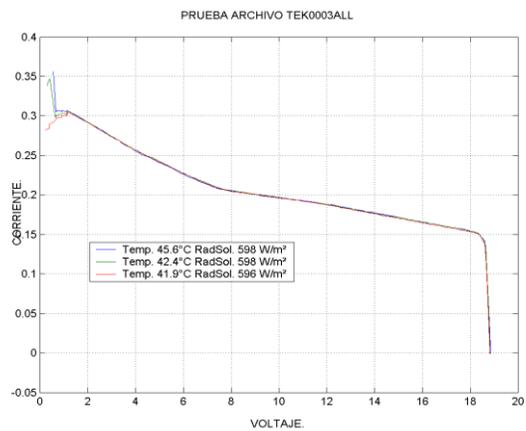
- Prueba 49.



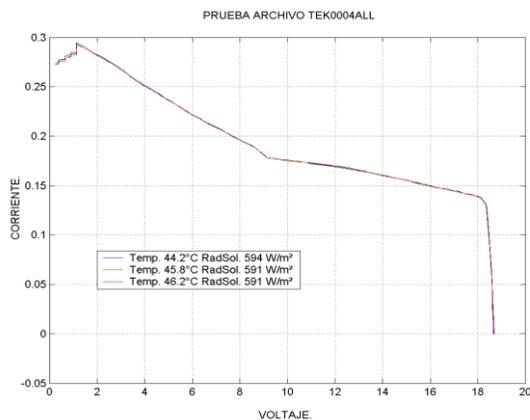
- Prueba 50. (Repetición)



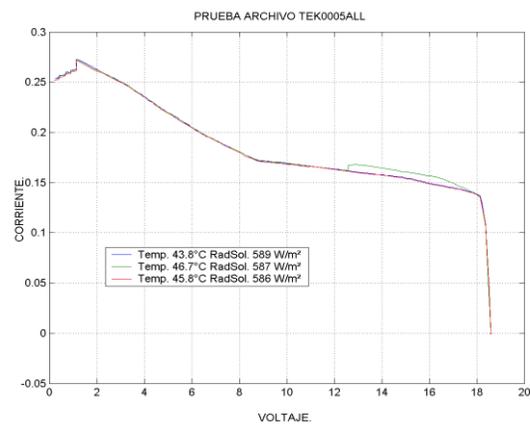
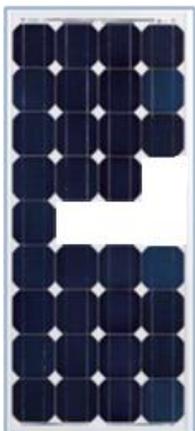
- Prueba 51.



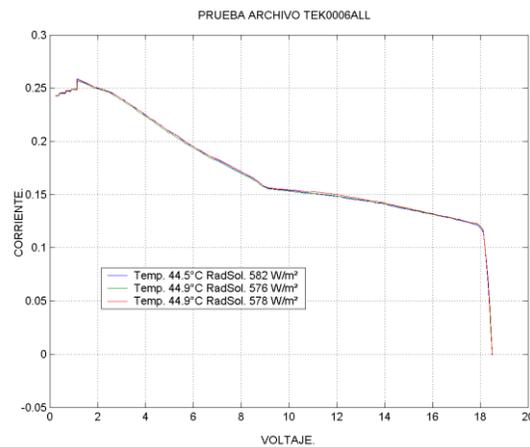
- Prueba 52.



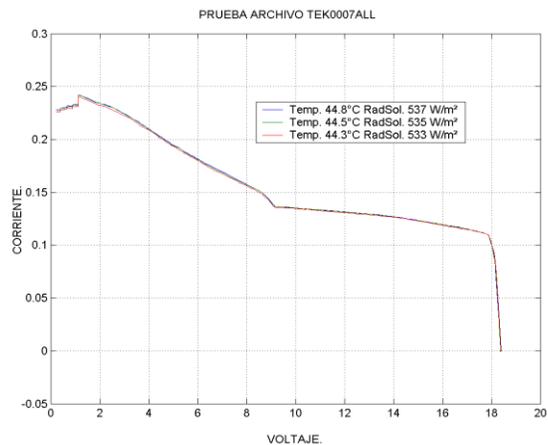
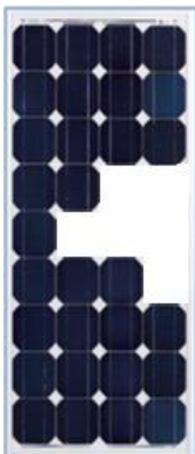
- Prueba 53.



- Prueba 54.



- Prueba 55.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Se generó una base de datos con 55 pruebas, cada una consta de aproximadamente 800 datos constituidos en dos columnas, la primera compila el voltaje y la segunda la corriente. Al graficar el voltaje en el eje X y la corriente en el eje Y se obtuvo una gráfica característica por cada prueba del comportamiento del panel, al cual previamente se le había inhabilitado una o varias celdas simulando una sombra, quedando en evidencia el comportamiento del diodo Bypass. Este actúa como protección de toda una serie de celdas solares de nuestro panel, el cual consta de dos series de celdas, por lo tanto tiene dos diodos Bypass, por consiguiente, al inhabilitarse una celda con una sombra el diodo actúa evitando que la celda solar se dañe, pues por ella pasaría toda la corriente en retroceso del panel. Por tal motivo, si se sombrea una o varias celdas de una serie se produce el mismo efecto. En situaciones atmosféricas reales es muy probable que suceda una sombra parcial, total o de una parte de una celda.
- Para estudios posteriores sobre el comportamiento del diodo de protección (Bypass) en un panel, esta base de datos sería fuente de consulta y sus gráficas serían muy útiles para comparar los efectos de las sombras en un panel fotovoltaico.
- Al analizar el comportamiento de la curva característica en sus puntos importantes, podemos concluir que cuando cualquier celda se sombrea en su totalidad se activa el diodo Bypass y esto se ve reflejado en la producción disminuida de potencia, llevando el MPP aproximadamente a la mitad de potencia que debería entregar sin sombra con la misma irradiación y temperatura. El punto de I_{SC} siempre inicia con corriente

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

máxima, y el V_{OC} cae a la mitad, aproximadamente 9 V. Cuando se tapa una celda o varias de la serie opuesta el comportamiento es igual. Cuando se tapa una o varias celdas de cada serie se inutiliza por completo el panel. Cuando se sombrea parcialmente una celda o varias de una serie por ejemplo al 50 % la corriente baja a la mitad o al 33% si es el caso.

- Se desea plantear un esquema de pruebas donde el acceso de los equipos y la filmación de la prueba sean lo más cercano posible al panel solar para poder obtener las temperaturas y radiaciones con mayor exactitud de cada curva característica. Además, sería muy interesante hacer otro tipo de pruebas con sombras a una distancia determinada sin tapar en su totalidad la celda solar. También probar el comportamiento del panel a temperaturas cambiantes con la misma irradiación, para determinar el efecto térmico en una celda PV.
- Con ayuda del software Matlab y los datos de voltaje y corriente capturados por el osciloscopio se logró la clasificación de las señales obtenidas del panel en diferentes situaciones de sombreado. Cada archivo (.mat) tiene compilado los datos de corriente y voltaje, siendo fácil la manipulación posterior para el análisis, los gráficos o construcción de un algoritmo.
- Después de analizar el conjunto de datos obtenidos podemos concluir varios aspectos: La eficiencia del panel es directamente proporcional a la irradiación solar y con la temperatura es inversamente proporcional, El panel PV es inmensamente sensible al sombreado total de una celda o una parte de ella, En días nublados también hubo producción de energía, lógicamente un día soleado es más productivo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Bastidas, J. D., Franco, E., Petrone, G., Ramos-Paja, C. A., & Spagnuolo, G. (2013). A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed. *Electric Power Systems Research*, 96, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.10.020>
- bk-precision-8502. (n.d.). Retrieved from <http://www.cedesa.com.mx/bkprecision/fuentes-poder/cargas-electronicas/8502/>
- BK PRECISION. (n.d.). 300W Programmable DC Electronic Load.
- BK PRECISION. (2017). IT-E132-2T Test Cable Assembly, USB to TTL Interface Cable. Premier Farnell Company. Retrieved from <http://www.newark.com/b-k-precision/it-e132/usb-interface-kit/dp/97J6902>
- Boylestad, Robert. Nashelsky, L. (2008). *Electronica: teoria de circuitos y dispositivos electrónicos* (Octava, p. 1040).
- Cemaer's, B. (2015). fabricacion-de-paneles-solares. Retrieved from <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/proceso-de-fabricacion-de-paneles-solares/>
- Marketing, B. S. G. (2003). bp-585. 85-Watt High-Efficiency Monocrystalline Photovoltaic Module. BP Solar Global Marketing. Retrieved from <http://www.electricsystems.co.nz/documents/BPSolar85w.pdf>
- Raytec. (n.d.). Raytek RAYST20XBUSVB ST20 Pro Infrared Thermometer.
- Restrepo, H. (2016). espectro-solar. Retrieved from <http://globalem.co/paneles-dias-nublados/>
- Rodriguez, L. (2004a). Celdas solares. Retrieved from <https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm>
- Rodriguez, L. (2004b). Efecto PV. Retrieved from <https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm>
- Rodriguez, L. (2004c). Lingotes y Obleas de Silicio. Retrieved from <https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm>
- Rodriguez, L. (2004d). Mineral De Silicio. Retrieved from <https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm>
- Rohde, R. A. (2007). Solar Spectrum. Retrieved from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png
- S.A, M. (1986). *Energia Solar Fotovoltaica*. (Boixareu, Ed.) (1986th ed.). Barcelona.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

SOLARC. (n.d.). Dispositivo de medición portátil de radiación solar y temperatura (con kit de fijación/orientación).

Tektronix. (2017). Tektronix MSO4034B 500 MHz, 2.5 GS/s, 20M record length, 4+16 channel Mixed Signal Oscilloscope. Test Equipment Depot. Retrieved from <http://www.testequipmentdepot.com/tektronix/oscilloscope/mso4034b.htm>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ANEXOS

Registro de actividades y cumplimientos de horas/ Talleres o Laboratorios de Docentes

Fecha		Actividad desempeñada por el estudiante	Hora Ingreso	Hora salida	Total horas	Firma Laboralista	Firma Estudiante	
A	M							D
2016	09	5	Reconocimiento de Equipos	9 AM	3pm	6	BORR	Juan P. M.
2016	09	12	Aprendizaje de Manejo de Equipos	9 AM	3pm	6	BORR	Juan P. M.
2016	09	19	Análisis de Información en la red y manuales de Equipos.	9 AM	3pm	6	BORR	Juan P. M.
2016	Sept	26	Configuración de Software e instalación	2pm	6pm	4	BORR	Juan P. M.
2016	Sept	29	Configuración de Software e instalación	1pm	5pm	4	BORR	Juan P. M.
2016	Oct	3	Prueba de software y conexión de carga programable	11 AM	4pm	5	BORR	Juan P. M.
2016	Oct	9	Prueba de Software y conexión de carga programable	1pm	5pm	4	BORR	Juan P. M.
2016	Oct	11	Conexión de carga programable a panel solar y Osciloscopio	11 AM	3pm	4	BORR	Juan P. M.
2016	Oct	18	Conexión de carga programable a panel solar y Osciloscopio	10 AM	5pm	7	BORR	Juan P. M.
2016	Oct	21	Pruebas preliminares en campo	10 AM	3pm	5	BORR	Juan P. M.

26	Oct 2016	26	Toma de pruebas en campo.	10AM	4pm	6	BTRC	Juan Pina.
31	Oct 2016	31	Toma de Pruebas	10AM	4pm	6	BTRC	Juan Pina.
4	Nov 2016	4	Toma de Pruebas	9AM	4pm	7	BTRC	Juan Pina.
11	Nov 2016	11	Análisis de las pruebas.	9AM	5pm	8	BTRC	Juan Pina.
15	Nov 2016	15	Organización de datos en Matlab	11AM	4pm	5	BTRC	Juan Pina.
18	Nov 2016	18	Organización de datos en Matlab.	9AM	3pm	6	BTRC	Juan Pina.
7	Feb 2017	7	Construcción de Gráficas en Matlab	10AM	4pm	6	BTRC	Juan Pina.
22	Feb 2017	22	Construcción de Gráficas en Matlab.	9AM	5pm	8	BTRC	Juan Pina.
27	Feb 2017	27	Construcción de Gráficas en Matlab.	1pm	4pm	3	BTRC	Juan Pina.
7	Marzo 2017	7	Compilación de datos y graficas	1pm	4pm	3	BTRC	Juan Pina.
13	Marzo 2017	13	Compilación de datos y graficas.	1pm	5pm	4	BTRC	Juan Pina.
17	Marzo 2017	17	Ajustes finales de la base de datos y graficas	1pm	4pm	3	BTRC	Juan Pina.
28	Marzo 2017	28	Ajustes finales de la base de datos	11AM	3pm	4	BTRC	Juan Pina.
1	Apr 2017	1	Revisión final	2pm	4pm	2	BTRC	Juan Pina.
TOTAL HORAS								122

Juan Pina
Firma Estudiante

Nombre y firma Laboralista

Cecilya Zeng
BONTE T. ROSALES C

Nombre y firma Profesional Universitario - Centro de Laboratorios

Pau Mui
FIRMA ESTUDIANTES _____

Cedimya Luján S.
FIRMA ASESOR _____
ROSA J. RESTREPO C.

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____
RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____
ACTA NO. _____

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FECHA ENTREGA: _____
