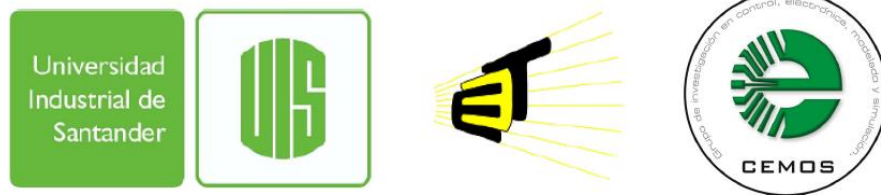


DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL
CÁLCULO DE UN INDICADOR DE DEGRADACIÓN PREMATURA EN PANELES
FOTOVOLTAICOS QUE ESTIMA EL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA
SERIE DEL MODELO DE UN DIODO

SEBASTIAN CALDERÓN ARAQUE
MILTON ANDRÉS SANABRIA CÉSPEDES



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL
CÁLCULO DE UN INDICADOR DE DEGRADACIÓN PREMATURA EN PANELES
FOTOVOLTAICOS QUE ESTIMA EL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA
SERIE DEL MODELO DE UN DIODO

SEBASTIAN CALDERÓN ARAQUE
MILTON ANDRÉS SANABRIA CÉSPEDES

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

Director

JUAN DAVID BASTIDAS RODRÍGUEZ
Ingeniero Electrónico, PhD.

Codirectora

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
Ingeniera Electrónica, MSc, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

Principalmente dedico con todo cariño y amor este trabajo de grado a mis padres, Blanca y Milton, sin su esfuerzo y apoyo incondicional habría sido muy difícil lograr este objetivo.

A mi hermana Lisa Julieth por escucharme siempre.

A mi nonita porque así ya no esté con nosotros siempre fue y será una motivación para salir adelante.

A mi compañero de proyecto Sebastián porque su esfuerzo también hace parte de este logro.

Al profesor Juan David por todo el tiempo dedicado, por creer en nosotros y por brindarnos la oportunidad de desarrollar este proyecto.

Por último, a todas las personas que de una u otra manera han contribuido con consejo, tiempo, y esfuerzo para culminar esta meta.

MILTON ANDRÉS SANABRIA CÉSPEDES

Agradezco y dedico este trabajo de grado principalmente a Dios, reconociendo que sin Él no habría sido posible. Él me enseñó que "Todo esfuerzo tiene su recompensa" Proverbios 14, 23.

Agradezco a mis padres Jorge Calderón y Martha Araque, siempre me han apoyado y han confiado en mí. Con su ejemplo me han mostrado cómo obrar correctamente. Y aún en mis fallos, están ahí para alentarme. A mi hermana Karelys Calderón, quien con sus sonrisas y sus frases de amor me motiva cada día a ser mejor, y quiero ser el mejor ejemplo para su vida.

A mis familiares, que siempre estaban pendientes de cómo me iba en la universidad, y de ellos siempre obtenía sus mejores deseos; en especial mi nona María, quien no veía la hora de verme profesional.

A mis amigos de la iglesia y de la universidad, de todos aprendo algo nuevo cada día. A todos aquellos excelentes profesores, que tienen pasión por lo que hacen y me motivaban a ser un buen ingeniero.

SEBASTIAN CALDERÓN ARAQUE

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PANEL FOTOVOLTAICO.....	18
1.1 CELDA, MÓDULO Y PANEL.....	18
1.2 MODELO DE UN SOLO DIODO.....	19
2. INDICADOR DE DEGRADACIÓN PREMATURA.....	23
2.1 DEGRADACIÓN EN PANELES FOTOVOLTAICOS.....	23
2.2 EFECTOS DE LA DEGRADACIÓN.....	24
2.3 INDICADOR DE DEGRADACIÓN.....	26
3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PROPUESTO.....	31
3.1 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN.....	32
3.2 CIRCUITO DE CONMUTACIÓN.....	34
3.3 CIRCUITO DE SENSADO.....	36
3.3.1 Sensor de corriente.....	36
3.3.2 Sensor de tensión.....	38
3.3.3 Sensor de temperatura.....	40
3.4 ALGORITMO PARA LA CONMUTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS....	41
3.5 PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DEL INDICADOR.....	44
4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN.....	47

5. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	51
5.1 RESULTADOS PANEL UPSOLAR.....	54
5.2 RESULTADOS PANEL TRINA SOLAR.....	57
6. OBSERVACIONES.....	62
7. CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fuentes de degradación que afectan las resistencias del modelo de un solo diodo.....	25
Tabla 2. Resultados de simulación.....	50
Tabla 3. Promedio de datos del panel Upsolar.....	56
Tabla 4. Promedio de datos del panel Trina Solar.....	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Celda, modulo, panel y arreglos fotovoltaicos.	19
Figura 2. Modelo de un solo diodo.....	20
Figura 3. Efecto del aumento del valor de R_s	26
Figura 4. Esquema general del sistema diseñado.	31
Figura 5. Circuito de alimentación.	33
Figura 6. Circuito de conmutación.	34
Figura 7. Circuito de activación de relé.....	35
Figura 8. Sensor de corriente LA25-NP	37
Figura 9. Sensor de tensión LV25-P.....	39
Figura 10. Sensor de temperatura LM35.	41
Figura 11. Circuito de control.....	42
Figura 12. Diagrama de flujo del código implementado en Arduino.....	43
Figura 13. Señales de activación generadas por el Arduino para la activación de los relés.....	44
Figura 14. Interfaz gráfica de usuario.	45
Figura 15. Diagrama de flujo implementado en MATLAB.....	46
Figura 16. Esquema de simulación del circuito en PSIM.....	48
Figura 17. Parámetros de simulación del panel Trina Solar TSM-255PC05.....	49
Figura 18. Herramienta para el cálculo de los parámetros del panel.....	49
Figura 19. Montaje experimental del dispositivo diseñado.	51

Figura 20. Interfaz de la aplicación <i>Curve Fitting</i> usada para la estimación de R_h	52
Figura 21. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0\Omega$ con panel Upsolar.	54
Figura 22. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0,32\Omega$ con panel Upsolar.	55
Figura 23. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.63\Omega$ con panel Upsolar.	55
Figura 24. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.94\Omega$ con panel Upsolar.	56
Figura 25. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0\Omega$ con panel Trina Solar.	58
Figura 26. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.32\Omega$ con panel Trina Solar. .	58
Figura 27. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.63\Omega$ con panel Trina Solar. .	59
Figura 28. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.94\Omega$ con panel Trina Solar. .	59
Figura 29. Valor del indicador y la corriente de cortocircuito para $R_{add} = 0.32\Omega$ en el panel Trina Solar.	61

LISTA DE ANEXOS

(Los anexos están adjuntos en el CD y pueden visualizarse en base de datos de la Biblioteca UIS)

Anexo A. Tarjeta impresa del dispositivo electrónico

Anexo B. Programa Arduino

Anexo C. Códigos interfaz gráfica de usuario.

RESUMEN

TITULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL CÁLCULO DE UN INDICADOR DE DEGRADACIÓN PREMATURA EN PANELES FOTOVOLTAICOS QUE ESTIMA EL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA SERIE DEL MODELO DE UN DIODO¹

AUTORES: MILTON ANDRÉS SANABRIA CÉSPEDES², SEBASTIAN CALDERÓN ARAQUE²

PALABRAS CLAVES: SISTEMA FOTOVOLTAICO, DEGRADACIÓN, MICROINVERSOR.

DESCRIPCIÓN:

La degradación prematura en paneles fotovoltaicos es un fenómeno que provoca deficiencias en el funcionamiento de estos y reduce la potencia generada, disminuyendo los beneficios económicos que se esperaban de la instalación, extendiendo el tiempo de retorno de la inversión y afectando directamente la viabilidad del sistema. La degradación prematura influye en la competitividad de la generación de energía fotovoltaica frente a otras fuentes de generación, por tal motivo, es un factor importante de monitorear y contrarrestar.

En la literatura existen algunos indicadores que permiten estimar la degradación prematura en los paneles fotovoltaicos. El presente trabajo de grado se enfoca en un indicador llamado ΔR_S , este indicador estima la degradación prematura midiendo el incremento en la resistencia en serie del modelo eléctrico de un solo diodo del panel fotovoltaico. En este trabajo de grado se realizó el diseño e implementación de un sistema electrónico capaz de calcular el indicador ΔR_S sin tener que sacar el panel de operación. El sistema toma algunos datos eléctricos del panel y la temperatura ambiente y los envía a un computador para que este calcule el indicador en ΔR_S y posteriormente muestre los resultados en una interfaz gráfica. El usuario podrá ver el cálculo del indicador en función del tiempo, además de la variación de otros parámetros del panel, incluyendo una estimación de las curvas características.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Director: PhD. Juan David Bastidas Rodríguez.

Codirectora: PhD. María Alejandra Mantilla Villalobos.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC SYSTEM FOR THE CALCULATION OF AN INDICATOR OF PREMATURE DEGRADATION IN PHOTOVOLTAIC PANELS THAT ESTIMATES THE INCREMENT OF THE RESISTANCE SERIES OF THE MODEL OF A DIODE³

AUTHORS: MILTON ANDRÉS SANABRIA CÉSPEDES⁴, SEBASTIAN CALDERÓN ARAQUE⁴

KEYWORDS: PHOTOVOLTAIC SYSTEM, DEGRADATION, MICRO-INVERTER.

DESCRIPTION:

The premature degradation in photovoltaic panels is a phenomenon that causes deficiencies in the operation of these and reduces the power generated, decreasing the economic benefits that were expected from the installation, extending the return of the investment and directly affecting the viability of the system. The premature degradation influences the competitiveness of the generation of photovoltaic energy compared to other sources of generation, for this reason, it is an important factor to monitor and counteract.

In the literature there are some indicators that allow to estimate the premature degradation in the photovoltaic panels. The present degree work focuses on an indicator called ΔR_s , this indicator estimates the premature degradation by measuring the increase in the series resistance of the electric model of a single diode of the photovoltaic panel. In this degree work, the design and implementation of an electronic system capable of calculating the ΔR_s indicator without having to remove the operation panel was carried out. The system takes some electrical data from the panel and ambient temperature and sends them to a computer so that it calculates the indicator and then shows the results in a graphical interface. The user can see the calculation of the indicator as a function of time, in addition to the variation of other panel parameters, including an estimate of the characteristic curves.

³ Degree project

⁴ Physics Mechanical Engineering Faculty, Electric, Electronic and Telecommunic Engineer School.

Director: PhD. Juan David Bastidas Rodríguez.

Co-director: PhD. María Alejandra Mantilla Villalobos.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos se han convertido en una de las mejores alternativas para la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables usando un recurso inagotable como lo es el sol. La potencia generada por los sistemas fotovoltaicos alrededor del mundo ha aumentado considerablemente en los últimos años. De hecho, la capacidad total instalada a finales de 2016 en todo el mundo era aproximadamente 303 GW, lo cual representa un aumento de al menos 75 GW con respecto al 2015⁵.

En general, los sistemas fotovoltaicos tienen algunas ventajas como lo son: modularidad, cero emisiones, la fuente de energía es gratuita y fácil de encontrar, no poseen partes móviles, pueden coexistir con otras fuentes de energía y el tiempo de vida es mayor a 20 años. Sin embargo, los generadores fotovoltaicos también poseen algunas desventajas entre las cuales se pueden destacar: eficiencia relativamente baja (entre un 5% y 20% dependiendo de la tecnología), comportamiento altamente no lineal, la energía producida depende directamente de las condiciones ambientales (irradiancia y temperatura) y pueden ver su vida útil reducida debido a la degradación prematura producida por la operación a la intemperie.

⁵ RENALDER, Lea y WILLIAMSON, Laura. Renewable energy tenders and community [Em]power[ment]. [En línea]. París: REN21. 2018., 60 p. Disponible en <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/09/LAC-Report.pdf>.

A pesar de las medidas que se toman para que los paneles fotovoltaicos soporten una operación a la intemperie pueden llegar a surgir situaciones que afecten su funcionamiento, algunas de estas pueden ser: humedad que entra a través de pequeñas grietas o agujeros, ciclos térmicos, problemas en los semiconductores que incrementan las corrientes de fuga, y decoloración, entre otros⁶. Situaciones como las mencionadas pueden generar degradación prematura en los materiales.

La degradación prematura en paneles fotovoltaicos es un fenómeno que provoca deficiencias en el funcionamiento de estos y reduce la potencia generada, disminuyendo los beneficios económicos que se esperaban de la instalación, extendiendo el tiempo de retorno de la inversión y afectando directamente la viabilidad del sistema⁷. La degradación temprana influye en la competitividad de la generación de energía fotovoltaica frente a otras fuentes de generación, por tal motivo, es un factor importante de monitorear y mitigar.

En la literatura existen algunos indicadores que permiten estimar la degradación prematura en los paneles fotovoltaicos, entre los cuales se encuentran el *Fill Factor* y el *Performance Ratio*, entre otros. Este trabajo de grado se enfoca en un indicador que estima la degradación prematura midiendo el cambio en la resistencia serie del

⁶ MESSENGER, Roger y VENTRE, Jerry. Photovoltaic systems engineering, 2 ed. 2004. 458 p. ISBN 0-203-58847-9.

⁷ REGUERA, Francisco. Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos. Trabajo de grado Máster Oficial en Tecnología de los Sistemas de Energía Solar. Universidad Internacional de Andalucía. 2015. 60 p.

modelo eléctrico de un solo diodo de un panel fotovoltaico. Este trabajo de grado consiste en el diseño e implementación de un sistema electrónico que permita estimar degradación prematura midiendo el incremento de la resistencia en serie del panel cuando se está en operación conectado a un microinversor. A pesar de que el indicador fue validado experimentalmente⁸, dicha validación se hizo con un montaje provisional que no permitía realizar un monitoreo continuo de un panel fotovoltaico.

⁸ BASTIDAS, Juan David, *et al.* Model-Based Degradation Analysis of Photovoltaic Modules Through Series Resistance Estimation. En IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. vol. 62, no. 11, p. 7256-7265.

1. PANEL FOTOVOLTAICO

1.1 CELDA, MÓDULO Y PANEL

Un material es fotovoltaico cuando al exponerlo directamente al sol es capaz de absorber la energía de los fotones de la luz y convertirla en energía eléctrica. El elemento base para el proceso de transformación de energía es la celda fotovoltaica, que se forma básicamente de la unión de dos materiales semiconductores⁹.

Una sola celda produce un voltaje similar al voltaje de conducción de un diodo (aproximadamente 0,6V para diodos de silicio) lo cual termina siendo un valor bajo. Por esta razón se conectan celdas en serie para formar una unidad fotovoltaica básica llamada módulo, los cuales son protegidos con diodos de *bypass* puestos en antiparalelo.

Los llamados paneles fotovoltaicos son dos o más módulos conectados en serie. A partir de los paneles es posible hacer arreglos de diferentes formas dependiendo de la aplicación, siendo el serie-paralelo (SP) uno de los más conocidos. Estos dispositivos y la forma como se conectan se observan en la Figura 1.

⁹ LUQUE, Antonio y HEGEDUS, Steven. Handbook of photovoltaic science and engineering. 2003. 1179 p. ISBN 0-471-49196-9.

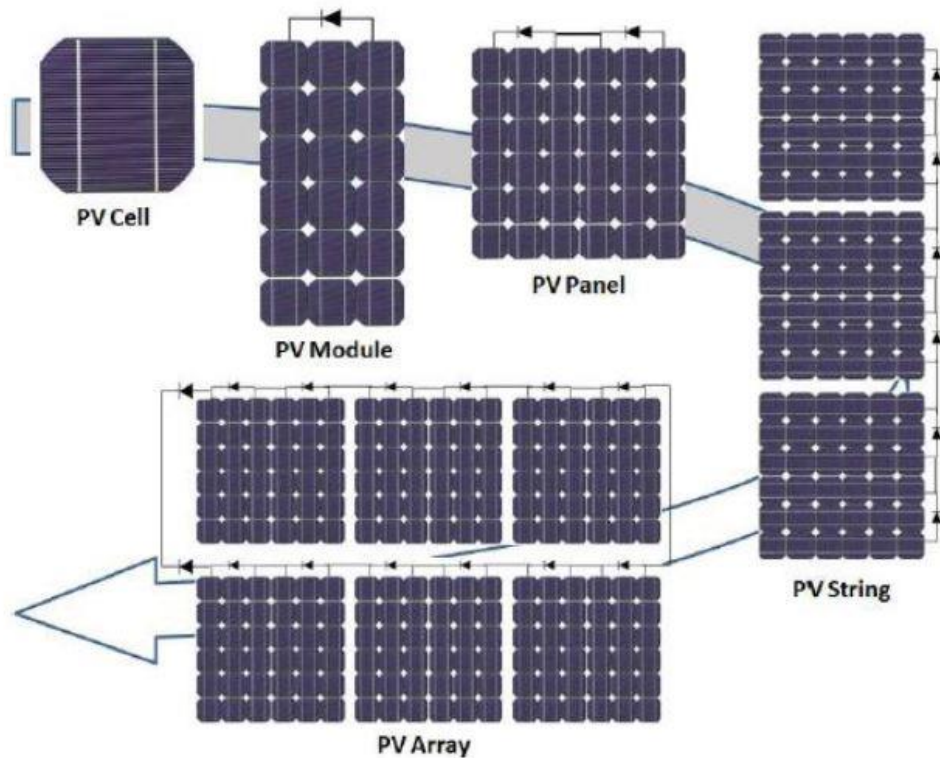


Figura 1. Celda, modulo, panel y arreglos fotovoltaicos¹⁰.

1.2 MODELO DE UN SOLO DIODO

Uno de los circuitos más usados en la literatura para modelar la celda fotovoltaica es el mostrado en la Figura 2, conocido como el modelo de un solo diodo. Este modelo es la base para la estimación de degradación en el presente proyecto ya que se analiza una de sus variables (R_s) a partir del cálculo de un indicador.

¹⁰ BASTIDAS, Juan David. Modeling, diagnosis and maximum power point tracking of photovoltaic arrays under mismatched conditions. Trabajo de grado Tesis Doctoral en Ingeniería Electrónica. Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2014. pp. 23–37

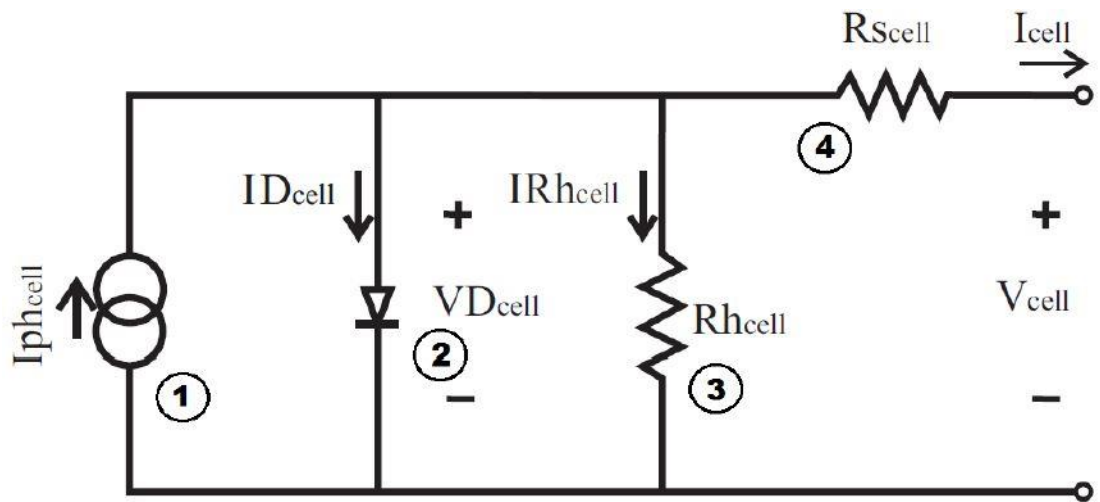


Figura 2. Modelo de un solo diodo¹¹.

Cada uno de los dispositivos que componen el circuito de la Figura 2 representan o modelan un fenómeno presente en la celda fotovoltaica que se detallan a continuación:

1. Fuente de corriente $I_{ph,cell}$. Representa el flujo de electrones producidos por la colisión de fotones en el material semiconductor.
2. Diodo. Modela el comportamiento no lineal de la unión de semiconductores p-n. Su principal parámetro es $I_{sat,cell}$, que representa la corriente de saturación inversa.
3. $R_{h,cell}$. Representa las pérdidas causadas por las corrientes de fuga.
4. $R_{s,cell}$. Representa las pérdidas por las uniones asociadas y los contactos entre el metal y los semiconductores.

¹¹ BASTIDAS, Juan David. Modeling, diagnosis and maximum power point tracking of photovoltaic arrays under mismatched conditions. Trabajo de grado Tesis Doctoral en Ingeniería Electrónica. Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2014. pp. 23–37

El modelo de un solo diodo puede ser usado también para representar el módulo y el panel fotovoltaico, asumiendo que todas las celdas son iguales y operan bajo las mismas condiciones de irradiancia y temperatura. Los parámetros del circuito de la Figura 2, extendidos al panel fotovoltaico, se muestran en las ecuaciones expresadas en (1), donde N_s representa el número de celdas conectadas en serie que forman el panel y η representa el factor de idealidad. Usando las leyes Kirchhoff es posible obtener la ecuación (2) que representa matemáticamente el comportamiento del módulo. Las ecuaciones (3) y (4) muestran las expresiones explícitas de corriente y voltaje respectivamente, para las cuales es necesario el uso de la función W de Lambert expresada como W_0 .

$$\begin{aligned}
 V &= N_s \cdot V_{cell}, & I &= I_{cell}, & I_{sat} &= I_{sat,cell}, & I_{ph} &= I_{ph,cell} \\
 V_t &= \eta \cdot N_s \cdot V_{t,cell}, & R_s &= N_s \cdot R_{s,cell}, & R_h &= N_s \cdot R_{h,cell}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_h} \right) \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 I &= -\frac{V_t}{R_s} \cdot W_0 \left(\frac{I_{sat} \cdot R_s}{(1 + R_s/R_h)V_t} \cdot \exp \left(\frac{V + R_s(I_{sat} + I_{ph})}{(1 + R_s/R_h)V_t} \right) \right) \\
 &+ \frac{I_{sat} + I_{ph} - V/R_h}{(1 + R_s/R_h)V_t}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$V = -V_t \cdot W_0 \left(\frac{I_{\text{sat}} \cdot R_h}{V_t} \cdot \exp \left(\frac{R_h (I_{\text{ph}} + I_{\text{sat}} - I)}{V_t} \right) \right) - I(R_s + R_h) + R_h (I_{\text{ph}} + I_{\text{sat}}) \quad (4)$$

2. INDICADOR DE DEGRADACIÓN PREMATURA

2.1 DEGRADACIÓN EN PANELES FOTOVOLTAICOS

Las condiciones de operación no uniformes en un panel fotovoltaico provocan que opere bajo condiciones de estrés, que junto con las condiciones de operación al aire libre pueden llegar a degradarlo prematuramente y reducir la generación de energía^{12 13 14}. Esta degradación modifica los parámetros que describen cada panel fotovoltaico, lo cual introduce errores en las aplicaciones que usan dichos parámetros.

Para detectar degradación de paneles fotovoltaicos, se debe evaluar algún indicador en cualquier momento de operación para compararlo con valores obtenidos al inicio del proceso de monitoreo o con valores que proporcionan las hojas de datos. Existen dos métodos para evaluar indicadores de degradación: off-line y on-line¹⁵. Los métodos off-line permiten determinar el sitio del fallo y cuantificar la degradación con precisión, pero tienen la desventaja de requerir la desconexión del panel fotovoltaico. Los métodos on-line calculan los indicadores de degradación durante la operación del panel fotovoltaico y requieren menos mediciones que los métodos off-line. Esto facilita la implementación y reduce los costos, pero también

¹² MUNOZ, Miguel Angel, *et al.* Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions, Sol. Energy, 2011. vol. 85, no. 9, pp. 2264–2274.

¹³ DJORDJEVIC, Sinisa; PARLEVLIT, David y HENNINGS, Philip. Detectable faults on recently installed solar modules in Western Australia, Renew. Energy, 2014. vol. 67, pp. 215–221.

¹⁴ KAHOUL, Nabil; HOUABES, Mourad y SADOK, Mohammed. Assessing the early degradation of photovoltaic modules performance in the Saharan region, Energy. Convers. Manage. 2014. vol. 82, pp. 320–326.

¹⁵ BASTIDAS, Juan David, *et al.* Photovoltaic modules diagnostic: An overview, IECON Proc. Industrial Electron. Conf. 2013. pp. 96–101.

reduce los tipos de fallos detectables e impide conocer su ubicación exacta en el panel o módulo que presenta la degradación.

Los métodos on-line para detección de degradación se pueden dividir en dos grupos. El primer grupo realiza un monitoreo continuo de la potencia generada por el panel para compararla con el valor teórico de potencia generada a partir de mediciones de irradiancia y temperatura. El segundo grupo no usa la potencia para estimar degradación, sino que se basan en otros cálculos para estimar la degradación o cuantificar algún indicador¹⁶.

Para este proyecto, se usa un método de diagnóstico on-line, que se basa en un indicador para cuantificar la degradación en un panel fotovoltaico.

2.2 EFECTOS DE LA DEGRADACIÓN

Existen diferentes fuentes de degradación que provocan alteraciones a los parámetros del modelo de un solo diodo, en la Tabla 1 se pueden ver algunas de ellas, las cuales afectan el valor de las resistencias R_s y R_h . Particularmente R_s puede aumentar hasta cinco o diez veces su valor nominal debido a una o más fuentes de degradación, mientras que R_h puede disminuir de cientos a unas pocas unidades de ohmios¹⁷.

¹⁶ BASTIDAS, Juan David. Modeling, diagnosis and maximum power point tracking of photovoltaic arrays under mismatched conditions. Trabajo de grado Tesis Doctoral en Ingeniería Electrónica. Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2014. pp. 23–37

¹⁷ VAN DYK y MEYER. Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. Renew. Energy. 2004. vol. 29, no. 3, pp. 333–344.

Fuente de degradación	Producido por	Efectos en el modelo
Degradación de la celda	Ciclos térmicos diarios, humedad que entra por pequeñas grietas o agujeros que producen la oxidación en los terminales.	Incremento del R_s efectivo.
	Pequeñas grietas en el aislamiento entre las celdas y el marco, daños en el cristal, problemas en los semiconductores que aumentan las corrientes de fuga	Reducción del R_h efectivo.
Celdas operando en condiciones no uniformes	Degradación del recubrimiento antireflectante, células agrietadas y sombreado.	incremento del R_s efectivo.
Degradación inducida por luz	Frenado de enlaces Si-Si débiles y cambios en algunos materiales semiconductores debido al tiempo de operación al aire libre.	Incremento del R_s y/o reducción del R_h efectivo.
Degradación potencial inducida	Problemas de puesta a tierra y altos voltajes entre el marco del módulo y las superficies que transportan las cargas en el modelo como celdas y cables.	Reducción del R_h efectivo.

Tabla 1. Fuentes de degradación que afectan las resistencias del modelo de un solo diodo.

Todas estas fuentes de degradación provocan una distorsión en la forma de las curvas I-V y P-V características del panel fotovoltaico, lo cual genera una reducción de la máxima potencia que el panel puede proveer bajo condiciones de irradiancia y temperatura dadas. En la Figura 3 se muestra el efecto del aumento de la resistencia R_s ; como se puede ver en la curva I-V, existe un decremento notable del voltaje en el punto de máxima potencia a medida que aumenta el valor de R_s ,

mientras el valor de la corriente en ese mismo punto no tiene una reducción significativa.

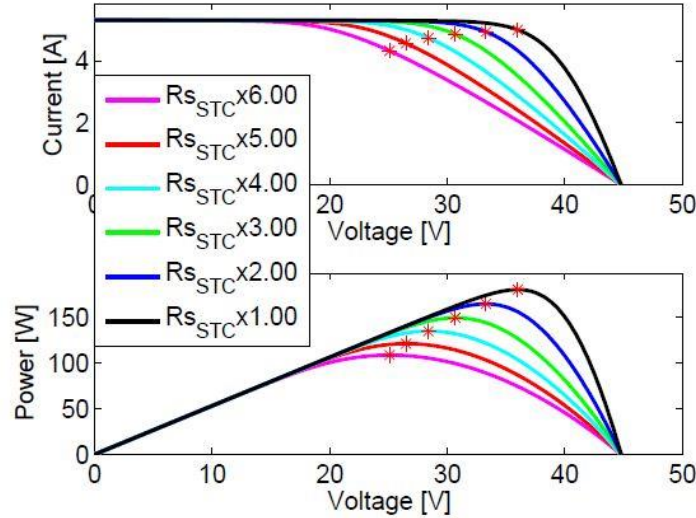


Figura 3. Efecto del aumento del valor de R_s ¹⁸.

2.3 INDICADOR DE DEGRADACIÓN

Como se mostró en la sección anterior, el aumento del valor de R_s provoca un decremento del voltaje en el punto de máxima potencia (MPP). El indicador objeto de estudio¹⁹ usa este desplazamiento del MPP para cuantificar la resistencia en serie adicional (R_{add}) conectada al panel sin degradación que provocaría la misma reducción en el voltaje. Para llevar a cabo esta estimación es necesario medir el voltaje en MPP y compararlo con un voltaje de referencia (ideal) que representa el panel sin degradación. Este indicador tiene la ventaja de poder operar bajo un

¹⁸ BASTIDAS, Juan David. Modeling, diagnosis and maximum power point tracking of photovoltaic arrays under mismatched conditions. Trabajo de grado Tesis Doctoral en Ingeniería Electrónica. Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2014. pp. 23–37

¹⁹ BASTIDAS, Juan David, *et al.* Model-Based Degradation Analysis of Photovoltaic Modules Through Series Resistance Estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. vol. 62, no. 11, p. 7256-7265.

amplio rango de irradiancias y temperaturas, a diferencia de otros indicadores de degradación como el *Fill Factor* (FF), en el cual una temperatura no uniforme puede introducir errores al cálculo.

A partir de la ecuación (4) es posible calcular el voltaje de referencia, Para esto se requiere hallar los cinco parámetros que describen la ecuación: I_{ph} , I_{sat} , η , R_s y R_h . Estos parámetros se calculan bajo condiciones de prueba estandar (STC) usando la información de las hojas de datos²⁰; sin embargo, estos valores varían dependiendo de la irradiancia y la temperatura, por tal motivo, se usan las ecuaciones (5) a la (9) que transforman los parámetros STC ya obtenidos, en los valores correspondientes a partir de una irradiancia y temperatura dadas^{21 22 23}. En estas ecuaciones $\alpha_{I_{sc}}$ y $\alpha_{V_{oc}}$ están expresados en [A/°C] y [V/°C] respectivamente; mientras que $V_t = N_s \cdot k \cdot \eta \cdot T/q$ con T expresado en Kelvin.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \left(I_{ph,STC} + \alpha_{I_{sc}} \cdot (T - T_{STC}) \right) \quad (5)$$

$$\eta = \eta_{STC} \cdot \frac{T}{T_{STC}} \quad (6)$$

$$I_{sat} = \frac{I_{sc,STC} + \alpha_{I_{sc}} \cdot (T - T_{STC})}{\exp\left(\frac{V_{oc,STC} + \alpha_{V_{oc}} \cdot (T - T_{STC})}{V_t}\right) - 1} \quad (7)$$

²⁰ ACCARINO, J, et al. Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model. IEEE ICCEP. 2013, pp. 62–66.

²¹ DE SOTO, W; KLEIN, A y BECKMAN, W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Energy. 2006. vol. 80, no. 1, pp. 78–88.

²² VILLALVA, Marcelo; GAZOLI, Jonas y FILHO, Ernesto. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Trans. Power Electron. 2009. vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208.

²³ BAI, Jianbo, et al. Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules. Energy Convers. Manage. 2014. vol. 79, pp. 294–303.

$$R_s = R_{s,STC} \cdot \frac{T}{T_{STC}} \cdot \left(1 - 0.217 \cdot \ln \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) \right) \quad (8)$$

$$R_h = R_{h,STC} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (9)$$

En algunas de estas ecuaciones es necesaria una medida de irradiancia, pero debido a lo complicado y costoso que puede resultar esta medición, se vuelve necesario una estimación de ella. Para solucionar este problema, se realiza la aproximación $I_{ph} \approx I_{sc}$ y se despeja la irradiancia de la ecuación (5).

$$G = \frac{I_{sc} \cdot G_{STC}}{I_{sc,STC} + \alpha_{I_{sc}} \cdot (T - T_{STC})} \quad (10)$$

Para usar todas estas ecuaciones es necesario conocer el valor de la temperatura T a la cual se encuentran las celdas fotovoltaicas en el panel, lo cual es complicado dado el cierre hermético del que disponen. Por tal motivo, es necesaria una estimación a partir de la temperatura ambiente como se muestra en (11) o a partir de la temperatura medida en la superficie detrás del panel como se muestra en (12); donde ΔT puede tomar valores de 2 a 3 °C. Dado que (11) y (12) tendrán dos soluciones, se debe escoger la que haga que el resultado sea coherente con las condiciones de operación actuales.

$$\alpha_{I_{sc}} \cdot T^2 + (I_{ph,STC} - \alpha_{I_{sc}} \cdot T_{STC} - T_a \cdot \alpha_{I_{sc}}) \cdot T - T_a \cdot (I_{ph,STC} - \alpha_{I_{sc}} \cdot T_{STC}) - I_{sc} \cdot G_{STC} \cdot \frac{NOCT - 20}{800} = 0 \quad (11)$$

$$\alpha_{I_{sc}} \cdot T^2 + (I_{ph,STC} - \alpha_{I_{sc}} \cdot T_{STC} - T_m \cdot \alpha_{I_{sc}}) \cdot T - T_m \cdot (I_{ph,STC} - \alpha_{I_{sc}} \cdot T_{STC}) - I_{sc} \cdot \Delta T = 0 \quad (12)$$

Teniendo todos los parámetros necesarios, se soluciona la ecuación (4) para hallar el voltaje de referencia (V_{id}) evaluado en la corriente I_{mpp} , el cual va a representar el panel sin degradación. Como resultado se obtiene la ecuación (13).

$$V_{id}(I_{mpp}) = -V_t \cdot W_0 \left(\frac{I_{sat} \cdot R_h}{V_t} \cdot \exp \left(\frac{R_h \cdot (I_{ph} + I_{sat} - I_{mpp})}{V_t} \right) \right) - I_{mpp} \cdot (R_s + R_h) + R_h \cdot (I_{ph} + I_{sat}) \quad (13)$$

Con estos datos es posible calcular el valor de la resistencia R_s que debe ser conectada al panel para producir el mismo descenso de voltaje que produciría la degradación, esto se muestra en la ecuación (14). Finalmente ΔR_s es dividido en el R_s ideal de la ecuación (8) para normalizar el valor, como se muestra en (15).

$$\Delta R_s = \frac{V_{id}(I_{mpp}) - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (14)$$

$$N\Delta R_s = \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (15)$$

ΔR_s provee una estimación en unidades físicas de la resistencia en serie, esto es útil para comparar degradación con paneles de diferentes modelos, fabricantes o tecnologías. Mientras que ΔR_s es adimensional y permite una comparación entre diferentes paneles del mismo modelo.

3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

PROPUESTO

Para calcular el indicador ΔR_s es necesario medir determinadas variables eléctricas del panel (V_{mpp} , I_{mpp} e I_{sc}) y la temperatura ambiente (T_a). Por lo anterior, se diseñó e implementó un sistema capaz de medir estas variables y enviarlas a un computador para ser procesadas, sin tener que retirar el panel de operación, dicho sistema se muestra en la Figura 4. Este sistema electrónico cuenta con cinco etapas: circuito de alimentación, circuito de sensado, circuito de conmutación, etapa de control y adquisición de datos, y finalmente, cálculo de indicador.

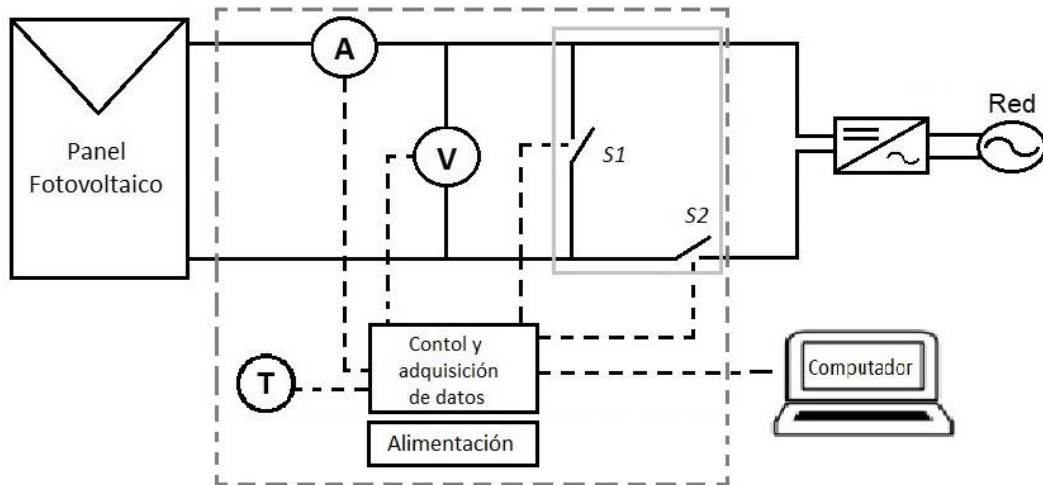


Figura 4. Esquema general del sistema diseñado.

Las medidas de las variables eléctricas del panel se obtienen con la conmutación de relés que cortocircuitan o abren el circuito del panel, además, permiten que se mantenga operando de forma normal. Por medio de un Arduino UNO se controla la

conmutación y organizan los datos provenientes de los sensores para posteriormente ser enviados a un computador que se encarga de ejecutar un algoritmo para el cálculo del indicador y mostrarlos en una interfaz de usuario.

La placa de circuito impreso (PCB) del hardware diseñado para el sistema electrónico se encuentra en el Anexo A. El circuito de alimentación, conmutación y sensado fue implementado en la misma tarjeta. Además, esta posee puertos de conexión directa con el panel y el microinversor Enphase M250 utilizado para este proyecto. Para la protección del circuito se usan dos fusibles, uno para la fuente de alimentación y otro para la entrada del panel, los cuales se encuentran fuera de la tarjeta diseñada.

3.1 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN

Los componentes del circuito necesitan ser alimentados con corriente continua con un valor de tensión específico. La alimentación debe estar aislada de la red eléctrica y del circuito de potencia del sistema. Se necesita una fuente de 5[V] para energizar las bobinas de los relés encargados de la conmutación, además, una fuente dual de +15 y -15[V] para alimentar el sensor de corriente y el sensor de tensión. Para lograr los valores de tensión requeridos es necesario usar transformadores de tensión. En la fuente de alimentación se usan dos transformadores, uno de 6 [V_{rms}] y otro de 12 [V_{rms}] con tap central para obtener la fuente dual.

La alimentación deseada se logra por medio de la implementación de una fuente regulada, es decir, un circuito que toma la energía de la red eléctrica y la suministra a una carga de forma aislada y estable frente a diversas variaciones. La Figura 5 muestra el esquema implementado para la alimentación.

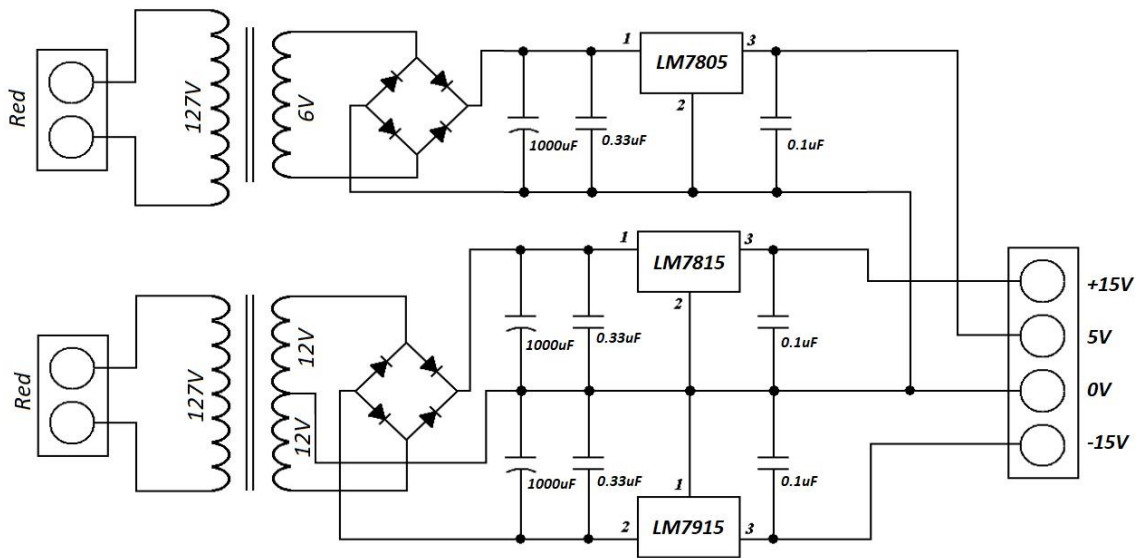


Figura 5. Circuito de alimentación.

Con la intención de transformar la fuente de alterna a constante, se pasa la señal del secundario de los transformadores por un puente rectificador y se utilizan los reguladores LM7805 y LM7815 para las tensiones positivas y el LM7915 para la tensión negativa. Se seleccionaron estos dispositivos debido a su disponibilidad en el mercado y bajo costo, lo cual es apropiado y cumple con los requisitos para esta aplicación. Adicionalmente, se agregan una serie de capacitores con la intención de mejorar la calidad de la señal.

3.2 CIRCUITO DE CONMUTACIÓN

Para generar el cortocircuito en el panel fotovoltaico y calcular la corriente de corto circuito, es necesario usar dos interruptores, uno que permita abrir el circuito que conecta el panel con el microinversor y otro que conecte la terminal positiva y negativa del panel. El control de la secuencia de conmutación se lleva a cabo por el Arduino. Los interruptores fueron implementados usando relés debido a su fácil uso y costo relativamente bajo. El modelo usado es el JQC-3F(T73) de la marca QIANJI²⁴, el cual es capaz de soportar una corriente de hasta 10[A], tensión de $28V_{DC}$ [] y se activa con 5[V].

En la Figura 6 se observa cómo han sido configurados los relés para operar en el circuito de potencia. El par de interruptores S_1 está normalmente abierto mientras que el interruptor S_2 normalmente cerrado, de esta forma se tiene una conexión directa al microinversor y una operación normal.

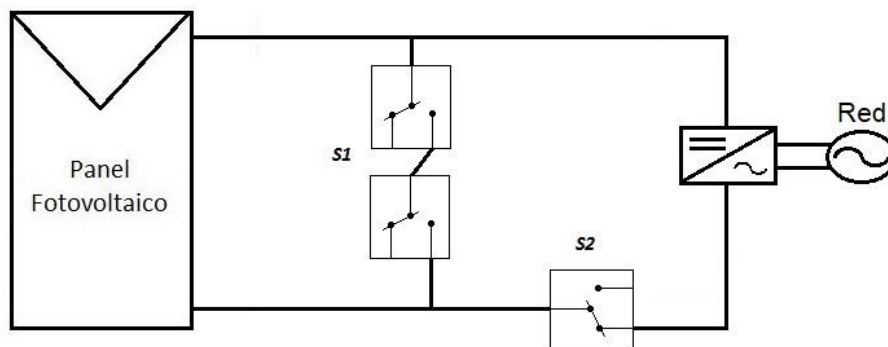


Figura 6. Circuito de conmutación.

²⁴ YUEQING HENGWEI ELECTRONICS. PCB Relay—JQC-3F(T73). [En línea]. 2012. Disponible en [https://voron.ua/files/pdf/relay/JQC-3F\(T73\).pdf](https://voron.ua/files/pdf/relay/JQC-3F(T73).pdf).

Para S_1 fueron usados dos relés en serie debido a que cada uno de estos solo soporta $28[V_{DC}]$ estando abiertos y el sistema funcionando puede superar los $30[V]$. Para este caso, ambos relés reciben el mismo pulso de activación. S_2 solo es activado cuando se desea desconectar el microinversor del panel. El motivo por el cual es obligatorio desconectar el microinversor se explica en la Sección 3.4.

Es necesario un circuito de activación para manejar los relés, dado que la corriente de salida de los pines digitales del Arduino no es suficiente. El circuito de activación de los relés es el mostrado en la Figura 7, en donde se ve la bobina de activación del relé, un transistor BJT 2N2222 controlado por el Arduino que permite la circulación de corriente por la bobina, y un diodo 2N4005 en antiparalelo cuya función es permitir una descarga adecuada de la bobina.

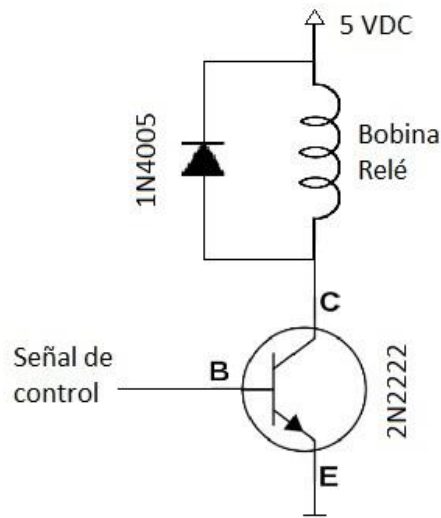


Figura 7. Circuito de activación de relé.

3.3 CIRCUITO DE SENSADO

Para el cálculo del indicador ΔR_s es necesario la medición de algunas características eléctricas del panel fotovoltaico y la temperatura ambiente. Las medidas eléctricas necesarias son: corriente de cortocircuito (I_{sc}), tensión y corriente en el punto de máxima potencia (I_{mpp} , V_{mpp}). La tensión y corriente en el punto de máxima potencia se logra gracias al algoritmo de MPPT que implementa el microinversor Enphase M250 utilizado para este proyecto. De esta forma, con el panel conectado al microinversor se garantiza que la tensión y corriente medida están en el punto de máxima potencia.

3.3.1 Sensor de corriente. La medición de la corriente de cortocircuito y operación se lleva a cabo por medio del transductor de modelo LA 25-NP de la marca LEM. Este sensor es usado para la medición de corrientes en DC, AC y pulsantes de hasta 36[A]. Además, cuenta con un aislamiento galvánico entre el circuito primario y secundario. Entre sus características principales se tienen las siguientes:

- Medición de corrientes de ± 36 [A]
- Rango de medida configurable
- Alimentación dual de 15[V]
- Precisión de 0.5%
- Ancho de banda de 150[KHz]

El circuito de la Figura 8 muestra el esquema general del sensor de corriente. Los pines del 1 al 10 sirven para configurar el rango de corrientes a medir con la intención de mejorar la resolución. Para este proyecto se seleccionó un rango de medida de 0 a 12[A] debido a que en condiciones de alta irradiancia la corriente de cortocircuito puede llegar a ser elevada en un panel con una potencia alrededor de 250[W].

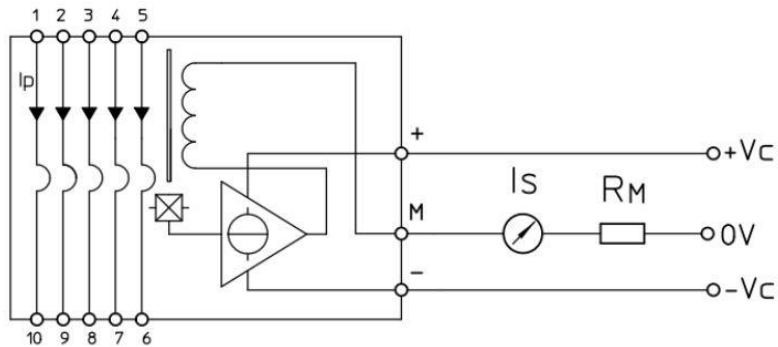


Figura 8. Sensor de corriente LA25-NP ²⁵.

El sensor de corriente entrega a la salida una corriente proporcional a la de entrada que es convertida a un valor de tensión por medio de la resistencia R_M . Se desea que a la salida del sensor haya una tensión de máximo 5 [V] para acoplarla con la entrada analógica del Arduino. Teniendo en cuenta que la corriente máxima a la salida del sensor es de 0.03536[A], se calculó $R_M = 5/0.03536=141.4 [\Omega]$, con lo cual se aproxima $R_M = 150[\Omega]$ ya que es el valor comercial más cercano.

²⁵ LEM. Current transducer LA 25-NP. [En línea] 2011. Disponible en <http://www.lem.com/docs/products/la\%2025-np.pdf>.

3.3.2 Sensor de tensión. Para la medición de la tensión en operación se utilizó el transductor de modelo LV 25-P de marca LEM. Al igual que el sensor de corriente, este permite mediciones en DC, AC y pulsantes y posee un aislamiento galvánico entre el circuito primaria y secundario.

- Tensión nominal del circuito primario de 10-500[V]
- corriente nominal del circuito primario de 10[mA]
- Alimentación dual entre 12-15[V]
- Precisión de 0.9%
- Ancho de banda de 150[kHz]

La configuración del sensor de corriente se da por medio de una resistencia a la entrada y una a la salida ($R_{\{1\}}$ y $R_{\{M\}}$, respectivamente). $R_{\{M\}}$ tiene como función transformar la tensión que se quiere medir en una corriente y $R_{\{M\}}$ permite adaptar la corriente de salida que proporciona el sensor a valores de tensión de salida según los requisitos de diseño. En la Figura 9 se puede observar un diagrama de conexión del sensor de tensión.

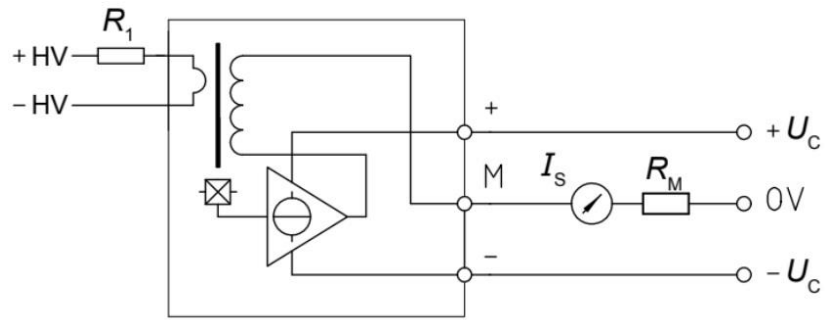


Figura 9. Sensor de tensión LV25-P²⁶.

Para el cálculo de R_1 se tiene en cuenta que la corriente a la entrada del sensor debe ser de 10[mA] máximo. Por tanto, se configura para una medición máxima de 39[V], de forma que pueda abarcar los valores máximos de voltaje en circuito abierto de diversos paneles de 60 celdas. Para esto se requiere una resistencia de $R_1 = V/I = 39/0.01 = 3900 [\Omega]$. El sensor de tensión incluye una resistencia de entrada de 234 $[\Omega]$, lo cual implica que R_1 debe ser aproximadamente de 3666 $[\Omega]$. Para lograr el valor aproximado se usa un arreglo de dos resistencias en serie (3300 y 390 $[\Omega]$), logrando así un valor de 3690 $[\Omega]$, lo cual es aceptable.

Teniendo en cuenta que la corriente máxima a la salida del sensor es de 25[mA] y que se requiere una tensión máxima de 5[V], para acoplarla a la entrada del puerto analógico del Arduino, se usa una resistencia de 200 $[\Omega]$.

²⁶ LEM. Voltage transducer LV 25-P. [En línea]. 2014. Disponible en http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf.

3.3.3 Sensor de temperatura. Para el cálculo del indicador de degradación prematura es necesario estimar la temperatura de la celda fotovoltaica, para esto existen dos métodos, uno midiendo la temperatura en la superficie detrás del panel y otro midiendo la temperatura ambiente. Debido a que usualmente los paneles se instalan en lugares que no son de fácil acceso, esto complica la medición de la temperatura detrás del panel; por tal motivo se optó por la medición de la temperatura ambiente.

El sensor escogido fue el LM35, el cual es un sensor de lineal de temperatura, es relativamente económico y de fácil acceso en el mercado. Este sensor permite una medición de 0 – 100 [°C] y una precisión de ± 0.9 [°C]. Este sensor entrega a la salida un voltaje proporcional a la temperatura. La salida del sensor es lineal con la temperatura, incrementando el valor a razón de 10 [mV/°C].

En la figura 10 se observa la conexión de los tres pines del sensor de temperatura; donde el terminal Vcc va conectado al pin de 5 [V] del Arduino, y su salida se conecta a uno de los puertos analógicos del Arduino.

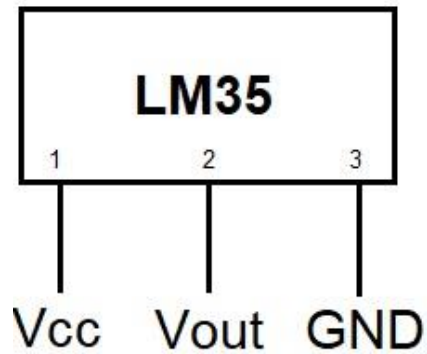


Figura 10. Sensor de temperatura LM35²⁷.

3.4 ALGORITMO PARA LA CONMUTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

La generación de las señales de conmutación, la adquisición de datos y su posterior transmisión a un computador se hace con un Arduino Uno. Esta tarjeta de desarrollo hace uso del microcontrolador Atmega 328P, el cual cuenta con 14 puertos digitales, 6 puertos para lecturas analógicas, un oscilador de 16 [MHz]. Además, la tarjeta posee una conexión USB que permite realizar una comunicación serial con el computador. El Arduino Uno es de los más básicos y económicos de la familia Arduino, pero es suficiente para los requerimientos del actual proyecto.

El algoritmo implementado en el Arduino se encarga de generar las señales de control de los relés con los tiempos adecuados, leer la información proveniente de los sensores y transmitir los datos tomados por el puerto serial. En la Figura 11 se muestra el esquema de conexiones de la etapa de sensado y activación de relés (representados por bobinas).

²⁷ TEXAS INSTRUMENTS. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. [En línea]. 2017. Disponible en <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.

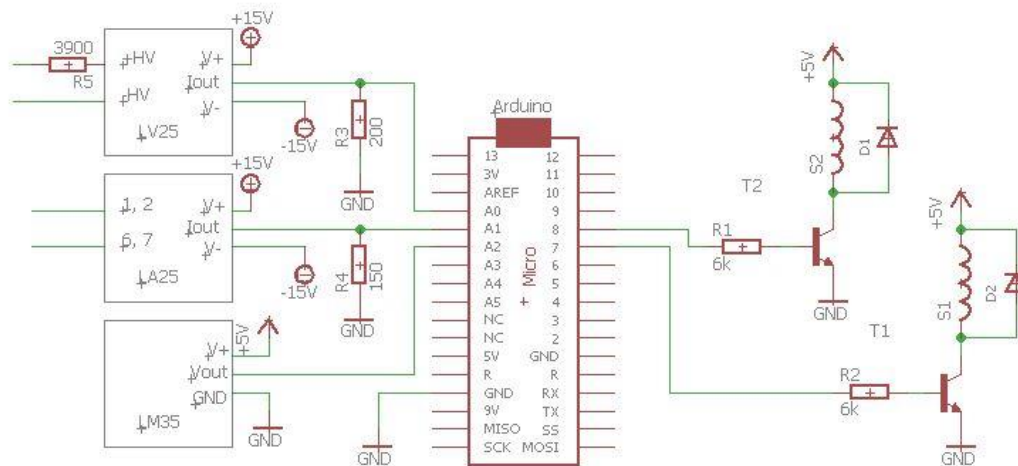


Figura 11. Circuito de control.

Estos pasos se ejecutan mediante un sencillo programa, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 12. El algoritmo inicia con una señal de activación proveniente de la interfaz gráfica al momento de calcular el indicador. Cuando se recibe esta señal se toman cinco muestras de las medidas de corriente y voltaje correspondientes a I_{mpp} y V_{mpp} respectivamente; se toman cinco muestras para evitar errores ante una posible medición equivocada; los intervalos entre medidas son de 20 [μ s], que es un tercio del ancho de banda de los sensores; dichas medidas se promedian y se envían al computador. Inmediatamente se activa el relé S_2 para desconectar el microinversor y se espera 20 [ms] para permitir que el relé conmute correctamente. Pasado este tiempo se activa S_1 para cortocircuitar el panel; se esperan 20[ms] y se toman cinco medidas de corriente correspondientes a I_{sc} , se promedian y se envía el dato. Luego se desactiva el corto circuito y se conecta el

microinversor. Por último, se mide y se envía el dato de la temperatura. El código implementado se muestra en el Anexo B.

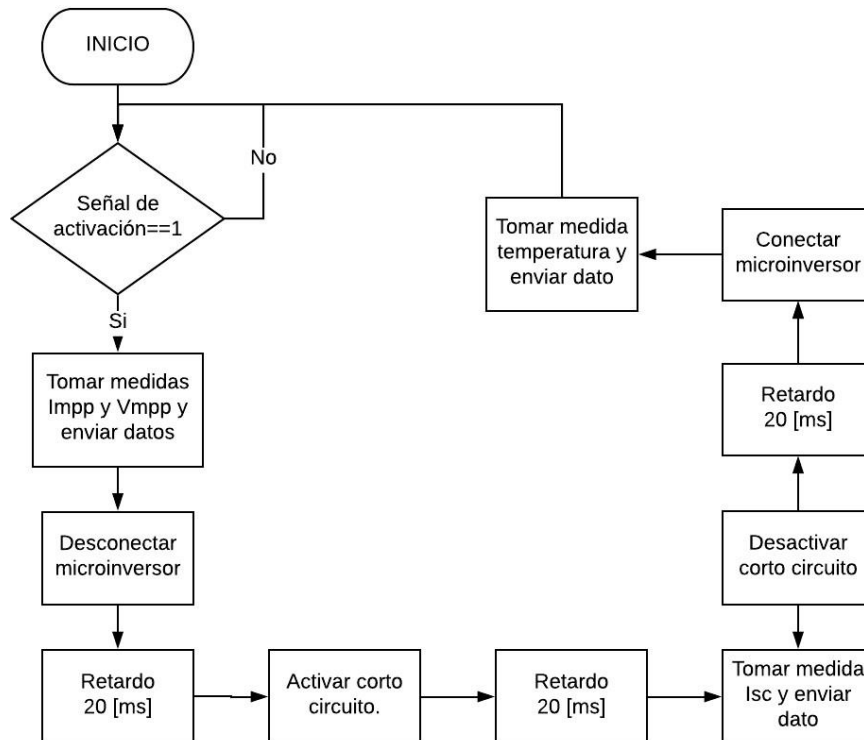


Figura 12. Diagrama de flujo del código implementado en Arduino.

Cabe resaltar que, al activar S_1 se debe estar seguro de que S_2 ya ha conmutado, de lo contrario, se pondría en corto el microinversor a la entrada y se generarían grandes corrientes ya que el microinversor tiene condensadores de gran valor a la entrada. Es por esto por lo que se esperan 20 [ms] después de activar cada relé, que es aproximadamente el doble del tiempo que indica la hoja de datos. En la Figura 13 se muestran las señales de activación generadas por el Arduino, donde

la línea amarilla representa la señal de activación del relé S_1 y la línea azul representa al relé S_2 . En total, considerando los tiempos que le toma al Arduino hacer las distintas operaciones, el microinversor dura desconectado aproximadamente 61 [ms].

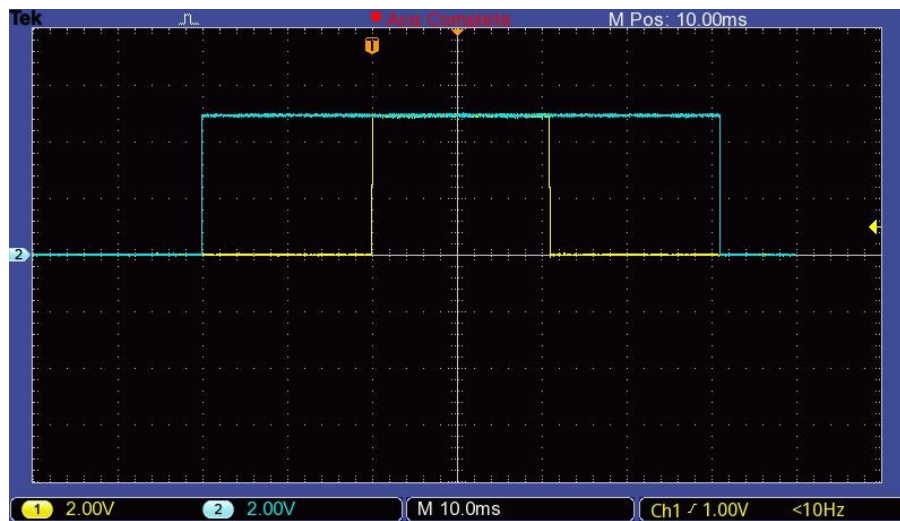


Figura 13. Señales de activación generadas por el Arduino para la activación de los relés.

3.5 PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DEL INDICADOR

El proceso para establecer la comunicación con el Arduino, el cálculo del indicador y el desarrollo de la interfaz gráfica se ejecuta en un computador con la ayuda del software MATLAB. Esta plataforma permite hacer ciertos cálculos de manera sencilla comparado otras plataformas, tal es el caso de la función W de Lambert que se usa en las ecuaciones (3), (4) y (13)

En la Figura 14 se muestra la interfaz gráfica de usuario, en ella es necesario seleccionar el panel al que se va a calcular el indicador o introducir manualmente los parámetros necesarios; posteriormente hacer clic en el botón "Iniciar" para correr el programa. El diagrama de flujo del código implementado en MATLAB se muestra en la figura 15. El código está diseñado para tomar lectura de las variables del panel cada 20 segundos y mostrar los resultados en 6 gráficas. Las gráficas 1,4,5 y 6 muestran el valor de ΔR_s , I_{sc} , I_{mpp} y V_{mpp} calculados en el tiempo respectivamente, mientras que las gráficas 2 y 3 muestran las curvas aproximadas I-V y P-v de la última medición. Todos los datos tomados, así como los cálculos de indicador se guardan en un documento Excel. El código completo de esta interfaz se muestra en el anexo C.

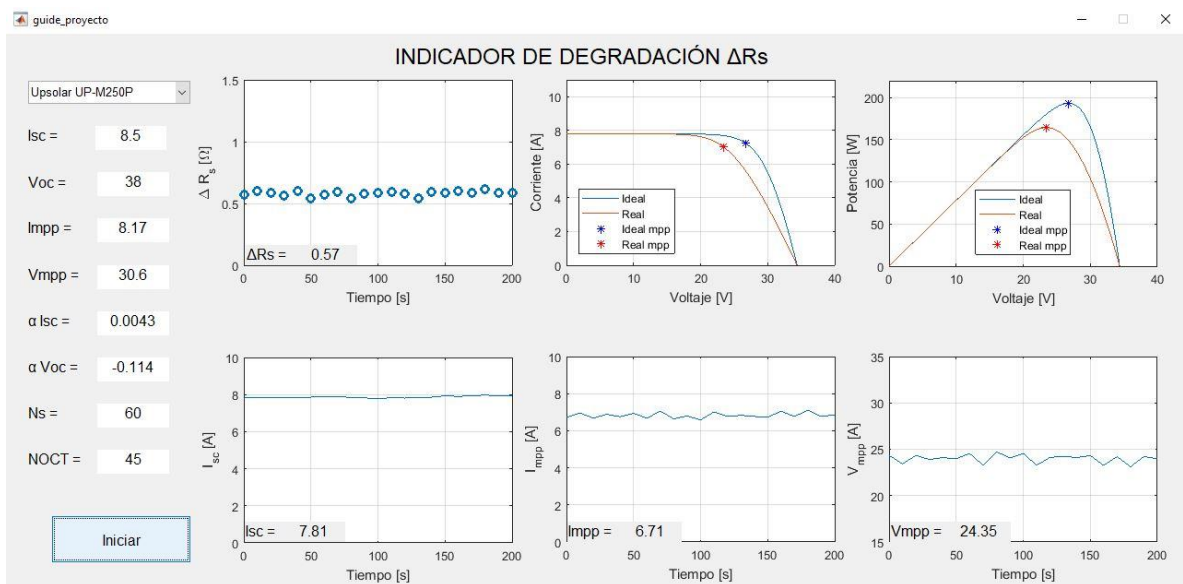


Figura 14. Interfaz gráfica de usuario.

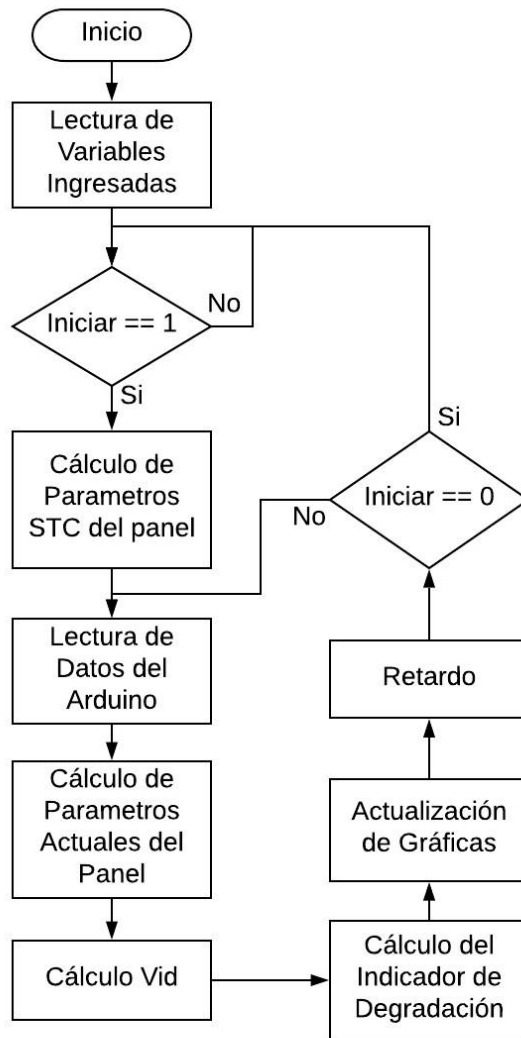


Figura 15. Diagrama de flujo implementado en MATLAB.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La simulación del sistema electrónico diseñado se realiza en dos plataformas. El circuito de potencia se simula en el software de simulación de circuitos eléctricos PSIM y los datos obtenidos de este son llevados a MATLAB donde se ha desarrollado un programa que calcula el indicador.

Teniendo en cuenta que para el cálculo del indicador es necesario medir unas variables eléctricas del panel, se simula en PSIM el circuito que conmuta y permite obtener los datos de la tensión y corriente en operación (V_{mpp} e I_{mpp}) y la corriente en cortocircuito (I_{sc}) del panel. Los anteriores datos más la información del datasheet del panel y la temperatura ambiente, son los valores de entrada del programa en MATLAB.

En la figura 16 se puede observar el circuito simulado en el software PSIM, en el cual se usó el modelo físico de un panel fotovoltaico para mejorar la calidad de la simulación. Las condiciones de irradiancia y temperatura ambiente fueron simuladas teniendo en cuenta los valores STC (1000 [W/m²] y 25[°C], respectivamente).

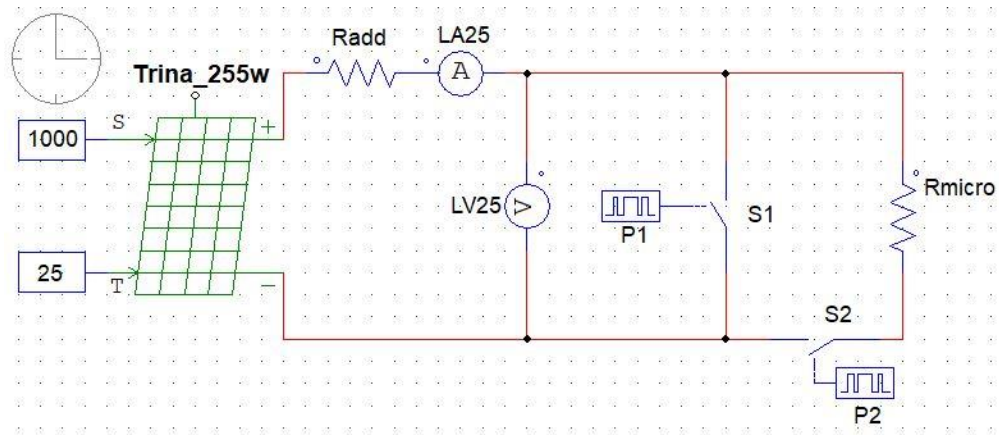


Figura 16. Esquema de simulación del circuito en PSIM.

Teniendo en cuenta que el microinversor conectado al sistema (Enphase M250 ²⁸) cuenta con un algoritmo de MPPT se toman los valores de tensión y corriente en el punto de máxima potencia y se modela el funcionamiento del microinversor como una carga resistiva de valor $R_{\text{micro}} = V_{\text{mpp}}/I_{\text{mpp}} = 30.5/8.37 = 3.64[\Omega]$. Los datos de tensión y corriente máxima son tomados del datasheet del panel Trina Solar de 255[W] ²⁹. Para validar el indicador es necesario agregar una resistencia R_{add} en serie al panel y comparar el indicador calculado con esta.

Los parámetros usados para simular el panel en PSIM se observan en la figura 17. Estos se obtuvieron por medio de una herramienta propia de PSIM llamada *Solar Module (physical model)*, con la cual es posible obtener un modelo usando los datos

²⁸ ENPHASE. Enphase M250 Microinverter. [En línea]. 2017. Disponible en https://enphase.com/sites/default/files/M250_DS_EN_60Hz.pdf.

²⁹ TRINA SOLAR. TSM-PC05A The honey module. [En línea]. 2012. Disponible en <http://www.totalsolarsolutions.com.au/wp-content/uploads/downloads/TRINA-PC05A-250W.pdf>.

del datasheet. La interfaz de usuario de la herramienta en PSIM se puede ver en la figura 18.

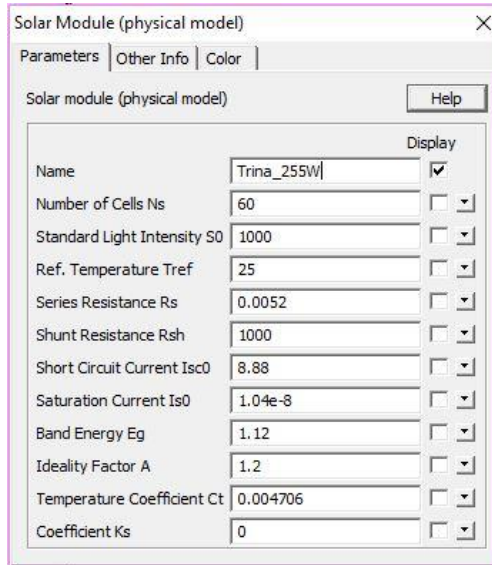


Figura 17. Parámetros de simulación del panel Trina Solar TSM-255PC05.

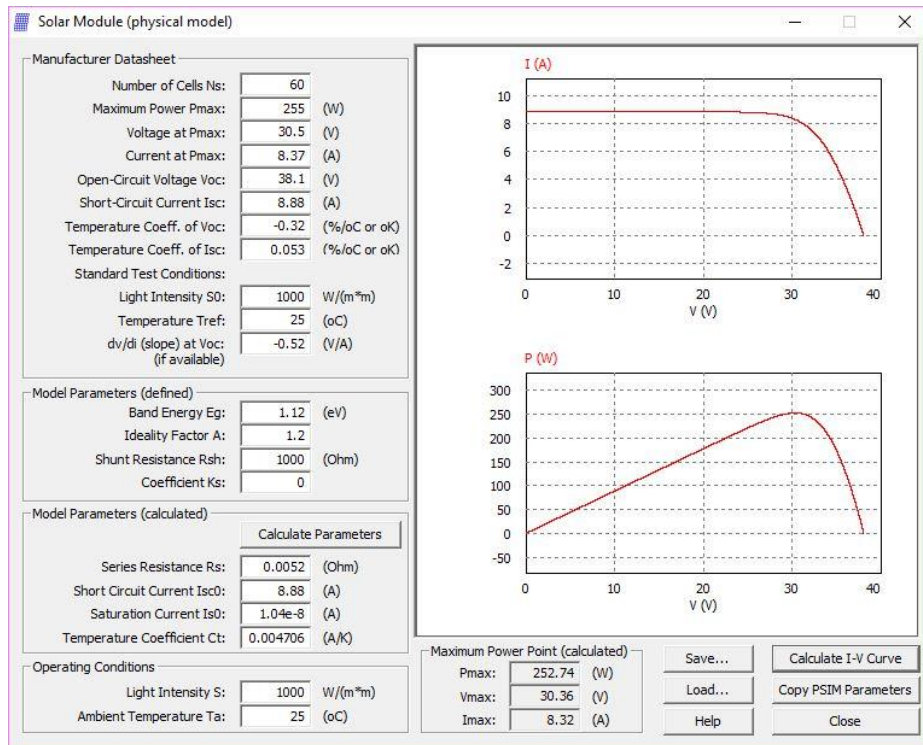


Figura 18. Herramienta para el cálculo de los parámetros del panel.

En la tabla 2 se observan los resultados de las simulaciones. Se puede ver que el indicador ΔR_s da una estimación de la resistencia en serie agregada, con un error máximo de 3.33%.

	Simulación PSIM				Cálculo MATLAB		%Error R_s
	$R_{add} [\Omega]$	$V_{mpp} [V]$	$I_{mpp} [A]$	$I_{sc} [A]$	$\Delta R_s [\Omega]$	$N\Delta R_s$	
R_{add0}	0	30.65	8.41	8.87	-0.04	-0.11	—
R_{add1}	0.3	29.3	8.1	8.87	0.29	0.77	3.33
R_{add2}	0.6	27.9	7.7	8.87	0.58	1.69	3.33
R_{add3}	0.9	26.5	7.3	8.87	0.88	2.63	2.22

Tabla 2. Resultados de simulación.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

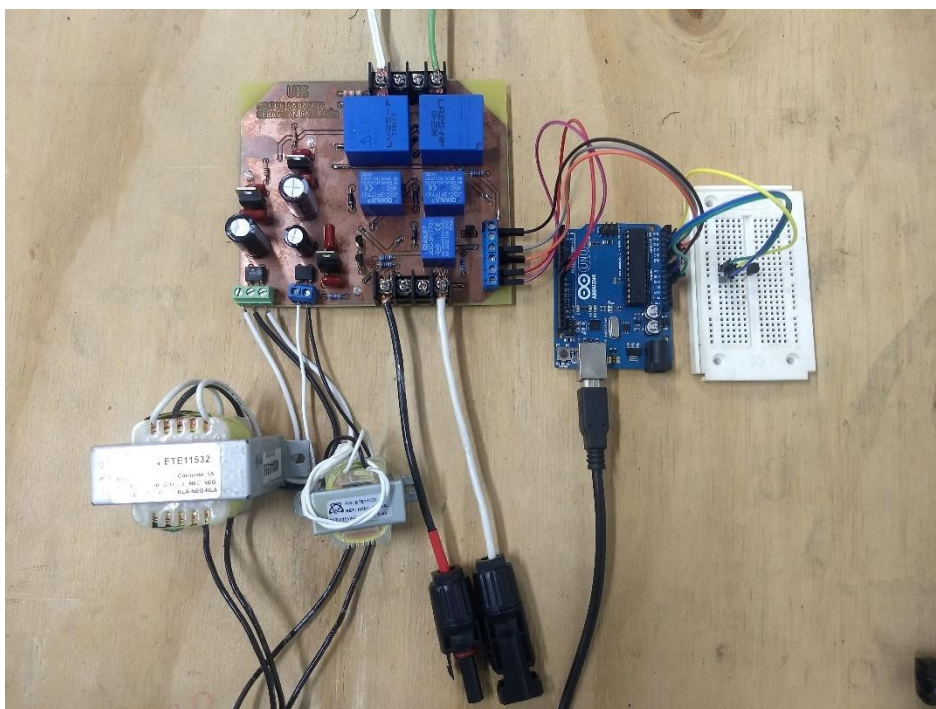


Figura 19. Montaje experimental del dispositivo diseñado.

En la figura 19 se puede ver el montaje del dispositivo para las pruebas experimentales. Se observan los conectores del estándar MC4, necesarios para poder conectar el panel y el microinversor. Las pruebas se realizaron con dos paneles fotovoltaicos ubicados en el edificio de investigaciones de la sede UIS Guatiguará. El primero es un panel Upsolar UP-M250P³⁰ de 250[W], el segundo es un Trina Solar TSM-255PC05A³¹ de 255 [W].

³⁰ UPSOLAR. Polycrystalline PV module. [En línea]. 2016. Disponible en <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Upsolar/3102/UP-M250P/specification-data-sheet.html>.

³¹ TRINA SOLAR. TSM-PC05A The honey module. [En línea]. 2012. Disponible en <http://www.totalsolarsolutions.com.au/wp-content/uploads/downloads/TRINA-PC05A-250W.pdf>.

Con el fin de poder evaluar correctamente el funcionamiento del sistema electrónico, se hicieron pruebas añadiendo resistencias en serie (R_{add}) a la salida del terminal positivo del panel para simular la degradación. Los valores de resistencias usadas fueron: $0.32[\Omega]$, $0.63[\Omega]$ y $0.94[\Omega]$, que corresponden aproximadamente a 1,2 y 3 veces el valor de R_s en condiciones STC de ambos paneles.

Al momento de calcular los parámetros del modelo de un solo diodo para condiciones STC, es decir, con datos extraídos de la hoja de datos, se obtuvo un resultado negativo para el valor de R_h . Por tal motivo, fue necesario el uso de la herramienta *Curve Fitting* de MATLAB para realizar una estimación de R_h a partir de la ecuación explícita de la corriente mostrada en ecuación (3) y de los otros parámetros ya calculados. En la figura 20 se muestra la interfaz de esta aplicación y uno de los resultados obtenidos.

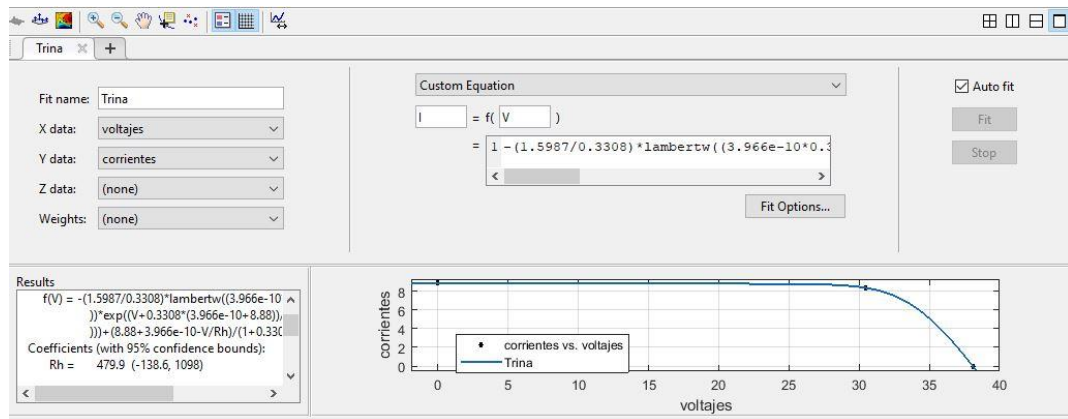


Figura 20. Interfaz de la aplicación *Curve Fitting* usada para la estimación de R_h .

En comparación con las condiciones simuladas en el Capítulo 4, $R_{add0} \neq 0[\Omega]$ ya que existe un valor asociado a la resistencia de los cables y al envejecimiento natural del panel. Lo anterior, se debe tener en cuenta en el análisis de los resultados experimentales ya que el indicador calculado da una aproximación de la suma entre el valor de referencia (R_{add0}) y el valor asociado a la degradación ($R_{add1,2,3}$).

La resistencia que se genera en los cables debido a la distancia entre el sitio donde están ubicados los paneles y el sitio donde se hicieron las pruebas se calcula en la ecuación (16), teniendo en cuenta la resistencia por metro del conductor calibre 10 usado ($R_{AWG10/m}$) y la distancia (D) en metros.

$$R_{AWG10}(D) = R_{AWG10/m} \cdot D = 0.003275 \cdot 60 = 0.1965 [\Omega] \quad (16)$$

Las pruebas realizadas para el cálculo del indicador se hicieron en el laboratorio, con condiciones de temperatura un poco diferentes a las medidas cerca del sitio de instalación de los paneles, esto introduce errores en la medición de temperatura ambiente; aunque, dicho error no era superior a 3 [°C], dado que el valor medido se comparó con el mostrado por la estación meteorológica instalada en el edificio de investigaciones.

5.1 RESULTADOS PANEL UPSOLAR

En las Figuras 21, 22, 23 y 24 se presentan los resultados experimentales obtenidos usando el panel Upsolar UP-M250P. Las gráficas muestran el valor del indicador con las diferentes resistencias añadidas (R_{add}) en función del tiempo. El indicador fue evaluado con una irradiancia que variaba de 700 a 800 $[W/m^2]$ y una temperatura ambiente alrededor de 27 $[^{\circ}C]$, esta última, medida en el laboratorio. Para tener un punto de comparación y un dato más certero, el valor de la irradiancia fue tomado de la estación meteorológica instalada en el techo del edificio.

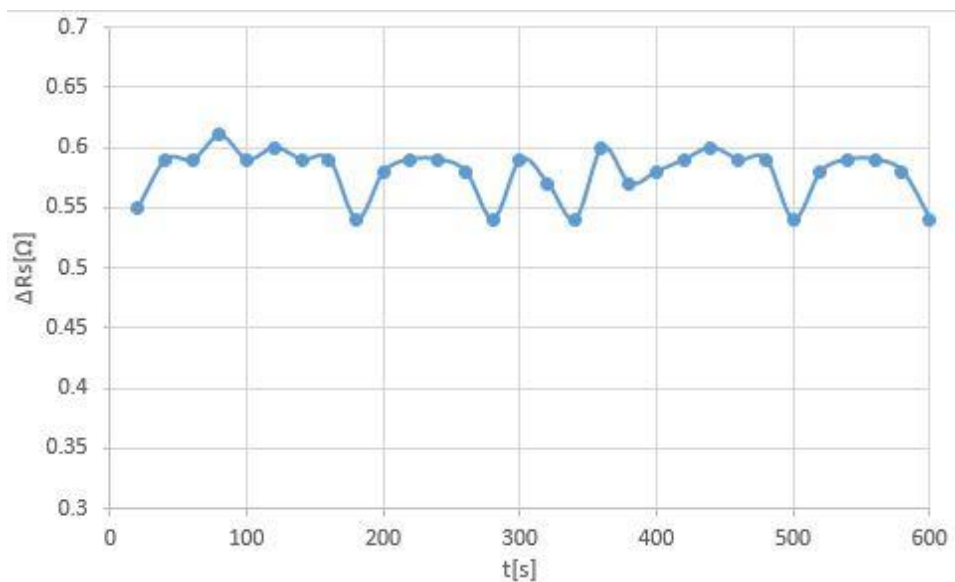


Figura 21. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0[\Omega]$ con panel Upsolar.

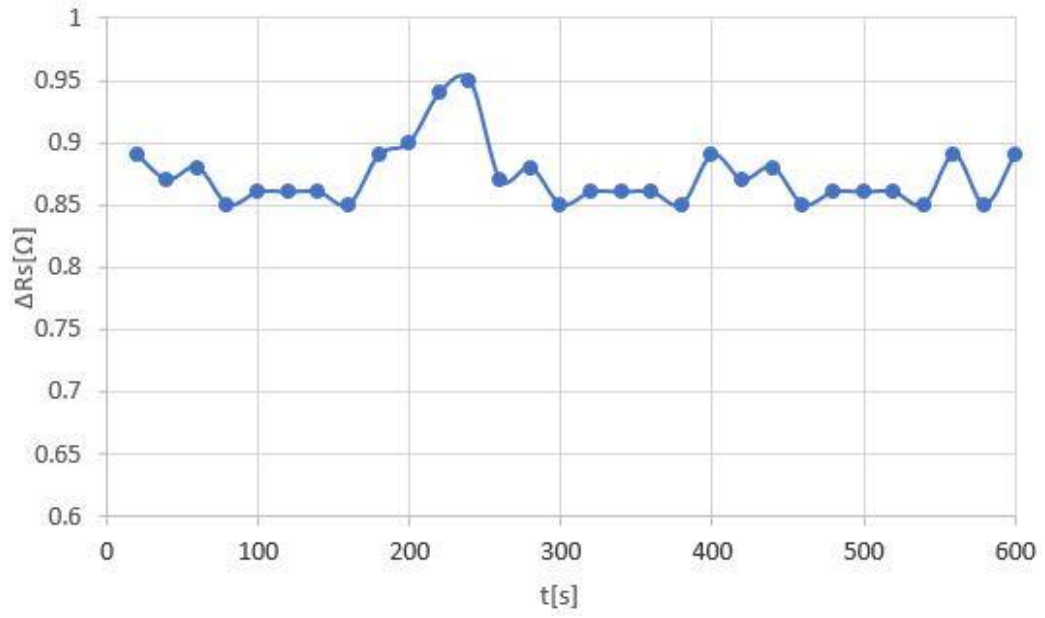


Figura 22. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0,32[\Omega]$ con panel Upsolar.

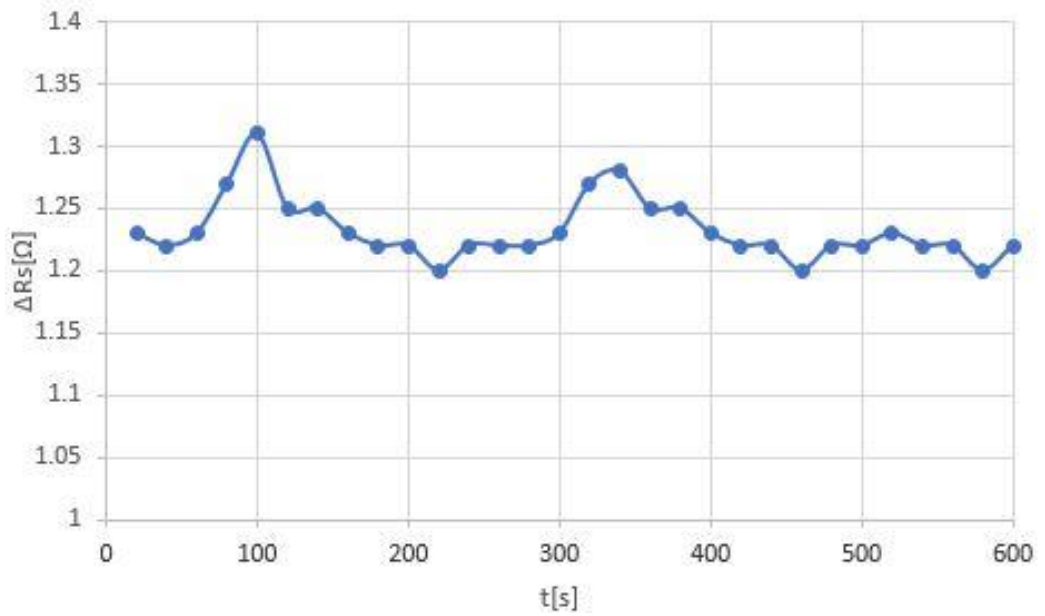


Figura 23. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0,63[\Omega]$ con panel Upsolar.

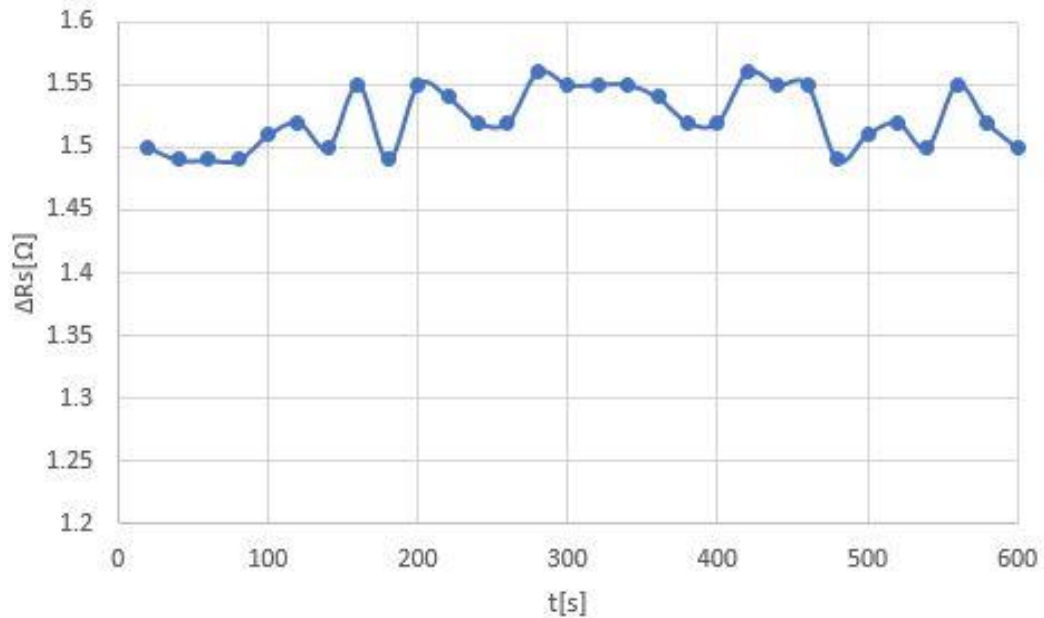


Figura 24. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.94[\Omega]$ con panel Upsolar.

La tabla 3 muestra el promedio de los datos tomados experimentalmente. La figura 21, que corresponde a la gráfica para $R_{add} = 0 [\Omega]$, se ve una tendencia en el indicador hacia un valor entre 0.55 y 0.6 $[\Omega]$. El valor promedio del indicador para este caso es de 0.58 $[\Omega]$, pero aproximadamente 0.2 $[\Omega]$ son debido a la resistencia del cable y los 0.38 $[\Omega]$ restantes corresponden a una degradación ya presente y/o envejecimiento del panel, ya que este tiene más de dos años de operación.

$R_{add} [\Omega]$	$\Delta R_{s,prom} [\Omega]$	$V_{mpp,prom} [V]$	$I_{mpp,prom} [A]$	$I_{sc,prom} [A]$
0.00	0.58	24.06	6.81	7.87
0.32	0.87	22.68	6.47	7.62
0.63	1.23	21.53	5.93	7.11
0.94	1.52	20.00	5.96	7.46

Tabla 3. Promedio de datos del panel Upsolar.

En la figura 22 se observa como el valor del indicador oscila entre 0.85 y 0.9 [Ω], el cual es un valor esperado al añadir una resistencia de 0.32[Ω]. Para la $R_{add} = 0.63$ [Ω] de la grafica 23 se puede ver que el intervalo predominante de variación es de 1.2 a 1.25 [Ω]. finalmente, para $R_{add} = 0.94$ [Ω] en la figura 24 se nota una variación de 1.5 a 1.55 [Ω]. Los resultados obtenidos en las pruebas con el panel Upsolar son satisfactorios ya que los rangos en los que varia el indicador coinciden con lo esperado y dan una buena aproximación de las resistencias añadidas.

En las gráficas del panel Upsolar se pudo observar que en algunos momentos se presentaban variaciones grandes en el valor del indicador, esto es normal debido a los cambios de irradiancia. Sin embargo, la máxima variación obtenida fue de 112.93\% con respecto al promedio del indicador ($R_{add} = 0.63$ [Ω]) para un tiempo específico, lo cual no afecta la estimación del crecimiento de R_s .

5.2 RESULTADOS PANEL TRINA SOLAR

En las figuras 25, 26, 27 Y 28 se presentan los resultados experimentales obtenidos usando el panel Trina Solar TSM-255PC05A. Las gráficas muestran el valor del indicador con las diferentes resistencias añadidas en función del tiempo. Las condiciones de irradiancia y temperatura son similares a las del panel Upsolar.

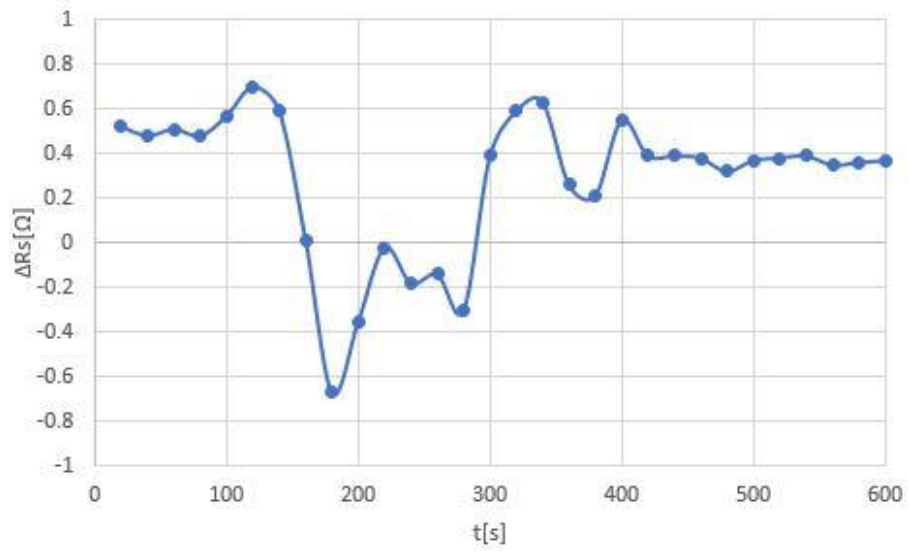


Figura 25. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0 \text{ [}\Omega\text{]}$ con panel Trina Solar.

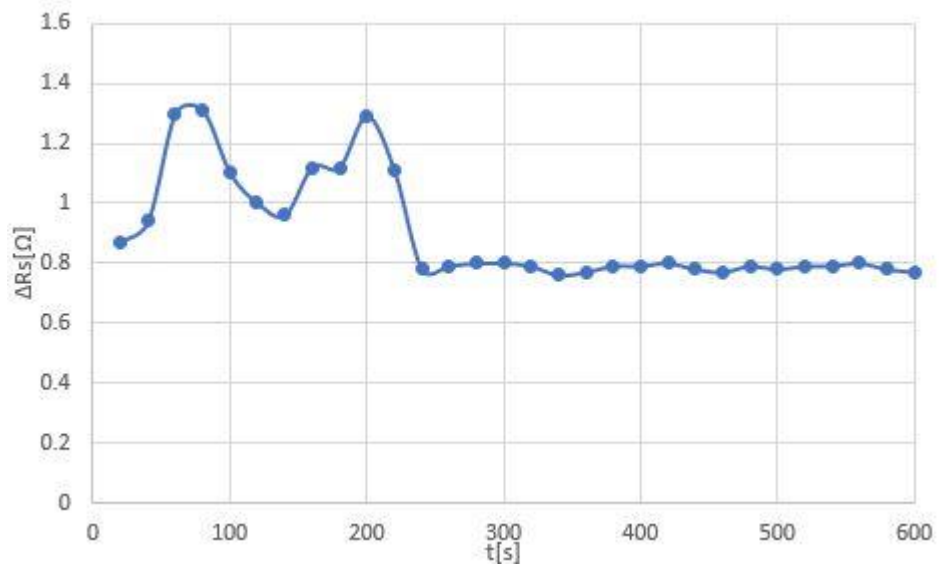


Figura 26. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.32 \text{ [}\Omega\text{]}$ con panel Trina Solar.

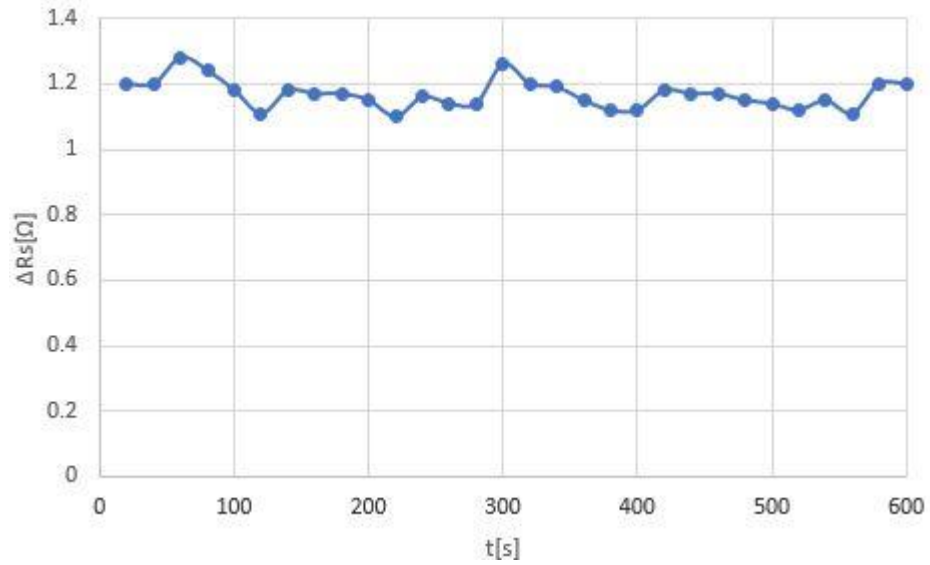


Figura 27. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.63$ [Ω] con panel Trina Solar.

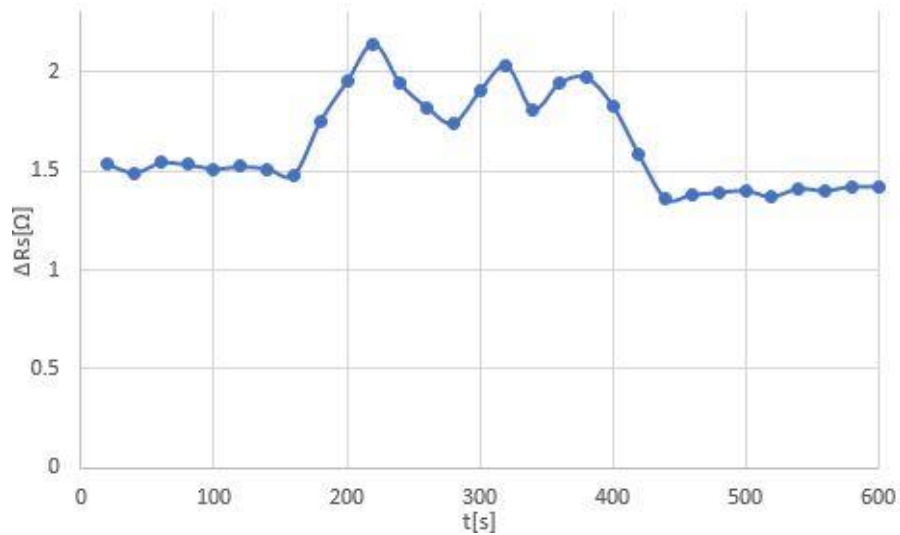


Figura 28. Resultado indicador cuando $R_{add} = 0.94$ [Ω] con panel Trina Solar.

En la figura 25 se puede observar la variación del indicador cuando no hay resistencia agregada, para este caso se nota que el indicador toma un valor cercano a 0.4 [Ω]. El indicador del panel Trina Solar es un poco menor al del panel Upsolar,

esto puede deberse a que es un panel relativamente nuevo ya que posee pocos meses de instalado.

Observando las gráficas 26, 27 y 28 se puede ver que el rango de variación de los valores del indicador esta levemente por encima de lo esperado, aun así se encuentran en un rango aceptable y permiten una aproximación cercana a la resistencia agregada.

Comparando las gráficas del panel Upsolar con las del panel Trina Solar se nota que este último posee unas variaciones más grandes en el valor del indicador, esto es debido a las condiciones en las que fueron tomadas las medidas para los cálculos. En la figura 29 se puede observar una gráfica donde se compara el indicador con la corriente de cortocircuito en el mismo intervalo de tiempo para $R_{add} = 0.32 [\Omega]$. Para el momento en el que fue evaluado el indicador, el cielo se nubló, lo que provocó que la irradiancia se redujera en gran medida afectando también el valor de la corriente del panel y el cálculo del indicador. Este comportamiento indica que el cálculo del indicador se debe hacer para valores de I_{sc} medios y altos. En el caso del panel Trina Solar para valores mayores a 5.8[A] que corresponde al 66% de $I_{sc,STC}$.

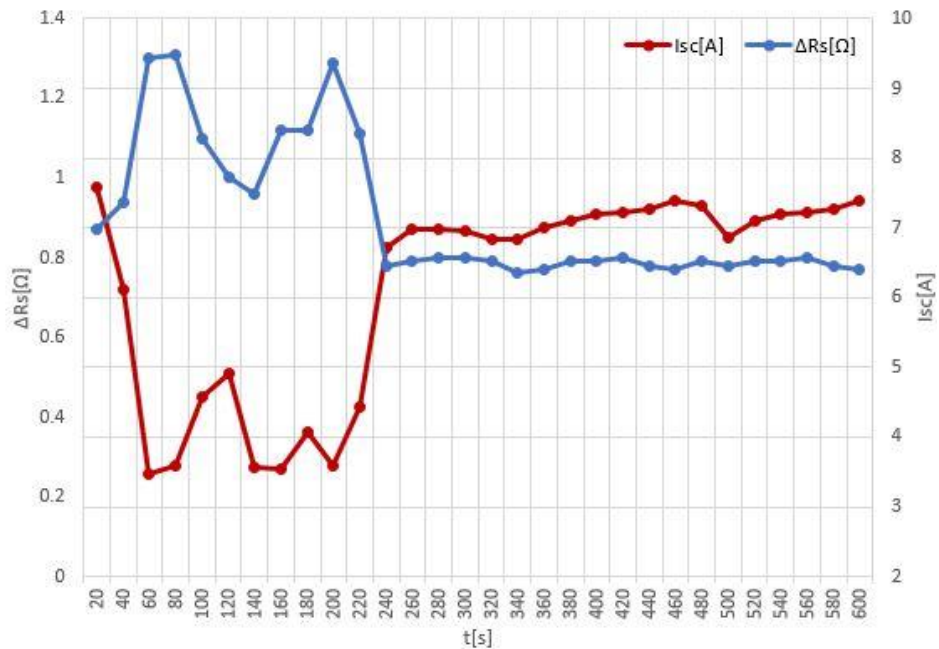


Figura 29. Valor del indicador y la corriente de cortocircuito para $R_{add} = 0.32 [\Omega]$ en el panel Trina Solar.

La tabla 4 muestra el promedio de los datos experimentales para el panel Trina Solar. Para este caso se usaron solo los datos válidos, despreciando los valores de corriente de corto circuito menores a 5.8[A].

$R_{add} [\Omega]$	$\Delta R_{s,prom} [\Omega]$	$V_{mpp,prom} [V]$	$I_{mpp,prom} [A]$	$I_{sc,prom} [A]$
0.00	0.41	25.01	5.78	6.34
0.32	0.79	20.17	6.32	7.10
0.63	1.17	20.62	6.51	7.79
0.94	1.45	19.25	6.55	8.44

Tabla 4. Promedio de datos del panel Trina Solar.

6. OBSERVACIONES

- Para poner en funcionamiento el microinversor Enphase M250, fue necesario conectarlo al dispositivo Envoy del mismo fabricante para configurar el perfil de red adecuado, debido a que estos microinversores están configurados por defecto a una frecuencia de 50 [Hz], mientras que, la frecuencia necesaria es de 60 [Hz].
- Pruebas realizadas con el microinversor usado en este proyecto, mostraron que se podía mantener desconectado el microinversor aproximadamente 4.1 [s] antes de que se reiniciara; lo cual hace perfectamente válido el tiempo de 61 [ms] que el sistema electrónico mantiene desconectado el microinversor para hacer las mediciones respectivas.
- Al momento de calcular los parámetros del modelo de un solo diodo, se notó que el valor de R_h era negativo. Por tal motivo fue necesario el uso de la herramienta *Curve Fitting* de MATLAB para realizar una estimación de R_h a partir de la ecuación explícita de la corriente del panel y de los parámetros ya calculados.
- Un cálculo estimado de la energía perdida cada vez que se desconecta el microinversor, asumiendo un punto de operación máximo de 250 [W], muestra que la energía perdida es de 4.24 [mWh]
- La forma en que están conectados los relés está pensada en permitir la operación normal del sistema panel-microinversor aun cuando el dispositivo

electrónico no esté en funcionamiento. Esto permite que la generación de energía no se detenga ante un posible fallo en el dispositivo diseñado.

- Todas las pruebas hechas para el cálculo del indicador se hicieron en el laboratorio 308 del edificio de investigaciones de la UIS, con condiciones de temperatura un poco diferentes a las medidas cerca del sitio de instalación de los paneles; esto probablemente introduce errores en la medición de temperatura ambiente; aunque, dicho error no era superior a 3 °C, ya que el valor medido se comparó con el mostrado por la estación meteorológica instalada en el edificio.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el diseño y la implementación de un sistema electrónico capaz de calcular un indicador de degradación que mide el aumento de la resistencia en serie de un panel, a partir del modelo de un solo diodo. El sistema diseñado muestra en una interfaz gráfica los resultados del cálculo del indicador en función del tiempo y permite ver como se afecta el cálculo al no haber las condiciones de irradiancia suficientes.

Se realizó la simulación del sistema propuesto en dos etapas usando software especializado para cada una de ellas. El circuito de potencia fue simulado en PSIM y el cálculo del indicador se realizó en MATLAB, probando así el programa diseñado por los autores del presente proyecto. Los resultados obtenidos no difieren de los datos esperados.

El sistema electrónico propuesto mostró ser capaz de generar la secuencia de conmutación adecuada, tomar las medidas necesarias y enviar dicha información a un computador para posteriormente hacer el cálculo del indicador. Este sistema permite guardar los datos sensado y los cálculos del indicador en una tabla de manera ordenada y exportar los datos a una tabla de Excel.

Se analizaron los resultados obtenidos y se determinó que el sistema electrónico calcula de manera aproximada los valores de resistencias usadas para simular la

degradación. También se determinó que las condiciones atmosféricas pueden influir considerablemente en el cálculo del indicador, por tanto, son necesarias unas determinadas condiciones de irradiancia para el correcto funcionamiento del dispositivo.

Se propone un mejoramiento del sistema electrónico de forma que se incluya: un sistema de comunicación inalámbrica para monitoreo remoto del indicador, la posibilidad de permitir un ajuste al sensor de voltaje para poder usar paneles de distintos rangos de potencia y un cambio de los elementos usados de forma que se pueda montar todo el sistema en una sola tarjeta. Además, se propone una adaptación al estándar IP65, el cual resiste condiciones de polvo y agua, para poder instalar el dispositivo cerca al panel.

BIBLIOGRAFÍA

ACCARINO, J, *et al.* Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model. IEEE ICCEP. 2013, pp. 62–66.

BAI, Jianbo, *et al.* Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules. Energy Convers. Manage. 2014. vol. 79, pp. 294–303.

BASTIDAS, Juan David, *et al.* Model-Based Degradation Analysis of Photovoltaic Modules Through Series Resistance Estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. vol. 62, no. 11, p. 7256-7265.

BASTIDAS, Juan David, *et al.* Photovoltaic modules diagnostic: An overview, IECON Proc. Industrial Electron. Conf. 2013. pp. 96–101.

BASTIDAS, Juan David. Modeling, diagnosis and maximum power point tracking of photovoltaic arrays under mismatched conditions. Trabajo de grado Tesis Doctoral en Ingeniería Electrónica. Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 2014. pp. 23–37, 151–168.

DE SOTO, W; KLEIN, A y BECKMAN, W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Energy. 2006. vol. 80, no. 1, pp. 78–88.

DJORDJEVIC, Sinisa; PARLEVLIT, David y HENNINGS, Philip. Detectable faults on recently installed solar modules in Western Australia, Renew. Energy, 2014. vol. 67, pp. 215–221.

ENPHASE. Enphase M250 Microinverter. [En línea]. 2017. Disponible en https://enphase.com/sites/default/files/M250_DS_EN_60Hz.pdf.

KAHOUL, Nabil; HOUABES, Mourad y SADOK, Mohammed. Assessing the early degradation of photovoltaic modules performance in the Saharan region, Energy Convers. Manage. 2014. vol. 82, pp. 320–326.

KING, D; BOYSON, W y KRATOCHVILL, J. Photovoltaic array performance model, Sandia Nat. Lab., 2004. Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep.

LEM. Current transducer LA 25-NP. [En línea] 2011. Disponible en <http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf>.

LEM. Voltage transducer LV 25-P. [En línea]. 2014. Disponible en http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf.

LUQUE, Antonio y HEGEDUS, Steven. Handbook of photovoltaic science and engineering. 2003. 1179 p. ISBN 0-471-49196-9.

MESSENGER, Roger y VENTRE, Jerry. Photovoltaic systems engineering, 2 ed. 2004. 458 p. ISBN 0-203-58847-9.

MUNOZ, Miguel Angel, *et al.* Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions, Sol. Energy, 2011. vol. 85, no. 9, pp. 2264–2274.

REGUERA, Francisco. Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos. Trabajo de grado Máster Oficial en Tecnología de los Sistemas de Energía Solar. Universidad Internacional de Andalucía. 2015. 60 p.

RENALDER, Lea y WILLIAMSON, Laura. Renewable energy tenders and community [Em]power[ment]. [En línea]. París: REN21. 2018., 60 p. Disponible en <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/09/LAC-Report.pdf>.

TEXAS INSTRUMENTS. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. [En línea]. 2017. Disponible en <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.

TRINA SOLAR. TSM-PC05A The honey module. [En línea]. 2012. Disponible en <http://www.totalsolarsolutions.com.au/wp-content/uploads/downloads/TRINA-PC05A-250W.pdf>.

UPSOLAR. Polycrystalline PV module. [En línea]. 2016. Disponible en <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Upsolar/3102/UP-M250P/specification-data-sheet.html>.

VAN DYK y MEYER. Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. Renew. Energy. 2004. vol. 29, no. 3, pp. 333–344.

VILLALVA, Marcelo; GAZOLI, Jonas y FILHO, Ernesto. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Trans. Power Electron. 2009. vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208.

YUEQING HENGWEI ELECTRONICS. PCB Relay—JQC-3F(T73). [En línea]. 2012. Disponible en [https://voron.ua/files/pdf/relay/JQC-3F\(T73\).pdf](https://voron.ua/files/pdf/relay/JQC-3F(T73).pdf).