

**SIMULACIÓN DE UN MODELO DE ARREGLO FOTOVOLTAICO EN
CONFIGURACIÓN SERIE-PARALELO OPERADO BAJO CONDICIONES
IRREGULARES Y UN ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE
MÁXIMA POTENCIA**

LUIS ALEJANDRO BOHÓRQUEZ VILLARREAL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

**SIMULACIÓN DE UN MODELO DE ARREGLO FOTOVOLTAICO EN
CONFIGURACIÓN SERIE-PARALELO OPERADO BAJO CONDICIONES
IRREGULARES Y UN ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE
MÁXIMA POTENCIA**

LUIS ALEJANDRO BOHÓRQUEZ VILLARREAL

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

DIRECTOR

JUAN DAVID BASTIDAS RODRIGUEZ

Ph.D. En ingeniería con énfasis en ingeniería eléctrica y electrónica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A mi Madre, quien me apoyo, tuvo fe cada día, y creyó en mí, quien es mi concejera incondicional, mi razón más fuerte, quien me motivo a salir adelante y no desfallecer.

A mi familia, quienes a pesar de la distancia me apoyaron cada día para que continuara siempre adelante.

A mi director, quien tuvo paciencia y me brindó su apoyo, conocimientos y quien dispuso de su tiempo para poder sacar este proyecto adelante.

Y sobre todo a Dios, quien hizo posible este logro, a las personas que me rodearon y compartieron en este primer pasó de mi carrera profesional, quienes estuvieron por la gracia de él para ser un gran equipo de trabajo.

Doy gracias a él por el esfuerzo y las vivencias que me fortalecieron y me formaron en el profesional que soy hoy día.

Luis Alejandro Bohórquez Villarreal

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece de manera especial y sincera a las personas que de forma desinteresada colaboraron con el desarrollo de este proyecto de grado.

Al profesor Juan David Bastidas Rodríguez, quien tuvo toda la disposición posible brindando sus aportes, oportunas orientaciones, recomendaciones para el mejoramiento continuo de esta labor, y ante todo su paciencia en la planeación y desarrollo del trabajo.

A los amigos, compañeros, profesores y personal de la Escuela de Ingeniería de eléctrica y electrónica por su colaboración profesional, en este camino de crecimiento formativo y personal.

CONTENIDO

| | Pág. |
|------------------------------------------------------------|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 20 |
| | |
| 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | 23 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 23 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 23 |
| | |
| 2. METODOLOGÍA | 25 |
| 2.1 REVISIÓN TEÓRICA | 25 |
| 2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 25 |
| 2.3 PROGRAMACIÓN DE LA ESTRATEGIA | 26 |
| 2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS | 26 |
| 2.5 DOCUMENTACIÓN | 26 |
| | |
| 3. MARCO TEÓRICO | 27 |
| 3.1 ENERGÍA SOLAR | 27 |
| 3.2 CELDA SOLAR | 27 |
| 3.2.1 Representación de un módulo PV. | 29 |
| 3.2.2 Configuración de conexión. | 34 |
| 3.2.3 Curva característica V-I | 36 |
| 3.2.4 Curva característica V-P | 37 |
| 3.2.5 Sistemas Fotovoltaicos | 38 |
| 3.2.6 Arreglo fotovoltaico en conexión serie-paralelo (SP) | 39 |
| 3.2.7 Micro-inversores o inversor DC/AC | 40 |
| 3.2.8 Contador eléctrico bidireccional | 41 |
| 3.2.9 Modelo de simulación | 41 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 43 |
| 4.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELO | 43 |
| 4.2 OBSERVACIÓN Y MODELO REPRESENTATIVO DE LOS PERFILES DE SOMBRAS PARCIALES EN UN DÍA PROMEDIO SOBRE UN ARREGLO PV | 45 |
| 5. DESARROLLO Y ANALISIS DE RESULTADOS | 48 |
| 5.1 DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO CIRCUITAL | 48 |
| 5.2 DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL DE SEGUIMIENTO DE MPPT | 62 |
| 5.3 IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK | 66 |
| 6. OBSERVACIONES | 87 |
| 7. CONCLUSIONES | 89 |
| 8. RECOMENDACIONES | 91 |
| REFERENCIAS | 93 |
| BIBLIOGRAFÍA | 96 |
| ANEXOS | 99 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1. Parámetros eléctricos según condiciones estándar de ensayo - STC (1000W/m ² , 25(+/- 2)°C, AM 1,5) – KC200GT | 30 |
| Tabla 2. Parámetros eléctricos a 800 W/m ² , NOCT, AM 1,5 – KC200GT | 31 |
| Tabla 3. Parámetros del comportamiento térmico – KC200GT..... | 31 |
| Tabla 4. Características mecánicas – KC200GT | 31 |
| Tabla 5. Parámetros eléctricos según condiciones estándar de ensayo - STC (1000W/m ² , 25(+/- 2)°C, AM 1,5) – SL8012M..... | 31 |
| Tabla 6. Parámetros eléctricos a 800 W/m ² , NOCT, AM 1,5 – SL8012M | 32 |
| Tabla 7. Parámetros del comportamiento térmico – SL8012M | 32 |
| Tabla 8. Características mecánicas – SL8012M..... | 32 |
| Tabla 9. Comparación de resultados obtenidos contra los calculados en el documento de referencia [8]. | 32 |
| Tabla 10. Ecuaciones de análisis de comportamiento de un módulo PV..... | 33 |
| Tabla 11. Valores de irradiancias y temperaturas correspondientes a horas fijas de un día..... | 57 |
| Tabla 12. Tablas porcentuales de sombras parciales presentes de un arreglo PV. | 57 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. Estructura de unión de semiconductores P-N en un módulo PV. | 28 |
| Figura 2. Sección transversal de un módulo PV. | 29 |
| Figura 3. Circuito equivalente de un módulo PV. | 29 |
| Figura 4. Conexiones de módulos PV: (a) Paralelo, (b) Serie, (c) Serie - Paralelo, (d) Total Cross-Tied, y (e) Bridge-Linked..... | 35 |
| Figura 5. Configuración Sistema Grid Tie. | 39 |
| Figura 6. Conexión Serie - Paralelo de arreglos PV. | 40 |
| Figura 7. Modelo detallado de un generador fotovoltaico de conexión a red de 100 kW (power_PVarray_grid_det)..... | 42 |
| Figura 8. Representación gráfica del lugar de estudio de proyección de sombras parciales incidentes sobre un arreglo PV. | 47 |
| Figura 9. Modelo de Referencia Simulink ***. | 52 |
| Figura 10. Subsistema de importación de parámetros de trabajo del modelo implementado. | 68 |
| Figura 11. Sistema PV conectado a la Red de distribución eléctrica, con análisis de perfiles de sombras y el estudio del comportamiento de MPPT. | 68 |
| Figura 12. Bloques de análisis de mismatching previo al suministro hacia la red..... | 69 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Gráfica 1. Curva característica V-I con diferentes temperaturas de trabajo..... | 36 |
| Gráfica 2. Curva característica V-I con diferentes niveles de Irradiancia solar. | 37 |
| Gráfica 3. Curva característica P-V con diferentes niveles de temperatura. | 38 |
| Gráfica 4. Curva característica P-V con diferentes niveles de Irradiancia solar. | 38 |
| Gráfica 5. Curvas V-I y V-P de un solo módulo con irradiancia del 100% en un string. | 44 |
| Gráfica 6. Curvas V-I y V-P de un solo módulo con irradiancia del 100% en un arreglo PV. | 45 |
| Gráfica 7. Curvas V-I y V-P de un string del arreglo PV, con diferentes niveles de irradiancia. | 46 |
| Gráfica 8. Curvas V-I y V-P de un string del arreglo PV, con diferentes niveles de irradiancia, representación de un arreglo PV mediante un string. | 46 |
| Gráfica 9. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado en condiciones ideales. | 53 |
| Gráfica 10. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado en condiciones ideales. | 53 |
| Gráfica 11. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado - primer perfil de mismatching. | 54 |
| Gráfica 12. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado - primer perfil de mismatching. | 54 |
| Gráfica 13. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado - segundo perfil de mismatching. | 55 |
| Gráfica 14. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado - segundo perfil de mismatching. | 55 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 15. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado - tercer perfil de mismatching. | 56 |
| Gráfica 16. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado - tercer perfil de mismatching. | 56 |
| Gráfica 17. Curvas V-I y P-V de los strings del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 11:00 [Hrs]. | 58 |
| Gráfica 18. Curvas V-I y P-V del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 11:00 [Hrs]. | 59 |
| Gráfica 19. Curvas V-I del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 12:40 [Hrs]. | 59 |
| Gráfica 20. Curvas V-I y P-V del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 12:40 [Hrs]. | 60 |
| Gráfica 21. Curvas V-I y P-V de los strings del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 15:10 [Hrs]. | 61 |
| Gráfica 22. Curvas V-I y P-V del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 15:10 [Hrs]. | 62 |
| Gráfica 23. Representación del funcionamiento del modelo de referencia. | 65 |
| Gráfica 24. Representación del funcionamiento del modelo implementado. | 66 |
| Gráfica 25. Análisis de la región de cálculo del MPPT global correspondiente al perfil de mismatching, irradiancia y temperatura de las 11:00 Hrs. | 70 |
| Gráfica 26. Región de estabilización del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs. | 70 |
| Gráfica 27. Análisis de los parámetros del comportamiento de MPPT global correspondientes a las 11:00 Hrs. | 71 |
| Gráfica 28. Comportamiento de la tensión del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs. | 71 |
| Gráfica 29. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 28. | 72 |
| Gráfica 30. Comportamiento de la corriente del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs. | 72 |
| Gráfica 31. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 30. | 73 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 32. Comportamiento de la potencia del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs..... | 73 |
| Gráfica 33. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 32. | 74 |
| Gráfica 34. Comportamiento de la relación de trabajo del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs. | 74 |
| Gráfica 35. Gráfica 33. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 34. | 75 |
| Gráfica 36. Análisis de la región de cálculo del MPPT global correspondiente al perfil de mismatching, irradiancia y temperatura de las 12:40 Hrs..... | 75 |
| Gráfica 37. Región de estabilización del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs. | 76 |
| Gráfica 38. Análisis de los parámetros del comportamiento de MPPT global correspondientes a las 12:40 Hrs. | 76 |
| Gráfica 39. Comportamiento de la tensión del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs..... | 77 |
| Gráfica 40. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 39. | 77 |
| Gráfica 41. Comportamiento de la corriente del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs..... | 78 |
| Gráfica 42. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 41. | 78 |
| Gráfica 43. Comportamiento de la potencia del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs..... | 79 |
| Gráfica 44. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 43. | 79 |
| Gráfica 45. Comportamiento de la relación de trabajo del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs. | 80 |
| Gráfica 46. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 45. | 80 |
| Gráfica 47. Análisis de la región de cálculo del MPPT global correspondiente al perfil de mismatching, irradiancia y temperatura de las 15:10 Hrs..... | 81 |
| Gráfica 48. Región de estabilización del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs. | 81 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 49. Análisis de los parámetros del comportamiento de MPPT global correspondientes a las 15:10 Hrs. | 82 |
| Gráfica 50. Comportamiento de la tensión del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs..... | 82 |
| Gráfica 51. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 50. | 83 |
| Gráfica 52. Comportamiento de la corriente del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs..... | 83 |
| Gráfica 53. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 52. | 84 |
| Gráfica 54. Comportamiento de la potencia del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs..... | 84 |
| Gráfica 55. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 54. | 85 |
| Gráfica 56. Comportamiento de la relación de trabajo del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs. | 85 |
| Gráfica 57. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 56. | 86 |

LISTA ANEXOS

| | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Anexo A. Código de arranque..... | 99 |
| Anexo B. Código modelo implementación | 106 |
| Anexo C. Tabla datos de información proporcionada por los instrumentos de medición del campus universitario de la UIS correspondientes a un día soleado. | 114 |

NOMENCLATURA

| | |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E | Energía [J] |
| F_d | Factor de idealidad |
| I | Corriente [A] |
| k | Constante de Boltzmann [J/K] |
| K_I | Coefficiente de temperatura de corriente [%K] |
| K_V | Coefficiente de temperatura de tensión [%K] |
| $NOCT$ | Temperatura nominal del Datasheet [K] |
| N_s | Número de celdas |
| q | Carga del electrón [C] = [A*seg] |
| P | Potencia [W] |
| R_p | Resistencia por pérdidas por las corrientes de fuga [Ω] |
| R_s | Resistencia por pérdidas por contactos óhmicos, por uniones de conductores y de los materiales [Ω] |
| G | Irradiancia [W/m^2] |
| G_{NOCT} | Irradiancia de operación nominal [W/m^2] |
| T | Temperatura [K] |
| V | Tensión [V] |

Símbolos Griegos

| | |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| α | Fracción de radiación absorbida por la superficie de las celdas [J] |
| γ | Metalización anterior |
| ζ | Semiconductor tipo N |
| η | Eficiencia del módulo suministrada por el fabricante [%] |
| ε | Metalización posterior |
| ρ | Semiconductor tipo P |
| τ | Transmitancia de las celdas abiertas [W/m ² *K] |
| ψ | Capa antirreflejo |
| ω | Función Lambert - W |

Subíndices

| | |
|-------------|-----------------------------------------|
| <i>amb</i> | Ambiente |
| <i>cell</i> | Celda |
| <i>gap</i> | Desfase del semiconductor |
| <i>mpp</i> | Máxima potencia |
| <i>oc</i> | Circuito abierto |
| <i>ph</i> | Panel fotovoltaico a máxima irradiancia |
| <i>sat</i> | Saturación |
| <i>sc</i> | Corto circuito |
| <i>stc</i> | Condiciones de prueba estándar |
| <i>t</i> | Térmica |

RESUMEN

TÍTULO: SIMULACIÓN DE UN MODELO DE ARREGLO FOTOVOLTAICO EN CONFIGURACIÓN SERIE-PARALELO OPERADO BAJO CONDICIONES IRREGULARES Y UN ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA*

AUTOR: LUIS ALEJANDRO BOHÓRQUEZ VILLARREAL**

PALABRAS CLAVE: SOMBRAS PARCIALES, PANEL FOTOVOLTAICO, POTENCIA, IRRADIANCIA, TEMPERATURA.

DESCRIPCIÓN:

El presente documento tiene como objetivo analizar las variables de un sistema fotovoltaico, el cual se encuentra en un entorno abierto, donde se pueden presentar diversos tipos de elementos circundantes y atmosféricos; los cuales ocasionan sombras parciales durante el transcurso de un día cotidiano, y en sí, pueden afectar la calidad de la energía que se está adquiriendo.

Al presentarse dichas condiciones, la radiación solar no es óptima; por lo tanto, presenta diversos tipos de Mismatching, los cuales van transcurriendo en diversos momentos del día sobre los sistemas fotovoltaicos. Dependiendo de estos elementos y de sus proporciones, influirán en la relación de los datos en la captación de dicha energía dado que se presentan en niveles de irradiancia en el análisis de los módulos P V.

Por lo tanto, el análisis de la calidad de la potencia que se está captando por medio de este sistema fotovoltaico, tiene variaciones significativas, las cuales afectan la potencia de la red cuando esta es inyectada con presencia de alteraciones que pueden generar perturbaciones, y por consiguiente se pierde el total aprovechamiento de la energía e inclusive, afecta la calidad de la energía suministrada por las empresas electrificadoras alrededor del mundo empresas electrificadoras alrededor del mundo.

* Trabajo de grado

** Facultad e Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Juan David Bastidas Rodríguez.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECTS OF PARTIAL SHADOWS ON QUALITY INDICATORS OF ENERGY PHOTOVOLTAIC SYSTEMS CONNECTED TO THE NETWORK*

AUTHOR: LUIS ALEJANDRO BOHÓRQUEZ VILLARREAL**

KEYWORDS: PARTIAL SHADOWS, PHOTOVOLTAIC PANEL, POWER, IRRADIANCE, TEMPERATURE.

DESCRIPTION:

The present document aims to analyze the variables of a photovoltaic system, which is in an open environment, where various types of surrounding and atmospheric elements can be present. Those that cause partial shadows during the course of a regular day, and in themselves, can affect the quality of the power that is being captured.

When these conditions are present, the solar radiation is not optimal. Therefore, it presents diverse types of mismatching, which are happening in different moments of the day on the photovoltaic systems. Depending on these elements and their proportions, they will influence the relation of the data being captured of said energy, since they are presented in levels of irradiance in the analysis of the PV modules.

Therefore, the analysis of the quality of power that is being captured, by means of this photovoltaic system, has significant variations. This affects the power of the network when it is injected with the presence of the alterations that can generate disturbances. It consequently loses the total use of energy and even affects the quality of energy supplied by electrification companies around the world energy and even affects the quality of energy supplied by electrification companies around the world.

* Work of degree

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director Ph.D. Juan David Bastidas Rodríguez.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se está incursionando en la implementación de generación de energías renovables limpias, permitiendo principalmente el desarrollo de la población en zonas rurales las cuales carecían de suministro de energía eléctrica a través de las redes eléctricas [1]. Para esta investigación, el objeto de estudio es la energía solar, la cual es adquirida y transformada mediante la implementación de paneles fotovoltaicos. El principal funcionamiento de este sistema es aprovechar de manera eficiente la energía de irradiancia solar sobre las superficies de los módulos fotovoltaicos (PV), permitiendo la adquisición, almacenamiento y consumo de la energía eléctrica generada por el sistema PV [2],[3].

En Colombia, la implementación de estos sistemas son regulados por el ministerio de minas y energía, los cuales son el ente encargado de regular la energía solar térmica y fotovoltaica mediante la normativa establecida por el ICONTEC [4].

Estos sistemas presentan un comportamiento no constante en la adquisición de la radiación solar debido a factores externos e internos que alteran los parámetros de su óptimo desempeño, como lo son las sombras parciales presentes sobre la superficie del módulo fotovoltaico, originadas por presencia de objetos circundantes, los cuales presentan diversos niveles de sombra [5].

El desarrollo de esta propuesta se hace considerando que anteriormente en la Universidad Industrial de Santander se han realizados diferentes tipos de investigaciones relacionados con el estudio de paneles PV; sin embargo, son pocos los que han analizado el comportamiento de la energía previa al suministro de la red eléctrica cuando se encuentra en presencia de sombras parciales [6]. Es

por ello que para esta investigación se aborda el problema de sombras parciales que afectan el comportamiento de los módulos PV, analizando la energía suministrada. Para dicho análisis, se contempla los parámetros en el Datasheet de un Panel Solar Monocristalino KC200GT [7] con el fin de corroborar el desarrollo matemático mediante el uso de la herramienta computacional MATLAB, y de esta manera tener un margen comparativo real contra los valores suministrados en el documento de referencia [8], así, de esta manera determinar la exactitud con los valores suministrados en el documento que son referenciados por el Datasheet en mención para sus respectivos cálculos.

Debido a que el arreglo PV que se tomara en consideración para el desarrollo de la actividad de investigación es de otra manufactura el cual es de referencia SL8012M [9], es importante aclarar que los parámetros del ahora mencionado, para determinar el análisis y desarrollo los cálculos de los diversos componentes en funcionamiento de todo el sistema PV. Por otra parte es importante resaltar que se deben tener consideraciones tales como la configuración de la conexión de las placas fotovoltaicas, ya que se presentan como: Paralelo (PI) (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a)), Serie (Sr) (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b)), Serie-Paralelo (SP) (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (c)), Total Cross-Tied (TCT)) (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (d)) o Bridge-Linked (BL)) (ve **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (e)) [2], pero en éste caso de estudio se enfoca en la configuración SP, ya que es la implementadas en el campus universitario y de las más referenciadas en la literatura [10], con el fin de realizar el análisis de los correspondientes cálculos a dicha configuración. Cada uno de estos procesos de cálculos de los principales parámetros de funcionamiento REF y comportamiento de los sistemas PV, son interconectados a un modelo de comportamiento y análisis para control del Punto de Máxima Potencia (MPP) [11],[12] en las curvas características considerando como principales variables $V - I$ (Voltaje vs Corriente), donde se percibe un

comportamiento de la energía adquirida por sistemas fotovoltaicos, permitiendo percibir variaciones en la calidad de la energía captada. Estos cambios bruscos en el comportamiento de este análisis se conoce como Mismatching, los cuales afectan la calidad de la potencia que se suministra a la red eléctrica [13],[14],.

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: Primero, se describe brevemente el trabajo de investigación. Luego se realiza una revisión teórica de los conceptos clave relacionados con este trabajo. Seguidamente, se presentan los modelos matemáticos empleados para el análisis de las variables de estudio presentes en el sistema. Subsecuentemente, se procede a analizar los resultados obtenidos durante esta investigación, los cuales son procesados para el análisis del MPP. Por último, se destacan las conclusiones más significativas obtenidas.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La siguiente investigación aborda el análisis de un módulo PV, su comportamiento real en presencia de sombras parciales y de cómo esto se ve directamente ligado con el efecto de Mismatching en el análisis de la potencia generada [15] previa al ser implementado el sistema de control de MPP y posteriormente para ser consumida tanto por el usuario como inyectada a la red eléctrica. Para ello, se empleó un algoritmo de evaluación de parámetros internos del módulo PV en condiciones no estables y con la mayor aproximación real mediante el ingreso de datos reales de irradiancia solar en cada una de las celdas PV y de esta manera determinar los puntos de inflexión de la caída de corriente con relación a los niveles de tensión en un día promedio. Los resultados obtenidos contemplan la incidencia que repercute en el momento de ser suministrada esta energía a la red. A continuación, se presentan los objetivos cumplidos en el desarrollo de este trabajo de investigación.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Simular un modelo de arreglos fotovoltaicos en configuración serie-paralelo operado bajo condiciones irregulares y un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia para ese tipo de arreglo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado está comprendido por:

- 1) Definir un caso de estudio de un sistema fotovoltaico conectado a la red en un ambiente urbano sometido a sombras parciales, contemplando los perfiles de sombreado del arreglo fotovoltaico en un día promedio.
- 2) Simular un modelo de arreglo fotovoltaico en configuración serie-paralelo operando bajo condiciones de sombras parciales.
- 3) Implementar un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia para el arreglo fotovoltaico descrito en el objetivo específico anterior.
- 4) Validar el modelo del arreglo fotovoltaico y el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico conectado a la red.

2. METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en este trabajo de investigación, se establecieron las siguientes etapas: Revisión teórica, planteamiento del problema, programación de la estrategia, análisis de resultados y documentación.

2.1 REVISIÓN TEÓRICA

En esta primera etapa se realizará la respectiva búsqueda de los temas contenidos en esta investigación, utilizando las bases bibliográficas de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander con el fin de respaldar y proporcionar la información requerida para resolver el problema planteado.

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En esta etapa se formulan los diferentes modelos matemáticos respectivos al circuito representativo de un módulo PV, considerando parámetros característicos de un sistema real. De esta forma el análisis de los elementos y sus comportamientos internos serán representados de forma matemática en condiciones de presencia de sombras parciales, y de esta forma establecer los parámetros de análisis de MPP el cual se encuentra integrado al sistema PV que se interconecta a la red eléctrica.

2.3 PROGRAMACIÓN DE LA ESTRATEGIA

Con el fin de encontrar una metodología de desarrollo de la problemática del trabajo de investigación, se implementará mediante el uso de la herramienta de cómputo numérico MATLAB y del entorno visual SIMULINK, en los cuales se establecerá el modelo matemático para el desarrollo y posterior análisis a una función predeterminada de un modelo de un sistema PV interconectado a la red eléctrica. Sin embargo, previo al análisis de los resultados, se empleará un código de seguimiento de MPP para determinar el comportamiento de los puntos de inflexión en las curvas representadas por las variables V-I (Tensión vs Corriente) debido a la presencia de sombras parciales en un día promedio.

2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En ésta etapa se realizaron varios análisis del modelo matemático con diversos niveles de irradiancia (S) y temperatura ambiente (T_{amb}) contemplando los parámetros establecidos por el fabricante de un panel PV para determinar los datos lo más reales posibles para su posterior análisis dentro del sistema completo. Posteriormente se seleccionaron diversos días en el campus de la Universidad Industrial de Santander con el fin de obtener niveles de irradiancia y de temperatura ambiente reales en un entorno con presencia de sombras parciales y así poder determinar un comportamiento real para su posterior análisis mediante simulación.

2.5 DOCUMENTACIÓN

En esta última etapa, se registran los resultados relevantes obtenidos como también se destacan las conclusiones más significativas obtenidas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ENERGÍA SOLAR

El sol es la fuente de energía más abundante que tenemos a nuestra disposición, de la cual sólo una pequeña parte de la energía irradiada llega a la superficie terrestre [10]; ésta es tomada a través de paneles fotovoltaicos para transformarla en energía eléctrica. Esta es una fuente de energía renovable, también llamada energía solar fotovoltaica, debido a que la tecnología empleada para poder ser aprovechada, se realiza mediante la instalación de paneles solares fotovoltaicos, que consiste en unas láminas de variado espesor que se encargan de capturar la radiación lumínica solar y transformarla en un recurso aprovechable, el cual suple las necesidades de las poblaciones con el principal objetivo de contrarrestar la contaminación por otras energías que afectan la vida y el ecosistema de nuestro planeta.

3.2 CELDA SOLAR

La celda solar es el elemento fundamental de un sistema fotovoltaico. Los valores de eficiencia de conversión de la radiación solar de las celdas solares determinan la potencia del panel. La principal función de estas celdas es convertir los fotones emitidos por la luz solar y convertirlos en potencia eléctrica; este proceso se lleva a cabo mediante el efecto fotoeléctrico [2],[10].

Una celda solar es la unión de un semiconductor tipo p con otro semiconductor tipo n (ver Figura 1), donde la radiación solar es absorbida mediante la excitación de los electrones en la capa frontal de valencia del semiconductor n , a la de

conducción. Las capas: Cubierta de vidrio, Adhesivo transparente y Antirreflectante, son las que permiten el ingreso de los fotones y que se queden atrapados para así, los que tienen mayor energía que la banda de energía o unión de los semiconductores $p-n$, sean absorbidos y crean pares de hueco-electrón que son proporcionales a la radiación incidente sobre la celda solar (ver

Figura 2). Estos crean un flujo de electrones, o corriente eléctrica, junto con una tensión hacia la carga externa, en cuyo caso de estudio, hablamos de la red eléctrica [2].

Figura 1. Estructura de unión de semiconductores P-N en un módulo PV.

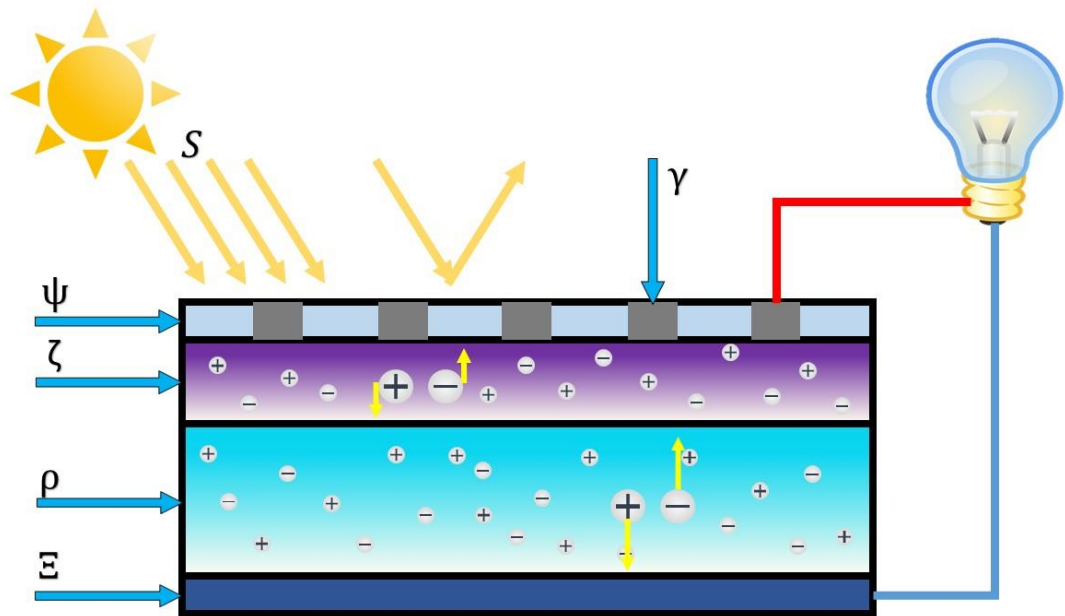
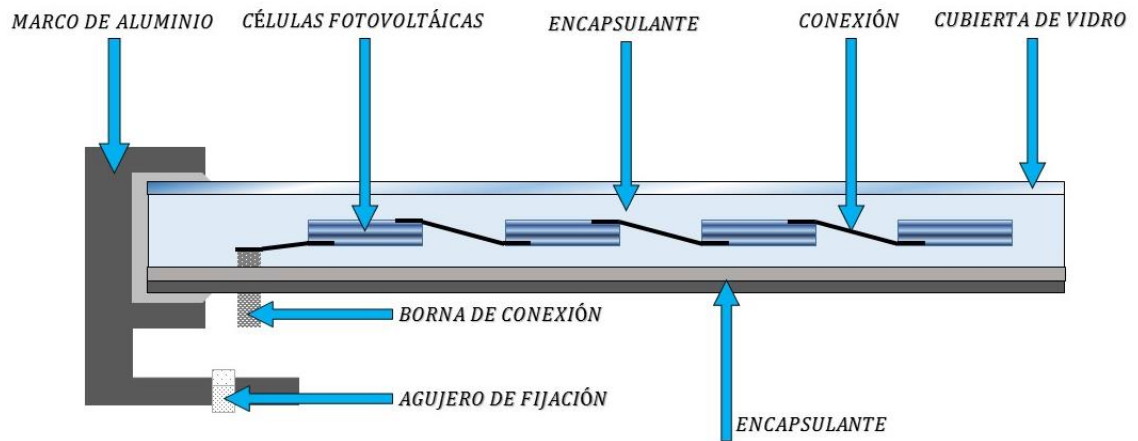
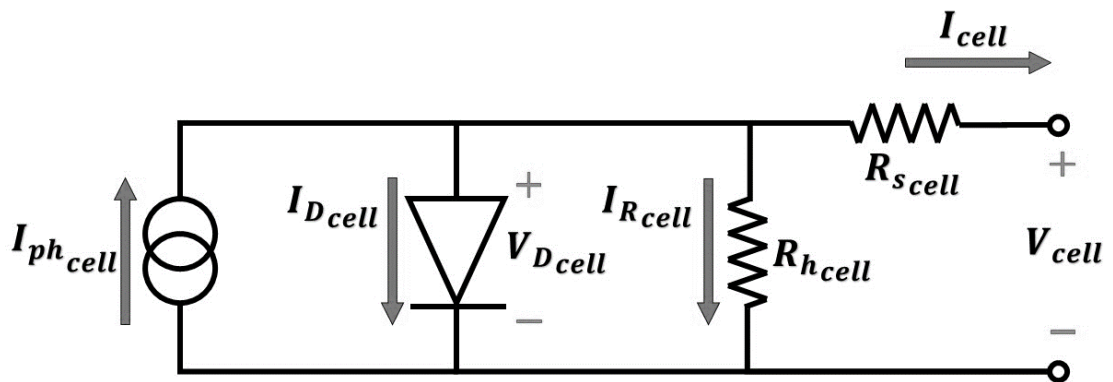


Figura 2. Sección transversal de un módulo PV.



3.2.1 Representación de un módulo PV. Para el análisis de los elementos de un módulo PV, las variables que interactúan en su estructura y de su comportamiento real, son representados mediante un modelo fundamental, el cual está representado en el circuito que se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Circuito equivalente de un módulo PV.



Basado en el funcionamiento de un módulo PV, se determinó mediante análisis circuital las ecuaciones que representan el comportamiento del mismo. Es

importante enfatizar que el fin de este estudio es la determinación de la tensión V_{cell} y la corriente I_{cell} que entregan el módulo PV como se representan en las siguientes ecuaciones [5], [8], [16], [17],

$$V_{cell} = -B \cdot \omega \left[\frac{I_{sat} \cdot R_p}{B} \cdot \left(\exp\left(\frac{R_p}{B} \cdot (I_{ph} + I_{sat} - I_{cell})\right) \right) \right] - I_{cell}(R_s + R_p) + R_p \cdot (I_{ph} + I_{sat}) \quad (1)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s \cdot I_{cell})}{N_s \cdot \eta \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s \cdot I_{cell}}{R_p} \quad (2)$$

Sin embargo, para el análisis de éstas ecuaciones, existen parámetros que involucran las propiedades intrínsecas de los materiales de fabricación de los módulos PV, los cuales el fabricante [7] proporciona y se muestran en las siguientes tablas, con el fin de establecer la proximidad de la implementación de este dispositivo y compararlo con los resultados obtenidos del análisis de las ecuaciones presentadas en la Tabla 10.

Tabla 1. Parámetros eléctricos según condiciones estándar de ensayo - STC (1000W/m², 25(+/- 2)°C, AM 1,5) – KC200GT

| Referencia | KC200GT |
|----------------------------|---------|
| I_{mpp} [V] | 7,61 |
| I_{sc} [A] | 8,21 |
| η [%] | 7,8 |
| V_{mpp} V | 26.3 |
| V_{oc} [V] | 32,9 |

Tabla 2. Parámetros eléctricos a 800 W/m², NOCT, AM 1,5 – KC200GT

| Referencia | KC200GT |
|----------------------------|---------|
| I_{mpp} [V] | 6,13 |
| I_{sc} [A] | 6,62 |
| V_{mpp} V | 23,2 |
| V_{oc} [V] | 29,9 |

Tabla 3. Parámetros del comportamiento térmico – KC200GT

| Referencia | KC200GT |
|-----------------------------------------|---------|
| NOCT [°C] | 47 |
| K_{I_{sc}} [%/K] | 0,0318 |
| K_{V_{oc}} [%/K] | -0,0123 |

Tabla 4. Características mecánicas – KC200GT

| Referencia | KC200GT |
|----------------------|----------------|
| Celda Solar | Monocrystalina |
| N_s | 54 |

Tabla 5. Parámetros eléctricos según condiciones estándar de ensayo - STC (1000W/m², 25(+/- 2)°C, AM 1,5) – SL8012M

| Referencia | SL8012M |
|----------------------------|---------|
| I_{mpp} [V] | 5,81 |
| I_{sc} [A] | 6.43 |
| η [%] | 15,6 |
| V_{mpp} V | 17,2 |
| V_{oc} [V] | 21,6 |

Tabla 6. Parámetros eléctricos a 800 W/m2, NOCT, AM 1,5 – SL8012M

| | |
|----------------------------|---------|
| Referencia | SL8012M |
| I_{mpp} [V] | 4,37 |
| I_{sc} [A] | 4,79 |
| V_{mpp} V | 16,5 |
| V_{oc} [V] | 19,9 |

Tabla 7. Parámetros del comportamiento térmico – SL8012M

| | |
|-----------------------------------------|---------|
| Referencia | SL8012M |
| NOCT [°C] | 45 |
| K_{I_{sc}} [%/K] | 0,055 |
| K_{V_{oc}} [%/K] | -0,35 |

Tabla 8. Características mecánicas – SL8012M

| | |
|----------------------|----------------|
| Referencia | SL8012M |
| Celda Solar | Monocristalina |
| N_s | 36 |

Empleando los parámetros de las Tabla 1,

Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4, los cuales están establecidos para el análisis y desarrollo del modelo matemático expresado en la Tabla 10, dando como resultado la siguiente tabla comparativa,

Tabla 9. Comparación de resultados obtenidos contra los calculados en el documento de referencia [8].

| Parámetro | Referencia bibliografica | Dattos obtenidos |
|---------------|--------------------------|------------------|
| I_{mpp} [V] | 8,21 | 8,21 |
| I_{sc} [A] | 1,0755 | 1,0622 |
| η [%] | 2,1546e-9 | 1,1714e-8 |
| V_{mpp} [V] | 0,2844 | 0,3637 |
| V_{oc} [V] | 157,536 | 161,1266 |

Se puede determinar que los parámetros calculados en comparación con los suministrados en el artículo referenciado, están dentro del margen real, sin embargo, cabe resaltar que los cálculos realizados para determinar las ecuaciones que se analizaron, contienen un margen de error por aproximaciones realizadas en el análisis de sus equivalencias las cuales determinaron como ecuaciones resultantes las enunciadas en la Tabla 10 y los resultados obtenidos para su comparación son los observados en la Tabla 9.

Es importante resaltar que existen otras variables de funcionamiento como: la energía de desfase del semiconductor, la Irradiancia de operación nominal y el producto entre transmitancia de las celdas abiertas y la fracción de la radiación absorbida por la superficie de las celdas, cuyos valores son $E_{gap} = 1.8 \exp^{-19} [J]$, $S_{NOCT} = 800 [W/m^2]$, $\tau * \alpha \approx 0,9$ [8] respectivamente.

Basado en [5], [8], [16], [17], se tiene las siguientes ecuaciones (ver Tabla 10)

Tabla 10. Ecuaciones de análisis de comportamiento de un módulo PV.

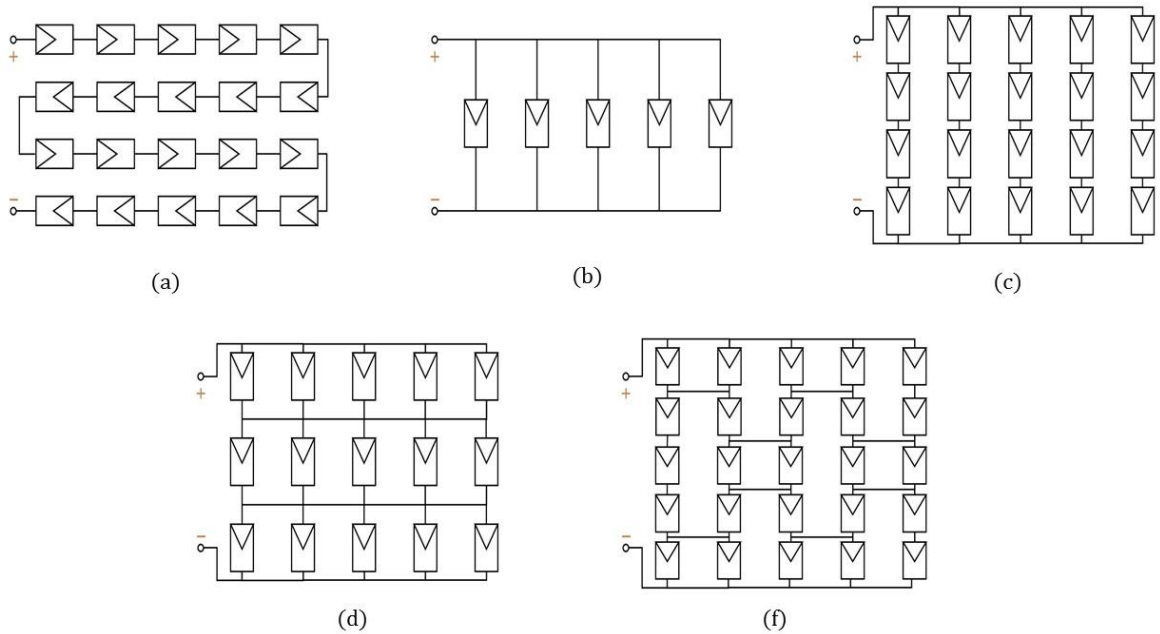
| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_{ph_{stc}} \approx I_{sc_{stc}} \quad (3)$ |
| $I_{ph} = I_{ph_{stc}} \cdot \frac{G}{G_{stc}} \left(1 + K_{I_{sc}} \cdot (T - T_{stc})\right) \quad (4)$ |
| $\eta = \frac{q \cdot \left(K_{V_{oc}} - \frac{V_{oc_{stc}}}{T_{stc}}\right)}{N_s \cdot k \cdot T_{stc} \left(\frac{K_{I_{sc}}}{I_{ph_{stc}}} - \frac{3}{T_{stc}} - \frac{E_{gap}}{k \cdot T_{stc}^2}\right)} \quad (5)$ |
| $I_{sat} = I_{ph_{stc}} \cdot \exp\left(\frac{-q \cdot V_{oc_{stc}} / N_s}{\eta \cdot k \cdot T_{stc}}\right) \quad (6)$ |
| $C = \frac{I_{sat}}{T_{stc}^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap}}{k \cdot T_{stc}}\right)} \quad (7)$ |
| $V_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad (8)$ |
| $R_s = N_s \cdot \left(\frac{\frac{\eta \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{ph}}\right) + \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{N_s}}{I_{mpp}}\right) \quad (9)$ |
| $R_p = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{I_{ph} - I_{mpp} - I_{sat} \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{\eta \cdot V_t \cdot N_s}\right) - 1\right)} \quad (10)$ |
| $B = \frac{\eta \cdot k \cdot T \cdot N_s}{q} \quad (11)$ |
| $x = \frac{V_{mpp}(2 \cdot I_{mpp} - I_{ph}) \left(e^{\frac{V_{mpp}(V_{mpp} - 2 \cdot \eta \cdot V_t)}{(\eta \cdot V_t)^2}}\right)}{\eta \cdot V_t \cdot I_{sat}} \quad (12)$ |
| $y = \omega[x] + \frac{2 \cdot V_{mpp}}{\eta \cdot V_t} - \frac{V_{mpp}^2}{(\eta \cdot V_t)^2} \quad (13)$ |
| $R_{s_{stc}} = \frac{y \cdot \eta \cdot V_t - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (14)$ |
| $R_{h_{stc}} = \frac{y \cdot \eta \cdot V_t}{I_{ph} - I_{mpp} - I_{sat}(e^y - 1)} \quad (15)$ |
| $T = \frac{G}{G_{stc}} (NOCT - (25 + 273,15)) \left(1 - \frac{\eta}{\tau \cdot \alpha}\right) + T_{amb} \quad (16)$ |
| $\beta = W(\beta) \cdot e^{W(\beta)} \quad (17)$ |

3.2.2 Configuración de conexión. Las celdas solares para su debido funcionamiento, se presenta en diversos tipos de conexiones: Serie (SR), Paralelo (PL), Serie-Paralelo (SP), Total Cross-Tied (TCT) o Bridge-Linked (BL), que visualizan en la Figura 4 (a), (b), (c), (d) y (e) respectivamente. Sin embargo, el sistema fotovoltaico más común y mejor empleado son de tipo SP la cual es más empleada, ya que es para obtener niveles de potencia superiores a 200[w]. Esta conexión es la unión de módulos PV serie y strings en paralelo, donde sus respectivos funcionamientos están determinados así:

- Conexión Serie, en la cual las terminales la primera terminal positiva va conectada directamente a la red, entre placas se interconectan positivas con negativas sucesivamente, y la última negativa a la red. El propósito de esta conexión es conservar el nivel de corriente, pero aumentar el nivel de tensión. Ésta se encuentra diseñada para potencias entre 200-240 [w].
- Conexión Paralelo, en la cual las terminales positivas están conectadas entre sí, y las terminales negativas igualmente. El principal propósito de esta conexión es conservar la tensión entre los paneles fotovoltaicos, pero al momento de aumentar la corriente. Por tal motivo la potencia se verá incrementada.

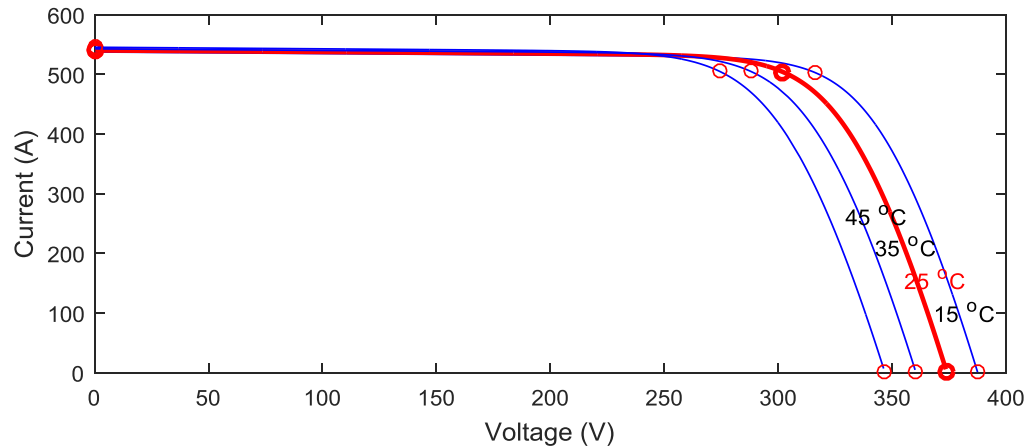
De esta forma se aumentan los niveles de corriente y tensión, pero los parámetros son definidos por el usuario, estableciendo la corriente o la tensión según la necesidad [18],[19].

Figura 4. Conexiones de módulos PV: (a) Paralelo, (b) Serie, (c) Serie - Paralelo, (d) Total Cross-Tied, y (e) Bridge-Linked.



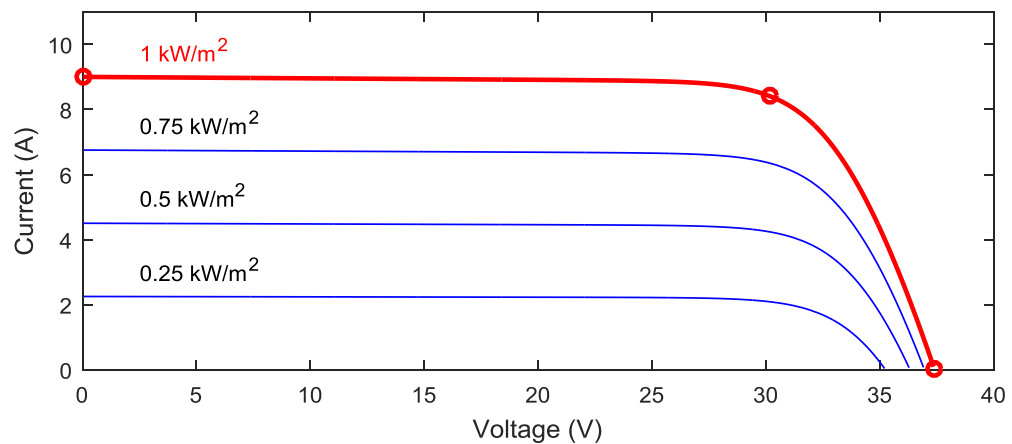
3.2.3 Curva característica V-I En el desarrollo de esta investigación se desea analizar el comportamiento de un arreglo PV observando la conducta entre la relación V_{cell} Vs I_{cell} (V - I), como el ejemplo ilustrado en la Gráfica 1, donde se puede apreciar un comportamiento constante en el valor de la corriente a media que aumenta la tensión hasta el punto MPP, en el cual a causa de una mayor tensión presenta un decaimiento constante hasta llegar a la nulidad de la corriente del arreglo. En ésta ilustración, se adoptaron diferentes temperaturas como principal variable externa, dadas unas condiciones de tensión y corrientes fijas, dando como resultado un mejor comportamiento de las curvas a medida que la temperatura es menor.

Gráfica 1. Curva característica V-I con diferentes temperaturas de trabajo.



Como se mencionó anteriormente, para el resto del desarrollo de la investigación se debe analizar la conducta entre la relación V_{cell} Vs I_{cell} (I -V) de un arreglo PV, pero en esta ocasión la variable externa es la irradiancia como se ilustra en la Gráfica 2, donde se puede apreciar una estabilidad del valor de MPP, donde la corriente es constante hasta llegar al punto de MPP, sin embargo, a mayor presencia de irradiancia, hay una mayor generación de corriente en el arreglo PV.

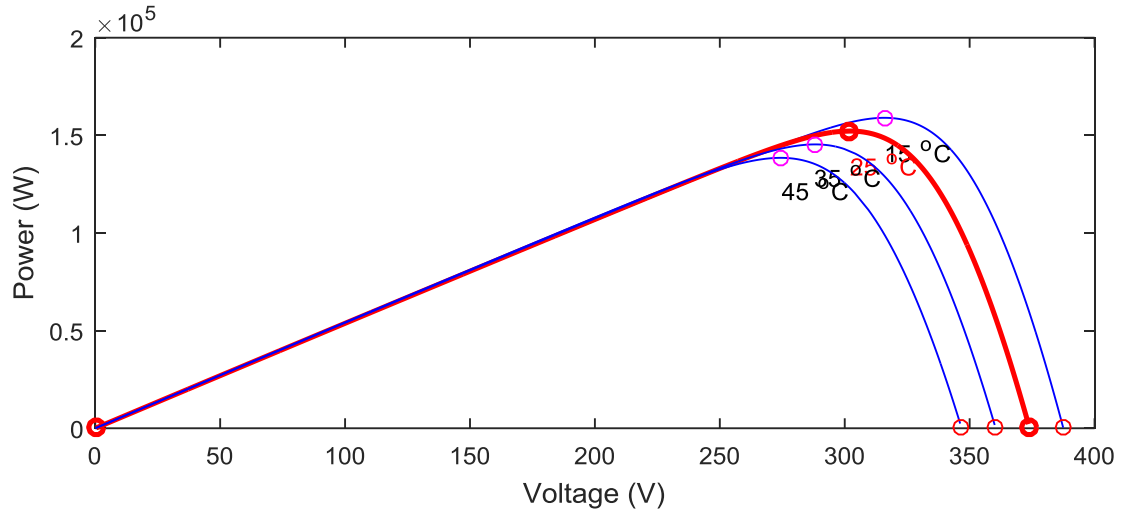
Gráfica 2. Curva característica V-I con diferentes niveles de Irradiancia solar.



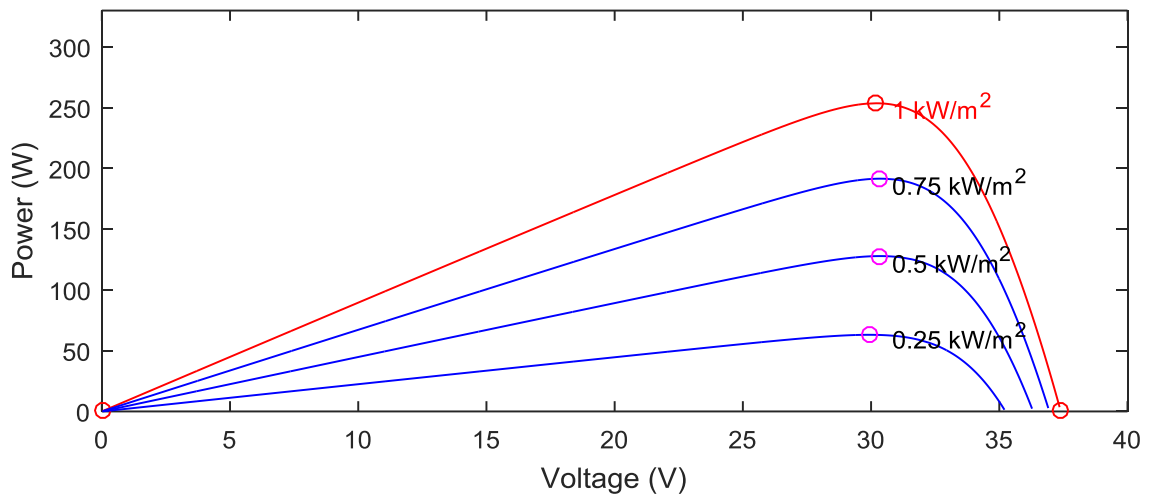
3.2.4 Curva característica V-P Las ecuaciones anteriormente mencionadas son las encargadas describir e interpretar el modelo circuital de los arreglos PV, en donde podemos caracterizar nuestro sistema para apreciar la conducta de parámetros como lo son P_{cell} vs V_{cell} (P-V) como se ilustra en la

Gráfica 3, en el cual se adoptaron diferentes temperaturas como principal variable externa, dando como resultado un crecimiento lineal de la potencia hasta encontrar el MPP, el cual es inversamente proporcional a la temperatura. En la Gráfica 4, se describe el comportamiento de la tensión y potencia a medida que varía la irradiancia, la cual es directamente proporcional a la potencia hasta alcanzar el MPP, sin embargo se puede determinar que este punto está fijo en relación al eje de la tensión, pero aumenta en relación al eje de la potencia. En el MPP, el arreglo PV posee la máxima eficiencia de trabajo ya que es donde el sistema entrega su máxima potencia [11], [12].

Gráfica 3. Curva característica P-V con diferentes niveles de temperatura.



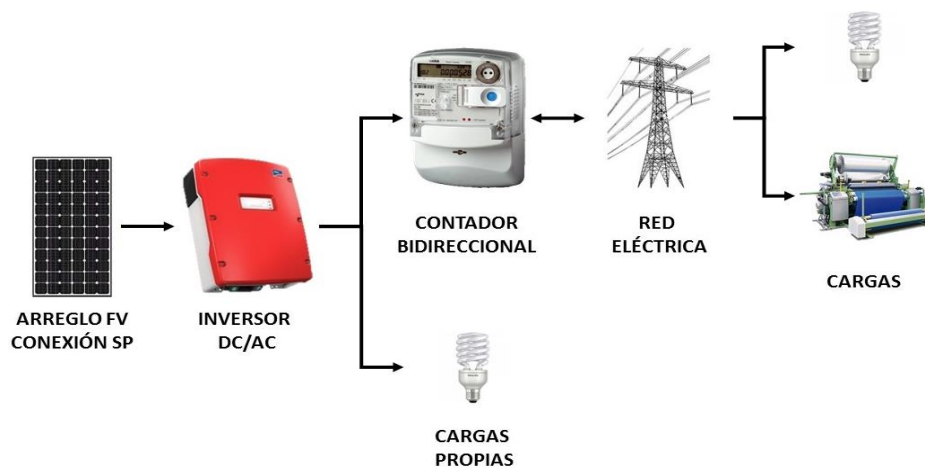
Gráfica 4. Curva característica P-V con diferentes niveles de Irradiancia solar.



3.2.5 Sistemas Fotovoltaicos Los sistemas PV son un conjunto de elementos electrónicos que permiten la captación, transformación, acondicionamiento y distribución de la energía proveniente de la irradiación solar a la red eléctrica. Estos sistemas se comprenden de: celdas solares o arreglos PV, inversores o micro-inversores (DC-AC) para surtir la carga de DC generada por las celdas

solares transformándolas en AC para posteriormente suministrar la energía generada a la red eléctrica, a través de la implementación de contadores eléctricos bidireccionales, para medir la cantidad de energía que se le está suministrando a la red, a este sistema se le denomina Grid Tie (ver Figura 5) [20], [21]. Las funciones básicas de cada elemento del sistema PV se describen en las siguientes sub-secciones.

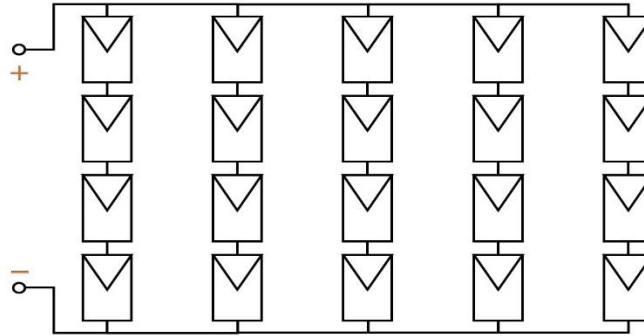
Figura 5. Configuración Sistema Grid Tie.



3.2.6 Arreglo fotovoltaico en conexión serie-paralelo (SP) El arreglo PV en conexión SP, consiste en un conjunto de paneles fotovoltaicos interconectados en serie para formar cadenas (paneles conectados), y cadenas conectadas en paralelo para formar el arreglo (conjuntos de paneles conectados) (ver

Figura 6) como se menciona en la sección 0.

Figura 6. Conexión Serie - Paralelo de arreglos PV.



3.2.7 Micro-inversores o inverter DC/AC Los sistemas PV en el caso de estudio, tiene integrados estos dispositivos, ya que son más compactos, y su propósito es transformar la corriente DC generada por las celdas solares en corriente AC para ser suministrada a la red. Estos dispositivos están diseñados para emplearse y controlar el funcionamiento de un arreglo PV [19].

Estos dispositivos presentan características favorables como:

- Tienen una mayor vida útil a comparación de los inversores convencionales.
- Sus dimensiones le permiten ser un dispositivo de fácil instalación y mejorando la disposición de los espacios, permitiendo su instalación en espacios reducidos.
- Mejora la seguridad, ya que no tiene cableado de alta tensión en DC.
- Cada módulo está diseñado para trabajar en el MPP, permitiendo reducir los efectos de Mismatching, el cual es el objetivo principal de nuestro proyecto de investigación, con lo cual se busca ver como estos cambios bruscos en el MPP en presencia de sombras parciales, y esa potencia de salida de los micro-inversores afecte a la red eléctrica.

Sin embargo, estos dispositivos presentan como desventajas:

- Un alto costo de inversión, ya que son dispositivos muy complejos y de alta tecnología en un espacio reducido.

- Debido a su complejidad, el mantenimiento es menos fácil de ejecutar a comparación de los inversores convencionales, y son mucho más costosos.
- Son vulnerables a las altas temperaturas debido a que son instalados en los mismos paneles solares, los cuales se sobrecargan de altas temperaturas por la radiación solar.

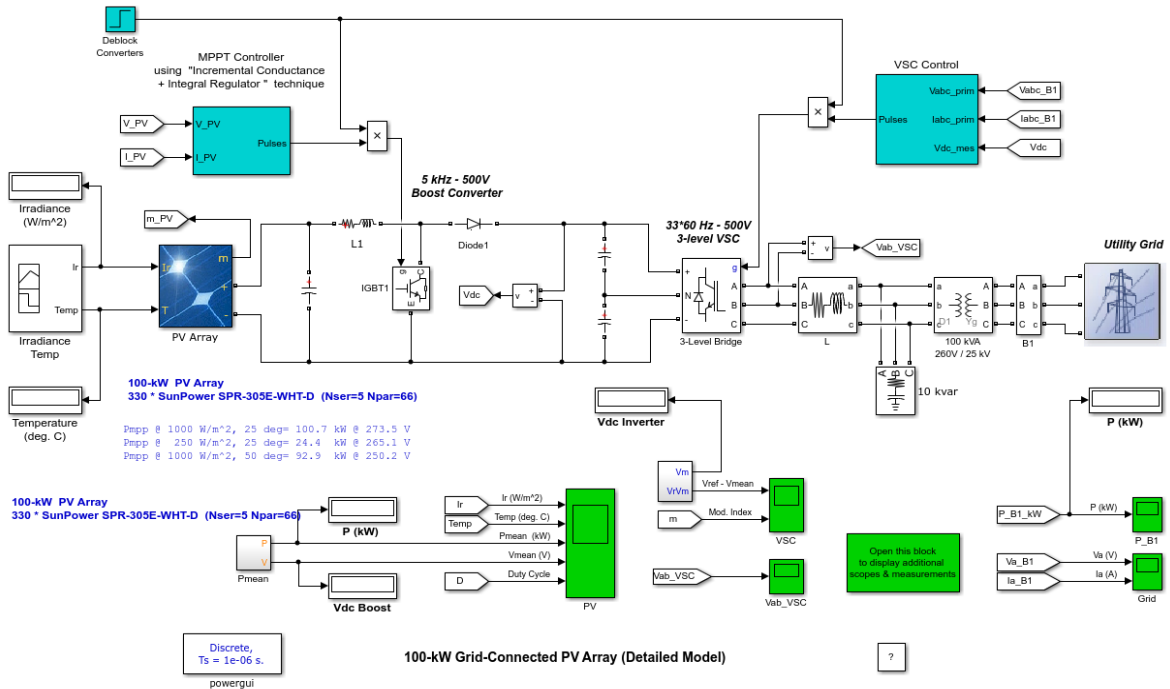
3.2.8 Contador eléctrico bidireccional El vatihorímetro o contador eléctrico bidireccional, es un instrumento de medición del consumo o de potencia eléctrica suministrada a la red. Su magnitud está representada en [kWh]. Este instrumento se encarga de calcular la energía producida por un arreglo PV, además de permitir interconectar la energía convencional o de la red a la carga propia, la cual aprovecha la energía generada por el arreglo PV, pero si llegado el caso requiere más potencia eléctrica, consume lo que necesita desde la red. Si dado el caso la potencia generada por el arreglo PV es superior al consumo propio, este exceso es inyectado a la red revirtiendo el giro de consumo y reduciendo costos.

3.2.9 Modelo de simulación Para determinar la calidad de la energía generada por un arreglo fotovoltaico, se implementará un modelo de comportamiento de las sombras parciales utilizando el software de cómputo numérico MATLAB. Los desarrolladores de este Software han incluido en su plataforma y directorios internos, modelos para nuestro trabajo con parámetros que se pueden modificar según se requiera, donde se establecen los principales elementos interconectado en un sistema PV y describir su funcionamiento como generador PV de conexión a la red con una generación de 100 [kW] [21] (ver Figura 7).

Sin embargo, en dicho modelo de simulación el arreglo PV asume que todos los paneles operan bajo las mismas condiciones de irradiancia y temperatura y además el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia no es capaz de rastrear el máximo global en la curva P-V. es por esto que el presente trabajo se enfocará en la implementación del modelo del arreglo PV operando bajo

condiciones de mismatching y en la implementación de un algoritmo de control capaz de rastrear el punto de máxima potencia global.

Figura 7. Modelo detallado de un generador fotovoltaico de conexión a red de 100 kW (power_PVarray_grid_det)



4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELO

Para el desarrollo del modelo representativo de un módulo PV, se recurrió al análisis del modelo circuital como se menciona en la sección 0.

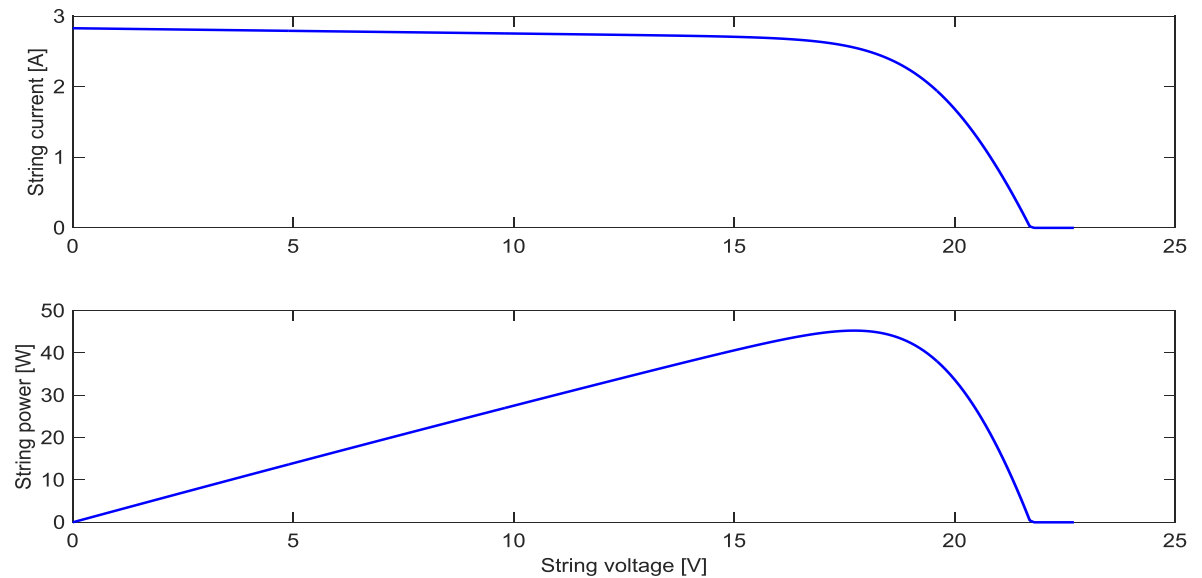
Pero se deben tener consideraciones importantes en el desarrollo de dicho modelo circuital, el cual da como resultado el modelo matemático para determinar la corriente del módulo PV y la tensión del mismo. Para este análisis se deben tener en cuenta factores externos que alteran el comportamiento y el desempeño de estos arreglos, y sin tener en este punto de desarrollo la relación que también conlleva tener presencia de sombras parciales en un día promedio.

Para este desarrollo se tiene como consideración y parámetro de gran importancia la configuración de conexión, las cuales conllevan a determinar la corriente y la tensión que generan para ser suministrados a la red.

En la solución de este modelo, encontramos otros parámetros que son intrínsecos del material o del diseño de fabricación, parámetros que son suministrados por los fabricantes como lo son la corriente de corto circuito en STC (Standar Test Conditions) $I_{sc_{stc}}$, la tensión de circuito abierto en STC $V_{oc_{stc}}$, irradiancia en STC G_{stc} , entre otros[5], [8], [10]. Estos parámetros son primordiales para el cálculo de los parámetros reales de trabajo o funcionamiento, cuando se encuentran en presencia de una determinada temperatura e irradiancia solar, y de esta forma poder determinar las ecuaciones resultantes de los parámetros que se desean a la salida del arreglo PV.

El comportamiento de las curvas características de un solo módulo se compara con parámetros reales de irradiancia y temperatura ambiente, presentan un comportamiento como se visualiza a continuación (ver Gráfica 5)

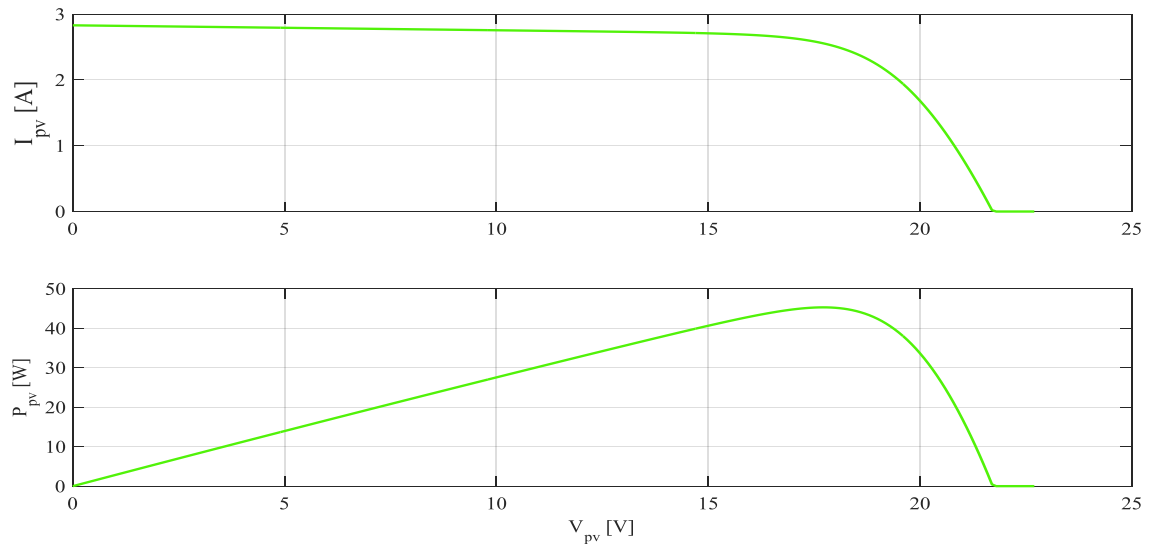
Gráfica 5. Curvas V-I y V-P de un solo módulo con irradiancia del 100% en un string.



En el caso antes mencionado, por ser un solo módulo, se representaría de igual forma considerando que éste único módulo sería nuestro arreglo PV, lo cual nos representa la siguiente gráfica (ver

Gráfica 6),

Gráfica 6. Curvas V-I y V-P de un solo módulo con irradiancia del 100% en un arreglo PV

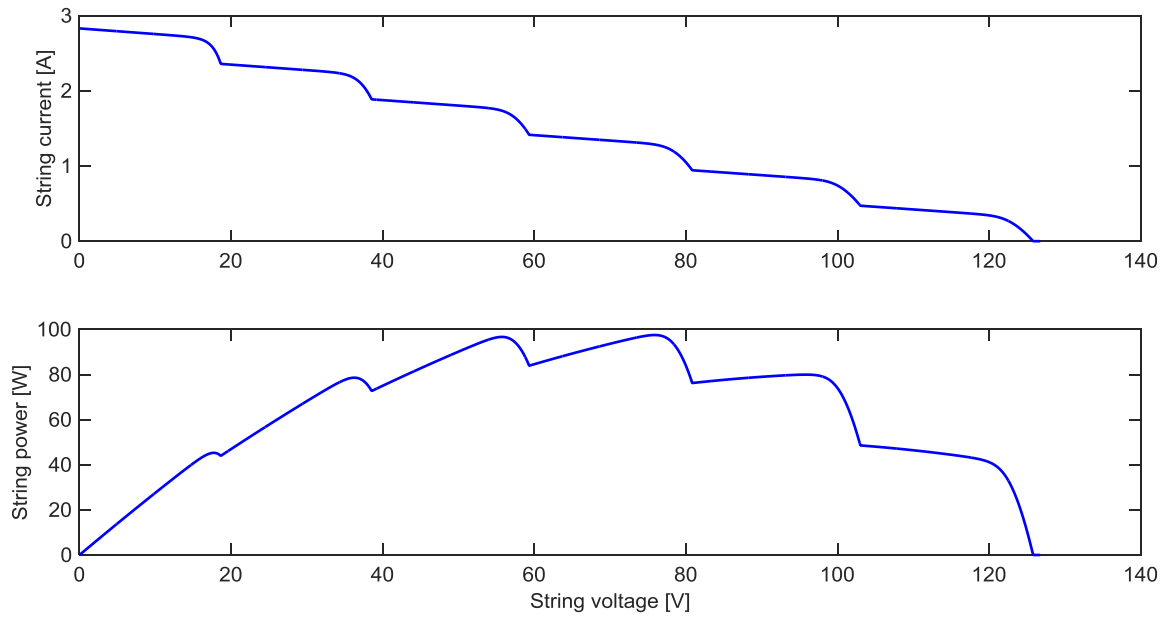


4.2 OBSERVACIÓN Y MODELO REPRESENTATIVO DE LOS PERFILES DE SOMBRAS PARCIALES EN UN DÍA PROMEDIO SOBRE UN ARREGLO PV

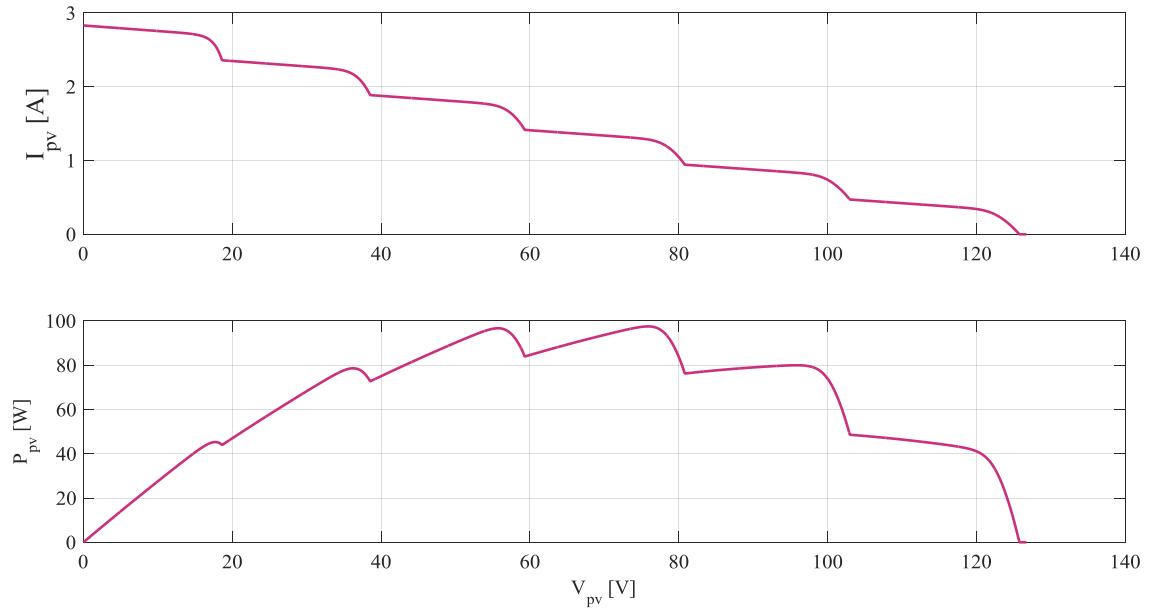
Como principal parámetro de análisis del comportamiento de un arreglo PV, es importante determinar la cantidad de irradiancia solar que recibe cada módulo del arreglo PV, con el fin de determinar el impacto energético que genera la presencia de sombras en la superficie receptora de la energía solar. Este tipo de comportamiento podemos observarlo en las

Gráfica 7 y 8.

Gráfica 7. Curvas V-I y V-P de un string del arreglo PV, con diferentes niveles de irradiancia.



Gráfica 8. Curvas V-I y V-P de un string del arreglo PV, con diferentes niveles de irradiancia, representación de un arreglo PV mediante un string.



En cuyo caso se determinó una matriz aleatoria en porcentajes dando como resultado este comportamiento. Sin embargo, ya como modelo real, se realizó un trabajo de observación en un día soleado, donde solo actuaban las sombras por elementos circundantes, y mediante una tabla de grado de porcentaje de sombras, se determinaron en la cuadrícula del arreglo PV como estaban proyectándose a medida que trascurría el día, y la trayectoria del sol como influía en ello.

Luego de realizar una matriz tridimensional de porcentajes de sombras, las cuales sus vectores serian, numero de módulos conectados en serie por string, luego el número de strings conectados en paralelo en un arreglo, y finalmente, como tercer parámetro establecemos la frecuencia de muestreo de las sombras entre las 7:00 am y las 4:30 pm, como está representado en la Figura 8.

Figura 8. Representación gráfica del lugar de estudio de proyección de sombras parciales incidentes sobre un arreglo PV.



La Figura 8 fue representada mediante el uso de la herramienta de simulación Sketchup .

5. DESARROLLO Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO CIRCUITAL

Previamente se mencionó la importancia de los parámetros iniciales para la solución de estas ecuaciones, en esta sección analizaremos las diferentes ecuaciones con el fin de establecer el modelo representativo mediante el análisis del circuito que caracteriza un módulo PV. También, se tendrá como referencias reales, el Anexo 3, el cual contiene valores reales capturados en uno de los sistemas PV del campus universitario de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de realizar posteriormente a este ítem, la simulación de los cálculos y las gráficas correspondientes a esos parámetros.

Mediante el análisis de corrientes que fluyen por el circuito de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede determinar la corriente de la célula o módulo de la siguiente forma,

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{N_s \eta \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s \cdot I_{cell}}{R_p} \quad (2)$$

Donde I_{ph} es la corriente que fluye por la resistencia en paralelo, la cual se determina de la siguiente formula

$$I_{ph} = I_{ph_{stc}} \cdot \frac{G}{G_{stc}} \left(1 + K_{I_{sc}} \cdot (T - T_{stc}) \right) \quad (4)$$

Asumiendo $I_{ph_{sat}} \approx I_{sc_{stc}}$ y los respectivos valores de G_{stc} , $K_{I_{sc}}$ y T_{stc} , los cuales son proporcionados por el fabricante del producto [22]. G es la irradiancia

solar y T es la temperatura ambiente, información la cual extraemos de los equipos que conforman parte de todo el funcionamiento del sistema PV instalado y en funcionamiento en el campus universitario de la Universidad Industrial de Santander.

De igual forma analizamos la corriente de corto circuito, la cual está representada de la siguiente forma,

$$I_{sat} = I_{ph_{stc}} \cdot \exp\left(\frac{-q \cdot V_{oc_{stc}} / N_s}{\eta \cdot k \cdot T_{stc}}\right) \quad (6)$$

Donde

$$\eta = \frac{q \cdot \left(K_{V_{oc}} - \frac{V_{oc_{stc}}}{T_{stc}}\right)}{N_s \cdot k \cdot T_{stc} \left(\frac{K_{I_{sc}}}{I_{ph_{stc}}} - \frac{3}{T_{stc}} - \frac{E_{gap}}{k \cdot T_{stc}^2}\right)} \quad (5)$$

Y de esta forma poder determinar

$$C = \frac{I_{sat}}{T_{stc}^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap}}{k \cdot T_{stc}}\right)} \quad (7)$$

Cabe recordar que las variables en estas tres ecuaciones están mencionadas en los Datasheet y en la sección 0.

Se procede a realizar el cálculo de las resistencias tanto en serie como en paralelo respectivamente, para lo cual se requiere el desarrollo de la siguiente fórmula matemática,

$$V_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad (8)$$

De esta forma determinar

$$R_s = N_s \cdot \left(\frac{\frac{\eta \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{ph}} \right) + \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{N_s}}{I_{mpp}} \right) \quad (9)$$

$$R_p = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{I_{ph} - I_{mpp} - I_{sat} \cdot \left(\exp \left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{\eta \cdot V_t \cdot N_s} \right) - 1 \right)} \quad (10)$$

$$B = \frac{\eta \cdot k \cdot T \cdot N_s}{q} \quad (11)$$

Sin embargo, estos valores de resistencias no son los reales cuando el sistema está en funcionamiento con una temperatura distinta, correspondiente a la interna del arreglo PV, la cual se determina así

$$x = \frac{V_{mpp} (2 \cdot I_{mpp} - I_{ph}) \left(e^{\frac{V_{mpp} (V_{mpp} - 2 \cdot \eta \cdot V_t)}{(\eta \cdot V_t)^2}} \right)}{\eta \cdot V_t \cdot I_{sat}} \quad (12)$$

$$y = \omega[x] + \frac{2 \cdot V_{mpp}}{\eta \cdot V_t} - \frac{V_{mpp}^2}{(\eta \cdot V_t)^2} \quad (13)$$

$$R_{stc} = \frac{y \cdot \eta \cdot V_t - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (14)$$

$$R_{p_{stc}} = \frac{y * \eta * V_t}{I_{ph} - I_{mpp} - I_{sat}(e^y - 1)} \quad (15)$$

$$T = \frac{G}{G_{stc}} (NOCT - (25 + 273,15)) \left(1 - \frac{\eta}{\tau * \alpha}\right) + T_{amb} \quad (16)$$

Y de esta forma determinar el valor de nuestras dos ecuaciones iniciales involucradas en este desarrollo matemático y analítico.

$$V_{cell} = -B \cdot \omega \left[\frac{I_{sat} \cdot R_p}{B} \cdot \left(\exp\left(\frac{R_p}{B} \cdot (I_{ph} + I_{sat} - I_{cell})\right) \right) \right] - I_{cell}(R_s + R_p) + R_p \cdot (I_{ph} + I_{sat}) \quad (1)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s \cdot I_{cell})}{N_s \cdot \eta \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s \cdot I_{cell}}{R_p} \quad (2)$$

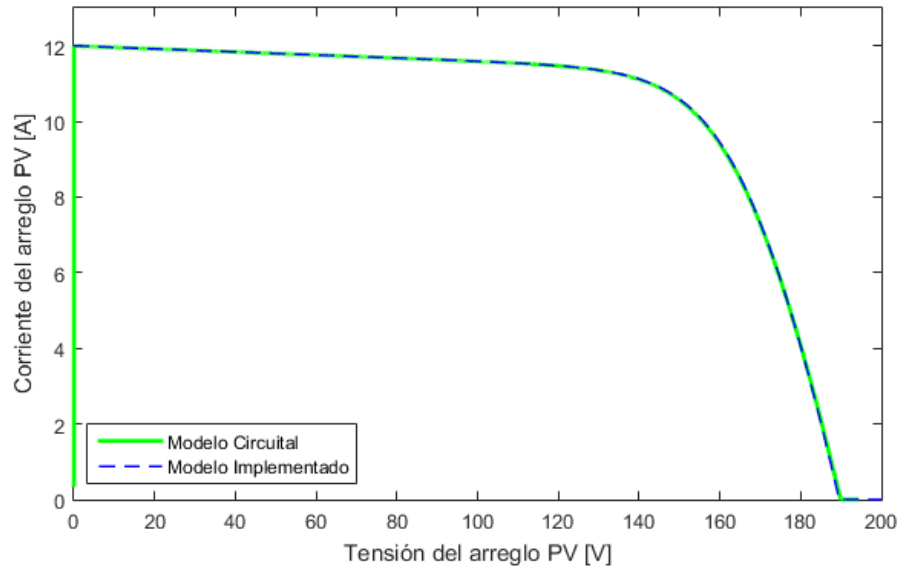
Las cuales representan también un modelo de una fuente de tensión controlada por corriente, por lo tanto, se puede observar que una es dependiente de la otra, para poder resolver estas ecuaciones no lineales, empleamos la función Lambert-W la cual ya fue puesta en desarrollo en las ecuaciones (12) y (13). Esta función tiene como particularidad, hacer una representación en connotación

$$\beta = W(\beta) \cdot e^{W(\beta)} \quad (17)$$

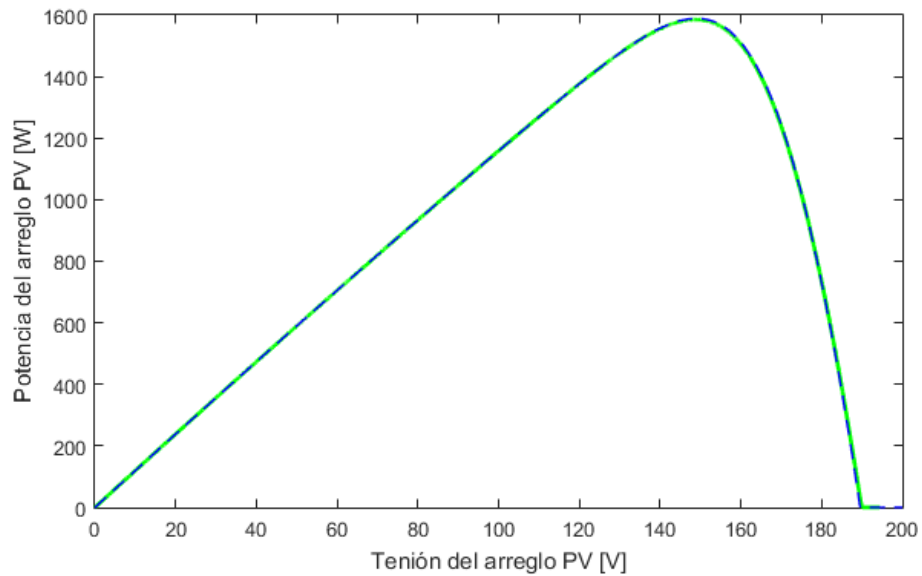
De esta forma, se ingresa el código en el software de computo MATLAB para resolver los cálculos numéricos del arreglo PV en el cual se puede detallar el modelo implementado en el Anexo 1; sin embargo, para validar que es modelo desarrollado en el proyecto de investigación tuviese validez, se comparó con un modelo en simulink el cual se presenta en la Figura 9, donde se incorporaron los parámetros de trabajo, con lo cual se corroboró el correcto funcionamiento. Este

análisis se desarrolló con una configuración de 2 strings, cada uno con 9 módulos PV, dando como resultado las curvas V-I y P-V representadas en las

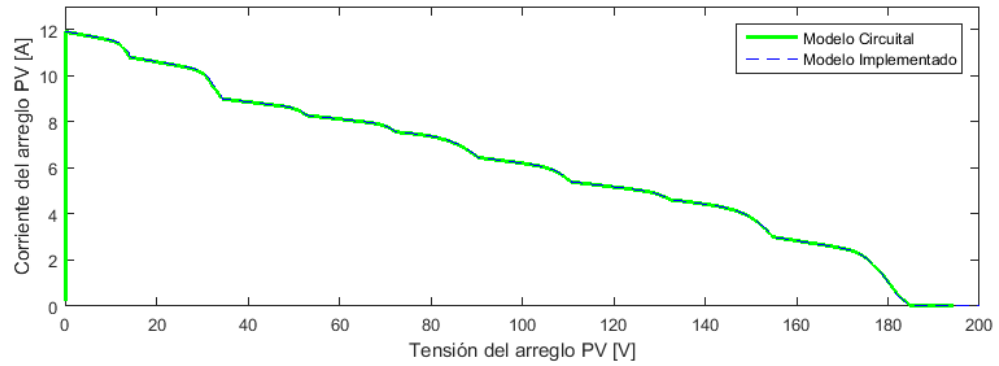
Gráfica 9. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado en condiciones ideales.



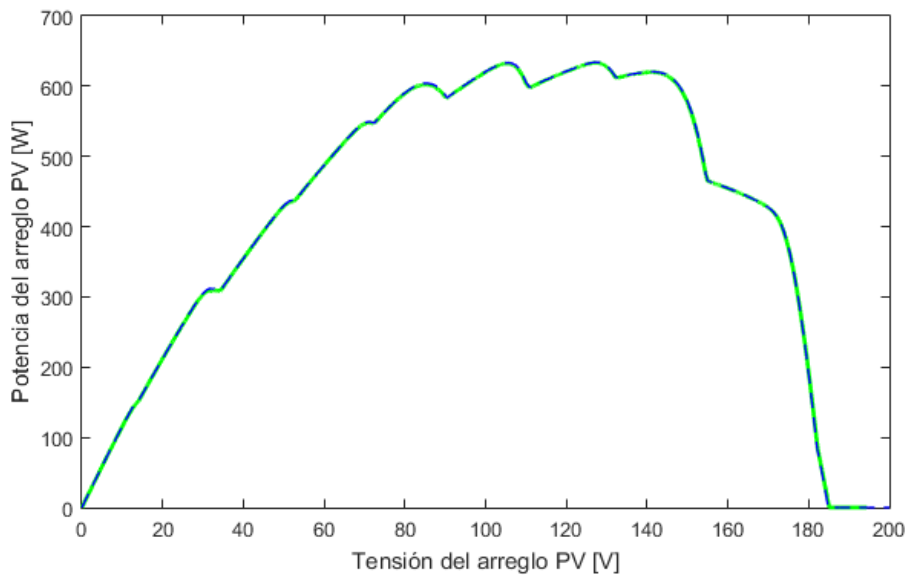
Gráfica 10. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado en condiciones ideales



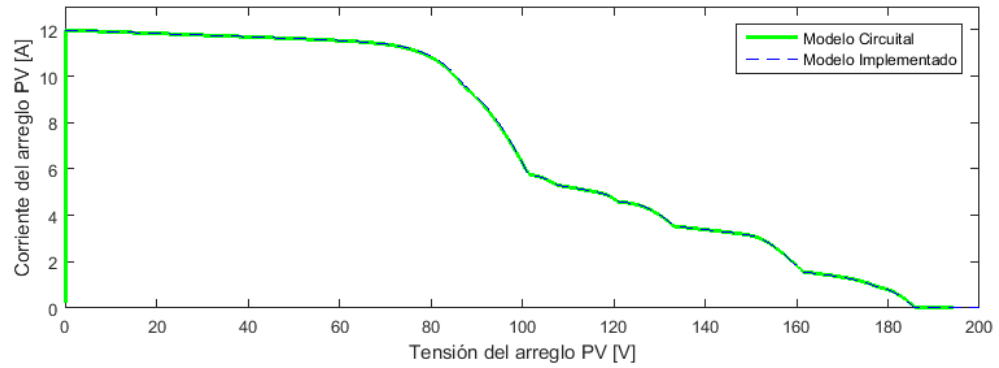
Gráfica 11. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado - primer perfil de mismatching.



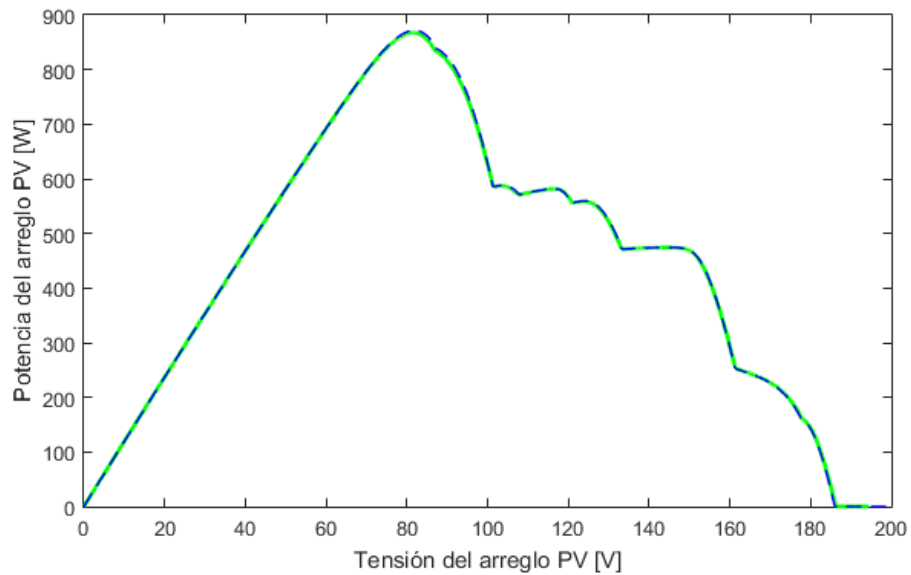
Gráfica 12. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado - primer perfil de mismatching.



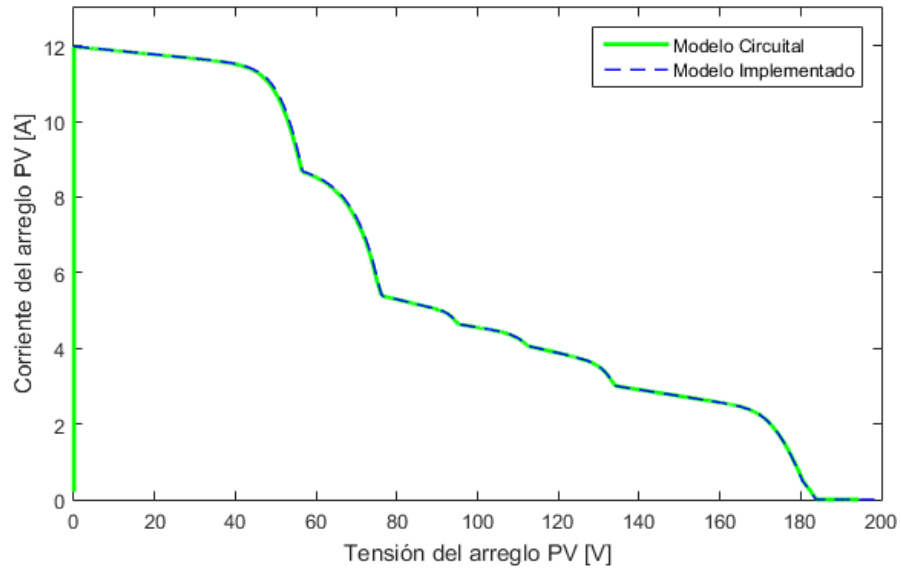
Gráfica 13. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado - segundo perfil de mismatching.



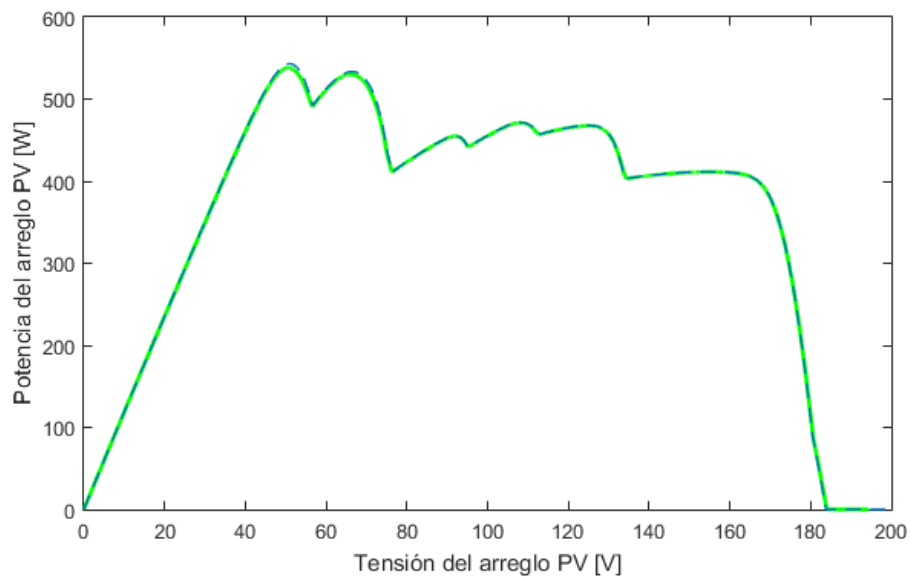
Gráfica 14. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado - segundo perfil de mismatching.



Gráfica 15. Validación V-I de modelo de referencia y modelo implementado - tercer perfil de mismatching.



Gráfica 16. Validación P-V de modelo de referencia y modelo implementado - tercer perfil de mismatching.



Con la comprobación del correcto funcionamiento, se procede a realizar el desarrollo del proyecto de investigación con los parámetros establecidos a continuación, con lo cual se obtuvo una representación gráfica del comportamiento de las corrientes que genera cada módulo PV y se ordenan todas estas corrientes y tensiones de los módulos que conforman un string, como se visualiza en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** – 33, las cuales son la representación de arreglo PV de 4 string con 9 módulos PV cada uno, para horas específicas de análisis de un día, con sus respectivas irradiancias solares, temperaturas ambientes (ver Tabla 11) y perfiles de sombras (ver Tabla 12).

Tabla 11. Valores de irradiancias y temperaturas correspondientes a horas fijas de un día.

| Hora [24:00 Hrs] | Irradiancia [W/m ²] | Temperatura [°C] |
|------------------|---------------------------------|------------------|
| 07:40 | 223 | 22,1 |
| 11:00 | 844 | 28,2 |
| 12:40 | 939 | 28,6 |
| 15:10 | 339 | 27,9 |

Tabla 12. Tablas porcentuales de sombras parciales presentes de un arreglo PV.

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 0,1 | 0,8 | 1 | 1 |
| 0,1 | 0,7 | 1 | 1 |
| 0,1 | 0,5 | 1 | 1 |
| 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,3 |
| 1 | 1 | 0,3 | 0,1 |
| 1 | 1 | 1 | 0,5 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

(11:00)

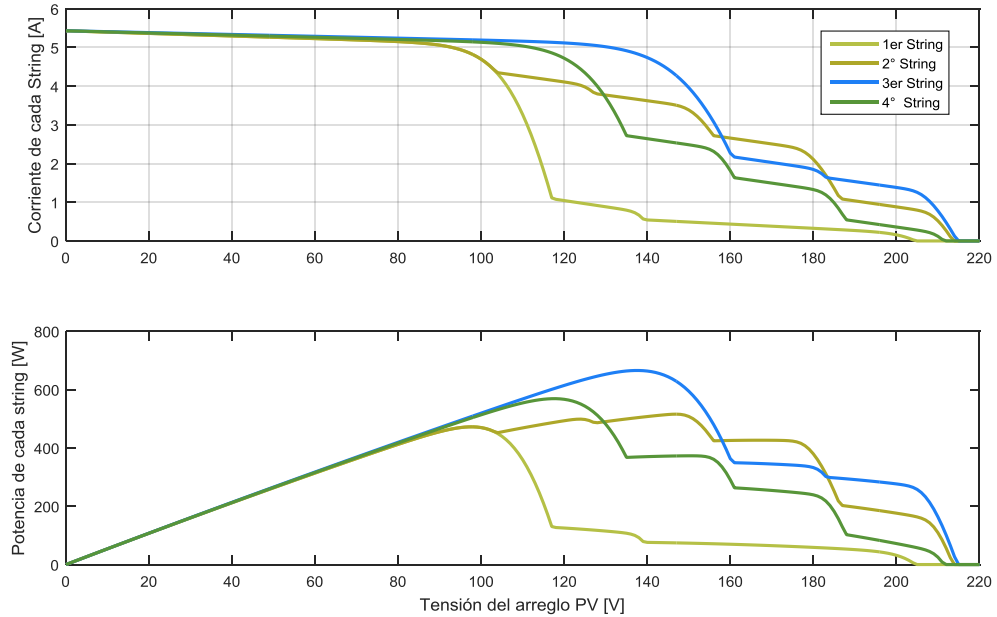
| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

(12:40)

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 0,5 | 0,7 | 1 | 1 |
| 0,8 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0,7 |
| 1 | 1 | 0,8 | 0,4 |
| 1 | 0,9 | 0,4 | 0,2 |
| 0,8 | 0,6 | 0,3 | 0,1 |
| 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 |

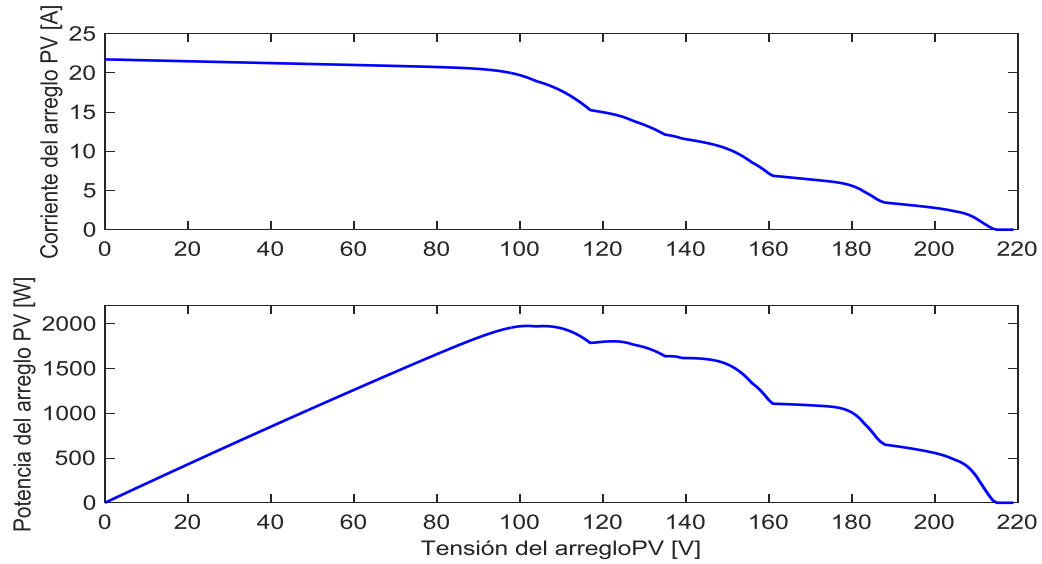
(15:10)

Gráfica 17. Curvas V-I y P-V de los strings del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 11:00 [Hrs].



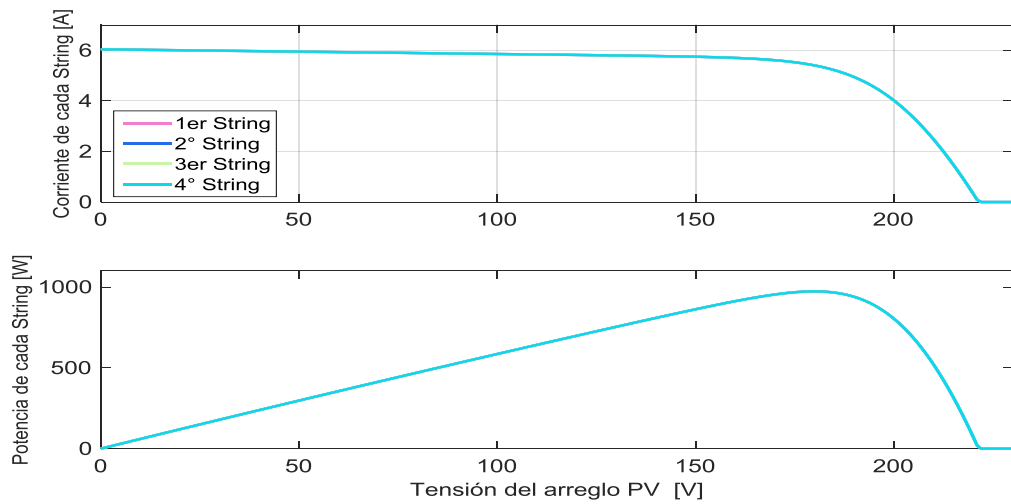
En esta grafica se observan los comportamientos de las corrientes y las potencias correspondientes a cada string que conforman el arreglo PV en el cual, se encuentran los puntos de inflexión y se observan máximos locales que son inducidos por los perfiles de mismatching presentes en este arreglo en esta hora especifica.

Gráfica 18. Curvas V-I y P-V del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 11:00 [Hrs].



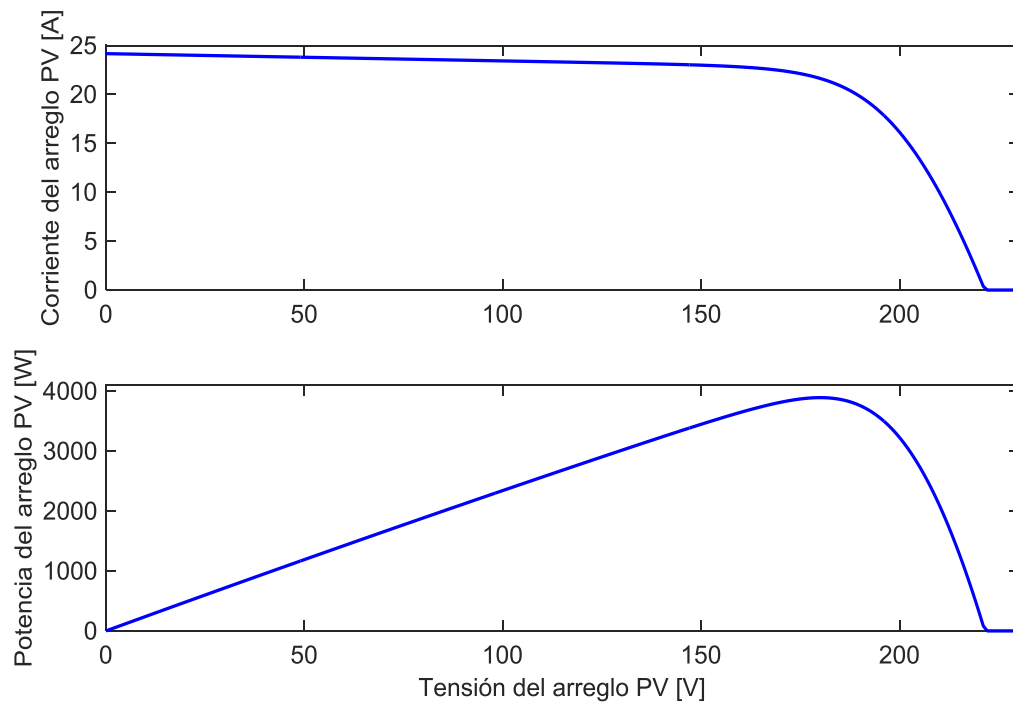
Esta grafica representa la relación V-I y P-V totales del sistema en el cual se aprecian los puntos de inflexión y máximos locales resultantes del arreglo PV.

Gráfica 19. Curvas V-I del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 12:40 [Hrs].



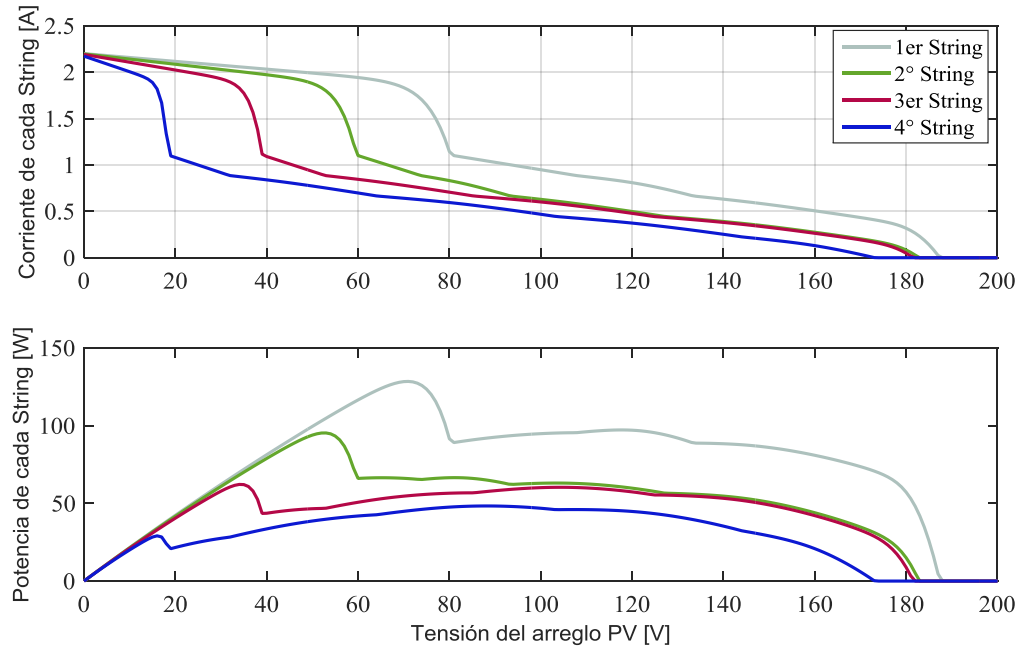
Esta es la representación de un arreglo PV en condiciones ideales, en el cual las curvas de V-I y P-V de cada string tienen exactamente el mismo valor; por tal motivo, estas se encuentran superpuestas. En cuyo caso no presenta puntos de inflexión y presenta un único máximo local.

Gráfica 20. Curvas V-I y P-V del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 12:40 [Hrs].



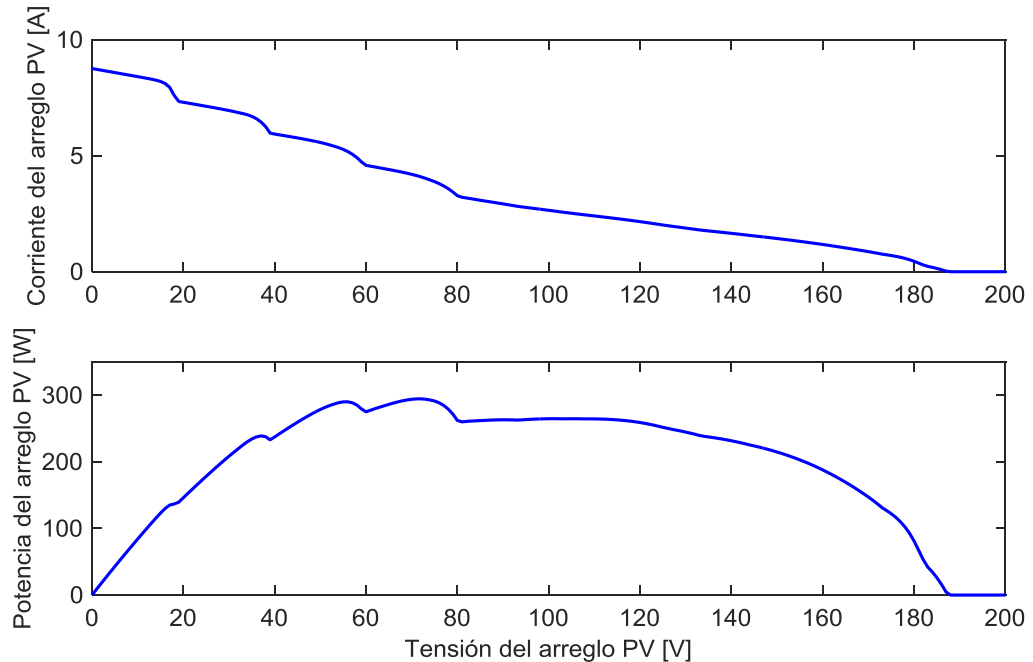
En esta grafica se observa la relación V-I y P-V resultantes de todo el arreglo PV en condiciones ideales.

Gráfica 21. Curvas V-I y P-V de los strings del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 15:10 [Hrs].



La anterior grafica describe el comportamiento de V-I y P-V con un perfil diferente de mismatching y niveles de irradiancia y temperatura acorde a las 15:10 Hrs dando como resultados un punto de inflexión definido y una serie de puntos de inflexión los cuales no presentan un comportamiento con poca variación, para el análisis de los MPPT locales.

Gráfica 22. Curvas V-I y P-V del arreglo PV con los parámetros correspondientes a las 15:10 [Hrs].



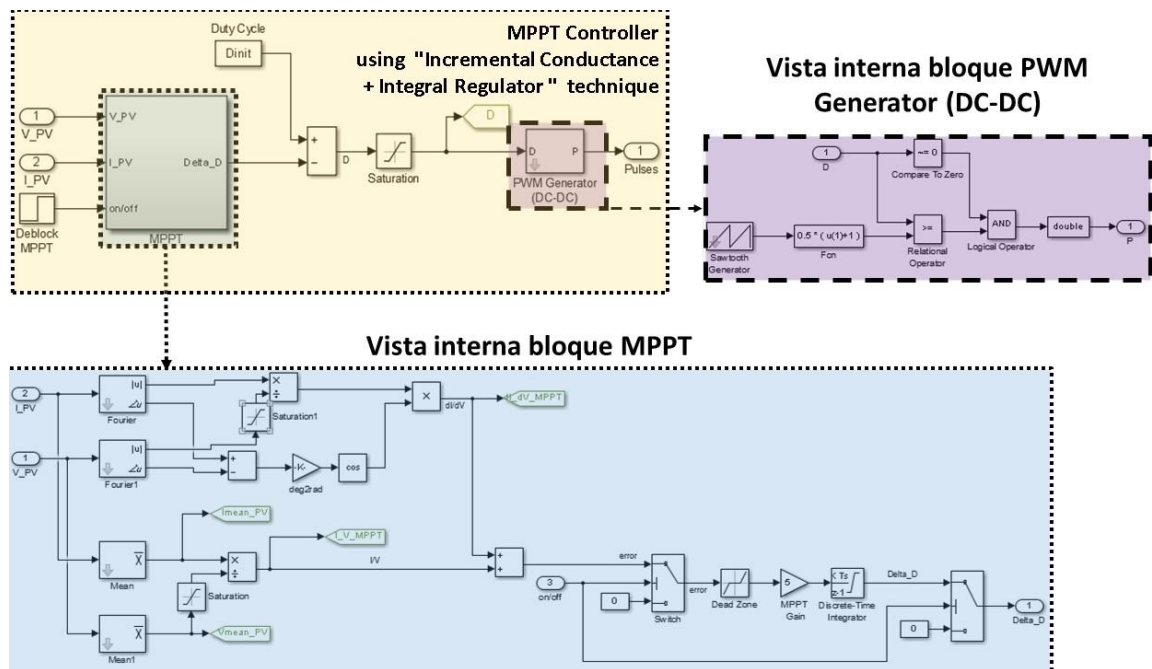
Esta grafica representa el comportamiento V-I y P-V resultante de los strings que componen el arreglo PV en condición de mismatching, irradiancia y temperatura correspondientes a las 15:10 Hrs, presentando puntos de inflexión definidos los cuales permiten la apreciación de los máximos locales y del punto MPPT global en cual se encuentra aproximadamente cuando la tensión del arreglo PV está entre el rango de los 65 y 80 [V].

5.2 DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL DE SEGUIMIENTO DE MPPT

Dando como finalizado a el desarrollo del proyecto de investigación, se estableció en los objetivos específicos la creación de un algoritmos de control de MPPT con el fin de analizar el comportamiento del correcto funcionamiento contrastándolo

con el modelo diseñado por la Toolbox de Matlab mencionado en la sección 0, en la cual se presenta un modelo de MPPT en el cual implementan la técnica de “Conductancia incremental + Regulación integral” como se observa en la Figura 10.

Figura 10. Funcionamiento bloque MPPT referenciado de la Toolbox de Matlab - Simulink.



El modelo implementado y propuesto en este proyecto de investigación se presenta a continuación en las Figura 12 y 12, el cual se creó una función, la cual esta descrita en el Anexo 2 y se define de la siguiente forma:

Figura 11. Diagrama de funcionamiento del MPPT implementado

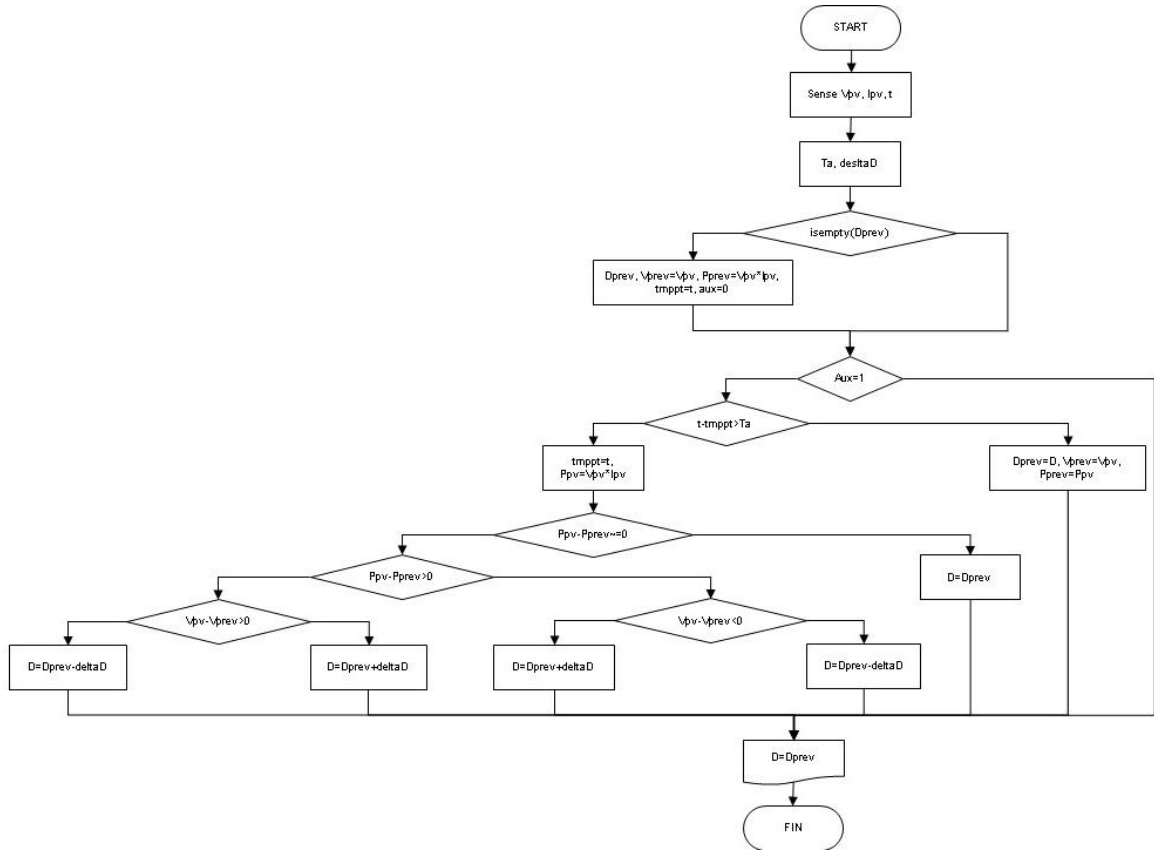
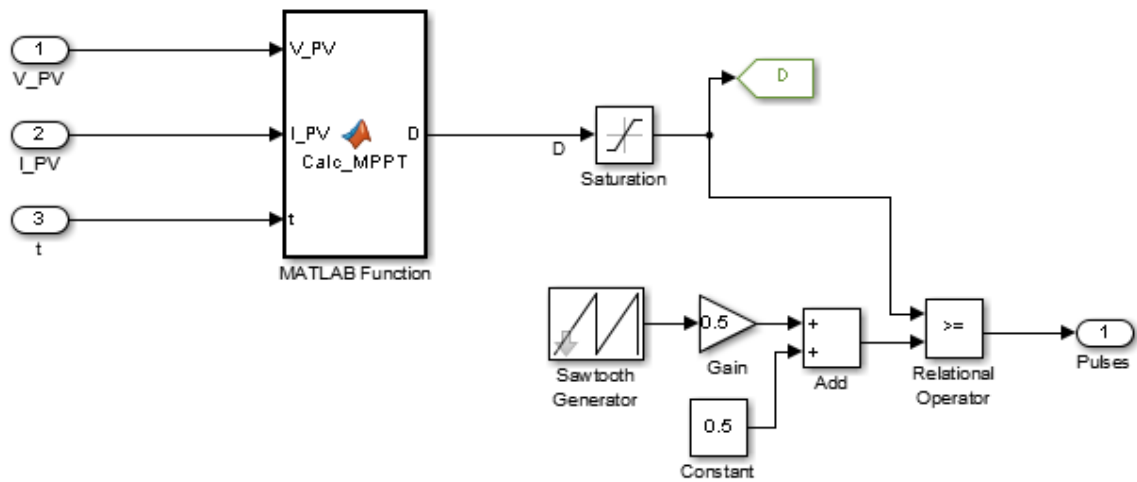
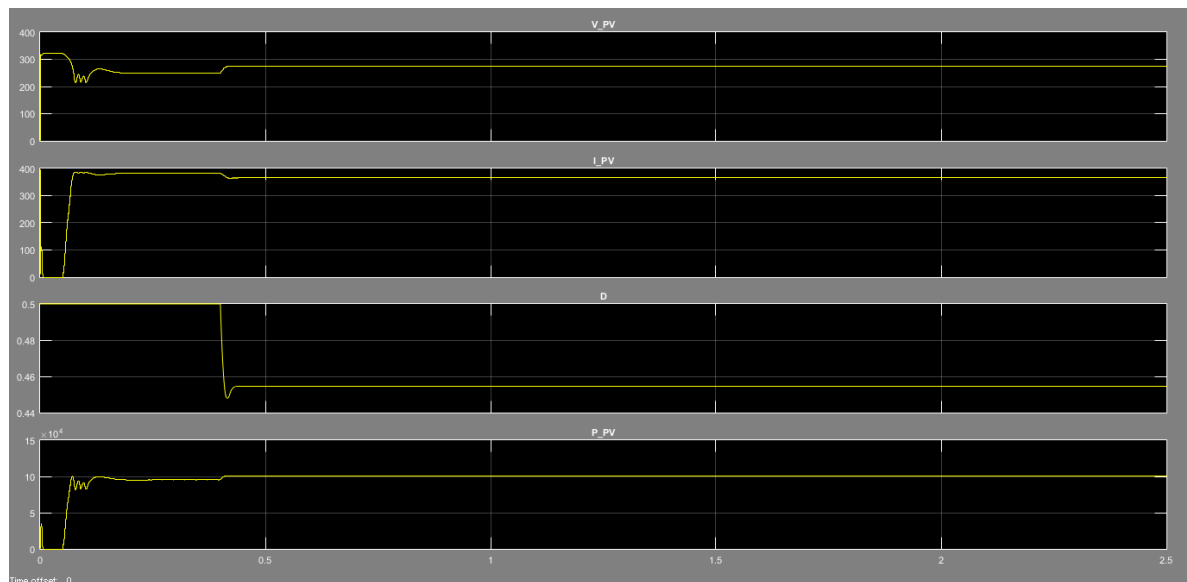


Figura 12. Funcionamiento bloque MPPT implementado.



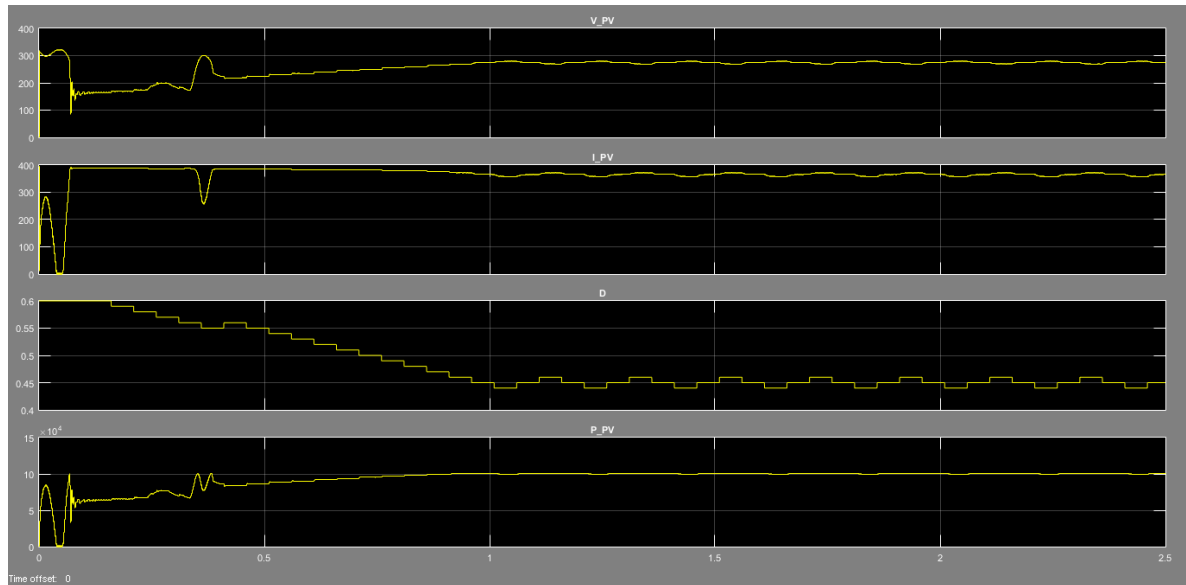
En la cual podemos observar un comportamiento estableciendo valores fijos de irradiancia y temperatura de $1000[\text{W}/\text{m}^2]$ y $25[^\circ\text{C}]$ respectivamente, dando como resultado las curvas de tensión, corriente y potencia de un arreglo PV ya establecido por la Toolbox de la herramienta de computo Matlab presentadas en las Grf++++ .

Gráfica 23. Representación del funcionamiento del modelo de referencia.



Para el desarrollo del algoritmo implementado en este trabajo, las curvas con las mismas condiciones de trabajo se presentan en las GR++++.

Gráfica 24. Representación del funcionamiento del modelo implementado.



Con esto se da por confirmado el correcto funcionamiento del código y la estructura del funcionamiento del MPPT en el cual se implementó la técnica de “Perturb and Observe”, la cual consiste en realizar una comparación del valor de la tensión en un punto inicial V_0 contra un valor de tensión en un espacio definido V_1 , con el fin de evaluar la tensión V_0 si es mayor a la tensión V_1 , y la potencia correspondiente a cada tensión es evaluada con el fin de establecer cuál de las dos es mayor. Se debe evaluar consecutivamente hasta encontrar un punto estacionario, en el cual se observa un comportamiento repetitivo en la evaluación de la señal “D” representada en la Gráfica 24.

5.3 IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK

Debido a la necesidad de ver como es el comportamiento de un arreglo PV conectado a la red eléctrica, se debe tener en consideración los demás dispositivos y su funcionamiento cuando todo se encuentra interconectado.

Por tal motivo, el modelo inicial, el cual se encuentra en la librería interna de la herramienta de computo MATLAB, en conjunto de su desarrollador grafico SIMULINK, se reemplazó el modelo existente en dicha librería, el cual representaba un arreglo PV con diversas referencias de paneles fotovoltaicos que están presentes en el mercado; pero el propósito de nuestro desarrollo es la implementación de nuestro modelo, el cual se adjuntara a continuación, ya que en nuestro desarrollo se incorpora el análisis de las curvas con sus respectivos puntos de inflexión considerando un modelo matricial de 3 dimensiones, de la siguiente forma:

- Para una determinada hora del día en la franja de estudio, le corresponde un nivel de irradiancia, temperatura ambiente y el respectivo perfil de sombras sobre el arreglo PV en ese espacio de tiempo de 10 minutos para un total de 60 muestras que se pueden representar mediante configuración del código base.

Para el cálculo de los parámetros de funcionamiento del arreglo PV se determinan mediante la incorporación del parámetro hora, y de esta forma el sistema, cargar los parámetros de trabajo con respecto a esa hora específica (ver

Figura 13).

En nuestro caso analizamos el comportamiento de las curvas de cada arreglo que conforman un sistema PV, en el cual presenta diferentes puntos de inflexión y consecuentemente el MPP en cada uno de estos puntos, para este fin se creó el sistema PV como se puede apreciar en la Figura 14.

Figura 13. Subsistema de importación de parámetros de trabajo del modelo implementado.

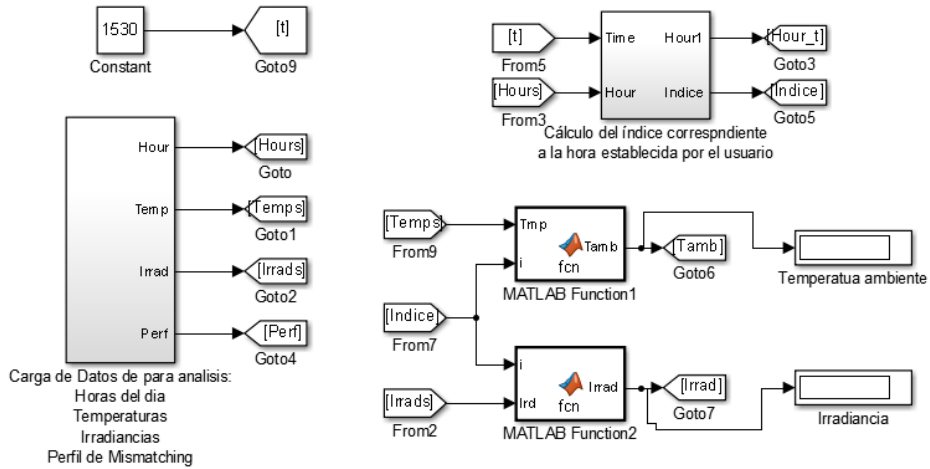
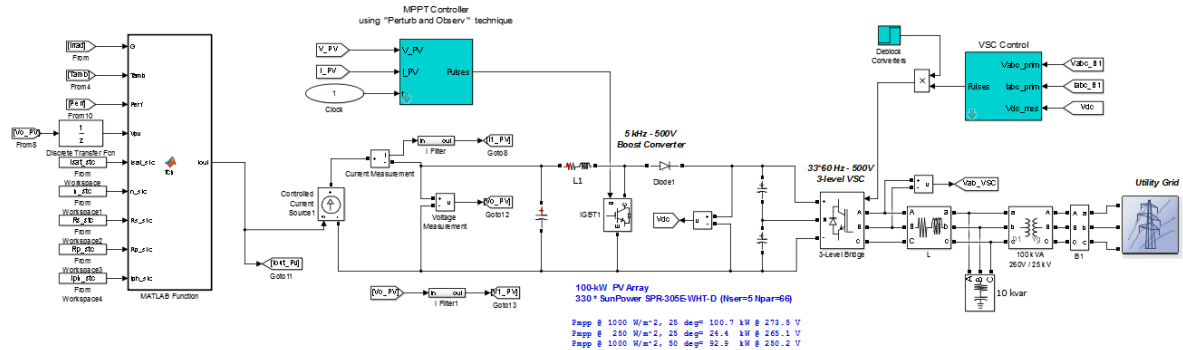


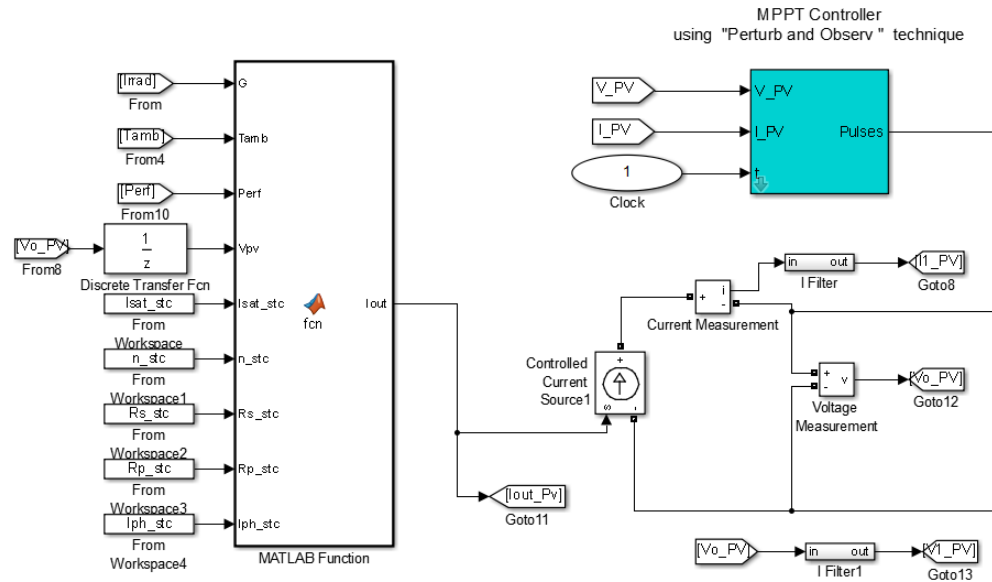
Figura 14. Sistema PV conectado a la Red de distribución eléctrica, con análisis de perfiles de sombras y el estudio del comportamiento de MPPT.



Del sistema completo, los parámetros o bloques en los que se enfocó el desarrollo de este proyecto de investigación son lo visualizados en la

Figura 15.

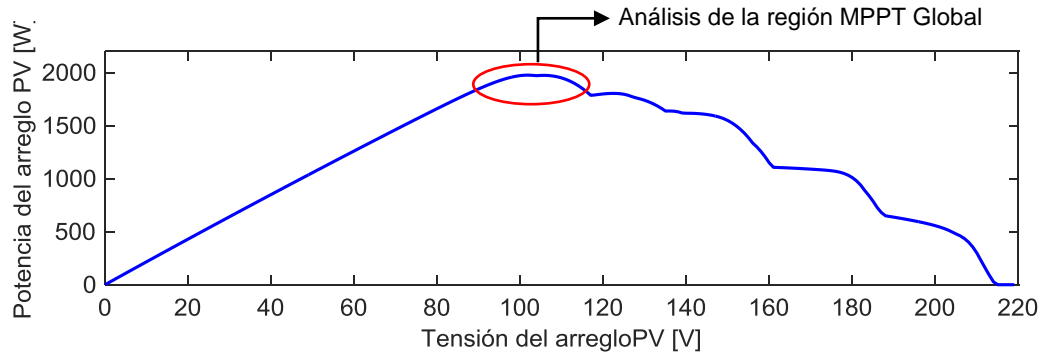
Figura 15. Bloques de análisis de mismatching previo al suministro hacia la red.



El desarrollo del código para la adquisición de datos desde un archivo almacenado previamente en la misma carpeta del directorio de ejecución del modelo de simulación.

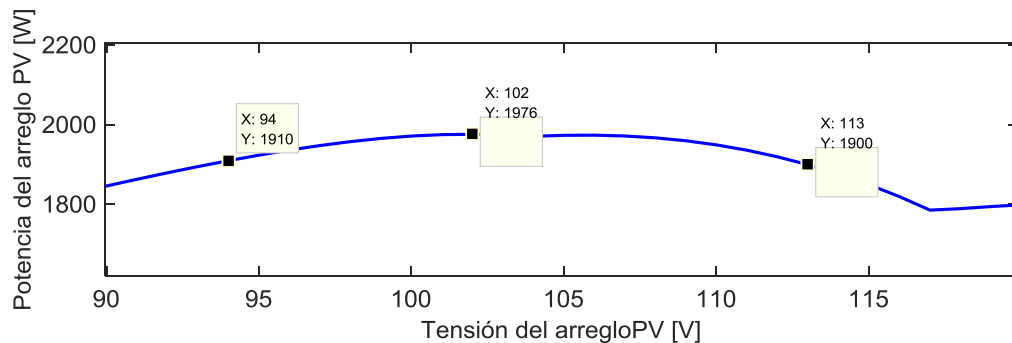
El desarrollo de un modelo en el entorno de programación visual SIMULINK, permite una mejor interacción del usuario con el sistema PV para determinar comportamientos a diversos proyectos futuros, sin embargo, cabe resaltar que para el estudio de este proyecto de grado se empleó una única referencia de dispositivo, pero con un comportamiento en horarios del día donde presentaban patrones de sombreado más significativos para realizar un análisis comparativo más demarcado por variables como lo son, la irradiancia y temperatura, las cuales son nuestras variables de ingreso para analizar el comportamiento del sistema.

Gráfica 25. Análisis de la región de cálculo del MPPT global correspondiente al perfil de mismatching, irradiancia y temperatura de las 11:00 Hrs.

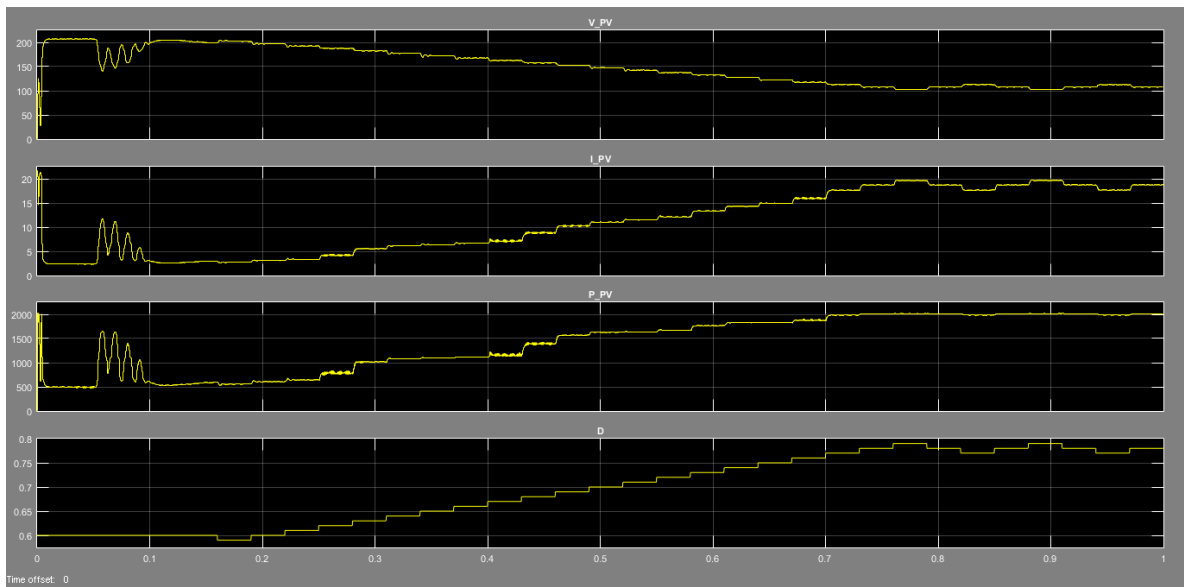


Para el primer análisis correspondiente a las 11:00 am, la gráfica de P-V describe unos puntos de inflexión a los cuales les corresponde sus respectivos MPPT locales, sin embargo, el algoritmo desarrollado para este proyecto de investigación se enfoca en encontrar el MPPT global como se observa en las Gráfica 26 – 35.

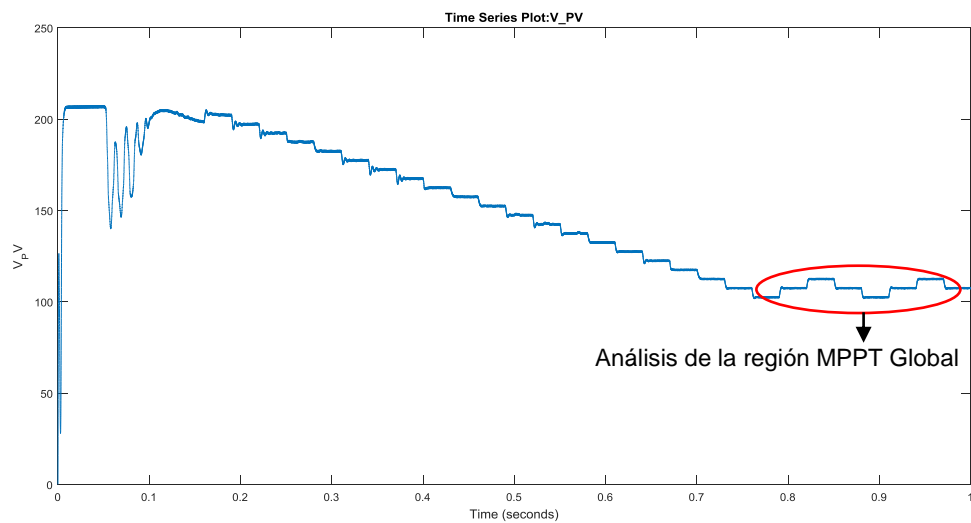
Gráfica 26. Región de estabilización del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs.



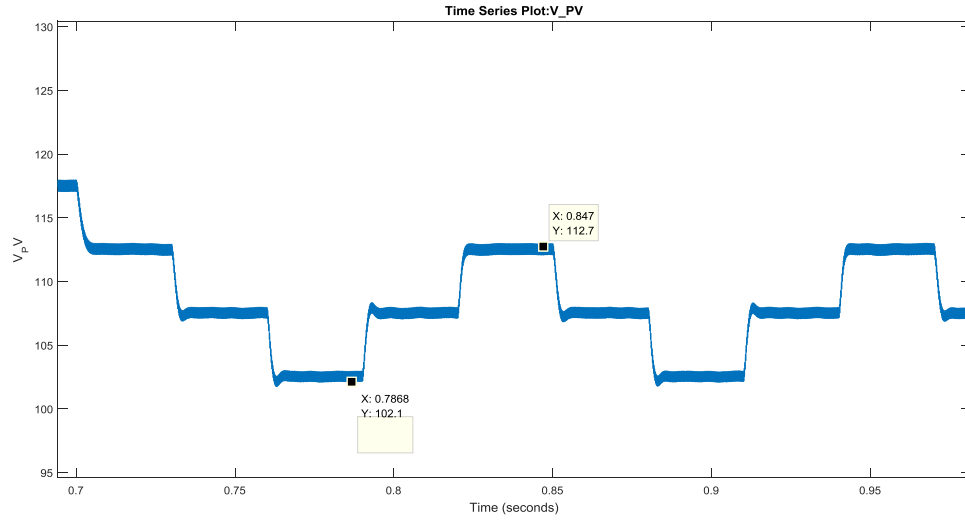
Gráfica 27. Análisis de los parámetros del comportamiento de MPPT global correspondientes a las 11:00 Hrs.



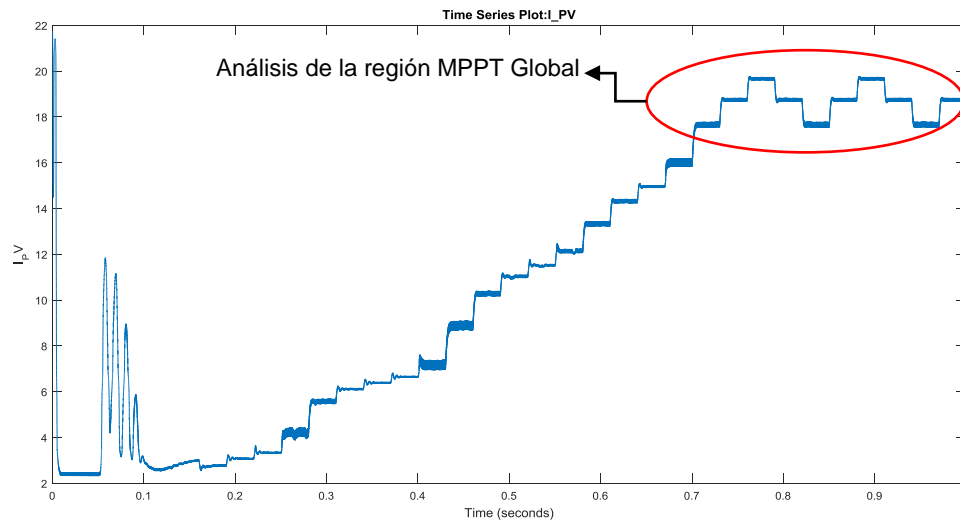
Gráfica 28. Comportamiento de la tensión del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs.



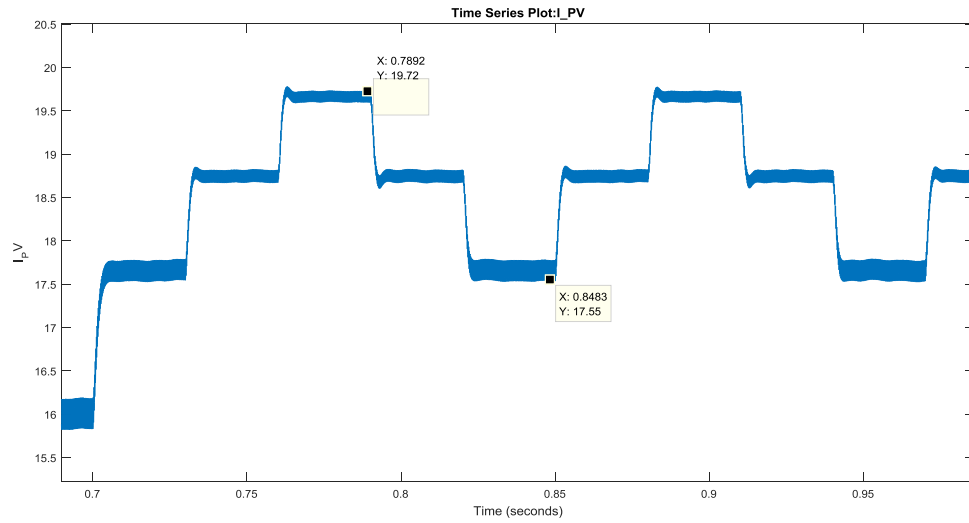
Gráfica 29. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 28.



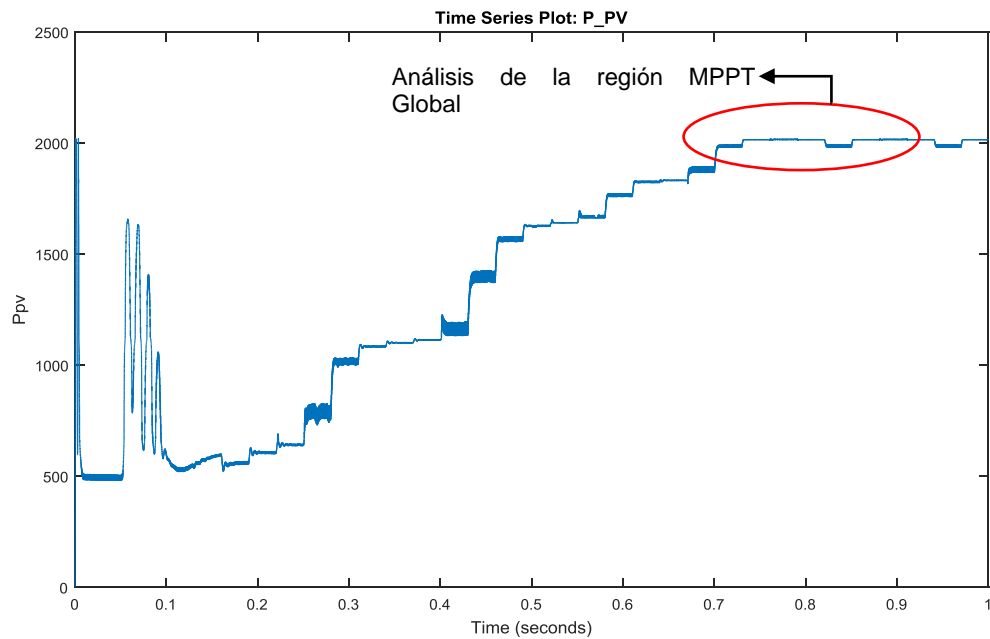
Gráfica 30. Comportamiento de la corriente del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs.



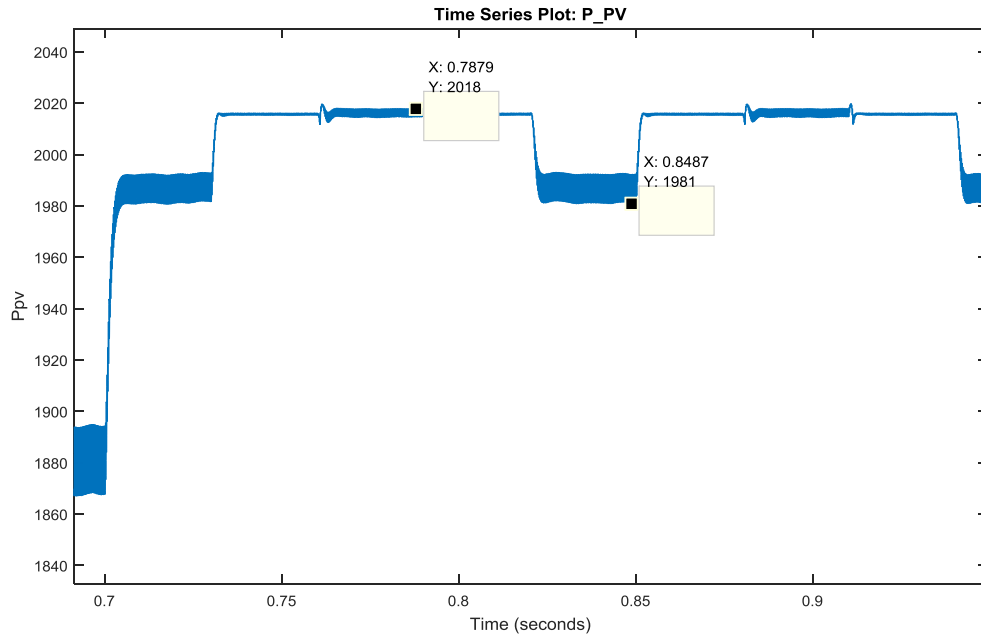
Gráfica 31. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 30.



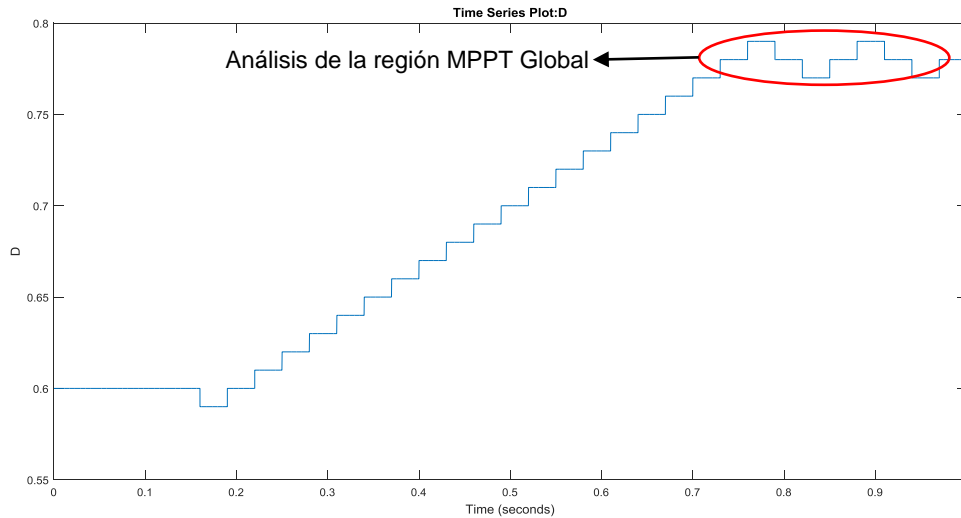
Gráfica 32. Comportamiento de la potencia del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs.



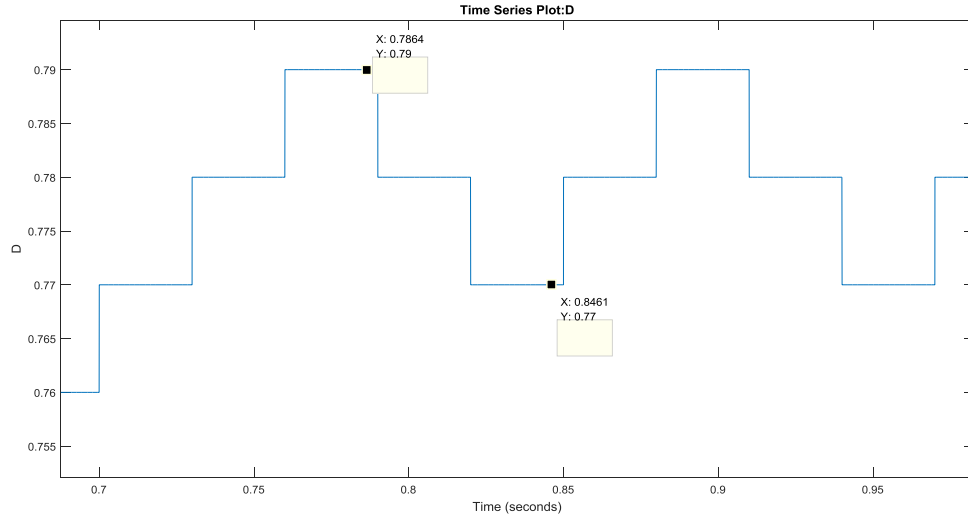
Gráfica 33. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 32.



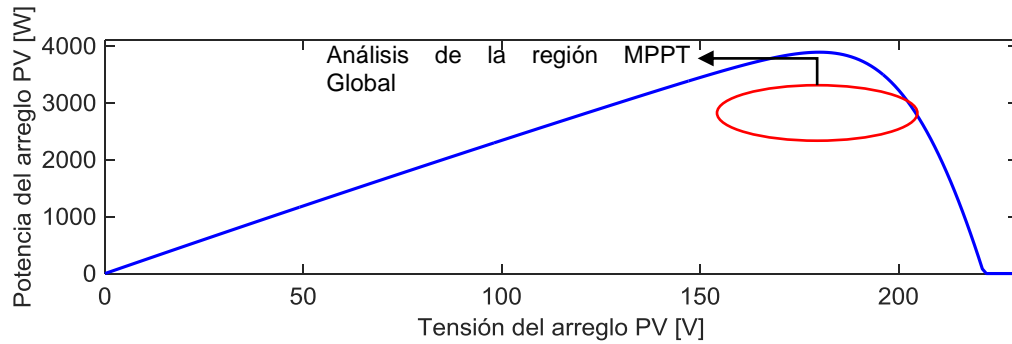
Gráfica 34. Comportamiento de la relación de trabajo del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 11:00 Hrs.



Gráfica 35. Gráfica 33. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 34.

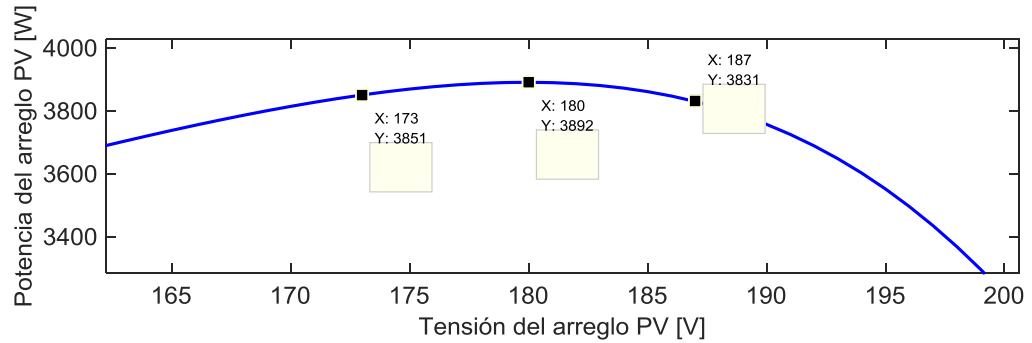


Gráfica 36. Análisis de la región de cálculo del MPPT global correspondiente al perfil de mismatching, irradiancia y temperatura de las 12:40 Hrs.

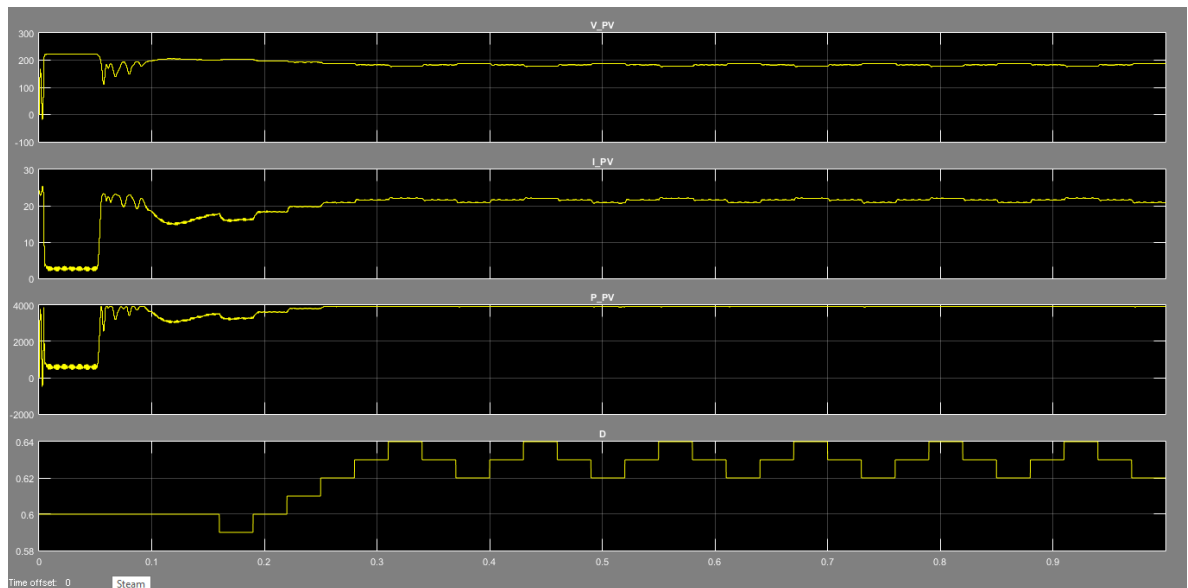


Para el primer análisis correspondiente a las 12:40 am, la gráfica de P-V no se aprecian puntos de inflexión, por tal motivo, el algoritmo desarrollado para este proyecto de investigación se enfoca en encontrar el MPPT global como se observa en las Gráfica 37 – 46.

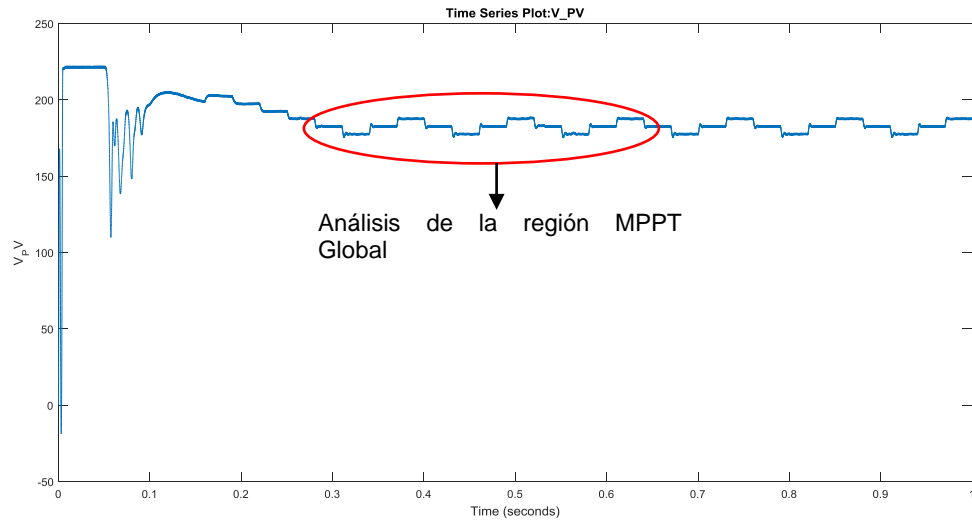
Gráfica 37. Región de estabilización del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs.



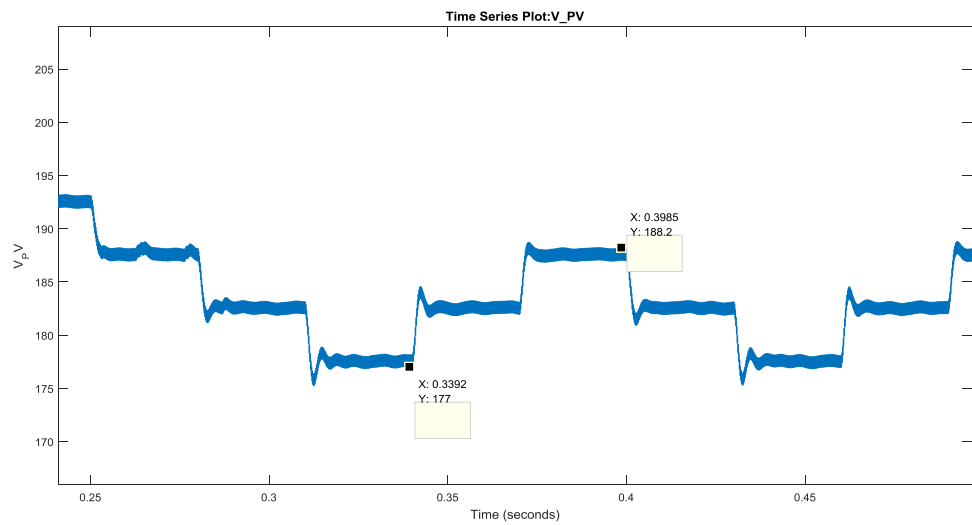
Gráfica 38. Análisis de los parámetros del comportamiento de MPPT global correspondientes a las 12:40 Hrs.



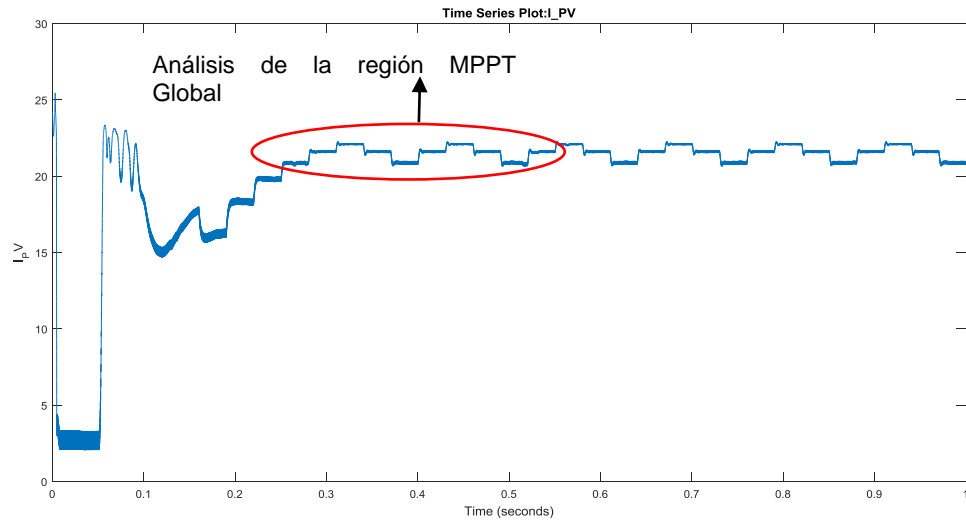
Gráfica 39. Comportamiento de la tensión del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs.



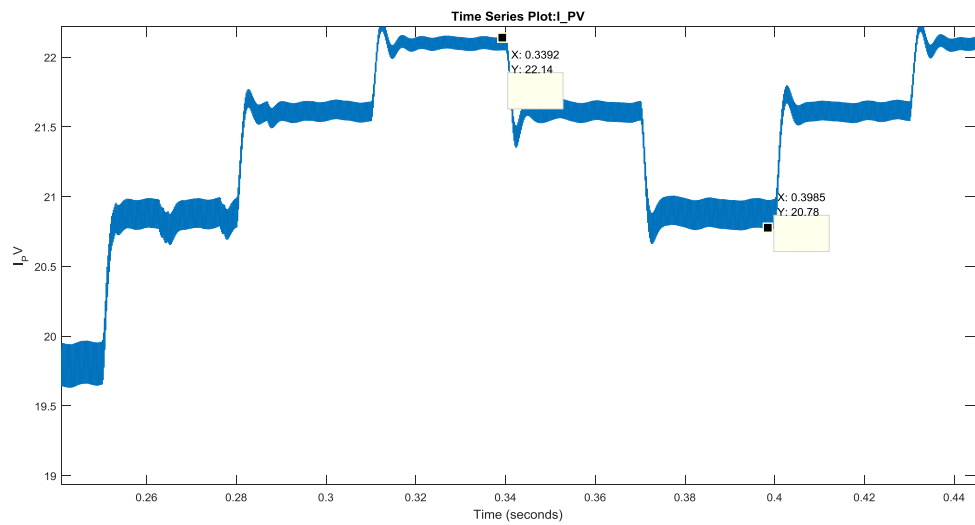
Gráfica 40. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 39.



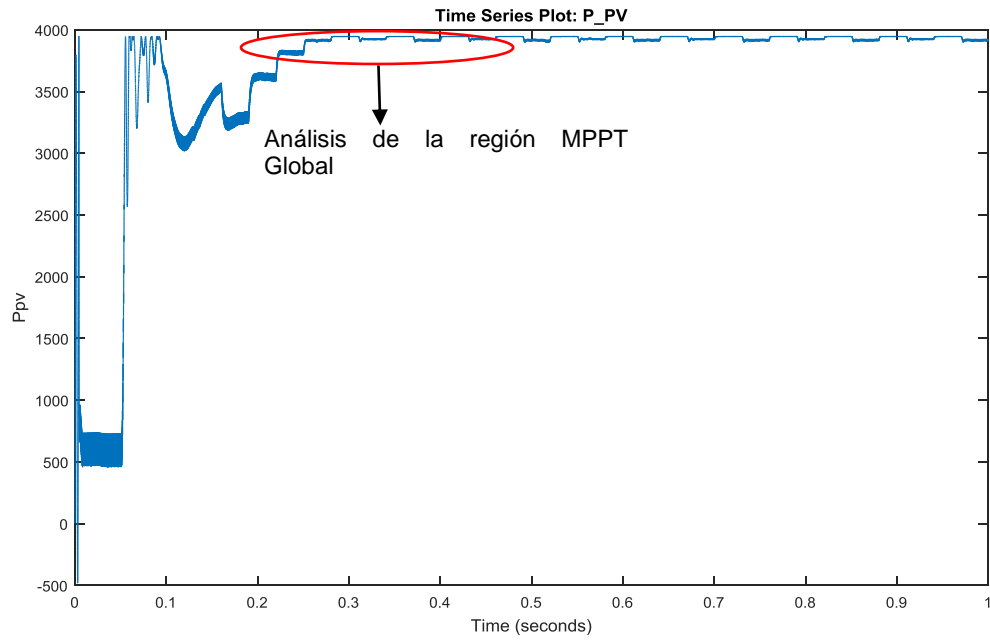
Gráfica 41. Comportamiento de la corriente del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs.



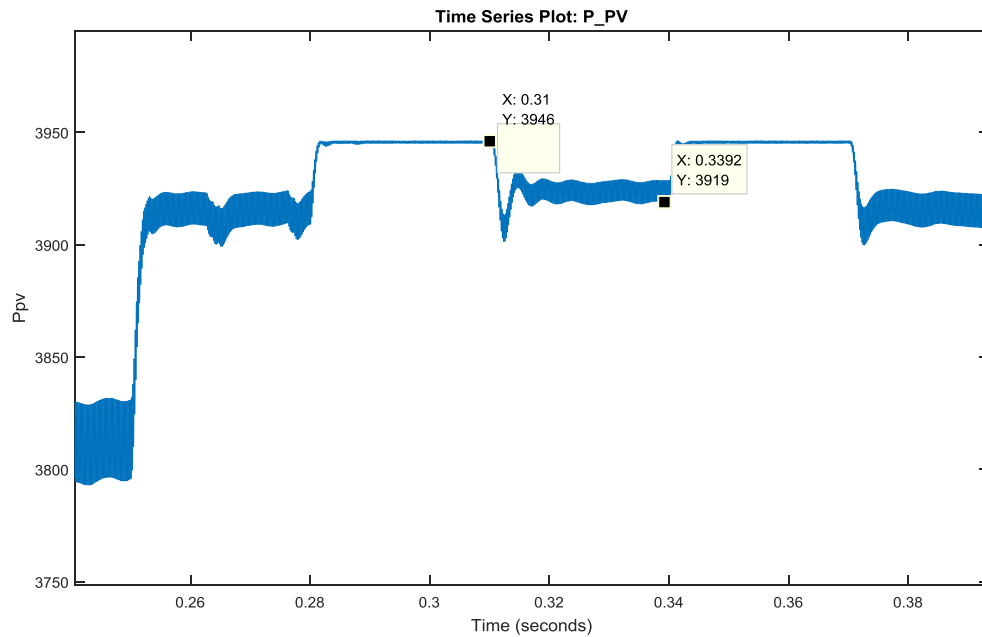
Gráfica 42. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 41.



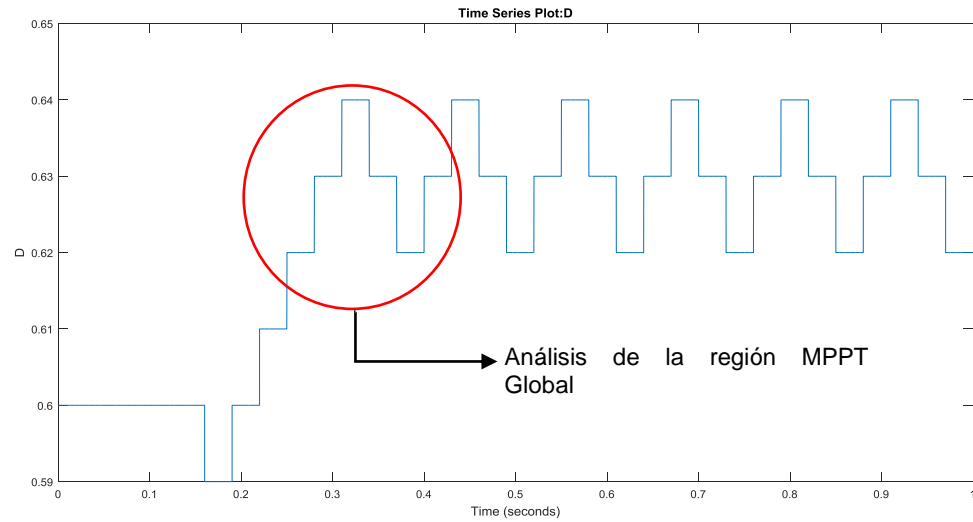
Gráfica 43. Comportamiento de la potencia del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs.



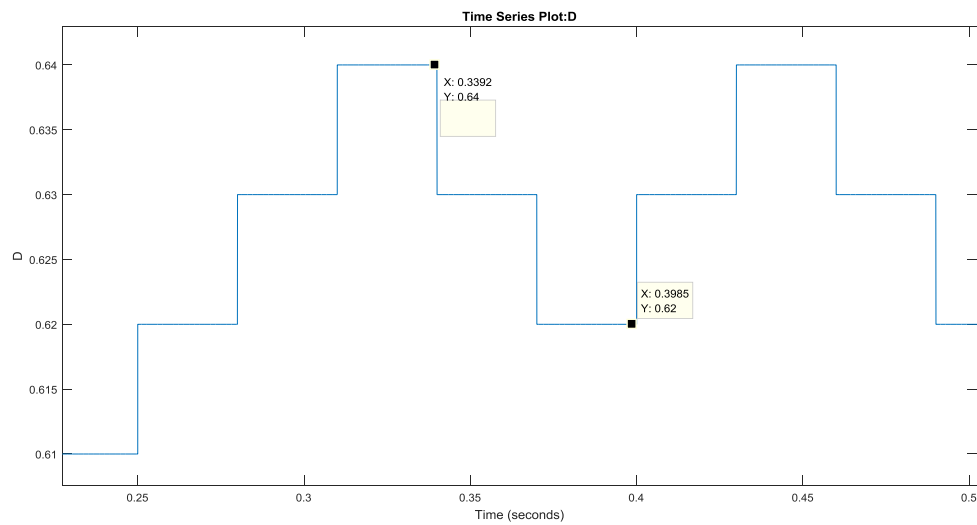
Gráfica 44. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 43.



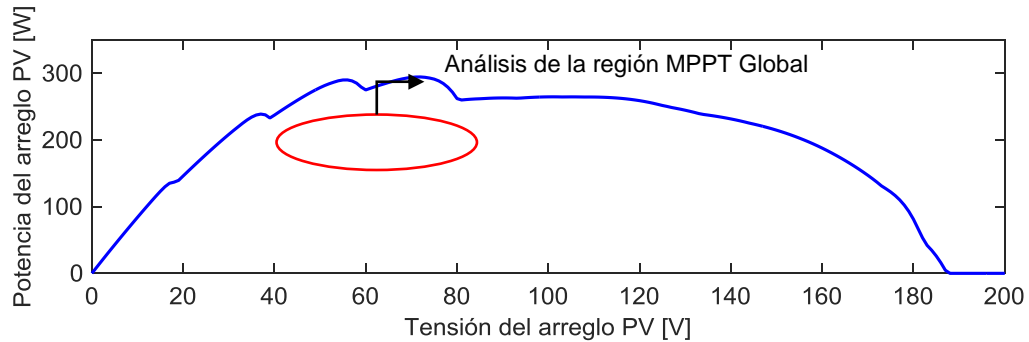
Gráfica 45. Comportamiento de la relación de trabajo del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 12:40 Hrs.



Gráfica 46. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 45.

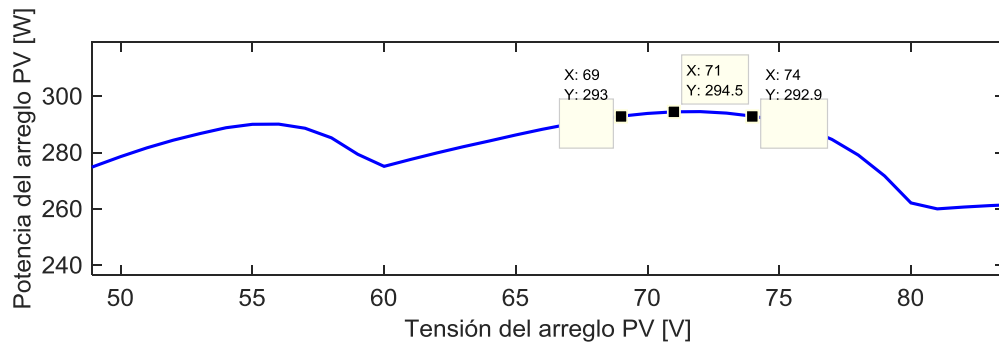


Gráfica 47. Análisis de la región de cálculo del MPPT global correspondiente al perfil de mismatching, irradiancia y temperatura de las 15:10 Hrs.

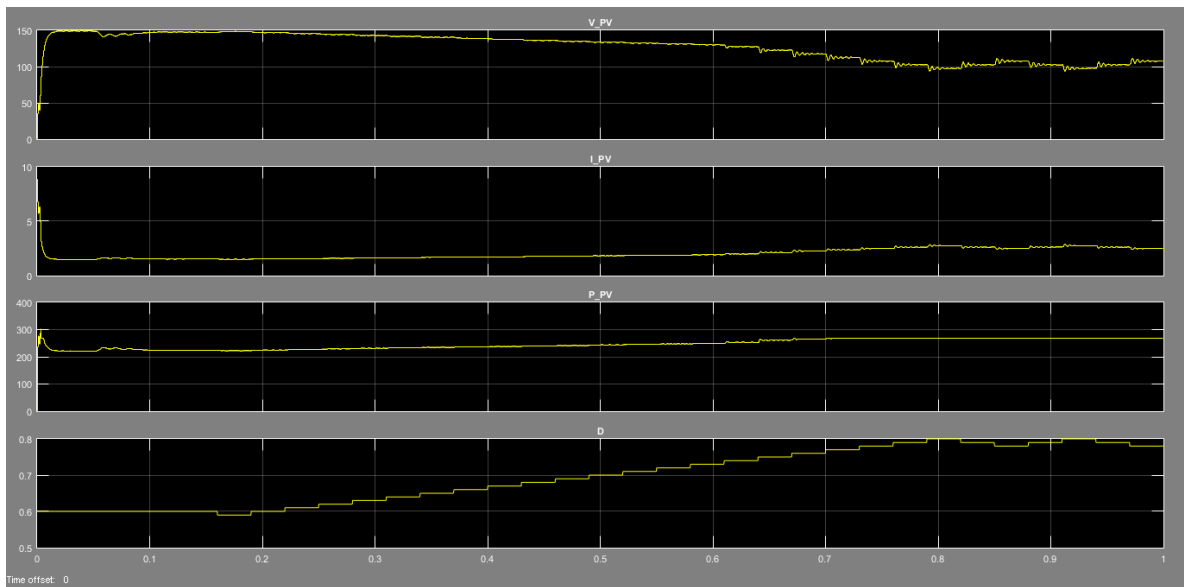


Para el primer análisis correspondiente a las 15:10 Hrs, la gráfica de P-V se aprecian puntos de inflexión acumulados detrás del punto MPP y otros no muy definidos delante de éste, por tal motivo, el algoritmo desarrollado para este proyecto de investigación se enfoca en encontrar el MPPT global como se observa en las Gráfica 48 – 46.

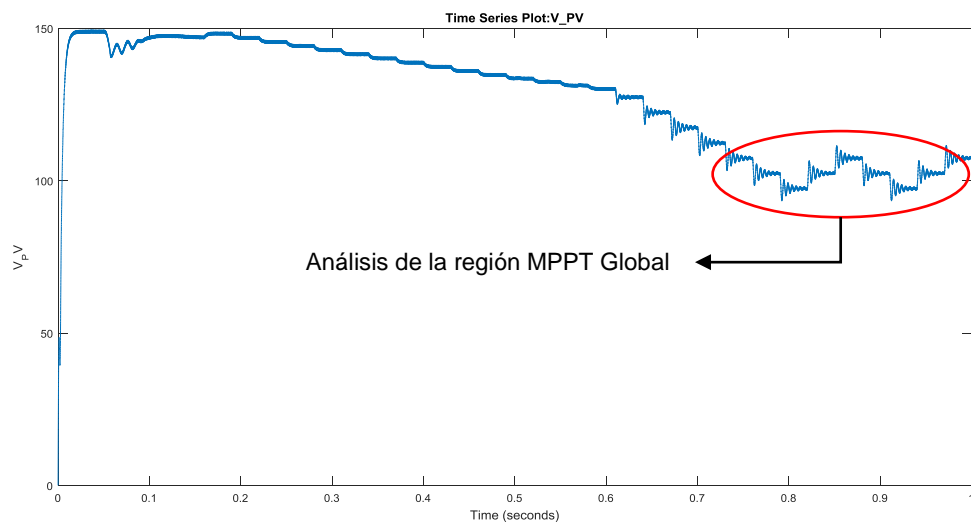
Gráfica 48. Región de estabilización del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs.



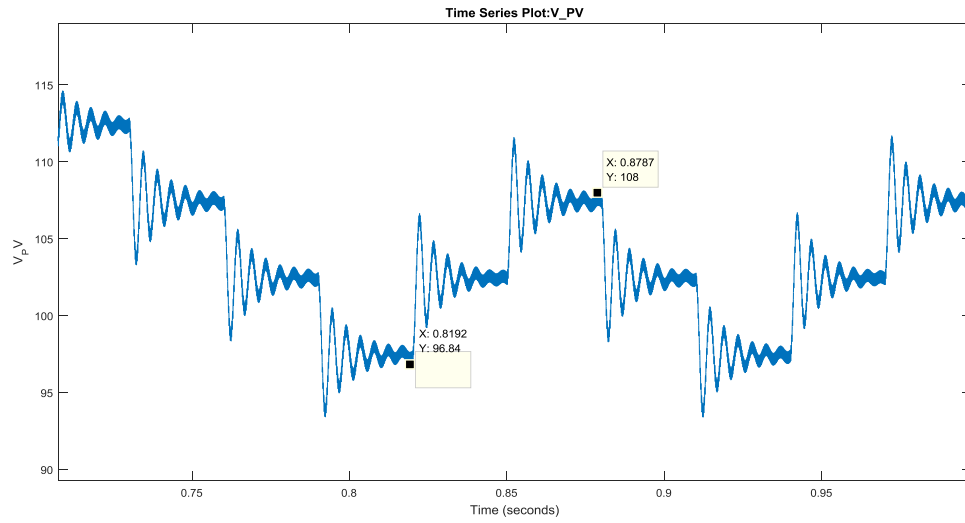
Gráfica 49. Análisis de los parámetros del comportamiento de MPPT global correspondientes a las 15:10 Hrs.



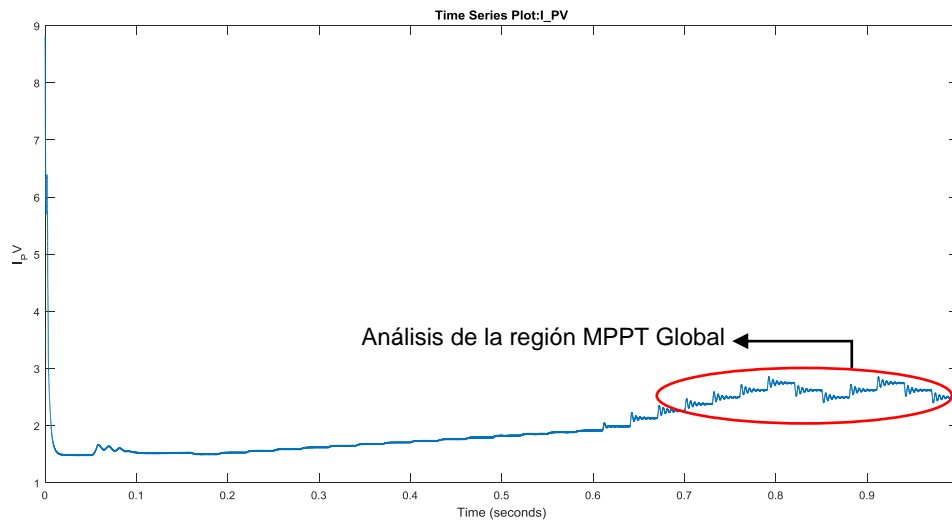
Gráfica 50. Comportamiento de la tensión del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs.



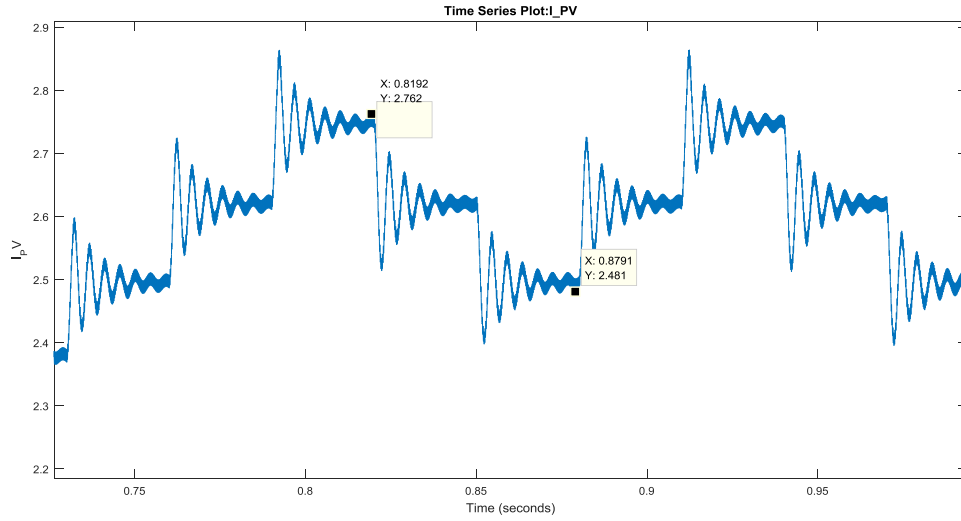
Gráfica 51. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 50.



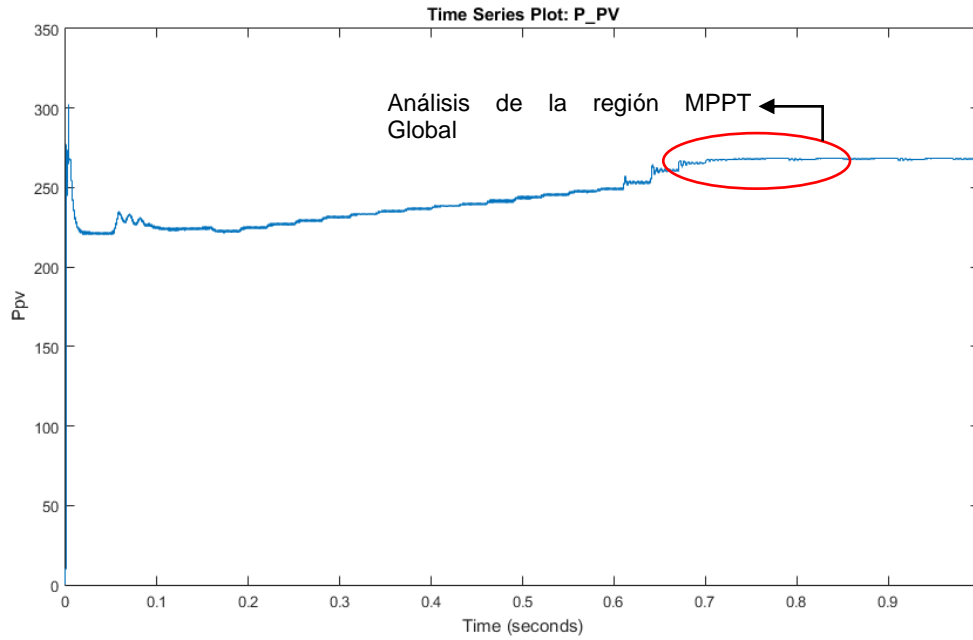
Gráfica 52. Comportamiento de la corriente del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs.



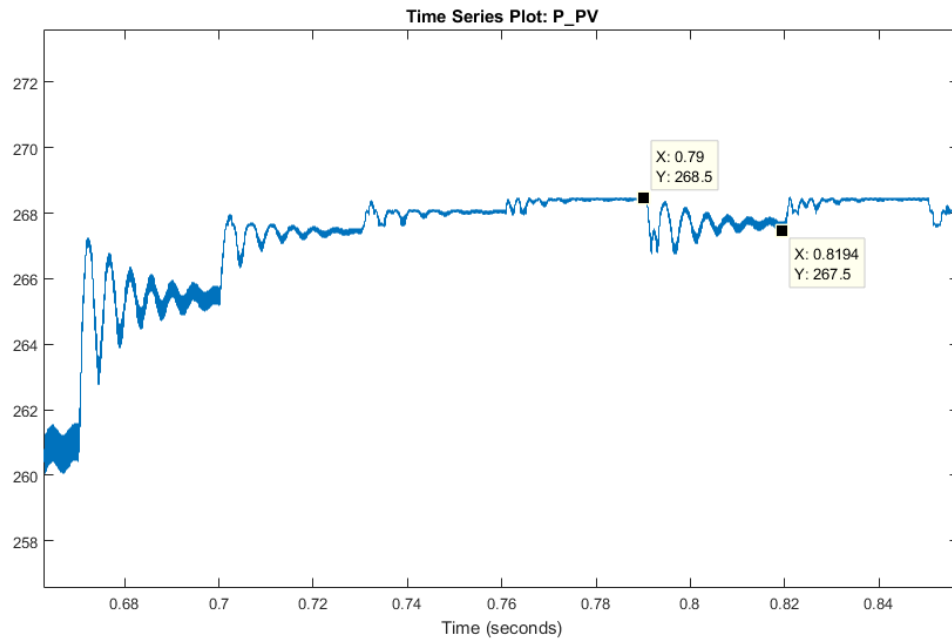
Gráfica 53. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 52.



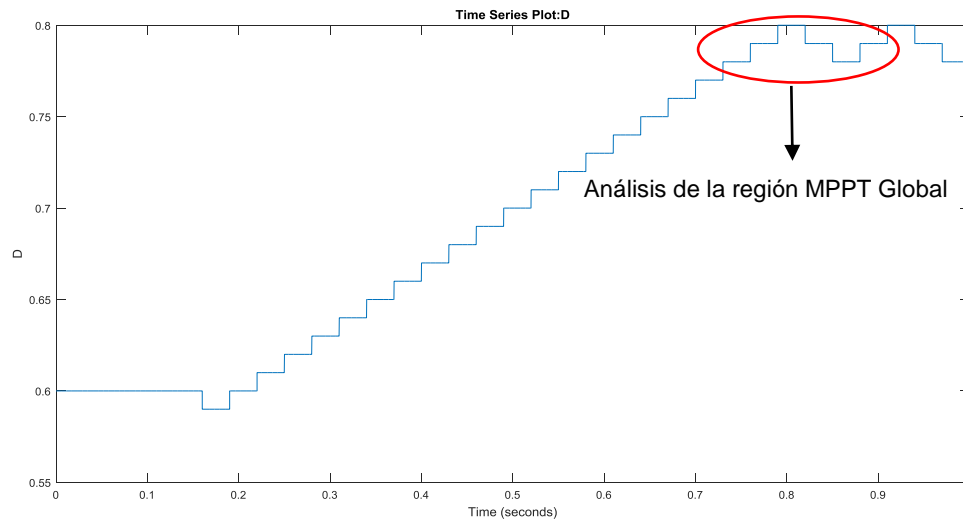
Gráfica 54. Comportamiento de la potencia del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs.



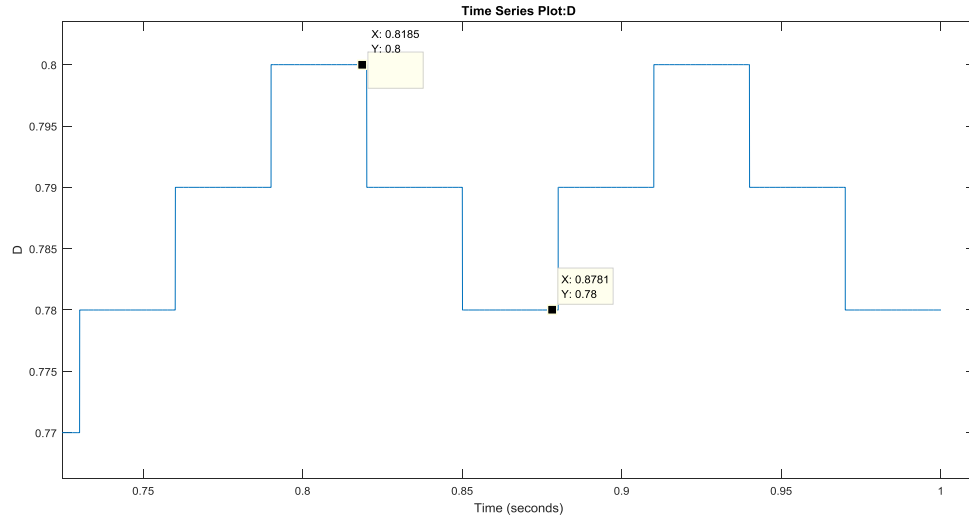
Gráfica 55. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 54.



Gráfica 56. Comportamiento de la relación de trabajo del arreglo PV para el análisis del MPPT global correspondiente a las 15:10 Hrs.



Gráfica 57. Análisis detallado de la región del MPPT global de la Gráfica 56.



En cada grafica presentada anteriormente, se visualizan valores máximos y mínimos, los cuales corresponden directamente a las regiones de trabajo en las cuales el sistema queda en un punto de estabilidad, indicando que entre estas: Tensiones máximas y mínimas, Corrientes máximas y mínimas y Potencias máximas y mínimas, están directamente relacionadas a los valores de estabilidad máximos y mínimos del duty o referencia de trabajo, dejando evidenciada la región en la que esta encuentra el MPPT global.

6. OBSERVACIONES

Los resultados obtenidos en las simulaciones se obtuvieron empleando una computadora portátil ASUS K42F, con las siguientes características: Intel® Core™ i5 CPU M430 @ 2,27 GHz – 2,3 GHz con memoria RAM instalada de 4 GB. En éste se instaló un software comercial de cómputo numérico, que operó en el sistema operativo de 64 bits Microsoft® Windows™ 10 Home Premium, utilizando los scripts facilitados por el director de este proyecto de investigación para la realización de las simulaciones y, también, el software de simulación de desarrollo propio creado para este trabajo de investigación.

En el desarrollo de este proyecto de investigación se tomó en cuenta el patrón de movimiento del sol con respecto a la ubicación geográfica, y así en dado momento si se deseara realizar una simulación considerando estas variables, las cuales no se tuvieron en consideración, pueden ser un gran complemento de desarrollo y de cobertura en diversos campos de estudio de comportamientos de los sistemas PV.

Como posible opción de análisis de los comportamientos de las sombras parciales y el cálculo de los porcentajes de estas incidencias en cada arreglo PV, se pueden emplear softwares de simulación los cuales fueron: Sketchup, en conjunto de Energy Plus para crear entornos controlados y de análisis de posicionamiento de solar, trayectoria, permitiendo la adquisición de datos aproximados para el estudio de la energía solar a través de estos dispositivos.

Partiendo del modelo inicial, este se modificó con los parámetros propuestos por nuestra investigación, con el fin de enfocar la mayor cobertura del desarrollo, y que no presentara conflicto esos bloques ya pre-establecidos por la compañía desarrolladora del software de computo MATLAB, lo cual presento inconsistencias

y problemas de desarrollo del análisis de las curvas, debido a que estos tienen parámetros ya establecidos para su análisis y no permitía el ingreso de la matriz de perfiles de sombras parciales en arreglo PV.

7. CONCLUSIONES

Con base en los desarrollos y los resultados obtenidos y presentados en el presente proyecto de grado, se concluye que:

- Se cumplieron a cabalidad los objetivos académicos aprobados para este trabajo de grado.
- Se corrobora mediante análisis de curvas de cada string y posteriormente del arreglo PV la influencia de las sombras parciales, en conjunto de la importancia de la irradiancia solar y la temperatura ambiente, y como esto repercute en la calidad de la potencia generada por el arreglo PV previo al suministro hacia la red eléctrica.
- Se logró determinar la influencia de las diferentes corrientes generadas por cada módulo PV, lo cual se ve reflejado en el comportamiento de las curvas características V-I y P-V, de esta forma el parámetro de estudio MPP nos proporciona la información de cómo este fenómeno puede generar ruido en la señal al suministrarla a la red eléctrica.
- Se pudo determinar la diferencia o margen de pérdida debido a la presencia de sombras parciales para que el sistema trabaje a su mayor potencial, empleando la simulación del arreglo en óptimas condiciones en diferentes horarios, y contrarrestarlos con el modelo matricial de los perfiles de sombras incidentes sobre el mismo. De esta manera podemos determinar qué tan eficiente y productivo es nuestro sistema, si se desea instalar en zonas urbanas donde presentan grandes cantidades de sombras por presencia de edificios, arboles, nubes, entre muchos que se encuentran en nuestro medio circundante.

- Es importante tener en cuenta los parámetros del fabricante, ya que en ellos cae el peso de ser un dispositivo de alto desempeño, con el propósito de tener la capacidad de generación y desempeño óptimo en los diferentes arreglos PV, y todo esto está ligado a los materiales de fabricación, conductores, y la región donde son empleados para suministros de energía.
- Se deben realizar estudios previos mediante el uso de estas herramientas de cómputo, para establecer el tipo de instrumentos y dispositivos a instalar para la generación y producción de energías limpias renovables, considerando los parámetros de necesidad de la región, puesto que en el mercado hay gran variedad de estos dispositivos, que tienen características particulares para su respectivo uso, y lograr compensar la demanda requerida para la industria y el desarrollo de las comunidades alrededor del mundo.

8. RECOMENDACIONES

- Se debe tener en cuenta la localización geográfica, ya que los comportamientos de las trayectorias solares son de gran importancia, con el fin de analizar la mejor ubicación para la óptima adquisición de energía solar.
- Se deben emplear instrumentos de medición de irradiancia solar y temperatura ambiente para el desarrollo matemático del comportamiento de un arreglo PV.
- Es importante tener presente para el análisis de cada módulo PV y de cada string, el tipo de configuración ya que el tipo de interconexión modifica las variables que se desean analizar. Puesto que unos son para generar mayor corriente, otros desean generar mayor tención, y otros son combinaciones de estos, para potencializar el desempeño de estos sistemas PV.
- Evaluar el método de observación del comportamiento de las sombras parciales en un día promedio, con el fin de establecer sus propios parámetros de trabajo y porcentajes de sombras incidentes sobre las superficies en los arreglos PV.
- Se debe establecer la frecuencia de muestreo de temperatura, irradiancia, y proyecciones de sombras parciales, para determinar el modelo que más desee implementar, puesto que puede no ser significativo para algunos de los usuarios establecer periodos muy cortos, ya que desean realizar análisis de comportamientos no tan significativos.

- Solo modificar los parámetros suministrados por el fabricante, de lo contrario no se garantiza el funcionamiento, si afectan el código principal del desarrollo matemático del arreglo PV presentado en esta tesis.

REFERENCIAS

- [1] IRENA, *REthinking Energy*, vol. 55, no. July. 2013.
- [2] R. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic systems engineering*. 2004.
- [3] S. RAO, *ENGINEERING OPTIMIZATION Theory and Practice*, Fourth. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [4] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, “Proyección de demanda de energía eléctrica en Colombia,” 2013.
- [5] J. D. Bastidas, E. Franco, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, and G. Spagnuolo, “A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 96, pp. 81–90, 2013.
- [6] T. Acosta Martínez and J. F. Arenas Ezenarro, “Estudio de pérdidas en paneles fotovoltaicos por inclinación, orientación y sombras,” 2015.
- [7] H. E. Multicrystal and P. Module, “Kc200Gt High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module,” no. V.
- [8] J. Accarino, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, and G. Spagnuolo, “Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model,” *4th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2013*, pp. 62–66, 2013.
- [9] SunLink PV, “SL8012M DATASHEET.”

- [10] U. Eicker, *Solar Technologies for Buildings*. 2005.
- [11] C. E. C. MARTÍNEZ and G. A. Q. GONZÁLEZ, “INTEGRACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A LA RED: TÉCNICAS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA,” 2013.
- [12] Y. G. CARRASCAL and J. M. GAMARRA, “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR CD/CD PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE GENERADORES FOTOVOLTAICOS,” 2014.
- [13] E. Fornis, F. Naranjo, M. Mazo, and F. Ruiz, “The influence of mismatch of solar cells on relative power loss of photovoltaic modules,” *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 39–47, 2013.
- [14] A. Orioli and A. Di Gangi, “Load mismatch of grid-connected photovoltaic systems: Review of the effects and analysis in an urban context,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 13–28, 2013.
- [15] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.
- [16] J. Bastidas-Rodriguez, G. Spagnuolo, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, and E. Franco, “Model based degradation analysis of photovoltaic modules through series resistance estimation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. c, pp. 1–1, 2015.
- [17] J. D. Bastidas-Rodriguez, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, and G. Spagnuolo, “A genetic algorithm for identifying the single diode model parameters of a photovoltaic panel,” *Math. Comput. Simul.*, vol. 131, pp. 38–54, 2014.

- [18] D. La Manna, V. Li Vigni, E. Riva Sanseverino, V. Di Dio, and P. Romano, "Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, no. May, pp. 412–426, 2014.
- [19] R. A. Álvarez-López, "Aportes a la conversión DC-AC en sistemas fotovoltaicos: módulos inversores conectados en cascada," *Thesis*, p. 103, 2015.
- [20] N. D. Kaushika, N. K. Gautam, and K. Kaushik, "Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 85, no. 4, pp. 499–519, 2005.
- [21] M. Sujith, R. Mohan, and P. Sundravadivel, "SIMULATION ANALYSIS OF 100KW INTEGRATED SEGMENTED ENERGY STORAGE FOR GRID CONNECTED PV SYSTEM," vol. 164, no. 1, pp. 164–173, 2012.
- [22] Suntech, "Datasheet STP 245/250/255 - 20/Wd," *IEEE Trans. Electron Devices*, no. 10, p. 50380, 1975.

BIBLIOGRAFÍA

ACCARINO J., PETRONE G., RAMOS-PAJA C. A., and SPAGNUOLO G., "Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model," 4th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2013, pp. 62–66, 2013.

ACOSTA MARTÍNEZ T. and ARENAS EZENARRO, J. F. "Estudio de pérdidas en paneles fotovoltaicos por inclinación, orientación y sombras," 2015.

ÁLVAREZ-LÓPEZ R. A., "Aportes a la conversión DC-AC en sistemas fotovoltaicos: módulos inversores conectados en cascada," Thesis, p. 103, 2015.

BASTIDAS J. D., FRANCO E., PETRONE G., RAMOS-PAJA C. A., and SPAGNUOLO G., "A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 96, pp. 81–90, 2013.

BASTIDAS-RODRIGUEZ J. D., PETRONE G., RAMOS-PAJA C. A. and SPAGNUOLO G., "A genetic algorithm for identifying the single diode model parameters of a photovoltaic panel," *Math. Comput. Simul.*, vol. 131, pp. 38–54, 2014.

BASTIDAS-RODRIGUEZ J., SPAGNUOLO G., PETRONE G., RAMOS-PAJA C. A., and FRANCO E., "Model based degradation analysis of photovoltaic modules through series resistance estimation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. c, pp. 1–1, 2015.

CARRASCAL Y. G. and GAMARRA J. M., "Implementación de un convertidor cd/cd para el seguimiento del punto de máxima potencia de generadores fotovoltaicos," 2014.

EICKER U., *Solar Technologies for Buildings*. 2005.

FORNÍ S E., NARANJO F., MAZO M., and RUIZ F., "The influence of mismatch of solar cells on relative power loss of photovoltaic modules," *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 39–47, 2013.

IRENA, *REthinking Energy*, vol. 55, no. July. 2013.

KAUSHIKA N. D., GAUTAM N. K., and KAUSHIK K., "Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 85, no. 4, pp. 499–519, 2005.

LA MANNA D., LI VIGNI V., RIVA SANSEVERINO E., DI DIO V., and ROMANO P., "Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, no. May, pp. 412–426, 2014.

MARTÍNEZ C. E. C. and GONZÁLEZ G. A. Q., "Integración de sistemas fotovoltaicos a la red: técnicas de control para el seguimiento del punto de máxima potencia," 2013.

MESENTER R. and VENTRE J., *Photovoltaic systems engineering*. 2004.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, "Proyección de demanda de energía eléctrica en Colombia," 2013.

MULTICRYSTAL H. E. and MODULE P., “Kc200Gt High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module,” no. V.

ORIOLO A. and DI GANGI A., “Load mismatch of grid-connected photovoltaic systems: Review of the effects and analysis in an urban context,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 13–28, 2013.

RAO S., *Engineering optimization Theory and Practice*, Fourth. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

SUJITH M., MOHAN R., and SUNDRAVADIVEL P., “Simulation analysis of 100kw integrated segmented energy storage for grid connected PV system,” vol. 164, no. 1, pp. 164–173, 2012.

SUNLINK PV, “SL8012M DATASHEET.”

SUNTECH, “Datasheet STP 245/250/255 - 20/Wd,” *IEEE Trans. Electron Devices*, no. 10, p. 50380, 1975.

VILLALVA M. G., GAZOLI J. R., and FILHO E. R., “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.

ANEXOS

Anexo A. Código de arranque.

```
clear all
close all
clc

%%
global Dat_HrIrTm;

%%
filename = 'HrIrTm.txt'; %Carga los datos en formato .txt de las Horas,
                        %Temperaturas e Irradiancias

A = importdata(filename);
Dat_HrIrTm=A.data;

t1 = [0:1:60]';

Hora=Dat_HrIrTm(:,1);
M1 = repmat(Hora,[1 1 length(t1)]);
Hr.time=t1;
Hr.signals.values = M1;
Hr.signals.dimensions=[60 1];

Temp=Dat_HrIrTm(:,2);
M2 = repmat(Temp,[1 1 length(t1)]);
Tmp.time=t1;
```

```
Tmp.signals.values = M2;
Tmp.signals.dimensions=[60 1];
```

```
Irrad=Dat_HrIrTm(:,3);
M3 = repmat(Irrad,[1 1 length(t1)]);
Ird.time=t1;
Ird.signals.values = M3;
Ird.signals.dimensions=[60 1];
```

```
filename1 = 'P1.txt';
P1= importdata(filename1);
P1=P1.';
t2 = [0:1:10];
M4 = repmat(P1,[1 1 length(t2)]);
Prf.time=t2;
Prf.signals.values = M4;
Prf.signals.dimensions=[4 10];
```

```
%%
% *****
% Contantes de desarrollo
% *****
```

```
k = 1.38065032e-23; %Constante de Boltzmann [J/K]
q = 1.60217646e-19; %Carga del electrón
t_a = 0.9; %Producto entre Thau ("Transmitancia de las celulas cubiertas ")
    %y Alpha ("Fracción de radiacion absorbida por la superficie de las
celulas")
Egap = 1.8e-19; %Energía de desfase del semiconductor en STC
%%
```

```
% *****  
% Parametros del fabricante - Datasheet  
% *****
```

```
%Tempeatura ambiente en STC
```

```
T_stc = 25+273.15;
```

```
%Irradiancia de operación nominal en STC
```

```
G_stc = 1000;
```

```
%Tensión de operación optima en STC
```

```
Vmpp = 17.2;
```

```
%Corriente de operación optima en STC
```

```
Impp = 5.81;
```

```
%Tensión de circuito abierto en STC
```

```
Voc_stc = 21.6;
```

```
%Corriente de corto circuito en STC
```

```
Isc_stc = 6.43;
```

```
%Eficiencia del módulo en STC
```

```
Ef = 0.156;
```

```
%Temperatura de operación nominal de las células
```

```
NOCT = 45;
```

```
%Coeficiente de temperatura de Voc
```

```
KVoc = -0.35;
```

```
%Coeficiente de temperatura de Isc
```

```
KIsc = 0.055;
```

```
%Número de células
```

```
Ns = 36;
```

```

%%
%Corriente de corto circuito
Isc1 = Isc_stc;
%Tensión de circuito abierto
Voc = Voc_stc;
%Temperatura de operación nominal de las células del Datasheet en Kelvin
NOCT = NOCT+273.15;
%Coeficiente de temperatura de corriente de corto circuito
KIsc = KIsc*Isc_stc/100;
%Coeficiente de temperatura de tensión de circuito abierto
KVoc = KVoc*Voc_stc/100;
%Temperatura de celulas bajo en STC en Kelvin
T_stc = 25+273.15;
%%
% *****
% Modelo matemático
% *****
T=T_stc; %Condición de tempeatura para STC

G=G_stc; %Condición de irradiancia para STC

% 1)
Iph_stc = Isc_stc;

% 2)
Vt = (k*T)/q;

% 3)
Iph1 = Iph_stc*(G/G_stc)*(1+KIsc*(T-T_stc));

```

```

% 4)
n = (q*(KVoc-(Voc_stc/T)))/(Ns*k*T*((Klsc/lph_stc)-(3/T)-(Egap/(k*(T^2))));

% 5)
Isat = lph_stc*(exp((-q*Voc_stc)/(n*Ns*k*T)));

% 6)
C = (Isat)/((T_stc^3)*exp(-Egap/(k*T_stc)));

% 7)
T1=Vmpp*(2*Impp-lph_stc)/(n*Ns*Isat*Vt);

% 8)
expT=(Vmpp*(Vmpp-2*n*Ns*Vt))/(n^2*Ns^2*Vt^2);

% 9)
T1s=num2str(T1,'%20.20f');

% 10)
expTs=num2str(expT,'%20.20f');

% 11)
aux_s=evalin(symengine,['lambertw(' T1s '*exp(' expTs ')')]);

% 12)
aux=double(aux_s);

% 13)

```

```
x=aux+(2*Vmpp)/(n*Ns*Vt)-(Vmpp^2)/(n^2*Ns^2*Vt^2);
```

```
% 15-c)
```

```
Rs = (x*n*Ns*Vt-Vmpp)/(Impp);
```

```
% 17)
```

```
Rp = x*n*Ns*Vt/(lph_stc-Impp-Isat*(exp(x)-1));
```

```
t3 = [0:1:1]';
```

```
M5 = repmat(n,[1 1 length(t3)]);
```

```
n_stc.time=t3;
```

```
n_stc.signals.values = M5;
```

```
n_stc.signals.dimensions=[1 1];
```

```
M6 = repmat(Isat,[1 1 length(t3)]);
```

```
Isat_stc.time=t3;
```

```
Isat_stc.signals.values = M6;
```

```
Isat_stc.signals.dimensions=[1 1];
```

```
M7 = repmat(Rs,[1 1 length(t3)]);
```

```
Rs_stc.time=t3;
```

```
Rs_stc.signals.values = M7;
```

```
Rs_stc.signals.dimensions=[1 1];
```

```
M8 = repmat(Rp,[1 1 length(t3)]);
```

```
Rp_stc.time=t3;
```

```
Rp_stc.signals.values = M8;
```

```
Rp_stc.signals.dimensions=[1 1];
```

```
M9 = repmat(lph1,[1 1 length(t3)]);
```

```
lph_stc.time=t3;  
lph_stc.signals.values = M9;  
lph_stc.signals.dimensions=[1 1];
```

```
%%
```

```
find_system('Name','smul1_1');  
open_system('smul1_1');
```

Anexo B. Código modelo implementación

```
function Iout = fcn(G,Tamb,Perf,Vpv,Isat_stc,n_stc,Rs_stc,Rp_stc,Iph_stc)

%%
% *****
% Definición de los parametros de simulación
% *****
deltaV = 1;
tol_x = 1e-3;

%%
% *****
% Contantes de desarrollo
% *****

k = 1.38065032e-23; %Constante de Boltzmann [J/K]
q = 1.60217646e-19; %Carga del electrón
t_a = 0.9; %Producto entre Thau ("Transmitancia de las celulas cubiertas ")
        %y Alpha ("Fracción de radiacion absorbida por la superficie de las
celulas")
Egap = 1.8e-19; %Energía de desfase del semiconductor en STC

%%
% *****
% Parametros del fabricante - Datasheet
% *****
```

%Temperatura de celulas bajo en STC en Kelvin

T_stc = 25+273.15;

%Irradiancia de operación nominal en STC

G_stc = 1000;

%Tensión de operación optima en STC

Vmpp = 17.2;

%Corriente de operación optima en STC

Impp = 5.81;

%Tensión de circuito abierto en STC

Voc_stc = 21.6;

%Corriente de corto circuito en STC

Isc_stc = 6.43;

%Eficiencia del módulo en STC

Ef = 0.156;

%Temperatura de operación nominal de las células

NOCT = 45;

%Coeficiente de temperatura de Voc

KVoc = -0.35;

%Coeficiente de temperatura de Isc

KIsc = 0.055;

%Número de células

Ns = 36;

%%

% *****

% Calculo de parametros para el desarrollo matemático

```

% *****

%Temperatura ambiente en Kelvin
T = Tamb + 273.15;
%Corriente de corto circuito
% Isc1 = Isc_stc;
%Tensión de circuito abierto
Voc = Voc_stc;
%Temperatura de operación nominal de las células del Datasheet en Kelvin
NOCT = NOCT+273.15;
%Coeficiente de temperatura de corriente de corto circuito
KIsc = KIsc*Isc_stc/100;
%Coeficiente de temperatura de tensión de circuito abierto
KVoc = KVoc*Voc_stc/100;

%
%
% %%
% % *****
% % Modelo matemático
% % *****
%
Iph1 = Iph_stc*(G/G_stc)*(1+KIsc*(T-T_stc));

%%
% *****
% Actalizar prametros con G y T de trabajo
% *****

% 18)

```

```

T = G/G_stc*(NOCT-293.15)*(1-(Ef/t_a))+T;

% 19)
Isc = G/G_stc*(Isc_stc+KIsc/100*(T-T_stc));

% 20)
Fd = n_stc*T/T_stc;

% 21)
B = (Ns*Fd*k*T)/q;

% 22)
Isat1=(Isc_stc+KIsc/100*Isc_stc*(T-T_stc))/...
      (exp((Voc_stc+KVoc/100*Voc_stc*(T-T_stc))/B)-1);

% 23)
Rs1=Rs_stc*T/T_stc*(1-0.217*log(G/G_stc));
if(Rs1<=0)
    Rs1=Rs_stc;
end
Rp1=Rp_stc*G/G_stc;

% 24)
Iph1=Isc+Isat1*(exp(Isc*Rs1/B)-1)+Isc*Rs1/Rp1;

%%
% *****
% Definición de las características del Diodo Bypass
% *****

```

```
Vthbd = 0.2166;
```

```
Rsbdb = 3e-03;
```

```
%%
```

```
% *****
```

```
% Definición de las características del Diodo de Bloqueo
```

```
% *****
```

```
% Isatbd=1e-6;
```

```
% Vtbd=0.015;
```

```
%%
```

```
% *****
```

```
% Definición de la Matriz de niveles de Irradiancia
```

```
% *****
```

```
Isc=Iph1*Perf;
```

```
FileNameP = 'xLUIIS_Data_1x1_RsP1';
```

```
% 3) In the string the PV Irradiance levels must be organized in descend order
```

```
dim=size(Isc);
```

```
for ii=1:dim(1) % number of row
```

```
    Isc(ii,:)=sort(Isc(ii,:), 'descend');
```

```
end
```

```
%%
```

```
% *****
```

```
% Introducción de las tolerancias de los modulos PV
```

```
% *****
```

```
%
```

```

Isat=Isat1*ones(dim(1),dim(2)-1); % zero tolerances

%
B=B*ones(dim(1),dim(2)-1); % Uniform Temperature

%
Rs=Rs1*ones(dim(1),dim(2)-1); % zero tolerances

%
Rp=Rp1*ones(dim(1),dim(2)-1); % zero tolerances

Vthbd=Vthbd*ones(dim(1),dim(2));

Rsbd=Rsbd*ones(dim(1),dim(2));

%%
% *****
% Evaluación de los puntos de inflexión
% *****
coder.extrinsic('tic')
t_total = tic;
Vo=zeros(dim(1),dim(2)-1);
for jj=1:dim(1) % sweep of strings
    for kk=2:dim(2) % sweep of modules
        for mm=1:kk-1 %
            Vo(jj,mm)=Vo(jj,mm)+...
            calc_Vij(Isc(jj,mm),Isc(jj,mm),Isat(jj,mm),B(jj,mm),Rs(jj,mm),Rp(jj,mm));
        end
    end
end

```

```

for ii=kk:(dim(2)-1) % This is from kk to all PV modules and Dblocking
    Vo(jj,kk-1)=Vo(jj,kk-1)-(Vthbd(jj,ii)+(Isc(jj,kk)-Isc(jj,ii))*Rsbd(jj,ii));
end
Vo(jj,kk-1)=Vo(jj,kk-1)-(Vthbd(jj,dim(2))+Isc(jj,kk)*Rsbd(jj,dim(2)));
end
end
% Vo

%%
% *****
% Inicio de caracterización del campo del PV
% *****
% if (Vpv>96)
%   Vpv
% end
N = dim(2)-1;
larray=0;
for jj=1:dim(1)
    t_str = tic;
    k = 1;
    Vok = Vo(jj,k);
    while(Vpv > Vok)
        k = k + 1;
        if k <= N
            Vok = Vo(jj,k);
        else
            k = k-1;
            break;
        end
    end
end
end

```

```

x0 = Isc(jj,k);
for kk=1:1
    x1 =
    calc_Istr_Newton_Vo_Vth_Rsbd(x0,Isc(jj,:),Vpv,Isat(jj,:),B(jj,:),Rs(jj,:),Rp(jj,:),Vthbd(
jj,:),Rsbd(jj,:),Vo(jj,:),deltaV,tol_x,k);
    if(x1<0)
        x1=0;
        break;
    else
        x0 = x1;
    end
end

larray=larray+x1;
end

lout=larray;

```

Anexo C. Tabla datos de información proporcionada por los instrumentos de medición del campus universitario de la UIS correspondientes a un día soleado.

| Date | Time | Temp Out | Solar Rad. |
|-------------|-------------|---------------------|-----------------------|
| 01/01/2014 | 12:10 a. m. | 22.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 12:20 a. m. | 22.5 | 0 |
| 01/01/2014 | 12:30 a. m. | 22.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 12:40 a. m. | 22.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 12:50 a. m. | 22.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 1:00 a. m. | 22.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 1:10 a. m. | 22.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 1:20 a. m. | 22.0 | 0 |
| 01/01/2014 | 1:30 a. m. | 22.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 1:40 a. m. | 22.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 1:50 a. m. | 21.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 2:00 a. m. | 21.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 2:10 a. m. | 21.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 2:20 a. m. | 21.6 | 0 |
| 01/01/2014 | 2:30 a. m. | 21.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 2:40 a. m. | 21.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 2:50 a. m. | 21.2 | 0 |
| 01/01/2014 | 3:00 a. m. | 21.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 3:10 a. m. | 20.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 3:20 a. m. | 20.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 3:30 a. m. | 21.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 3:40 a. m. | 21.6 | 0 |
| 01/01/2014 | 3:50 a. m. | 21.6 | 0 |
| 01/01/2014 | 4:00 a. m. | 21.5 | 0 |
| 01/01/2014 | 4:10 a. m. | 21.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 4:20 a. m. | 21.2 | 0 |
| 01/01/2014 | 4:30 a. m. | 21.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 4:40 a. m. | 20.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 4:50 a. m. | 20.8 | 0 |

| Date | Time | Temp Out | Solar Rad. |
|-------------|-------------|---------------------|-----------------------|
| 01/01/2014 | 5:00 a. m. | 20.8 | 0 |
| 01/01/2014 | 5:10 a. m. | 20.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 5:20 a. m. | 20.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 5:30 a. m. | 21.0 | 0 |
| 01/01/2014 | 5:40 a. m. | 20.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 5:50 a. m. | 20.7 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:00 a. m. | 20.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:10 a. m. | 20.3 | 3 |
| 01/01/2014 | 6:20 a. m. | 20.3 | 10 |
| 01/01/2014 | 6:30 a. m. | 20.3 | 19 |
| 01/01/2014 | 6:40 a. m. | 20.3 | 30 |
| 01/01/2014 | 6:50 a. m. | 20.3 | 51 |
| 01/01/2014 | 7:00 a. m. | 20.4 | 97 |
| 01/01/2014 | 7:10 a. m. | 20.8 | 103 |
| 01/01/2014 | 7:20 a. m. | 21.3 | 125 |
| 01/01/2014 | 7:30 a. m. | 21.8 | 184 |
| 01/01/2014 | 7:40 a. m. | 22.1 | 223 |
| 01/01/2014 | 7:50 a. m. | 22.2 | 270 |
| 01/01/2014 | 8:00 a. m. | 22.5 | 307 |
| 01/01/2014 | 8:10 a. m. | 23.2 | 361 |
| 01/01/2014 | 8:20 a. m. | 23.6 | 389 |
| 01/01/2014 | 8:30 a. m. | 23.9 | 417 |
| 01/01/2014 | 8:40 a. m. | 24.6 | 451 |
| 01/01/2014 | 8:50 a. m. | 24.7 | 490 |
| 01/01/2014 | 9:00 a. m. | 24.8 | 526 |
| 01/01/2014 | 9:10 a. m. | 24.7 | 556 |
| 01/01/2014 | 9:20 a. m. | 24.7 | 587 |
| 01/01/2014 | 9:30 a. m. | 24.8 | 621 |
| 01/01/2014 | 9:40 a. m. | 25.1 | 656 |
| 01/01/2014 | 9:50 a. m. | 25.6 | 676 |
| 01/01/2014 | 10:00 a. m. | 26.0 | 707 |
| 01/01/2014 | 10:10 a. m. | 26.2 | 731 |
| 01/01/2014 | 10:20 a. m. | 26.4 | 763 |
| 01/01/2014 | 10:30 a. m. | 26.9 | 778 |
| 01/01/2014 | 10:40 a. m. | 27.5 | 807 |
| 01/01/2014 | 10:50 a. m. | 27.8 | 818 |
| 01/01/2014 | 11:00 a. m. | 28.2 | 844 |

| Date | Time | Temp Out | Solar Rad. |
|-------------|-------------|---------------------|-----------------------|
| 01/01/2014 | 11:10 a. m. | 28.4 | 868 |
| 01/01/2014 | 11:20 a. m. | 28.8 | 890 |
| 01/01/2014 | 11:30 a. m. | 28.6 | 903 |
| 01/01/2014 | 11:40 a. m. | 28.4 | 898 |
| 01/01/2014 | 11:50 a. m. | 28.2 | 911 |
| 01/01/2014 | 12:00 p. m. | 28.2 | 918 |
| 01/01/2014 | 12:10 p. m. | 27.9 | 963 |
| 01/01/2014 | 12:20 p. m. | 28.2 | 918 |
| 01/01/2014 | 12:30 p. m. | 28.3 | 955 |
| 01/01/2014 | 12:40 p. m. | 28.4 | 939 |
| 01/01/2014 | 12:50 p. m. | 28.5 | 933 |
| 01/01/2014 | 1:00 p. m. | 28.4 | 920 |
| 01/01/2014 | 1:10 p. m. | 28.2 | 906 |
| 01/01/2014 | 1:20 p. m. | 28.5 | 896 |
| 01/01/2014 | 1:30 p. m. | 28.5 | 691 |
| 01/01/2014 | 1:40 p. m. | 27.9 | 401 |
| 01/01/2014 | 1:50 p. m. | 28.0 | 765 |
| 01/01/2014 | 2:00 p. m. | 27.8 | 843 |
| 01/01/2014 | 2:10 p. m. | 28.3 | 836 |
| 01/01/2014 | 2:20 p. m. | 28.4 | 894 |
| 01/01/2014 | 2:30 p. m. | 28.2 | 576 |
| 01/01/2014 | 2:40 p. m. | 28.1 | 789 |
| 01/01/2014 | 2:50 p. m. | 28.2 | 794 |
| 01/01/2014 | 3:00 p. m. | 28.0 | 683 |
| 01/01/2014 | 3:10 p. m. | 27.7 | 339 |
| 01/01/2014 | 3:20 p. m. | 27.2 | 212 |
| 01/01/2014 | 3:30 p. m. | 26.7 | 219 |
| 01/01/2014 | 3:40 p. m. | 26.7 | 267 |
| 01/01/2014 | 3:50 p. m. | 26.6 | 220 |
| 01/01/2014 | 4:00 p. m. | 26.4 | 234 |
| 01/01/2014 | 4:10 p. m. | 26.4 | 406 |
| 01/01/2014 | 4:20 p. m. | 26.3 | 322 |
| 01/01/2014 | 4:30 p. m. | 26.1 | 202 |
| 01/01/2014 | 4:40 p. m. | 26.0 | 213 |
| 01/01/2014 | 4:50 p. m. | 25.9 | 97 |
| 01/01/2014 | 5:00 p. m. | 25.7 | 40 |
| 01/01/2014 | 5:10 p. m. | 25.5 | 21 |

| Date | Time | Temp Out | Solar Rad. |
|-------------|-------------|---------------------|-----------------------|
| 01/01/2014 | 5:20 p. m. | 25.4 | 12 |
| 01/01/2014 | 5:30 p. m. | 25.2 | 9 |
| 01/01/2014 | 5:40 p. m. | 25.1 | 7 |
| 01/01/2014 | 5:50 p. m. | 24.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:00 p. m. | 24.7 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:10 p. m. | 24.6 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:20 p. m. | 24.5 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:30 p. m. | 24.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:40 p. m. | 24.2 | 0 |
| 01/01/2014 | 6:50 p. m. | 24.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 7:00 p. m. | 24.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 7:10 p. m. | 24.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 7:20 p. m. | 24.0 | 0 |
| 01/01/2014 | 7:30 p. m. | 23.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 7:40 p. m. | 23.8 | 0 |
| 01/01/2014 | 7:50 p. m. | 23.7 | 0 |
| 01/01/2014 | 8:00 p. m. | 23.7 | 0 |
| 01/01/2014 | 8:10 p. m. | 23.6 | 0 |
| 01/01/2014 | 8:20 p. m. | 23.7 | 0 |
| 01/01/2014 | 8:30 p. m. | 23.6 | 0 |
| 01/01/2014 | 8:40 p. m. | 23.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 8:50 p. m. | 23.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 9:00 p. m. | 23.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 9:10 p. m. | 23.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 9:20 p. m. | 23.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 9:30 p. m. | 23.2 | 0 |
| 01/01/2014 | 9:40 p. m. | 23.2 | 0 |
| 01/01/2014 | 9:50 p. m. | 23.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 10:00 p. m. | 23.4 | 0 |
| 01/01/2014 | 10:10 p. m. | 23.3 | 0 |
| 01/01/2014 | 10:20 p. m. | 23.2 | 0 |
| 01/01/2014 | 10:30 p. m. | 23.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 10:40 p. m. | 23.0 | 0 |
| 01/01/2014 | 10:50 p. m. | 22.9 | 0 |
| 01/01/2014 | 11:00 p. m. | 23.0 | 0 |
| 01/01/2014 | 11:10 p. m. | 23.0 | 0 |
| 01/01/2014 | 11:20 p. m. | 22.8 | 0 |

| Date | Time | Temp Out | Solar Rad. |
|-------------|-------------|---------------------|-----------------------|
| 01/01/2014 | 11:30 p. m. | 22.7 | 0 |
| 01/01/2014 | 11:40 p. m. | 23.1 | 0 |
| 01/01/2014 | 11:50 p. m. | 23.1 | 0 |