

**OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE IRRIGACIÓN DE UN PANEL
FOTOVOLTAICO ORIENTADO A LA MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO
ENERGÉTICO**

**MIGUEL ÁNGEL CARO PADILLA
DIEGO FERNANDO ROJAS LUNA**

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

2019

**OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE IRRIGACIÓN DE UN PANEL
FOTOVOLTAICO ORIENTADO A LA MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO
ENERGÉTICO**

**MIGUEL ÁNGEL CARO PADILLA
DIEGO FERNANDO ROJAS LUNA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

**DIRECTOR:
JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTINEZ
Doctor en Ingeniería Eléctrica**

**CODIRECTOR:
RICARDO ANTONIO DOMINGUEZ GOMEZ
Ingeniero Electrónico**

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

2019

DEDICATORIA

A Dios por darme la sabiduría suficiente para poder culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, Victor Julio Caro y Bertha Padilla por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de toda mi etapa como estudiante.

A mis hermanos, Mauricio, Gineth y Juan Esteban por siempre haber estado para mí cuando más los necesite.

A mi abuelito Ubaldo, a mis sobrinos, demás familiares y amigos que confiaron en mí y me demostraron su apoyo y cariño.

Miguel Angel Caro Padilla

Primero que todo a Dios por darme sabiduría, paciencia y fortaleza en cada momento para culminar satisfactoriamente esta etapa de la vida.

A mis padres, Guillermo Rojas y María Alicia Luna, por mostrarme que la educación es el camino para salir adelante, por su amor y esfuerzo constante para ayudarme a lograr esta gran meta, gracias por los sacrificios y la confianza dada en estos años.

A mis hermanos, Guillermo y Magaly, que admiro mucho y por siempre haber estado para mí cuando más los necesité.

A mis demás familiares que confiaron en mí, me demostraron su apoyo incondicional y su cariño.

A mi novia, Tania Ávila, por su apoyo incondicional, por su motivación, por su colaboración y por estar en los buenos y sobretodo en los malos momentos.

A mis amigos de la Universidad Industrial de Santander, a todos y cada uno de ellos, con quienes compartí los mejores momentos de mi vida, supimos superar cada obstáculo y aportaron un granito de arena para cumplir esta meta.

Diego Fernando Rojas Luna

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director el doctor Javier Enrique Solano por su tiempo y dedicación durante todo el proceso de nuestro trabajo de grado.

A nuestro codirector el ingeniero Ricardo Antonio Domínguez por su tiempo y dedicación durante todo el proceso de nuestro trabajo de grado.

Al profesor German Alfonso Osma por el acompañamiento y colaboración durante todo el proceso de nuestro trabajo de grado.

A la secretaria Ingrid García por su colaboración en los trámites durante el proceso.

A todos los profesores que durante la carrera lograron transmitirnos sus conocimientos y experiencias en nuestra formación como profesionales íntegros.

A nuestra alma mater, la UIS, la cual ha sido un campo de aprendizaje, de fortaleza y de crecimiento.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1 POTENCIA GENERADA.....	17
1.2 MODELO TÉRMICO DEL PANEL FOTOVOLTAICO (FV)	17
1.2.1 Puntos de temperatura.....	18
1.2.2 Transferencia de calor.	19
1.2.3 Temperatura del panel FV sin incluir el sistema de irrigación	20
1.2.4 Comportamiento térmico del agua de riego.	21
1.2.5 Temperatura del panel FV incluyendo el sistema de irrigación.	22
2. PROGRAMACIÓN DINÁMICA.....	23
2.1 ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA	23
3. IMPLEMENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO A LA FUNCIÓN DE PROGRAMACIÓN DINAMICA.....	25
3.1 PARÁMETROS	25
3.2 VECTORES	27
4. CASO DE ESTUDIO	28
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PERFILES DÍA 1.....	29
4.1.1 Gráficas del análisis día 1.	29
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS PERFILES DÍA 2.....	31
4.2.1 Gráficas del análisis día 2.	32
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS PERFILES DÍA 3.....	35

5. CONCLUSIONES	39
BIBLIOGRAFIA	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de irrigación de un panel FV.	14
Figura 2. Algoritmo de control	17
Figura 3. Modelo térmico RC del panel FV	18
Figura 4. Perfil de irradiación, temperatura ambiente y velocidad del viento, día 1.	28
Figura 5. Perfil de temperatura ambiente, del panel con y sin irrigación, día 1.....	29
Figura 6. Potencia irrigación, día 1.....	30
Figura 7. Potencia beneficio vs sin irrigación, día 1.	30
Figura 8. Zoom aplicado a potencia beneficio vs sin irrigación, día 1.	31
Figura 9. Energía beneficio vs sin irrigación, día 1	31
Figura 10. Perfil de irradiación, temperatura ambiente, velocidad del viento, día 2.	32
Figura 11. Potencia irrigación, día 2.....	33
Figura 12. Perfil de temperatura ambiente, del panel con y sin irrigación, día 2.	33
Figura 13. Potencia beneficio vs sin irrigación, día 2.	34
Figura 14. Zoom aplicado a potencia beneficio vs sin irrigación, día 2.	34
Figura 15. Energía beneficio vs sin irrigación, día 2.....	35
Figura 16. Perfil de irradiación, Temperatura ambiente, Velocidad del viento, día 3.	36
Figura 17. Potencia irrigación, día 3.....	36
Figura 18. Perfil de temperatura ambiente, del panel con y sin irrigación, día 3.	37
Figura 19. Potencia beneficio vs sin irrigación, día 3.	37
Figura 20. Zoom aplicado a potencia beneficio vs sin irrigación, día 3.	38
Figura 21. Energía beneficio vs sin irrigación, día 3.....	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de un panel FV	26

RESUMEN

TITULO: OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE IRRIGACIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO ORIENTADO A LA MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ENERGÉTICO*

AUTORES: MIGUEL ÁNGEL CARO PADILLA, DIEGO FERNANDO ROJAS LUNA**

PALABRAS CLAVE: Optimización, Irrigación, Paneles Fotovoltaicos, Energía, Radiación.

DESCRIPCION

Ante la comunidad científica, se comprende que la temperatura, la radiación solar y la transferencia calor juegan un papel de suma importancia en la extracción y producción de energía mediante los paneles fotovoltaicos. No obstante, la exposición de estos paneles a la luz solar ocasiona la disminución de la potencia generada por el aumento de la temperatura en el módulo fotovoltaico. Es por ello que, el presente trabajo para optar al título de ingeniero electricista busca plantear un modelo que optimice el tiempo de riego y que dé como resultado un sistema más eficiente.

La idea del presente proyecto surge de una tesis doctoral y de varios proyectos realizados por el grupo de investigación GISEL, pues la temática de irrigación de paneles fotovoltaicos es objeto de constante investigación. Por tal motivo, el proyecto que se presenta busca una mejora en el desempeño del procedimiento de irrigación de paneles FV. Así mismo, el objetivo general de este ejercicio es analizar el tiempo y el momento óptimo de irrigación, los cuales son procesos que permiten la maximización de la diferencia entre la potencia generada y la potencia consumida por el sistema durante un periodo de tiempo. En ese orden de ideas, se pretende que mediante herramientas informáticas como, por ejemplo, MATLAB el proyecto pueda modelar y resolver situaciones en donde se alcance una optimización que mejore el sistema de irrigación y que otorgue mejores resultados.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martinez, Doctor en Ingeniería Eléctrica

ABSTRACT

TITULO: OPTIMIZATION OF THE IRRIGATION TIME OF A PHOTOVOLTAIC PANEL ORIENTED TO THE MAXIMIZATION OF ENERGY BENEFIT *

AUTORES: MIGUEL ÁNGEL CARO PADILLA, DIEGO FERNANDO ROJAS LUNA**

PALABRAS CLAVE: Optimization, Irrigation, Photovoltaic Panels, Energy, Radiation.

DESCRIPTION:

In the scientific community, it is understood that temperature, solar radiation and heat transfer play a very important role in the extraction and production of energy through photovoltaic panels. However, the exposure of these panels to sunlight causes them to reduce of the power generated by the increase in temperature in the photovoltaic module. That is why, the present work to opt for the title of electrical engineer seeks to propose a model that optimizes the time of irrigation and that results in a more efficient system.

The idea of the present project arises from a doctoral thesis and several projects carried out by the GISEL research group, since the subject of irrigation of photovoltaic panels is subject to constant investigation. For this reason, the project presented seeks an improvement in the performance of the irrigation procedure of PV panels. Likewise, the general objective of this exercise is to analyze the time and the optimal moment of irrigation, which are processes that allow the maximization of the difference between the power generated and the power consumed by the system for a period of time. In this order of ideas, it is intended that through computer tools such as, for example, MATLAB, the project can model and solve situations where an optimization is achieved that improves the irrigation system and gives better results.

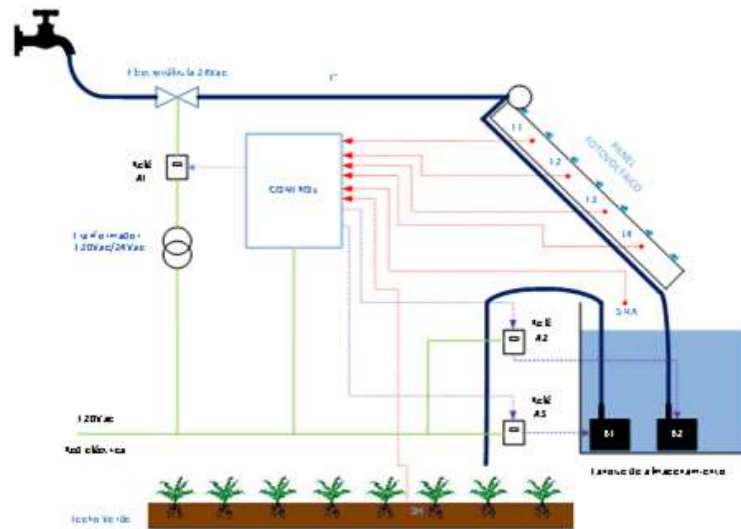
* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martinez, Doctor en Ingeniería Eléctrica

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años en la ciudad, en el país y en el mundo, se han realizado investigaciones con la finalidad de aumentar el rendimiento en los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica. En ese sentido, trabajos de ingenieros e investigadores sugieren que el método de irrigación puede mejorar la producción de energía mediante los paneles FV^{1,2,3,4}. A continuación, se presenta a través de la figura 1 este proceso y, así mismo, cómo se puede reducir la temperatura de un panel fotovoltaico para que así aumente la potencia y rendimiento de este.

Figura 1. Sistema de irrigación de un panel FV.



Fuente: MAGGI, Sebastián Andrés. Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile. 2013.

¹ OSMA, German. Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido. Tesis doctorado en Ingeniería Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2015.

² MAGGI, Sebastián Andrés. Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile. Tesis Ingeniero Civil Mecánico. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2013.

³ ROJAS, Wilmer y FLÓREZ, Carlos. Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico upsolar 250W instalado sobre techo verde en la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2016.

⁴ JAIMES, Juan y CORTÉS, Camilo. Estudio del balance térmico de los paneles fotovoltaicos instalados en la terraza del edificio de ingeniería eléctrica. Tesis en Ingeniería Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2018.

El objetivo principal de este proyecto consistió en diseñar una herramienta de optimización que permita definir el perfil de irrigación.

Esta herramienta utilizó como insumos tres perfiles: Temperatura ambiente (T_{amb}), Velocidad del viento (Vel) y la Irradiancia (G_{inc}).

Para solucionar el problema se usó una herramienta basada en la programación dinámica desarrollada por Sundstrom y Guzzella⁵. Así mismo, se implementó un algoritmo en el programa MATLAB para realizar la optimización del tiempo de irrigación. Por último, se sintetizaron los resultados obtenidos en las simulaciones del sistema de irrigación en las condiciones de operación: buenas, regulares y malas.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 presenta el modelo térmico del panel FV, la sección 3 introduce a la programación dinámica, la sección 4 muestra cómo utilizar la programación dinámica para resolver el problema planteado y finalmente, la sección 5 explica los análisis de los resultados obtenidos.

⁵ SUNDSTROM, Olle; GUZZELLA, Lino. A generic dynamic programming Matlab function. En 2009 IEEE Control Applications (CCA) & Intelligent Control, (ISIC). IEEE, 2009. p. 1625-1630.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente trabajo tiene como objetivo aumentar la energía neta generada de un panel fotovoltaico.

La energía neta generada por el sistema descrito se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{ben} = \int_{t-inicial}^{t-final} P_{beneficio}.dt \quad (1)$$

$$P_{beneficio} = P_{gen} - P_{irrigación} \quad (2)$$

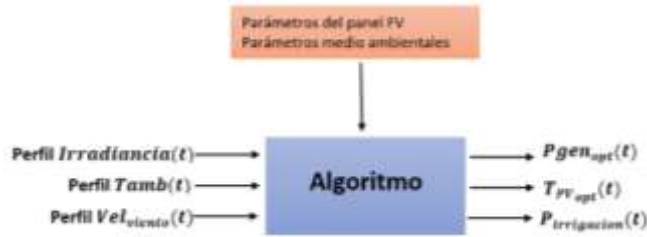
Donde:

- $t - inicial$: Temporada inicial.
- $t - final$: Temperatura final.
- E_{ben} : Energía neta en un periodo de tiempo.
- $P_{beneficio}$: Potencia beneficio.
- P_{gen} : Potencia generada por el panel FV, en función de la Temperatura ambiente (T_{amb}), Irradiancia (G_{inc}) y Velocidad del viento (Vel).
- $P_{irrigación}$: Potencia consumida por el sistema de irrigación.

La irrigación se aplica a los paneles FV para disminuir la temperatura, y con ello aumentar la potencia eléctrica generada por el panel FV.

La Figura 2 ilustra las variables de entrada, los parámetros y las variables de salida del algoritmo de control, siendo la Potencia de irrigación ($P_{irrigación}$) la variable de control.

Figura 2. Algoritmo de control



1.1 POTENCIA GENERADA

De acuerdo con Hernández, Quintero y Torres⁶ la potencia generada es función de la radiación solar incidente y la temperatura de operación del panel FV, por lo tanto, se representa como una fuente de corriente dependiente, existiendo una dependencia mutua entre T_{PV} y P_{gen} , tal como se muestra en la expresión (3).

$$P_{gen} = G_{inc} \cdot A_{PV} \cdot \eta_{a0} \cdot (1 + b \cdot (T_{PV} - 25)) \quad (3)$$

Donde:

- G_{inc} : Irradiancia, $[W/m^2]$.
- A_{PV} : Área del panel FV, $[m^2]$
- η_{a0} : Eficiencia del panel FV, [%].
- b : Coeficiente térmico del panel FV, $[%/K]$

1.2 MODELO TÉRMICO DEL PANEL FOTOVOLTAICO (FV)

La mayor parte de la radiación solar absorbida por un panel FV no se convierte en energía eléctrica, sino que se convierte en pérdidas que ocasiona un aumento de temperatura del módulo⁷. La curva I-V del módulo⁸, se ve afectada fuertemente por

⁶ HERNÁNDEZ, Edgar, QUINTERO, Luz y TORRES, Miguel. Caracterización de la operación de paneles fotovoltaicos en condiciones tropicales bajo la influencia de un techo verde. Caso Bucaramanga. Tesis en Ingeniería Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

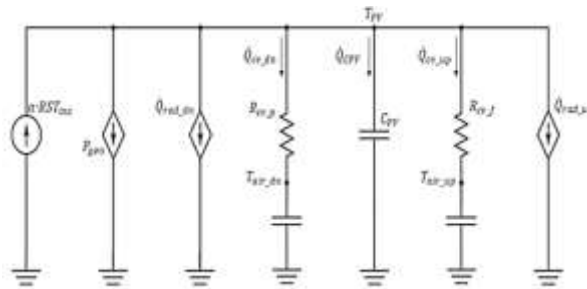
⁷ GUIRGUIS; RUIZ, E.; PILIOUGINE, M. y SIDRACH, M. Estudio de la temperatura de módulos fotovoltaicos bajo diferentes condiciones ambientales: Modelos NOTC y balance de energía. 2007.

⁸ Canadian Solar CS6P-255|260 |265P-SD [En Línea]. Febrero 2016. Disponible en internet. https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/na/Canadian_Solar-Datasheet-CS6PP-SmartDC_v5.4_na.pdf

la temperatura, es decir, a medida que la temperatura aumenta el voltaje disminuye, causando una reducción de la potencia generada.

Para este trabajo, se utilizó el modelo presentado por Osma⁹. Este modelo hace una adaptación de un sistema termoelectrico a un circuito eléctrico y es representado en la Figura 3.

Figura 3. Modelo térmico RC del panel FV



Fuente: OSMA, German. Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido.

Para este estudio se consideró que el panel FV es un cuerpo muy delgado (<5 mm) por lo que su temperatura se supone igual en toda su extensión. Por esto el panel es representado por una capacitancia térmica, sin resistencias internas producidas por conducción.

1.2.1 Puntos de temperatura. El nodo principal es la temperatura de operación del panel FV (T_{PV}), la cual es una incógnita, puesto que es una variable de salida. Los nodos de temperatura del aire circundante sobre ($T_{air\ up}$) y debajo ($T_{air\ dn}$) de las superficies frontal y posterior del panel FV son representados por capacitancias térmicas, siendo la capacitancia térmica del panel FV. La temperatura del aire por encima y por debajo del panel FV, se consideran sumideros térmicos con

⁹ OSMA, German. Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido. Op. Cit p. 19.

capacitancias térmicas de valores muy elevados. Estas dos temperaturas no se consideran iguales, ya que se encuentran a diferentes alturas con respecto al techo. Los objetos que están más cercanos al techo tienden a incrementar su temperatura ya que, el techo tiene una temperatura mayor al ambiente¹⁰.

1.2.2 Transferencia de calor. En este modelo se consideró que no existe transferencia de calor por conducción al interior del panel FV, y dado que no hay otro cuerpo a ser analizado en el sistema, no hay transferencia de calor por conducción en este modelo.

Por otro lado, se identifican dos procesos de transferencia de calor por convección entre el panel FV y el medio ambiente para el caso del aire, los cuales ocurren entre las superficies frontal ($R_{cv f}$) y posterior ($R_{cv p}$), y el aire circundante a éstas. Se presentan dos temperaturas de aire, ya que éstas pueden depender de la altura de ubicación del panel FV con respecto al techo. Las expresiones (4) y (5) representan la transferencia de calor por convección frontal y posterior, respectivamente.

$$Q_{cv f} = h_{cv f} \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV} - T_{air up}) \quad (4)$$

$$Q_{cv p} = h_{cv p} \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV} - T_{air dn}) \quad (5)$$

Donde:

- $h_{cv f}$: Coeficiente de convección posterior, $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.
- $h_{cv p}$: Coeficiente de convección frontal, $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.

La transferencia de calor por radiación se representa a partir de una fuente de corriente (flujo de calor) dependiente. En total, se consideran dos fuentes dependientes, una para cada proceso de transferencia ocurrido en las dos superficies del panel FV, superficie frontal y superficie posterior. Cada una de estas

¹⁰ MAGGI, Sebastián Andrés. Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile. Tesis Ingeniero Civil Mecánico. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2013.

tasas de pérdida está conformada por dos componentes debido a la inclinación del panel FV, tal como lo muestran Las expresiones (6) y (7).

$$Q_{rad f} = \varepsilon_{PVf} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (F_{f1} \cdot (T_{PV}^4 - T_{amb}^4) + F_{f2} \cdot (T_{PV}^4 - T_{sky mod}^4)) \quad (6)$$

$$Q_{rad p} = \varepsilon_{PVp} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (F_{p1} \cdot (T_{PV}^4 - T_{sky mod}^4) + F_{p2} \cdot (T_{PV}^4 - T_{amb}^4)) \quad (7)$$

Donde:

- ε_{PVf} : Emitancia frontal del panel FV, adimensional.
- ε_{PVp} : Emitancia posterior del panel FV, adimensional.
- σ : Constante de Stefan Boltzmann, $[5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4]$.
- T_{amb} : Temperatura ambiente, $[^{\circ}C]$.
- $T_{sky mod}$: Temperatura del cielo ajustada, este ajuste representa el nivel de nubosidad del cielo.

Los factores de visibilidad f_{f1} , f_{f2} , f_{p1} y f_{p2} de cada superficie del panel FV para el cielo y el techo, se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$T_{sky mod} = (1 - \gamma) \cdot 0.052 \cdot T_{amb}^{3/2} + \gamma \cdot T_{amb} \quad (8)$$

$$f_{f1} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(180 - \delta)) \quad (9)$$

$$f_{f2} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(180 - \delta)) \quad (10)$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(180)) \quad (11)$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(180)) \quad (12)$$

Donde:

- γ : Coeficiente del nivel de nubosidad.
- δ : Ángulo de inclinación del panel FV.

1.2.3 Temperatura del panel FV sin incluir el sistema de irrigación. En este modelo equivalente, la fuente de corriente independiente representa la irradiación

efectiva en el panel FV ($G_{in\,eff}$) como el producto entre la irradiancia del panel FV (RST_{inc}) y el coeficiente de transmitancia (α), y la irradiancia del panel FV que es el producto entre la radiación solar incidente (G_{inc}) y el área del panel FV (A_{PV}). Lo anterior, se indica mediante las siguientes expresiones:

$$G_{in\,eff} = \alpha \cdot RST_{inc} \quad (13)$$

$$RST_{inc} = G_{inc} \cdot A_{PV} \quad (14)$$

A continuación, se aplica el análisis de los nodos para obtener la variación del calor del panel FV como se ve en la siguiente expresión (15).

$$Q_{c\,pv} = G_{in\,eff} - P_{gen} - Q_{rad\,f} - Q_{rad\,p} - Q_{cv\,p} - Q_{cv\,f} \quad (15)$$

La expresión número (16) permite determinar la temperatura de operación del panel FV en el instante $i+1$, en función de la temperatura de operación y los flujos de calor en el instante i .

$$T_{PV\,i+1} = T_{PV} + \frac{\Delta t}{C_p \cdot A_{PV}} \cdot (G_{in\,eff\,i} - P_{gen\,i} - Q_{rad\,f\,i} - Q_{rad\,p\,i} - Q_{conv\,p\,i} - Q_{conv\,f\,i}) \quad (16)$$

Donde:

- C_p : Capacidad térmica del panel FV, $[J/m^2 \cdot K]$.
- Δt : Paso de tiempo, segundos.

1.2.4 Comportamiento térmico del agua de riego. La película de agua durante el proceso de irrigación obstruye la interacción de la superficie superior del panel con el entorno, dado que elimina la transferencia de calor por radiación y convección frontal. En consecuencia, se produce una corriente o flujo de calor de enfriamiento hacia el panel FV como se indica en la expresión (17).

$$Q_{enfriamiento} = \frac{T_{PV} - T_{agua\,r}}{Rrg} \quad (17)$$

Donde:

- $T_{agua\ r}$: Temperatura del agua de riego, [$^{\circ}C$].
- Rrg : Resistencia de riego, [$W/^{\circ}C$].

1.2.5 Temperatura del panel FV incluyendo el sistema de irrigación. La variación del calor del panel FV se ve afectada. Por consiguiente, con el análisis de nodos se obtiene la expresión (18). Y la temperatura de operación se representa en la expresión (19).

$$Q_{Cpv} = G_{in\ eff} - P_{gen} - Q_{rad\ f} - Q_{rad\ p} - Q_{CV\ p} - Q_{CV\ f} - Q_{enfriamiento} \quad (18)$$

$$T_{PVi+1} = T_{PV\ i} + \frac{\Delta t}{C_p.A_{PV}} \cdot (G_{in\ eff\ i} - P_{gen\ i} - Q_{rad\ f\ i} - Q_{rad\ p\ i} - Q_{conv\ p\ i} - Q_{conv\ f\ i} - Q_{enfriamiento\ i}) \quad (19)$$

Aunque hay expresiones que determinan el comportamiento de la temperatura del agua de riego y la temperatura del agua en la cava, como se muestra en Osma¹¹ y Jaimes¹², en el caso de estudio, se asume que estas temperaturas son iguales y tienen un comportamiento igual a la temperatura ambiente.

¹¹ OSMA, German. Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido. Op cit. p. 56.

¹² JAIMES, Juan y CORTÉS, Camilo. Estudio del balance térmico de los paneles fotovoltaicos instalados en la terraza del edificio de ingeniería eléctrica. Op. Cit., p. 44.

2. PROGRAMACIÓN DINÁMICA

Richard Bellman en los años cincuenta desarrolló la programación dinámica y, en esta postuló el principio de optimalidad que dice: *"Una política óptima tiene la propiedad de que cualesquiera que sean su estado y decisión iniciales, las decisiones subsecuentes deben constituir una política óptima con respecto al estado resultante de la decisión inicial."*¹³. La programación dinámica es un proceso de decisión de optimización por etapas, que permite solucionar problemas en los cuales es necesario tomar decisiones en etapas consecutivas, este se basa en el método propuesto por Bellman¹⁴.

2.1 ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA

Sea $\pi = \{\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{N-1}\}$ una política de control¹⁵, usando el estado inicial T_{PV0} se tiene:

$$J_{\pi}(x_0) = g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} h_k(T_k, \mu_k(T_k)) \quad (19)$$

Donde:

- $g_N(T_N)$: Costo final.
- $h_k(T_k, \mu_k(T_{PVK}))$: El costo de aplicar el control.

La función se basa en el principio de optimalidad¹⁶, el algoritmo de programación dinámica DP evalúa el costo óptimo de la función $J_k(T_{PV}^i)$ en cada nodo que se

¹³ BELLMAN, Richard. Dynamic programming, Princeton. New Jersey: Prese Princeton.1957.

¹⁴ BELLMAN, Richard. Applied dynamic programming. New York: Princeton university press. 1962.

¹⁵ Ibid., p. 1.

¹⁶ BELLMAN, Richard. Dynamic programming, Op. Cit., p. 123.

encuentra discretizado tiempo-espacio del estado, se procede hacia atrás en el tiempo¹⁷.

Cálculo del costo final

$$J_N(T^i) = g_N(T_{PV}^i) \quad (20)$$

Cálculo intermedio $k = N - 1$ a 0

$$J_k(T^i) = \max_{u_k} \{h_k(T_{PV}^i, u_k) + (F_k(T_{PV}^i, u_k))\} \quad (21)$$

Donde:

- T_{PV}^i : Índice de tiempo.
- k : Discretización tiempo-estado del espacio.
- J_{k+1} : Función de costo para llegar al siguiente nodo.

La salida de la función $(F_k(T_{PV}^i, u_k))$ es una variable continua en el espacio de estado que está entre punto y punto.

La salida del algoritmo (20) - (21) es el control óptimo.

Investigadores de la Universidad ETH de Zúrich¹⁸ comparten una función que permite solucionar problemas de optimización utilizando el método de la programación dinámica. Este tipo de problemas se pueden resolver de la siguiente manera.

¹⁷ HERNÁNDEZ, QUINTERO y TORRES. Op. cit, p. 12.

¹⁸ SUNDSTROM, Olle; GUZZELLA, Lino. A generic dynamic programming Matlab function. En 2009 IEEE Control Applications (CCA) & Intelligent Control, (ISIC). IEEE, 2009. p. 1625-1630.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO A LA FUNCIÓN DE PROGRAMACIÓN DINAMICA

El estado $T_{PVk} \in [20, 80]$ es la temperatura del panel FV, la variable de control $u_k \in [0, 15]$ es la potencia consumida por el sistema de irrigación durante un paso de tiempo. El problema de control óptimo en tiempo discreto se basa en maximizar la potencia beneficio durante un periodo de tiempo, por lo cual se puede describir como:

$$\max_{u_k \in [0, 15]} \sum_{k=1}^{N-1} P_{gen} - P_{irrigacion} \quad (22)$$

$$T_{PVk+1} = f(T_{PVk}, u_k) + T_{PVk} \quad (23)$$

$$T_{PV0} = 23 \quad (24)$$

$$T_{PV} \in [20, 80] \quad (25)$$

$$N = 12horas * \frac{60 minutos}{1 hora} + 1 \quad (26)$$

$$J(u(t))_k = \int_6^{18} (P_{gen}(I(t), T_{PV}(T_{amb}(t), u(t))) - P_{irri}(u(t))) dt \quad (27)$$

Donde:

- $T_{PV}(T_{amb}(t), u(t))$: Temperatura del panel FV
- $T_{amb}(t)$: Temperatura ambiente.

3.1 PARÁMETROS

Los parámetros necesarios se presentan en la Tabla 1, tomado de Rojas y Flórez¹⁹. Estos parámetros corresponde a los paneles FV ubicados en la terraza del edificio

¹⁹ ROJAS, Wilmer y FLÓREZ, Carlos. Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico upsolar 250W instalado sobre techo verde en la ciudad de Bucaramanga. Tesis en Ingeniería Eléctrica Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2016.

de eléctrica, electrónica y telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 1. Parámetros de un panel FV

Ecuación	Interpretación
$P_{nom}: 250 [W]$	Potencia nominal del panel
$A_{pv}: 1.6 [m^2]$	Área del panel
$\eta_{0} = \frac{P_{nom}}{A_{pv} \cdot 1000} [\%]$	Eficiencia del panel FV
$b : -0.0043 [\%/K]$	Coeficiente térmico del panel FV
$\alpha: 0.9$	Coeficiente de transmitancia
$C_p: 10140 [J/m^2 \cdot K]$	Capacidad térmica del panel FV
$\sigma: 5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4].$	Constante de Stefan Boltzmann
$\delta: 10 \frac{pl}{180}$	Ángulo de inclinación del panel FV
$G_{ext}: 1278 [W/m^2]$	Irradiancia máxima
$Rrg: 0.00285 [W/^{\circ}C]$	Resistencia de riego
$\varepsilon_{pvfrg}: 0.9$ adimensional	Emitancia del agua
$Rrg: 0.00285/5 [W/^{\circ}C]$	Resistencia de mezclado
$V_{rg}: 4,5 [L/m]$	Volumen de agua de riego
$C_{agua}: 4180 [J/K]$	Capacidad específica del agua
$km_c = 3.5 [^{\circ}C/W]$	Coeficiente de enfriamiento dentro de la cava
$km_r: 1/km_c [W/^{\circ}C]$	Resistencia de enfriamiento

Fuente: ROJAS, Wilmer y FLÓREZ, Carlos. Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico upsolar 250W instalado sobre techo verde en la ciudad de Bucaramanga. 2016.

3.2 VECTORES

Los vectores vx y vu contienen toda la información sobre el estado y el control respectivamente.

$$vT_{PV} = [20 \ 20.1 \ 20.2 \ \dots \ 79.8 \ 79.9 \ 80] \quad (28)$$

$$vu = [0 \ 15] \quad (29)$$

$$vT = [0 \ 60 \ 120 \ \dots \ 43140 \ 43200] \quad (30)$$

Donde:

- vT_{PV} : Es el vector de estado, cuenta con delta de temperatura de 0.1 °C, su límite inferior de 20 °C y su límite superior es 80 °C.
- vu : Es el vector de control, es la potencia consumida por el sistema de irrigación. Donde, la potencia mínima a 0 W corresponde a la potencia cuando está desactivado el sistema, y la potencia máxima a 15 W es la potencia cuando el sistema está activado.
- vT : Es la variable independiente. Donde, 0 corresponde a las 6 am con un delta de tiempo de 60 segundos, hasta 43200 segundos que pertenece a las 6pm. Por lo tanto, se pueden observar los cambios repentinos que se producen alrededor del día con el sistema de irrigación.

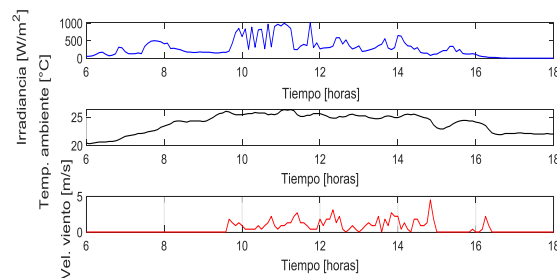
4. CASO DE ESTUDIO

Para el caso de estudio se utilizaron diversos valores de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento, suministrados por la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

Se seleccionaron tres días diferentes, con diferentes condiciones climáticas, temperatura ambiente (T_{amb}), irradiancia (G_{inc}) y velocidad del viento (Vel) ilustrados en las figuras 4, 10 y 16. Los días seleccionados corresponden al primer trimestre del 2018. Estos fueron:

- Día 1: 13/01/2018
- Día 2: 31/03/2018
- Día 3: 22/03/2018

Figura 4. Perfil de irradiación, temperatura ambiente y velocidad del viento, día 1.



Las variables analizadas fueron: Potencia consumida por el sistema de irrigación, temperatura del panel FV con irrigación y sin irrigación, potencia generada por el panel FV con irrigación, sin irrigación y potencia beneficio.

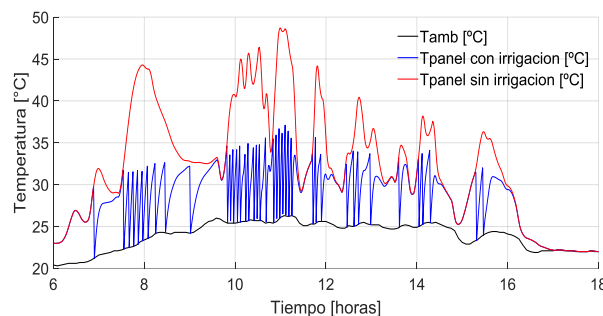
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PERFILES DÍA 1

Para el presente caso de estudio, los resultados se muestran desde la Figura 5 a la Figura 9. En la Figura 4 se muestran los perfiles de entrada para este primer día. En la Figura 5 se observa la potencia consumida por el sistema de irrigación. En la Figura 6 se presentan las variaciones de la temperatura que presenta el panel FV. La Figura 7 muestra la potencia beneficio con respecto a la potencia sin irrigación. Posteriormente, en la Figura 8 se observa un zoom respecto a la potencia de beneficio. Finalmente, en la Figura 9, se presenta la variación de energía beneficio que presenta un incremento porcentual de 2.13% ante la energía generada sin irrigación.

4.1.1 Gráficas del análisis día 1. La Figura 4 presenta los perfiles de entrada obtenidos.

En la Figura 5 se observa que en las horas cercanas a las 11:30 am se presenta la mayor potencia consumida por el sistema de irrigación.

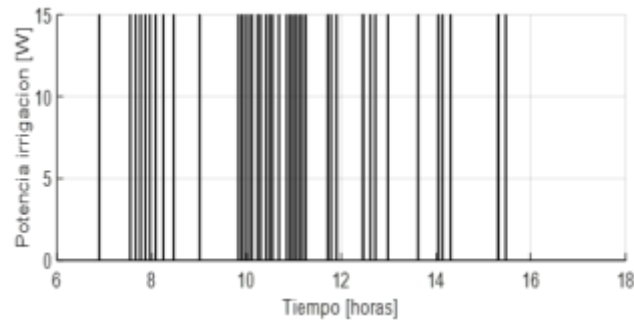
Figura 5. Perfil de temperatura ambiente, del panel con y sin irrigación, día 1.



La Figura 6 presenta tres temperaturas: La temperatura ambiente es la de valores más bajos, la temperatura de irrigación con valores cercanos a la temperatura

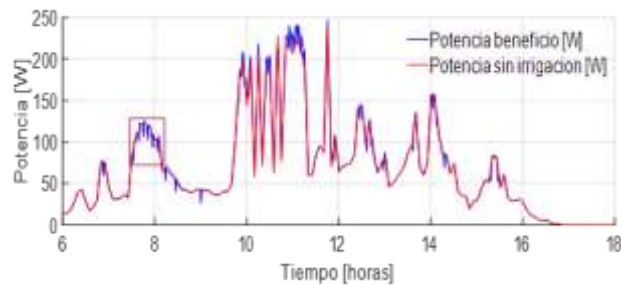
ambiente, y la temperatura sin irrigación es la que alcanza valores cercanos a los 60°C.

Figura 6. Potencia irrigación, día 1



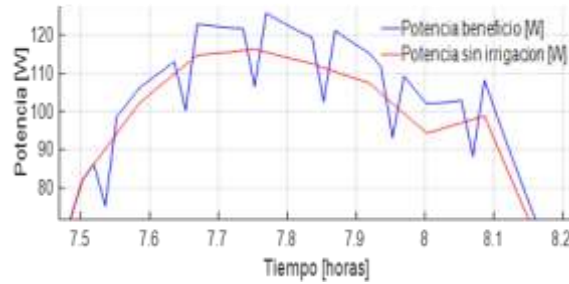
La Figura 7 presenta las variaciones de potencia beneficio generada y la potencia generada por el panel FV sin incluir el sistema de irrigación que permitió una inversión para sus resultados en los instantes posteriores a la irrigación

Figura 7. Potencia beneficio vs sin irrigación, día 1.



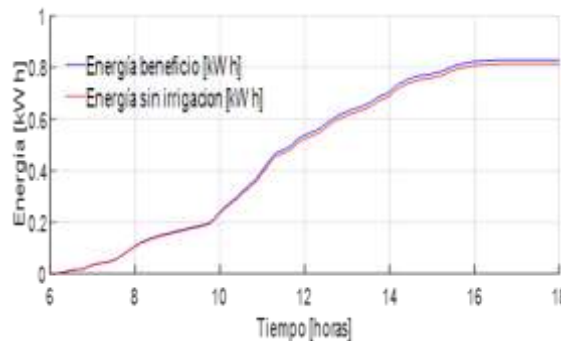
En la Figura 8 se observan los incrementos de la potencia beneficio en comparación a la potencia generada sin el sistema de irrigación. Cuando la potencia beneficio es menor a la potencia sin irrigación, permite hacer una inversión que se ve reflejada una ganancia luego de un instante de tiempo.

Figura 8. Zoom aplicado a potencia beneficio vs sin irrigación, día 1.



En la Figura 9 se presenta la variación del beneficio y el aumento de la energía beneficio generada por el sistema de irrigación. La energía beneficio presenta un incremento porcentual de 2.13% ante la energía generada sin irrigación.

Figura 9. Energía beneficio vs sin irrigación, día 1



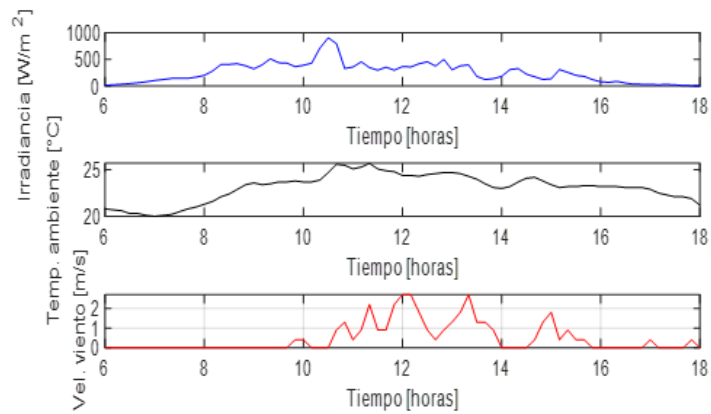
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS PERFILES DÍA 2

Las figuras 10 a la 15 presentan los resultados para el perfil del día 2. En ese sentido, en la Figura 10 se muestran los perfiles de entrada para este día de operación, en la Figura 11 se observa la potencia consumida por el sistema de irrigación y los momentos del día en los cuales este sistema entro en operación. En la Figura 12, se aprecian las variaciones de las temperaturas de operación que se

presentan en el panel FV. En la Figura 13, se muestra la potencia beneficio generada con y sin el sistema de irrigación. En las figuras 14 y 15, se presentan las variaciones de Potencia beneficio vs. Potencia generada sin irrigación, donde se puede ver que en algunos momentos del día la potencia beneficio es menor a la generada sin irrigación. Se presenta la variación de energía beneficio que presenta un incremento porcentual de 2.56% ante la energía generada sin irrigación.

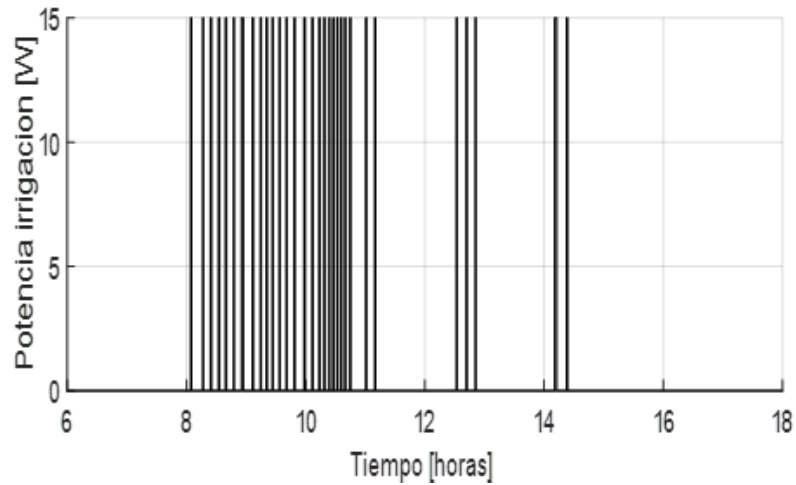
4.2.1 Gráficas del análisis día 2. En la Figura 10, se muestran los perfiles de entrada para el segundo día de aplicación del estudio.

Figura 10. Perfil de irradiación, temperatura ambiente, velocidad del viento, día 2.



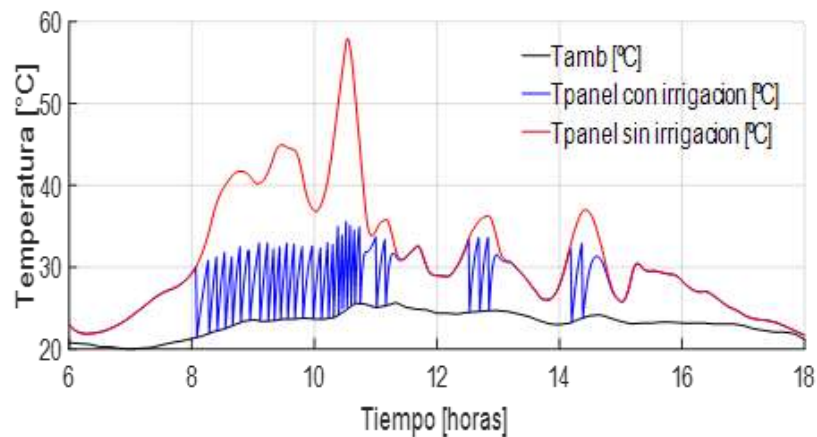
En la Figura 11, se observa la potencia consumida en diferentes momentos de la jornada de aplicación, los cuales se concentran principalmente entre las 8 am y las 11 am.

Figura 11. Potencia irrigación, día 2.



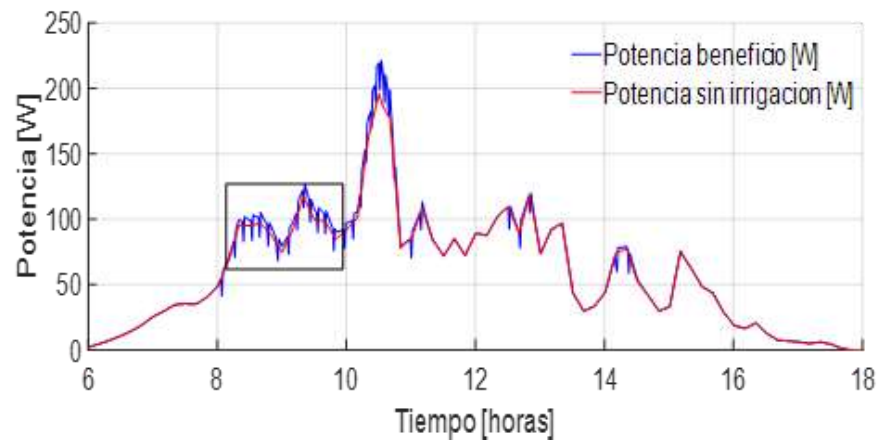
En la Figura 12, se observan las variaciones presentadas en el segundo día. En los momentos donde el sistema de irrigación entró en funcionamiento. En este día de operación la mayor variación de temperatura se presentó cerca de las 10:15 am teniendo una variación de temperatura del panel FV la cual va desde los 57.9°C hasta los 35°C.

Figura 12. Perfil de temperatura ambiente, del panel con y sin irrigación, día 2.



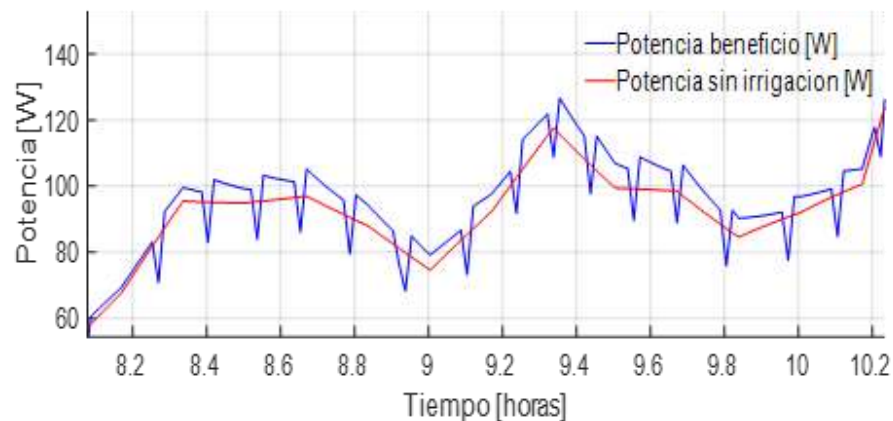
En la Figura 13, se aprecia la potencia beneficio generada con y sin el sistema de irrigación.

Figura 13. Potencia beneficio vs sin irrigación, día 2.



En Figura 14, se observa de manera más detallada el beneficio obtenido con la irrigación. Cuando la potencia beneficio es menor a la potencia sin irrigación, permite hacer una inversión que se ve reflejada una ganancia luego de un instante de tiempo.

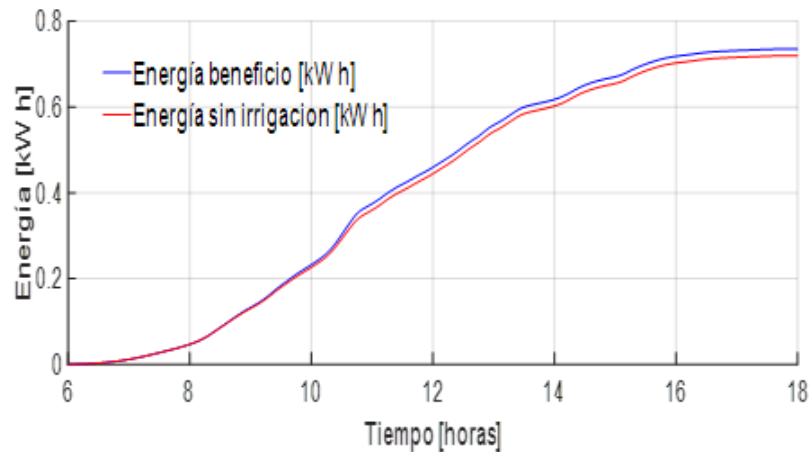
Figura 14. Zoom aplicado a potencia beneficio vs sin irrigación, día 2.



En la Figura 15, se ilustra la energía beneficio obtenida sin la irrigación. Esta pequeña disminución de potencia lleva a una mayor generación de esta, significando una ganancia de energía para el sistema de generación. La energía

beneficio presenta un incremento porcentual de 2.56% ante la energía generada sin irrigación.

Figura 15. Energía beneficio vs sin irrigación, día 2.

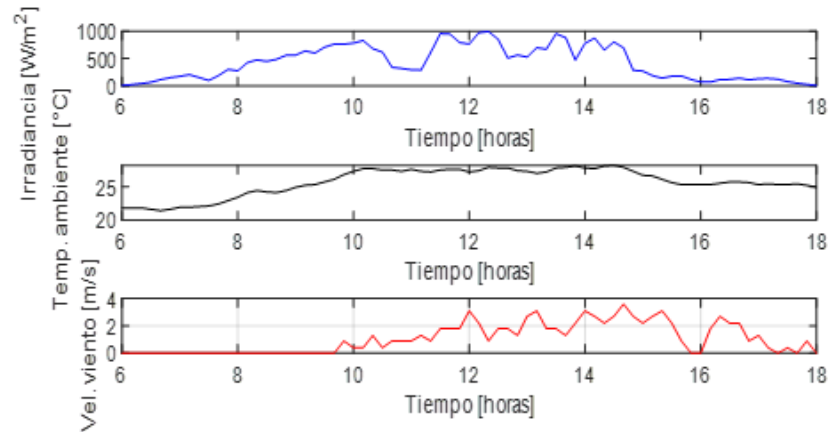


4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS PERFILES DÍA 3

Las figuras 16 a la 21 presentan los resultados para el perfil del día 3. En la Figura 16 son mostrados los perfiles de entrada para este día de operación. En la Figura 17 se observa la potencia consumida por el sistema de irrigación. En la Figura 18 se observan las variaciones de temperaturas de operación. En las Figuras 19 y 20, se observan las variaciones de potencia beneficio vs generada sin irrigación. Y, finalmente en la Figura 21 se muestra la variación de energía beneficio vs. energía generada sin irrigación. Se presenta la variación de energía beneficio que presenta un incremento porcentual de 3.36% ante la energía generada sin irrigación.

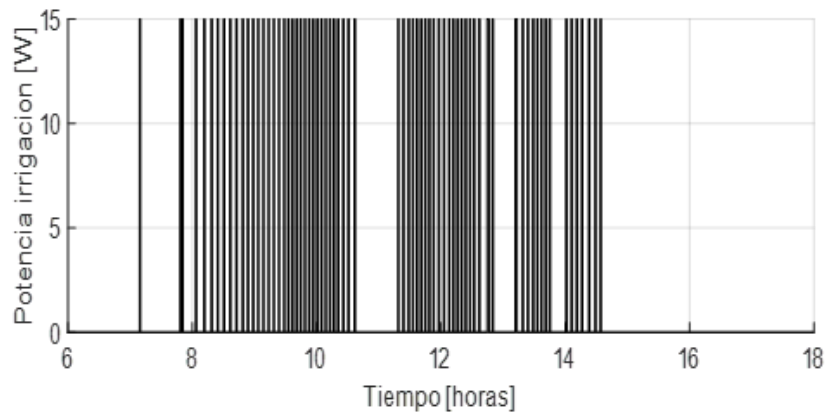
4.3.1 Gráficas del análisis día 3. En la Figura 16, se muestran los perfiles de entrada y salida para la aplicación en el tercer día.

Figura 16. Perfil de irradiación, Temperatura ambiente, Velocidad del viento, día 3.



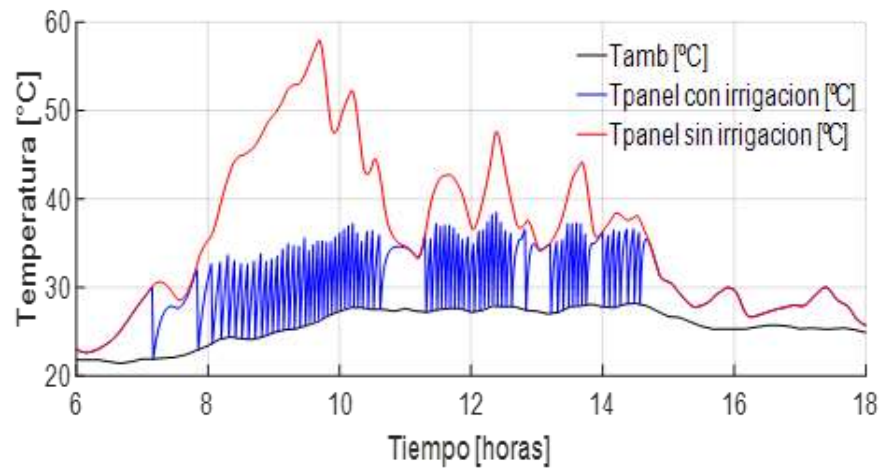
En la Figura 17, se ilustra la potencia consumida por el sistema, y los momentos del día que el sistema entró en operación los cuales se concentran principalmente entre las 8 am a las 10:30 am y entre las 11:30 am a 12:30 pm.

Figura 17. Potencia irrigación, día 3.



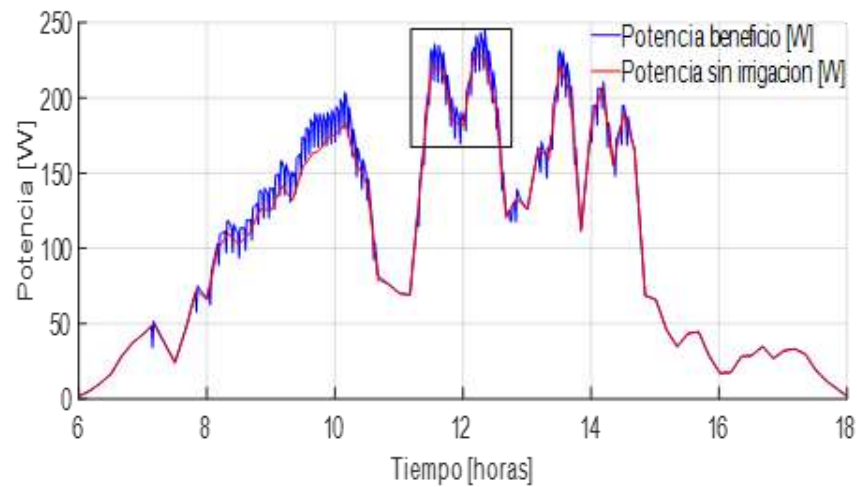
En la Figura 18 se observan las variaciones de temperatura obtenidas durante la jornada, que se presentan en el panel FV en los momentos donde el sistema de irrigación entró en funcionamiento, para este día de operación la mayor variación de temperatura se presentó cerca de las 9:45 am teniendo una variación de temperatura del panel FV la cual va desde los 58°C hasta los 35°C.

Figura 18. Perfil de temperatura ambiente, del panel con y sin irrigación, día 3.



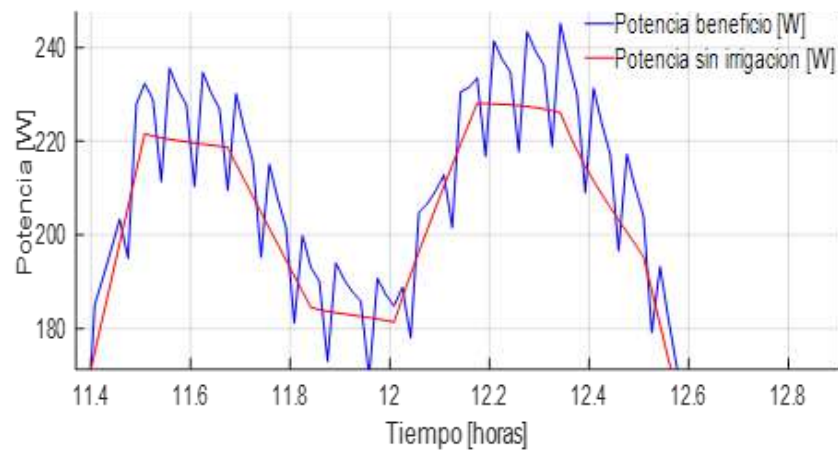
En la Figura 19, se ilustra la potencia generada sin el sistema de irrigación.

Figura 19. Potencia beneficio vs sin irrigación, día 3.



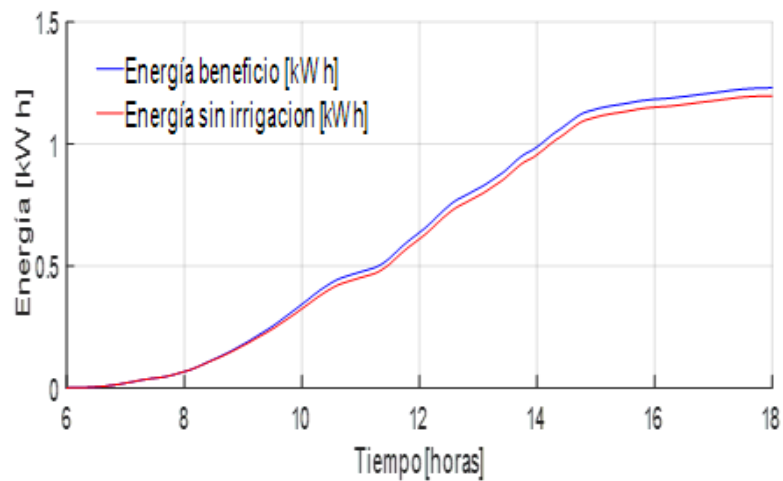
En la Figura 20, se observa de forma más detallada la potencia beneficio generada sin la irrigación. Cuando la potencia beneficio es menor a la potencia sin irrigación, permite hacer una inversión que se ve reflejada una ganancia luego de un instante de tiempo.

Figura 20. Zoom aplicado a potencia beneficio vs sin irrigación, día 3.



En la Figura 21, se observa la energía beneficio vs. la energía sin irrigación, para este día de operación, se calculó la variación porcentual de energía para este día y presentó un incremento de 3.36%, teniendo así un mayor incremento en la energía beneficio del panel FV.

Figura 21. Energía beneficio vs sin irrigación, día 3.



5. CONCLUSIONES

Se diseñó un algoritmo basado en la programación dinámica haciendo uso del programa MATLAB, el cual permitió realizar la optimización del tiempo de irrigación de los paneles fotovoltaicos a partir de un modelo térmico RC.

Según los resultados obtenidos se concluye que la simulación realizada mediante el método de programación dinámica funciona eficazmente para las diferentes condiciones ambientales que se presentan en un clima tropical para el primer trimestre del 2018, en cada caso de estudio se obtuvo un incremento de la energía neta que oscilan entre 2.13% a 3.36% empleando el sistema de irrigación, en comparación al sistema sin irrigación.

Se comprobó que los resultados obtenidos a partir de la simulación son los esperados, puesto que la activación de este sistema de irrigación permitió una mayor generación de energía eléctrica, mejorando la cantidad de energía entregada por un panel FV.

BIBLIOGRAFIA

BELLMAN, Richard. Dynamic programming, Princeton. New Jersey: Prese Princeton.1957.

BELLMAN, Richard. Applied dynamic programming. New York: Princeton university press. 1962.

CANADIAN SOLAR. CS6P-255|260 |265P-SD [En Línea]. Febrero 2016. Disponible en internet. [https://www.canadiansolar.com /downloads/datasheets/na/Canadian_Solar-Datasheet-CS6PP-SmartDC_v5.4_na.pdf](https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/na/Canadian_Solar-Datasheet-CS6PP-SmartDC_v5.4_na.pdf)

GUIRGUIS; RUIZ, E.; PILIOUGINE, M. y SIDRACH, M. Estudio de la temperatura de módulos fotovoltaicos bajo diferentes condiciones ambientales: Modelos NOTC y balance de energía. 2007.

HERNÁNDEZ, Edgar, QUINTERO, Luz y TORRES, Miguel. Caracterización de la operación de paneles fotovoltaicos en condiciones tropicales bajo la influencia de un techo verde. Caso Bucaramanga. Tesis en Ingeniería Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2014

JAIMES, Juan y CORTÉS, Camilo. Estudio del balance térmico de los paneles fotovoltaicos instalados en la terraza del edificio de ingeniería eléctrica. Tesis en Ingeniería Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2018.

KRAUTER, Stefan. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. Solar energy materials and solar cells, 2004, vol. 82, no 1-2, p. 131-137.

MAGGI, Sebastián Andrés. Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile. Tesis Ingeniero Civil Mecánico. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2013.

OSMA, German. Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido. Tesis doctorado en Ingeniería Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2015.

ROJAS, Wilmer y FLÓREZ, Carlos. Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico upsolar 250W instalado sobre techo verde en la ciudad de Bucaramanga. Tesis en Ingeniería Eléctrica Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2016.

SUNDSTROM, Olle; GUZZELLA, Lino. A generic dynamic programming Matlab function. En 2009 IEEE Control Applications (CCA) & Intelligent Control,(ISIC). IEEE, 2009. p. 1625-1630.