

**ESTUDIO DEL BALANCE TÉRMICO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS
INSTALADOS EN LA TERRAZA DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**JUAN SEBASTIÁN JAIMES RÍOS
CAMILO EDUARDO CORTÉS ADARME**

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

2018

**ESTUDIO DEL BALANCE TÉRMICO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS
INSTALADOS EN LA TERRAZA DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**JUAN SEBASTIÁN JAIMES RÍOS
CAMILO EDUARDO CORTÉS ADARME**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

**Director:
GERMAN ALFONSO OSMA PINTO
PhD en Ingeniería Eléctrica**

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

2018

DEDICATORIA

A mis padres y familiares por su apoyo incondicional y sincero, por haber sido parte de esta gran experiencia personal y profesional.

A todas las personas que aportaron un granito de arena para que esta meta fuera una realidad.

A mis amigos por todo el apoyo y tiempo que me han aportado tanto en mi vida profesional y personal.

Juan Sebastián Jaimes Ríos

Agradezco infinitamente a toda mi familia por su apoyo incondicional y sincero, por haber sido parte de esta gran experiencia personal y profesional.

A esas personas únicas e inigualables que siempre me motivan a seguir adelante, por su confianza y todo el amor que me brindan.

A mis amigos, que desde el inicio me han mostrado su cariño y han compartido conmigo grandes momentos.

Al profesor Juan Manuel Murcia, por haber sido parte en mi orientación profesional y brindarme su apoyo en momentos difíciles.

Camilo Eduardo Cortés Adarme

“Nada significativo fue logrado por un esfuerzo individual. Mira debajo de la superficie y verás que todos los actos aparentemente solitarios son realmente el producto de un trabajo en equipo”.

John C. Maxwell.

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos al profesor German Alfonso Osma Pinto por su dirección, acompañamiento y por compartirnos sus conocimientos y apoyarnos a lo largo del desarrollo del presente trabajo de grado.

Agradecemos al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS con su apoyo permitimos culminar este trabajo de grado.

Finalmente, gracias infinitas a nuestra alma máter, la Universidad Industrial de Santander al permitirnos ser parte de su comunidad estudiantil.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. CONSIDERACIONES GENERALES	21
2.1 MODELO TÉRMICO DE UN PANEL FV.....	21
2.2 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	32
2.2.1 CELDAS FOTOVOLTAICAS.....	32
2.2.2 PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS (FV)	33
2.3 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE <i>TRNSYS</i>	35
2.3.1 INTERÉS DE SIMULAR CON <i>TRNSYS</i>	36
2.3.2 LIMITACIONES EN LOS COMPONENTES ESTÁNDAR	37
2.3.3 NUEVOS COMPONENTES.....	37
3. MODELAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	39
3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA	39
3.1.1 PANEL FOTOVOLTAICO	40
3.1.2 LECTOR DE DATOS METEOROLÓGICOS.....	41
3.1.3 VARIADOR DE VELOCIDAD DEL VIENTO	43
3.1.4 CONTROL DE IRRIGACIÓN	44
3.1.5 SUBROUTINAS COMPLEMENTARIAS.....	45
3.2. CREACIÓN DE NUEVOS COMPONENTES A TRAVÉS DE <i>MATLAB</i>	46
4 SIMULACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO	53
4.1 VARIABLES METEOROLÓGICAS	53
4.2 SIMULACIÓN SIN IRRIGACIÓN	55
4.3 SIMULACIÓN CON IRRIGACIÓN	57

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	63
5.1 TEMPERATURA DE OPERACIÓN	63
5.2 POTENCIA GENERADA DC	68
5.3 TASAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	72
5.4 BALANCE ENERGÉTICO.....	78
6. ENERGÍA PRODUCIDA POR EL PANEL FV	81
6.1 NUEVOS COMPONENTES EN TRNSYS	81
6.2 ENERGÍA CONSUMIDA POR EL SISTEMA DE RIEGO.....	83
6.3 RESULTADOS.....	83
6.4 ENERGÍA ADICIONAL PRODUCIDA PARA DIFERENTES REGÍMENES DE IRRIGACIÓN.....	85
7. CONCLUSIONES	91
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	97

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Componentes del sistema.....	40
Tabla 2. Parámetros del <i>Type155</i>	40
Tabla 3. Parámetros del <i>Type9a</i>	42
Tabla 4. Entradas del modelo desarrollado en <i>MATLAB</i>	47
Tabla 5. Salidas del modelo desarrollado en <i>MATLAB</i>	47
Tabla 6. Parámetros del modelo desarrollado en <i>MATLAB</i>	48
Tabla 7. Parámetros generales de <i>TRNSYS</i>	49
Tabla 8. Variación de temperatura debido a la irrigación.	65
Tabla 9. Cálculo de la constante de tiempo.	67
Tabla 10. Variación de la potencia generada debido a la irrigación.	70
Tabla 11. Variación de la transferencia de calor por radiación total debido a la irrigación.	75
Tabla 12. Variación de la transferencia de calor por convección total debido a la irrigación.	78
Tabla 13. Cuadro comparativo balance energético.....	80
Tabla 14. Descripción de entradas y salidas del <i>Type24</i>	82
Tabla 15. Comparación energía adicional generada para diferentes potencias de bomba.....	85
Tabla 16. Resultados del impacto de irrigación para para diferentes escenarios. .	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo térmico del panel FV	22
Figura 2. Convección natural.	24
Figura 3. Convección forzada	25
Figura 4. Transferencia de calor por radiación	26
Figura 5. Efecto fotovoltaico.....	33
Figura 6. Curva V-I de un panel FV con efecto de la temperatura.....	34
Figura 7. Modelo desarrollado en TRNSYS.....	39
Figura 8. Editor de funciones del Type14h.	44
Figura 9. Ventana de las variables del entorno.....	51
Figura 10. Editor de la variable del sistema " <i>Path</i> ".	52
Figura 11. Irradiación solar y temperatura ambiente simulada durante 7 días.	54
Figura 12. Temperatura de operación y potencia generada del panel FV sin irrigación.	56
Figura 13. Tasas de transferencia por radiación y convección del panel FV sin irrigación.	57
Figura 14. Temperatura de operación del panel FV con irrigación.	58
Figura 15. Potencia generada del panel FV con irrigación.	59
Figura 16. Transferencia de calor por radiación con irrigación.	60
Figura 17. Transferencia de calor por radiación frontal-1 en la pantalla de agua. .	60
Figura 18. Transferencia de calor por radiación frontal-2 en la pantalla de agua. .	61
Figura 19. Transferencia de calor por convección frontal en la partícula de agua. .	61
Figura 20. Transferencia de calor por convección con irrigación.	62
Figura 21. Comparación temperaturas de operación del panel FV.....	64
Figura 22. Decremento de la temperatura de operación con irrigación.	65
Figura 23. Estimación de la constante de tiempo.	66

Figura 24. Constante de tiempo de calentamiento.....	67
Figura 25. Constante de tiempo de enfriamiento.	68
Figura 26. Comparación potencia generada por el panel FV.....	69
Figura 27. Incremento de potencia generada.	70
Figura 28. Comportamiento de la potencia generada en el punto de irradiación máxima.	71
Figura 29. Porcentaje de incremento de potencia generada.	72
Figura 30. Comparación transferencias de calor por radiación frontal.....	73
Figura 31. Comparación transferencias de calor por radiación posterior.....	74
Figura 32. Comparación transferencia de calor por radiación total.....	74
Figura 33. Comparación transferencia de calor por convección frontal.	76
Figura 34. Comparación transferencia de calor por convección posterior.	77
Figura 35. Comparación transferencia de calor por convección total.	77
Figura 36. Balance energético del panel FV sin irrigación.	79
Figura 37. Balance energético del panel FV con irrigación.....	79
Figura 38. Modelo desarrollado para estimar la energía del panel FV.....	82
Figura 39. Potencia y energía consumida por el sistema de riego.....	83
Figura 40. Energía producida durante un día.	84
Figura 41. Energía adicional producida.	84
Figura 42. Temperatura de operación para diferentes regímenes de riego.	87
Figura 43. Potencia generada para diferentes regímenes de riego.	88
Figura 44. Energía generada para diferentes regímenes de riego.....	89
Figura 45. Energía adicional generada para diferentes regímenes de riego.	90

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. VENTANA DE CONFIGURACIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS Y LA RUTA DE ENLACE CON ARCHIVOS EXTERNOS.....	97
ANEXO B. INTERCONEXIÓN DE COMPONENTES.....	104
ANEXO C. ESTRUCTURA DEL SCRIPT DE <i>MATLAB</i>	110
ANEXO D. SCRIPT DE <i>MATLAB</i>	111

RESUMEN

Título: Estudio del Balance Térmico de los Paneles Fotovoltaicos Instalados en el Edificio de Ingeniería Eléctrica*.

Autores: Jaimes Ríos, Juan Sebastián y Cortés Adarme, Camilo Eduardo**

Palabras Claves: Balance térmico, paneles fotovoltaicos.

Descripción

La demanda energética mundial ha tenido un crecimiento acelerado en las últimas décadas, se prevé que entre 2018 y 2030 aumentará alrededor del 33%. Actualmente, la industria afronta el reto de reducir el impacto negativo de las energías tradicionales mientras se satisface la creciente demanda energética, y solo las fuentes renovables, como la energía solar, pueden ser la solución para el suministro de energía sostenible. Es por esto, que se realizó un estudio del balance térmico de los paneles fotovoltaicos debido a que su eficiencia se reduce entre 0,40% – 0,65% con el aumento de un 1 °C de su temperatura de operación y ésta puede alcanzar hasta los 80 °C en las zonas más áridas. En consecuencia, se han desarrollado algunos métodos de enfriamiento pasivos y activos para los paneles FV. Se caracterizó el proceso de irrigación y no irrigación por medio de una interfaz MATLAB - TRNSYS17 el cual nos permitió realizar las respectivas simulaciones de potencia generada, transferencia de calor por radiación y convección, temperatura de operación del panel FV. Se analizaron las simulaciones respectivas con el sistema de irrigación y sin el sistema de irrigación, estos resultados se compararon entre sí. Se evaluaron la ganancia energética, el delta de energía y el tiempo más adecuado de irrigación para que este sistema se utilice en el punto más benéfico..

* Proyecto de grado (modalidad, proyecto de investigación.)

** Facultad de Ingenierías Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto.

ABSTRACT

Title: Study of the Thermal Balance of the Photovoltaic Panels Installed in the Electrical Engineering Building*

Authors: Jaimes Ríos, Juan Sebastián and Cortés Adarme, Camilo Eduardo**

Keywords: Thermal balance, photovoltaic panels.

Description:

The world energy demand has had an accelerated growth in the last decades, it is foreseen that between 2018 and 2030 will increase around 33%. Currently, the industry faces the challenge of reducing the negative impact of traditional energies while satisfying the growing energy demand, and only renewable sources, such as solar energy, can be the solution for sustainable energy supply. This is why a study of the thermal balance of the photovoltaic panels was carried out because its efficiency is reduced between 0.40% - 0.65% with the increase of 1 ° C of its operating temperature and this can reach up to 80 ° C in the most arid areas. As a result, some passive and active cooling methods have been developed for PV panels. The process of irrigation and non-irrigation was characterized by MATLAB-TRNSYS17 interface which allowed us to perform the respective simulations of generated power, heat transfer by radiation and convection, operating temperature of the PV panel. The respective simulations were analyzed with the irrigation system and without the irrigation system, these results were compared with each other. The energy gain, the energy delta and the most adequate irrigation time were evaluated so that this system will be used at the most beneficial point.

* Degree project (modality, research project.)

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Advisers: Dr. German Alfonso Osma Pinto.

INTRODUCCIÓN

La demanda energética mundial ha tenido un crecimiento acelerado en las últimas décadas, se prevé que entre 2018 y 2030 aumentará alrededor del 33%¹. Actualmente, la industria afronta el reto de reducir el impacto negativo de las energías tradicionales mientras se satisface la creciente demanda energética, y solo las fuentes renovables, como la energía solar, pueden ser la solución para el suministro de energía sostenible².

La energía solar fotovoltaica es una de las energías renovables más utilizadas en edificaciones urbanas, especialmente en países tropicales³. Sin embargo, solo alrededor del 15%-20% de la irradiación solar es transformada en energía eléctrica por sistemas FV⁴. La eficiencia de los paneles FV depende tanto de sus características técnicas como de algunos factores como irradiación solar y temperatura de operación, entre otros⁵.

El estudio del comportamiento térmico de los paneles FV es importante debido a que su eficiencia se reduce entre 0,40% – 0,65% con el aumento de un 1 °C de su temperatura de operación y ésta puede alcanzar hasta los 80 °C en las zonas más

¹ AKBARZADEH A. y WADOWSKI T., "Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 16, no 1, pp. 81–87, 1996

² HASANUZZAMAN M., MALEK A. B. M. A., ISLAM M. M., PANDEY A. K., y RAHIM N. A., "Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review", *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 25–45, 2016

³ PINTO G. A. O. y Plata G. O., "Desarrollo sostenible en edificaciones", *Rev. Uis Ing.*, vol. 9, no 1, 2010.

⁴ HASANUZZAMAN M., MALEK A. B. M. A., ISLAM M. M., PANDEY A. K., y RAHIM N. A., *Op. Cit.*

⁵ HUSSEIN H. A., NUMAN A. H., y ABDULRAHMAN R. A., "Improving the Hybrid Photovoltaic/Thermal System Performance Using Water Cooling Technique and (Zn -H₂O) Nanofluid", *Int. J. Photoenergy*, vol. 2017, no 3, pp. 1–14, 2017

áridas^{6 7 8}. En consecuencia, se han desarrollado algunos métodos de enfriamiento pasivos y activos para los paneles FV. Los métodos pasivos no requieren de un consumo de energía adicional para operar, por ejemplo, la circulación natural del aire sobre y debajo del panel. Los métodos activos funcionan con ventiladores o bombas que utilizan aire o agua, respectivamente⁹.

La Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), y el grupo de investigación GISEL han desarrollado importantes avances y desea apropiarse la tecnología de enfriamiento en los paneles FV. Por tanto, se ha gestionado apoyo a COLCIENCIAS para obtener recursos y continuar la investigación.

Un sistema FV se ha instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander de aproximadamente 10 kW, consta de 37 paneles FV con potencia nominal entre 255 Wp y 270 Wp, de los cuales uno tiene un sistema de refrigeración de irrigación forzada.

Actualmente, el grupo de investigación GISEL lidera el proyecto de investigación titulado VIABILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (FV) INTEGRADOS CON VEGETACIÓN COMO ESTRATEGIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y HORTICULTURA EN ENTORNOS URBANOS DE CLIMA CÁLIDO TROPICAL (Aprobado en la Convocatoria 745 de 2016 de COLCIENCIAS), en compañía de los grupos de investigación GIEFIVET y GIEMA de las escuelas de Biología e Ingeniería Mecánica, respectivamente. Uno de los

⁶ VARMA R. K., MEMBER S., RAHMAN S. A., VANDERHEIDE T., y DANG M., “Harmonic Impact of a 20 MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network”, vol. 7707, no c, pp. 1–9, 2016

⁷ SHAN F., TANG F., CAO L., y FANG G., “Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors with different configurations”, Energy Convers. Manag., vol. 87, pp. 778–786, 2014

⁸ REDDY S. R., EBADIAN M. A., y LIN C. X., “A review of PV-T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling”, Int. J. Heat Mass Transf., vol. 91, pp. 861–871, 2015

⁹ HASANUZZAMAN M., MALEK A. B. M. A., ISLAM M. M., PANDEY A. K., y RAHIM N. A., Op. Cit.

alcances de este proyecto es estudiar el comportamiento térmico de los paneles FV instalados en la terraza superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS con el software *TRNSYS*.

Este trabajo de grado se desarrolló como apoyo al proyecto COLCIENCIAS mencionado y su objetivo principal es estimar el comportamiento térmico de los paneles FV ubicados en la terraza superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS a partir del modelado y simulación con el software *TRNSYS*. Para alcanzar este objetivo, se implementó un nuevo modelo RC desarrollado a partir de analogías termoeléctricas en el software de simulación *TRNSYS*¹⁰; se simuló el comportamiento de un panel FV con el sistema de riego activado y desactivado; se estimó las tasas de transferencia de calor por radiación y convección, potencia generada en DC y la temperatura de operación del panel FV; y se estimó la energía adicional producida por el sistema de riego a partir de la energía producida por el panel FV con y sin irrigación.

Este documento expone el trabajo desarrollado en seis capítulos. El Capítulo 1 aborda las consideraciones generales sobre energía solar FV, balance térmico y el modelo RC implementado en el software de simulación *TRNSYS*. El Capítulo 2 presenta el modelamiento del panel FV en el software de simulación *TRNSYS* y los componentes utilizados y creados que permitieron modelarlo, así como el enlace entre *MATLAB* y *TRNSYS* que permite desarrollar nuevos componentes.

El Capítulo 3 expone las variables climatológicas y los resultados obtenidos a partir de las simulaciones del panel FV con y sin irrigación. El Capítulo 4 presenta un análisis del comportamiento del panel FV con irrigación y sin irrigación, se cuantifica el incremento de la potencia generada en DC y el decremento de la temperatura de

¹⁰ OSMA PINTO G. A., “Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido”, Universidad Industrial de Santander, Tesis doctoral, 2016

operación, se estima el tiempo del transitorio durante el proceso de riego y muestra el balance de la energía útil del panel FV.

El Capítulo 5 presenta los resultados y el análisis de la energía adicional producida por el panel FV en diferentes regímenes de operación (tiempo de riego y caudal), la energía consumida por el sistema de riego y los componentes adicionales utilizados en *TRNSYS* para cumplir este objetivo. Por último, el Capítulo 6 presenta las conclusiones y las observaciones resultantes durante el desarrollo de este trabajo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar el comportamiento térmico de los paneles fotovoltaicos (FV) instalados en la terraza superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica a partir del modelado y simulaciones con el software TRNSYS.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el sistema fotovoltaico ubicado en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica a partir de la selección y creación de sub-rutinas en el software TRNSYS.
- Simular el comportamiento térmico de los paneles FV instalados en la terraza superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica para escenarios de irrigación y no irrigación.
- Estimar el perfil de comportamiento de la temperatura de operación, la potencia generada DC y las tasas de transferencia de calor por convección y radiación para un día.
- Estimar la energía consumida por el sistema de riego, la energía adicional ganada y la generación adicional total.

2. CONSIDERACIONES GENERALES

Este capítulo aborda los tópicos generales del trabajo realizado. Se presenta el modelo térmico del panel fotovoltaico (FV), el sistema solar fotovoltaico y, por último, el software de simulación utilizado para estudiar el comportamiento térmico del panel FV.

2.1 MODELO TÉRMICO DE UN PANEL FV

Los modelos térmicos simples de paneles FV asumen que el tiempo de medición de la potencia de salida es mayor que la respuesta térmica del mismo¹¹. En consecuencia, no puede ser utilizado en periodos cuando se encuentran fluctuaciones de la irradiación solar y la velocidad del viento en pequeños instantes de tiempo¹².

Un panel FV también puede ser modelado como una serie de resistencias y capacitancias¹³. Las resistencias representan la resistencia al flujo de calor que es dependiente del espesor y la conductividad térmica; y las capacitancias representan la capacidad del material de absorber y almacenar calor, y son dependientes de la densidad, calor específico, sección transversal y espesor¹⁴.

El modelo utilizado en este trabajo de grado fue desarrollado por Osma (Tesis Doctoral) ¹⁵ y se basa en un modelo RC, establecido a partir de analogías

¹¹ MOYA ARRUE C. H., "Modelamiento térmico unidimensional y transiente de un panel fotovoltaico", Tesis de pregrado, Universidad de Chile, 2016

¹² OSMA PINTO G. A., Op. Cit.

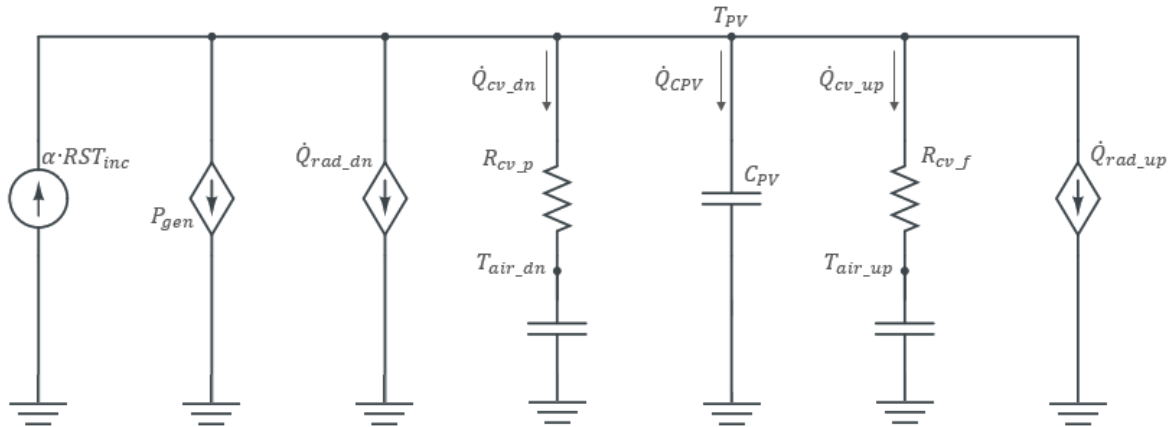
¹³ *Ibíd.*

¹⁴ MOYA ARRUE C. H., Op. Cit.

¹⁵ OSMA PINTO G. A., Op. Cit.

termoeléctricas, que permite predecir el comportamiento térmico del panel FV ante diversos escenarios y a cambios rápidos de irradiación y velocidad del viento. La Figura 1 muestra el modelo RC del panel FV.

Figura 1. Modelo térmico del panel FV



Fuente: OSMA PINTO G. A., “Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido”, Universidad Industrial de Santander, Tesis doctoral, 2016

Puntos de temperatura

Los nodos son representados como capacitancias térmicas y definen los puntos de la temperatura del panel (T_{pv}), temperatura del aire que está a varios centímetros sobre la superficie frontal del panel FV (T_{air_up}) y la temperatura del aire que está a varios centímetros sobre la superficie posterior del panel FV (T_{air_dn}). Al considerarse que el panel FV es un cuerpo muy delgado las temperaturas del aire en las superficies frontal y posterior se consideran iguales.

Transferencia de calor

La energía se puede transmitir mediante las interacciones de un sistema con su alrededor. Cuando existe un gradiente de temperatura, se presenta un transporte

de energía que se conoce como transferencia de calor. La termodinámica se encarga del estudio de la relación entre el calor y otras formas de energía, para introducir algunos conceptos sobre transferencia de calor es necesario comprender el Primer Principio de la Termodinámica o Principio de la conservación de energía que se representa en la expresión (1)^{16 17} .

$$Q = W + \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

Donde:

Q : Tasa de transferencia de calor absorbido por el sistema, W .

W : Tasa de transferencia de trabajo realizado por el sistema, W .

dE/dt : Variación del calor almacenado en el sistema, J .

Muchos de los análisis de transferencia de calor se realizan sin transferencia de trabajo¹⁸, por lo que la expresión (1) se puede simplificar como sigue:

$$Q = \frac{dE}{dT} = m * C_p * \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Donde:

m : masa del sistema, kg .

C_p : Calor específico del sistema, $J/kg K$.

dT/dt : Variación de temperatura por unidad de tiempo K/s .

¹⁶ KREITH F., MANGLIK R. M., y BOHN M. S., Principios de transferencia de calor, Séptima ed. 2013

¹⁷ INCROPERA F. P. y DEWITT D., Fundamentos de transferencia de calor, Cuarta ed. 1999

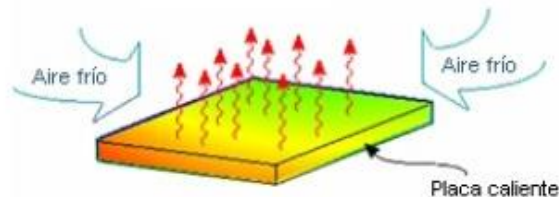
¹⁸ HINOJOSA J., "Simulación y análisis del sistema solar térmico de una vivienda energéticamente eficiente memoria", Universidad de Chile, 20011

Hay tres mecanismos físicos por los que se da la transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Pero, este modelo considera que no hay transferencia de calor por conducción al no haber otro cuerpo para analizar.

En la tasa de cambio de calor por convección, la energía se transfiere debido al movimiento molecular aleatorio (difusión) y debido al movimiento global o macroscópico del fluido; este último se conoce como campo de velocidades. Entre más rápido es el movimiento del fluido, más calor es transferido¹⁹. Se han establecido dos tipos de convección:

Convección libre o natural: No hay agitación mecánica externa y el fluido se mueve debido a las fuerzas causadas por sus diferentes densidades causadas por la variación de temperatura como se observa en la Figura 2.

Figura 2. Convección natural.

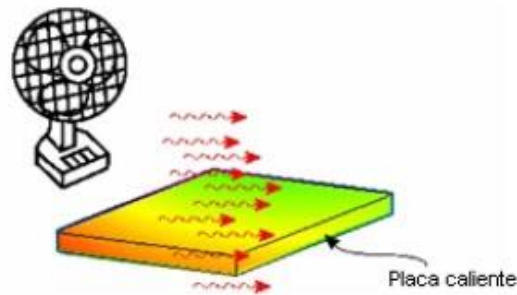


Fuente: ÇENGEL Y. A., Transferencia de calor y masa, Tercera ed. 2007

Convección forzada: El movimiento del fluido es complementado con alguna clase de agitación mecánica externa que lo obliga a moverse como se observa en la Figura 3.

¹⁹ ÇENGEL Y. A., Transferencia de calor y masa, Tercera ed. 2007

Figura 3. Convección forzada



Fuente: ÇENGEL Y. A., Transferencia de calor y masa, Tercera ed. 2007

En el modelo RC, la convección natural y forzada se modelaron igual y son representados como resistencias térmicas y se dividen en dos procesos de transferencia de calor por convección: entre el panel FV y el aire circundante, transferencia de calor por convección frontal (R_{cv_f}) y transferencia de calor por convección posterior (R_{cv_p}). Las expresiones (3) y (4) representan las tasas de transferencia por convección frontal y posterior, respectivamente.

$$\dot{Q}_{cv_f} = h_{cv_f} * A * (T_{PV} - T_{air_{up}}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{cv_p} = h_{cv_p} * A * (T_{PV} - T_{air_{dn}}) \quad (4)$$

Donde:

h_{cv_f} : Coeficiente de convección frontal, $W/m^2 * ^\circ C$.

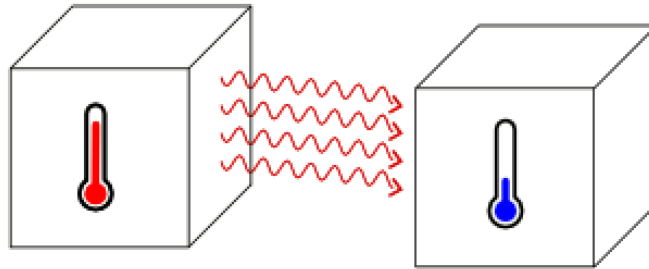
h_{cv_p} : Coeficiente de convección posterior, $W/m^2 * ^\circ C$.

A: Área del panel FV, m^2 .

La radiación es la energía emitida como ondas electromagnéticas. Aunque la mayoría de veces se estudia la radiación proveniente de cuerpos sólidos, también puede ser emitida por líquidos y gases. Este tipo de transferencia de calor se genera

a partir de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas que constituyen la materia del cuerpo que la emite, tal como se observa en la Figura 4²⁰.

Figura 4. Transferencia de calor por radiación



Fuente: FIGUEIRA G. y ANGEL H. J., "Climatología: Radiación, Balance energético. Temperatura", Books Abroad, vol. 19, no 3, p. 8, 1945

Este mecanismo de transferencia de calor no requiere de un medio para transportar el calor radiante desde la fuente hasta el receptor y puede transmitirse a través del vacío sin ser atenuado. De esta forma es como llega la energía solar a la Tierra²¹.

La cantidad de energía emitida desde un cuerpo en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie²².

En el modelado RC, la transferencia por radiación es representada como una fuente de corriente dependiente de la temperatura de la superficie del panel FV. Debido a la inclinación del panel FV, se consideran cuatro tasas de transferencia de calor por radiación definidas en dos fuentes de corriente dependiente, una para la transferencia de la superficie frontal y otra para la superficie posterior, tal como se muestran en las expresiones (5) y (6).

²⁰ FIGUEIRA G. y ANGEL H. J., "Climatología: Radiación, Balance energético. Temperatura", Books Abroad, vol. 19, no 3, p. 8, 1945

²¹ KERN D. Q., Procesos de Transferencia de Calor, Primera ed. 1999

²² HINOJOSA J., Op. Cit.

$$\dot{Q}_{rad_f} = \varepsilon_{pv_f} * A * \sigma * (f_{f_1} * (T_{PV}^4 - T_{amb}^4) + f_{f_2} * (T_{PV}^4 - T_{sky_mod}^4)) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{rad_p} = \varepsilon_{pv_p} * A * \sigma * (f_{p_2} * (T_{PV}^4 - T_{amb}^4) + f_{p_1} * (T_{PV}^4 - T_{sky_mod}^4)) \quad (6)$$

Donde:

ε_{pv_f} : Emitancia frontal del panel FV, adimensional.

ε_{pv_p} : Emitancia posterior del panel FV, adimensional.

A: Área del panel FV, m².

σ : Constante de Stefan Boltzmann, W/ m² * K⁴.

T_{amb} : Temperatura ambiente, °C.

T_{sky_mod} , es la temperatura del cielo ajustada debido a la nubosidad que afecta la radiación solar incidente. Mientras que f_{f_1} , f_{f_2} , f_{p_1} y f_{p_2} son factores de visibilidad de cada superficie del panel FV respecto del cielo y del techo.

$$T_{sky_mod} = (1 - \gamma) * 0.052 * T_{amb}^{\frac{3}{2}} + \gamma * T_{amb} \quad (7)$$

$$f_{f_1} = \frac{1}{2} * (1 + \cos(180 - \delta)) \quad (8)$$

$$f_{f_2} = \frac{1}{2} * (1 - \cos(180 - \delta)) \quad (9)$$

$$f_{p_1} = \frac{1}{2} * (1 + \cos(\delta)) \quad (10)$$

$$f_{p_2} = \frac{1}{2} * (1 - \cos(\delta)) \quad (11)$$

Donde:

γ : Coeficiente que representa el nivel de nubosidad del cielo.

δ : Ángulo de inclinación del panel FV.

Potencia generada

La potencia generada está en función de la irradiación solar incidente y la temperatura de operación del panel FV, por el cual se representa como una fuente de corriente dependiente como se muestra en la expresión (12).

$$P_{gen} = G_{in} * A * \text{Eta}_0 * (1 + b * (T_{PV} - 25)) \quad (12)$$

Donde:

G_{in} : Irradiación solar incidente, W/m^2 .

Eta_0 : Eficiencia del panel FV, %.

b : Coeficiente térmico del panel FV, %/K.

Temperatura del panel FV

La fuente de corriente independiente representa la irradiancia efectiva en el panel FV (G_{ineff}) 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_{in}) y el área del panel FV (A), tal como lo indican las expresiones (13) y (14).

$$G_{ineff} = \alpha * RST_{inc} \quad (13)$$

$$RST_{inc} = G_{in} * A \quad (14)$$

Al modelo RC se le aplica el análisis de nodos para obtener la variación del calor del panel FV como se ve en la expresión (15).

$$\dot{Q}_{Cpv} = G_{in_eff} - P_{gen} - \dot{Q}_{rad_f} - \dot{Q}_{rad_p} - \dot{Q}_{cv_p} - \dot{Q}_{cv_f} \quad (15)$$

Por último, se obtiene la expresión (16) que 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 .

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} + \frac{\Delta t}{C_p * A} * (G_{in_eff} - P_{gen} - \dot{Q}_{rad_f} - \dot{Q}_{rad_p} - \dot{Q}_{conv_p} - \dot{Q}_{conv_f}) \quad (16)$$

Donde:

C_p : Capacidad térmica del panel FV, $J/m^2 * K$.

Δt : Paso de tiempo, segundos.

Comportamiento térmico del agua de riego y de la cava

La película de agua durante el proceso de irrigación obstruye interacción de la superficie superior del panel con el entorno, eliminando la transferencia de calor por radiación y convección frontales. En consecuencia, la película de agua origina una transferencia de calor por radiación y convección frontales que son representados en las expresiones (17) y (18). A su vez, se produce una corriente o flujo de calor de enfriamiento hacia el panel FV como se indica en la expresión (19)²³.

$$\dot{Q}_{rad_{rgf}} = \varepsilon_{pvf_{rg}} * A * \sigma * (f_{f_1} * (T_{Agua_r}^4 - T_{amb}^4) + f_{f_2} * (T_{Agua_r}^4 - T_{sky_mod}^4)) \quad (17)$$

²³ OSMA PINTO G. A., Op. Cit.

$$\dot{Q}_{cv_rg_f} = h_{cv_rg_f} * A * (T_{Agua_r} - T_{air_{up}}) \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{enfriamiento} = \frac{T_{PV} - T_{Agua_r}}{Rrg} \quad (19)$$

Donde:

ε_{pv_rg} : Emitancia del agua, adimensional.

$h_{cv_rg_f}$: Coeficiente de convección en la película de agua, $W/m^2 * ^\circ C$.

T_{Agua_r} : Temperatura del agua de riego, $^\circ C$.

Rrg : Resistencia de riego, $W/^\circ C$.

La variación del calor del panel FV se ve afectada, por consiguiente, del análisis de nodos se obtiene la expresión (20). Y la temperatura de operación se representa en la expresión (21).

$$\dot{Q}_{Cpv} = G_{in_eff} - P_{gen} - \dot{Q}_{radf} - \dot{Q}_{radp} - \dot{Q}_{cvp} - \dot{Q}_{cvf} - \dot{Q}_{enfriamiento} \quad (20)$$

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} + \frac{\Delta t}{C_p * A} * (G_{ineffi} - P_{gen_i} - \dot{Q}_{radf_i} - \dot{Q}_{radp_i} - \dot{Q}_{cvp_i} - \dot{Q}_{cvf_i} - \dot{Q}_{enfriamiento_i}) \quad (21)$$

De igual forma al proceso de estimación de la expresión que define el comportamiento de la temperatura de operación del panel FV, la expresión (22) determina la temperatura del agua de riego para el instante i+1, en función de la temperatura del agua de riego y los flujos de calor en el instante i.

$$T_{Agua_r_{i+1}} = T_{Agua_r_i} + \frac{\Delta t}{C_{agua} * V_{rg}} * (\dot{Q}_{enfriamiento_i} - \dot{Q}_{radrgf_i} - \dot{Q}_{cvrgf_i} - \dot{Q}_{mezclado_i}) \quad (22)$$

Donde:

C_{agua} : Capacidad específica del agua, J/kg *K.

V_{rg} : Volumen de agua de riego, L/m.

$\dot{Q}_{mezclado_i}$: Corriente o flujo de calor de mezclado, W.

En la expresión (23), la variación de calor de la partícula de agua es afectada flujo de calor de mezclado de la cava que se define como:

$$\dot{Q}_{mezclado} = \frac{T_{Agua_r} - T_{Agua_c}}{Rrg} \quad (23)$$

Donde:

Rrg : Resistencia de mezclado, W/°C.

T_{Agua_c} : Temperatura del agua de la cava, °C.

La temperatura del agua de la cava se define para el instante i+1, en función de la temperatura del agua de la cava y los flujos de calor en el instante i, como se observa en la expresión (24).

$$T_{Agua_{c_{i+1}}} = T_{Agua_{c_i}} + \frac{\Delta t}{(V_{tq} - V_{rg}) * C_{agua}} * (\dot{Q}_{mezclado_i} - \dot{Q}_{thagtq_i} - \dot{Q}_{thpdtq_i}) \quad (24)$$

Donde:

V_{tq} : Volumen de agua de la cava, L/m.

\dot{Q}_{thagtq_i} y \dot{Q}_{thpdtq_i} , se definen como las tasas de transferencia de calor de la cava al entorno y se representan por las expresiones (25) y (26), respectivamente.

$$\dot{Q}_{th_{agtq}} = \frac{T_{Agua_c} - T_{Amb}}{km} \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{th_{agtq}} = i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots 60 \quad (26)$$

2.2 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

La energía solar FV es una de las fuentes de energía renovable, es decir, virtualmente infinita, amigable con el medio ambiente y que puede ser aprovechada en el mismo lugar en que se produce²⁴. Los sistemas solares FV son arreglos de módulo o paneles conformados por celdas fotovoltaicas a través de los cuales es posible obtener energía eléctrica a partir de la energía lumínica proveniente del sol²⁵.

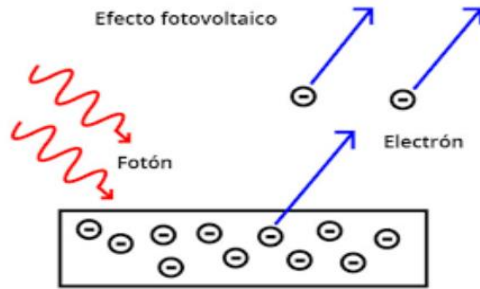
2.2.1 Celdas fotovoltaicas Las celdas fotovoltaicas son dispositivos capaces de transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores como se observa en la Figura 5²⁶.

²⁴ MÉNDEZ MUÑIZ J. M. y CUERVO GARCÍA R., Energía Solar Fotovoltaica, Cuarta edi. 2010

²⁵ REYES S., "Cálculo y selección de un colector solar y de un módulo fotovoltaico para uso doméstico, conforme a la norma mexicana NMX-ES-NORMEX-2005-energía solar- rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares", Instituto Politécnico Nacional, 2008

²⁶ SILVA MAGGI A. S., "Modelamiento Térmico De Un Panel Fotovoltaico Con Disipador De Calor Operando En El Norte De Chile", Universidad de Chile, 2013

Figura 5. Efecto fotovoltaico.



Estas celdas están conformadas por dispositivos tipo diodo fabricados con materiales semiconductores en los que artificialmente se crea un campo eléctrico constante (mediante una unión p-n) que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos²⁷.

2.2.2 Paneles solares fotovoltaicos (FV) Los paneles FV son los elementos principales de los sistemas solares fotovoltaicos, son arreglos de celdas fotovoltaicas conectadas en serie y paralelo para aumentar la tensión de salida continua hasta el valor deseado o conectadas en paralelo si se desea una corriente de salida específica²⁸.

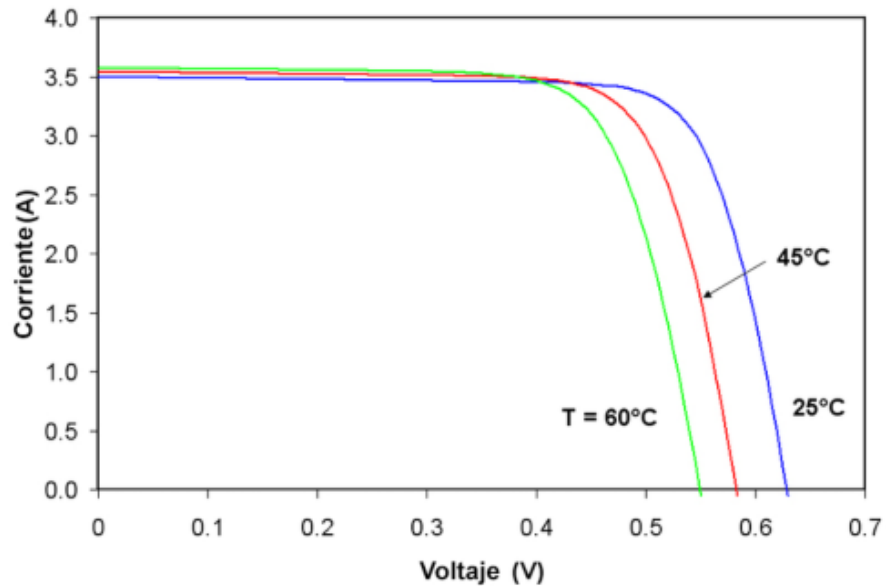
Influencia de la temperatura

La temperatura del panel FV afecta su rendimiento. En la Figura 6 se observan curvas corriente-voltaje del panel FV para diferentes temperaturas y como la potencia máxima aumenta al disminuir la temperatura.

²⁷ ITER-S.A, Instalación solar fotovoltaica, E38600 ed. Santa Cruz de Tenerife: Plígono Industrial de Granadilla, 2008

²⁸ SIMEC, "Proyecto Simec Chile SRL", proyecto energético Chile, 2010

Figura 6. Curva V-I de un panel FV con efecto de la temperatura.



Se han establecido algunos coeficientes térmicos (α , β , γ) mediante los cuales se puede cuantificar la variación de algunos parámetros de los paneles fotovoltaicos como el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de corto circuito (I_{sc}) y la potencia máxima (P_{mpp}) en función de la temperatura de la celda fotovoltaica²⁹.

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (27)$$

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (28)$$

$$\gamma = \frac{\partial P_{mpp}}{\partial T} \quad (29)$$

²⁹ SMITH R. M., JORDAN D. C., y KURTZ S. R., "Outdoor PV module degradation of current-voltage parameters", en World renewable energy forum, 2012, no May, pp. 1–9.

La relación entre la temperatura de la celda fotovoltaica y la potencia de salida está dada por la expresión (30).

$$P = P_{mpp} \left[1 + \frac{\gamma}{100} (T_{celda} - 25) \right] \quad (30)$$

Donde:

T_{celda} : Temperatura de la celda, °C.

γ : Coeficiente térmico de potencia, %/°C.

A partir de esta expresión se observa que mientras la temperatura de la celda sea más cerca a los 25 °C, mayor será a potencia nominal de salida.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE *TRNSYS*

(*TRaNsient SYstem Simulation*) fue desarrollado en el (*Solar Energy Laboratory*) por la University of Wisconsin-Madison (UW-Madison). Es un software a través del cual se pueden estudiar, analizar, diseñar y optimizar sistemas cuyo comportamiento varíe con el tiempo³⁰. Originalmente se desarrolló para modelar los procesos térmicos de los sistemas, sin embargo, en la actualidad entre su gran número de aplicaciones se encuentran³¹:

- Sistemas solares térmicos y fotovoltaicos
- Edificios de baja energía
- Sistemas HVAC

³⁰ ALVARADO FAJARDO A. C., “Análisis, diseño y simulación de sistema solar fotovoltaico para suministro eléctrico en apoyo a programa nutricional en la escuela rural el cardonal, Tibaná (Boyacá) – Colombia”, Magister en ingeniería con énfasis en energías alternativas, Universidad Libre, 2014

³¹ ROMERO RODRÍGUEZ L., “Análisis de la reducción de consumos energéticos en un edificio al integrar un sistema fotovoltaico y de micro-cogeneración mediante trnsys”, Universidad de Sevilla, 2014.

- Plantas biomasa, cogeneración y trigeneración
- Simulación de edificios
- Simulación de procesos de transferencia de calor con el suelo
- Sistemas de energía renovable como eólico e hidrógeno

Es un solucionador de ecuaciones algebraicas y diferenciales; posee una estructura modular en la que se pueden agregar cada uno de los componentes que hacen parte del sistema a estudiar. Cada uno de estos componentes se describen mediante subrutinas que en el programa son denominadas *TYPES*, de esta forma el análisis de los sistemas es abordado a partir de cada componente o sistemas individuales y la interconexión entre éstos³²

2.3.1 Interés de simular con TRNSYS Se caracteriza por tener una relativa facilidad de manejo. Para generar un proyecto en *TRNSYS*, se debe seguir un proceso intuitivo donde se conectan gráficamente los componentes del sistema (*Types*) por medio del interfaz visual *Simulation Studio*.

Los *Types* son descritos como modelos matemáticos en el lenguaje de programación Fortran y lleva asociado un Proforma en el *Simulation Studio*. Cada componente es visto como una caja negra a la que se le asignan entradas, salidas y parámetros. Las salidas de cada componente actúan como variables de entrada para otros componentes³³.

TRNSYS tiene una extensa librería estándar donde contiene gran parte de los componentes encontrados en los sistemas termoenergéticos. Incluye aproximadamente 150 modelos tales como aerogeneradores, colectores solares,

³² GABRIEL E. y LAZO C., "Diseño Y Simulación Del Comportamiento De Un Sistema Híbrido De Potencia", 2010

³³ LÓPEZ E., "Simulación mediante TRNSYS de un banco de ensayos de colectores solares térmicos. Implementación de nuevos componentes", Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena, 2009

procesadores de datos meteorológicos, entre otros³⁴. No obstante, una de las principales ventajas de este software es que le permite al usuario crear e implementar nuevas subrutinas y modelos, extendiendo las aplicaciones del programa a sus propias necesidades.

2.3.2 Limitaciones en los componentes estándar Los componentes sobre paneles FV de la librería estándar de *TRNSYS* presentan algunas limitaciones:

- No estudia modelos térmicos que resultan de interés en este proyecto, ya que existen varios componentes que modelan el comportamiento eléctrico del panel FV, pero no su comportamiento térmico.
- Los controladores son limitados, no permiten generar varios intervalos de tiempo que permiten controlar el sistema de riego durante un día de simulación.
- Se hace necesario implementar un nuevo componente que permita estudiar el comportamiento térmico del panel FV y generar pulsos en múltiples intervalos de tiempo.

2.3.3 Nuevos componentes *TRNSYS* permite crear y/o modificar componentes a través de *FORTRAN (FORmula TRANslating System)*³⁵. *FORTRAN* es un lenguaje de programación desarrollado en los años 50 por International Business Machines, Corporación IBM. Este lenguaje de programación está orientado al cálculo numérico, aplicaciones científicas y de ingeniería³⁶.

También es posible crear un componente a través del software *MATLAB (MATriz LABoratory)*, que posteriormente es leído desde la plataforma de *TRNSYS* por el **Type155**³⁷. *MATLAB* es un lenguaje de programación de alto rendimiento para

³⁴ ROMERO RODRÍGUEZ L., Op. Cit.

³⁵ KLEIN S. A., "Volume 1 Getting Started", Trnsys 16, vol. 1, pp. 1–87, 2007

³⁶ NAVARRINA F., COLOMINAS I., GÓMEZ H., PARÍS J., y CASTELEIRO M., "Lenguaje Fortran: Origen Y Evolución", GMNI Grup. métodos numéricos en Ing

³⁷ KLEIN S. A., Op. Cit.

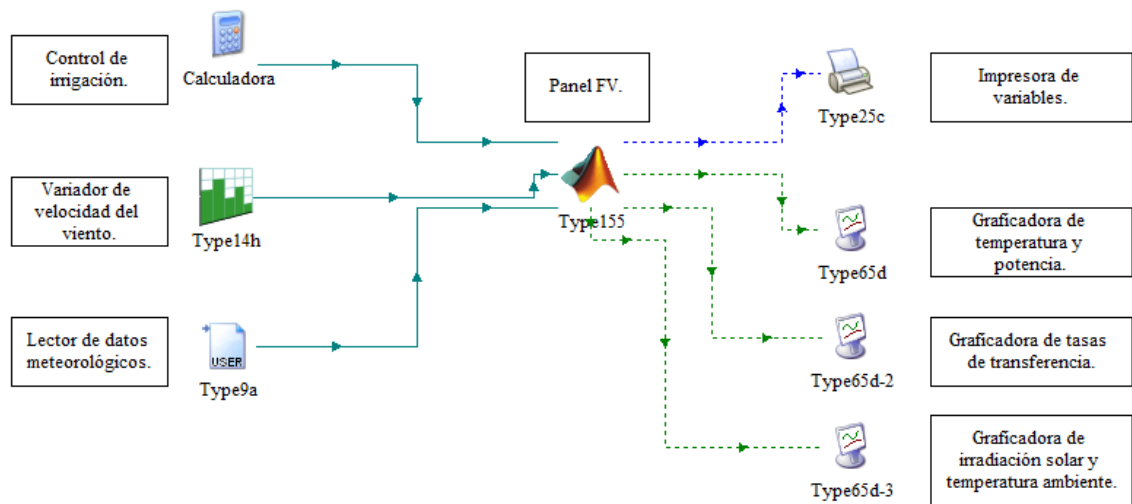
cálculos técnicos que permite crear funciones propias y programas especiales, conocidos como M-archivos³⁸.

³⁸ ARIZMENDI A. M., "Manual básico de Matlab", p. 52, Servicios Informáticos U.C.M, Apoyo a Investigación y Docencia, 2010

3. MODELAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para estudiar el balance térmico de un panel FV instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica se lleva a cabo el montaje de un panel FV en el programa de simulación *TRNSYS*. Este capítulo describe algunos aspectos generales de las subrutinas seleccionadas que modelan cada uno de los componentes a simular y la creación de nuevos componentes a través de *MATLAB* y llamadas en *TRNSYS*. La Figura 7 muestra el diagrama que representa todos los componentes del sistema a simular.

Figura 7. Modelo desarrollado en TRNSYS.



3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA

La Tabla 1 proporciona una vista general de los componentes utilizados en este trabajo de grado.

Tabla 1. Componentes del sistema.

Subrutina	Componente
Type155	Panel fotovoltaico
Type9a	Lector de datos meteorológicos
Type14h	Variador de velocidad del viento
Eqa	Control de irrigación
Type25c	Impresora de variables
Type65d	Graficadora de variables

Las subrutinas están compuestas por una serie de parámetros esenciales para su funcionamiento, su configuración adicional se encuentra en el Anexo A.

3.1.1 Panel fotovoltaico El panel FV es representado por el **Type155**, que implementa un enlace permitiendo comunicarse con el motor de *MATLAB* a través de la interfaz Component Object Model (COM)³⁹, plataforma diseñada por Microsoft para componentes de software permitiendo la comunicación entre procesos y la creación dinámica de objetos en diferentes lenguajes de programación⁴⁰. Esta subrutina se encuentra ubicada dentro de la carpeta *Utility→Calling External Programs→MATLAB*. Sus parámetros son descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del Type155.

Número	Parámetro	Función	Valor asignado
1	Modo	Es un parámetro en blanco. Está reservado para usos futuros.	0
2	Número de entradas	Número de entradas que requiere el script de MATLAB.	5
3	Número de salidas	Número de salidas definidas en el script de MATLAB.	17

³⁹ KLEIN S. A. y BECKMAN W. A., "Volume 5 Mathematical Reference", Trnsys 16, vol. 5, p. 389 to 396, 2007

⁴⁰ MICROSOFT DEVELOPER NETWORK, "Component Object Model", MSDN Library, 1993. [En línea]. Disponible en: <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/aa286559.aspx>

Número	Parámetro	Función	Valor asignado
4	Modo de llamada	Describe el comportamiento iterativo, sus valores pueden ser: 0: Componente iterativo estándar. En este caso INFO(9) = 1. 10: Componente no iterativo la final de cada calculo. En este caso INFO(9) = 2.	0
5	Mantener abierto MATLAB al finalizar la simulación	0: Cerrar MATLAB al finalizar la simulación. 1: Mantener abierto MATLAB al finalizar la simulación.	1

Al **Type155** se le conecta un lector y procesador de datos meteorológicos, que se encargue de interpolar la radiación solar incidente sobre el panel, velocidad del viento y temperatura ambiente.

3.1.2 Lector de datos meteorológicos TRNSYS tiene una lista amplia de componentes que leen archivos de datos meteorológicos para diferentes formatos como Energy Plus Weather (EPW), Typical Meteorological Year (TMY), International Weather For Energy Calculations (IWEC), entre otros⁴¹.

Debido al paso de tiempo que requiere la simulación, el algoritmo de interpolación no genera los datos de forma satisfactoria, haciendo que existan cambios bruscos cada hora y, por lo tanto, irregularidades en la simulación. Para mitigar este problema, se utilizó el **Type9a** que permite leer datos en intervalos de tiempo regulares desde un archivo externo y ponerlos a disposición de otras subrutinas de TRNSYS.

⁴¹ SOLAR ENERGY LABORATORY, "Volume 9 Weather Data", Sol. Energy Lab., vol. 9, 2006

El **Type9a** funciona interpolando linealmente, según el paso de tiempo de simulación, los valores que se adjuntaron en formato de datos o texto. Esta subrutina se encuentra ubicada dentro de la carpeta *Utility→Data Readers→Generic Data Files→First Line is Simulation Start→Free Format*. La Tabla 3 describe los parámetros de este *Type*.

Tabla 3. Parámetros del Type9a.

Número	Parámetro	Función	Valor asignado
1	Modo	Establece el modo del lector de datos. Varía entre 1 a 6.	6
2	Líneas del encabezado para saltar.	Indica el número de líneas del encabezado que debe omitir del documento de datos, por ejemplo nombres de variables o unidades.	0
3	Número de variables a leer.	Indica el número de columnas que leerá el Type9a.	13
4	Intervalo de tiempo del archivo de datos.	Es el intervalo de tiempo en el que están registrados los datos.	1
5	Interpolar o no.	Este parámetro se repetirá dependiendo del número de variables a leer. Su valor puede ser (1) si se desea interpolar o (-1) si no se desea interpolar.	1
6	Factor de multiplicación.	Este parámetro se repetirá dependiendo del número de variables a leer. Es una constante que multiplica las variables de la columna.	1
7	Factor de suma.	Este parámetro se repetirá dependiendo del número de variables a leer. Es una constante que suma las variables de la columna.	0
8	Valor promedio o instantáneo.	Este parámetro se repetirá dependiendo del número de variables a leer. Su valor puede ser (0) si se	1

Número	Parámetro	Función	Valor asignado
		desea que la variable de salida sea el promedio o (1) si se desea que la variable de salida sea la instantánea.	

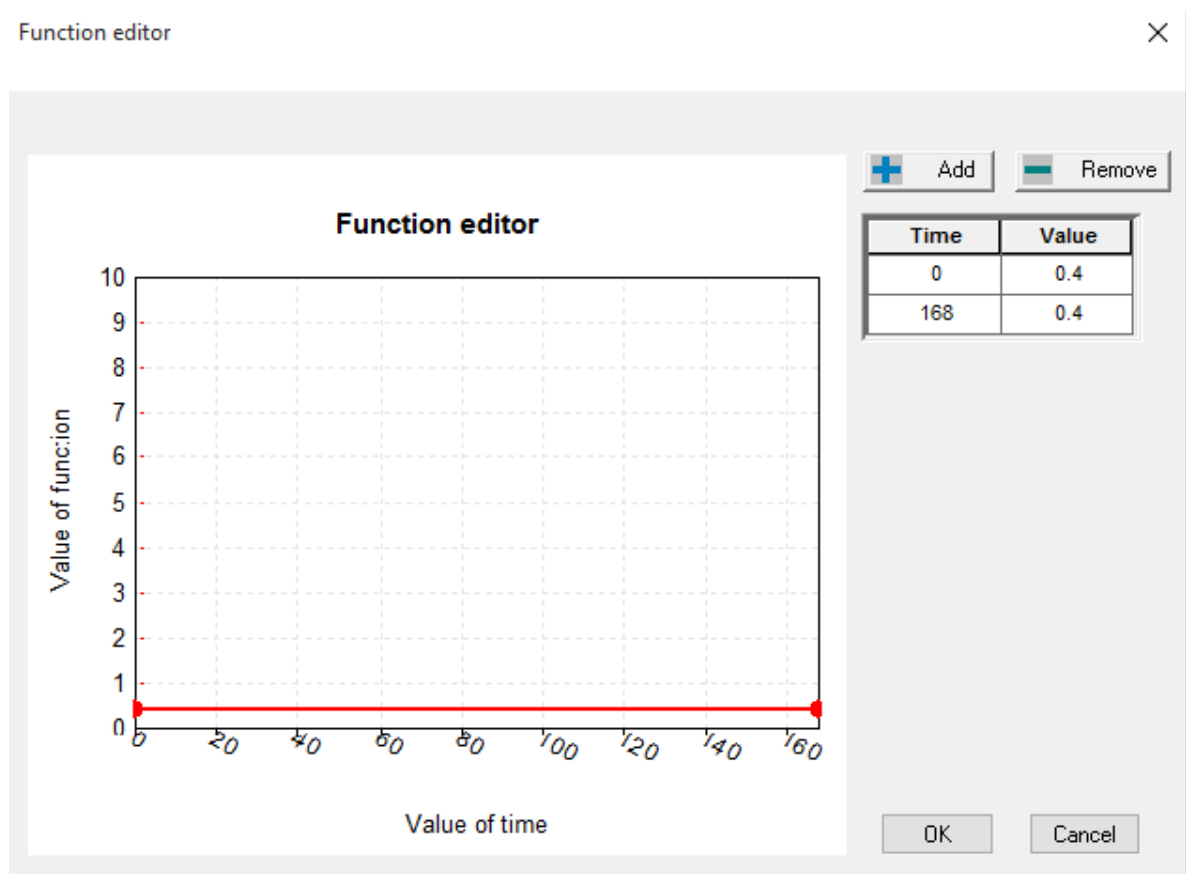
3.1.3 Variador de velocidad del viento El **Type14h** crea una función dependiente del tiempo, permitiendo simular cuando se desee una velocidad del viento determinada. Utiliza unidades adimensionales para que se pueda utilizar de manera genérica⁴². Éste se encuentra ubicado dentro de la carpeta *Utility→Forcing Functions→General*.

La cantidad de intervalos dentro del Type14h es limitada a 20 conjuntos de puntos de la forma (x,y)⁴³. La función forzada es creada gráficamente como se observa en la Figura 8.

⁴² ALVARADO FAJARDO A. C., Op. Cit.

⁴³ KLEIN S. A. y BECKMAN W. A., Op. Cit.

Figura 8. Editor de funciones del Type14h.



3.1.4 Control de irrigación El control de irrigación es implementado por la *Calculadora*. Esta subrutina es muy útil para realizar operaciones algebraicas y crear funciones para el procesamiento de variables⁴⁴. En este trabajo de grado se consideraron dos funciones, una permite tener un registro del número de la iteración en tiempo real y la otra es una constante condicional. Este componente se encuentra ubicado en *Assembly* → *Insert new Equation*.

⁴⁴ Ibíd.

Control_1

Esta salida se utiliza para crear un contador de pasos de tiempo respecto al tiempo real mientras la simulación está corriendo, es decir, convierte el tiempo real de la simulación en un número entero que representa el total de pasos de tiempo hasta el momento como se muestra en la expresión (31).

$$control_1 = \frac{TIME}{STEP} \quad (31)$$

Donde

TIME: Tiempo real de la simulación en horas [h].

STEP: Paso de tiempo de la simulación en horas [h].

Irrigación

Es una constante que se utiliza como señal para diferenciar si el proceso a simular es con irrigación o sin irrigación. Su valor puede ser (1) cuando es irrigado el panel FV o (0) cuando no es irrigado el panel FV.

3.1.5 Subrutinas complementarias Se implementaron dos subrutinas que cumplen con la función de ver en tiempo real la tendencia de los componentes de interés y extraer estos resultados.

Type65d

Es un componente gráfico en línea que permite observar de forma inmediata las variables que son de interés mientras la simulación está en progreso⁴⁵ ⁴⁶. Se encuentra ubicado en la carpeta *Output* → *Online Plotter* → *Online Plotter Without File*.

Type25c

Es una impresora que permite almacenar de manera sencilla todas las variables de interés en intervalos de tiempo específicos⁴⁷. Los datos son guardados en un archivo de texto que es creado automáticamente y se encuentra ubicado en la carpeta del proyecto. Este componente se encuentra ubicado en la carpeta *Output* → *Printer* → *Unformatted* → *No Units*.

El Anexo B presenta la interconexión realizada los componentes seleccionados en este capítulo.

3.2. CREACIÓN DE NUEVOS COMPONENTES A TRAVÉS DE *MATLAB*

El componente creado en *MATLAB* está desarrollado a partir del modelo RC de una Tesis Doctoral⁴⁸, que permite estudiar el comportamiento cuando es irrigado y cuando no es irrigado y, adicionalmente, controlar los intervalos de tiempo de riego.

Las entradas, salidas y parámetros del componente diseñado en *MATLAB* son definidos en las tablas 4, 5 y 6.

⁴⁵ LÓPEZ E., Op. Cit.

⁴⁶ KLEIN S. A. y BECKMAN W. A., Op. Cit.

⁴⁷ *Ibíd.*

⁴⁸ OSMA PINTO G. A., Op. Cit.

Tabla 4. Entradas del modelo desarrollado en *MATLAB*.

Entrada	Número de entrada	Variable de <i>MATLAB</i>
Temperatura ambiente	trnInputs(1)	Tamb
Irradiación solar	trnInputs(2)	Gin
Velocidad del viento	trnInputs(3)	Vel
Control del tiempo de riego	trnInputs(4)	control_1
Índice de irrigación	trnInputs(5)	Irrigación

Tabla 5. Salidas del modelo desarrollado en *MATLAB*.

Salida	Número de salida	Variable de <i>MATLAB</i>
Temperatura ambiente	trnOutputs(1)	Tamb
Temperatura de operación del panel FV	trnOutputs(2)	Tpanel
Potencia generada del panel FV	trnOutputs(3)	Pgen
Transferencia de calor por radiación frontal 1	trnOutputs(4)	Qrad_f1
Transferencia de calor por radiación frontal 2	trnOutputs(5)	Qrad_f2
Transferencia de calor por radiación posterior 1	trnOutputs(6)	Qrad_p1
Transferencia de calor por radiación posterior 2	trnOutputs(7)	Qrad_p2
Transferencia de calor por convección frontal	trnOutputs(8)	Qconv_f
Transferencia de calor por convección posterior	trnOutputs(9)	Qconv_p
Temperatura del agua de riego	trnOutputs(10)	TaPgua_r
Temperatura del agua de la cava	trnOutputs(11)	Tagua_c
Transferencia de calor de la cava al entorno	trnOutputs(12)	Qth_pdtq
Transferencia de calor por radiación frontal 1 –Película de agua	trnOutputs(13)	Q_Rad_rg_f1
Transferencia de calor por radiación frontal 2 –Película de agua	trnOutputs(14)	Q_rad_rg_f2
Transferencia de calor por convección –Película de agua	trnOutputs(15)	Q_conv_rg

Salida	Número de salida	Variable de <i>MATLAB</i>
Irradiación solar	trnOutputs(16)	Gin
Velocidad del viento	trnOutputs(17)	Vel
Potencia del sistema de riego	trnOutputs(18)	Pot_riego

Tabla 6. Parámetros del modelo desarrollado en *MATLAB*.

Parámetro	Nombre en <i>MATLAB</i>	Valor
Potencia nominal	Pnom	250
Área del panel FV	A	1.6
Eficiencia del panel FV	eta0	15.625%
Coeficiente térmico	B	-0.0043
Coeficiente de transmitancia	A	0.9
Capacidad térmica	Cp	10140
Constante de Stefan-Boltzmann	Sigma	5.67×10^{-8}
Emitancia frontal	Epv_f	0.9
Emitancia posterior	Epv_p	0.85
Ángulo de inclinación	Angle	10
Factor de visibilidad frontal 1	Ff_1	0.0076
Factor de visibilidad frontal 2	Ff_2	0.9924
Factor de visibilidad posterior 1	Fp_1	0.9924
Factor de visibilidad posterior 2	Fp_2	0.0076
Irradiancia máxima	Gext	1278
Resistencia de riego	Rrg	0.00285
Emitancia del agua	Epv_a	0.9
Resistencia de mezclado	Rmz	5.7×10^{-4}
Volumen de agua de riego	Vrg	4.5
Capacidad específica	Cagua	4180
Capacidad térmica	Crg	18810
Coeficiente de enfriamiento dentro de la cava	km_c	3.5
Resistencia de enfriamiento	km_r	0.285714

MATLAB recibe tanto las entradas determinadas por el usuario, denominadas *trnInputs*, como otra información general sobre la simulación⁴⁹ que son explicados en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros generales de *TRNSYS*.

Nombre	Descripción
trnInfo	Una copia de la matriz INFO. Existen 15 INFO que se explican en ⁵⁰ .
trnTime	Tiempo real de la simulación.
trnStartTime	Tiempo de inicio de la simulación.
trnStopTime	Tiempo de parada de la simulación.
trnTimeStep	Paso de tiempo de la simulación.
mFileErrorCode	Es un valor asignado por el usuario al crear el Script y que va aumentando a lo largo de éste. Permite que <i>TRNSYS</i> identifique y señale la ubicación de un error en el Script de <i>MATLAB</i> . Su valor inicial es 1 y debe ser cero al final de la simulación para indicar que la llamada de <i>MATLAB</i> fue exitosa. Cualquier valor distinto de cero detendrá la simulación.
trnInputs(N ^o I)	Son las entradas asignadas en el Script de <i>MATLAB</i> . El número de entradas debe concordar con el parámetro del Type155.
trnOutputs(N ^o O)	Son las salidas asignadas en el Script de <i>MATLAB</i> . El número de salidas debe concordar con el parámetro del Type155.

La estructura del Script de *MATLAB* se explica a través del diagrama de flujo que se encuentra en el Anexo digital C.

Enlace *MATLAB* – *TRNSYS*

Es fundamental tener en cuenta los requerimientos de *TRNSYS* y configurar el enlace entre éste y *MATLAB*. *TRNSYS* 17 solo admite las siguientes versiones de

⁴⁹ *TRNSYS*, “Volume 8 Programmer’s Guide”, *TRNSYS* 16 a *TRaNsient Syst. Simul. Progr.*, vol. 8, 2007

⁵⁰ *Ibíd.*

32-bit de *MATLAB*: 2006, 2007, 2008, 2009a, 2009b, 2010a, 2010b, 2011a, 2011b, 2012a, 2012b, 2013a y 2014a⁵¹.

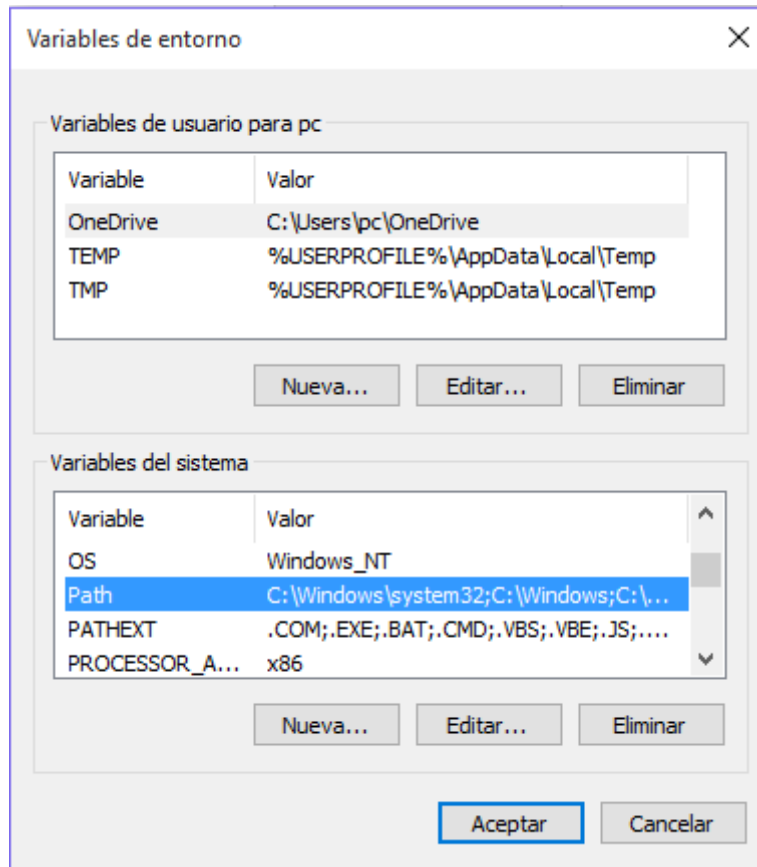
Cada vez que *MATLAB* se actualiza, *TRNSYS* necesita volver a compilar y vincular el archivo **Type155.dll** con las últimas bibliotecas de *MATLAB*. Si no se ejecuta el *Calling MATLAB*, es posible que se tenga una versión de **Type155.dll** que no corresponda con la versión de *MATLAB*.

Para poder solucionar este problema, las DLL compatibles con otras versiones de *MATLAB* se encuentran en `\Trnsys 17 \ Exe \ DLLs`, Después de encontrar la DLL compatible con su versión de *MATLAB*, se copia y pega en la ubicación `\Trnsys 17 \ Exe`.

Por último, se debe agregar la carpeta carpeta **win32** de *MATLAB* en el Windows Search Path. Para hacerlo, primero se debe ingresar a *Panel de control* → *Sistema* → *Configuración avanzada del sistema* → *Variables de entorno* y aparecerá la ventana de la Figura 9.

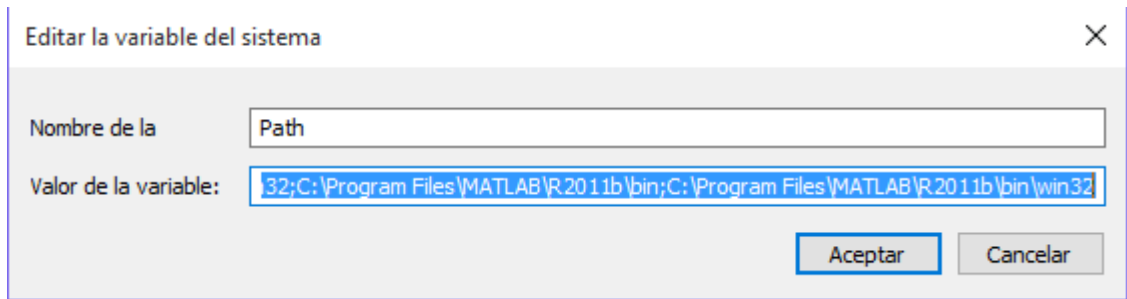
⁵¹ KLEIN S. A. y BECKMAN W. A., Op. Cit.

Figura 9. Ventana de las variables del entorno.



Dentro de la ventana *Variables de entorno* se encuentra la lista de variables del sistema, en esa lista se busca la variable **Path** y se presiona la opción *Editar*. La ventana resultante se observa en la Figura 10. Se agrega un nuevo valor de la variable que será la ruta completa de la carpeta **win32** de *MATLAB*. En este caso se agregó “C:\Program Files\MATLAB\R2011b\bin\win32”.

Figura 10. Editor de la variable del sistema "Path".



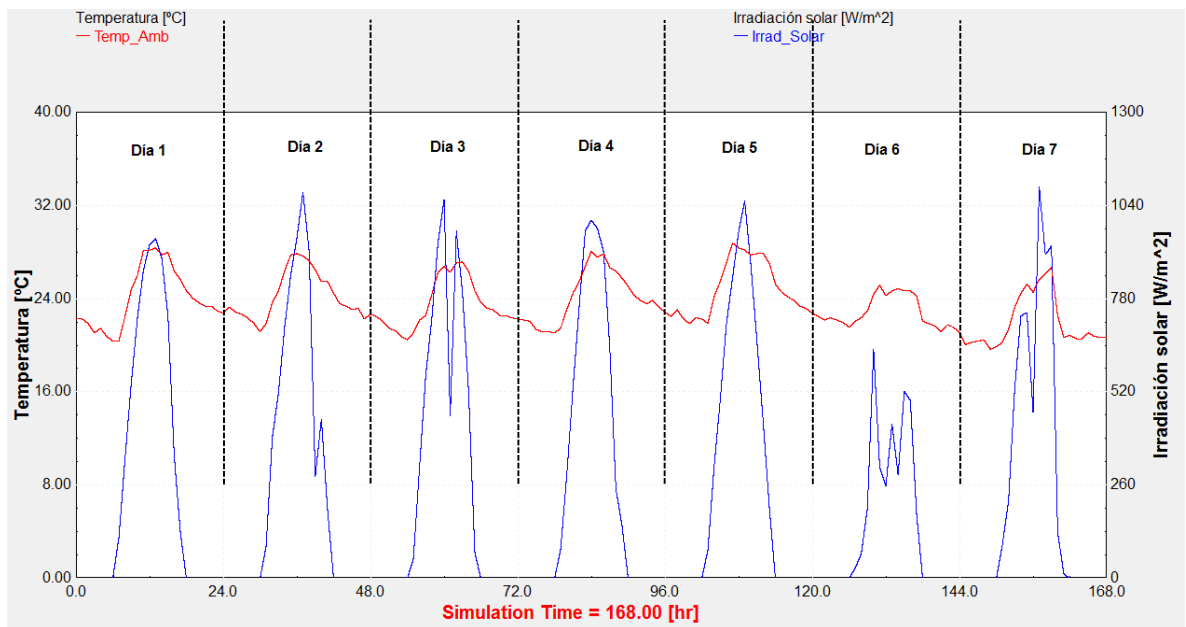
4 SIMULACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Después de obtener todos los componentes que modelan el panel FV estudiado en este trabajo de grado (Capítulo 2), se procede a simular su comportamiento. Este capítulo contiene el registro de las variables meteorológicas utilizadas y las simulaciones del panel FV para los escenarios de interés, sin irrigación y con irrigación.

4.1 VARIABLES METEOROLÓGICAS

El comportamiento de las variables de entrada se presenta en la Figura 11. El eje izquierdo corresponde a la curva de temperatura ambiente (de color rojo) y el eje derecho corresponde a la curva de irradiación solar (de color azul). El proceso desarrollado en esta sección, permite validar el funcionamiento y enlace del *Script* en *MATLAB* y la plataforma en *TRNSYS*.

Figura 11. Irradiación solar y temperatura ambiente simulada durante 7 días.



De la gráfica anterior se tiene que:

- El primer y cuarto día presentan las mejores condiciones de irradiación solar al tener una curva estable y sin cambios bruscos, sus valores máximos son 950 W/m^2 y 1000 W/m^2 , respectivamente.
- Los días 3, 6 y 7 presentan bajas condiciones de irradiación solar al tener un alto nivel de nubosidad.
- La temperatura tiene la misma tendencia todos los días y los índices más bajos de temperaturas se dieron el día 3 y 6.

El día 1 posee una curva de irradiación solar sin perturbaciones, es decir, con bajos niveles de nubosidad. Por este motivo, se decidió simular durante el día 1.

4.2 SIMULACIÓN SIN IRRIGACIÓN

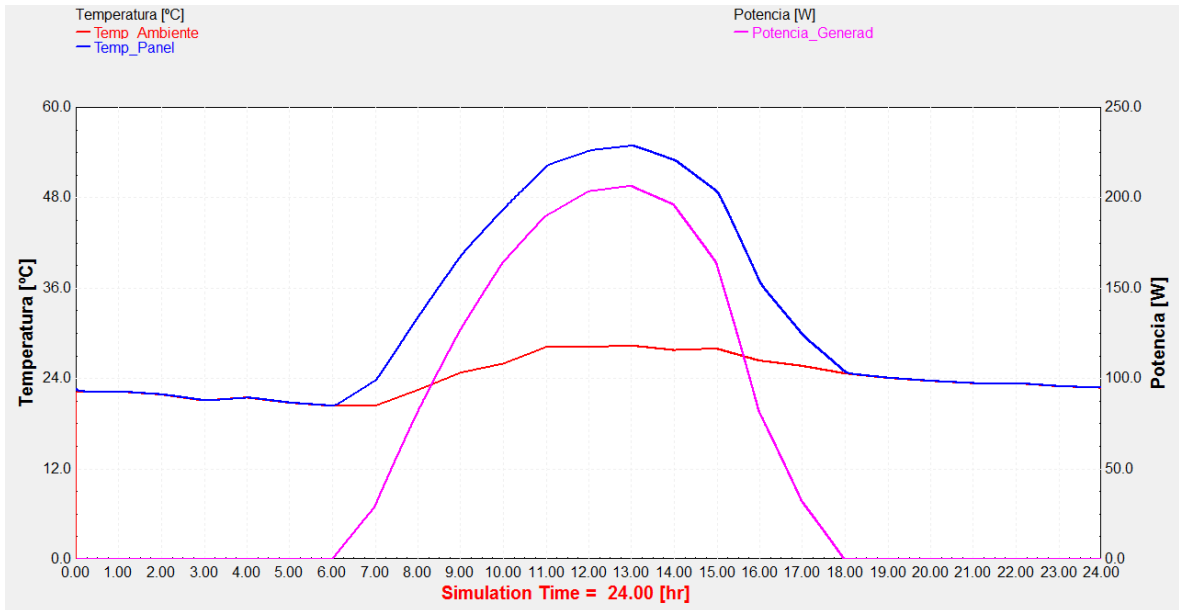
Antes de realizar el proceso de simulación sin irrigación, es necesario configurar los parámetros de simulación. En este escenario, se considera un paso de tiempo máximo de 10 segundos⁵² y el indicador de irrigación, ubicado en la **Calculadora**, se deja en cero. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Temperatura de operación del panel FV y potencia generada.

La Figura 12 muestra el comportamiento de la temperatura de operación del panel FV y la potencia generada a la salida del mismo sin irrigación. La curva de color rojo corresponde a la temperatura ambiente (*Temp_Ambiente*), la curva de color azul corresponde a la temperatura de operación del panel FV (*Temp_Panel*) y la curva de color rosado corresponde a la potencia generada DC (*Potencia_Generad*). Las temperaturas están representadas en el eje izquierdo y sus unidades son *Celsius* °C; la potencia generada DC está representada en el eje derecho y sus unidades son *Watts W*.

⁵² OSMA PINTO G. A., Op. Cit.

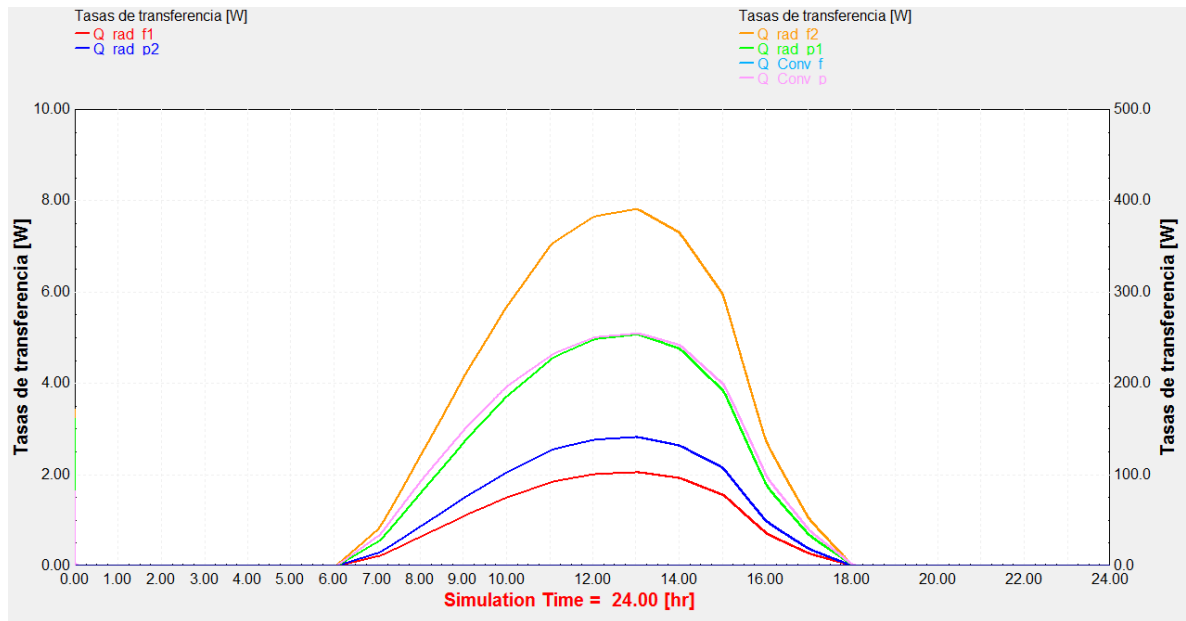
Figura 12. Temperatura de operación y potencia generada del panel FV sin irrigación.



Tasas de transferencia por radiación y convección

La Figura 13 muestra las tasas de transferencia de calor por radiación y convección a lo largo del día sin irrigación. El eje izquierdo muestra las tasas de transferencia por radiación frontal 1 (Q_{Rad_f1}) y posterior 2 (Q_{rad_p2}), y son representados en las curvas de color rojo y azul, respectivamente. Por otro lado, las curvas en color naranja, verde, celeste y rosado corresponden las tasas de transferencia de calor por radiación frontal 2 (Q_{Rad_f2}), radiación posterior 1 (Q_{rad_p1}), convección frontal (Q_{conv_f}) y convección posterior (Q_{conv_p}) respectivamente, y corresponden al eje derecho. Los valores de estas tasas de transferencia son iguales, en consecuencia, solo se observa la gráfica de la tasa de transferencia por convección posterior.

Figura 13. Tasas de transferencia por radiación y convección del panel FV sin irrigación.



4.3 SIMULACIÓN CON IRRIGACIÓN

Durante la simulación del panel FV con irrigación, se realizaron 13 procesos de riego de 1 minuto de duración por cada 30 minutos, desde las 10 a.m. hasta las 4:30 p.m. Se consideró un paso de tiempo máximo de 1 segundo⁵³. Adicionalmente, el indicador de irrigación se cambió a 1, como se explicó en el Capítulo 2. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

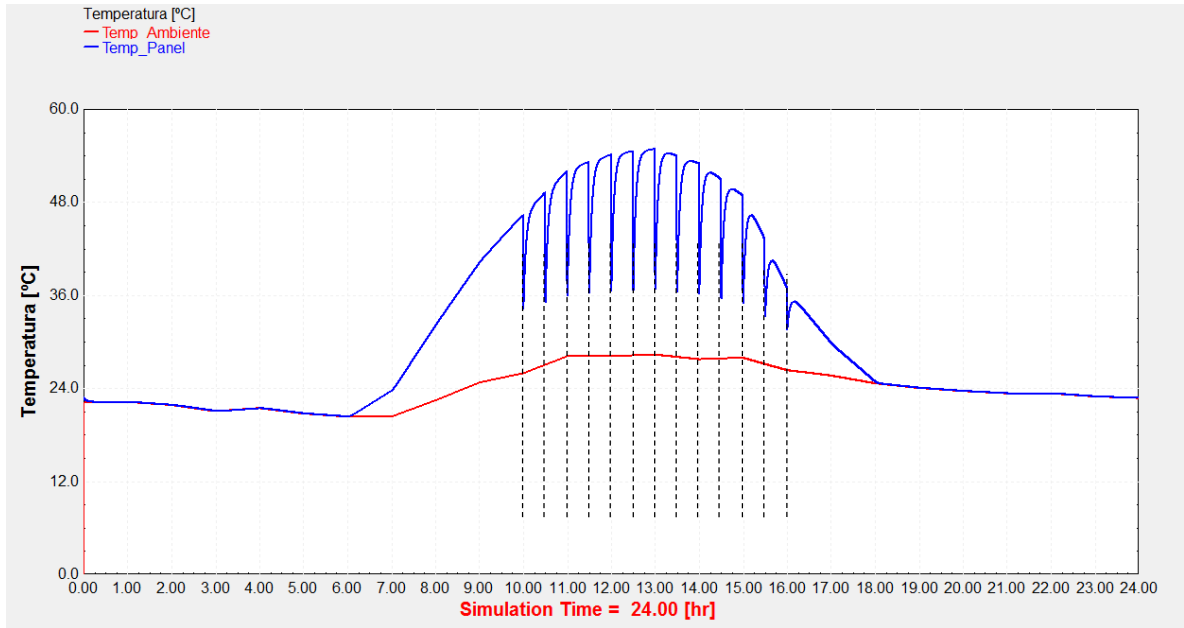
Temperatura de operación del panel FV y potencia generada

La Figura 14 muestra el comportamiento de la temperatura de operación del panel FV al ser afectada por la irrigación; la curva de color rojo corresponde a la

⁵³ Ibíd.

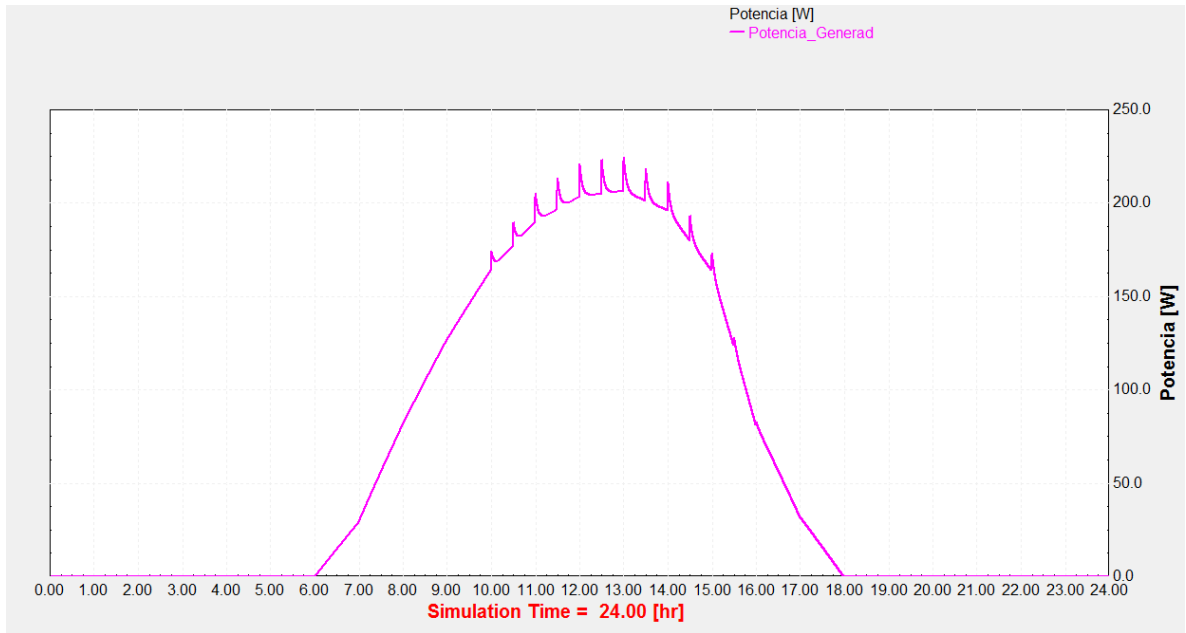
temperatura ambiente ($Temp_Ambiente$) y la curva de color azul corresponde a la temperatura de operación del panel FV ($Temp_Panel$).

Figura 14. Temperatura de operación del panel FV con irrigación.



Como consecuencia, la potencia generada también se ve afectada en las horas que se activa el sistema de riego, tal como se observa en la Figura 15.

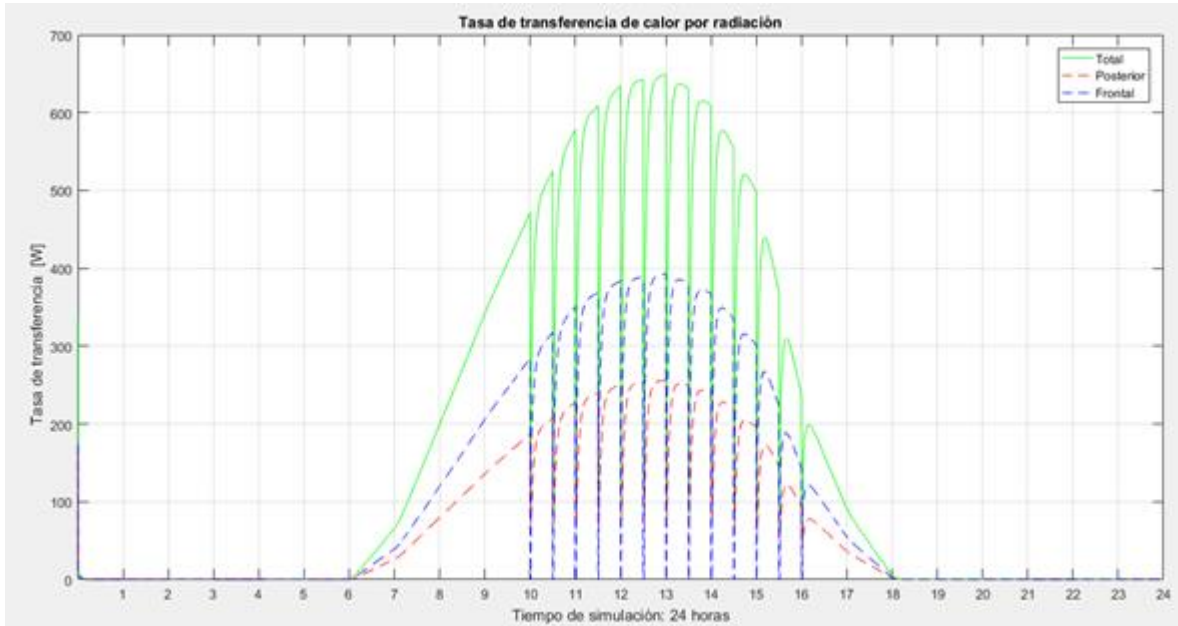
Figura 15. Potencia generada del panel FV con irrigación.



Transferencia de calor por radiación

Las tasas de transferencia de calor por radiación también fueron afectadas por la irrigación. Durante el proceso de irrigación, las tasas de transferencia de calor frontales (Q_{rad_f1} y Q_{rad_f2}) tomaron un valor de cero y las posteriores (Q_{rad_p1} y Q_{rad_p2}) disminuyeron, tal como se puede observar en la Figura 16. Las curvas de color azul y rojo corresponden a las tasas de transferencia de calor por radiación frontal y posterior, respectivamente, y la curva de color verde corresponde a la tasa de transferencia total de calor por radiación.

Figura 16. Transferencia de calor por radiación con irrigación.



Adicionalmente, surgen dos componentes de transferencia de calor por radiación frontal en la película de agua, $Q_{rad_rg_f1}$ y $Q_{rad_rg_f2}$. Estas componentes de radiación tienen una duración de un minuto, tal como se observan en las figuras 17 y 18.

Figura 17. Transferencia de calor por radiación frontal-1 en la pantalla de agua.

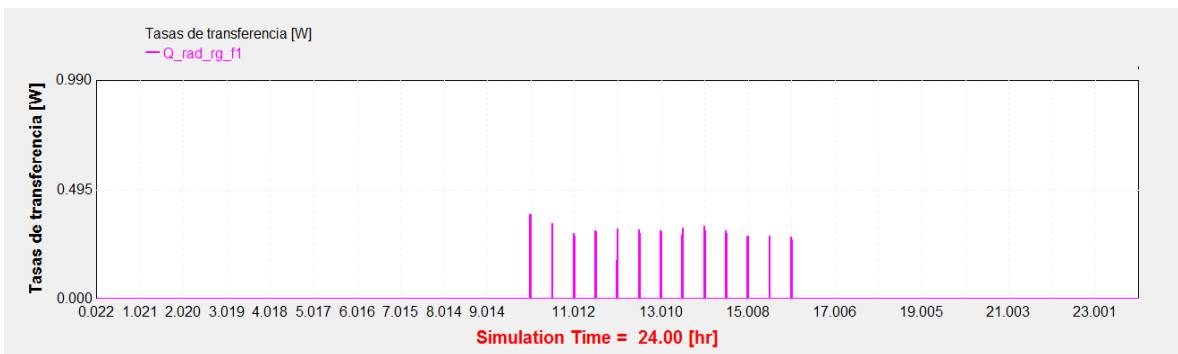
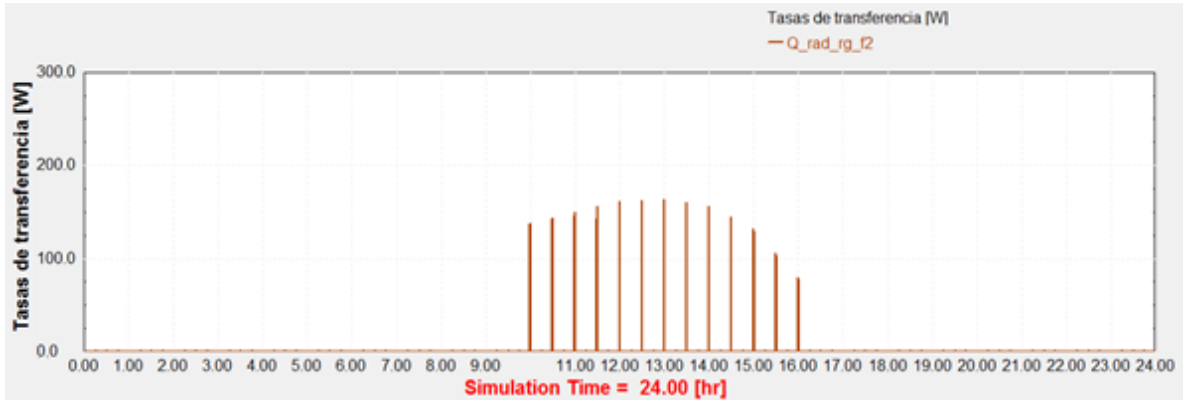


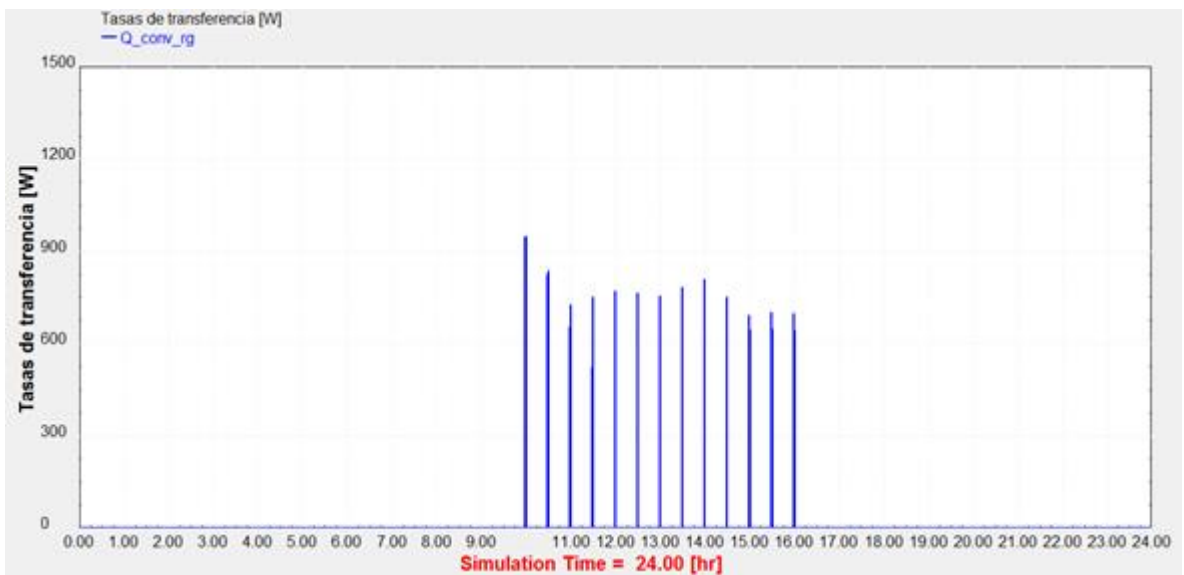
Figura 18. Transferencia de calor por radiación frontal-2 en la pantalla de agua.



Transferencia de calor por convección

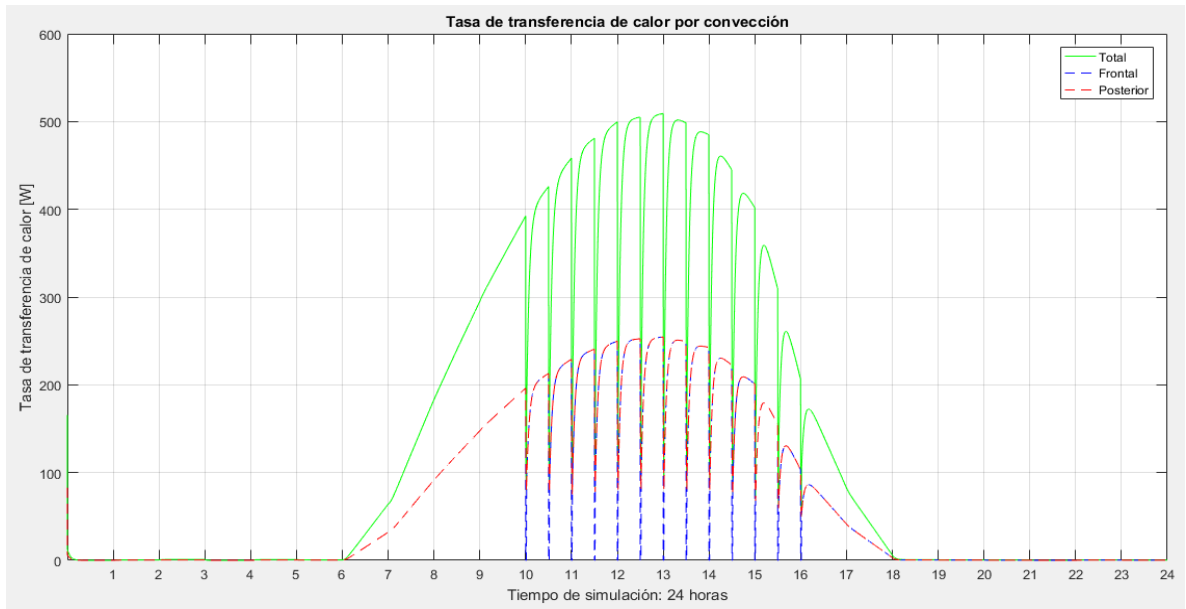
De forma similar a la transferencia por radiación, durante el proceso de riego la tasa de transferencia de calor por convección frontal (Q_{conv_f}) se hace igual a cero y la posterior (Q_{conv_p}) disminuye considerablemente, también surge una componente de convección frontal debido a la película de agua (Q_{conv_rg}) que se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Transferencia de calor por convección frontal en la partícula de agua.



La Figura 20 muestra las tasa de transferencia de calor por convección. Las curvas de color azul y rojo corresponden a las tasas de transferencia de calor por radiación frontal y posterior, respectivamente, y la curva de color verde corresponde a la tasa de transferencia total de calor por radiación.

Figura 20. Transferencia de calor por convección con irrigación.



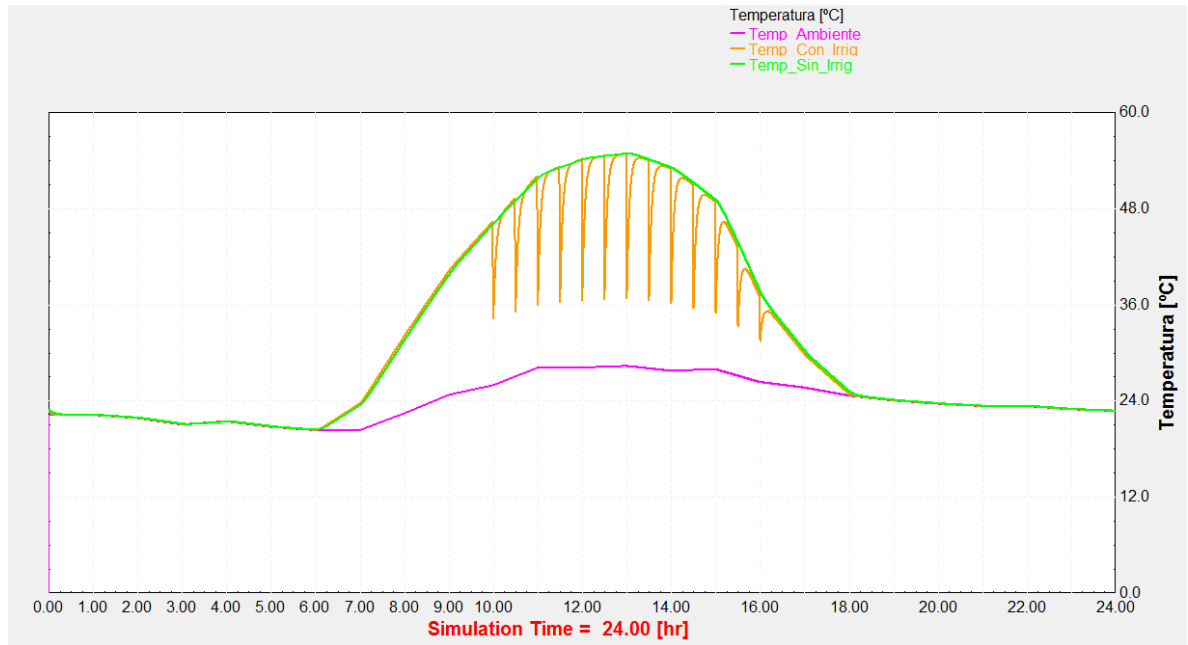
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Con los resultados obtenidos (Capítulo 3) es posible detallar el comportamiento del panel FV ante los escenarios de irrigación y no irrigación. Este capítulo presenta un análisis del balance térmico del panel FV estimando el comportamiento del perfil de la temperatura de operación, la potencia generada en DC y, por último, estimando las tasas de transferencia de calor por radiación y convección.

5.1 TEMPERATURA DE OPERACIÓN

El proceso de irrigación genera cambios significativos en la temperatura de operación del panel FV, tal como se observa en la Figura 21, la curva de color verde corresponde a la temperatura de operación sin irrigación y en color naranja con irrigación.

Figura 21. Comparación temperaturas de operación del panel FV.



Sobre las 13 horas (01:00 p.m.) la temperatura de operación se hace máxima, tomando un valor aproximado de 55 °C. Su temperatura mínima se da a las 06 horas (06:00 a.m.), cuando toma un valor de 20,4 °C y siendo igual a la temperatura ambiente. Estos valores son iguales para ambos escenarios.

La temperatura de operación del panel FV en ambos escenarios se asume que es igual a la temperatura ambiente cuando no hay irradiación solar. Es decir, desde las 0 horas (12:00 a.m.) hasta las 06 horas (06:00 a.m.) y desde las 18 horas (06:00 p.m.) hasta las 24 horas (11:59 p.m.).

La Figura 22 muestra el decremento de la temperatura de operación durante el tiempo de irrigación. Se puede observar que durante el proceso de irrigación, cuya duración es un minuto, la temperatura de operación disminuyó de forma considerable, tal como se demuestra en la Tabla 8. La máxima disminución se dio de 13:00 horas (01:00 p.m.) a 13:01 horas (01:01 p.m.), cuando la temperatura de operación del panel disminuyó aproximadamente 18 °C.

Figura 22. Decremento de la temperatura de operación con irrigación.

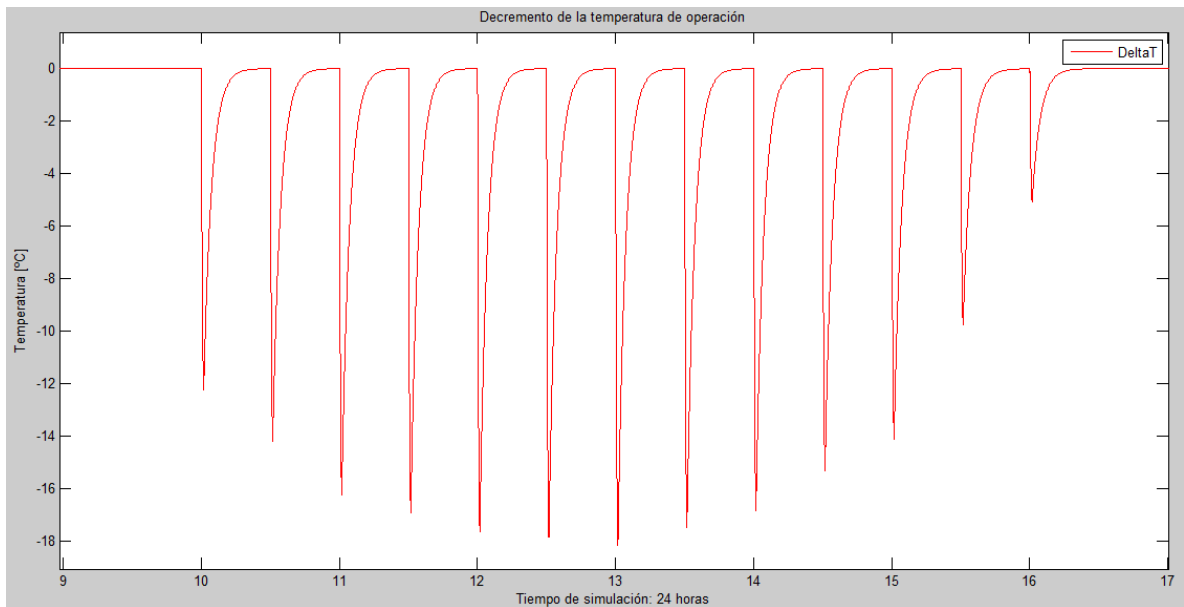


Tabla 8. Variación de temperatura debido a la irrigación.

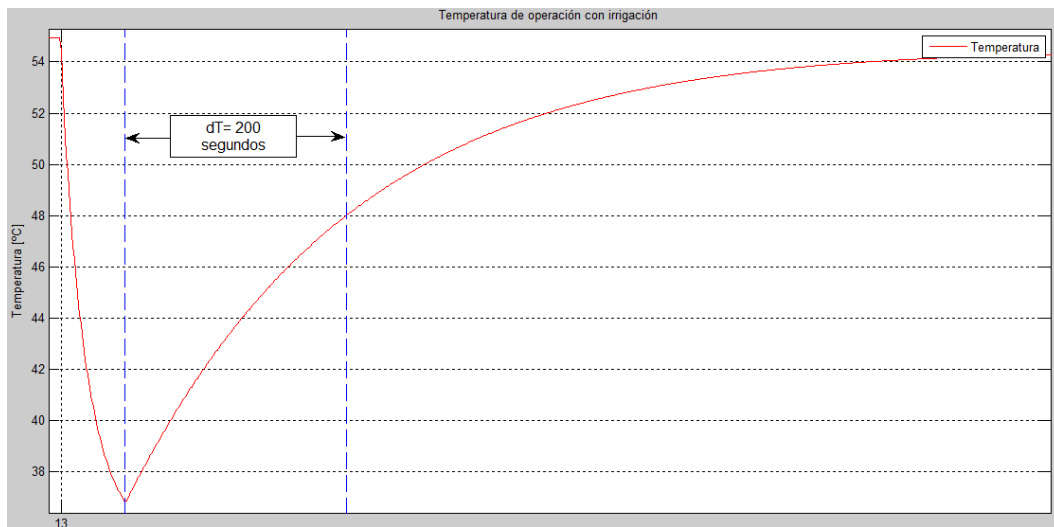
Hora de irrigación	Temperatura °C		
	Inicial	Final	Disminución
10:00 a 10:01	46.45	34.33	12.12
10:30 a 10:31	49.30	35.21	14.09
11:00 a 11:01	52.09	36.07	16.02
11:30 a 11:31	53.26	36.38	16.89
12:00 a 12:01	54.23	36.65	17.58
12:30 a 12:31	54.62	36.76	17.86
13:00 a 13:01	54.93	36.85	18.08
13:30 a 13:31	54.07	36.56	17.51
14:00 a 14:01	53.07	36.25	16.81
14:30 a 14:31	51.07	35.68	15.39
15:00 a 15:01	48.94	35.08	13.86
15:30 a 15:31	43.33	33.39	9.94
16:00 a 16:01	37.15	31.62	5.53

Estimación de la constante de tiempo

La constante de tiempo Tau (τ) es el tiempo del transitorio y se determina cuando la temperatura incrementa el 63,2% del valor máximo respecto al valor mínimo al culminar el proceso de irrigación⁵⁴.

La Figura 23 muestra la constante de tiempo que se determinó a partir de la simulación realizada en el punto de máxima irradiación solar. Al introducirse el criterio $\tau/20$ se encontró que el valor máximo del paso de tiempo para el proceso iterativo del modelo RC es 10 segundos, igual al paso de tiempo empleado por Osma⁵⁵.

Figura 23. Estimación de la constante de tiempo.



La Figura 24 muestra la constante de tiempo de calentamiento para cada uno de los ciclos de irrigación. Se puede observar que la constante de tiempo de calentamiento es mayor cuando la temperatura de operación tiene una rata de cambio ascendente, tal como se muestra en la Tabla 9.

⁵⁴ *Ibíd.*

⁵⁵ *Ibíd.*

Figura 24. Constante de tiempo de calentamiento.

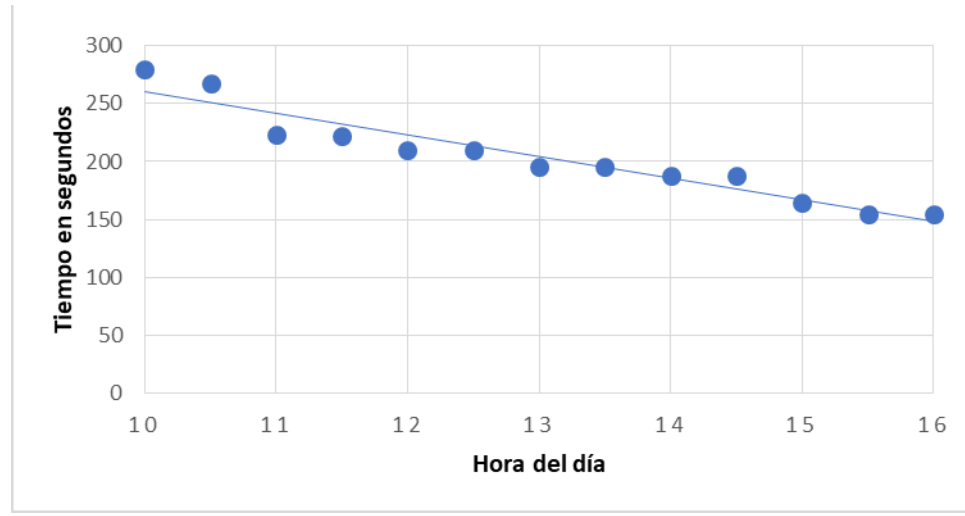
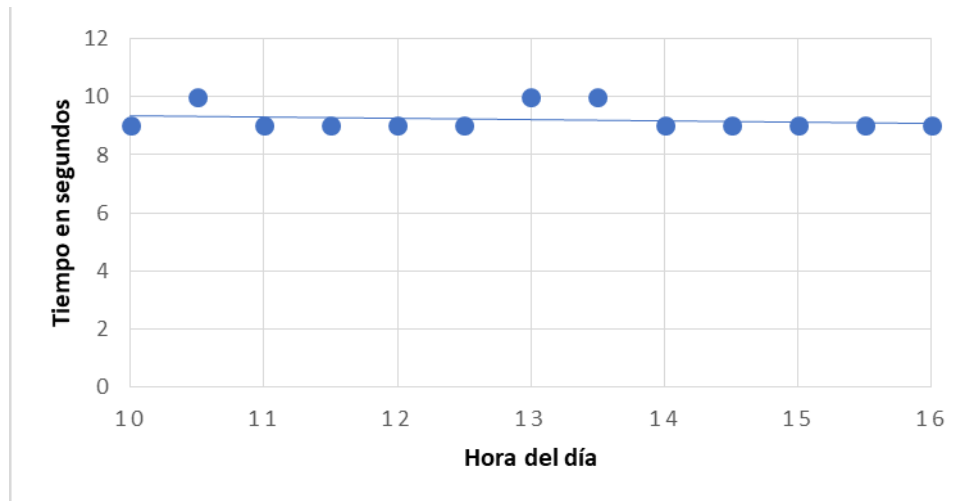


Tabla 9. Cálculo de la constante de tiempo.

Ciclo	Hora de irrigación	T _{máx} °C	T _{mín} °C	ΔT °C	T _{63,2%} °C	Constante de tiempo s
1	10:00:00	49.29	34.33	14.96	43.79	280
2	10:30:00	52.08	35.21	16.87	45.87	267
3	11:00:00	53.26	36.07	17.19	46.93	223
4	11:30:00	54.23	36.38	17.84	47.66	222
5	12:00:00	54.61	36.66	17.95	48.01	210
6	12:30:00	54.92	36.76	18.15	48.24	210
7	13:00:00	54.36	36.86	17.49	47.92	195
8	13:30:00	53.36	36.57	16.78	47.18	196
9	14:00:00	51.86	36.26	15.60	46.12	188
10	14:30:00	49.75	35.68	14.06	44.57	188
11	15:00:00	46.39	35.08	11.31	42.23	165
12	15:30:00	40.52	33.38	7.13	37.89	155
13	16:00:00	35.26	31.61	3.64	33.92	155

La Figura 25 muestra la constante de tiempo de enfriamiento para cada uno de los ciclos de irrigación. Se puede observar que la constante de tiempo de enfriamiento tiende a tener un comportamiento similar en cada ciclo de irrigación debido a que todos se hicieron con las mismas condiciones de riego.

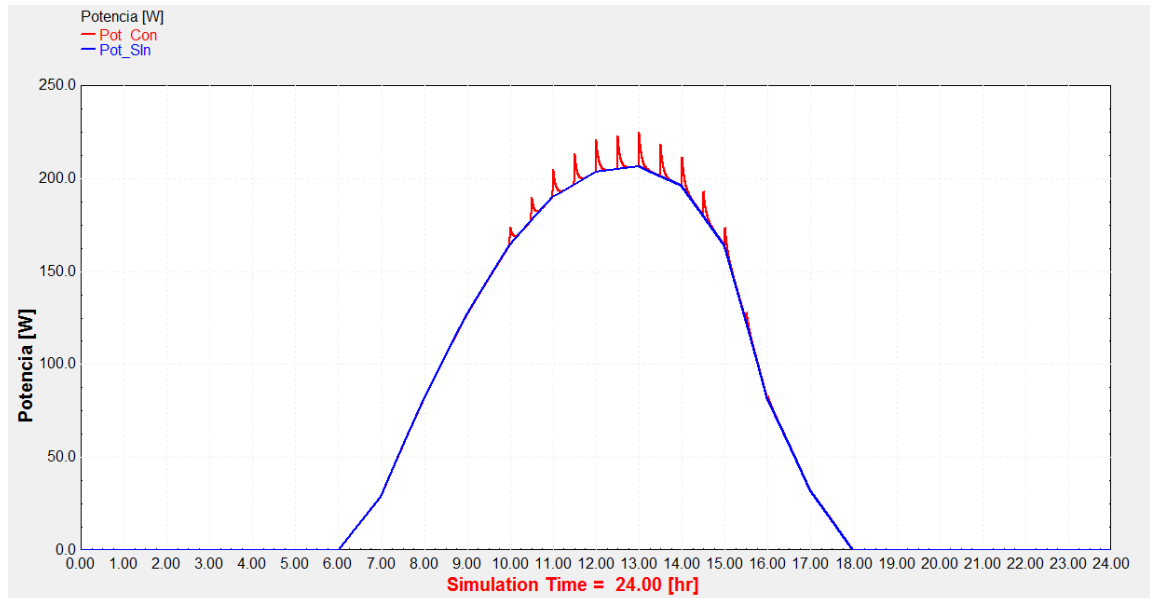
Figura 25. Constante de tiempo de enfriamiento.



5.2 POTENCIA GENERADA DC

El proceso de irrigación permite disminuir la temperatura de operación del panel FV y, por consiguiente, la potencia generada DC incrementa en estos intervalos de tiempo. La Figura 26 muestra una comparación de la potencia generada en estos dos escenarios durante un día, en color azul sin irrigación y en color rojo con irrigación.

Figura 26. Comparación potencia generada por el panel FV.



De la figura anterior se tiene que la potencia generada por el panel FV tiende a estar en el mismo sentido a la irradiación solar. Debido a esto, el panel FV no genera potencia desde las 0 horas (12:00 a.m.) hasta las 06 horas (06:00 a.m.) y desde las 18 horas (06:00 p.m.) hasta las 24 horas (11:59 p.m.).

La Figura 27 muestra el incremento de potencia generada por el panel FV. Se puede observar que para ambos escenarios la potencia generada es igual hasta que empieza el proceso de riego, haciendo que ésta incremente de forma considerable, como se observa en la Tabla 10.

Figura 27. Incremento de potencia generada.

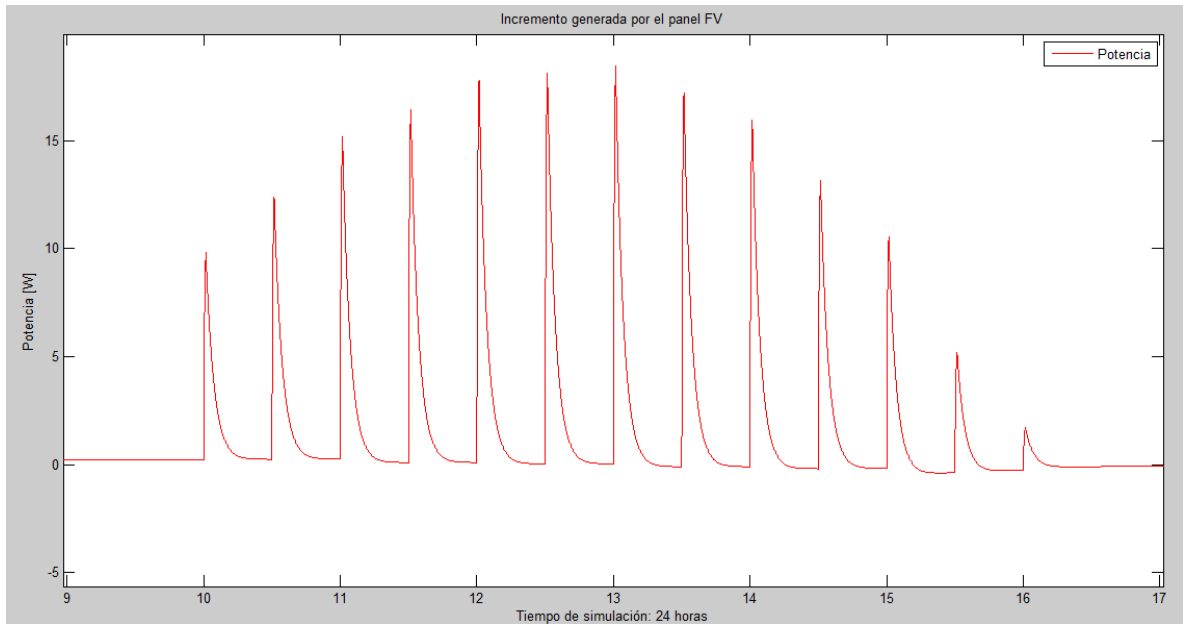


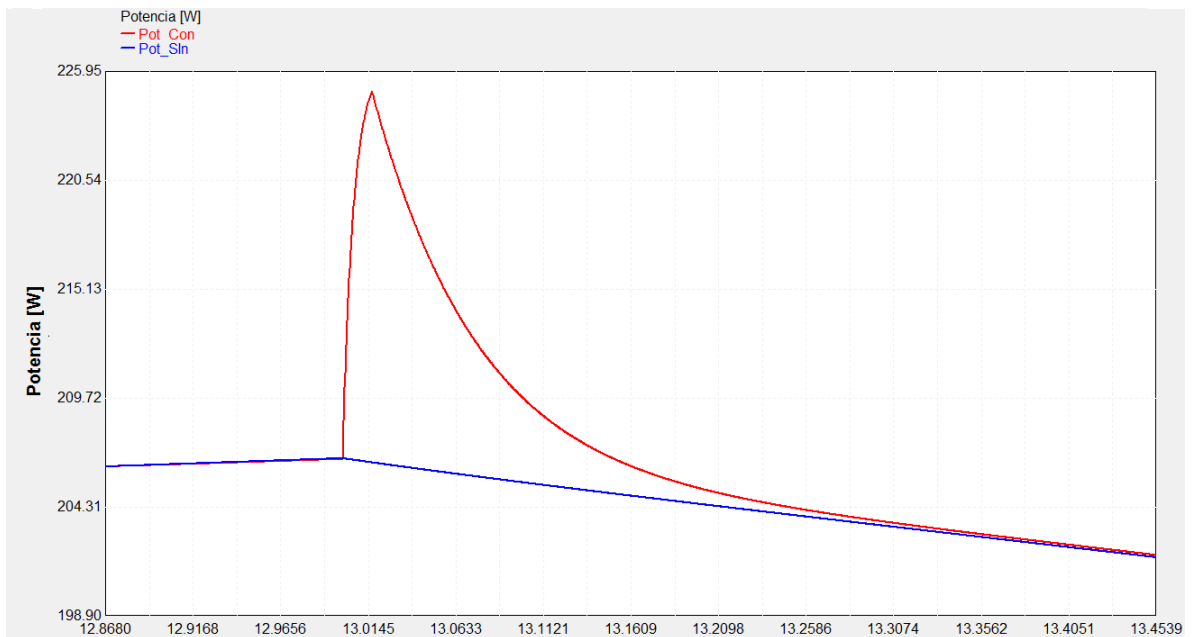
Tabla 10. Variación de la potencia generada debido a la irrigación.

Hora de irrigación	Potencia máxima W			
	Sin irrigación	Con irrigación	Incremento	%
10:00 a 10:01	165,02	174,30	9,29	5,63
10:30 a 10:31	178,12	189,99	11,87	6,66
11:00 a 11:01	190,64	205,31	14,67	7,70
11:30 a 11:31	197,22	213,47	16,25	8,24
12:00 a 12:01	203,85	221,43	17,58	8,62
12:30 a 12:31	205,27	223,34	18,07	8,80
13:00 a 13:01	206,54	224,98	18,43	8,92
13:30 a 13:31	201,19	218,61	17,42	8,66
14:00 a 14:01	195,64	211,84	16,20	8,28
14:30 a 14:31	179,62	193,19	13,57	7,55
15:00 a 15:01	162,60	173,56	10,96	6,74
15:30 a 15:31	122,26	128,24	5,98	4,89
16:00 a 16:01	80,89	82,99	2,09	2,58

Durante el proceso sin irrigación, la máxima generación de potencia ocurre a las 13 horas (01:00 p.m.) con un valor de 206.7 W. Para el proceso con irrigación, ésta

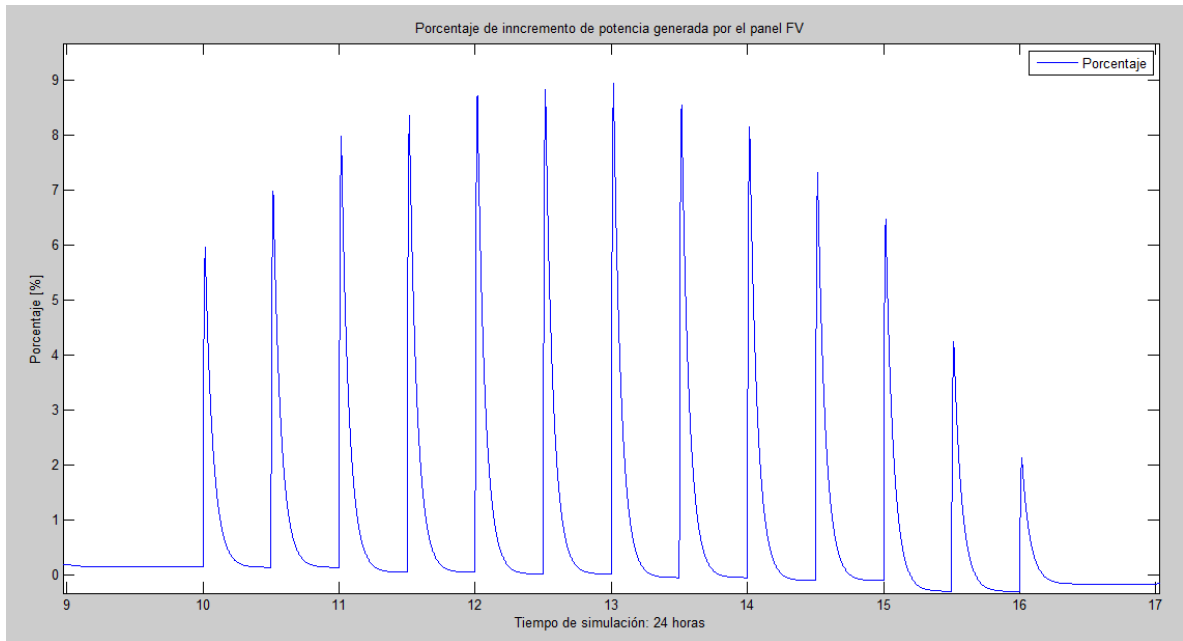
ocurre a las 13:01 horas (01:01 p.m.) con un valor de 225 W. Es decir, que en el punto de irradiación máxima la potencia generada incrementó 18.3 W debido a la irrigación utilizada. La Figura 28 muestra el comportamiento de la potencia generada en el punto de irradiación máxima.

Figura 28. Comportamiento de la potencia generada en el punto de irradiación máxima.



El proceso de irrigación permitió incrementar la potencia generada en un 9% en el punto de irradiación solar máxima y en 2% durante el periodo de baja irradiación solar, tal como se observa en la Figura 31.

Figura 29. Porcentaje de incremento de potencia generada.



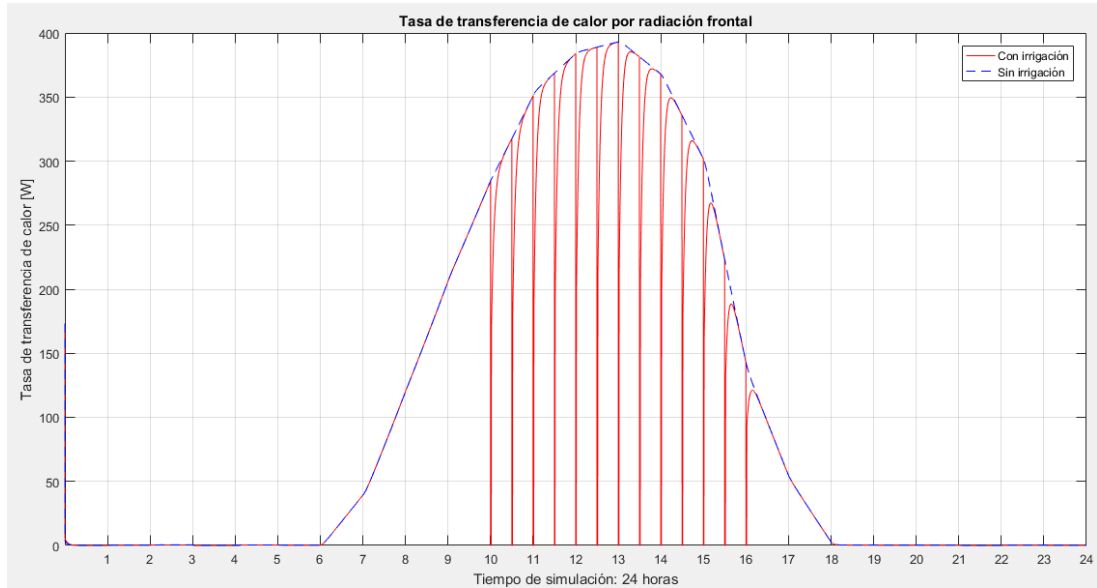
5.3 TASAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Como se vio en la sección anterior, las tasas de transferencia de calor por radiación están dividida en 4 tasas: radiación frontal 1, radiación frontal 2, radiación posterior 1 y radiación posterior 2.

Tasas de transferencia de calor por radiación

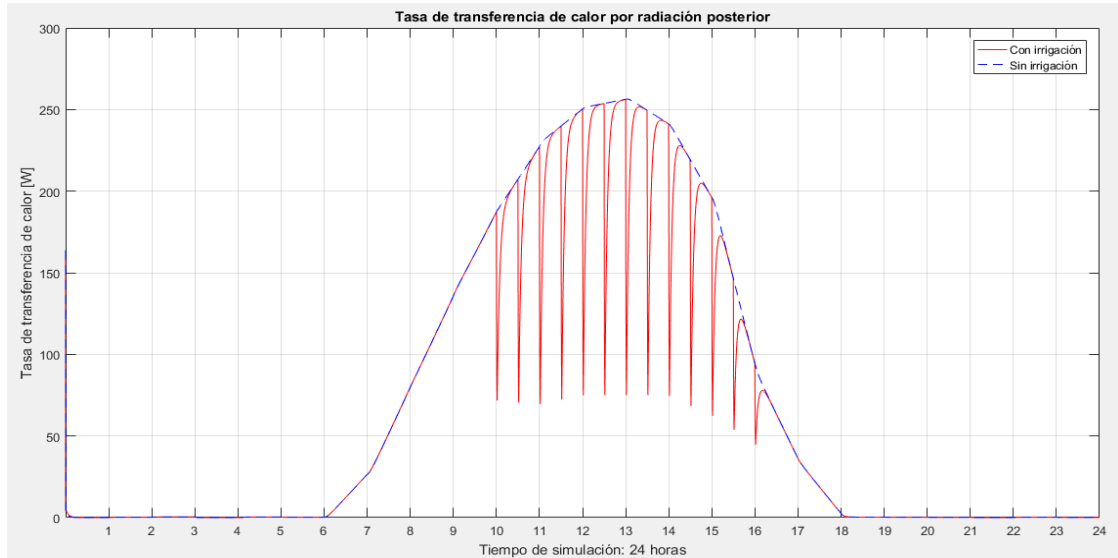
La Figura 30 muestra la tasa de transferencia de calor por radiación frontal para un día, incluyendo frontal 1 y frontal 2. En las horas del día sin irradiación solar su valor es cero. El proceso de irrigación afecta directamente la transferencia frontal, haciendo que vuelva a ser cero. Su máximo valor es 393 W a las 13 horas (01:00 p.m.), cuando la irradiación solar es máxima, y representa aproximadamente el 60.5% de la transferencia total por radiación.

Figura 30. Comparación transferencias de calor por radiación frontal.



La Figura 31 muestra la tasa de transferencia de calor por radiación posterior para un día, incluyendo posterior 1 y 2. En las horas del día sin irradiación solar su valor es cero. El proceso de irrigación afecta directamente haciendo que disminuya significativamente. Su máximo valor es 256.2 W a las 13 horas (01:00 p.m.), cuando la irradiación solar es máxima, y representa aproximadamente el 39,5% de la transferencia total por radiación.

Figura 31. Comparación transferencias de calor por radiación posterior.



La transferencia de calor por radiación total es igual a la suma de las tasas frontales y posteriores, tal como se observa en la Figura 32. Su valor pico es aproximadamente 649.2 W y ocurre cuando la irradiación es máxima. La Tabla 11 muestra la disminución de transferencia de calor por radiación debido a la irrigación.

Figura 32. Comparación transferencia de calor por radiación total.

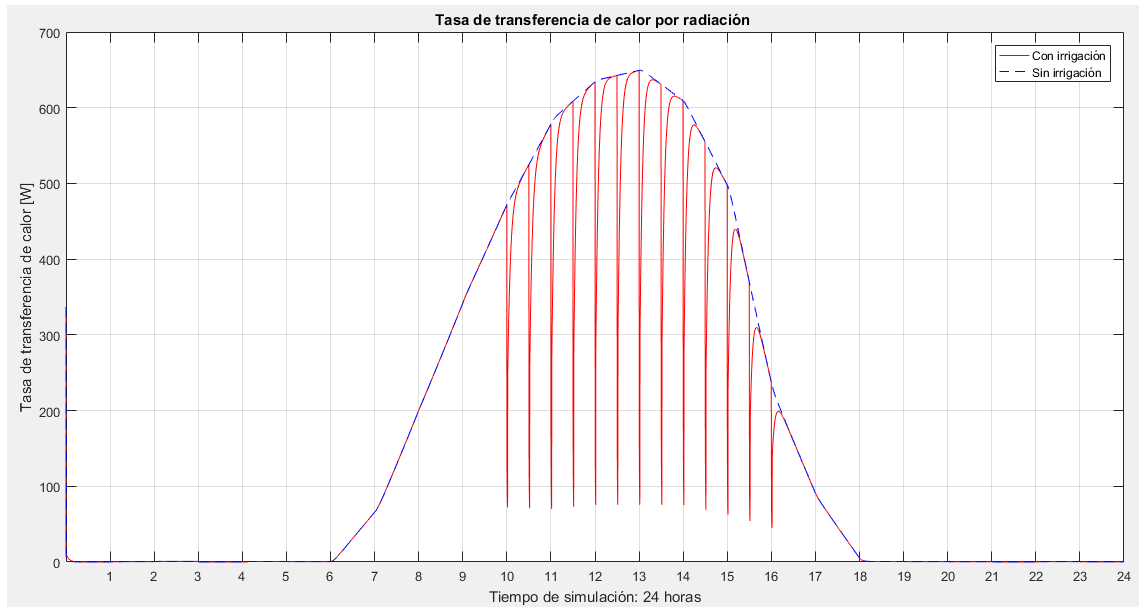


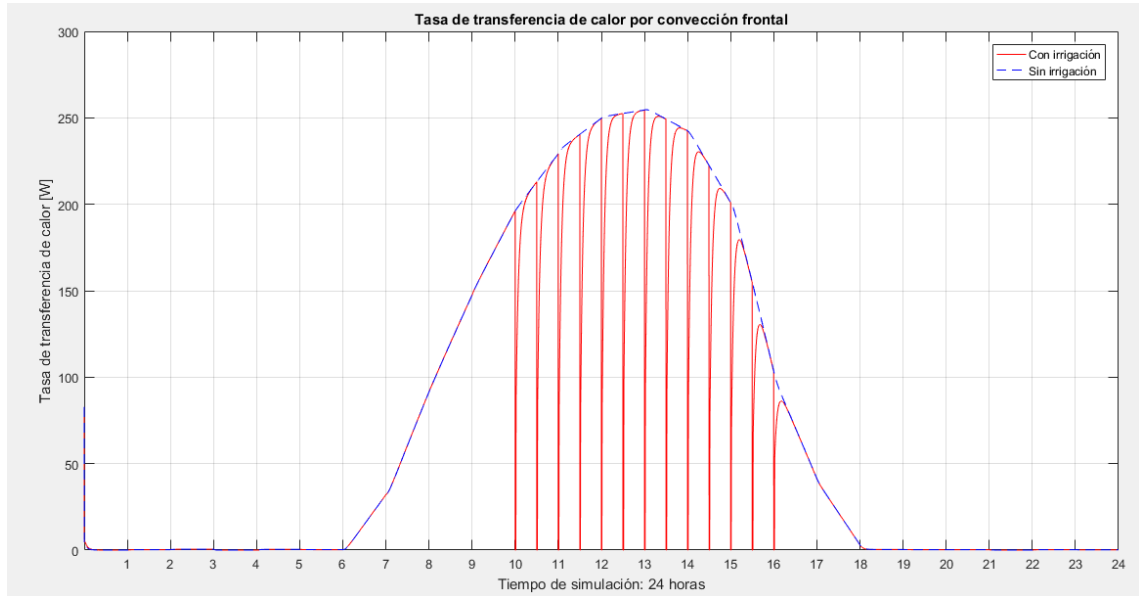
Tabla 11. Variación de la transferencia de calor por radiación total debido a la irrigación.

Hora de irrigación	Transferencia de calor por radiación W		
	Sin irrigación	Con irrigación	Disminución
10:00 a 10:01	471.99	234.31	237.68
10:30 a 10:31	524.93	243.70	281.22
11:00 a 11:01	578.55	253.67	324.88
11:30 a 11:31	608.58	263.68	344.90
12:00 a 12:01	634.30	272.90	361.40
12:30 a 12:31	642.59	274.64	367.95
13:00 a 13:01	649.25	276.12	373.13
13:30 a 13:31	630.74	271.30	359.44
14:00 a 14:01	609.11	265.68	343.43
14:30 a 14:31	554.51	244.00	310.52
15:00 a 15:01	497.68	221.54	276.14
15:30 a 15:31	369.43	178.07	191.35
16:00 a 16:01	236.92	134.44	102.48

Transferencia de calor por convección

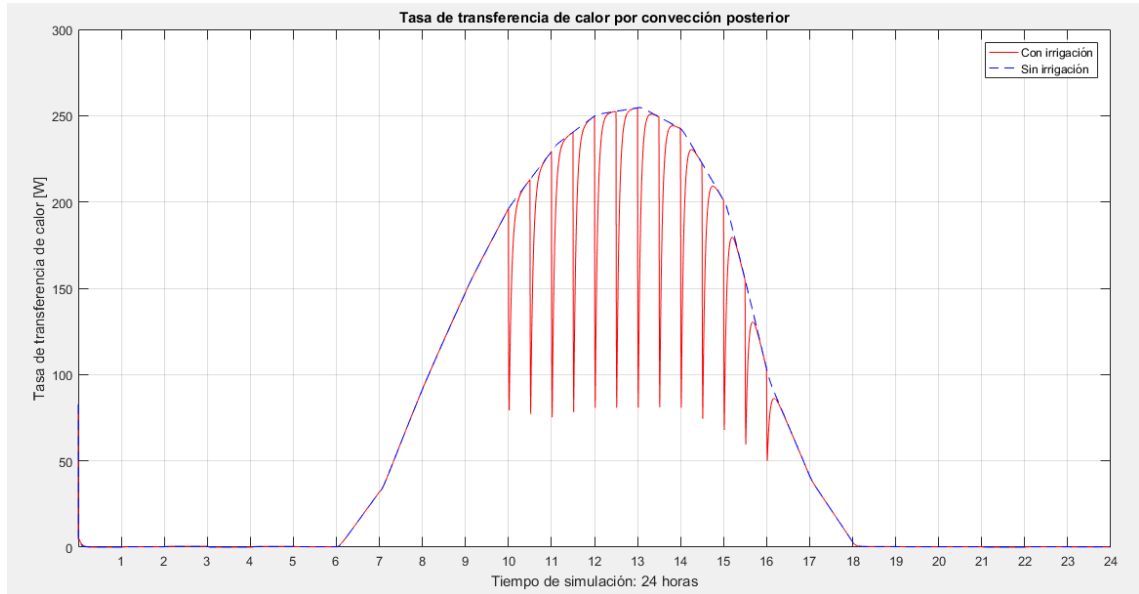
La Figura 33 muestra la tasa de transferencia de calor por convección frontal para un día. En las horas del día sin irradiación solar su valor es cero. El proceso de irrigación afecta directamente la transferencia frontal, haciendo que vuelva a ser cero. Su máximo valor es 254,75 W a las 13 horas (01:00 p.m.), cuando la irradiación solar es máxima, y representa el 50% de la transferencia total por convección, excepto cuando está activa la irrigación.

Figura 33. Comparación transferencia de calor por convección frontal.



La Figura 34 muestra la tasa de transferencia de calor por convección posterior para un día. En las horas del día sin irradiación solar su valor es cero. El proceso de irrigación afecta directamente haciendo que disminuya significativamente. Su máximo valor es 254.75 W a las 13 horas (01:00 p.m.), cuando la irradiación solar es máxima. Representa el 50% de la transferencia total por convección y durante la irrigación el 100%.

Figura 34. Comparación transferencia de calor por convección posterior.



La transferencia de calor por convección total es igual a la suma de las tasas frontales y posteriores, tal como se observa en la Figura 35. Su valor pico es aproximadamente 509.5 W y ocurre cuando la irradiación es máxima. La Tabla 12 muestra la disminución de transferencia de calor total por radiación.

Figura 35. Comparación transferencia de calor por convección total.

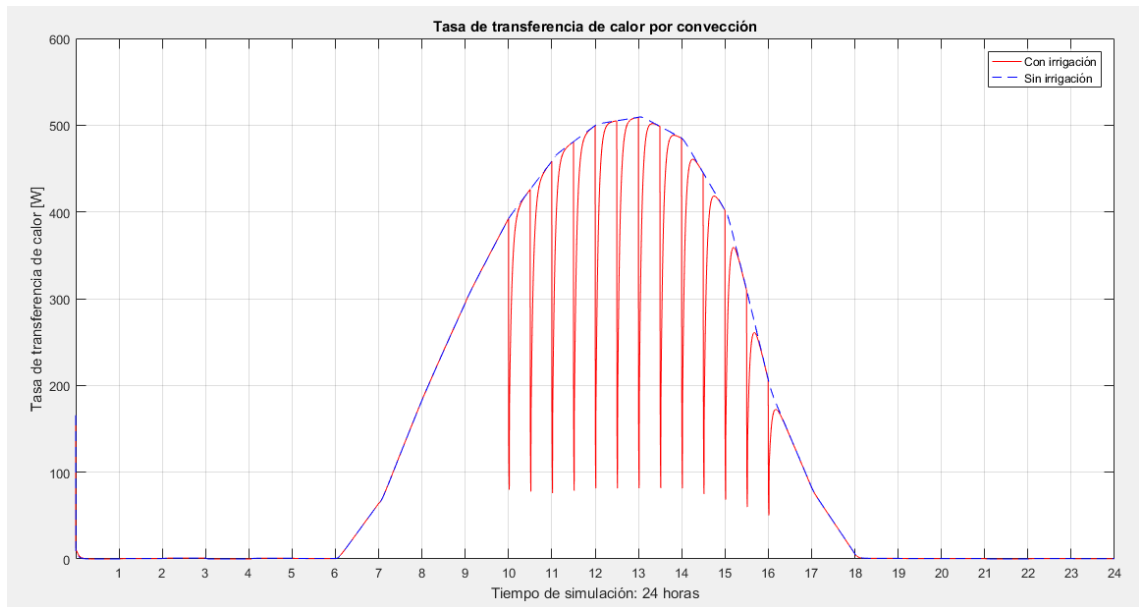


Tabla 12. Variación de la transferencia de calor por convección total debido a la irrigación.

Hora de irrigación	Transferencia de calor por convección W		
	Sin irrigación	Con irrigación	Disminución
10:00 a 10:01	392.48	158.70	233.78
10:30 a 10:31	426.04	154.41	271.64
11:00 a 11:01	458.47	150.52	307.96
11:30 a 11:31	480.99	156.36	324.63
12:00 a 12:01	499.57	161.50	338.07
12:30 a 12:31	505.02	161.63	343.39
13:00 a 13:01	509.06	161.72	347.34
13:30 a 13:31	498.43	162.04	336.39
14:00 a 14:01	484.92	161.61	323.32
14:30 a 14:31	444.64	148.73	295.91
15:00 a 15:01	401.78	135.82	265.96
15:30 a 15:31	309.51	118.88	190.63
16:00 a 16:01	206.29	100.16	106.13

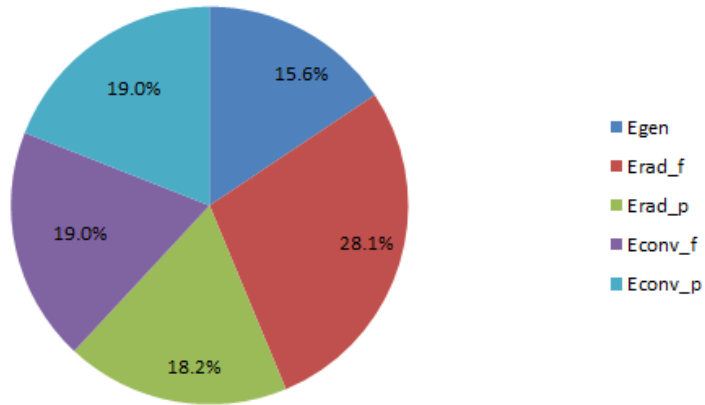
5.4 BALANCE ENERGÉTICO

La energía solar incidente corresponde a la energía total entrante y es igual a la sumatoria de las tasas de transferencia de calor y la potencia generada, tal como se observa en la expresión (32).

$$E_{ineff} = E_{gen} + E_{rad_f} + E_{rad_p} + E_{cv_p} + E_{cv_f} + E_{enfriamiento} \quad (32)$$

La Figura 36 corresponde al balance energético del panel FV sin irrigación y se observa que solo el 15,6% de la energía solar incidente se transforma en energía útil y el 83,4% restante se convierte en calor. Adicionalmente, la mayor parte de la energía solar incidente se transforma en calor por radiación.

Figura 36. Balance energético del panel FV sin irrigación.



La Figura 37 corresponde al balance energético del panel FV con irrigación y se aprecia un nuevo componente que representa el calor de enfriamiento debido al sistema de riego. El calor de enfriamiento permitió incrementar la energía producida por el panel FV a un 16% al disminuir los porcentajes de calor por radiación y convección. La Tabla 13 muestra los valores energéticos obtenidos en W/hora día del panel FV con y sin irrigación.

Figura 37. Balance energético del panel FV con irrigación.

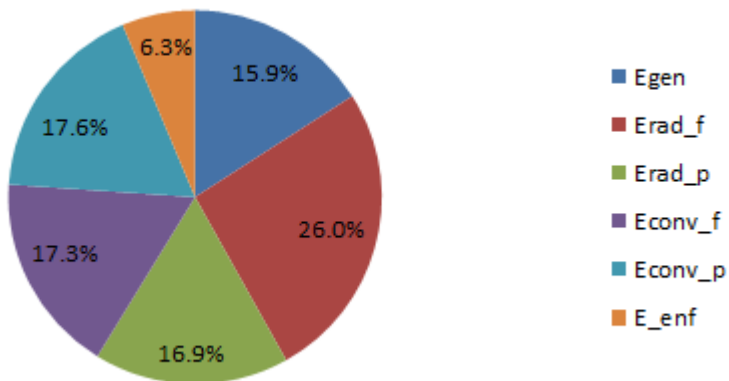


Tabla 13. Cuadro comparativo balance energético.

		Sin irrigación	Con irrigación
Egen	W/h día	1479,25	1490,76
Erad_f	W/h día	2626,51	2433,03
Erad_p	W/h día	1703,84	1582,84
Econv_f	W/h día	1780,64	1621,09
Econv_p	W/h día	1780,64	1647,20
E_enf	W/h día	-	595,96
Total	W/h día	9370,90	9370,89

6. ENERGÍA PRODUCIDA POR EL PANEL FV

La eficiencia energética de un sistema FV se puede incrementar dependiendo del régimen de operación del sistema de riego, tiempo de irrigación y caudal⁵⁶. En este trabajo de grado, se tiene un caudal de 4.5 l/min, un tiempo de irrigación de 1 minuto y la potencia consumida por la bomba de 15 W como parámetros del sistema de riego. Para evidenciar el impacto de la irrigación como estrategia de mitigación térmica del panel FV instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, se estimó la energía adicional producida durante un día.

En este capítulo se definen los componentes necesarios para estimar la energía producida por el panel FV durante un día de simulación y los resultados obtenidos para diferentes tipos de operación del sistema de riego.

6.1 NUEVOS COMPONENTES EN TRNSYS

Para estimar la energía producida por el panel FV se agregó una nueva subrutina al modelado diseñado en el Capítulo 2. El **Type24**, es un componente que permite integrar una serie de cantidades durante un periodo de tiempo. Sus entradas son potencias y como salida se obtiene las energías que se describen en la Tabla 14.

⁵⁶ OSMA G., FLOREZ C., ROJAS W., FLOREZ J., y ORDOÑEZ G., “Mejoramiento del desempeño de paneles fotovoltaicos a partir de la irrigación forzada de la superficie superior Improvement of the performance of photovoltaics panels by forced irrigation on the upper surface”, vol. 16, no 2, pp. 161–171, 2017

Tabla 14. Descripción de entradas y salidas del Type24.

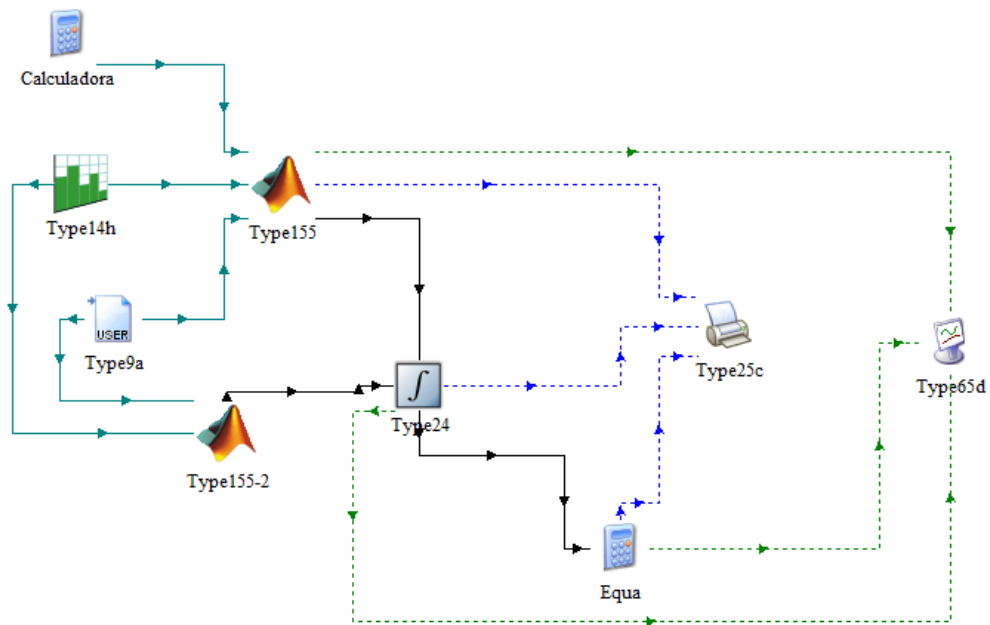
N°	Entrada			Salida
1	Potencia generada sin irrigación W			Energía producida sin irrigación Wh/día
2	Potencia generada con irrigación W			Energía producida con irrigación Wh/día
3	Potencia de la bomba de riego W			Energía consumida por la bomba de riego Wh/día

Para obtener la energía adicional producida por el sistema, las salidas del *Type24* son analizadas a través de la calculadora y se define la expresión (33).

$$E_{adicional} = E_{con\ irrigación} - E_{sin\ irrigación} - E_{consumida\ por\ la\ bomba} \quad (33)$$

La Figura 38 representa el modelado final desarrollado para el estudio de este capítulo.

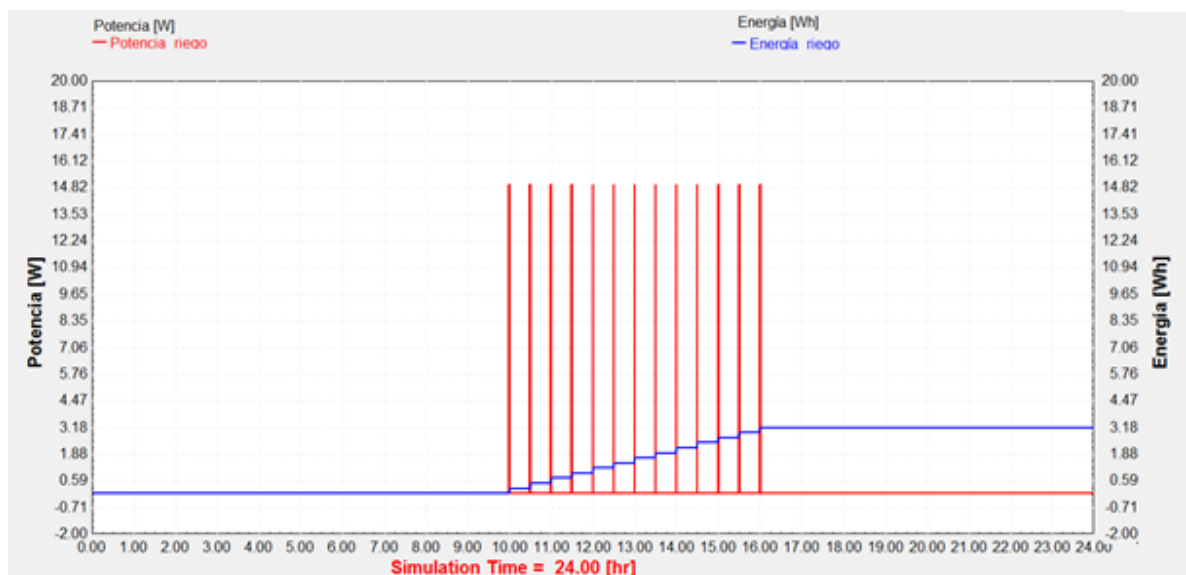
Figura 38. Modelo desarrollado para estimar la energía del panel FV.



6.2 ENERGÍA CONSUMIDA POR EL SISTEMA DE RIEGO

Para el sistema de riego, se consideró una bomba sumergible de 15 W. La Figura 39 muestra la potencia y energía consumida por el sistema de riego, en color rojo se observa la potencia del sistema de riego, tomando un valor de 15 W cuando la irrigación está en funcionamiento y 0 W cuando está desactivada. La energía total consumida por el sistema de riego es de 3.2 Wh/día y su comportamiento se observa en la gráfica azul.

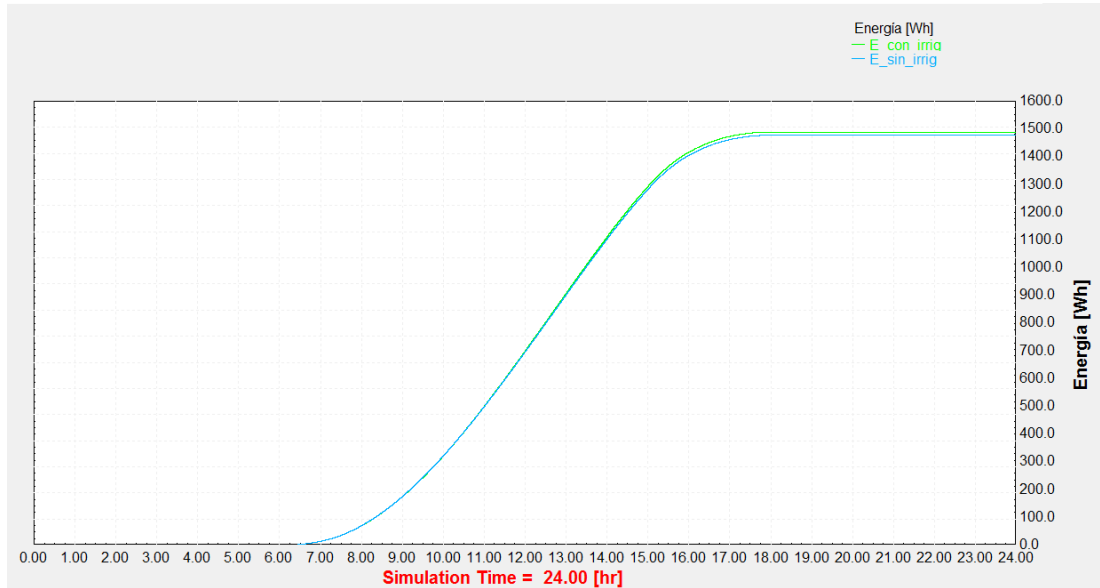
Figura 39. Potencia y energía consumida por el sistema de riego.



6.3 RESULTADOS

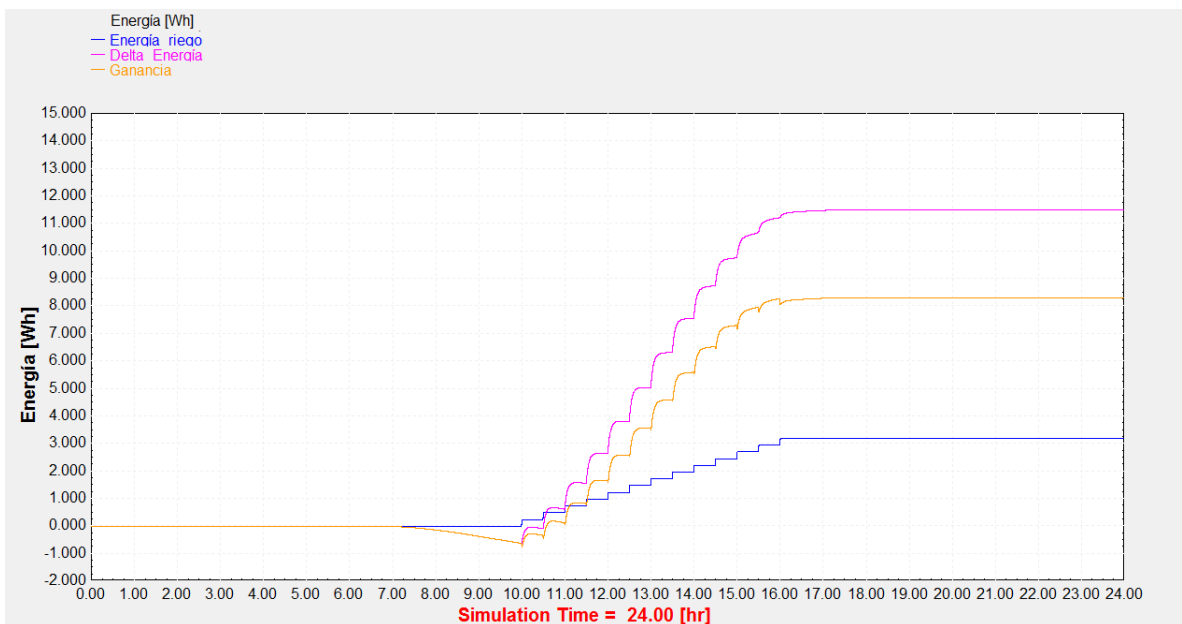
La Figura 40 muestra el comportamiento de energía producida para un día de simulación. El color verde representa la energía producida por el sistema fotovoltaico con irrigación con un total 1490.76 Wh/día y sin irrigación en color azul con un total de 1479.25 Wh/día.

Figura 40. Energía producida durante un día.



La diferencia entre la energía producida con irrigación y sin irrigación es de 11.64 Wh/día y la ganancia total de energía es de 8.315 Wh/día, tal como se observa en la Figura 41.

Figura 41. Energía adicional producida.



De la gráfica anterior se tiene que la energía adicional empieza siendo negativa debido a la energía consumida por el sistema de riego. Después del segundo intervalo de irrigación, la energía adicional producida es positiva, es decir, después de las 10:30 horas el sistema de riego recupera la energía consumida por la bomba y comienza a tener ganancias. A medida que la irradiación solar aumenta, la variación de potencia generada durante la irrigación también lo hace y, en consecuencia, la ganancia de energía incrementa.

La Tabla 15 muestra la energía adicional producida por el sistema de irrigación cuando se varía la potencia de la bomba de riego.

Tabla 15. Comparación energía adicional generada para diferentes potencias de bomba.

N°	Potencia de la bomba W	Energía consumida por la bomba W/h día	Ganancia W/h día
1	0	0	11,64
2	8	1,71	9,92
3	15	3,21	8,33
4	30	6,42	5,22

6.4 ENERGÍA ADICIONAL PRODUCIDA PARA DIFERENTES REGÍMENES DE IRRIGACIÓN

Por último, se experimentó el impacto de la irrigación para diferentes condiciones de riego. Los intervalos de irrigación continúan siendo cada 30 minutos desde las 10 horas hasta las 4:30 horas. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 16 que muestra las condiciones de riego utilizadas y el incremento de la ganancia de energía generada.

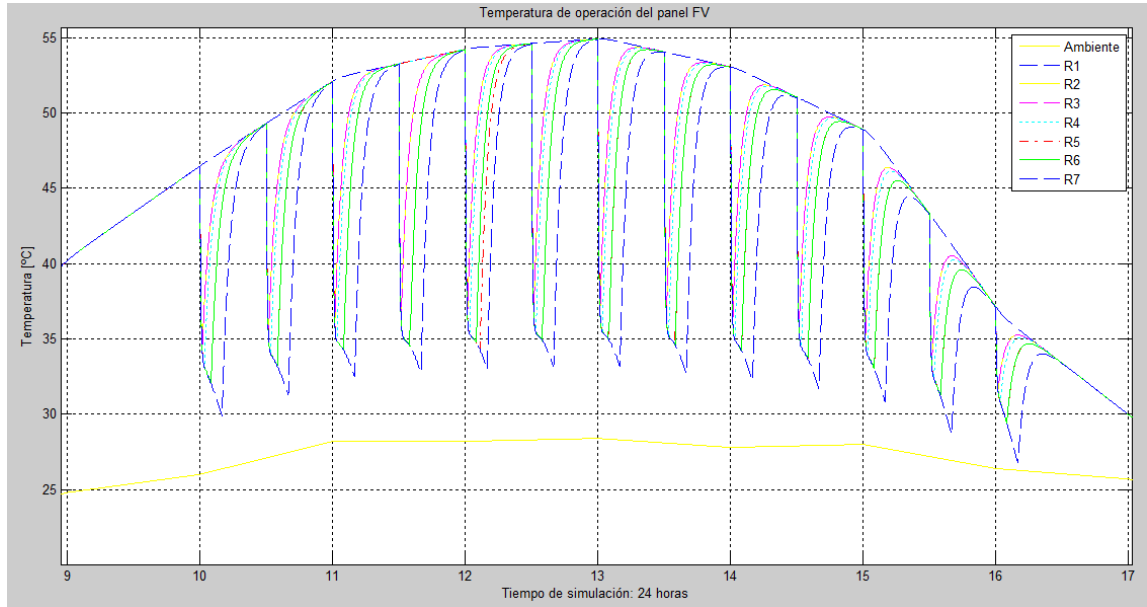
Tabla 16. Resultados del impacto de irrigación para para diferentes escenarios.

R	Caudal [l/min]	Tiempo [min]	Punto de irradiación máxima			Energía producida [Wh/día]	Ganancia	
			Temperatura °C		Potencia W		[Wh/día]	[%]
			Max	Min				
1	-	-	54.93	-	206.71	1479,25	-	-
2	4.5	1	54.93	36.85	224.98	1490,76	8.32	0.56
3	9.5	1	54.93	36.84	225.30	1490,85	8.40	0.57
4	4.5	2	54.92	35.92	226.09	1493,07	7.99	0.54
5	4.5	5	54.92	34.95	226.10	1502,56	8.07	0.55
6	9.5	5	54.92	34.93	226.08	1504,45	9.10	0.62
7	4.5	10	54.87	33.22	227.56	1522,29	10.71	0.72
8	4.5	15	54.65	30.73	230.29	1542,27	14.45	0.98

La Figura 42 muestra el comportamiento de la temperatura de operación ante diferentes regímenes del sistema de riego. Se aprecia que a medida que el tiempo de irrigación aumenta, la temperatura de operación del panel FV disminuye. En el punto de irradiación máxima, la disminución de la temperatura de operación en la prueba R2 es igual a 18 °C mientras que en la prueba R8, con el mayor tiempo de irrigación, su valor fue de 24 °C.

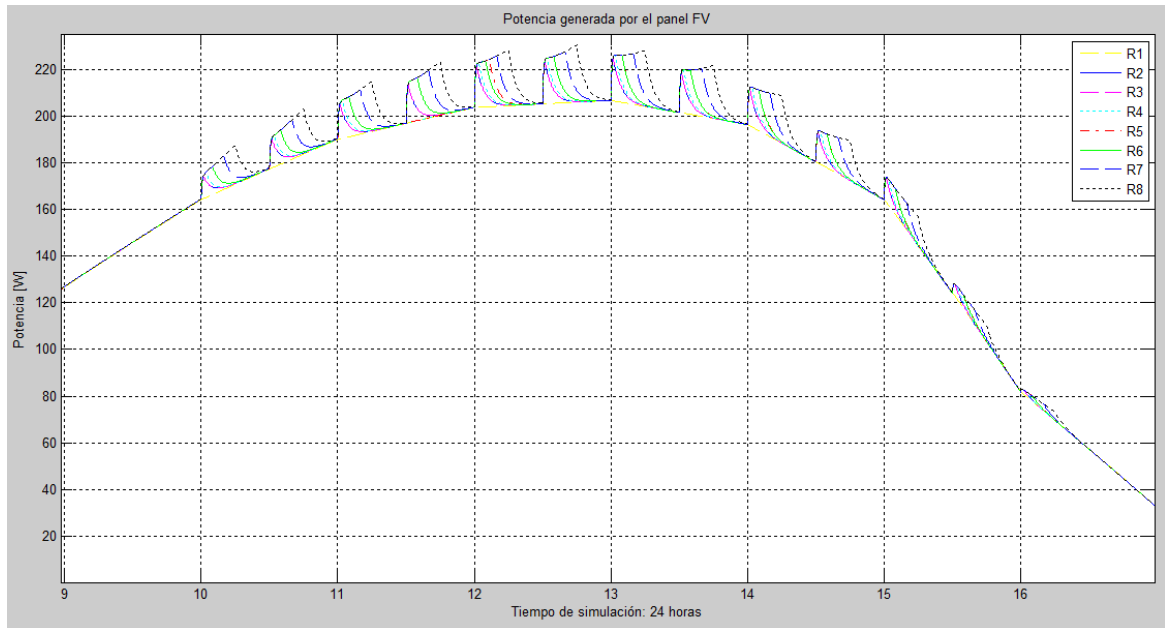
Para la prueba R7, en los puntos de irrigación después de las 15:30 horas la temperatura de operación tuvo un valor menor a la temperatura ambiente, esto se debe que la irradiación solar es baja (<450 W/m²), y el régimen de riego es muy extenso (4.5 L/min y 15 minutos de irrigación).

Figura 42. Temperatura de operación para diferentes regímenes de riego.



La Figura 43 muestra la potencia generada por el panel FV para los diferentes regímenes de riego. Se puede observar que el decremento de la temperatura produce un incremento en la potencia y la máxima potencia generada se obtuvo en la prueba R8, que presentó 23,6 W adicionales en comparación con la prueba sin irrigación y 5,3 W con respecto a la prueba R2.

Figura 43. Potencia generada para diferentes regímenes de riego.



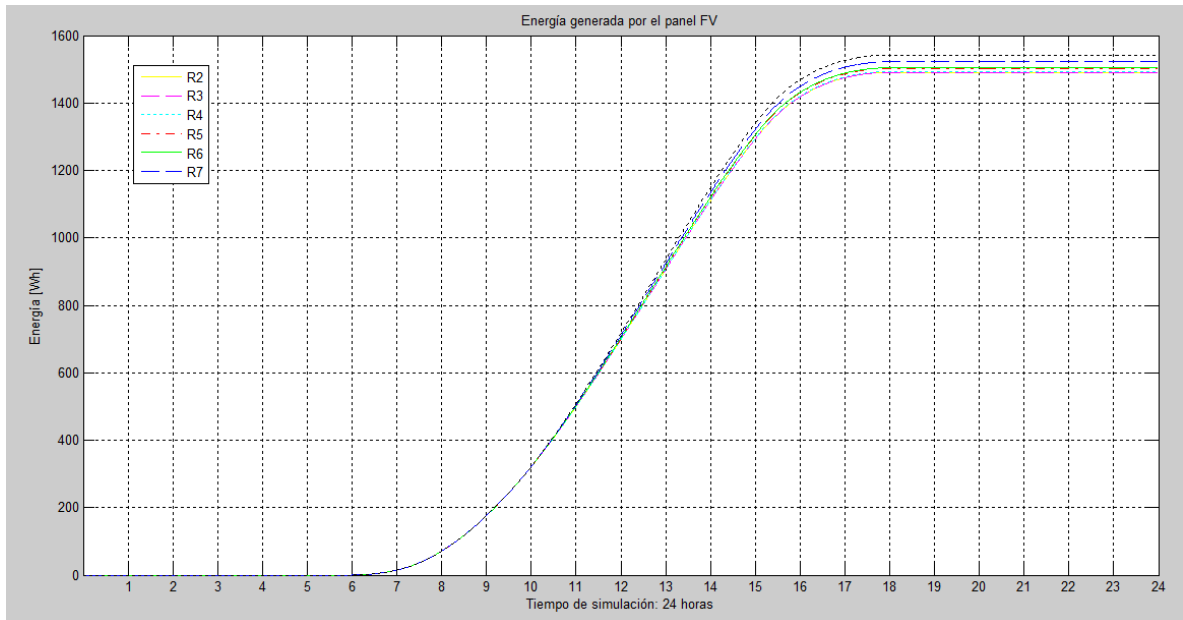
A su vez, la energía generada durante un día se incrementa como se observa en la Figura 44. Se observó que el caudal no influye de manera considerable en la generación, ya que los resultados para diferentes caudales fueron similares. Se considera que un caudal recomendable para optimizar el dimensionamiento del sistema de riego es de 4.5 L/min ⁵⁷.

Se debe aplicar un procedimiento de mejoramiento del sistema de irrigación desarrollado por Osma⁵⁸, que permite incrementar la ganancia neta a 10%, puesto que define cuándo y cuánto tiempo debe ser irrigado el panel FV.

⁵⁷ *Ibíd.*

⁵⁸ OSMA PINTO G. A., Op. Clt.

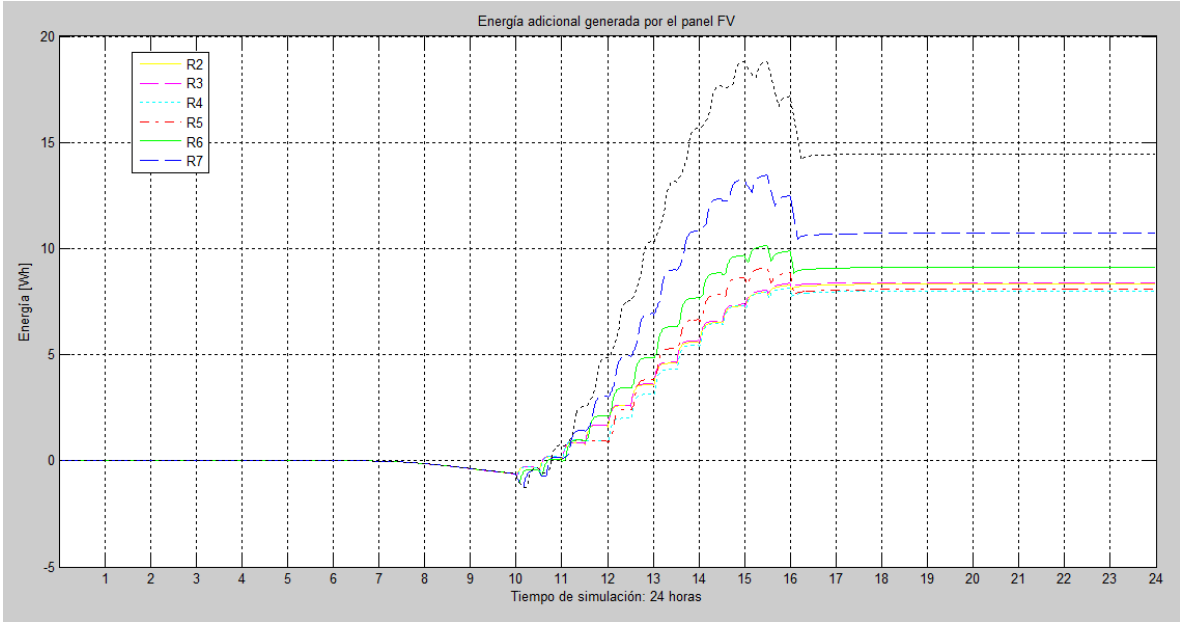
Figura 44. Energía generada para diferentes regímenes de riego.



Aunque la energía generada por el sistema de riego incrementa considerablemente en diferentes regímenes de riego, la energía adicional generada durante un día no lo hace y esto es debido al incremento de la energía consumida por el sistema de riego.

La Figura 45 muestra el comportamiento de la energía adicional generada. Permite inferir que la irrigación solo es potencialmente viable ente 10:00 a.m. y 03:00 p.m. para tiempos de riego superiores a los 5 minutos.

Figura 45. Energía adicional generada para diferentes regímenes de riego.



7. CONCLUSIONES

Se comprueba la validez de *TRNSYS* como una herramienta útil para la simulación del comportamiento térmico y eléctrico en sistemas solares fotovoltaicos, permitiendo así determinar la energía generada y asegurar una mayor eficacia en el uso de los recursos naturales disponibles.

Se evidenció de forma gráfica que el proceso de enfriamiento por irrigación es más efectivo en horas de alta irradiación solar, al mitigar la temperatura de operación del panel FV en aproximadamente 18 °C durante el proceso y, a su vez, incrementar la potencia en 18 W.

El estudio realizado en este trabajo de grado permitió evidenciar que un mayor tiempo de riego como estrategia de mitigación de calor incrementa la energía diaria producida por el panel FV pero, la energía adicional generada no evidencia incrementos significativos. Esto se debe que el incremento del tiempo de irrigación también incrementa la energía consumida diariamente por el sistema de riego.

Se determinó que un tiempo de irrigación superior a los 5 minutos solo es viable entre las 10:00 a.m. y las 03:00 p.m. Después de ese tiempo, la energía consumida por el sistema de riego es mayor que la generada adicionalmente por el panel FV, generando pérdidas.

La ventaja del manejo del modelo RC implementado en el software *TRNSYS*, es facilitar el modelado y el manejo de las variables utilizadas, buscando mejorar su desempeño ante diferentes escenarios ambientales y forzados. Adicionalmente, el modelo podrá ser adaptado sin mayor dificultad a otras simulaciones que permitan obtener un mayor beneficio energético del panel FV.

Se proporciona un modelado térmico y de generación del panel FV en TRNSYS-MATLAB para realizar los trabajos futuros del proyecto COLCIENCIAS.

BIBLIOGRAFÍA

AKBARZADEH A. y WADOWSKI T., “Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 16, no 1, pp. 81–87, 1996.

ALVARADO FAJARDO A. C., “Análisis, diseño y simulación de sistema solar fotovoltaico para suministro eléctrico en apoyo a programa nutricional en la escuela rural el cardonal, Tibaná (Boyacá) – Colombia”, Magister en ingeniería con énfasis en energías alternativas, Universidad Libre, 2014.

ARIZMENDI A. M., “Manual básico de Matlab”, p. 52, Servicios Informáticos U.C.M, Apoyo a Investigación y Docencia, 2010.

ÇENGEL Y. A., *Transferencia de calor y masa*, Tercera ed. 2007.

FIGUEIRA G. y ANGEL H. J., “Climatología: Radiación, Balance energético. Temperatura”, *Books Abroad*, vol. 19, no 3, p. 8, 1945.

GABRIEL E. y LAZO C., “Diseño Y Simulación Del Comportamiento De Un Sistema Híbrido De Potencia”, 2010.

HASANUZZAMAN M., MALEK A. B. M. A., ISLAM M. M., PANDEY A. K., y RAHIM N. A., “Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review”, *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 25–45, 2016.

HINOJOSA J., “Simulación y análisis del sistema solar térmico de una vivienda energéticamente eficiente memoria”, Universidad de Chile, 2011.

HUSSEIN H. A., NUMAN A. H., y ABDULRAHMAN R. A., “Improving the Hybrid Photovoltaic/ Thermal System Performance Using Water Cooling Technique and (Zn -H₂O) Nanofluid”, Int. J. Photoenergy, vol. 2017, no 3, pp. 1–14, 2017.

INCROPERA F. P. y DEWITT D., Fundamentos de transferencia de calor, Cuarta edi. 1999.

ITER-S.A, Instalación solar fotovoltaica, E38600 ed. Santa Cruz de Tenerife: Plígono Industrial de Granadilla, 2008.

KERN D. Q., Procesos de Transferencia de Calor, Primera ed. 1999.

KLEIN S. A. y BECKMAN W. A., “Volume 5 Mathematical Reference”, Trnsys 16, vol. 5, p. 389 to 396, 2007.

KLEIN S. A., “Volume 1 Getting Started”, Trnsys 16, vol. 1, pp. 1–87, 2007.

KREITH F., MANGLIK R. M., y BOHN M. S., Principios de transferencia de calor, Séptima ed. 2013.

LÓPEZ E., “Simulación mediante TRNSYS de un banco de ensayos de colectores solares térmicos. Implementación de nuevos componentes”, Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena, 2009.

MÉNDEZ MUÑIZ J. M. y CUERVO GARCÍA R., Energía Solar Fotovoltaica, Cuarta edi. 2010.

MICROSOFT DEVELOPER NETWORK, “Component Object Model”, MSDN Library, 1993. [En línea]. Disponible en: <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/aa286559.aspx>.

MOYA ARRUÉ C. H., “Modelamiento térmico unidimensional y transiente de un panel fotovoltaico”, Tesis de pregrado, Universidad de Chile, 2016.

NAVARRINA F., COLOMINAS I., GÓMEZ H., PARÍS J., y CASTELEIRO M., “Lenguaje Fortran: Origen Y Evolución”, GMNI Grup. métodos numéricos en Ing.

OSMA G., FLOREZ C., ROJAS W., FLOREZ J., y ORDOÑEZ G., “Mejoramiento del desempeño de paneles fotovoltaicos a partir de la irrigación forzada de la superficie superior Improvement of the performance of photovoltaics panels by forced irrigation on the upper surface”, vol. 16, no 2, pp. 161–171, 2017.

OSMA PINTO G. A., “Caracterización del desempeño de paneles FV en terrazas de edificaciones localizadas en entornos con clima tropical cálido”, Universidad Industrial de Santander, Tesis doctoral, 2016.

PINTO G. A. O. y Plata G. O., “Desarrollo sostenible en edificaciones”, Rev. Uis Ing., vol. 9, no 1, 2010.

REDDY S. R., EBADIAN M. A., y LIN C. X., “A review of PV-T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling”, Int. J. Heat Mass Transf., vol. 91, pp. 861–871, 2015.

REYES S., “Cálculo y selección de un colector solar y de un módulo fotovoltaico para uso doméstico, conforme a la norma mexicana NMX-ES-NORMEX-2005-energía solar- rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares”, Instituto Politécnico Nacional, 2008.

ROMERO RODRÍGUEZ L., “Análisis de la reducción de consumos energéticos en un edificio al integrar un sistema fotovoltaico y de micro-cogeneración mediante trnsys”, Universidad de Sevilla, 2014.

SHAN F., TANG F., CAO L., y FANG G., “Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors with different configurations”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 778–786, 2014.

SILVA MAGGI A. S., “Modelamiento Térmico De Un Panel Fotovoltaico Con Disipador De Calor Operando En El Norte De Chile”, Universidad de Chile, 2013.

SIMEC, “Proyecto Simec Chile SRL”, proyecto energético Chile, 2010.

SMITH R. M., JORDAN D. C., y KURTZ S. R., “Outdoor PV module degradation of current-voltage parameters”, en *World renewable energy forum*, 2012, no May, pp. 1–9.

SOLAR ENERGY LABORATORY, “Volume 9 Weather Data”, *Sol. Energy Lab.*, vol. 9, 2006.

TRNSYS, “Volume 8 Programmer’s Guide”, TRNSYS 16 a TRaNsient Syst. Simul. Progr., vol. 8, 2007.

VARMA R. K., MEMBER S., RAHMAN S. A., VANDERHEIDE T., y DANG M., “Harmonic Impact of a 20 MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network”, vol. 7707, no c, pp. 1–9, 2016.

ANEXOS

ANEXO A. VENTANA DE CONFIGURACIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS Y LA RUTA DE ENLACE CON ARCHIVOS EXTERNOS

Este anexo contiene la descripción de los componentes utilizados para la simulación del panel FV y la ruta de enlace con archivos externos, los componentes son descritos en la Tabla A1.

Tabla A1. Componentes seleccionados.

Subrutina	Componente
Type155	Panel fotovoltaico
Type9a	Lector de datos meteorológicos
Type14h	Variador de velocidad del viento
Type25c	Impresora de variables
Type65d	Graficadora de variables

Type 155

Para abrir el menú de configuración general del **Type155** se debe seleccionar el icono y presionar dos veces clic izquierdo. La ventana emergente se observa en la Figura A1.

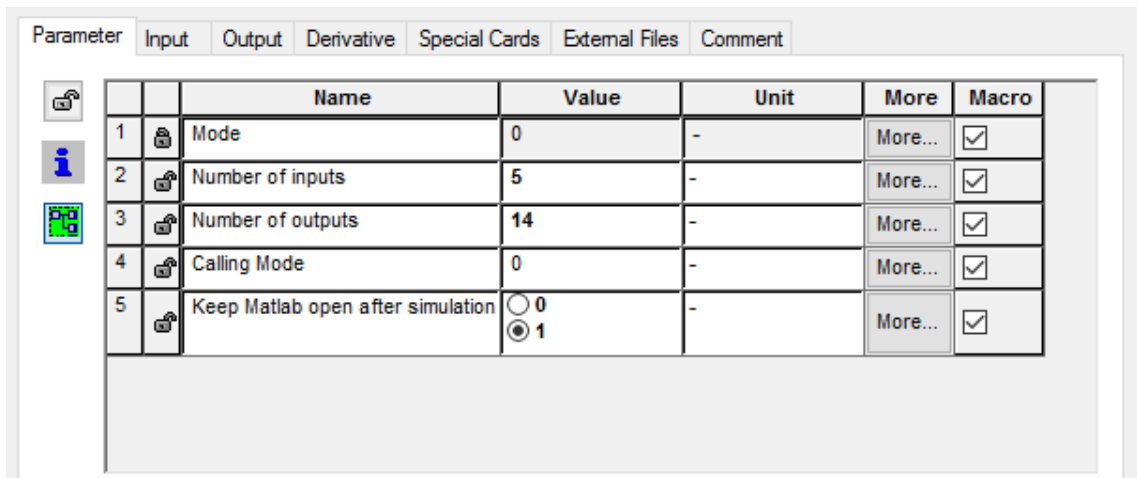


Figura A1. Menú de configuración general del *Type155*.

La ruta del Script de Matlab se ingresa en la opción “Special Cards” tal como se muestra en la Figura A2 y existen tres formas de escribirla.

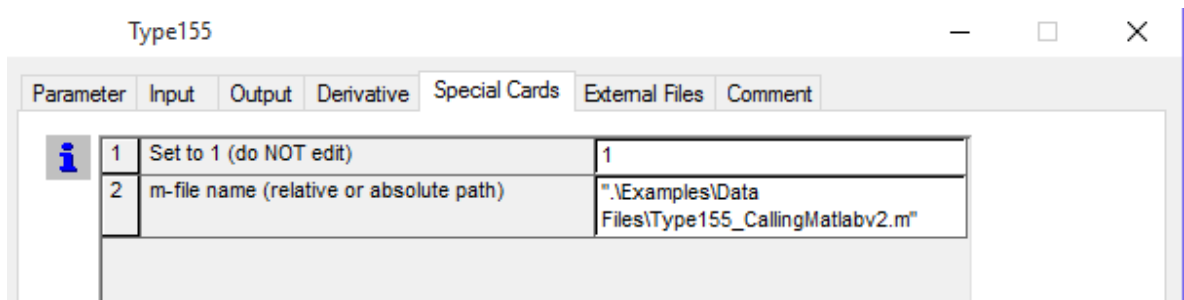


Figura A2. Ruta para llamar archivos externos con el *Type155*.

- Relativo a la plataforma: Si el archivo de Matlab se encuentra dentro de la misma carpeta donde está el proyecto actual de TRNSYS, no se especifica ninguna ruta y solo se escribe el nombre del formato m dentro de comillas. Por ejemplo, “Type155_CallingMatlabv2.m”.
- Absoluto: Cuando el archivo de Matlab se encuentra ubicado en una carpeta diferente al proyecto actual de TRNSYS la ruta comienza con la ubicación

específica. Por ejemplo, "C:\Trnsys17\Examples\Data Files\Type155_CallingMatlabv2.m".

- Relativo al directorio raíz de TRNSYS: Si el archivo de Matlab está dentro del directorio del software la ruta comienza con "\" seguido de la ubicación relativa. Por ejemplo, ".\Examples\Data Files\Type155_CallingMatlabv2.m".

Type9a

Para abrir el menú de configuración general del **Type9a** se debe seleccionar el icono y presionar dos veces clic izquierdo. La ventana emergente se observa en la Figura A3.

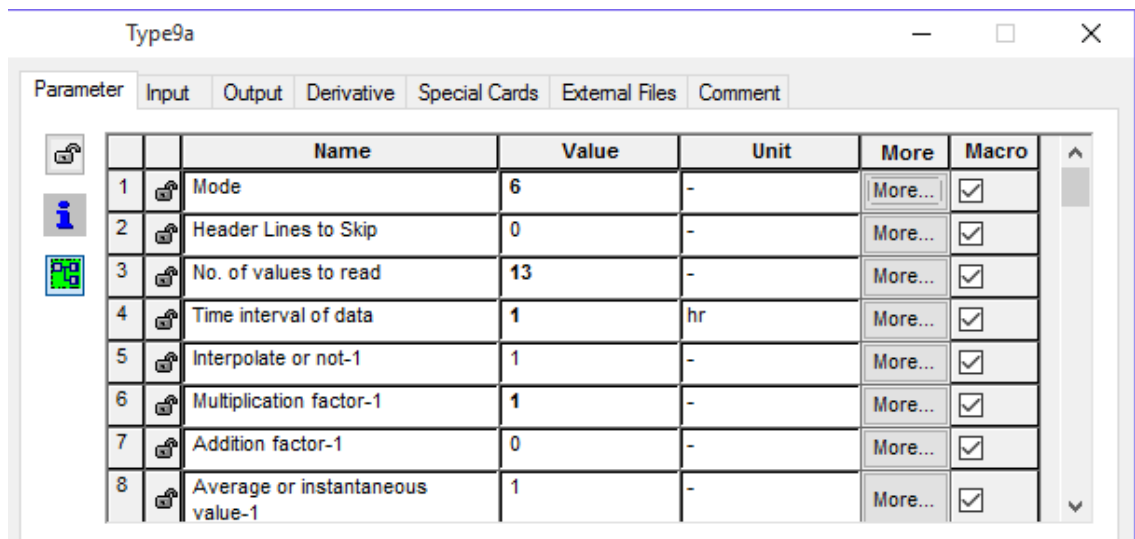


Figura A3. Menú de configuración general del *Type9a*.

La ruta documento de datos se ingresa en la opción "External Files" como se muestra en la Figura A4 y existen tres formas de escribirlo [29].

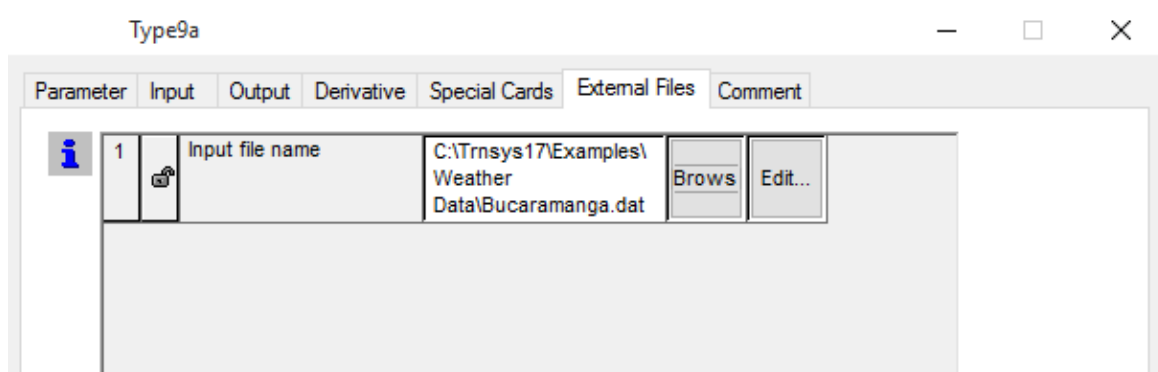


Figura A4. Ruta para llamar archivos externos con el *Type9a*.

- Relativo a la plataforma: Si el documento de datos se encuentra dentro de la misma carpeta donde está el proyecto actual de TRNSYS, no se especifica ninguna ruta y solo se escribe el nombre del formato m dentro de comillas. Por ejemplo, "Bucaramanga.dat".
- Absoluto: Cuando el documento de datos se encuentra ubicado en una carpeta diferente al proyecto actual de TRNSYS la ruta comienza con la ubicación específica. Por ejemplo, "C:\Trnsys17\Examples\Weather Data\Bucaramanga.dat".
- Relativo al directorio raíz de TRNSYS: Si el documento de datos está dentro del directorio del software la ruta comienza con "\" seguido de la ubicación relativa. Por ejemplo, ".\Examples\Weather Data\Bucaramanga.dat".

Type14h

Para abrir el menú de configuración general del **Type14h** se debe seleccionar el icono y presionar dos veces clic izquierdo. La ventana emergente se observa en la Figura A5.

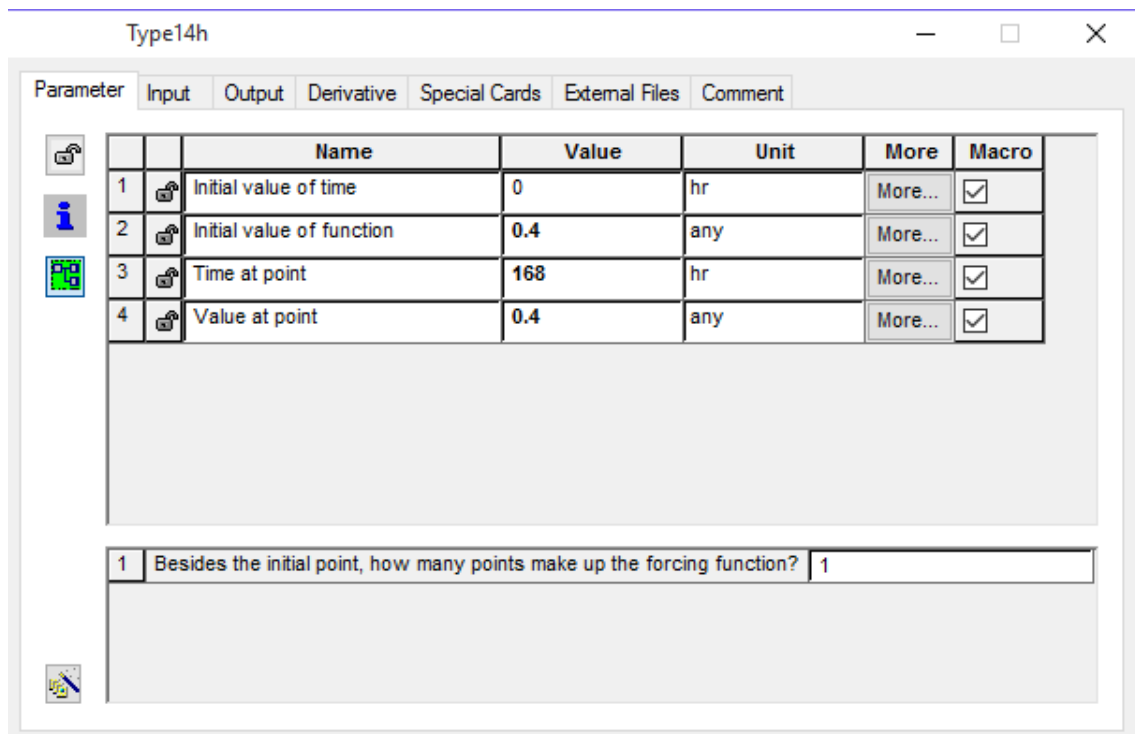


Figura A5. Menú de configuración general del *Type14h*.

Type65d

Para abrir el menú de configuración general del ***Type65d*** se debe seleccionar el icono y presionar dos veces clic izquierdo. La ventana emergente se observa en la Figura A6.

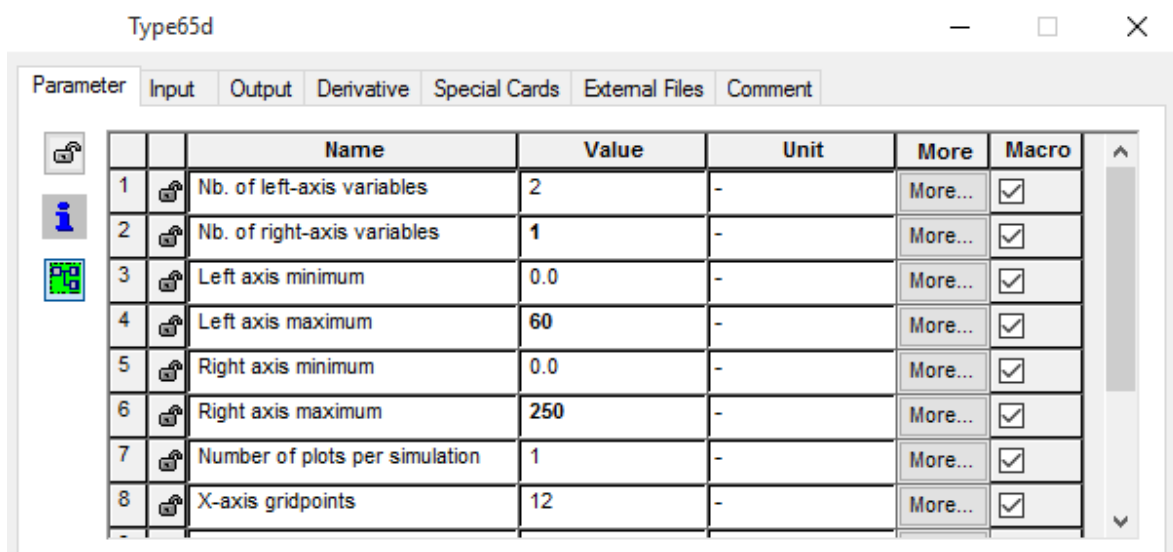


Figura A6. Menú de configuración del *Type65d*.

En la opción de configuración “Special Cards” permite ponerle títulos a los ejes y también a la gráfica en general, tal como se observa en la Figura A7.

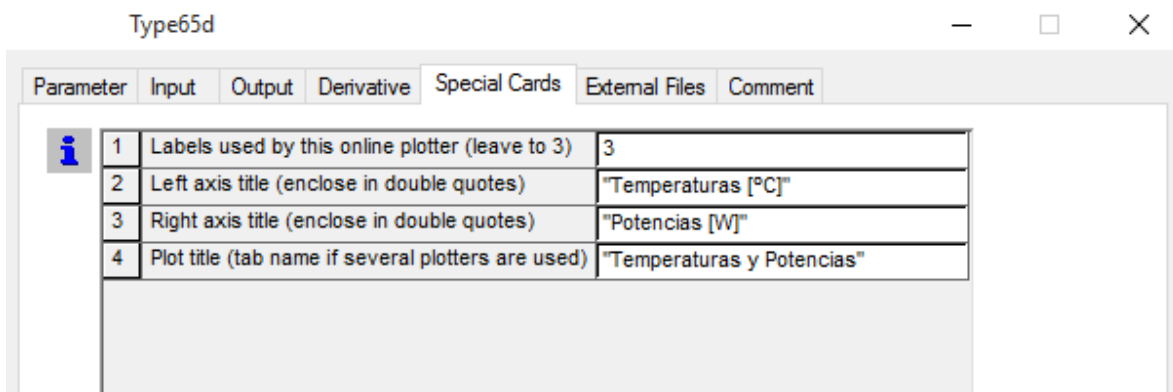


Figura A7. Menú de configuración para la titulación de ejes.

Type 25c

Para abrir el menú de configuración general del **Type25c** se debe seleccionar el icono y presionar dos veces clic izquierdo. La ventana emergente se observa en la Figura A8.

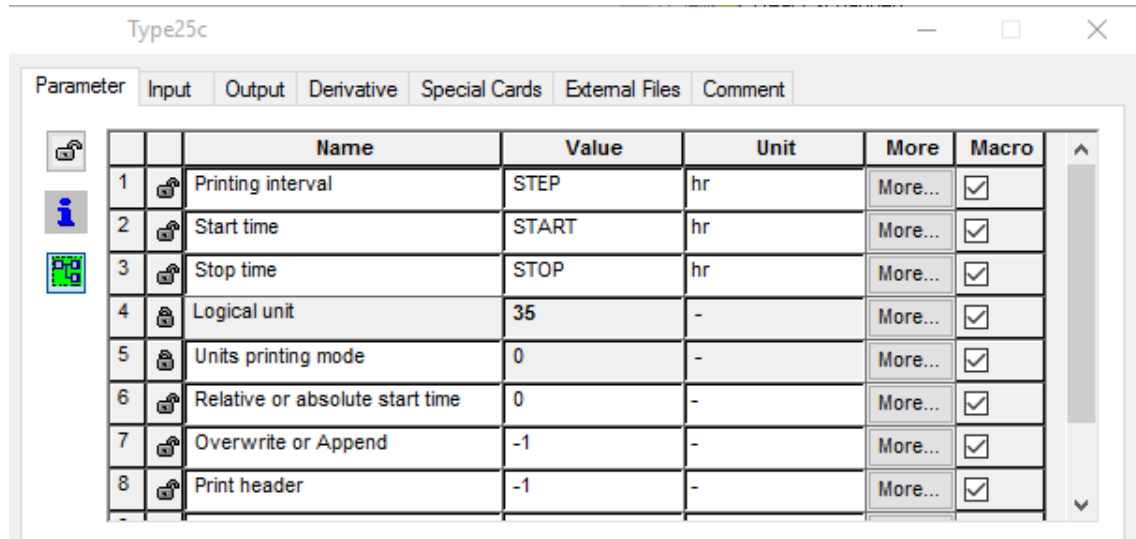


Figura A8. Menú de configuración general del *Type25c*.

ANEXO B. INTERCONEXIÓN DE COMPONENTES.

Al utilizar el software *TRNSYS*, se requiere interconectar los componentes seleccionados. En este anexo se presenta el enlace entre los componentes que modelan el panel FV.

Para enlazar los componentes seleccionados se utiliza la opción “*Link mode*”, ubicado en dos partes: la ruta de acceso *Assembly* → *Link mode* o el noveno icono de la barra de acceso rápido como se muestran en las figuras B1(a) y B1(b), respectivamente.

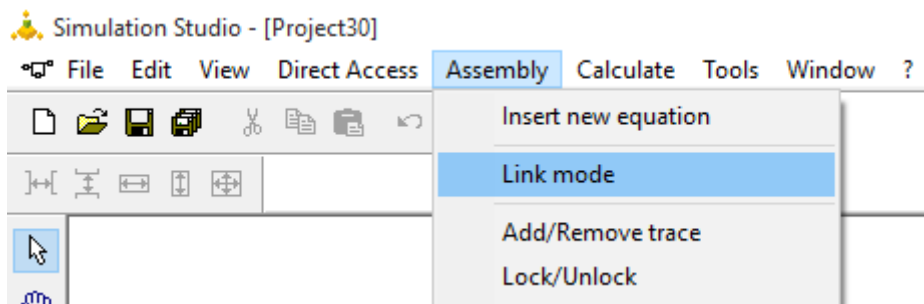


Figura B1 (a). Ubicación del comando *LINK MODE*.

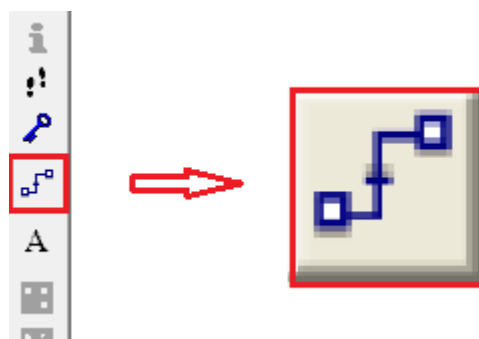


Figura B1 (b). Ubicación del comando *LINK MODE*.

Calculadora → Type155

La calculadora tiene dos salidas que son leídas como entradas por el Type155. La Figura B2 presenta la conexión entre estos dos componentes y la Tabla B1 describe cada una de ellas.

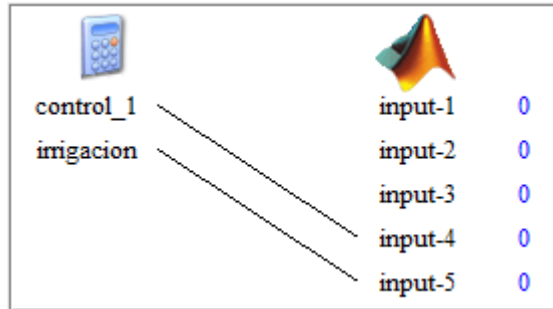


Figura B2. Interconexión entre *Equa* y *Type155*.

Tabla B1. Variables enlazadas entre *Equa* y *Type155*.

Nº	Calculadora	Type155	Descripción
1	Control_1	Input-4	Representa el contador de pasos de tiempo respecto al tiempo de la simulación. Se utiliza como referencia para el control de irrigación.
2	irrigación	Input-5	Es una condición que representa si la simulación es con irrigación o sin irrigación.

Type14h → Type155

La función creada con el Type14h representa la velocidad del viento y el valor instantáneo de salida se conecta con una de las entradas del Type155 tal como se observa en la Figura B3.

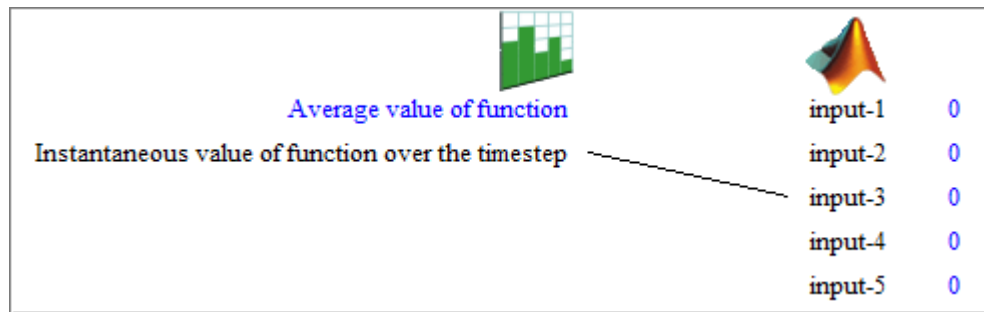


Figura B3. Interconexión entre *Type14h* y *Type155*.

Type9a → *Type155*

El lector de datos meteorológicos posee trece salidas que representan cada una de las variables del archivo de datos proporcionados por la estación meteorológica, de los cuales dos son utilizadas como entradas para el *Type155*. La Figura B4 presenta la conexión de los componentes y son descritas en la Tabla B2.

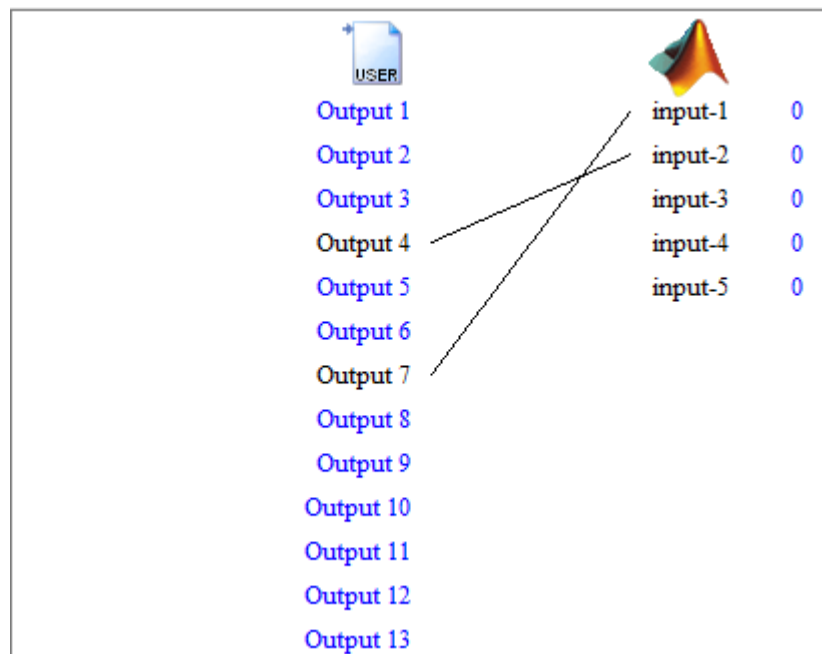


Figura B4. Interconexión entre *Type9a* y *Type155*.

Tabla B2. Variables enlazadas entre *Type9a* y *Type155*.

Nº	Type9a	Type155	Descripción
1	Output 4	Input-2	Representa la irradiación solar.
2	Output 7	Input-1	Representa la temperatura ambiente.

Type155 → *Type25c*

Al finalizar cada iteración, el *Type155* envía las 17 salidas seleccionadas para que sean guardadas por el *Type25c*. La Figura B5 presenta la conexión entre los componentes y la Tabla B3 describe cada una de las variables.

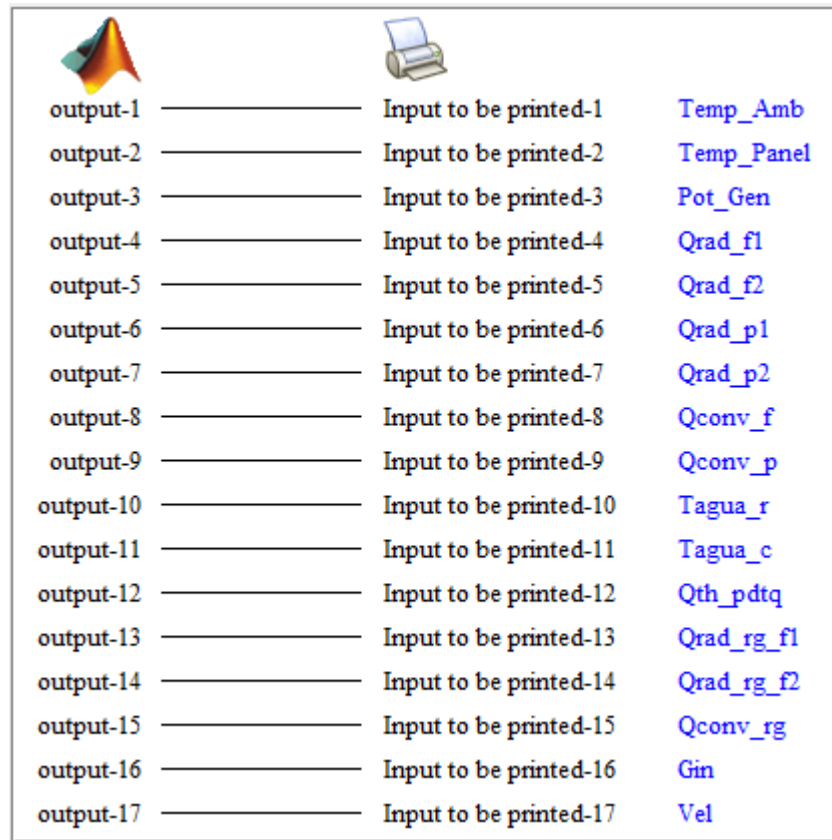


Figura B5. Interconexión entre *Type155* y *Type25c*.

Tabla B3. Variables enlazadas entre *Type155* y *Type25c*.

Nº	Type9a	Type155	Descripción
1	Output 1	Input-1	Temperatura ambiente
2	Output 2	Input-2	Temperatura de operación del panel FV.
3	Output 3	Input-3	Potencia generada por el panel FV.
4	Output 4	Input-4	Transferencia de calor por radiación frontal 1.
5	Output 5	Input-5	Transferencia de calor por radiación frontal 2.
6	Output 6	Input-6	Transferencia de calor por radiación posterior 1.
7	Output 7	Input-7	Transferencia de calor por radiación posterior 2.
8	Output 8	Input-8	Transferencia de calor por convección frontal.
9	Output 9	Input-9	Transferencia de calor por convección posterior.
10	Output 10	Input-10	Temperatura del agua de riego.
11	Output 11	Input-11	Temperatura del agua de la cava.
12	Output 12	Input-12	Transferencia de calor de la cava al entorno.
13	Output 13	Input-13	Transferencia de calor por radiación frontal 1- Película de agua.
14	Output 14	Input-14	Transferencia de calor por radiación frontal 2- Película de agua.
15	Output 15	Input-15	Transferencia de calor por convección- Película de agua.
16	Output 16	Input-16	Irradiación solar.
17	Output 17	Input-17	Velocidad del viento.

Type155 → *Type65d*

Es necesario ver gráficamente el comportamiento de las variables de estudio mientras la simulación está en progreso. En consecuencia, las salidas del *Type155* que son de interés se enlazan con el *Type65d*. Las figuras B6(a) y B6(b) muestran las conexiones de las variables que son graficadas.

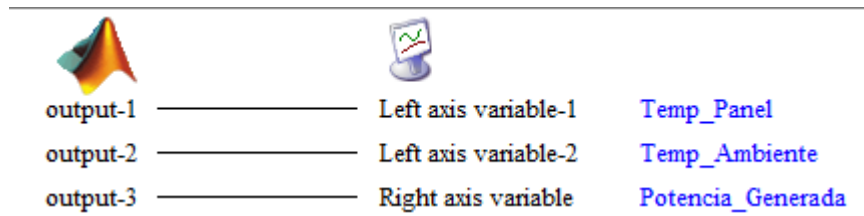


Figura B6(a). Interconexión entre *Type155* y *Type65d*.

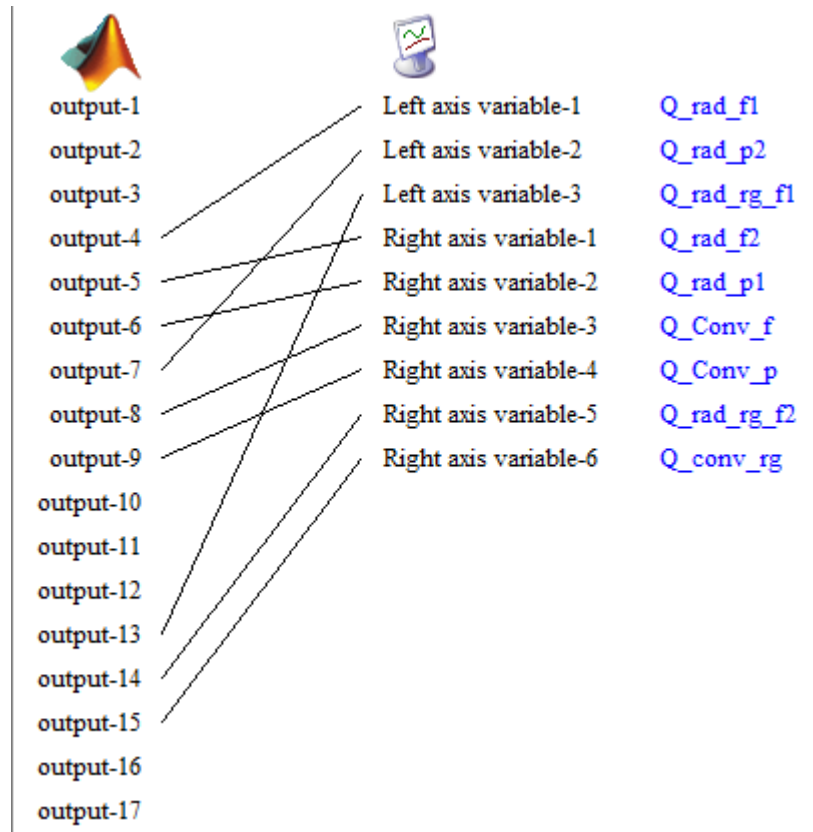


Figura B6(a). Interconexión entre *Type155* y *Type65d*

ANEXO C. ESTRUCTURA DEL SCRIPT DE *MATLAB*.

La estructura del Script de *MATLAB* es explicada a partir del diagrama de flujo indicado en el siguiente enlace: [LIBRO ANEXO DIGITAL C - DIAGRAMA DE FLUJO.pdf](#)

ANEXO D. SCRIPT DE *MATLAB*.

En este anexo se encuentra el Script desarrollado en *MATLAB* del panel FV.

```
%MODELADO TÉRMICO DEL PANEL FV UBICADO EN LA TERRAZA DEL EDIFICIO DE
%INGENIERÍA ELÉCTRICA
%Autor: Dr. Germán Osma
```

```
%A medida que se va desarrollando el código en Matlab se irá asignando un
%valor al mFileErrorCode; dicho valor es leído por TRNSYS y si surge un
%error nos indicará el numero asignado.
% mFileErrorCode= 100, indica el inicio del código en Matlab que
%TRNSYS analizará.
%mFileErrorCode =0; Le avisamos a TRNSYS que el código de Matlab ha
finalizado y que no hubo errores.
```

```
%Es necesario leer la guía del programador, ya que se necesitan datos
%fundamentales de ella. Por ejemplo: Significado de INFO(3), INFO(6),
%INFO(7), etc...
```

```
%INICIO
```

```
mFileErrorCode = 100;
```

```
%PARÁMETROS ASIGNADOS
```

```
%Parámetros del Panel FV
```

```
% Potencia nominal del panel W
Pnom=250;
% Área del panel [m^2]
A = 1.6;
% Eficiencia [-]
eta0 = Pnom/(A*1000);
% Coeficiente térmico [1/K]
b = -0.0043;
% Coeficiente de transmitancia
a = 0.9;
% Capacidad térmica [J/m^2-K]
Cp = 10140;
% Constante Stefan-Boltzmann [W/m^2-K^4]
sigma = 5.67e-8;
% Emitancia frontal
Epv_f = 0.9;
```

```

% Emitancia posterior
Epv_p = 0.85;
% Ángulo de inclinación [rad]
angle = 10*(pi/180);
%Factores de participación de la transferencia de calor por radiación
Ff_1 = (1/2)*(1+cos(pi-angle));
Ff_2 = (1/2)*(1-cos(pi-angle));
Fp_1 = (1/2)*(1+cos(angle));
Fp_2 = (1/2)*(1-cos(angle));
%Irradiancia máxima [W/m^2]
Gext = 1278;

%Parámetros del sistema de riego

%Resistencia de riego [W/°C]
Rrg = 0.00285;
%Emitancia del agua [-]
Epv_a = 0.9;
%Resistencia de mezclado [W/°C]
Rmz = Rrg/5;
%Volumen de agua de riego [l/m]
Vrg = 4.5;
%Capacidad específica [J/kg-K]
Cagua = 4180;
%Capacidad térmica [J/K]
Crg = Vrg*Cagua;
% Coeficiente de enfriamiento dentro de la cava [°C/W]
km_c = 3.5;
%Resistencia de enfriamiento [W/°C]
km_r = 1/km_c;
paso_v4 = 10;

%INFO(3) nos indica el número de entradas que posee el type 155.
nI = trnInfo(3);
%INFO(6) nos indica el número de salidas que posee el type 155.
nO = trnInfo(6);

%ASIGNAMOS LAS ENTRADAS DEL Type 155.

%Temperatura ambiente
Tamb = trnInputs(1);
%Irradiación solar
Gin = trnInputs(2);
%Velocidad del viento
vel = trnInputs(3);
%control_1 Es un contador asignado para el control de irrigación.
%Relaciona el tiempo y el paso (DeltaT). Así cuando sean las 10 am para un
paso de 1 segundo,
%control_1 tendrá un valor de 10*3600= 36000 y un minuto después tendrá un
valor de 36060. De ésta forma se logró diseñar el control de irrigación
%puesto que no habian types que hicieran tal control para los 13 intervalos
%propuestos.

```

```

control_1 = trnInputs(4);
% Condición para determinar si la simulación es con irrigación o no.
irrigacion = trnInputs(5);

mFileErrorCode = 110;    %Valor asignado

%-----
%-----

%A CONTINUACIÓN SE HARÁ EL PRIMER LLAMADO DE LA SIMULACIÓN
%INFO(7) indica cuántas veces se ha llamado a la Unidad en el paso de
%tiempo actual. En la guía del programador se encuentran dichos valores y
%su significado.

if ( (trnInfo(7) == 0) & (trnTime-trnStartTime < 1e-6) )

    iCall = 0;

    %Definimos la primera iteración
    iStep = 1;

    %Ingresamos los valores iniciales que tienen proceso iterativo
    Tpanel_v4      = 23;
    Tagua_r_v4     = 30;
    Tagua_c_v4     = 30;
    Qth_pdtq_v4    = 0;
    Qth_agtq_v4    = 0;
    Q_rad_rg_f2_v4 = 0;
    Q_rad_rg_f1_v4 = 0;
    Q_conv_rg_v4   = 0;
    Pot_riego      = 0;
    %Definimos el número de iteración
    nTimeSteps = (trnStopTime-trnStartTime)/trnTimeStep + 1;

    mFileErrorCode = 120

end

% -----
% -----

mFileErrorCode = 140;    % Inicio del proceso iterativo

%Irradiancia sobre el panel FV
Gpanel_v4      = Gin*A;
%Temperatura del cielo
Tsky_v4        = 0.0552*(Tamb)^1.5;
%Nubosidad
Nub_v4         = 1-(Gin/Gext);
%Temperatura del cielo corregida

```

```

Tsky_mod_v4      = (1-Nub_v4)*Tsky_v4+Nub_v4*Tamb;
%Coeficiente de convección
Coef_conv_v4     = -0.5345*(vel)^2 + 9.5819*vel +2.25;
%Irradiancia efectiva sobre el panel FV
Eff_Gt_v4        = Gpanel_v4*a;

mFileErrorCode =150;
if ( irrigacion == 1) %Condición para determinar si es con irrigación o no
% Paso de tiempo
paso_v4 = 1;

%Intervalos de irrigación.
if (control_1>36000 && control_1<36060)|| (control_1>37800 &&
control_1<37860)|| (control_1>39600 && control_1<39660)||
(control_1>41400 && control_1<41460)|| (control_1>43200 &&
control_1<43260)|| (control_1>45000 && control_1<45060)||
(control_1>46800 && control_1<46860)|| (control_1>48600 &&
control_1<48660)|| (control_1>50400 && control_1<50460)||
(control_1>52200 && control_1<52260)|| (control_1>54000 &&
control_1<54060)|| (control_1>55800 && control_1<55860)||
(control_1>57597 && control_1<57660)

mFileErrorCode =160;
    %Potencia consumida por el sistema de riego
    Pot_riego = 15;
    %Las transferencias de calor por radiación y convección son cero
    %durante la irrigación
    %Transferencia de calor por radiación frontal 1
    Qrad_f1_v4 = 0;
    %Transferencia de calor por radiación frontal 2
    Qrad_f2_v4 = 0;
    %Transferencia de calor por convección frontal
    Qconv_f_v4 = 0;
    %Corriente o flujo de calor de enfriamiento
    F_calor_enf_v4 = (Tpanel_v4-Tagua_r_v4)/Rrg;
    %Transferencia de calor por radiación frontal 1 en la película de
    %agua
    Q_rad_rg_f1_v4      =      sigma*A*Epv_a*Ff_1*((Tagua_r_v4+273)^4-
(Tamb+273)^4);
    %Transferencia de calor por radiación frontal 2 en la película de
    %agua
    Q_rad_rg_f2_v4      =      sigma*A*Epv_a*Ff_2*((Tagua_r_v4+273)^4-
(Tsky_mod_v4+273)^4);
    %Transferencia de calor por radiación total en la película de agua
    Q_rad_gt_T_v4 = Q_rad_rg_f1_v4+Q_rad_rg_f2_v4;
    %Coeficiente convectivo en la película de agua
    Coef_conv_p_v4 = (28.53*vel+93.094)*A;
    %Transferencia de calor por convección frontal en la película de
    %agua
    Q_conv_rg_v4 = Coef_conv_p_v4*(Tagua_r_v4-Tamb);

mFileErrorCode =170;
    %Corriente o flujo de calor de mezclado
    F_calor_mez_v4 = (Tagua_r_v4-Tagua_c_v4)/Rmz;

```

```

    %Temperatura del agua de riego
    Tagua_r_i_v4 = Tagua_r_v4+(1/Crg)*(F_calor_enf_v4-Q_rad_gt_T_v4-
Q_conv_rg_v4-F_calor_mez_v4);
    %Volumen del agua de la cava
    Vol_agua_v4 = 30;
    %Volumen del agua residual en la cava
    V_agua_re_v4 = Vol_agua_v4-Vrg;
    %Capacidad térmica
    Cap_termica_v4 = V_agua_re_v4*Cagua;
    %Transferencia de calor de la cava al entorno
    Qth_agtq_v4 = (Tagua_c_v4-Tamb)/km_r;
    %Temperatura del agua de la cava
    Tagua_c_i_v4 = Tagua_c_v4 +(1/Cap_termica_v4)*(F_calor_mez_v4-
Qth_agtq_v4-Qth_pdtq_v4);
    %Transferencia de calor de la cava al entorno
    Qth_pdtq_i_v4 = (Qth_pdtq_v4+1);

else
mFileErrorCode =180;
    %Cuando no está en el intervalo de irrigación:
    %No hay potencia consumida por la bomba de agua
    Pot_riego = 0;
    %Transferencia de calor por convección frontal
    Qconv_f_v4 = Coef_conv_v4*A*(Tpanel_v4-Tamb);
    %Transferencia de calor por radiación frontal 1
    Qrad_f1_v4 = sigma*A*Epv_f*Ff_1*((Tpanel_v4+273)^4-
(Tamb+273)^4);
    %Transferencia de calor por radiación frontal 2
    Qrad_f2_v4 = sigma*A*Epv_f*Ff_2*((Tpanel_v4+273)^4-
(Tsky_mod_v4+273)^4);
    %Los valores debidos a la irrigación toman un valor de cero o a sus
    %condiciones iniciales
    %Corriente o flujo de calor de enfriamiento
    F_calor_enf_v4 = 0;
    %Temperatura del agua de riego
    Tagua_r_i_v4 = 30;
    %Temperatura del agua de la cava
    Tagua_c_i_v4 = 30;
    %Transferencia de calor de la cava al entorno
    Qth_pdtq_i_v4 = 0;

    Qth_agtq_v4 = 0;
    %Transferencia de calor por radiación frontal 1 en la película de
    %agua
    Q_rad_rg_f1_v4 = 0;
    %Transferencia de calor por radiación frontal 2 en la película de
    %agua
    Q_rad_rg_f2_v4 = 0;
    %Transferencia de calor por convección frontal en la película de
    %agua
    Q_conv_rg_v4 = 0;
mFileErrorCode=190;
end

```

```

else
    %Cuando el proceso es sin irrigación:
    %Paso de tiempo
    paso_v4 = 10;
    %Transferencia de calor por convección frontal
    Qconv_f_v4 = Coef_conv_v4*A*(Tpanel_v4-Tamb);
    %Transferencia de calor por radiación frontal 1
    Qrad_f1_v4 = sigma*A*Epv_f*Ff_1*((Tpanel_v4+273)^4-(Tamb+273)^4);
    %Transferencia de calor por radiación frontal 2
    Qrad_f2_v4 = sigma*A*Epv_f*Ff_2*((Tpanel_v4+273)^4-
(Tsky_mod_v4+273)^4);

    F_calor_enf_v4 = 0;

end

%Después del control de irrigación, se calculan las variables que no
%dependen de ella.
%Transferencia de calor por radiación frontal
Qrad_f_v4 = Qrad_f1_v4+Qrad_f2_v4;
%Transferencia de calor por radiación posterior 1
Qrad_p1_v4 = sigma*A*Epv_p*Fp_1*((Tpanel_v4+273)^4-(Tamb+273)^4);
%Transferencia de calor por radiación posterior 2
Qrad_p2_v4 = sigma*A*Epv_p*Fp_2*((Tpanel_v4+273)^4-(Tsky_mod_v4+273)^4);
%Transferencia de calor por radiación posterior
Qrad_p_v4 = Qrad_p1_v4+Qrad_p2_v4;
%Transferencia de calor por radiación total
Qrad_v4 = Qrad_f_v4+Qrad_p_v4;
%Transferencia de calor por convección posterior
Qconv_p_v4 = Coef_conv_v4*A*(Tpanel_v4-Tamb);
%Transferencia de calor por convección total
Qconv_v4 = Qconv_f_v4 + Qconv_p_v4;

%Potencia generada
Pgen_v4 = Gin*A*eta0*(1+b*(Tpanel_v4-25));
%Variación de calor en el panel FV
Q_panel_v4 = Eff_Gt_v4-Pgen_v4-Qrad_v4-Qconv_v4-F_calor_enf_v4;
%Razón de la variación de la Temperatura de operación del panel FV
Razon_var_v4 = Q_panel_v4/(A*Cp);
%Temperatura de operación del panel FV
Tpanel_i_v4 = Razon_var_v4*paso_v4 + Tpanel_v4;

% --- Se definen las salidas de interés ---
mFileErrorCode = 210;

trnOutputs(1) = Tamb;
trnOutputs(2) = Tpanel_i_v4;
trnOutputs(3) = Pgen_v4;
trnOutputs(4) = Qrad_f1_v4;
trnOutputs(5) = Qrad_f2_v4;
trnOutputs(6) = Qrad_p1_v4;
trnOutputs(7) = Qrad_p2_v4;
trnOutputs(8) = Qconv_f_v4;

```

```

trnOutputs(9) = Qconv_p_v4;
trnOutputs(10) = Tagua_r_v4;
trnOutputs(11) = Tagua_c_v4;
trnOutputs(12) = Qth_pdtq_v4+Qth_agtq_v4;
trnOutputs(13) = Q_rad_rg_f1_v4;
mFileErrorCode = 230;
trnOutputs(14) = Q_rad_rg_f2_v4;
trnOutputs(15) = Q_conv_rg_v4;
trnOutputs(16) = Gin;
trnOutputs(17) = vel;
trnOutputs(18) = Pot_riego;

mFileErrorCode = 0;
%Defino las variables necesarias para el proceso iterativo
Tpanel_v4 = Tpanel_i_v4;
Tagua_r_v4 = Tagua_r_i_v4;
Tagua_c_v4 = Tagua_c_i_v4;
Qth_pdtq_v4 = Qth_pdtq_i_v4;
Return
%FIN

```