

**Mejoramiento de un sistema inteligente de irrigación de paneles
fotovoltaicos ubicados sobre techo verde**

Juan Diego Martínez Jiménez, Gustavo Adolfo Páez Amador

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico

**Director
German Alfonso Osma Pinto
Doctor en Ingeniería Eléctrica**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas
Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de
Telecomunicaciones
Bucaramanga
2017**

Tabla de contenido

Introducción	13
1 Marco teórico.....	16
1.1 Principio de funcionamiento del panel FV	17
1.2 Afectaciones en la generación FV.....	17
1.3 Principio termodinámico	20
1.4 Sistema de control.....	21
1.5 Estado del arte	22
2 Implementación de las técnicas de irrigación.....	25
2.1 Sistema de irrigación.....	25
2.2 Sistema de control	29
2.3 Sistema de operación.....	30
2.4 Monitorización de los beneficios energéticos durante la irrigación.....	31
2.4.1 Temperatura.....	31
2.4.2 Irradiación solar.....	33
2.4.3 Velocidad del viento.....	34
2.4.4 Humedad.....	35
2.4.5 Rutina de almacenamiento de datos.....	36
3 Configuración de las técnicas de irrigación.....	37
3.1 Técnica estática	38

3.2	Técnica predictiva	40
4	Cálculo del beneficio energético de la técnica de irrigación	48
4.1	Técnica predictiva	49
4.2	Técnica estática	56
4.3	Resultados comparativos.....	62
5	Conclusiones y recomendaciones.....	65
	Referencias.....	68
	Apéndices.....	70

Lista de figuras

Figura 1. Modelo básico de una celda FV. Adaptado de (Klaus et al. 2014).	17
Figura 2. Esquema de refracción y reflexión de una onda incidente. Adaptado de (Klaus et al. 2014).	18
Figura 3. Relación eficiencia eléctrica y temperatura de operación PV. Adaptado de (Teo, Lee, and Hawlader 2012).	19
Figura 4. Convección forzada y natural. Adaptado de (Cengel 2007).	21
Figura 5. Componentes básicos de un sistema de control. Adaptado de (Dorf and Bishop 2011).	21
Figura 6. Sistema FV con irrigación en superficie superior. 1. Panel FV operando con técnica de irrigación estática. 2. Panel FV operando con técnica de irrigación predictiva. 3. Panel FV de referencia. 4. Tubería del sistema de irrigación de la técnica estática. 5. Tubería del sistema de irrigación de la técnica predictiva.	26
Figura 7. Sistema de irrigación y acopio de agua instalados en paneles FV. 1. Sistema de acopio de agua. 2. Tanque de almacenamiento. 3. Electroválvula del sistema de irrigación. 4. Sensor de viento. 5. Piranómetro.	28
Figura 8. Ubicación RTD's. Adaptado de Recurso electrónico disponible en: http://4ndroide.blogspot.com.co/2015/02/arreglosde-paneles-solares-los.html	32
Figura 9. Circuito de adecuación para RTD	33
Figura 10. Piranómetro SMP3. Adaptado de Recurso electrónico disponible en: http://www.kippzonen.com/Download/583/Manual-SMP-series-Smart-Pyranometers	33
Figura 11. Zonas de riego. Adaptado de (Pacheco Rios and Suarez Vásquez 2015)	36
Figura 12. Diagrama de flujo rutina de almacenamiento de datos.	37

Figura 13. Diagrama de flujo técnica de irrigación estática.	39
Figura 14. Diagrama de flujo función irrigación técnica estática.	40
Figura 15. Diagrama de flujo técnica predictiva de irrigación.	42
Figura 16. Diagrama de flujo función asignación.....	43
Figura 17. Modelo ideal de la transferencia de calor por irrigación. Adaptado de (Osma Pinto 2016).....	44
Figura 18. Modelo RC de un panel FV integrado con un sistema de irrigación. Adaptado de (Osma Pinto 2016).	45
Figura 19. Diagrama de flujo irrigación del techo verde.	47
Figura 20. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 1.....	51
Figura 21. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 1.....	52
Figura 22. Resta de la potencia generada por el panel FV con régimen predictivo con respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 1.....	53
Figura 23. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 2.....	54
Figura 24. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 2.....	55
Figura 25. Resta de la potencia generada por el panel FV con régimen predictivo con respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 2.....	56
Figura 26. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 1.	57

Figura 27. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 1.	58
Figura 28. Resta de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 1.....	59
Figura 29. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 2.	60
Figura 30. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 2.	61
Figura 31. Resta de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 2.....	62
Figura 32. Energía promedio generada y consumida día 1.....	63
Figura 33. Resta de energía acumulada por los paneles FV irrigados respecto al consumo del sistema de irrigación.	64
Figura 34. Resta de energía acumulada por los paneles FV irrigados respecto al consumo del sistema de irrigación (región estable).	65

Lista de tablas

Tabla 1 Revisión mundial de las técnicas de irrigación implementadas y el impacto en la potencia generada en paneles FV	24
Tabla 2 Datos técnicos de la electroválvula 12v.....	26
Tabla 3 Ficha técnica de las bombas sumergibles utilizadas	28
Tabla 4 Ficha técnica del RTD PT100.....	31
Tabla 5 Datos técnicos del piranómetro SMP3.....	33
Tabla 6 Datos técnicos del sensor de velocidad del viento SKU:SEN0170	34
Tabla 7 Nomenclatura del modelo de irrigación predictivo	45

Lista de apéndices

Apéndice A. Sistema de irrigación.	70
Apéndice B. Baño Termo-estado.....	71
Apéndice C. Circuito de adecuación de temperatura.....	79
Apéndice D. Humedad.....	79
Apéndice E. Recurso hídrico	81
Apéndice F. Ajuste de los datos de potencia generada.....	83

Resumen

TÍTULO: MEJORAMIENTO DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE IRRIGACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS UBICADOS SOBRE TECHO VERDE¹

AUTORES: GUSTAVO ADOLFO PÁEZ AMADOR
JUAN DIEGO MARTÍNEZ JIMÉNEZ²

PALABRAS CLAVE: Irrigación, temperatura, eficiencia, paneles FV.

En el proceso de conversión energética de un panel FV solo cerca del 15% de la irradiación solar es convertida en energía eléctrica, el resto es irradiación reflejada o se convierte en calor y a su vez en un aumento en la temperatura de operación. El incremento de la temperatura afecta negativamente el flujo libre de electrones. Es por esta razón que es deseable un sistema que monitoree y controle la temperatura de un panel FV; uno de estos sistemas es la irrigación de la superficie superior del panel FV utilizando agua como refrigerante.

Este trabajo de grado llevó a cabo la implementación de un experimento con una técnica de irrigación basada en un modelo RC predictivo instalada en paneles FV operando con microinversores Enphase 250. El trabajo de grado se desarrolló en tres etapas durante los meses de septiembre y octubre de 2017 en la terraza verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), la primera etapa consistió en la instalación de sensores y el sistema de irrigación; la segunda etapa abordó el desarrollo de los experimentos correspondientes a las dos técnicas de irrigación. Simultáneamente, se tomaron datos de temperatura, irradiación solar y potencia eléctrica generada. La tercera etapa abarcó la comparación de los datos con las mediciones realizadas en el panel FV de referencia (no irrigado) respecto al panel FV con la técnica de irrigación estudiada.

Los resultados evidenciaron un beneficio energético superior al implementar la técnica de irrigación predictiva, comparando con un panel fotovoltaico de referencia y un panel fotovoltaico con una técnica de irrigación estática.

¹Trabajo de grado.

²Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director del proyecto PhD. Germán Alfonso Osma Pinto. Codirectores PhD. Gabriel Ordóñez Plata, MSc Julián Oswaldo Florez.

Abstract

TITLE:IMPROVMENTOF A PHOTOVOLTAIC INTELIGENTCOOLING SYSTEM LOCATED ON A GREEN ROOF³

AUTHORS: GUSTAVO ADOLFO PÁEZ AMADOR
JUAN DIEGO MARTÍNEZ JIMÉNEZ⁴

KEY WORDS: Cooling, temperature, efficiency, photovoltaic panels.

In the photovoltaic energetic conversion process around of the 15% of the solar irradiation is converted into electric energy, the rest is reflected irradiation or it is converted to heat and in turn in an operating temperature increase. The temperature increase affects negatively the electrons free flux. This is the reason that is desirable a system that permit monitoring and control the photovoltaic temperature, one of these systems is the PV panel's upper surface irrigation using water as a cooler.

This degree project carried out the experiment implementation with a cooling technique based in a RC predictive model installed on PV panels operating with Enphase 250 microinverter. The degree project was developed in three stages during September and October of 2017 in the green roof of the Electrical Engineering Building from Industrial University of Santander (Bucaramanga,Colombia), the first stage consisted in the sensors and the cooling system installation; the second stage approached the two cooling technique experiments. Simultaneously, were taken the data of temperature, solar radiation and out electrical power. The third stage reached the data comparison with the reference panel data (not cooling).

The results evidenced a higher energy benefit when a predictive cooling technique is implemented, comparing with a reference photovoltaic panel and a photovoltaic panel with a static technique cooling.

³ Degree project.

⁴ Department of Physical – Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director PhD. Germán Alfonso Osma Pinto. Codirectors PhD. Gabriel Ordóñez Plata, MSc Julián Oswaldo Florez.

Introducción

La energía fotovoltaica (FV) se ha convertido en protagonista mundial de las energías renovables en los últimos años, aunque presenta porcentajes bajos de eficiencia; diferentes aspectos influyen en este proceso de conversión de energía solar a energía eléctrica y se busca mitigar uno de ellos, la temperatura de operación del panel FV(Klaus et al. 2014).

Además de otros parámetros, la temperatura de operación de un panel FV es determinante en su producción energética; esta relación es contraria ya que a mayor temperatura del panel FV menor es su eficiencia. Por ello, una estrategia para aumentar dicha conversión energética es disminuir la temperatura de operación del sistema FV para que éste opere en la región en la cual es mayor el proceso de conversión energética(Nižetić et al. 2016).

Dentro de las técnicas usadas en este tópico se encuentra la irrigación con agua, una estrategia que permite rociar agua por la parte superior del panel FV, permitiendo con esto un intercambio de calor entre la superficie y el líquido que se hace circular durante un tiempo definido y con caudal constante(Bahaidarah et al. 2013).

El grupo de investigación GISEL emprendió dos proyectos COLCIENCIAS¹ importantes en este tema, de los cuales uno de ellos se encuentra en desarrollo. Tales proyectos surgieron de la tesis doctoral CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PANELES FV EN TERRAZAS DE EDIFICACIONES LOCALIZADAS EN ENTORNOS CON CLIMA TROPICAL CÁLIDO(Osma Pinto 2016)que determinó un modelo matemático de irrigación de

¹Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico Upsolar 250W instalado sobre techo verde en la ciudad de Bucaramanga.

paneles FV y una estrategia para maximizar el beneficio energético de la irrigación en paneles FV.

En el marco de las investigaciones mencionadas, (Rojas Zambrano and Florez Gomez 2016) llevaron a cabo la implementación y análisis de algunas técnicas de irrigación implementadas alrededor del mundo con el fin de evidenciar su beneficio energético en condiciones tropicales como las existentes en la terraza verde del edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia).

Con el fin de continuar en el estudio de la irrigación de paneles FV, se identificó la necesidad de implementar una primera versión de la técnica de irrigación predictiva desarrollada por (Osma Pinto 2016). Esta técnica abarca la monitorización del sistema FV en tiempo real y a partir de dichas mediciones proyectar la operación del panel FV con el fin de establecer si es conveniente irrigar o no el panel FV.

Existe una diferencia considerable entre los sistemas de irrigación habituales y el desarrollado en este trabajo de grado, una de ellas es el régimen de irrigación. En general, las técnicas de irrigación definen tiempos de irrigación de manera repetitiva, (X:Y) X minutos de irrigación y Y minutos de inactividad, cuyo periodo es X+Y. Entre tanto, la irrigación predictiva puede llevar a realizar varias irrigaciones en una hora o pasar horas consecutivas del día sin activar el sistema de riego dado que el beneficio energético a ser obtenido por las condiciones climatológicas no es favorable.

La técnica predictiva de irrigación contempla condiciones del entorno como lo son: la irradiación solar, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, también considera la temperatura de operación del panel FV. Estas variables son empleadas para realizar estimaciones

de las potencias generadas por el panel FV en caso de ser irrigado o no irrigado, al igual que las temperaturas de operación del panel FV en caso de ser irrigado o no irrigado; Siendo estas variables las más importantes para el análisis del beneficio energético y de un sistema de irrigación.

En definitiva, este trabajo de grado compara dos técnicas de irrigación, la primera de ellas es una técnica estática con régimen de irrigación definido en tiempo y caudal; y la segunda de ellas conocida como técnica predictiva, la cual mediante unas entradas definidas del entorno determina el tiempo óptimo de irrigación. Además, se compara un panel FV sin irrigación con el panel FV con técnica de irrigación predictiva.

Para llevar a cabo estas técnicas de irrigación y su análisis se estableció como objetivo general de este trabajo: *Cuantificar el beneficio energético de un procedimiento de irrigación de paneles FV a partir de datos experimentales en los paneles FV ubicados en la terraza verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica.*

Para dar cumplimiento a este objetivo general se definieron los siguientes objetivos específicos.

- Implementar sistemas de irrigación individuales para seis paneles FV instalados en la terraza verde superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica.
- Configurar la operación de los sistemas de irrigación de paneles FV, 3 unidades con régimen de operación estático y 3 unidades con el procedimiento de operación a ser analizado.
- Monitorizar el efecto de la irrigación en la potencia eléctrica generada y la temperatura de operación de los 6 paneles FV.

- Calcular el beneficio energético producido por la irrigación de los paneles FV.

La temperatura de operación del panel FV (T_{PV}) y la potencia generada (P_{gen}) hacen parte de las variables determinantes del análisis del beneficio energético. Estas variables fueron medidas en tres paneles utilizados en el trabajo de grado, además de la irradiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente disponible en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Finalmente, el cálculo del beneficio energético de las técnicas de irrigación se desarrolla teniendo en cuenta el análisis comparativo de la potencia generada por los paneles FV bajo las mismas condiciones climatológicas para cada panel FV.

El Capítulo 1 aborda la fundamentación necesaria para la ejecución del proyecto, el Capítulo 2 describe el sistema de irrigación implementado para los paneles FV y la adquisición de los datos. El Capítulo 3 presenta la programación asociada al control de las técnicas de irrigación; el Capítulo 4 evidencia el análisis de los datos para la cuantificación del beneficio energético aportado por la técnica de irrigación implementada. Finalmente, en el Capítulo 5 se encuentran las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado, así como el trabajo futuro que podría ser realizado a partir de futuros trabajos de grado.

1 Marco teórico

Este capítulo aborda la temática relacionada con el trabajo de grado que permite entender el principio de operación de la técnica de irrigación predictiva y su impacto sobre la conversión energética.

1.1 Principio de funcionamiento del panel FV

Los paneles FV están conformados por pequeñas celdas FV que tienen la capacidad de convertir la luz solar en energía eléctrica. Estas celdas FV tienen la estructura similar a la de un diodo, conformada por dos capas semiconductoras de tipo N y P. Los electrones que pueden generar corriente eléctrica son aquellos que se encuentran en la banda de valencia, aplicando una diferencia de potencial para que estos salten de la banda de valencia del átomo hacia la banda de conducción (Palz 2014).

La *Figura 1* muestra el funcionamiento básico de una celda FV. La absorción de un fotón da paso a la generación de un par de hueco-electrón. Usualmente, los electrones y huecos se combinan; pueden ser separados con membranas semipermeables de electrones y huecos. Los electrones separados pueden ser usados para circular por un circuito eléctrico para finalmente recombinarse con huecos (Klaus et al. 2014).

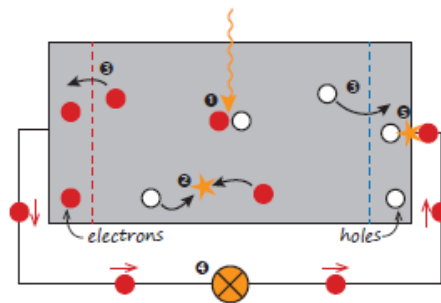


Figura 1. Modelo básico de una celda FV. Adaptado de (Klaus et al. 2014).

La corriente generada por el panel FV es una corriente continua que debe ser convertida a corriente alterna para alimentar las cargas a las que está conectada la red.

1.2 Afectaciones en la generación FV

La transmisión de luz solar en el panel FV se explica de la siguiente manera, una cantidad de ondas incidentes irradian en la cubierta de vidrio del panel FV, en la superficie del vidrio se

presentan ondas por refracción y por reflexión. Como se muestra en la *Figura 2* las ondas por refracción atraviesan varias capas dentro del vidrio hasta ser absorbidas por la celda FV (Ju and Fu 2011).

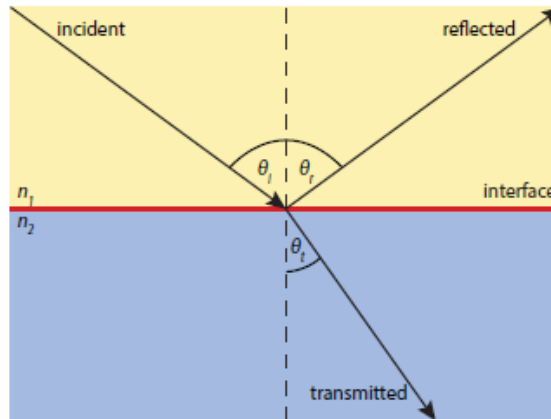


Figura 2. Esquema de refracción y reflexión de una onda incidente. Adaptado de(Klaus et al. 2014).

La reflexión es una de las causas del bajo desempeño que presentan los paneles FV, ya que esta energía que no puede ser transformada en energía eléctrica. Adicionalmente, parte de la energía transmitida se transforma en calor, de ahí el incremento de la temperatura de operación del panel FV.

El aumento en la temperatura del panel FV afecta el canal P-N que permite el flujo libre de electrones, lo cual a su vez disminuye la corriente generada y su tensión de circuito abierto (Faiz and Moosavi 2016).

El proceso de convertir la luz solar en energía eléctrica tiene factores que pueden afectar dicho proceso, algunos de ellos son el aumento de la temperatura de operación del panel, suciedad o polución en la capa superior del mismo, la humedad, entre otros. Según estudios realizados, el incremento de un grado Celsius en la temperatura de un panel FV disminuye cerca

de 0,5% la eficiencia del mismo, esto es desde cierta temperatura de operación puesto que existe una región en la cual el panel FV opera de manera óptima(Ju and Fu 2011).

Según se observa en la *Figura 3*, existe una relación entre la temperatura de operación del panel FV (T_{PV}) y la eficiencia eléctrica del panel FV. A medida que incrementa T_{PV} decrece la eficiencia eléctrica; a su vez, se puede ver la misma relación entre T_{PV} y la potencia generada cuando se aplica una técnica de irrigación. Se evidencia un incremento en la eficiencia eléctrica a medida que disminuye T_{PV} .

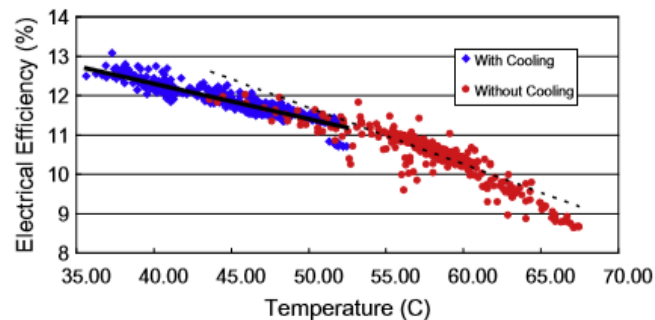


Figura 3. Relación eficiencia eléctrica y temperatura de operación PV. Adaptado de(Teo, Lee, and Hawlader 2012).

Esta afectación a la producción energética se puede mitigar de ciertas maneras, una de ellas es la irrigación con agua desde la parte superior del panel FV. Esto produce un intercambio de calor entre el líquido y la superficie del panel FV; además de disminuir la temperatura de operación, esta técnica aporta a la refracción del panel FV y la limpieza del mismo, permitiendo que la irradiación incida en mayor medida sobre las celdas FV y aumente la producción energética(Ju and Fu 2011).

Además de la irrigación, el incremento en la T_{PV} se puede mitigar con la integración de una cubierta verde en las instalaciones FV, según los estudios realizados por (Hernandez Cristancho, Quintero Sanguino, and Torres Romero 2016) un sistema FV instalado sobre techo

verde presenta una eficiencia mayor hasta de 6%. El sistema FV analizado en este trabajo de grado se encuentra instalado sobre una cubierta de techo verde.

La cubierta verde sobre la cual se encuentra instalado el sistema FV debe ser irrigado dependiendo de las condiciones de humedad; esto permite garantizar la disminución de la temperatura ambiente percibida por el panel FV.

1.3 Principio termodinámico

El intercambio de calor que se presenta entre la superficie irrigada y el líquido circulante se conoce como intercambio por convección forzada, en el cual la transferencia de calor se realiza por contacto entre dos elementos (Cengel and Boles 2009). En este caso la superficie del panel FV se encuentra a una temperatura elevada con respecto al líquido circulante, por lo cual la temperatura de la superficie del panel FV disminuye a medida que el líquido irrigado fluye por encima de ella, a su vez el líquido circulante aumenta su temperatura transferida desde la superficie del panel FV (Osma Pinto 2016).

La *Figura 4* muestra los procesos de convección forzada y natural; para el caso en el que se hace circular aire sobre un objeto que naturalmente no contaba con este se conoce como convección forzada (Cengel 2007); sin embargo, el panel FV se encuentra instalado en la intemperie lo cual sugiere momentos en los cuales la lluvia hace una irrigación natural; dado que dichas condiciones no son controlables, no se tienen en cuenta para el análisis del intercambio de calor con el panel FV, pero si se contemplan los efectos de esta (Osma Pinto 2016).

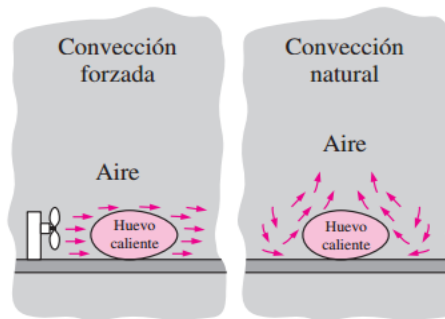


Figura 4. Convección forzada y natural. Adaptado de (Cengel 2007).

1.4 Sistema de control

En los últimos años, los sistemas de control han asumido un papel importante en el desarrollo y los avances de la civilización moderna y la tecnología; los sistemas de control hacen parte de todos los sectores de la industria y este trabajo de grado hace parte de ese grupo que abarca los sistemas controlados y que permite obtener un mejor resultado a partir de las mismas entradas, estas entradas son: temperatura de operación del panel FV, irradiación solar, velocidad del viento, humedad, temperatura ambiente, temperatura del techo verde y distancia del tanque.

La

Figura 5 muestra los elementos que componen un sistema de control, las entradas son señales que aportan información del sistema a controlar y las salidas son las señales al término de las estrategias de control. Todo lo que se encuentra en el cuadro *Process* hace referencia al control, las acciones que realiza un dispositivo sobre las variables o señales de entrada.

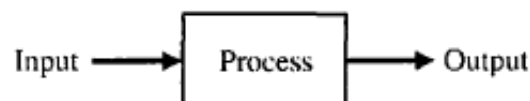


Figura 5. Componentes básicos de un sistema de control. Adaptado de (Dorf and Bishop 2011).

Las acciones de control realizadas durante la irrigación se verán reflejadas en las variables de salida; la temperatura de operación del panel FV y la potencia generada son las variables de salida en las que se realiza el análisis de este trabajo de grado.

Las acciones de control se llevan a cabo por medio de actuadores, dispositivos que alteran la variable de salida llevándola a un valor de referencia deseado (Ogata 2010). Para este trabajo de grado, los actuadores son electroválvulas que permiten el flujo de agua en los paneles FV y motobombas que utilizan el agua almacenada para la irrigación de los paneles FV y el techo verde.

1.5 Estado del arte

La

Tabla 1 muestra los casos de estudio sobre irrigación identificadas durante la planeación y ejecución de este trabajo de grado. Se muestran los datos correspondientes a temperatura del panel FV sin irrigación temperatura de operación con irrigación, eficiencia eléctrica sin irrigación y eficiencia eléctrica con irrigación, la potencia de salida sin irrigación y la potencia de salida con irrigación.

En la mayoría de los casos se presenta un aumento significativo en la potencia de salida del sistema; existen diferentes circunstancias a tener en cuenta para cada implementación, desde el potencial solar hasta el flujo de irrigación. Los beneficios que se pueden destacar de estos trabajos realizados es la relación que se obtiene entre temperatura de operación del panel FV y su potencia generada debido a la película de agua que se produce por la irrigación.

Tabla 1
 Revisión mundial de las técnicas de irrigación implementadas y el impacto en la potencia generada en paneles FV

Referencia	Técnica utilizada	T inicial [°C]	T final [°C]	Eficiencia sin irrigar %	Eficiencia con irrigación %	Potencia sin irrigar [W]	Potencia con irrigación [W]
(Abdolzadeh and Ameri 2008)	Película de agua superficie frontal	58	35	9,26	12,35	55,4	66,9
(Hindee, Lampongchat, and Suwapaet 2016)	Película de agua superficie frontal	54,5	24	-	-	40	41
(Hindee, Lampongchat, and Suwapaet 2016)	Película de agua superficie posterior	54,5	32	-	-	40	39
(Mehrotra et al. 2014)	Inmersión	59,4	34,8	4,04	4,76	1,346	1,418
(Nižetić et al. 2016)	Aspersión frontal y posterior	56	24,1	13,92	15,92	35	40,7
(Krauter 2004)	Película de agua superficie frontal	60	40	10,7	12	38	45
(Bahaidarah et al. 2013)	Película de agua superficie posterior	42,8	25,9	18	27	185	211
(Hosseini, Hosseini, and Khorasanizadeh n.d.)	Película de agua superficie frontal	49	30	3,6	4,4	-	-
(Odeh and Behnia 2009)	Película de agua superficie frontal	58	33	-	-	109,3	115,2

Referencia	Técnica utilizada	T inicial [°C]	T final [°C]	Eficiencia sin irrigar %	Eficiencia con irrigación %	Potencia sin irrigar [W]	Potencia con irrigación [W]
(Hussien, Numan, and Abdulmunem 2015)	Tuberia superficie posterior	80	71	7	9,5	40	45

2 Implementación de las técnicas de irrigación

Este capítulo muestra el montaje que se realizó para la implementación de las dos técnicas de irrigación.

2.1 Sistema de irrigación

La *Figura 6* muestra el arreglo FV instalado en la terraza superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica con el sistema de irrigación actuando en la superficie superior del panel FV. El Apéndice A muestra los datos técnicos de la instalación.



Figura 6. Sistema FV con irrigación en superficie superior. 1. Panel FV operando con técnica de irrigación estática. 2. Panel FV operando con técnica de irrigación predictiva. 3. Panel FV de referencia. 4. Tubería del sistema de irrigación de la técnica estática. 5. Tubería del sistema de irrigación de la técnica predictiva.

La Tabla 2 muestra los datos técnicos de las electroválvulas instaladas, para la aplicación es necesaria una presión de funcionamiento teniendo en cuenta la presión del sistema hídrico del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Las electroválvulas operan a una tensión de 12 V_{DC}, para lo cual se utiliza un circuito regulador de tensión conectado a la red eléctrica.

Tabla 2
Datos técnicos de la electroválvula 12v

Electroválvula plástica	
Medio de funcionamiento	Aire, agua.
Voltaje de operación	12 VDC
Modo de operación	Acción directa
Tipo de accionamiento	Normalmente cerrada
Diámetro nominal	8mm
Tamaño del Puerto	G1/2"
Presión salida de agua	0.02Mpa~0.8Mpa
Temperatura de operación	5°C~60°C

Adaptado de Recurso electrónico disponible en: <https://www.vistronica.com/valvulas/electrovalvula-de-plastico-12v-12-con-presion-detail.html>.

En la parte inferior del panel FV se adecuó un sistema de acopio de agua instalado por (Rojas Zambrano and Florez Gomez 2016) que permite almacenar el líquido en tanques ubicados debajo de los paneles FV, esto con el fin de reutilizar este recurso hídrico en la irrigación ya sea del panel FV o del techo verde; lo cual se lleva a cabo con bombas sumergibles de 9W de potencia y son conectadas con un circuito optoacoplador que brinda seguridad ante posibles corrientes de fuga.

La *Figura 7* muestra el sistema de irrigación en funcionamiento y la instalación del sistema de acopio con el tanque de almacenamiento; además, se observa el sensor de viento y el piranómetro instalados en las esquinas superior e inferior derechas de la estructura que soporta los paneles FV.



Figura 7. Sistema de irrigación y acopio de agua instalados en paneles FV. 1. Sistema de acopio de agua. 2. Tanque de almacenamiento. 3. Electroválvula del sistema de irrigación. 4. Sensor de viento. 5. Piranómetro.

Una prueba de funcionamiento fue realizada para distintas bombas sumergibles variando entre ellas la capacidad de bombeo, en la prueba fueron usadas bombas de 22W, 18W y 9 W, siendo esta última la que presenta el flujo necesario para la irrigación del panel FV. La Tabla 3 muestra los datos técnicos de dos bombas sumergibles usadas en las pruebas.

Tabla 3
Ficha técnica de las bombas sumergibles utilizadas

	Bomba sumergible	
Modelo	HJ-1141	SP-980
Voltaje	120V/220V/240V	120V/220V/240V
Frecuencia	50Hz/60Hz	50Hz/60Hz
Potencia	22W	9W

Altura máxima	1,6m	1,3m
Flujo de salida	1000L/h	550L/h

Adaptado de Recurso electrónico disponible en: <http://www.sunsun-china.com/en/product/html/?213.html>.
<http://www.harvestfishandpet.com/resun-rs-980-submersible-pump---550-lh>

Además de la instalación de los componentes mencionados, se realizó la instalación de tubería para conectar cada elemento, en el caso de la bomba sumergible fue usada manguera plástica. Fue necesario realizar instalación de tubería y manguera para conectar el punto del recurso hídrico de la terraza al punto de instalación de los paneles FV, la conexión entre la electroválvula y el panel FV. Y, por último, la conexión entre la bomba y el techo verde y el panel FV.

2.2 Sistema de control

El sistema de control consiste en de un micro-controlador Arduino UNO, esto se debe al bajo costo del micro-controlador y a las tareas a desarrollar; además, la cantidad de datos y señales es la acorde a sus capacidades. Los sensores utilizados entregan su medición al Arduino, posteriormente se realiza el procesamiento de dichos datos para realizar acciones de control asociadas a cada técnica de irrigación.

Se usaron cajas Dexson² para asegurar el funcionamiento del sistema de control, teniendo en cuenta posibles fugas de agua o momentos de lluvia que pueden afectar algún componente del sistema de control.

Los sistemas de irrigación de techo verde y control de nivel del tanque son totalmente independientes de la técnica de irrigación, es por esto por lo que dichas acciones son controladas en simultaneo por el Arduino en rutinas que no afectan la operatividad del sistema de irrigación de paneles FV o su sistema de procesado y almacenado.

² Estas cajas de protección han presentado excelentes resultados para instalaciones en la intemperie.

El control del nivel del tanque se realizó con un módulo de ultrasonido que mide la altura de llenado del tanque. Este módulo se instaló en la tapa superior del tanque de almacenamiento dado que la medición de distancia es estable desde ese punto. Esto para evitar operación en vacío de la bomba sumergible, el sistema de irrigación desde la electroválvula se activa para alturas mayores a 27 cm.

2.3 Sistema de operación

El sistema de irrigación opera de dos formas diferentes; una de ellas es reutilizando el recurso hídrico proveniente de agua lluvia o de la misma irrigación, en este trabajo de grado se pretende darle enfoque a este modo de operación ya que es el que más recursos recicla. El segundo modo de operación es utilizando el recurso hídrico de la red de alimentación de la edificación. El sistema de irrigación opera desde el tanque de almacenamiento a menos que el tanque no cuente con el recurso hídrico necesario, en ese caso, se activa el sistema de irrigación desde la electroválvula.

El funcionamiento con los tanques de almacenamiento se realiza con bombas sumergibles para transportar el agua desde el techo verde donde se encuentran los tanques hasta la superficie a la que se encuentran los paneles FV. El circuito usado para el funcionamiento de la bomba sumergible consta de un relé activado por optoacoplador, disminuyendo al máximo posibles corrientes de fuga o daños al sistema de control.

El escenario que demanda el uso de la electroválvula consiste en la conexión del suministro de potencia que garantice 12 V_{DC} y un transistor para controlar la corriente que se presenta durante la activación de la electroválvula.

2.4 Monitorización de los beneficios energéticos durante la irrigación

A continuación, se presentan los sensores utilizados en el trabajo de grado, algunos de ellos necesarios para la monitorización del beneficio energético; también se presentan los usados por el sistema de control.

2.4.1 Temperatura. Para registrar la temperatura se utilizaron RTD's (detector de temperatura resistivo) de referencia PT100 de tres hilos; la Tabla 4 muestra los datos técnicos del sensor. La utilidad de este sensor es importante en este trabajo de grado ya que cumple con las especificaciones necesarias como lo es la salida linealizada y la estabilidad en la medición, el rango de medición es el adecuado a la aplicación (10 °C - 80 °C). Se diseñó un circuito de adecuación que permite escalar apropiadamente la curva de temperatura y resistencia y así obtener una región de operación acorde a la aplicación, aprovechando que este sensor tiene salida linealizada.

Tabla 4
Ficha técnica del RTD PT100

PT100	
Resistencia	100Ω a 0°C
Exactitud	±0.22Ω – 0.25% de temp.
Estabilidad	< 0.2 °C
Rango de medición	-200°C a 420°C
Tiempo de Respuesta	<200 ms

Adaptado de Recurso electrónico disponible en: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/296659/RHOPOINT/22810.html>

Además de esto, se realizó un baño termo-estático como procedimiento de calibración del instrumento, dicho proceso consiste en registrar un barrido de temperaturas incluyendo las temperaturas de operación típicas en esta aplicación con un sensor de referencia y el sensor a calibrar (Apéndice B). Con esta información se construye una ecuación que ajusta la medida del sensor al patrón de referencia teniendo con esto una medida exacta.

La medición de temperatura de operación del panel FV fue almacenada en un módulo de Arduino Mega. Este módulo se conoce como Shield o Datalogger que permite la comunicación IC2 con una memoria SD extraíble para realizar la adquisición de los datos y posterior análisis de los mismos.

La instalación de los RTD's en los paneles FV se realizó de la misma manera para cada uno de ellos, dos RTD's ubicados en la superficie posterior de cada panel FV. La *Figura 8* muestra la ubicación de las RTD's correspondientes a cada panel FV. Las intersecciones de las líneas amarillas representan la posición en la cual se instalaron los sensores de temperatura.

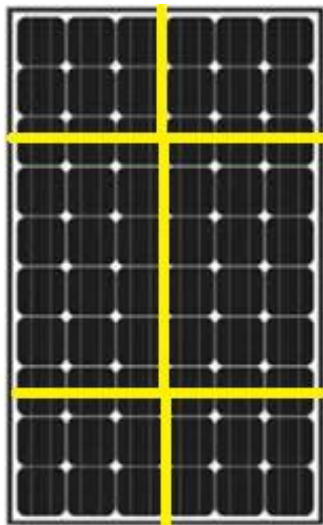


Figura 8. Ubicación RTD's. Adaptado de Recurso electrónico disponible en: <http://4ndroide.blogspot.com.co/2015/02/arreglosde-paneles-solares-los.html>.

La *Figura 9* muestra el circuito de adecuación de señal para el RTD, el potenciómetro sirve para ajustar un valor resistivo de referencia y calibrar el circuito a una temperatura conocida. La ganancia de este circuito permite trabajar el RTD en un rango apropiado de temperaturas, desde 10 °C hasta 100 °C. El Apéndice C muestra el esquema eléctrico y detalle técnico del circuito de adecuación.



Figura 9. Circuito de adecuación para RTD

2.4.2 Irradiación solar. La irradiación solar hace parte del análisis de un sistema de energía FV, permite estimar la potencia generada por el sistema y es por esta razón que hace parte de los datos necesarios para la ejecución de la técnica de irrigación predictiva.

Para la medición de la irradiación solar se instaló un piranómetro Kipp&Zonen SMP3; mide irradiancia de onda corta y el valor entregado corresponde a la suma de irradiación solar directa y difusa. El piranómetro se instaló a nivel en la estructura que soporta el arreglo FV.

La Figura 10 muestra el piranómetro SMP3 y sus partes y la Tabla 5 muestra sus datos técnicos.

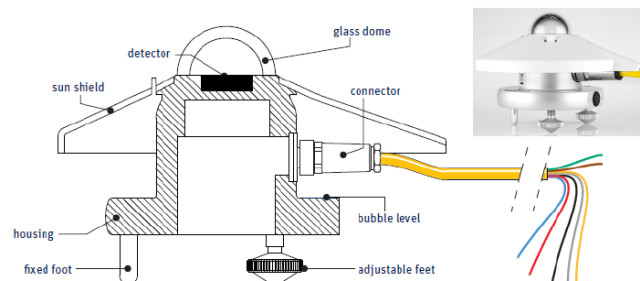


Figura 10. Piranómetro SMP3. Adaptado de Recurso electrónico disponible en: <http://www.kippzonen.com/Download/583/Manual-SMP-series-Smart-Pyranometers>

Tabla 5

Datos técnicos del piranómetro SMP3

SMP3

Salida Analógica	0 - 1 V
Rango de Medición	200 a 2000 W/m
Tiempo de Respuesta	(63%) < 1,5 s
	(95%) < 12 s

Adaptado de Recurso electrónico disponible en: <http://www.kippzonen.com/Download/583/Manual-SMP-series-Smart-Pyranometers>.

2.4.3 Velocidad del viento. La velocidad del viento es usada en varios parámetros del modelo predictivo de irrigación. La medición de la velocidad del viento se llevó a cabo con un sensor SKU:SEN0170 que su estructura y material le permiten ser instalado en la intemperie y evitar la corrosión; la Tabla 6 muestra los datos técnicos de este sensor.

Tabla 6
Datos técnicos del sensor de velocidad del viento SKU:SEN0170

SKU:SEN0170	
Estilo	Tres copas
Material	Aleación de aluminio
Señal de salida	0-5V(Señal de Voltaje)
Alimentación	DC 9-24V
Consumo de potencia	Voltage MAX≤0.3W
Velocidad minima	0.4-0.8m/s
Resolución	0.1m/s
Rango efectivo de medida	0-30m/s
Porcentaje de error	±3%
Distancia de tansmisión	Más de 1000m
Medio de transmission	Cableado
Modo de conexión	Sistema de tres cables
Temperatura de operación	-40°C~80°C
Humedad de operación	35%~85%

Adaptado de Recurso electrónico disponible en:
[https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Wind_Speed_Sensor_Voltage_Type\(0-5V\)_SKU:SEN0170](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Wind_Speed_Sensor_Voltage_Type(0-5V)_SKU:SEN0170)

2.4.4 Humedad. Los paneles FV se encuentran instalados sobre el techo verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica, este techo verde permite disminuir la temperatura de operación del sistema FV. Para mantener el techo verde en condiciones adecuadas se instaló un sensor de humedad que permite irrigar la vegetación en el momento adecuado, realizando un goteo que inicia en el valor crítico de humedad hasta que se encuentre en un valor aceptado.

En esta aplicación se usa el sensor de humedad FC28, para las condiciones presentadas en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica se registraron valores de humedad mínimos de 300 y máximos de 850. El criterio de irrigación del techo verde es el definido por (Pacheco Rios and Suarez Vásquez 2015) esta información se encuentra en el Apéndice D, donde también se evidencia la calibración del sensor con respecto al sensor usado en dicho trabajo de grado.

Una bomba sumergible aporta el suministro hídrico para el goteo de las plantas, el agua utilizada proviene de la irrigación de los paneles FV que es recolectada en tanques. El sistema de goteo utilizado se basa en el diseño desarrollado por (Pacheco Rios and Suarez Vásquez 2015) que puede realizar el riego de cuatro zonas, en este caso el equivalente a las zonas tres y cuatro que se muestran en la Figura 11, esto se debe a que son las más cercanas a los paneles FV.

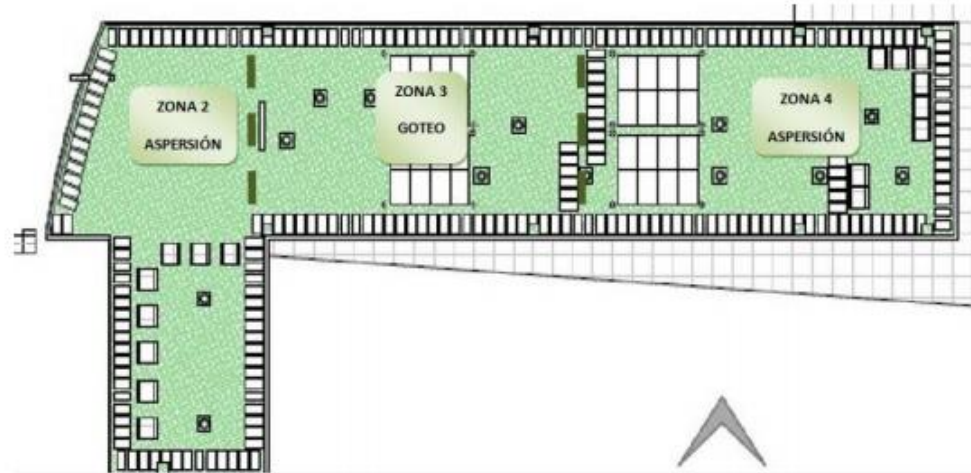


Figura 11. Zonas de riego. Adaptado de (Pacheco Rios and Suarez Vásquez 2015)

2.4.5 Rutina de almacenamiento de datos. La *Figura 12* muestra el diagrama de flujo asociado al guardado de datos en las rutinas de irrigación estática y predictiva, se utilizan variables independientes a las variables de cálculo. El tiempo de guardado se definió en 5 minutos debido a que es el tiempo mínimo necesario para percibir cambios en condiciones climatológicas y de operación del sistema FV. Se muestra en un diagrama independiente debido a que se ejecuta en paralelo a las rutinas de irrigación y no afecta dichos procesos, `currentMillis` es la función que se usa para controlar el tiempo de sensado definido en 5 minutos.

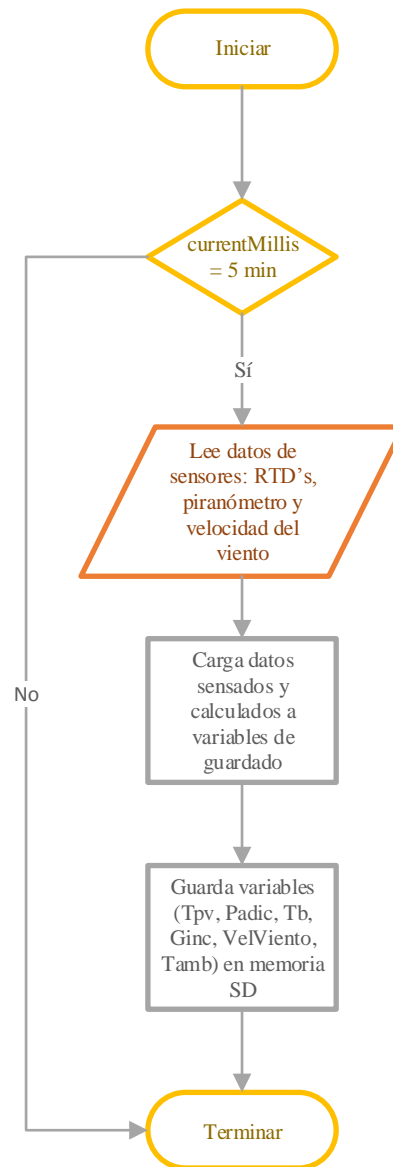


Figura 12. Diagrama de flujo rutina de almacenamiento de datos.

El monitoreo de los datos de potencia generada de los paneles FV se realiza de manera independiente en un datalogger conectado a los contadores de luz instalados en la terraza verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica, estos datos de potencia se guardan cada minuto.

3 Configuración de las técnicas de irrigación

Esta sección presenta las dos técnicas de irrigación utilizadas.

3.1 Técnica estática

Esta técnica consiste en irrigar el panel FV con un tiempo y caudal definidos, esto quiere decir que cada cierto tiempo se activa la bomba sumergible o la electroválvula durante un tiempo definido, así permitiendo la irrigación del panel FV. Para este caso se configura un régimen 1:29 el cual indica que habrá un periodo de irrigación de 1' seguido de un periodo de no irrigación de 29'. Esta técnica fue una de las opciones que mejores resultados presentó en el estudio realizado por (Rojas Zambrano and Florez Gomez 2016).

Para esto se implementó un módulo de reloj que permite utilizar una hora definida de inicio y final; esto permite irrigar solo durante el periodo de generación de energía FV. Se define este periodo a las horas comprendidas entre las 8:00 y 18:00, iniciando las acciones de irrigación a las 8:10 como primera rutina de irrigación y la última rutina de irrigación se definió para las 17:40.

Esta técnica cuenta con tanques de almacenamiento de agua, que son utilizados para la irrigación del panel FV y del techo verde; esto quiere decir que siempre que se deba irrigar el panel FV se realiza una consulta del estado del tanque de almacenamiento para saber si es posible o no irrigar desde el mismo; de lo contrario se cuenta con la conexión a la red hídrica.

La *Figura 13* muestra el diagrama de flujo programado en el IDE de Arduino; del cual se destaca la integración de la función RTC que utiliza el módulo de reloj acondicionado al sistema de control, la variable presentada como hora representa un número entero correspondiente a la hora actual del módulo de reloj.

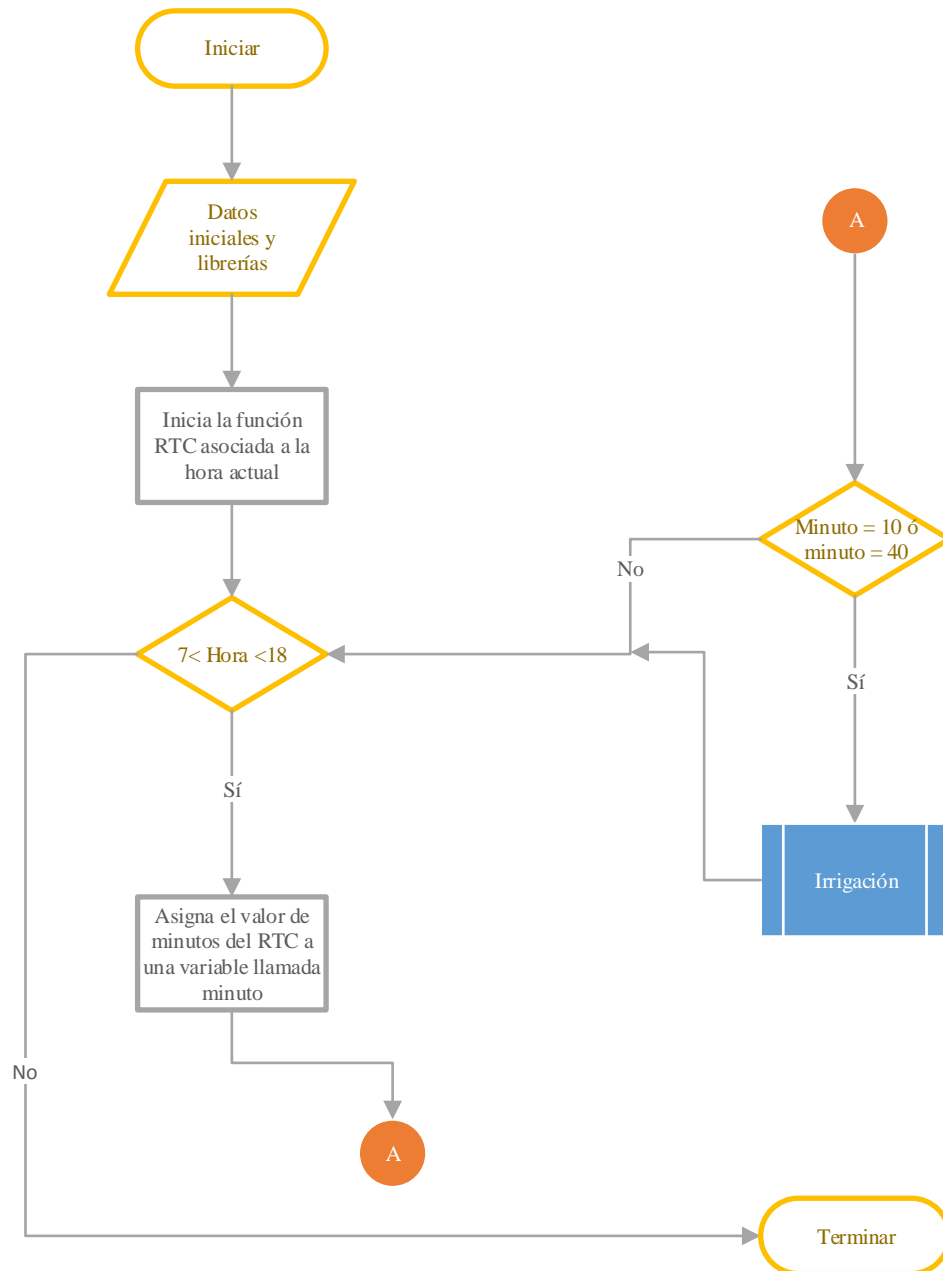


Figura 13. Diagrama de flujo técnica de irrigación estática.

La Figura 14 muestra la función asignación programada en el IDE de Arduino y la estructura que permite la irrigación durante un minuto, el tiempo de irrigación es controlado por una estructura for que utiliza las variables i y x; i toma el valor actual de los segundos del módulo de reloj, x toma el valor de i más 60 segundos.

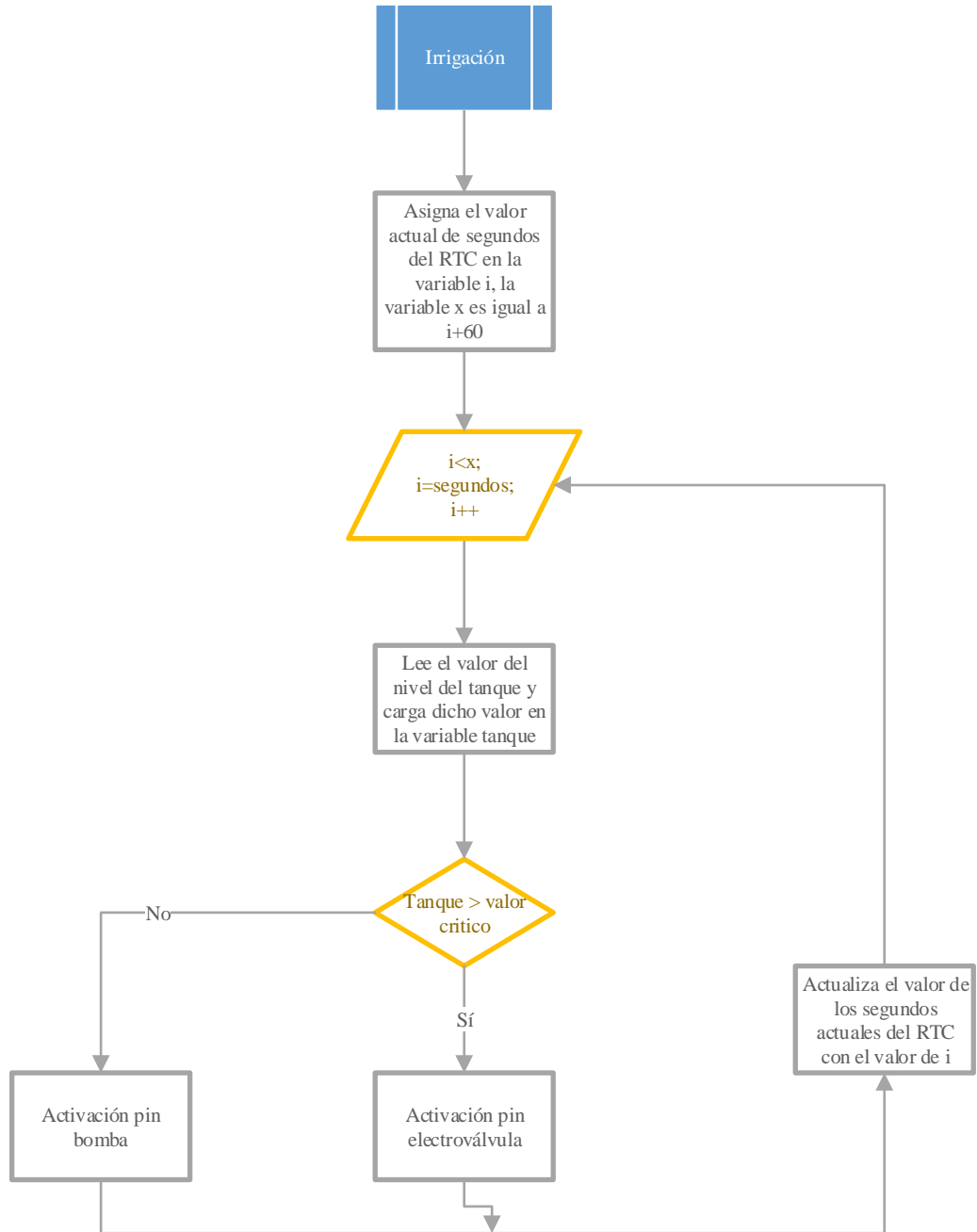


Figura 14. Diagrama de flujo función irrigación técnica estática.

3.2 Técnica predictiva

Esta técnica de irrigación consiste en calcular los parámetros de tiempo de irrigación a un caudal constante, estos tiempos se calculan mediante un algoritmo desarrollado por (Osma Pinto 2016).

Los parámetros que hacen parte de este algoritmo son: la temperatura de operación del panel FV,

la potencia generada por el panel FV, la irradiación incidente, la velocidad del viento y la temperatura ambiente, entre otros.

La rutina consiste en proyectar la temperatura de operación del panel FV y dependiendo de los valores que ésta arroje se decide si es conveniente irrigar o no; cada criterio de decisión se basa en un punto de comparación de energía eléctrica almacenada, esto con el fin de tener en cuenta el consumo energético producido por los sistemas de irrigación y de control.

La *Figura 15* muestra el diagrama de flujo programado en el IDE de Arduino para la técnica de irrigación predictiva; de esta técnica de irrigación se puede destacar la proyección energética que se realiza cada 30 minutos y las variables que controlan la irrigación que son la potencia generada adicional y el tiempo de espera (T_b) que permite al sistema reasignar valores de sensores del sistema para seguir proyectando bajo las nuevas condiciones de operación. La función Irrigación se ejecuta de la misma forma presentada en la Sección 3.1.

Las funciones `currenMillis` y `currentMillis1` permiten controlar los tiempos de ejecución de los procesos del modelo predictivo; `currenMillis` está asociada a la proyección que se realiza cada 30 minutos y `currentMillis1` controla el tiempo de consulta de P_{adic} . La potencia generada adicional se define en la ecuación [1], para esta estimación se tiene en cuenta la potencia generada de cada escenario, irrigado y no irrigado, además de la potencia de consumo del sistema de irrigación.

$$P_{adic} = P_{gen\ irrigado} - P_{gen\ no\ irrigado} - P_{consumo} \quad [1]$$

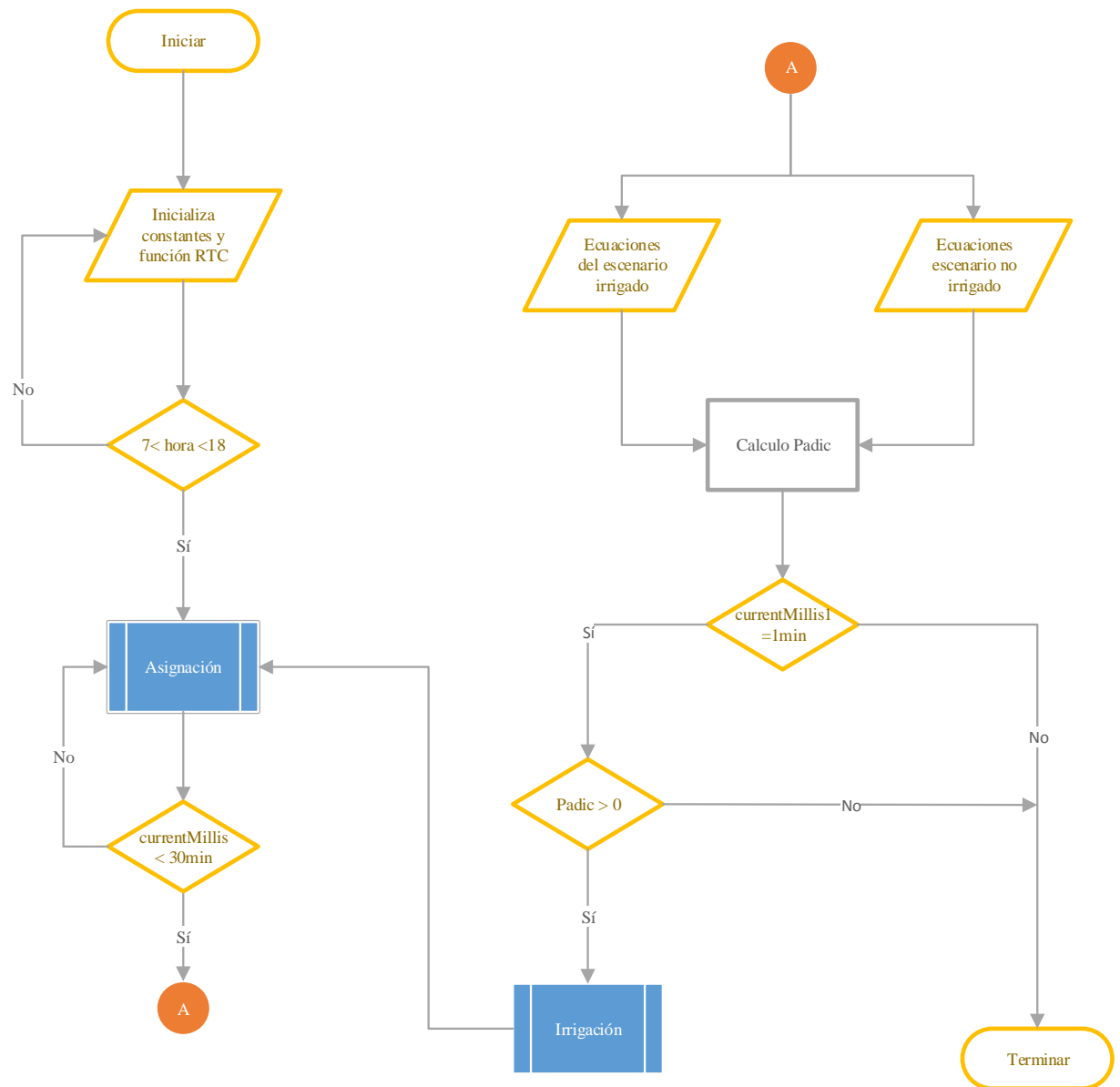


Figura 15. Diagrama de flujo técnica predictiva de irrigación.

La Figura 16 muestra la función asignación que se ejecuta cada treinta minutos o cada vez que el sistema irrigue, en esta función se realiza la actualización de variables para los cálculos de todas las ecuaciones que envuelve la técnica de irrigación predictiva. Los cálculos son el modelo RC desarrollado por (Osma Pinto 2016) necesario para hallar el valor estimado de la T_{PV} y la P_{gen} .

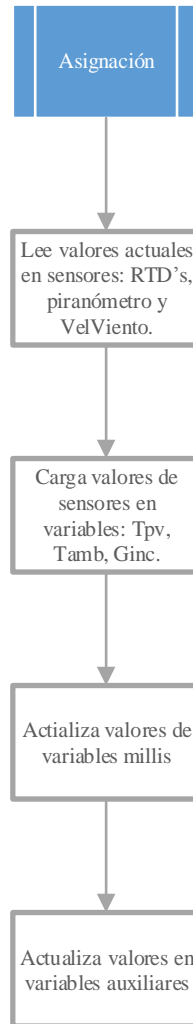


Figura 16. Diagrama de flujo función asignación.

La proyección que realiza el sistema es de treinta minutos, esa es la razón por la cual pasado ese tiempo se cargan datos sensados y se reinician los cálculos. Sin embargo, el criterio de irrigación se ejecuta cada minuto; dado que el sistema en un minuto tiene los datos suficientes para decidir si es conveniente irrigar o no.

A partir de la T_{PV} se calculan la potencia generada y la energía adicional, datos que sirven para calcular el beneficio neto obtenido en los escenarios de irrigación y de no irrigación. Si al comparar estos dos valores de energía la energía neta es superior al valor definido se considera que es apropiado irrigar y se procede a calcular los tiempos de irrigación del sistema.

Al cabo del tiempo de irrigación, la rutina programada para la técnica de irrigación calcula un tiempo de espera del sistema (t_b); este tiempo permite proyectar de nuevo la T_{PV} y con esto definir el próximo periodo de irrigación, pero en las condiciones actuales del sistema FV.

La *Figura 17* muestra el modelo ideal de la transferencia de calor por irrigación presentado en la tesis doctoral por (Osma Pinto 2016) en la cual se establece un modelo RC básico del enfriamiento que se presenta durante la irrigación de un panel FV. Donde C_{PV} y C_{tq} son capacitancias térmicas del panel y del recurso hídrico almacenado en el tanque de acopio, respectivamente. De este análisis se definen los parámetros que intervienen en el cálculo de la temperatura de operación del panel FV con irrigación.

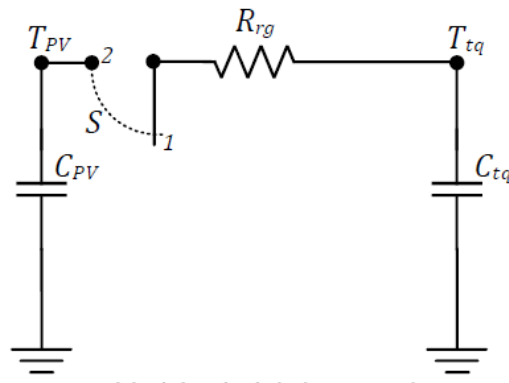


Figura 17. Modelo ideal de la transferencia de calor por irrigación. Adaptado de (Osma Pinto 2016).

La *Figura 18* muestra el modelo RC para un panel FV integrado con un sistema de irrigación. Los interruptores permiten analizar los dos escenarios de operación del panel FV, la posición 1 de los interruptores indican que el sistema de irrigación se encuentra inactivo, la posición 2 del interruptor indica que el sistema de irrigación está activado. Todos los elementos que muestra el modelo RC hacen parte del modelo de irrigación predictiva desarrollado por (Osma Pinto 2016).

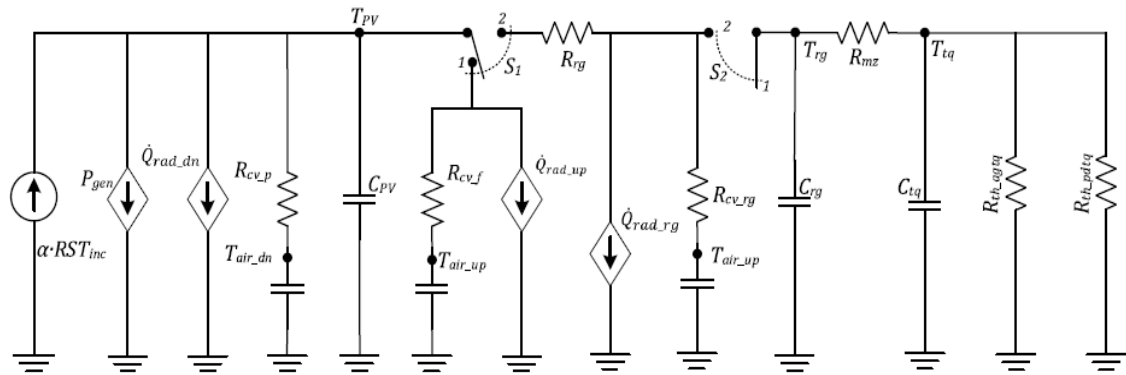


Figura 18. Modelo RC de un panel FV integrado con un sistema de irrigación. Adaptado de (Osma Pinto 2016).

La Tabla 7 muestra la nomenclatura del modelo de irrigación predictivo.

Tabla 7
Nomenclatura del modelo de irrigación predictivo

Nomenclatura	
αRST_{inc}	Irradiación total incidente absorbida por el panel FV
C_{tq}	Capacitancia térmica del agua almacenada en el tanque
C_{PV}	Capacitancia térmica del panel FV
C_{rg}	Capacitancia térmica de la irrigación
P_{gen}	Potencia eléctrica generada del panel FV
Q_{rad_up}	Variación de calor por radiación en la superficie frontal del panel FV
Q_{rad_dn}	Variación de calor por radiación en la superficie posterior del panel FV
Q_{rad_rg}	Variación de calor por radiación durante la irrigación
R_{cv_f}	Resistencia de convección superficie frontal del panel FV
R_{cv_rg}	Resistencia de convección durante la irrigación
R_{mz}	Resistencia de mezclado del agua
R_{cv_p}	Resistencia de convección superficie posterior del panel FV
R_{th_agtq}	Resistencia térmica de transferencia de calor (agua-ambiente)
R_{th_pdtq}	Resistencia térmica de transferencia de calor (envolvente-ambiente)
R_{rg}	Resistencia de irrigación
T_{tq}	Temperatura del agua almacenada en el tanque
T_{rg}	Temperatura del agua durante la irrigación
T_{PV}	Temperatura de operación del panel FV
T_{air_up}	Temperatura del aire circulante superficie frontal del panel FV
T_{air_dn}	Temperatura del aire circulante superficie posterior del panel FV

Adaptado de (Osma Pinto 2016).

Según (Osma Pinto 2016), la técnica de irrigación predictiva realiza un proceso de toma inteligente de decisiones en cada instante de análisis $-t$.

Se basa para ello en los siguientes cuatro pasos:

- a) Monitorizar en tiempo real las condiciones micro-climáticas en sitio.
- b) Realizar la predicción proyectada en el tiempo del comportamiento del panel FV (temperatura de operación y potencia eléctrica generada) para dos casos, irrigado y no irrigado en el instante de análisis – t .
- c) Determinar los índices: potencia neta promedio máxima ($P_{pm\acute{a}x}$) y tiempo de beneficio energético máximo ($t_{bm\acute{a}x}$). $P_{pm\acute{a}x}$ indica cuánto será el beneficio máximo a ser obtenido por la irrigación efectuada y $t_{bm\acute{a}x}$ indica cuándo será el instante de tiempo más favorable para llevar a cabo el siguiente proceso de análisis sobre la irrigación.
- d) Llevar a cabo la aplicación recurrente de los literales a), b) y c) para un paso de tiempo Δt (e.g. 1 min).

Las ecuación [2] y ecuación [3] corresponden a la potencia eléctrica generada por el panel FV y la temperatura de operación del panel FV para un instante $i+1$, respectivamente. La potencia generada depende de la irradiación incidente y del valor actual de la temperatura de operación del panel FV. La temperatura de operación del panel FV depende del valor de temperatura de operación anterior y otros factores como lo son: capacitancias térmicas, irradiación incidente absorbida, potencia generada, calor por radiación y calor por convección (Osma Pinto 2016).

$$P_{gen} = 0,2381Ginc(t) - 0,0000318Ginc(t)^2 - 0,0991T_{PV}(t) + 0,00213T_{PV}^2(t) \quad [2]$$

$$T_{PVi+1} = T_{PVi} + \frac{\Delta t}{C_{SPV} \cdot A_{PV}} (\alpha Ginc_i - P_{gen_i} - Q_{rad_i} - Q_{cv_i}) \quad [3]$$

La *Figura 19* muestra el diagrama de flujo del proceso de irrigación del techo verde y los sensores de humedad, esta rutina se presenta con un esquema independiente dado que se realiza en una rutina en paralelo a las rutinas de irrigación estática y predictiva.

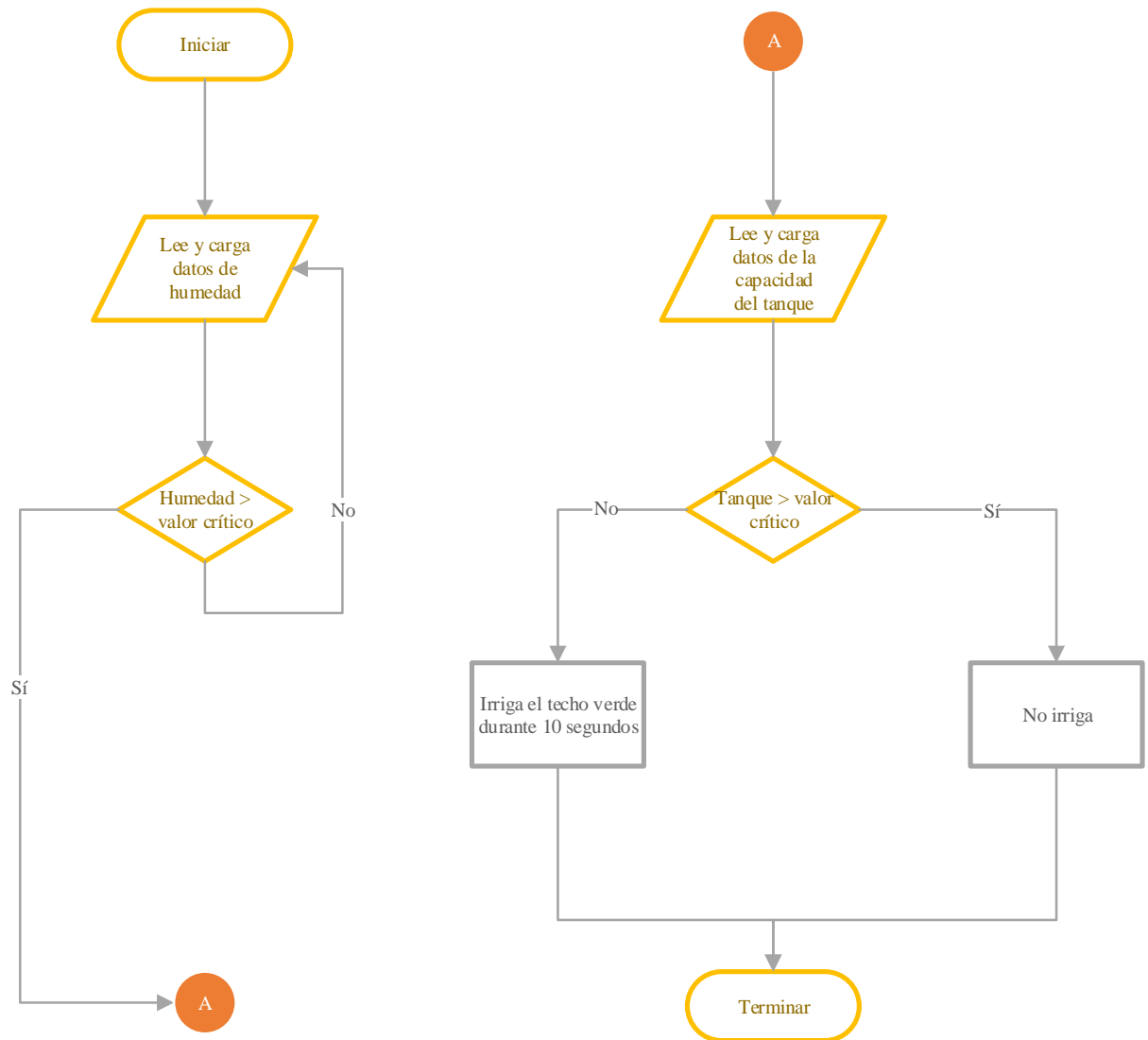


Figura 19. Diagrama de flujo irrigación del techo verde.

En el caso de necesitar irrigación del techo verde pero no se cuente con el recurso hídrico necesario, se decide no irrigar hasta obtener el recurso hídrico en el sistema de acopio para luego ser bombeado durante 10 segundos para cada rutina de irrigación.

4 Cálculo del beneficio energético de la técnica de irrigación

Una vez instaladas las dos técnicas de irrigación se debe medir la producción energética para tres escenarios diferentes: sin irrigación, irrigación estática e irrigación predictiva. Este capítulo expone la comparación y el análisis de dicha información dividida en tres secciones; la Sección 4.1 muestra el estudio realizado a la técnica de irrigación predictiva con respecto al sistema FV de referencia; la Sección 4.2 muestra el estudio de la técnica de irrigación predictiva con respecto a la técnica de irrigación estática; finalmente, la última sección 4.3 muestra los resultados comparativos en los cuales se muestra la información relacionando los tres escenarios en simultáneo.

Inicialmente, se registran los datos generales de operación como lo son la irradiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Además, los parámetros determinantes como la temperatura de operación de cada panel FV y su respectiva potencia generada, teniendo así un criterio claro de comparación y relación entre temperatura de operación y generación de energía eléctrica.

Del panel FV de referencia se mide la T_{PV} y la P_{gen} como datos individuales de este sistema FV; datos que son comparados con los correspondientes de la técnica de irrigación predictiva. Además, la técnica de irrigación predictiva se compara con los datos obtenidos de la técnica de irrigación estática.

Por otro lado, un factor a tener en cuenta en la comparación de las dos técnicas de irrigación es el recurso hídrico utilizado. Este análisis se encuentra en el Apéndice E. La cuantificación del beneficio energético de la técnica de irrigación predictiva pretende analizar si

dicho funcionamiento presenta mejor resultados o no con respecto a potencia generada y recurso hídrico utilizado.

El Apéndice F muestra el ajuste realizado a los datos correspondientes a la potencia generada de los paneles FV, esto se realiza para normalizar los datos de potencia generada ya que cada panel FV genera una magnitud de potencia diferente aun cuando operan bajo las mismas condiciones.

4.1 Técnica predictiva

Este experimento consiste en comparar dos paneles FV instalados sobre la misma estructura, uno de ellos opera bajo los efectos de una técnica de irrigación llamada predictiva debido a su modo de operación en el cual se proyecta la temperatura y potencia generada por el panel FV suponiendo que es irrigado para predecir si es conveniente o no irrigarlo durante el tiempo analizado que es de 30 minutos. El otro panel FV utilizado en este experimento opera sin irrigación y se le llama de referencia debido a que es la base para medir la potencia generada extra y el decremento de la temperatura de operación del panel FV irrigado.

El beneficio térmico y energético se calcula estimando el promedio de la T_{PV} o P_{gen} , según sea el caso, teniendo el promedio de cada panel FV se procede a relacionar estos valores en el siguiente orden: panel FV de referencia /panel FV con régimen predictivo, panel FV con régimen estático /panel FV con régimen predictivo; esto para el caso de la temperatura de operación, en el caso de la potencia generada el orden es inverso. En el caso de los paneles FV irrigados, el análisis de potencia y energía se realiza teniendo en cuenta el consumo del sistema de irrigación.

La ecuación [4] muestra la estimación del decremento de temperatura de operación usada en este análisis; en el numerador se encuentran las T_{PV} con las que se compara la T_{PV} predictiva que corresponde a la temperatura de operación del panel FV con técnica de irrigación predictiva. La ecuación [5] muestra la estimación del incremento de potencia usada en este análisis; en el numerador se encuentran las P_{gen} con las que se compara la P_{gen} predictiva que corresponde a la potencia generada del panel FV con técnica de irrigación predictiva.

$$DT = \frac{T_{PVreferencia}}{T_{PVpredictiva}} \quad [4]$$

$$IP = \frac{P_{gen predictiva}}{P_{gen referencia}} \quad [5]$$

La *Figura 20* muestra la variación de la temperatura de operación del panel FV operando con una técnica de irrigación predictiva. Los datos fueron tomados desde las 8:20 am hasta las 12:00 pm, mostrando un perfil completo de temperatura de operación entre dos sistemas FV. Las líneas punteadas de color naranja representan los momentos en los cuales se activó el sistema de irrigación; en los momentos en los cuales más se irrigó el panel FV es en los de mayor nivel de irradiación solar.

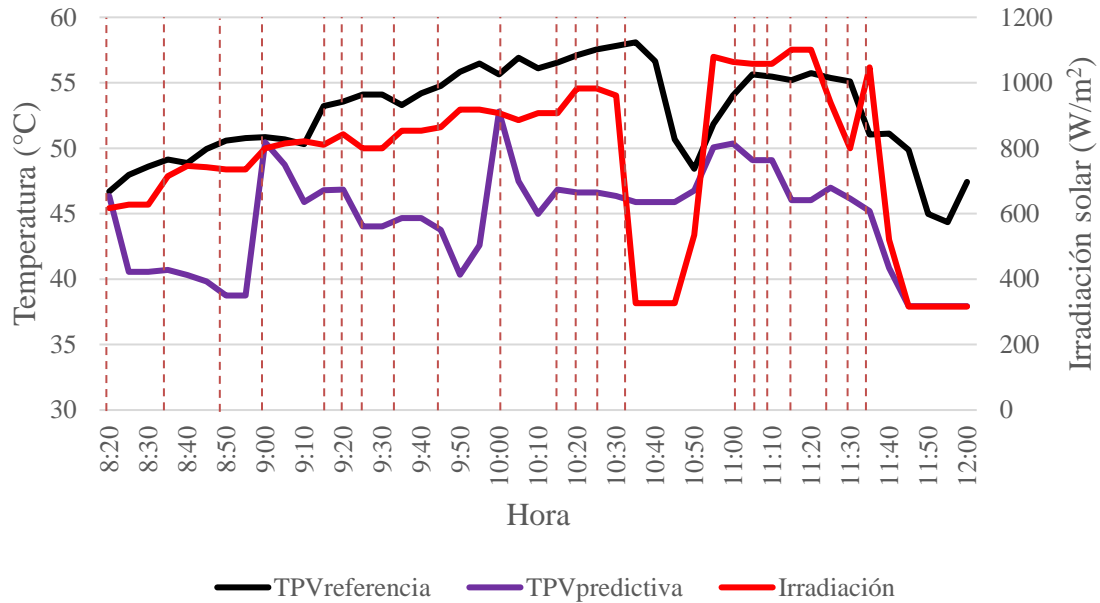


Figura 20. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 1.

Se puede apreciar una reducción térmica considerable de $13,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 9:55 am en la $T_{PVpredictiva}$ del panel FV irrigado con técnica predictiva respecto a $T_{PVreferencia}$ la cual representa la temperatura de operación del panel FV de referencia. El decremento de temperatura, hallado con la ecuación [4], desde las 8:20 am hasta las 12:00 pm es de 18% correspondiente a $8,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La Figura 21 muestra la variación de potencia generada por el panel FV irrigado con técnica predictiva respecto al panel FV de referencia. El incremento de potencia, hallado con la ecuación [5] desde las 8:00 am hasta las 12:00 pm, fue del 9,49% producto de 21 rutinas de irrigación durante el tiempo de observación; irrigaciones que no se presentan de forma periódica, sino que por el contrario de manera específica debido a las condiciones climatológicas y de operación. El 9,49% corresponde a $17,07\text{ W}$ de potencia generada adicional por el panel FV irrigado con técnica predictiva en comparación con el panel FV de referencia.

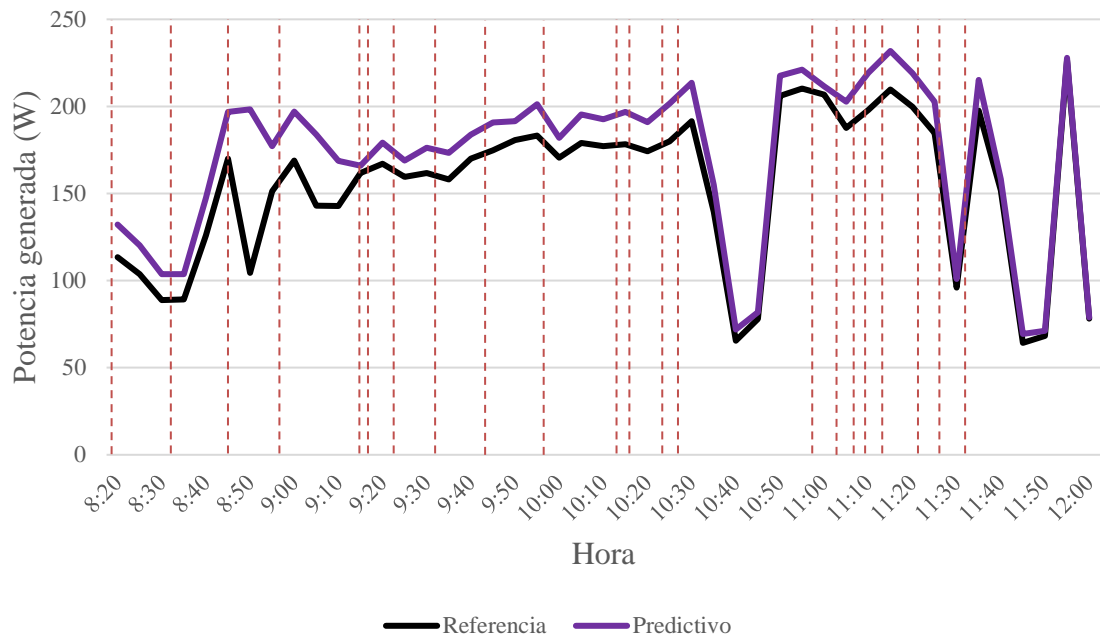


Figura 21. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 1.

La Figura 22 muestra la resta de las curvas de potencia generada por el panel FV con técnica de irrigación predictiva y el panel FV de referencia. La mayor diferencia de la curva se presenta a las 9:05 am de 40,73 W del panel FV irrigado en régimen predictivo respecto al panel FV de referencia, se destaca la irrigación realizada a las 9:02 am responsable del incremento de potencia generada mencionado.

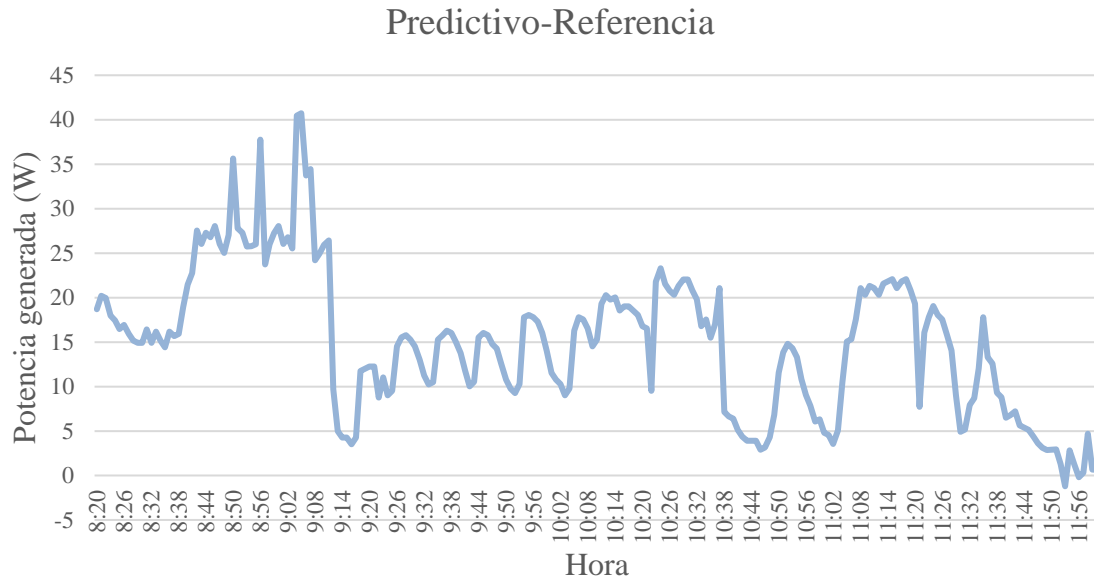


Figura 22. Resta de la potencia generada por el panel FV con régimen predictivo con respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 1.

La Figura 23 muestra la variación de temperatura del panel FV irrigado con técnica de irrigación predictiva y la temperatura del panel FV de referencia, los datos se tomaron desde las 12:00 hasta las 16:00. Se destaca el nivel de irradiación bajo y por ende la cantidad de rutinas de irrigación es baja. El decremento de temperatura durante el tiempo de observación fue de 5,2%, hallado con la ecuación [4]. Se destacan los tiempos de irrigación ya que se presentan en los picos de irradiación solar.

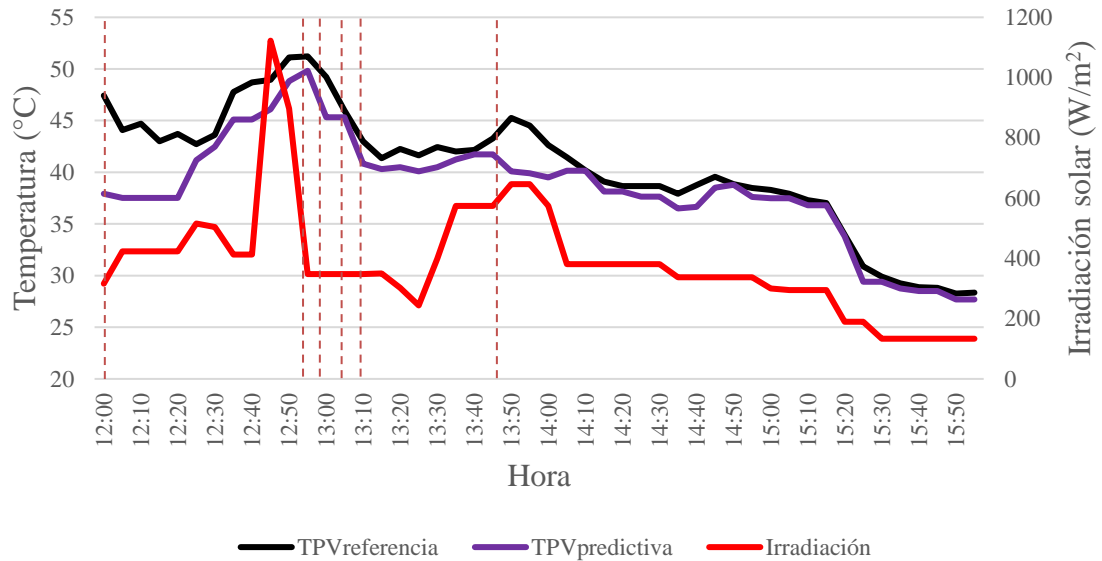


Figura 23. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 2.

La Figura 24 muestra la variación de la potencia generada por el panel FV con técnica de irrigación predictiva y el panel FV de referencia, el incremento hallado para esta observación es de 0,45%, lo que corresponde a 0,39W de potencia adicional generada por el panel FV con técnica de irrigación predictiva con respecto al panel FV de referencia desde las 12:00 pm hasta las 16:00.

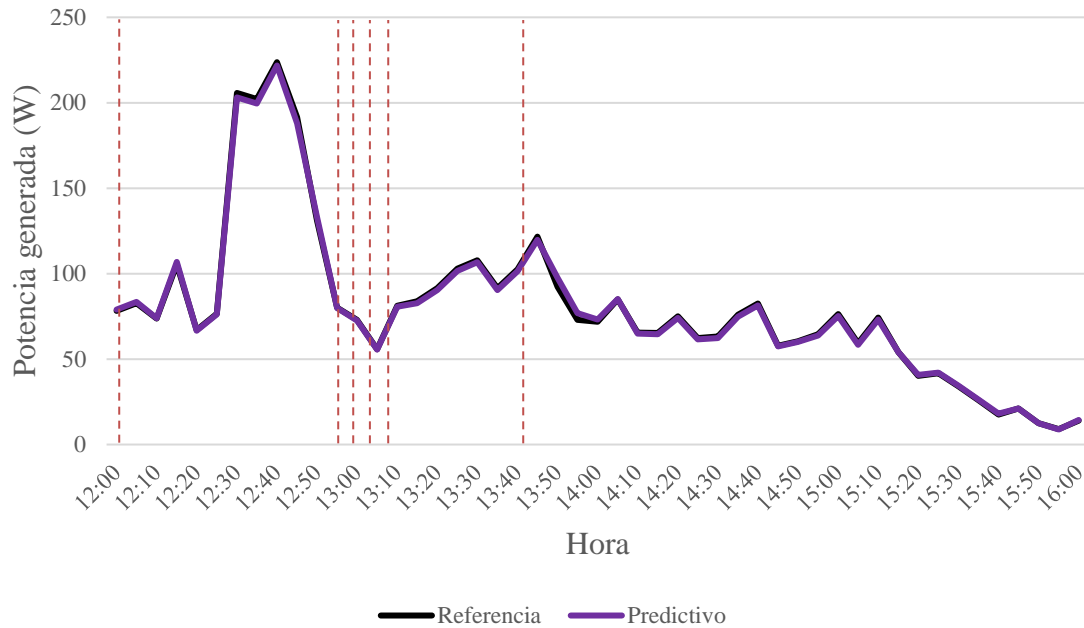


Figura 24. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 2.

La Figura 25 muestra la curva de resta de potencia generada del panel FV con irrigación predictiva respecto al panel FV de referencia; la diferencia que se obtiene es mínima y eso lo evidencia el beneficio energético de 0,45%, hallado en el párrafo anterior, esto se debe al bajo nivel de irradiación solar presente durante la muestra. Es por esta razón, el número reducido de irrigaciones (6) presentes en este periodo del día por ende la temperatura de operación del panel FV con técnica predictiva tiene una diferencia en promedio de 2 °C respecto al panel FV de referencia, lo cual supone un gran análisis por parte de esta técnica de irrigación dado que las condiciones de operación no ameritan acciones de control.

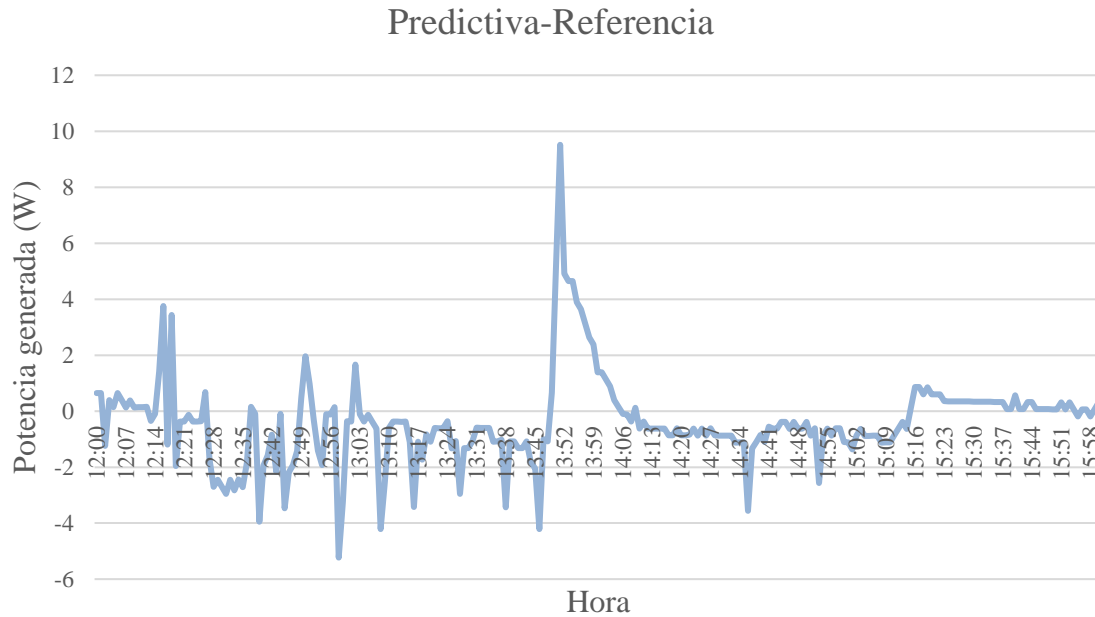


Figura 25. Resta de la potencia generada por el panel FV con régimen predictivo con respecto al panel FV de referencia día 1 periodo 2.

4.2 Técnica estática

En este experimento se procede a irrigar dos paneles FV con técnicas de irrigación individuales; uno de ellos opera con una técnica de irrigación estática definida en 1:29, esto significa que se activa el sistema de irrigación durante 1 minuto y los 29 minutos siguientes se encuentra desactivado el sistema de irrigación, el otro panel FV opera con una técnica de irrigación predictiva la cual predice los tiempos de irrigación cada vez que exista un beneficio energético en la irrigación. Cabe mencionar que la irrigación estática se activa cada 30 minutos iniciando su primera irrigación a las 8:10 y su última irrigación a las 17:40.

La Figura 26 muestra la variación de temperatura del panel FV irrigado con la técnica predictiva con respecto al panel irrigado con la técnica estática. Las líneas verticales punteadas representan los instantes en los que se activan los sistemas de irrigación, las líneas de color naranja corresponden a la irrigación predictiva y las líneas de color negro corresponden a la

irrigación estática. Aspectos que se tienen en cuenta para esta observación es el nivel de irradiación solar alto y por ende la cantidad de rutinas de irrigación para la técnica predictiva.

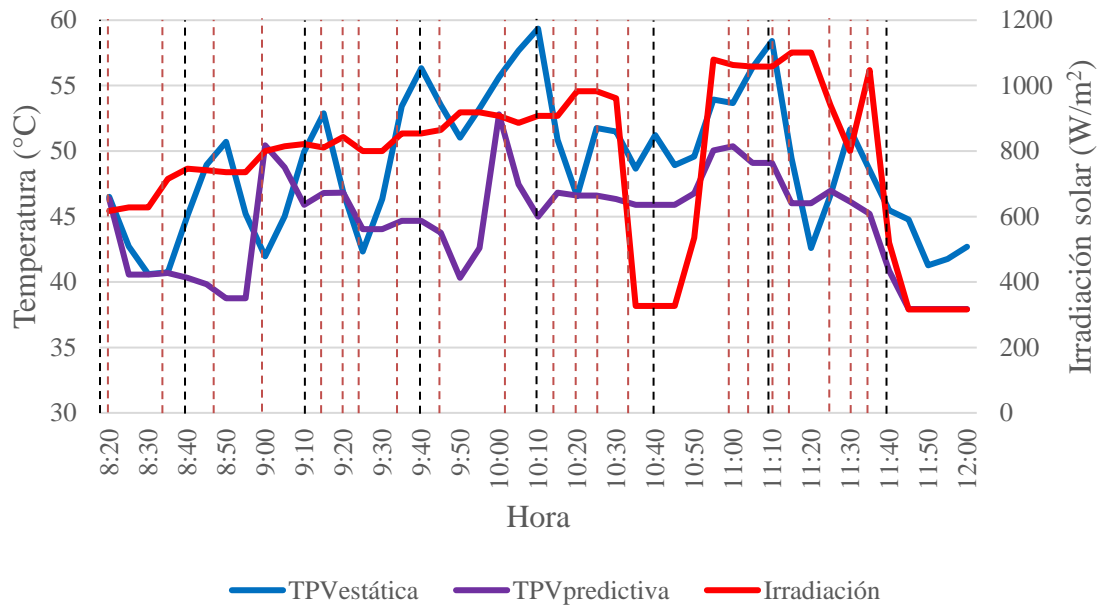


Figura 26. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 1.

En esta observación se obtiene un decremento de temperatura de 10% del panel FV irrigado con técnica predictiva respecto al panel FV irrigado con técnica estática, hallado con la ecuación [4]. La técnica de irrigación estática se activa 8 veces en el periodo de observación, comprado con 21 veces de activación del sistema de irrigación predictivo. Se destaca el periodo de tiempo en el cual la irradiación solar es baja y la técnica de irrigación predictiva, la cual se encontraba irrigando continuamente, no irriga debido a las condiciones desfavorables del entorno.

La Figura 27 muestra la variación de potencia generada entre el panel FV irrigado en régimen predictivo y el panel FV irrigado en régimen estático, este último presenta una potencia menor respecto al panel irrigado con el régimen predictivo. Las líneas verticales punteadas

representan los instantes en los que se activan los sistemas de irrigación, las líneas de color naranja corresponden a la irrigación predictiva y las líneas de color negro corresponden a la irrigación estática.

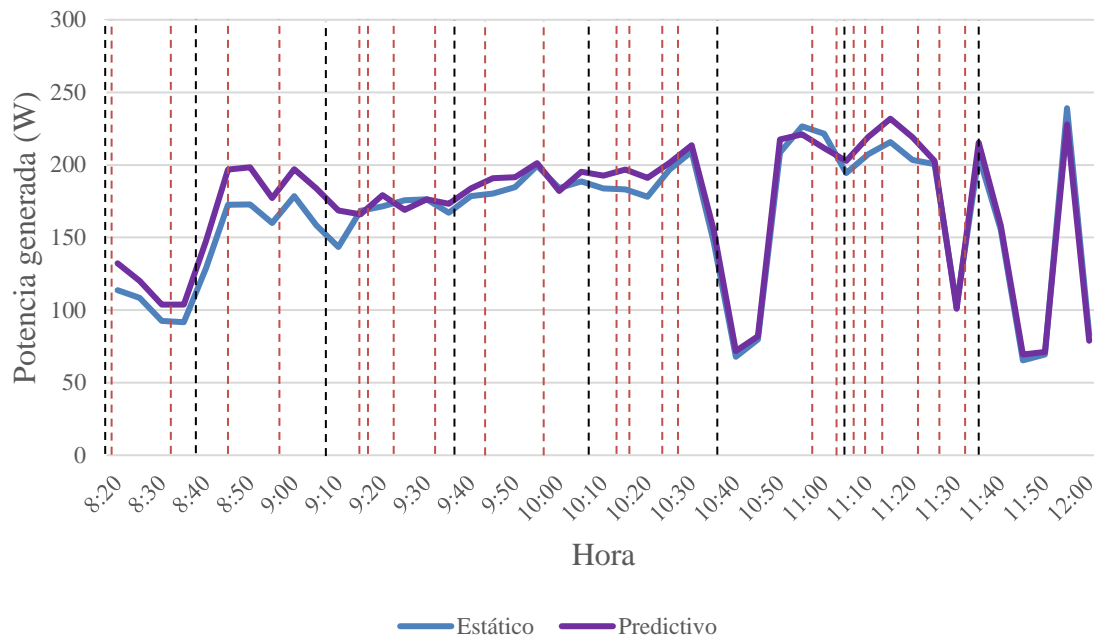


Figura 27. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 1.

El incremento de potencia hallado con la ecuación [5] desde las 8:20am hasta las 12:00pm es de 4,77%, que corresponde a 7,92W. Pese a que las curvas presentan las mismas características a lo largo del análisis, la potencia generada del panel FV irrigado en régimen estático es menor debido a la cantidad de irrigaciones que realiza, la diferencia de la cantidad de rutinas de irrigación realizadas para esta muestra es de 13; 21 rutinas de irrigación de la técnica predictiva respecto a 8 rutinas de irrigación de la técnica estática.

La Figura 28 muestra la resta de las curvas de potencia generada del panel FV irrigado con técnica de irrigación predictiva y el panel FV irrigado con técnica de irrigación estática. La mayor diferencia en la curva se presenta a las 9:04am y es de 33,75 W y se debe a los 7 °C de

diferencia que existe entre las T_{PV} , siendo menor la $T_{PVpredictiva}$; además, la técnica de irrigación predictiva una rutina de irrigación a las 9:00 am las condiciones son ideales ya que el nivel de irradiación solar es alto.



Figura 28. Resta de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 1.

La Figura 29 muestra la variación de temperatura del panel FV irrigado con técnica de irrigación predictiva y el panel FV irrigado con técnica de irrigación estática, se destaca el nivel de irradiación bajo y esto conlleva en el número de rutinas de irrigación de la técnica de irrigación predictiva. El decremento de temperatura hallado con la ecuación [4] durante el análisis de los datos es de 9,78%. Para este caso, el número de rutinas de irrigación de la técnica predictiva es de 6 con respecto a 8 de la técnica de irrigación estática.

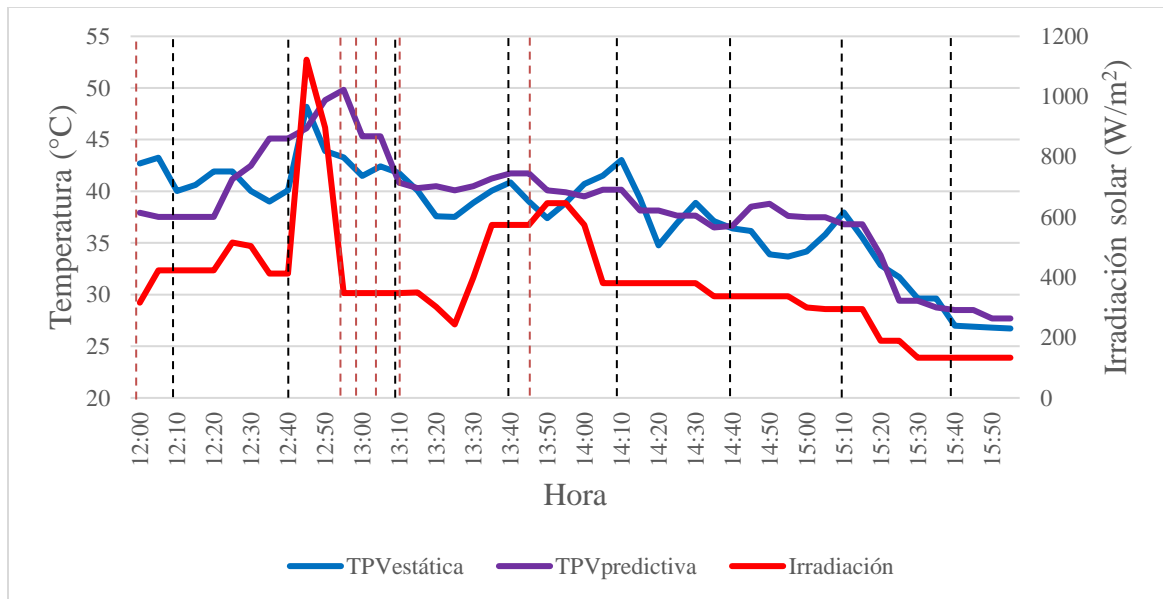


Figura 29. Variación de la temperatura de operación del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 2.

La Figura 30 muestra la variación de la potencia generada del panel FV con técnica de irrigación predictivo y el panel FV con técnica de irrigación estática, el número de rutinas de irrigación es menor para la técnica de irrigación predictiva aportando un incremento de potencia de 1.17% durante el tiempo de observación, el 1,17% corresponde a 1 W. El incremento mencionado es de la técnica de irrigación predictiva con respecto a la técnica de irrigación estática, en el análisis se tuvo en cuenta el consumo del sistema de irrigación para cada rutina y esto fue determinante en la potencia adicional generada por el sistema predictivo.

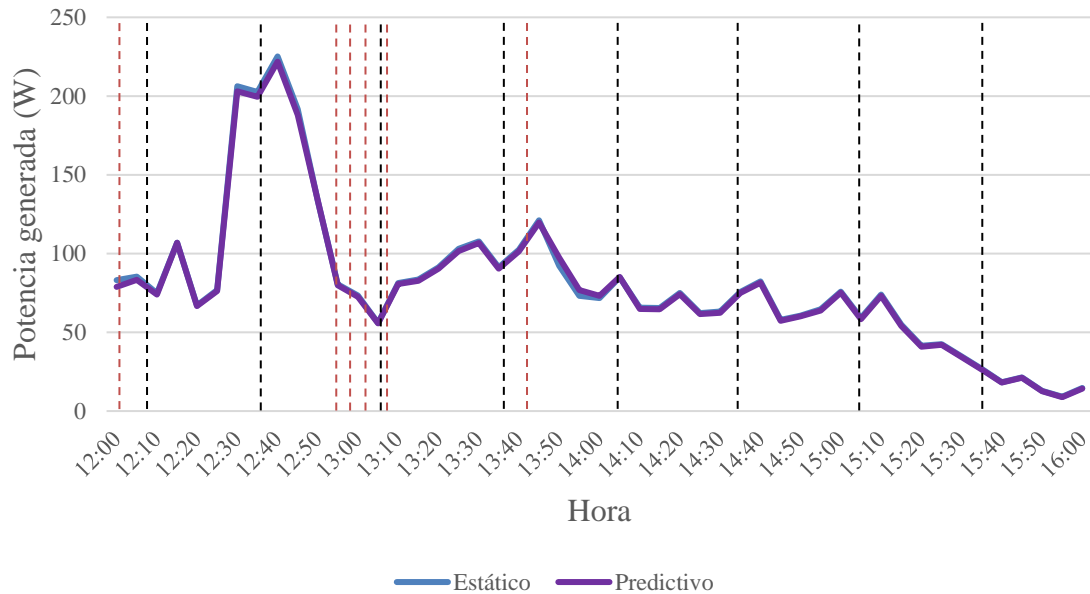


Figura 30. Variación de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 2.

La Figura 31 muestra la curva de resta de potencia generada del panel FV irrigado con régimen predictivo respecto al panel FV irrigado con régimen estático, se destaca el número reducido de rutinas de irrigación de la técnica predictiva lo cual permite verificar la activación del sistema de irrigación sólo en entornos apropiados para la producción energética. Al comparar con la cantidad de rutinas de irrigación realizadas en el periodo 1 de observación se halla la diferencia de 15 rutinas; 21 rutinas de irrigación en el periodo 1 de observación respecto a 6 rutinas de irrigación en el periodo 2 de observación.

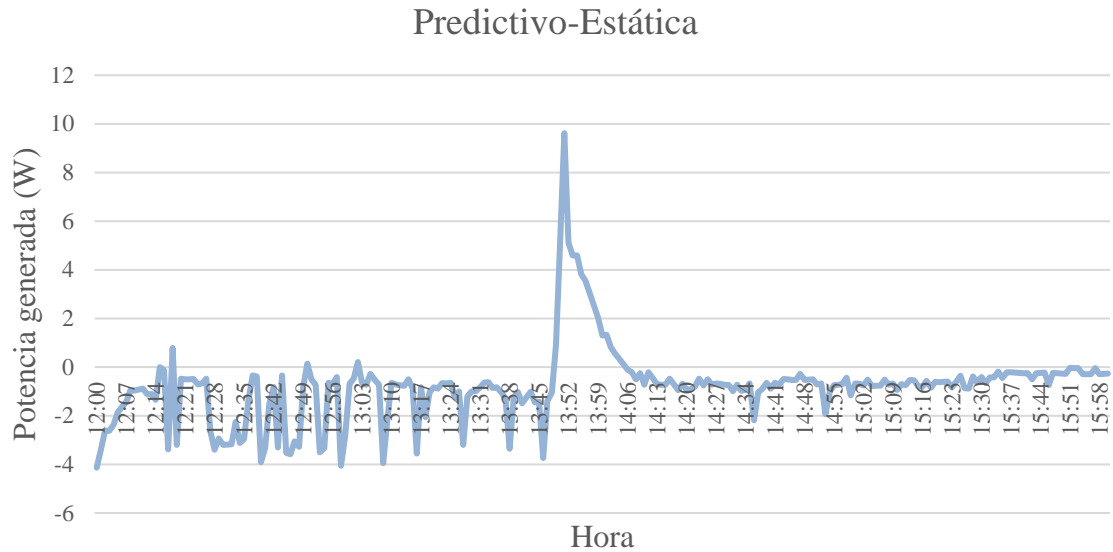


Figura 31. Resta de la potencia generada del panel FV con régimen predictivo respecto al panel FV con régimen estático día 1 periodo 2.

4.3 Resultados comparativos

El proceso de monitorización y análisis de los datos permitió evidenciar el beneficio energético y térmico que se obtiene al implementar una estrategia de irrigación inteligente en un panel FV. Para el caso se tienen en cuenta las muestras recogidas durante los meses de septiembre y octubre del año 2017, escenarios en los cuales se evidencian diferentes condiciones climatológicas y en todos de ellos el mismo resultado, mayor producción energética a una temperatura de operación más baja para los paneles FV con técnica de irrigación predictiva.

La Figura 32 muestra la energía promedio generada por cada panel FV, de la cual se comprueba el beneficio energético diario de la técnica de irrigación predictiva con respecto a la técnica de irrigación estática y al panel FV de referencia. También se muestra el consumo energético debido al sistema de irrigación estático y predictivo y el sistema de control de cada una de las técnicas de irrigación implementadas, este consumo de energía corresponde a 4,9 Wh para un día cualquiera día de operación de la técnica de irrigación estática; por su parte, el

consumo energético de la técnica de irrigación predictiva presentado en el día de observación es de 4,3 Wh, este consumo varía dependiendo de la cantidad de irrigaciones que proyecte el modelo de irrigación predictiva.

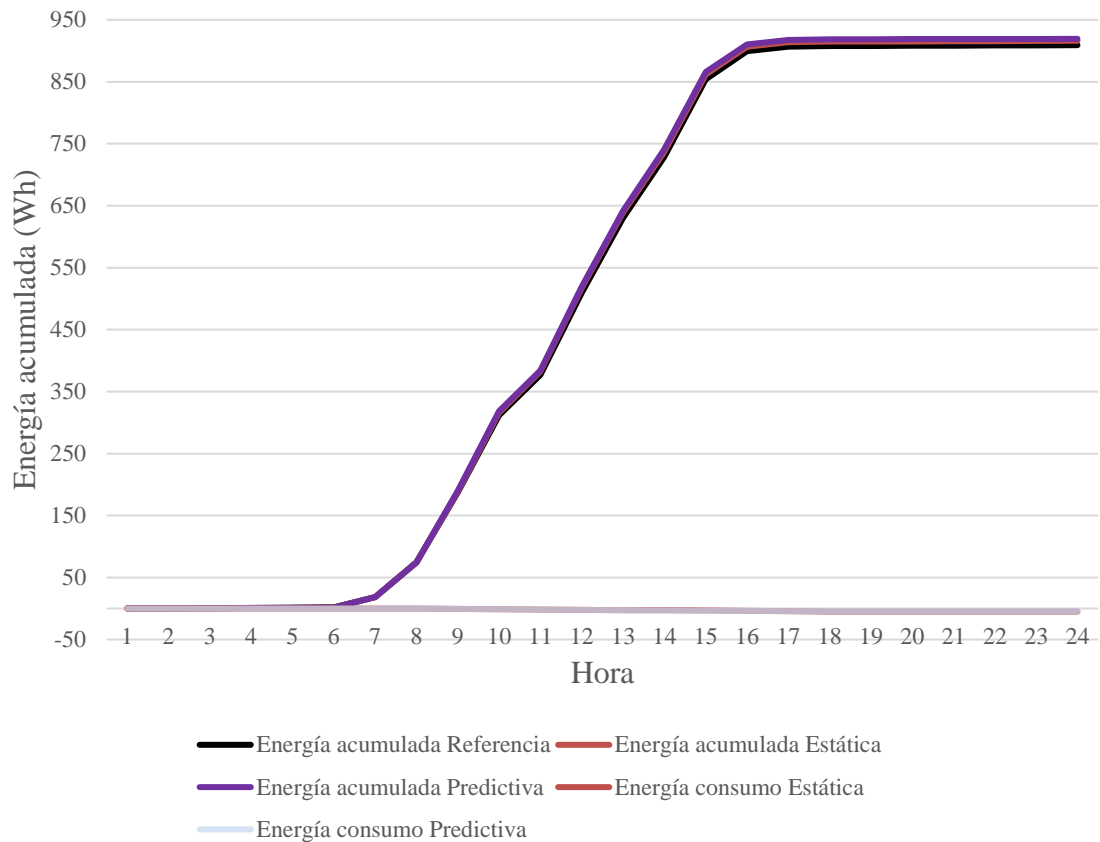


Figura 32. Energía promedio generada y consumida día 1.

La Figura 33 muestra las curvas que representan la resta de energía acumulada en los paneles FV con técnica de irrigación estática y predictiva, además de la energía acumulada por el panel FV de referencia para hallar el beneficio energético; dicho beneficio energético es de 4,23Wh-día equivalente al 0,86% para el panel FV con régimen predictivo con respecto al panel FV de referencia y de 2,22 Wh-día equivalente al 0,45% para el panel FV con régimen predictivo con respecto al panel FV con régimen estático. El ovalo color naranja corresponde a la zona de la

gráfica que aporta más información sobre el beneficio energético y se presenta en detalle en la *Figura 34.*

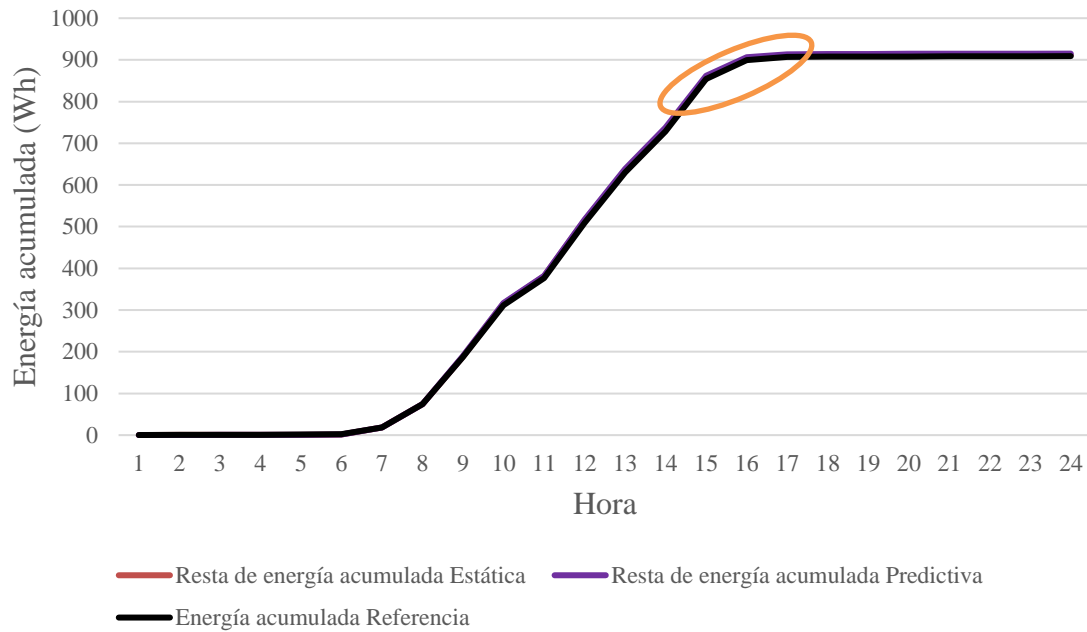


Figura 33. Resta de energía acumulada por los paneles FV irrigados respecto al consumo del sistema de irrigación.

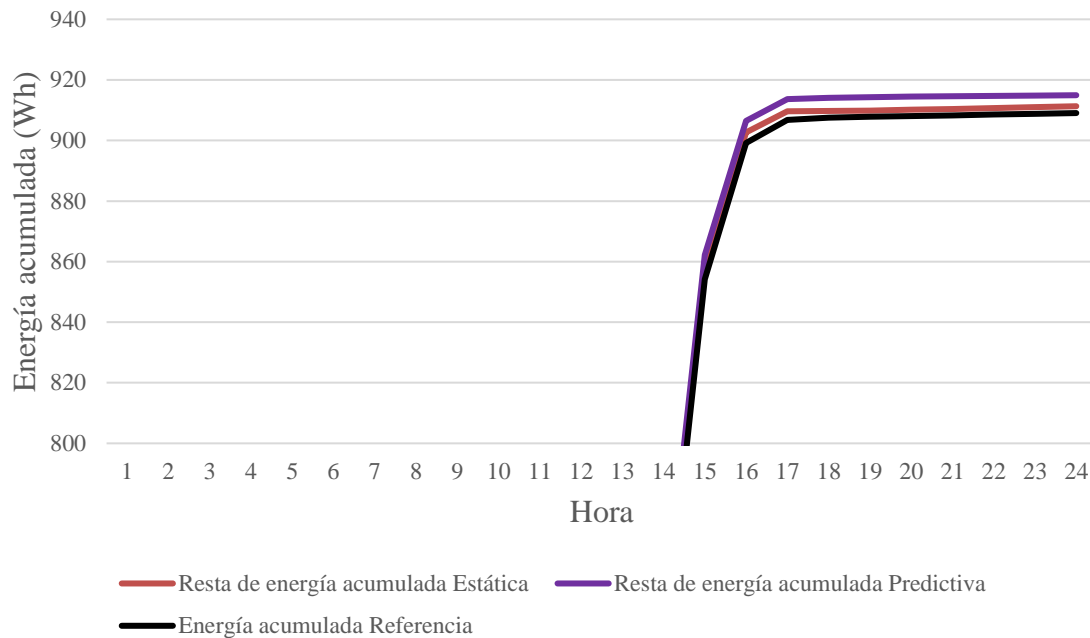


Figura 34. Resta de energía acumulada por los paneles FV irrigados respecto al consumo del sistema de irrigación (acercamiento).

5 Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones para trabajo futuro con técnicas de irrigación o en el tópico de beneficio energético FV.

La técnica de irrigación predictiva demostró en cada iteración un nivel de potencia generada superior precedido de un decremento en temperatura de operación comparado con 2 paneles FV, un panel FV sin irrigación y un panel FV con irrigación estática. Siendo la técnica de irrigación predictiva una solución para el aumento de la eficiencia de conversión de los sistemas FV actuales integrando las variables y parámetros necesarios para el análisis inteligente de un sistema FV con un sistema de riego que permite disminuir la temperatura de operación del panel FV y aumentar así su productividad energética.

La técnica de irrigación predictiva que se implementó en este trabajo de grado presenta resultados favorables en temperatura de operación y potencia generada para locaciones con bajo nivel de irradiación o con alta nubosidad, escenario que se presentó durante el análisis de los datos obteniendo beneficio energético y decremento en temperatura de operación en el panel FV con técnica predictiva respecto a los paneles FV comparados, panel FV de referencia y panel FV con técnica estática.

La aplicación desarrollada en este trabajo de grado con irrigación está orientada a sistemas autónomos y amigables con el medio ambiente; por lo cual, se puede implementar con un sistema de almacenamiento de agua que garantice la irrigación periódica del panel FV y así disminuir el consumo hídrico generado en cada irrigación, esto también favorece temporadas de lluvia o aplicaciones bajo dichas condiciones dado que el sistema tiene en cuenta los efectos de la misma en el proceso de conversión energética.

Durante la ejecución de los experimentos de irrigación se llevaron a cabo varios escenarios de irrigación, cambiando entre ellos la capacidad de bombeo de la bomba sumergible, de las utilizadas se destaca la de menor consumo energético (9W), ya que al presentar el menor consumo y proporcionar la calidad de riego necesaria es la mejor opción en esta aplicación, cabe destacar que para obtener resultados similares se debe garantizar una película de agua sobre la superficie del panel FV; esto lo garantiza la potencia de bombeo y el caudal de la bomba.

Es necesario tener en cuenta la temperatura del recurso hídrico al ser reutilizado debido al intercambio de calor con la superficie del panel FV, este análisis se realiza debido al incremento que se evidenció durante la monitorización de los datos y que influye en el decremento de la temperatura de operación del panel FV.

Se recomienda realizar estudios al tiempo de irrigación de la técnica de irrigación predictiva, esto con el fin de irrigar durante el tiempo necesario para cada condición y no de manera constante para todas ellas. Durante la implementación del trabajo de grado se observó que las irrigaciones eran seguidas en las horas de mayor irradiación solar, lo cual sugiere el estudio de diferentes Δt dependiendo de cada condición climatológica presentada.

Se recomienda integrar la medición en tiempo real de la producción energética del panel FV al modelo de irrigación predictivo para disminuir al máximo el porcentaje de error que se pueda obtener durante cada rutina de proyección de temperatura, esto para evitar los errores producidos por lecturas aleatorias que se puedan generar en momentos esporádicos en los sensores de temperatura.

Referencias

- Bahaidarah, Haitham M., Shafiqur Rehman, P. Ganidasan, and Bilal Tanweer. 2013. “Experimental Evaluation of the Performance of a Photovoltaic Panel with Water Cooling.” *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (October 2016): 2987–91.
- Cengel, Yunus A. (2007). *Transferencia de Calor Y Masa*. Tercera Ed. Reno.
- Cengel, Yunus A., and Michael A. Boles. (2009). *Termodinámica*. Sexta Edic. México D.F.
- Dorf, Richard C, and Robert H Bishop. (2011). *Modern Control Systems*. Twelfth Ed.
- Faiz, Jawad, and S.M.M. Moosavi. (2016). “Eccentricity Fault Detection – From Induction Machines to DFIG—A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 169–79. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115011922>.
- Hernandez Cristancho, Edgar Yesid, Luz Esther Quintero Sanguino, and Miguel Andres Torres Romero. (2016). “Caracterización de La Operación de Paneles Fotovoltaicos En Condiciones Tropicales Bajo La Influencia de Un Techo Verde. Caso Bucaramanga.” Universidad Industrial de Santander.
- Ju, Fali, and Xiangzhao Fu. (2011). “Research on Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance.” : 3601–6.
- Klaus, Jager et al. (2014). *Solar Energy. Fundamentals, Technology and Systems*. Delft.
- Nižetić, S., D. Čoko, A. Yadav, and F. Grubišić-Čabo. (2016). “Water Spray Cooling Technique Applied on a Photovoltaic Panel: The Performance Response.” *Energy Conversion and*

Management 108: 287–96.

Ogata, Katsuhiko. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Quinta Edi.

Osma Pinto, German Alfonso. (2016). “Caracterización Del Desempeño de Paneles FV En Terrazas de Edificaciones Localizadas En Entornos Con Clima Tropical Cálido.” Universidad Industrial de Santander.

Pacheco Rios, Laura Viviana, and Julián Fernando Suarez Vásquez. (2015). “Diseño de Un Sistema de Riego Automático Con Monitorización de Nivel de Humedad.” Universidad Industrial de Santander.

Palz, Wolfgang. (2014). *SOLAR POWER FOR THE WORLD. What You Wanted to Know about Photovoltaics*. Boca Raton.

Rojas Zambrano, Wilmer Yohanny, and Carlos Enrique Florez Gomez. (2016). “Impacto de Dos Estrategias de Irrigación En La Potencia Generada Y La Temperatura de Operación de Un Panel Fotovoltaico Upsolar 250W Instalado Sobre Techo Verde En La Ciudad de Bucaramanga.”

Teo, H G, P S Lee, and M N A Hawlader. (2012). “An Active Cooling System for Photovoltaic Modules.” *Applied Energy* 90(1): 309–15.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017>.

Apéndices

Apéndice A. Sistema de irrigación.

El sistema de irrigación fue diseñado de forma que garantice una película de agua en la superficie del panel FV, esto lo recomienda (Rojas Zambrano and Florez Gomez 2016) para obtener mejores resultados en la irrigación.

En el trabajo de grado fueron usadas 3 bombas sumergibles de diferente capacidad; obteniendo mejores resultados la bomba SP-980(9 W) gracias a la perilla de control de flujo que ésta presenta, que obtener un flujo de 500 l/h suficiente para la aplicación y la de menor consumo energético.

La única limitante de la bomba SP-980 es la altura de operación; debido a su baja potencia de consumo permite una altura máxima de operación de 1,3 m lo cual es perjudicial para aplicaciones en las que el sistema FV se encuentre por encima del metro de altura, se recomienda usar la bomba SP-980 para aplicaciones de una altura menor a un metro ya que para alturas superiores la irrigación se presenta en goteo, no se obtiene la película de agua deseada.

Para el sistema de acopio del recurso hídrico se recomienda un tanque de almacenamiento de 100 litros teniendo en cuenta el almacenamiento normal en un día de irrigación y el almacenamiento de aguas lluvias, lo anterior se tiene en cuenta para lograr reutilizar la mayor cantidad de líquido posible en el proceso de irrigación. Dado que dicho líquido es usado en la irrigación de los paneles FV y el techo verde se presenta un aspecto a tener en cuenta en la eficiencia del sistema y es la temperatura del agua; al presentar un intercambio de calor el agua almacenada presenta un aumento en su temperatura y esto es perjudicial a la hora de disminuir la temperatura del panel FV.

La *Figura 35* muestra la película de agua que se forma durante la irrigación en un tubo de PVC con agujeros distanciados 5cm.



Figura 35. Película de agua del sistema de irrigación.

Apéndice B. Baño Termo-estado

Este procedimiento se llevó a cabo en los laboratorios de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander; consiste en medir la temperatura del líquido que se encuentra en un recipiente, luego se incrementa la temperatura del líquido progresivamente hasta el punto de ebullición al cual se encuentra el líquido para la presión atmosférica de la ciudad de Bucaramanga.

La *Figura 36* muestra el procedimiento de calibración para dos RTD's tomando de base dos termocuplas de precisión conectadas a un medidor de temperatura digital.

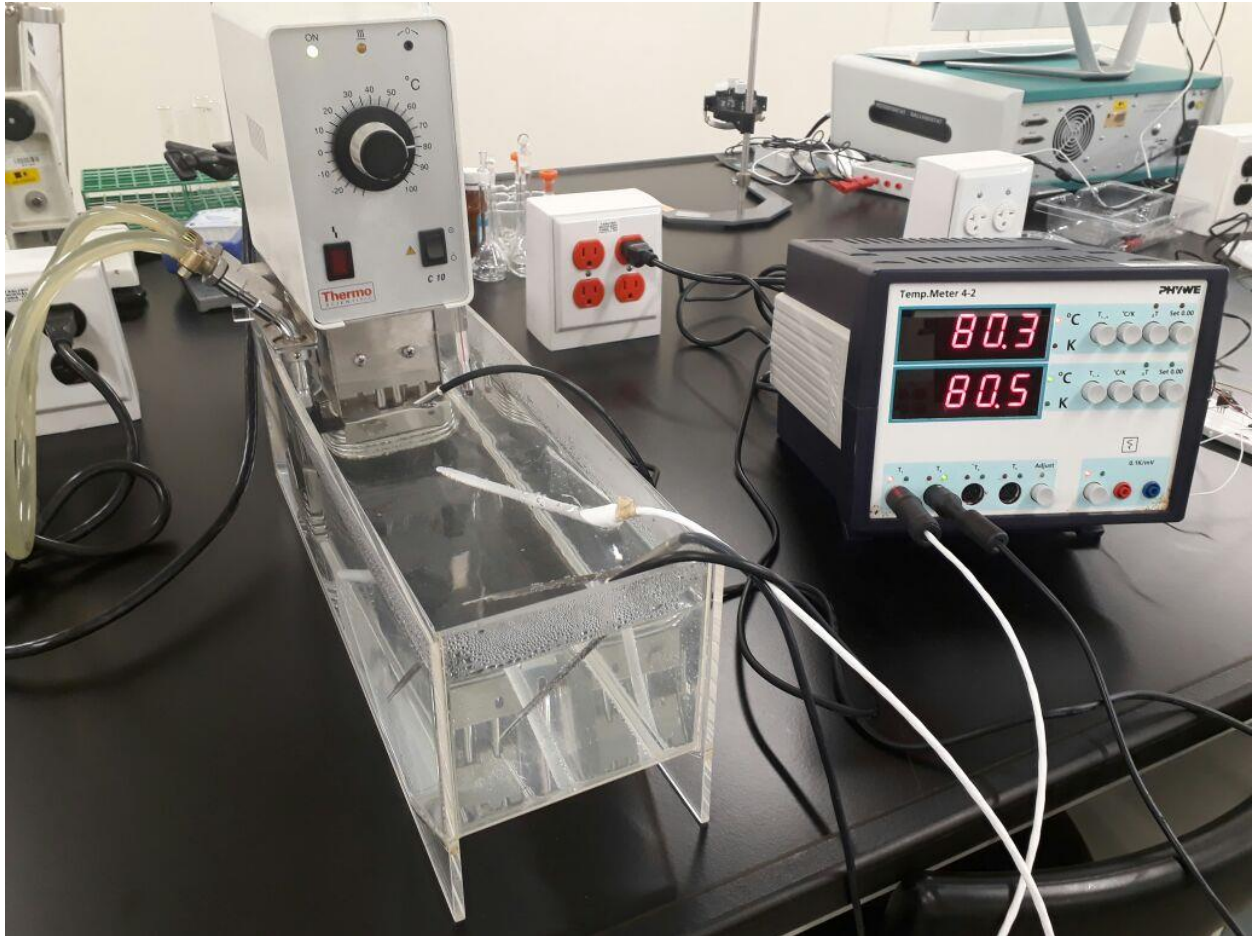


Figura 36. Baño termo-estado de 2 RTD's.

Debido a la aplicación en la cual serán usados los RTD's la temperatura inicial del procedimiento se fijó en 10 °C; la temperatura de ebullición del agua para la presión atmosférica en la ciudad de Bucaramanga es de 98 °C. Teniendo los dos límites de operación se realiza el barrido de temperaturas, el incremento entre cada medición se fijó en cinco grados Celsius. Se realizaron cinco experimentos en total para cada RTD y de los datos arrojados se realiza la curva de calibración.

Las *Figura 37* y *Figura 38* muestran las curvas y ecuaciones de calibración halladas a partir de los datos tomados durante los cinco experimentos para 2 RTD's, V1 corresponde al voltaje medido en el RTD 1 y V2 corresponde al voltaje medido en el RTD 2 ante cada variación de temperatura en el líquido utilizado en el procedimiento de calibración.

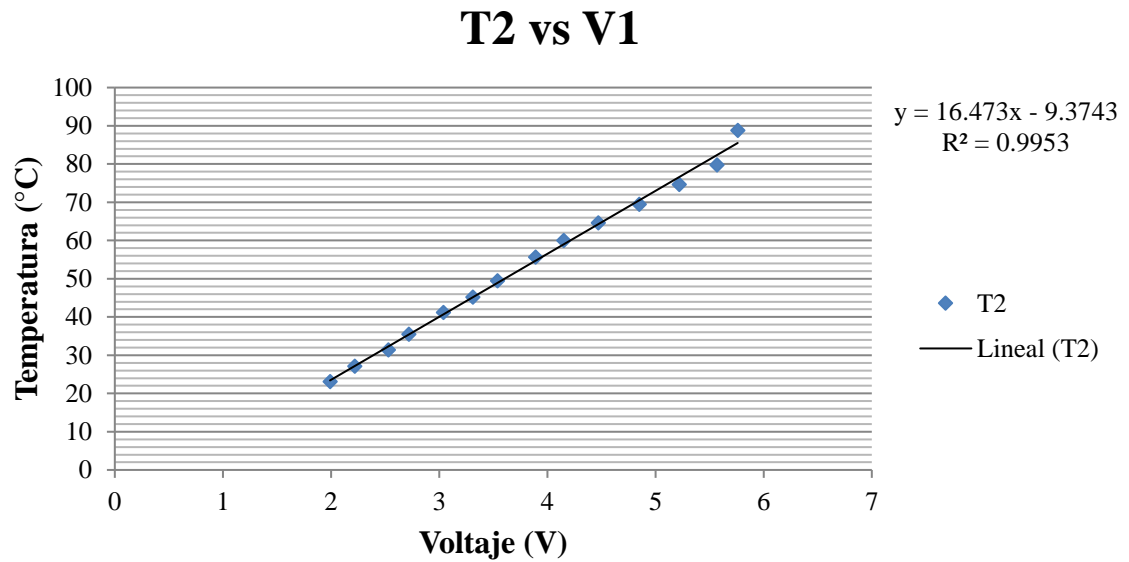


Figura 37. Curva y ecuación de calibración del RTD 1.

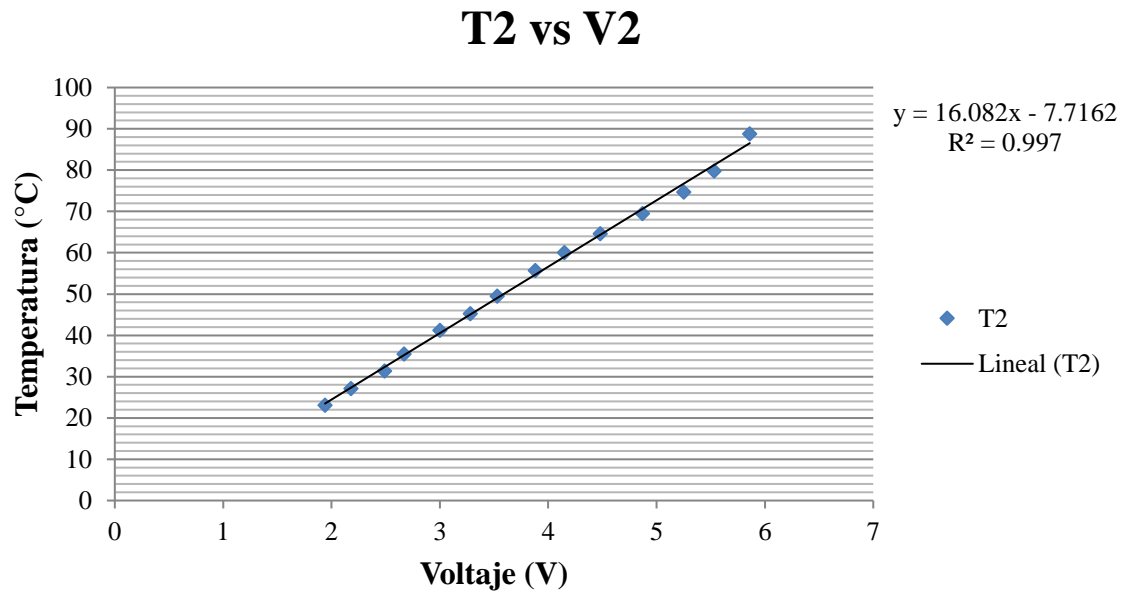


Figura 38. Curva y ecuación de calibración del RTD 2.

La duración de cada experimento fue de 1 hora en promedio, realizando dos sesiones de calibración para cada pareja de RTD's.

La Figura 39 muestra los datos técnicos del termostato de inmersión utilizado para el procedimiento de calibración de los sensores de temperatura.

Escuela de Química	Facultad de Ciencias		Universidad Industrial de Santander	MANUAL TÉCNICO DE INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA	Código: MMTQ-FQ.01 Versión: 00 Página 8 de 54
-----------------------	-------------------------	---	---	--	---

4.2. TERMOSTATO DE INMERSIÓN



IDENTIFICACIÓN	Termostato de inmersión C10.
NOMBRE DEL FABRICANTE	Thermo Fisher Scientific Phywe Systeme GMBH & Co. KG
ALCANCE	Este equipo es apropiado para la regulación de la temperatura de un baño, en aplicaciones biológicas o físicas. Normalmente se usa con agua como liquido de transferencia de calor.
AUTORIZACIÓN DE USO	Docentes, técnicos de lab., estudiantes.
AGENTE AUTORIZADO DE CONTACTO	Support.mc.de@thermofischer.com www.thermo.com/mc Tel. +49(0)721 4094-444 Fax +49(0)721 4094-300

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ENERGÍA DE CALEFACCIÓN	1000 W
PRECISIÓN DE TEMPERATURA	+/- 0,04 °k
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	25 a 100 °C
CON REFRIGERACION ADICIONAL	-30 a 100 °C
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	115 +/- 10% V FRECUENCIA: 60 Hz
BOMBA DE PRECISIÓN máx.	300 mbar

Figura 39. Ficha técnica del termostato de inmersión.

La *Figura 40* muestra los datos técnicos del RTD de precisión utilizado en el procedimiento y la ficha técnica del medidor de temperatura digital se muestran en la *Figura 41* con los cuales tenemos una medición precisa de la temperatura y será el valor de referencia para la construcción de la curva de temperatura de cada RTD.

Escuela de Química	Facultad de Ciencias		Universidad Industrial de Santander	MANUAL TÉCNICO DE INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA	Código: MMTQ-FQ.01
				Versión: 00	
				Página 27 de 54	

4.14. SONDA DE TEMPERATURA SUMERGIBLE, PT 100



IDENTIFICACIÓN	Sonda de temperatura sumergible PT100
NOMBRE DEL FABRICANTE	Phywe Systeme GMBH & Co. KG
ALCANCE	Resistencia de medida de temperatura PT 100 en acero inoxidable con un tubo protector.
AUTORIZACIÓN DE USO	Docentes, técnicos de lab., estudiantes.
AGENTE AUTORIZADO DE CONTACTO	info@phywe.de www.phywe.de Tel. +49(0)551 604-0 Fax +49(0)551 604-107

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

RANGO DE TEMPERATURA	-50 a 350°C
TIEMPO DE RESPUESTA(en agua)	Aprox. 10 segundos
LONGITUD DEL TUBO PROTECTOR	200mm
DIÁMETRO DEL TUBO PROTECTOR	5.2 mm
DIÁMETRO DE LA PUNTA DE MEDICIÓN	3.2 mm
LONGITUD DEL CABLE	120 cm

Figura 40. Ficha técnica termopar de precisión.

 Escuela de Química	 Facultad de Ciencias	 Universidad Industrial de Santander	MANUAL TÉCNICO DE INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DEL LABORATORIO DE FISCOQUÍMICA	Código: MMTQ-FQ.01 Versión: 00 Página 26 de 54
---	---	--	---	--

4.13. MEDIDOR DIGITAL DE TEMPERTURA , 4-2



IDENTIFICACIÓN	Medidor de temperatura, 4-2
NOMBRE DEL FABRICANTE	Phywe Systeme GMBH & Co. KG
ALCANCE	Este equipo se usa para la medición de temperatura, puede medir simultáneamente hasta 4 temperaturas.
AUTORIZACIÓN DE USO	Docentes, técnicos de lab., estudiantes.
AGENTE AUTORIZADO DE CONTACTO	info@phywe.de www.phywe.de Tel. +49(0)551 604-0 Fax +49(0)551 604-107

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

RANGO DE MEDIDA	-50.... +300°C
RESOLUCIÓN	0.1 °C / (0.01°C ΔT si se ajusta 0.00)
CONECTORES	4 tapones diodos , 5 pines
DIMENSIONES	270 X 236 X 168 mm
CONEXIÓN	RS 232C, 9600
TIPO DE SONDAS	Pt 100, tecnología 4-conductores
GRABADOR DE SALIDA	0.1 K/mV (-50...300°C)
CONEXIÓN DE VOLTAJE (+6%-10%)	Ver tipo de plato
CONSUMO DE ENERGÍA	Aproximadamente 10VA
FRECUENCIA	50...60Hz
MICROFUSIBLE	Ver tipo de plato

Figura 41. Ficha técnica medidor de temperatura digital.

Apéndice C. Circuito de adecuación de temperatura

El circuito de adecuación para la señal de temperatura proveniente del sensor PT100 se diseñó pensando en el rango de medición, esto se debe a que el sensor cuenta con un amplio rango de medición. Al limitar el rango de medición del sensor se obtiene mayor cantidad de datos para el mismo rango de voltaje disponible.

La *Figura 42* muestra el esquema eléctrico del circuito de adecuación de señal, el diseño del circuito de adecuación se basa en un puente de Wheatstone; los elementos utilizados se encuentran en el esquema eléctrico, además de las borneras para la conexión del sensor con la PCB.

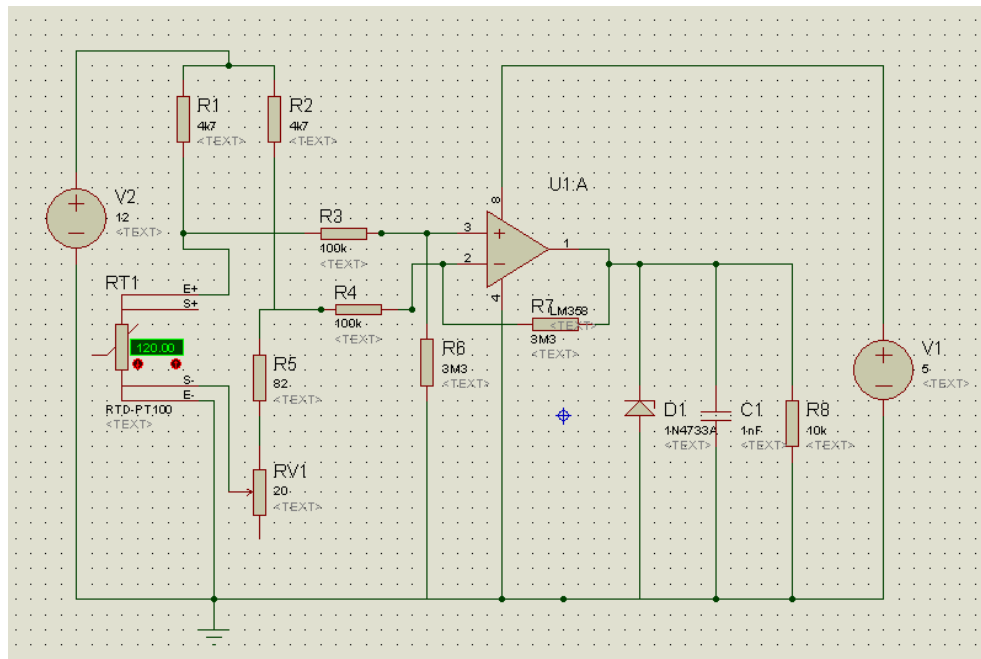


Figura 42. Esquema eléctrico del circuito de adecuación de temperatura para RTD.

Apéndice D. Humedad

La calibración del sensor de humedad FC28 se realizó con el sensor Vegetronix VH400 en una prueba de medición de humedad en suelo realizado en la terraza superior del Edificio de

Ingeniería Eléctrica, la medición se realizó durante 2 días arrojando los datos presentes en la *Figura 43*.

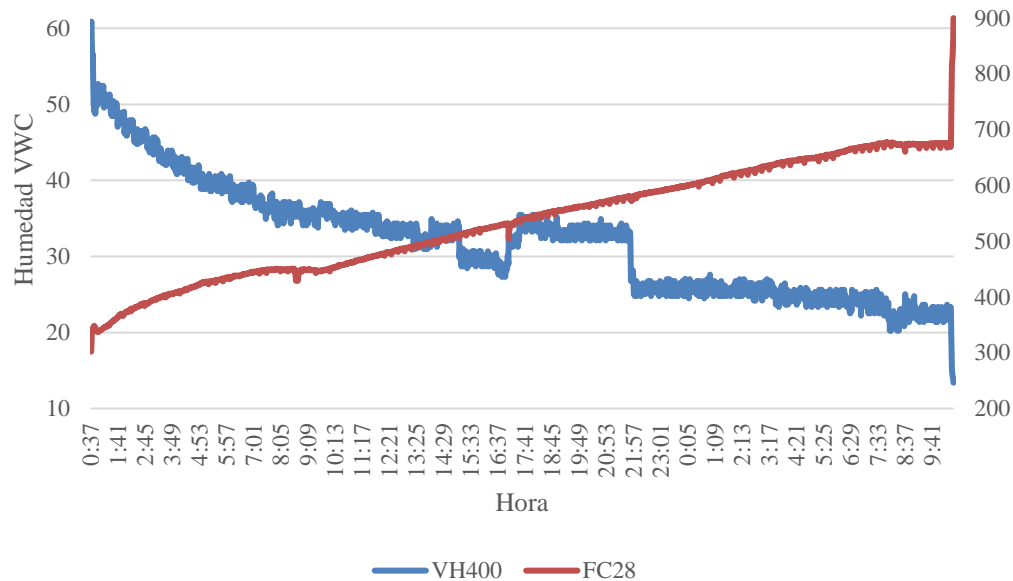


Figura 43. Humedad del techo verde.

El eje vertical derecho tiene la escala de medición en VWC por las siglas en inglés de contenido volumétrico de agua, esta escala pertenece al sensor VH400, correspondiente a la curva en color. El eje vertical izquierdo tiene la escala de medición adimensional correspondiente al sensor FC28 que se comporta de manera inversa a la presentada por el sensor VH400; para escenarios con gran cantidad de agua en tierra presenta valores de 300 y para escenarios secos y de tierra seca valores de 900 de humedad.

La *Figura 44* muestra la regresión exponencial hallada entre las dos curvas de humedad correspondientes a cada sensor, esto se realiza con el fin de obtener una medición de humedad exacta con el sensor FC28 tomando como base el sensor VH400 gracias a su nivel de exactitud. Además, en el trabajo realizado por (Pacheco Rios and Suarez Vásquez 2015) se define el nivel

crítico al cual debe ser irrigado el techo verde para garantizar condición física y operacional en el sistema FV. Dicho valor corresponde a un valor de 750 unidades de humedad en el rango de medición del sensor FC28, hallado usando la ecuación de regresión exponencial.

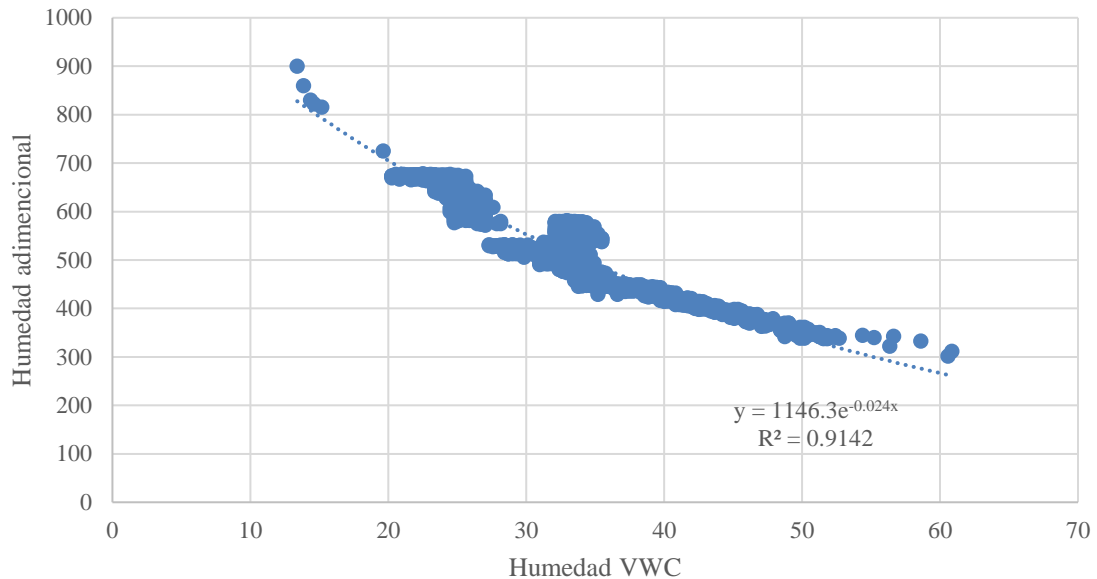


Figura 44. Regresión exponencial de humedad.

El sistema de riego por goteo consiste en un arreglo de tubería con agujeros distanciados 50 cm entre sí, unas boquillas que se insertan en dichos agujeros garantizan que el flujo de agua sea el adecuado para un goteo realizado en la base de la planta al nivel de la tierra. El goteo se realiza en dirección perpendicular a la planta para evitar que la irradiación afecte su estado físico al ser regada.

Apéndice E. Recurso hídrico

El recurso hídrico utilizado también hace parte del análisis comparativo, para días en los cuales se presentaba alta nubosidad y bajo nivel de irradiación la técnica de irrigación predictiva activaba su sistema de riego en un rango de 4 a 7 veces por día comparado con las 20 veces de activación que tiene el sistema de irrigación estático implementado. Esto indica una reducción en

el recurso hídrico de cerca de 150 litros de agua; cabe mencionar que este recurso hídrico utilizado proviene del sistema de acopio.

También se resalta la importancia del sistema de acopio del recurso hídrico para el reciclaje de este recurso durante todas las rutinas de irrigación. El agua almacenada puede provenir de agua lluvia o irrigaciones desde la red hídrica de la edificación, situación que se presenta únicamente cuando los tanques de almacenamiento se encuentran vacíos. Esto permite reducir en un 90% el consumo de recurso hídrico en un día normal de operación; la reducción del recurso hídrico se calcula con el total de irrigaciones realizadas desde el sistema de acopio con relación al total de irrigaciones en un día, en un día normal la técnica de irrigación predictiva irriga 15 veces, 13 de ellas reusando el recurso hídrico contenido en los tanques de almacenamiento.

La temperatura del agua contenida en el tanque de almacenamiento presenta una característica modelada por la técnica de irrigación predictiva y que impide alcanzar la temperatura ambiente durante la irrigación, esta característica se presenta precedida del intercambio de calor existente durante cada irrigación entre el panel FV y el líquido circulante; el aumento de la temperatura del recurso hídrico se muestra en la *Figura 45*, las líneas verticales punteadas indican los instantes de activación del sistema de irrigación.

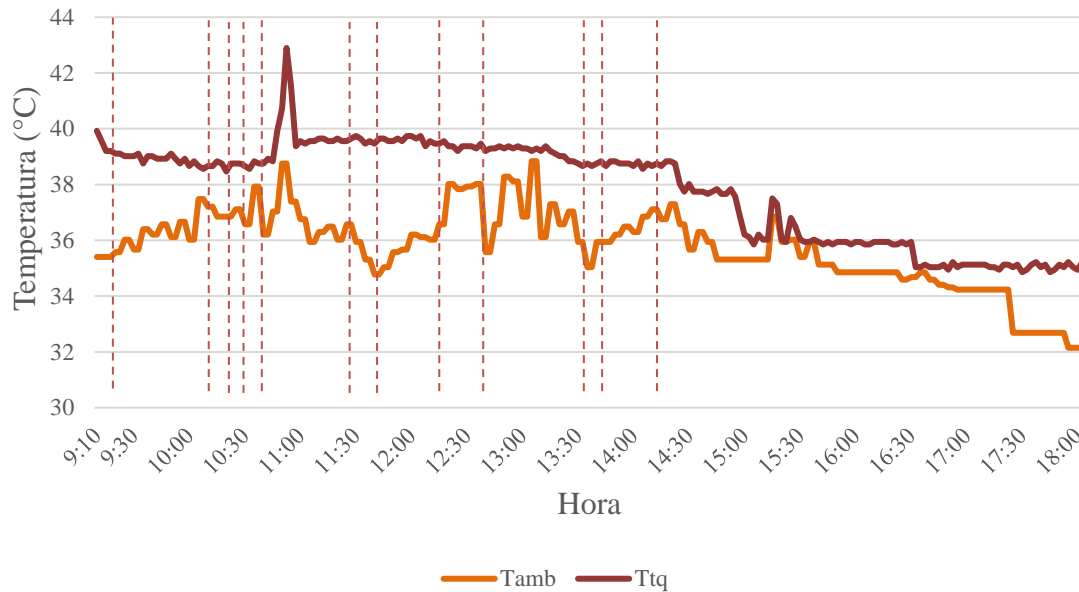


Figura 45. Perfil de temperatura del recurso hídrico.

La diferencia promedio entre las dos curvas de temperatura alcanza un valor de $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una diferencia máxima de $4.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ presente a las 11:50 am, hora a la cual comúnmente se presentan los niveles máximos de irradiación. Esto indica que para reducir en mayor medida la T_{PV} del sistema FV se puede controlar la temperatura del recurso hídrico almacenado y el beneficio que se pueda obtener al realizar dicho control de temperatura con respecto a la potencia generada adicional.

Apéndice F. Ajuste de los datos de potencia generada

Al realizar mediciones de potencia generada por un panel FV se encuentran diferentes valores de este parámetro mencionado respecto a otro panel FV instalado en las mismas condiciones, es decir, dos paneles FV de iguales características y modelo presentan diferentes niveles de potencia generada para el mismo valor de entrada. Estos valores de entrada son: irradiación solar, temperatura de operación del panel FV, temperatura ambiente, velocidad del viento. Esta

diferencia en la potencia generada se presenta por características específicas adquiridas durante su construcción y propias del material.

El ajuste consiste en tomar un panel FV de referencia y comparar los valores de potencia generada de los demás paneles FV analizados, esto determina una referencia de las mediciones realizadas por el micro-inversor de cada panel FV y se obtiene una potencia generada normalizada.

Los datos usados para el ajuste de potencia generada son los obtenidos a la salida del micro-inversor de cada panel FV y se procede a realizar una regresión que relacione las dos curvas de potencia; por último, se halla la ecuación que permite ajustar todos los datos de potencia generada a analizar y mediante el coeficiente de correlación se determina la validez de la ecuación de ajuste.

Las *Figura 46* y *Figura 47* muestran los ajustes realizados a las curvas de potencia de los paneles FV; los paneles FV P5, P6 y P7 corresponden a panel FV de referencia, panel FV irrigado en régimen estático y panel FV irrigado en régimen predictivo, respectivamente. El panel FV llamado de referencia en este documento corresponde a un panel FV operando sin irrigación y que a su vez es la referencia para la medición de la potencia generada.

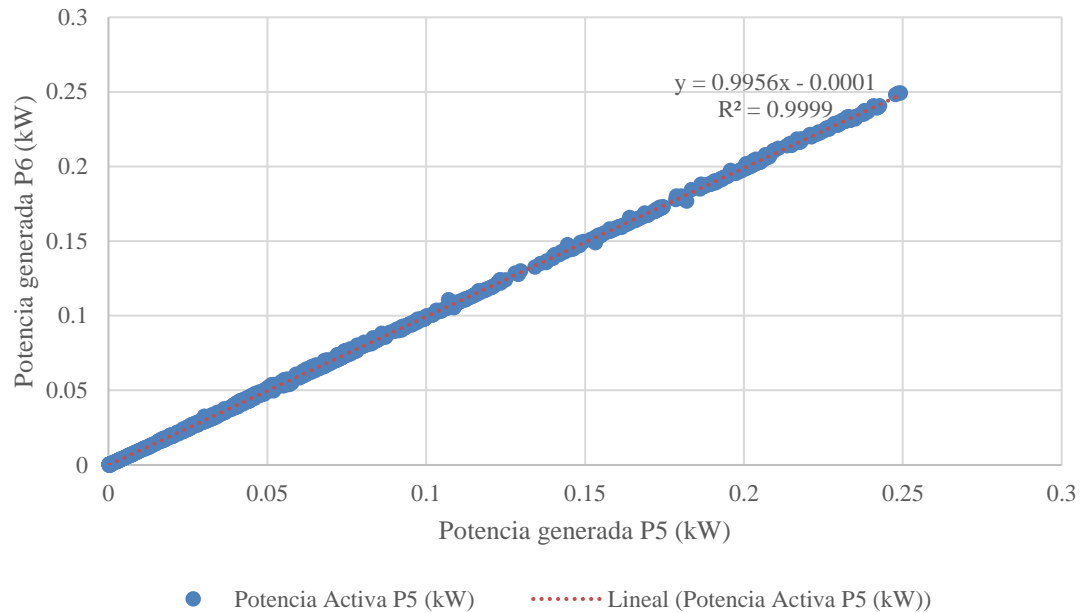


Figura 46. Ajuste de curvas de potencia de los paneles FV P5 y P6.

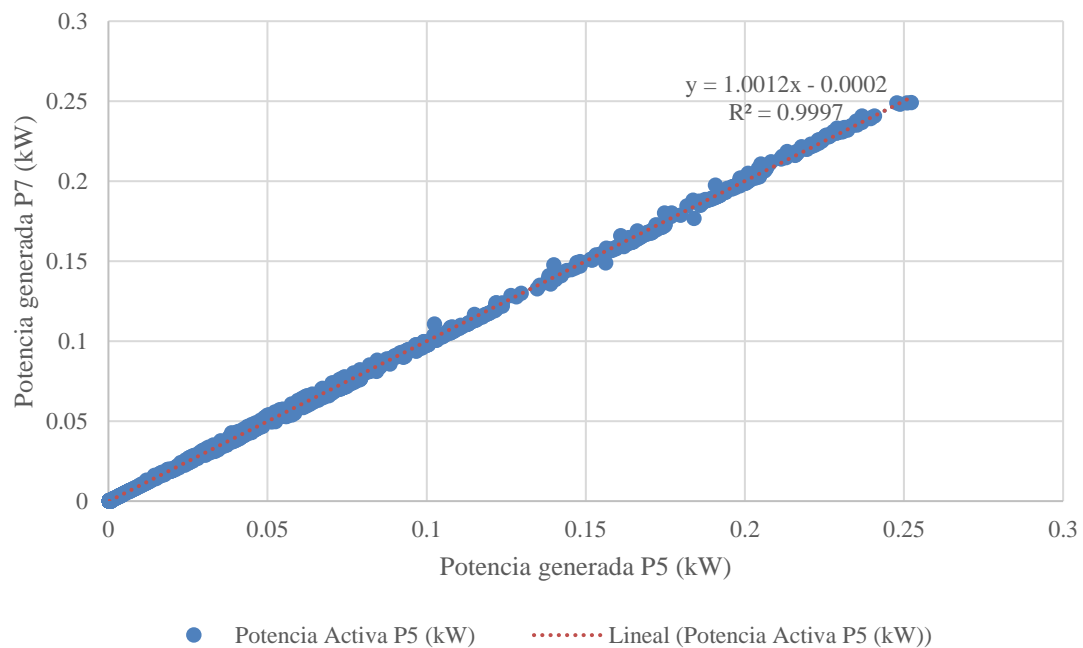


Figura 47. Ajuste de curvas de potencia de los paneles FV P5 y P7.

Los coeficientes de correlación de ambas ecuaciones son cercanos a la unidad, lo que significa que la ecuación hallada relaciona de manera casi perfecta la potencia generada de cada

panel FV ajustado, las ecuaciones son usadas para hallar la potencia generada por los paneles FV P6 y P7 y realizar el análisis respectivo.