

CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PANELES FV EN TERRAZAS DE EDIFICACIONES LOCALIZADAS EN ENTORNOS CON CLIMA TROPICAL CÁLIDO

Autor: GERMAN ALFONSO OSMA PINTO



Universidad Industrial de Santander
Facultad de Físico-Mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Doctorado en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica
Bucaramanga
2016

CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PANELES FV EN TERRAZAS DE EDIFICACIONES LOCALIZADAS EN ENTORNOS CON CLIMA TROPICAL CÁLIDO

Tesis Doctoral

Autor: GERMAN ALFONSO OSMA PINTO
Magister en Ingeniería Eléctrica – UIS
Ingeniero Electricista – UIS
Ingeniero Industrial – UIS

Director: Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Profesor UIS

Codirector: Dr. DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO
Profesor UIS

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Físico-Mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Doctorado en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica
Bucaramanga
2016

DEDICATORIA

A Dios

A mi esposa Laura Yazmin

A mis papás, Alfonso y Marien

A mi sobrino Juan José

A mi hermano Julio Cesar

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su bendición.

A mi familia por su apoyo, paciencia y calidez incondicionales.

A los doctores Gabriel Ordóñez Plata y Daniel Alfonso Sierra Bueno por su orientación como Director y Codirector, respectivamente.

A la Universidad Industrial de Santander por su contribución a mi formación personal y profesional, especialmente al Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica – GISEL, a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones – E3T y Vicerrectoría de Investigación y Extensión – VIE.

A *Portland State University* (Oregon, EEUU), especialmente al Dr. David Sailor por su dirección en la pasantía de investigación en el *Green Building Research Laboratory* y a Pilar Montejo, Asesora de Estudiantes Internacionales y egresada UIS, por su amistad.

Al Programa de Doctorados Nacionales de COLCIENCIAS por su apoyo por medio de la Convocatoria 511 de 2010.

A egresados UIS (algunos en su momento estudiantes) con quienes compartí durante mis estudios de doctorado, ya sea como Director de Trabajo de Grado o Profesor; especialmente, a los ingenieros Julián Flórez, Diego Galvis, Carlos Expósito, Aura Rueda, Yuliany García y a la bióloga Silvia Vásquez.

A los evaluadores por su realimentación y consejos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	- 18 -
I. ESTADO DEL ARTE SOBRE SISTEMAS GRIPV	- 29 -
1.1 SISTEMAS GRIPV EN OPERACIÓN	- 29 -
1.2 ANTECEDENTES.....	- 30 -
1.3 MODELADO Y SIMULACIONES	- 32 -
1.4 EXPERIMENTACIÓN	- 33 -
1.5 EFECTOS DEL SOMBREADO OCASIONADO POR PANELES FV.....	- 36 -
1.6 OTRAS ESTRATEGIAS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE LOS PANELES FV.....	- 37 -
2. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN PROPUESTA.....	- 39 -
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	- 39 -
2.2 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN.....	- 43 -
2.3 OBJETIVOS Y ALCANCES PROPUESTOS.....	- 46 -
2.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO	- 48 -
3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN	- 50 -
3.1 CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.....	- 50 -
3.2 CUBIERTAS VEGETALES.....	- 54 -
3.3 GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	- 56 -
3.4 MONITORIZACIÓN.....	- 60 -
3.5 EXPERIMENTOS DISEÑADOS E IMPLEMENTADOS.....	- 64 -
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	- 70 -
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ALTURA DE INSTALACIÓN Y TIPO DE TECHO	- 71 -
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....	- 78 -
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR IRRIGACIÓN	- 81 -
4.4 RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES DE LA EXPERIMENTACIÓN	- 99 -
5. MODELADO MATEMÁTICO POR REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN Y LA POTENCIA GENERADA POR UN PANEL FV	- 105 -
5.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES	- 106 -
5.2 FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MODELOS POR REGRESIÓN.....	- 110 -
5.3 MODELADO DE REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL PANEL FV	- 115 -
5.4 MODELADO DE REGRESIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA DEL PANEL FV	- 121 -

5.5	RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES DEL MODELADO PARAMÉTRICO	- 125 -
6.	MODELADO TÉRMICO DE UN PANEL FV A PARTIR DE ANALOGÍAS TERMOELÉCTRICAS.....	- 127 -
6.1	CONSIDERACIONES PRELIMINARES	- 128 -
6.2	MODELO GENERAL DEL PANEL FV	- 130 -
6.3	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	- 136 -
6.4	VALIDACIÓN DEL MODELO RC.....	- 143 -
6.5	MODELO RC DE UN SISTEMA INTEGRADO PANEL FV-IRRIGACIÓN	- 147 -
6.6	RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES DEL MODELADO A PARTIR DE ANALOGÍAS TERMOELÉCTRICAS	- 163 -
7.	CONSIDERACIONES PARA INCREMENTAR EL BENEFICIO ENERGÉTICO DE LA IRRIGACIÓN EN LA GENERACIÓN DE UN PANEL FV	- 164 -
7.1	ESTRATEGIA PARA LA OBTENCIÓN DEL BENEFICIO ENERGÉTICO NETO MÁXIMO	- 165 -
7.2	ANÁLISIS DEL EFECTO ENERGÉTICO PRODUCIDO POR LOS REGÍMENES DE IRRIGACIÓN A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LOS ÍNDICES $P_{pm\acute{a}x}$ Y $t_{bm\acute{a}x}$	- 178 -
7.3	BREVE RESEÑA DE UNA PATENTE DE INVENCIÓN DESARROLLADA	- 186 -
7.4	RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES	- 201 -
8.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	- 203 -
8.1	RESULTADOS	- 203 -
8.2	CONCLUSIONES.....	- 205 -
8.3	TRABAJO FUTURO	- 206 -
8.4	OBSERVACIONES.....	- 208 -
	REFERENCIAS.....	- 210 -
	BIBLIOGRAFÍA.....	- 216 -
	ANEXOS.....	- 219 -

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LAS CUBIERTAS VERDES.	- 26 -
TABLA 2. LISTADO DE SISTEMAS GRIPV EXISTENTES A NIVEL MUNDIAL.	- 30 -
TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS SOBRE DESEMPEÑO DE SISTEMAS GRIPV.	- 31 -
TABLA 4. DIFERENCIAS DE TEMPERATURA ENTRE EL TECHO VERDE Y EL TECHO DE CONCRETO.	- 34 -
TABLA 5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN REALIZADO POR NAGENGAST [14].	- 35 -
TABLA 6. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS FACTORES DE INFLUENCIA CONSIDERADOS (VARIABLES). - 47 -	-
TABLA 7. CUBIERTAS VEGETALES INSTALADAS Y UTILIZADAS.	- 54 -
TABLA 8. LISTADO DE SISTEMAS FV UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO.	- 57 -
TABLA 9. DESCRIPCIÓN DE LA MONITORIZACIÓN POR MICROINVERSORES PARA CADA SISTEMA FOTOVOLTAICO. - 60 -	-
TABLA 10. LISTADO DE EQUIPOS DE MONITORIZACIÓN A SER UTILIZADOS.	- 61 -
TABLA 11. IDENTIFICACIÓN Y UBICACIÓN DE SENSORES DE VARIABLES AMBIENTALES.	- 63 -
TABLA 12. LISTADO DE TRATAMIENTOS DEL EXPERIMENTO I – EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.	- 65 -
TABLA 13. LISTADO DE TRATAMIENTOS DEL EXPERIMENTO I – EDIFICIO DE BIBLIOTECA.	- 66 -
TABLA 14. REGÍMENES DE IRRIGACIÓN.	- 67 -
TABLA 15. LISTADO DE TRATAMIENTOS DEL EXPERIMENTO II.	- 67 -
TABLA 16. IDENTIFICACIÓN DE LAS ETIQUETAS DE LAS CURVAS DE TEMPERATURA MONITORIZADAS.	- 71 -
TABLA 17. VALORES PROMEDIO, MÁXIMO Y MÍNIMO DE LAS DIFERENCIAS DE TEMPERATURA ANALIZADAS. -	- 73 -
TABLA 18. VALORES DE FPG PARA EL EXPERIMENTO REALIZADO.	- 75 -
TABLA 19. VALORES DE FPG NORMALIZADO.	- 76 -
TABLA 20. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL EXPERIMENTO – VELOCIDAD DEL VIENTO.	- 79 -
TABLA 21. VARIABLES CONSIDERADAS PARA EL MODELADO POR REGRESIÓN.	- 107 -
TABLA 22. COEFICIENTES DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL PANEL FV.	- 107 -
TABLA 23. COEFICIENTES DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR EL PANEL FV.	- 110 -
TABLA 24. ESQUEMA DEL ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA SIGNIFICACIÓN DE LA REGRESIÓN.	- 114 -
TABLA 25. VALORES DE LOS COEFICIENTES (EN NEGRO) Y SUS ERRORES ESTÁNDAR (EN AZUL) CORRESPONDIENTES A LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN.	- 116 -
TABLA 26. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA SIGNIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN.	- 118 -
TABLA 27. CUANTIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LA PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA OPERACIÓN A PARTIR DE LOS ÍNDICES RMSD Y NRMSD.	- 119 -
TABLA 28. VALORES DE LOS COEFICIENTES (EN NEGRO) Y SUS ERRORES ESTÁNDAR (EN AZUL) CORRESPONDIENTES A LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA POTENCIA GENERADA.	- 121 -
TABLA 29. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA SIGNIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN.	- 122 -

TABLA 30. CUANTIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LA PREDICCIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE LOS ÍNDICES RMSD Y NRMSD.	- 124 -
TABLA 31. PRESENTACIÓN DE ANALOGÍAS TERMOELÉCTRICAS.	- 129 -
TABLA 32. RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE h	- 142 -
TABLA 33. ÍNDICES RMSD Y NRMSD PARA LA VALIDACIÓN DEL CASO DE VALIDACIÓN I.	- 143 -
TABLA 34. RESULTADOS CONSOLIDADOS DE LOS CASOS DE VALIDACIÓN DEL MODELO RC.	- 145 -
TABLA 35. PUBLICACIONES REALIZADAS.	- 208 -

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SCHOTT POLY 225 PARA CONDICIONES ESTÁNDAR Y TÍPICAS DE BUCARAMANGA.	- 21 -
FIGURA 2. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DIVERSOS MODELOS DE PANEL DE 225W.	- 22 -
FIGURA 3. EJEMPLO DE CUBIERTAS VERDES EN EDIFICACIONES.	- 23 -
FIGURA 4. CONFORMACIÓN DE UNA CUBIERTA VERDE.	- 24 -
FIGURA 5. EJEMPLOS DE CUBIERTA VERDE POR BLOQUES.	- 26 -
FIGURA 6. SISTEMA GRIPV DE 75 kW INSTALADO SOBRE MUNICH TECHNOLOGY CENTER EN MUNICH, ALEMANIA.	- 30 -
FIGURA 7. FASES DE LA METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.	- 48 -
FIGURA 8. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA (ESTRELLA).	- 51 -
FIGURA 9. EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.	- 52 -
FIGURA 10. TECHO VERDE DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.	- 52 -
FIGURA 11. EDIFICIO DE BIBLIOTECA.	- 53 -
FIGURA 12. TERRAZA DESCUBIERTA EN EL LADO SUR DEL EDIFICIO DE BIBLIOTECA.	- 54 -
FIGURA 13. CUBIERTA VEGETAL EN EL NIVEL 6 DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.	- 55 -
FIGURA 14. INSTALACIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL PORTABLE EN LA TERRAZA SUR DEL EDIFICIO DE BIBLIOTECA.	- 55 -
FIGURA 15. ESPECIES VEGETALES UTILIZADAS.	- 56 -
FIGURA 16. BANDEJAS DE SIEMBRA UTILIZADAS EN LAS CUBIERTAS VEGETALES MODULARES.	- 56 -
FIGURA 17. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS.	- 57 -
FIGURA 18. DIAGRAMA DE COMPONENTES DEL SISTEMA FV 1 (EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA).	- 58 -
FIGURA 19. TABLEROS ELÉCTRICOS DE LOS SISTEMAS FV 2 Y 3.	- 62 -
FIGURA 20. DIAGRAMA DE SENSORES PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES DE LOS SISTEMAS FV1 Y FV2.	- 63 -
FIGURA 21. DIAGRAMA DE SENSORES PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES DEL SISTEMA FV3.	- 64 -
FIGURA 22. VARIACIÓN DE LA ALTURA DE INSTALACIÓN (EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA).	- 65 -
FIGURA 23. VARIACIÓN DE LA ALTURA DE INSTALACIÓN (EDIFICIO DE BIBLIOTECA).	- 66 -
FIGURA 24. DIAGRAMA DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN FORZADA DE PANELES FV (SISTEMA FV2).	- 67 -
FIGURA 25. MONTAJE DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN EN LA CONFIGURACIÓN #2 (EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA).	- 68 -
FIGURA 26. DIAGRAMA DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN FORZADA (SISTEMA FV2).	- 69 -
FIGURA 27. ESTRUCTURA DE ACRÍLICO PARA LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE.	- 69 -
FIGURA 28. TEMPERATURAS DEL TECHO VERDE Y DE LA SUPERFICIE DEL TECHO DE CONCRETO.	- 72 -
FIGURA 29. COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS TEMPERATURA PARA DIFERENTES ALTURAS Y TIPO DE TECHO.	- 72 -
FIGURA 30. GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA.	- 74 -
FIGURA 31. PORCENTAJE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SEGÚN LA ALTURA Y TIPO DE TECHO.	- 77 -
FIGURA 32. VELOCIDADES DEL VIENTO PARA EL DÍA ANALIZADO.	- 79 -
FIGURA 33. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA Y POTENCIA DE LOS PANELES FV.	- 79 -

FIGURA 34. VARIACIONES DE TEMPERATURA Y POTENCIA DE LOS PANELES FV P9 Y P10.	- 80 -
FIGURA 35. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA.	- 80 -
FIGURA 36. VARIACIONES DE TEMPERATURA Y POTENCIA DEL PANEL FV.	- 81 -
FIGURA 37. EVOLUCIÓN TÉRMICA DE LOS PANELES FV.	- 82 -
FIGURA 38. CAMBIO TÉRMICO DEL AGUA DE IRRIGACIÓN.	- 84 -
FIGURA 39. CURVAS DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE LOS PANELES FV.	- 85 -
FIGURA 40. DISMINUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE LOS PANELES FV.	- 85 -
FIGURA 41. ÍNDICES DRT DE LOS PANELES FV P6 Y P7.	- 87 -
FIGURA 42. CURVAS DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA DE LOS PANELES FV.	- 87 -
FIGURA 43. AUMENTO DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA DE LOS PANELES FV.	- 88 -
FIGURA 44. ÍNDICES IPG DE LOS PANELES FV P6 Y P7.	- 89 -
FIGURA 45. ÍNDICES CARACTERÍSTICOS DRT Y IPG PARA LOS REGÍMENES B Y C DEL CASO X.	- 89 -
FIGURA 46. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DRT PARA LOS REGÍMENES ANALIZADOS.	- 91 -
FIGURA 47. COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE IPG PARA LOS REGÍMENES ANALIZADOS.	- 91 -
FIGURA 48. COMPORTAMIENTO DE LOS ÍNDICES DRT Y IPG SEGÚN LOS TIEMPOS DE IRRIGACIÓN Y NO IRRIGACIÓN.	- 92 -
FIGURA 49. VARIACIÓN DE LA CONSTANTE DE TIEMPO DE ENFRIAMIENTO DEL PANEL FV SEGÚN EL CAUDAL DE RIEGO.	- 94 -
FIGURA 50. ÍNDICES DRT Y IPG PROMEDIOS SEGÚN LOS TIEMPOS DE IRRIGACIÓN Y NO IRRIGACIÓN.	- 95 -
FIGURA 51. CURVAS DE ENERGÍA ADICIONAL GENERADA POR INTERVALO SEGÚN LA POTENCIA DE LA BOMBA... - 96 -	- 96 -
FIGURA 52. CURVAS DE ENERGÍA ADICIONAL GENERADA POR DÍA SEGÚN LA POTENCIA DE LA BOMBA.	- 98 -
FIGURA 53. POTENCIA MÁXIMA DE LA BOMBA PARA LA OBTENCIÓN DE BENEFICIO ENERGÉTICO.	- 99 -
FIGURA 54. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN AJUSTADOS Y ERRORES ESTÁNDAR DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN.	- 117 -
FIGURA 55. PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE UN PANEL FV – CASO A.	- 119 -
FIGURA 56. PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE UN PANEL FV – CASO B.	- 119 -
FIGURA 57. TEMPERATURA DE OPERACIÓN ESTIMADA POR EL MODELO T9.	- 120 -
FIGURA 58. CURVA DE RESIDUOS DE LA FIGURA 57.	- 120 -
FIGURA 59. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN AJUSTADOS Y ERRORES ESTÁNDAR DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA.	- 122 -
FIGURA 60. COMPORTAMIENTO PREDICTIVO DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR EL MODELO P6.	- 123 -
FIGURA 61. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DE PREDICCIÓN DE LOS MODELOS ANALIZADOS. .	- 124 -
FIGURA 62. MODELO TÉRMICO RC DEL PANEL FV.	- 131 -
FIGURA 63. VALORES RESULTANTES DE $csPV$ OBTENIDOS DE FORMA EXPERIMENTAL.	- 139 -
FIGURA 64. AJUSTE DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN PARA VARIACIONES DEL VALOR DE H CONSIDERANDO VENTILACIÓN FORZADA DE 1 M/S.	- 141 -
FIGURA 65. RESULTADOS DEL VALOR h OBTENIDOS DE FORMA EXPERIMENTAL.	- 142 -
FIGURA 66. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE TEMPERATURA MEDIDA Y ESTIMADA PARA EL CASO DE VALIDACIÓN I.	- 143 -
FIGURA 67. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE TEMPERATURA MEDIDA Y ESTIMADA PARA EL CASO DE VALIDACIÓN II.	- 144 -
FIGURA 68. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE TEMPERATURA MEDIDA Y ESTIMADA PARA EL CASO DE VALIDACIÓN III.	- 145 -
FIGURA 69. VARIACIÓN DEL CALOR ACUMULADO EN EL PANEL FV.	- 146 -
FIGURA 70. PARTICIPACIÓN ENERGÉTICA POR FACTORES DE INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN PANEL FV PARA UN DÍA TÍPICO. VALORES DADOS POR METRO CUADRADO.	- 146 -
FIGURA 71. MODELADO IDEAL DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR IRRIGACIÓN.	- 147 -
FIGURA 72. CURVAS DE ENFRIAMIENTO DEL PANEL FV Y CALENTAMIENTO DEL AGUA DE IRRIGACIÓN.	- 149 -
FIGURA 73. CIRCUITO REPRESENTATIVO DE LOS PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN PANEL FV IRRIGADO SIN RADIACIÓN SOLAR Y CON AISLAMIENTO TÉRMICO EN LA SUPERFICIE POSTERIOR.	- 150 -
FIGURA 74. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE TEMPERATURA MEDIDAS Y ESTIMADAS DEL PANEL FV Y EL AGUA CONTENIDA EN EL TANQUE DE ACOPIO.	- 153 -
FIGURA 75. EFECTO DEL VALOR DE RMZ.	- 154 -

FIGURA 76. MODELO RC DE UN PANEL FV INTEGRADO CON UN SISTEMA DE IRRIGACIÓN.	- 155 -
FIGURA 77. CIRCUITO TÉRMICO DE UN PANEL FV EN ESTADO DE IRRIGACIÓN.	- 156 -
FIGURA 78. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE FRONTAL DEL PANEL FV CUANDO SE EVAPORA LA CAPA DE AGUA RESIDUAL RESULTANTE AL FINALIZAR LA IRRIGACIÓN.	- 159 -
FIGURA 79. TIEMPO DE EVAPORACIÓN SEGÚN LA RADIACIÓN SOLAR.	- 160 -
FIGURA 80. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS MEDIDA Y ESTIMADA DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL PANEL FV PARA UN RÉGIMEN DE IRRIGACIÓN 1MIN:29 MIN.	- 161 -
FIGURA 81. VARIACIÓN EL TIEMPO DE EVAPORACIÓN DE ACUERDO AL NIVEL DE RADIACIÓN SOLAR.	- 162 -
FIGURA 82. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS MEDIDA Y ESTIMADA DE LA TEMPERATURA DEL AGUA ALMACENADA EN EL TANQUE DE ACOPIO.	- 162 -
FIGURA 83. COMPARACIÓN DE LAS TEMPERATURAS ESTIMADAS DE DOS PANELES FV DE LA TEMPERATURA DEL AGUA CONTENIDA EN EL TANQUE DE ACOPIO.	- 163 -
FIGURA 84. COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPERATURAS DE OPERACIÓN Y VARIABLES MICRO-CLIMÁTICAS. .-	168 -
FIGURA 85. COMPORTAMIENTO DE LAS POTENCIAS GENERADAS POR LOS PANELES FV P5, P6 Y P7.	- 169 -
FIGURA 86. CURVAS DE POTENCIA ADICIONAL O NETA GENERADA POR LOS PANELES FV P6 Y P7.	- 169 -
FIGURA 87. CURVAS DE LA ENERGÍA ADICIONAL O NETA GENERADA OBTENIDA POR LOS PANELES FV P6 Y P7. .-	170 -
FIGURA 88. CURVA DE POTENCIA PROMEDIO ADICIONAL DEL PANEL P7.	- 171 -
FIGURA 89. DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES $P_{pm\acute{a}x}$ Y $t_{bm\acute{a}x}$	- 172 -
FIGURA 90. CURVAS P_{adic} DE ANÁLISIS PARA LOS DOS CASOS DE P_{genref}	- 174 -
FIGURA 91. CURVAS DE ENERGÍA NETA ACUMULADA.	- 176 -
FIGURA 92. CURVAS DE P_{adic} DE LOS RÉGIMENES DE IRRIGACIÓN.	- 179 -
FIGURA 93. VARIACIÓN DE LA POTENCIA ADICIONAL MÁXIMA Y TIEMPO DE BENEFICIO ENERGÉTICO MÁXIMO DE ACUERDO A LA POTENCIA DE LA BOMBA.	- 181 -
FIGURA 94. CURVAS DE ENERGÍA ADICIONAL DIARIA EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA DE LA BOMBA DE IRRIGACIÓN.	- 182 -
FIGURA 95. POTENCIA MÁXIMA DE LA BOMBA PARA LOGRAR BENEFICIO ENERGÉTICO DE LA IRRIGACIÓN. -	184 -
FIGURA 96. ESQUEMA DEL SISTEMA DESARROLLADO.	- 190 -
FIGURA 97. COMPONENTES DEL SUBSISTEMA DE SUMINISTRO DE FLUIDO PARA LA IRRIGACIÓN DEL PANEL FV. .-	190 -
FIGURA 98. VISTA FRONTAL DE LA UNIDAD DE DIFUSIÓN/CAPTACIÓN.	- 191 -
FIGURA 99. VISTA DE LA UNIDAD DE DIFUSIÓN/CAPTACIÓN (5) EN OPERACIÓN INSTALADA EN EL LADO ALTO DE UN PANEL FV.	- 192 -
FIGURA 100. ESQUEMA DEL TANQUE DE ACOPIO (15).	- 192 -
FIGURA 101. COMPONENTES DEL SUBSISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL.	- 193 -
FIGURA 102. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA IMPLEMENTACIÓN PREFERIDA DE LA OPERACIÓN GENERAL DEL MÉTODO DE IRRIGACIÓN DEL PANEL FV.	- 200 -

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. INFORMACIÓN ELÉCTRICA DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	209 -
ANEXO B. INFORMACIÓN TÉCNICA DE PANELES Y MICROINVERSORES	217 -
ANEXO C. CONEXIÓN DE MEDIDORES DE ENERGÍA	221 -
ANEXO D. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DIARIO DE LOS CASOS ANALIZADOS DEL EXPERIMENTO DE IRRIGACIÓN.....	223 -
ANEXO E. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ÍNDICES DRT Y IPG POR RÉGIMEN DE IRRIGACIÓN.....	238 -
ANEXO F. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA Y ENERGÍA DE CADA RÉGIMEN DE IRRIGACIÓN.....	247 -
ANEXO G. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA ENERGÍA GENERADA POR RÉGIMEN SEGÚN LA POTENCIA DE BOMBA DE IRRIGACIÓN	260 -
ANEXO H. FLUJOS DE CALOR ASOCIADOS CON EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL PANEL FV.....	264 -
ANEXO I. SOLUCIÓN ANALÍTICA AL CIRCUITO IDEAL DE ENFRIAMIENTO DE UN PANEL FV	267 -
ANEXO J. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIACIONES DE P_{p_adic} , $P_{pm\dot{A}x}$ Y $t_{bm\dot{A}x}$ PARA CADA RÉGIMEN DE IRRIGACIÓN.....	270 -

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PANELES FV EN TERRAZAS DE EDIFICACIONES LOCALIZADAS EN ENTORNOS CON CLIMA TROPICAL CÁLIDO¹

AUTOR: GERMAN ALFONSO OSMA PINTO²

PALABRAS CLAVE: Experimentación, Irrigación, Modelado RC, Sistema fotovoltaico, Techo verde.

DESCRIPCIÓN: La primera parte de esta Tesis Doctoral presenta un proceso de experimentación en condiciones de operación real para evaluar el desempeño de un panel FV ante variaciones de altura de instalación, tipo de techo, velocidad del aire e irrigación. Los experimentos se ejecutaron en las terrazas de dos edificaciones de la Universidad Industrial de Santander para condiciones de no sombreado. Se determinó que la altura de instalación, el tipo de techo y la velocidad del aire pueden incrementar la energía generada en hasta 3%; mientras la irrigación puede lograr un beneficio de hasta 10%.

La segunda parte de la investigación abordó el modelado del comportamiento de un panel FV por regresión y analogías termoeléctricas. Los modelos de regresión de la temperatura presentaron errores de predicción entre 5% y 10%, asimismo se estableció un modelo de regresión de la potencia eléctrica generada con un error de predicción de aproximadamente 5%. El modelado a partir de analogías termoeléctricas se empleó para predecir la temperatura del panel FV ante variaciones abruptas de radiación solar y velocidad del viento, encontrándose errores entre 4% y 5%. A partir de este modelado se desarrolló un modelo RC modificado que predice el comportamiento del panel FV cuando es irrigado con un error menor al 6 %.

En la parte final se estableció un procedimiento para el riego inteligente de paneles FV que determina si se debe o no irrigar y cuándo, con el fin de incrementar el beneficio energético.

Se considera que esta investigación realizó tres aportes de conocimiento, la caracterización de la influencia de cuatro factores en el comportamiento de un panel FV, el modelo RC modificado para condición de irrigación y un procedimiento de incremento del beneficio energético debido a la irrigación. Este último aporte es la base de una patente de invención.

¹ Tesis Doctoral

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Doctorado en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica. Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata. Codirector: Dr. Daniel Alfonso Sierra Bueno.

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE PERFORMANCE OF PV PANEL ON ROOFS OF THE BUILDINGS LOCATED IN PLACES WITH WARM-TROPICAL CLIMATE³

AUTHOR: GERMAN ALFONSO OSMA PINTO⁴

KEYWORDS: Experimentation, Green Roof, Irrigation, Photovoltaic System, RC modeling.

DESCRIPTION: The first part of this Doctoral Thesis presents an experimentation process for actual conditions in order to evaluate the performance of a PV panel against variations of height installation, roof type, wind speed and irrigation. The experiments was conducted on the roofs of two buildings of the Universidad Industrial de Santander for no-shading conditions. It was determined that height installation, the roof type and the wind speed can increase the generated energy up to 3%, while the irrigation can achieve an energy benefit up to 10%.

The second part of the research treated the modeling of the behaviour of a PV panel for regression and thermo-electrical analogies (RC model). The regression models of the temperature present prediction error between 5% and 10%, in addition it was determined a regression model of the generated power with a prediction error near to 5%. The RC modeling was used to predict the PV temperature against abrupt variations of the solar radiation and wind speed with errors between 4% and 5%. From this model, a modified RC model was developed with which can be predicted the thermal behaviour of a PV panel when is irrigated with an error lower than 6%.

The final part of this research provides a procedure to carry out smart irrigation of PV panel, which treats about to determine whether or not to should be irrigated the PV panel and when this decision should be taken, with the purpose to increase the energy benefit.

This doctoral thesis presents three knowledge contributions, the characterization of the influence of four factors on the PV panel behaviour, a modified RC model for irrigation condition and a procedure to increase the energy benefits due to irrigation. This last contribution is the of an invention patent.

³ Doctoral Thesis

⁴ Faculty of Physical-Mechanics Engineering. Department of Electrical and Electronics Engineering and Telecommunications. Doctorate in Engineering – Electrical Engineering. Advisor: Dr. Gabriel Ordóñez Plata. Co-advisor: Dr. Daniel Alfonso Sierra Bueno.

INTRODUCCIÓN

Los techos de las edificaciones tienen como funciones principales brindar seguridad y protección del clima. Actualmente, algunas edificaciones a nivel urbano promueven el uso de estos espacios para implementar iniciativas amigables con el medio ambiente, tales como: Techos verdes, captación de agua lluvia, generación fotovoltaica (FV) y generación térmica solar, entre otros [1]. Tales aplicaciones permiten generar energía en sitio, controlar el nivel de escorrentía de agua lluvia, y mitigar el efecto de isla de calor en las ciudades y el consumo energético de las edificaciones [2].

Un sistema orientado transversalmente a estos propósitos es el *Green Building Integrated Photovoltaics* – GRIPV, el cual es una alternativa de generación de energía eléctrica y de climatización de terrazas que pudiera reemplazar el tradicional techo negro o gris con capa asfáltica.

Un sistema GRIPV puede propender por el incremento tanto de la eficiencia energética de los paneles FV como el aislamiento térmico de los techos verdes. Adicionalmente, tanto el sistema FV como el techo verde tienen reconocimiento en el sistema americano de certificación de sostenibilidad de edificaciones LEED [1].

A pesar de los beneficios que pueden otorgar los sistemas GRIPV, no son una práctica común, ya que se han documentado pocas implementaciones e investigaciones a nivel mundial.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

Con base en la revisión del estado del arte sobre los sistemas GRIPV, se establece que la información existente no es concluyente para estimar de manera razonable el beneficio de un sistema GRIPV en la generación eléctrica en un entorno tropical cálido para condiciones micro-climáticas y de instalación específicas.

Por lo que el objeto de esta Tesis Doctoral es resolver las siguientes preguntas de investigación: 1) ¿Los sistemas GRIPV son una solución válida para incrementar la potencia generada de los paneles FV en un entorno tropical específico con clima cálido?, en caso de ser así 2) ¿Para qué condiciones específicas se obtendría dicho incremento de potencia?

Para dar respuesta a estos interrogantes, se llevó a cabo un proceso de experimentación intensiva en condiciones de operación real para evaluar el desempeño de un modelo de panel FV (*Canadian Solar 255W*) ante variaciones de cuatro factores, altura de instalación⁵, tipo de techo (vegetación sobre techo de concreto o techo de concreto descubierto), velocidad del aire (ventilación) e irrigación. Tal aporte de conocimiento permite determinar las condiciones más convenientes para incrementar la potencia generada por paneles FV en terrazas, así como definir lineamientos de diseño y de operación de sistemas FV útiles en entornos tropicales cálidos.

El experimento propuesto se llevó a cabo en los Edificios de Ingeniería Eléctrica y de Biblioteca del Campus Central de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

MARCO TEÓRICO

Esta sección presenta generalidades sobre la generación fotovoltaica y los techos verdes.

⁵ Se refiere a la altura con respecto al techo (placa de concreto)

Energía solar fotovoltaica

Los sistemas fotovoltaicos transforman la radiación solar en energía eléctrica, tanto en corriente continua como en corriente alterna. Están conformados principalmente por paneles FV y unidades de gestión (reguladores, inversores y microinversores).

Suelen instalarse tanto en terrazas como en fachadas de las edificaciones, lo cual depende mayormente de la latitud. Pueden inyectar energía a la red eléctrica pública (*grid-tied*) o atender cargas aisladas (*stand-alone*). La vida útil de estos sistemas varía entre 20 y 30 años [3], [4].

En general, la eficiencia de estos sistemas oscila entre 10% y 14%, lo cual depende mayormente de la eficiencia de los paneles FV que se encuentra entre 12% y 16%; y en un menor grado de la temperatura ambiente y de los dispositivos de gestión y acondicionamiento de la energía [3].

Su aplicación es favorable en la zona tropical porque se caracterizan por niveles de radiación solar anuales cuasi-estables debido a su cercanía con el Ecuador; y que varían mayormente entre 4,0 kWh/m²/día y 6,0 kWh/m²/día [5].

- **Efecto térmico en la generación FV**

En general, las especificaciones técnicas de los paneles FV son consideradas para estimar la generación a ser obtenida; sin embargo, tales especificaciones están referidas a condiciones estándar (*Standard Test Conditions*– STC) que difieren significativamente de las condiciones reales en entornos tropicales.

Esto se debe a que los paneles FV están constituidos por material semiconductor, por lo que un cambio en la temperatura operativa de las celdas – T_{cell} (1) causa variación en parámetros eléctricos como corriente de máxima potencia – I_m (2) y tensión de máxima potencia – V_m (3), respectivamente. Esto ocasiona un decremento de la potencia máxima que puede ser generada – P_m (4), (5). Esta afectación es más significativa en lugares cálidos tropicales.

$$T_{cell} = T_a + G \cdot (NOCT - 20)/800 \tag{1}$$

$$I_m = I_{mpr} + G \cdot \left(I + \alpha_{mpr} \cdot (T_{cell} - T_r) \right) / 1000 \tag{2}$$

$$V_m = V_T \cdot \ln \left(I + \frac{(I_{sc} - I_m)(e^{V_{oc}/V_T} - 1)}{I_{sc}} \right) - I_m \cdot R_s \tag{3}$$

$$P_m = V_m \cdot I_m \tag{4}$$

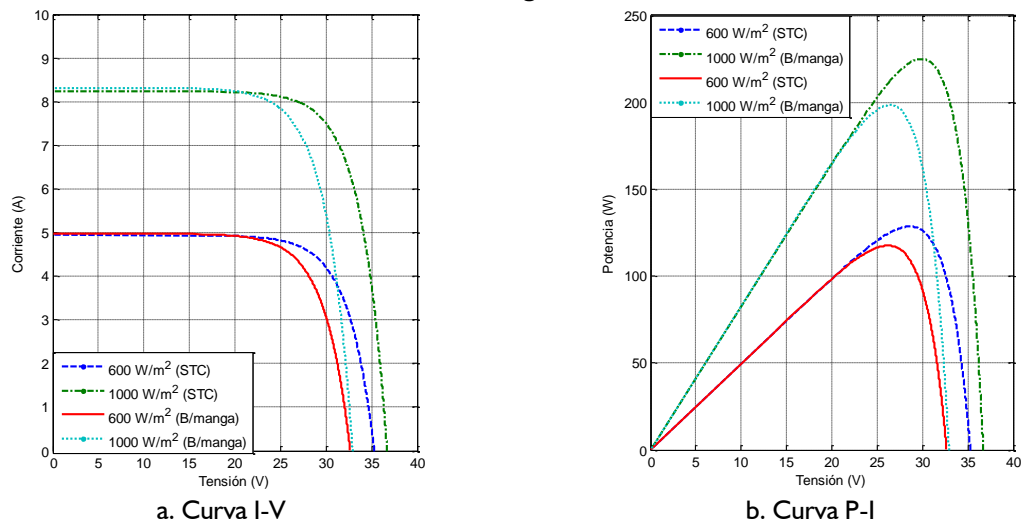
$$P_m = \eta_{nom} \cdot A_{PV} \cdot G \cdot (1 + \beta \cdot (T_{cell} - T_r)) \tag{5}$$

La temperatura ambiente (T_a) y la radiación solar (G) son datos horarios del lugar. Los datos técnicos como $NOCT$, I_{mpr} , α_{mpr} , T_r y β dependen del modelo de panel FV y son suministrados en las fichas técnicas.

- **Análisis de efecto térmico de algunos modelos comerciales de paneles FV**

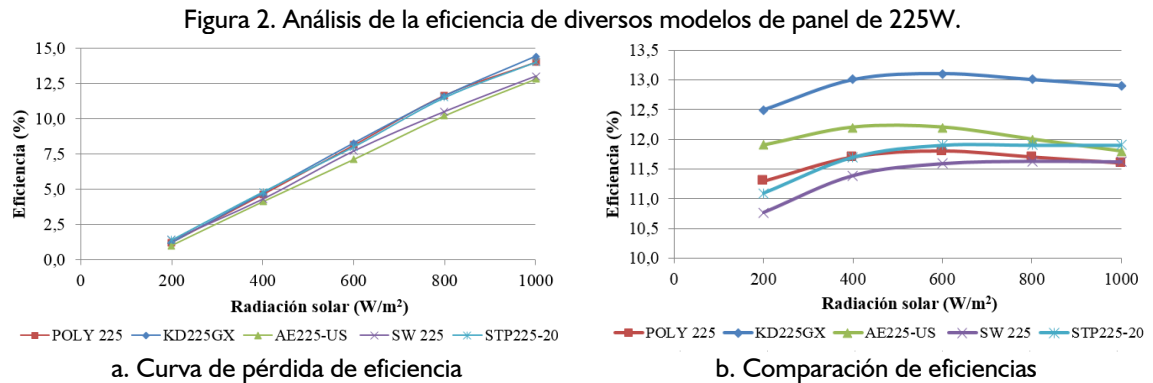
Con el fin de apreciar el efecto térmico en la eficiencia de los paneles FV, la Figura 1 presenta el análisis teórico de las curvas I-V y P-I para un panel de 225W de la marca SCHOTT (POLY 225). Estas curvas comparan el desempeño de los paneles FV para las condiciones ambientes STC y de Bucaramanga.

Figura 1. Curvas características del panel SCHOTT POLY 225 para condiciones estándar y típicas de Bucaramanga.



La temperatura afecta principalmente los parámetros de tensión: Tensión de potencia máxima y tensión de corto circuito. El decremento más crítico se da para el punto de máxima potencia.

La Figura 2 analiza el desempeño de los otros modelos de panel de 225W (STP225-20, SW 225, AE225-US y KD225GX) para las mismas condiciones de análisis. La Figura 2.a muestra la pérdida de eficiencia del panel FV que se incrementa en función de la radiación solar, pasando de 2% para una radiación de 200 W/m² a cerca de 15% para el caso de 1 000 W/m². Esto ocurre debido a que la radiación solar influye significativamente en la temperatura de operación del panel FV. La Figura 2.b compara las curvas de eficiencias para las condiciones analizadas.



Este análisis se basa en el modelo térmico presentado por las expresiones (1) a (4), y no considera el efecto de calentamiento de la temperatura del aire circundante de los paneles FV cuando están instalados sobre terrazas de edificaciones. Esta temperatura puede incrementarse entre 5 °C y 10 °C con respecto a la temperatura ambiente en zonas tropicales con clima cálido. Por tanto, la afectación térmica en condiciones de operación real podría ser aún más desfavorable.

Techos verdes

La estrategia hoy en día más utilizada para garantizar el confort térmico en zonas tropicales es la climatización mecánica (aires acondicionados), aplicación masiva que ocasiona el 50% del consumo energético en las edificaciones [3].

Para espacios localizados en los últimos niveles de edificaciones ubicadas en zonas tropicales, se tiene que la terraza de concreto es una de las mayores fuentes de calor debido a la alta absorción de radiación solar. Este fenómeno es más crítico cuando son recubiertas por impermeabilizantes de color oscuro [6], como soluciones asfálticas.

Tal absorción puede reducirse entre 15% y 30% [3], si existe un recubrimiento a partir de colores claros o metálicos o se superpone material cerámico reflectante [6]; lo que en consecuencia, disminuye el consumo energético debido a aires acondicionados. Este ahorro energético podría ser aún mayor si se utiliza un recubrimiento vegetal, ya que ofrece un mayor aislamiento térmico. La Figura 3 presenta algunos ejemplos de cubiertas verdes.

Figura 3. Ejemplo de cubiertas verdes en edificaciones.



a. Univ. Tecnológica de Nanyang



b. The Calhoun School

El recubrimiento de techos con vegetación surgió hace siglos en lugares como Islandia, Escandinavia y Tanzania, entre otros. Sin embargo, su concepción moderna inició hacia 1960 en Alemania, país donde hoy en día alrededor del 10% de los techos son verdes.

Es tal su importancia en algunos países europeos, que existe legislación que fomenta su práctica. En Colombia, su implementación ha venido en alza en ciudades como Bogotá, Medellín y Barranquilla.

Kosareo y Ries [7] concluyen, a partir de una evaluación del impacto ambiental usando la herramienta LCA (*Life Cycle Analysis*), que las cubiertas verdes son una aplicación significativamente beneficiosa para el medio ambiente, entre otros aspectos, por la prolongada vida útil, que puede ser de 50 años.

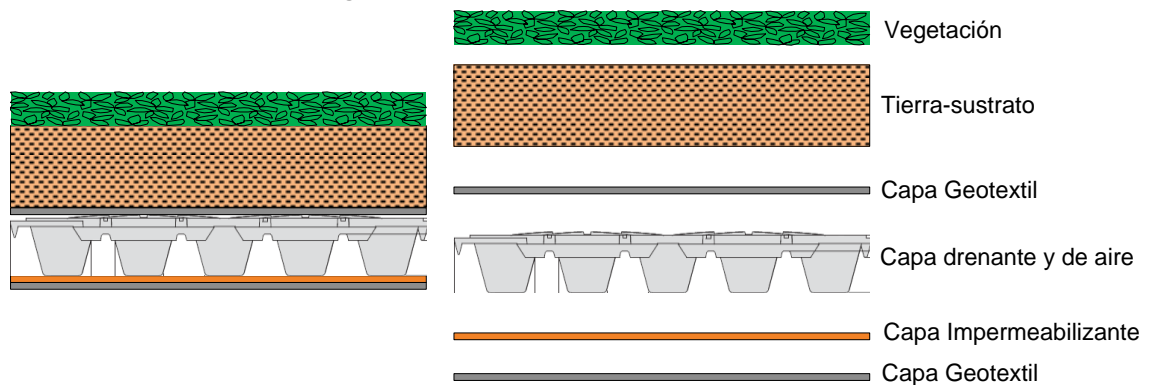
Esta técnica, más allá de reflejar la radiación solar para evitar el calentamiento de la estructura de concreto, busca reducir la radiación solar incidente sobre la superficie de concreto a partir del sombreado ofrecido por el área foliar de las plantas y la expulsión de calor al ambiente. Tal expulsión se da por el proceso de evapotranspiración, evaporación de agua remanente en vegetación y suelo de cultivo por riego o por precipitaciones, con lo cual se mitiga la transferencia de calor [3].

Son características deseables en un techo verde, resistencia a las sequías, resistencia a cambios bruscos de temperatura, crecimiento vegetal moderado, vegetación con raíz de corta profundidad, alta esperanza de vida, mínimo mantenimiento, mínimo requerimiento de irrigación; así como, una buena apariencia [3], [8].

- **Capas de un techo verde**

Una cubierta o techo verde o ajardinado está compuesta en general de una capa vegetal, un suelo de cultivo o sustrato y un conjunto de capas protectoras. El espesor de la aplicación oscila entre 10 cm y 30 cm, generalmente [8]. La Figura 4 presenta el esquema de un techo verde en función de las capas que lo constituyen.

Figura 4. Conformación de una cubierta verde.



Vegetación. Es la parte visible de la aplicación; su área foliar determina en parte el nivel de aislamiento térmico, ya que a mayor sombra generada sobre el sustrato, menor calor será transmitido a la estructura.

Suelo de cultivo. Su composición determina mayormente la vida útil del proyecto; se debe caracterizar por ser liviano, nutritivo y de alta expectativa de vida. El espesor depende de la profundidad que puedan alcanzar las raíces de las plantas, el nivel de aislamiento térmico deseado y la resistencia mecánica de la estructura civil.

El peso de la aplicación por unidad de área determina el diseño estructural de la edificación. El masa (m) se encuentra en función del área (A), el espesor (h) y la densidad del sustrato (ρ); y se calcula con base en la expresión (6).

$$m = \rho Ah \quad (6)$$

La densidad del suelo de cultivo varía básicamente según el nivel de humedad, por lo que oscila entre 700 kg/m^3 y $1\,000 \text{ kg/m}^3$.

Esta capa es la responsable de que los techos verdes drenen sólo el 50%, o menos, del agua lluvia; la cantidad restante se almacena en el sustrato, y se decanta de la siguiente manera: drenaje lento (25%), evaporación rápida (20%) y evaporación lenta (5%) [8].

Capa de drenaje y anti-raíz. Permite controlar el nivel de agua lluvia y de riego almacenada en el sustrato, a partir de material granular (grava) y de una estructura reticular plástica liviana y perforada; es de fácil instalación debido a la presentación en rollos o módulos.

Las últimas capas de drenaje ofrecidas en el mercado evitan que las raíces de la vegetación sembrada se extiendan hasta la capa impermeabilizante, lo cual podría ocasionar perforaciones a ésta.

Capa de impermeabilización. Evita el contacto del agua con la placa de concreto, y con ello problemas de humedad. Se realiza a partir de una tela de PVC o de una solución asfáltica (aplicación líquida). La primera estrategia es la más común debido al no requerimiento de aditivos.

- **Tipos de techo verde**

Con base en lo expuesto en [3], [6]–[8], se considera que las cubiertas verdes se pueden clasificar según espesor, instalación, pendiente y diseño, tal como se indica en la Tabla I.

La instalación modular mostrada en la Figura 5, implica un costo mayor para el proyecto; sin embargo, demanda menor tiempo de instalación, alcanza su punto de madurez en menor tiempo, facilita la realización de mantenimiento y reparaciones, disminuye el número de capas de la aplicación; y adicionalmente, por su versatilidad, facilita el desarrollo de investigaciones académicas.

Tabla 1. Clasificación de las cubiertas verdes.

Criterio		TIPO
ESPESOR	Extensivo	Techos verdes horizontales o inclinados con espesores de 5 cm a 30 cm, generalmente cercanos a 10 cm. Son de bajo mantenimiento y una densidad de peso menor a 150 kg/m ² .
	Intensivo	Techos verdes horizontales con un espesor de 30 cm o superior, cuyas plantas son de raíces generosas. Requiere un mantenimiento considerable.
INSTALACIÓN	Modular	Se caracteriza por la utilización de módulos (plásticos o metálicos) o sacos, de aproximadamente 0,2 m ² y un espesor de 5 cm a 15 cm, que almacenan el sustrato y en el cual se siembra la vegetación. Es de fácil y rápida instalación. La vegetación puede ser sembrada varias semanas antes de la ubicación definitiva de los módulos.
	En sitio	Son los techos verdes tradicionales, que consisten en el extendido de tierra sobre toda la terraza, previa adecuación a partir de la instalación de membranas, para la posterior siembra de la vegetación.
PENDIENTE	Horizontal	Son aquellos que tienen una pendiente menor a 5%. Debido a su baja pendiente, el sistema de drenaje debe ser especialmente diseñado.
	Inclinado	Techos verdes de 5% hasta 40% de pendiente que deben ser especialmente confinados en sus laterales para evitar deslizamientos. Una gran ventaja de éstos, es el alto nivel de drenaje.
DISEÑO	Artisanal	Son aquellos desarrollos a pequeña escala, principalmente en zonas rurales. Se caracterizan por la utilización de elementos comunes.
	Tecnificado	Son los típicos de edificaciones y emplean productos especializados para este tipo de proyectos; y por ello, su costo es mayor. Tienen mayores prestaciones en drenaje e impermeabilización que los de tipo artesanal.

Figura 5. Ejemplos de cubierta verde por bloques.



a. Módulos



b. Sacos.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento consta de 8 capítulos. El Capítulo I presenta el estado del arte de los sistemas GRIPV. A partir de los hallazgos de esta revisión, se determinó que la información

existente no es concluyente para cuantificar el impacto del techo verde sobre la potencia generada por un panel FV. La formulación detallada del problema identificado, la alternativa de solución y los objetivos de la Tesis Doctoral se exponen en el Capítulo 2.

El Capítulo 3 describe la etapa de experimentación llevada a cabo para determinar la influencia de cuatro factores (altura de instalación, tipo de techo, velocidad del aire e irrigación) sobre la potencia generada por un modelo comercial de panel FV (Canadian Solar CS6P-255P). El análisis de los resultados obtenidos es abordado en el Capítulo 4.

El Capítulo 5 presenta el modelado paramétrico (por regresión) de la temperatura de operación y la potencia generada del modelo de panel FV seleccionado a partir del análisis de regresión de los datos adquiridos. El modelado paramétrico de la temperatura de operación es confiable para describir la condición de operación normal; sin embargo, ante condiciones transitorias extremas como las producidas por la irrigación de panel FV, se requiere de un modelo basado en los procesos de transferencia de calor, por lo cual se estableció un modelo específico para determinar el efecto de la irrigación a partir de analogías termoeléctricas, el cual se presenta en el Capítulo 6.

El Capítulo 7 expone consideraciones para incrementar el beneficio energético de la irrigación en la generación de un panel FV y una breve reseña de un invento registrado ante la Superintendencia de Industria y Comercio – SIC para la obtención de una patente de invención.

Finalmente, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones, las observaciones y algunas alternativas de trabajo futuro identificadas en esta investigación.

TRABAJOS ACADÉMICOS Y PROYECTOS PROMOVIDOS

Durante el desarrollo de la investigación doctoral se exploraron diversas temáticas relacionadas con aplicaciones URE en edificaciones, siendo el estudio de los sistemas GRIPV el tema final de investigación. En dicho proceso de exploración se han promovieron diversos trabajos de investigación (36 trabajos de grado de pregrado, 2 monografías en especialización

y 3 trabajos de investigación en maestría) y se divulgaron hallazgos tanto en ponencias (nacionales e internacional) como en artículos científicos. Específicamente, en relación con esta Tesis Doctoral se llevaron a cabo dos trabajos de grado, tres ponencias nacionales y un artículo científico.

Adicionalmente, se coordinó la ejecución de tres proyectos de investigación: dos con financiación interna^{6,7} de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS y uno financiado por COLCIENCIAS – BID⁸, los cuales fueron liderados por el Director de esta Tesis Doctoral.

Como producto de esta Tesis Doctoral, y en el marco del proyecto COLCIENCIAS – BID, se desarrolló una invención titulada *Método y sistema de irrigación para paneles fotovoltaicos integrados con techos verdes*, para la cual se registró una solicitud de otorgamiento de la patente de invención ante la Superintendencia de Industria y Comercio en abril de 2016.

⁶ Título: Comportamiento energético de aplicaciones para el uso racional de la energía en edificaciones en un entorno tropical (Código VIE #1364)

⁷ Apoyo a Tesis Doctoral – Programa de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) – UIS (Código VIE#1605)

⁸ Título: Validación experimental del beneficio energético de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con techos verdes para entornos tropicales con clima cálido (Convocatoria 700 de 2014). (Código VIE #8574)

I. ESTADO DEL ARTE SOBRE SISTEMAS GRIPV

Un sistema *Green Roof Integrated Photovoltaics* – GRIPV hace referencia a un sistema FV instalado sobre techo verde que propende por incrementar tanto la eficiencia energética de los paneles FV como el aislamiento térmico de los techos verdes de manera simultánea. A pesar de los beneficios que pueden otorgar los sistemas GRIPV, no son una práctica común a nivel mundial, ya sea en sistemas en operación o en investigaciones. Esto contrasta con el elevado número de sistemas FV y techos verdes instalados y las tendencias de penetración de mercado. Tal situación se puede deber mayormente al paradigma de la existencia exclusiva de un solo sistema sobre las terrazas de las edificaciones.

I.1 SISTEMAS GRIPV EN OPERACIÓN

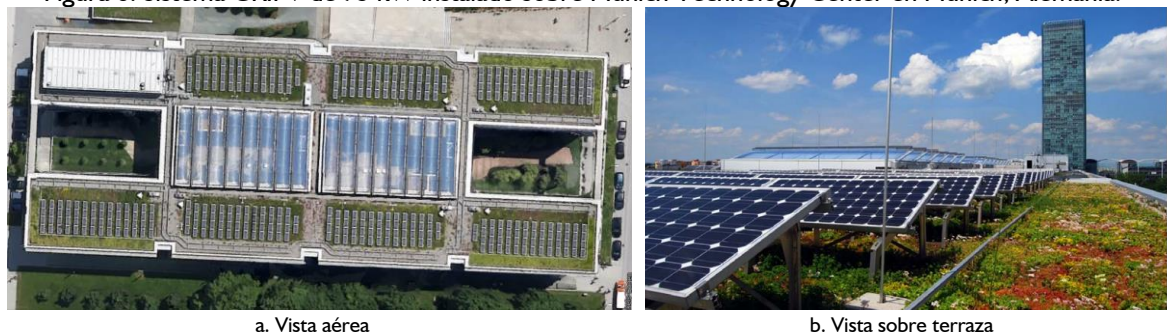
La Tabla 2 presenta varios de los sistemas GRIPV identificados a nivel mundial, los cuales están ubicados en zona templada, a excepción de un sistema de 5,9 kW instalado en la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), producto de esta Tesis Doctoral. La totalidad de los sistemas operan conectados a la red en condición de máxima potencia. La Figura 6 muestra un sistema instalado en Múnich.

Con base en diversas fuentes consultadas, como revistas científicas, conferencias y páginas de Internet, es posible indicar que existen algunas organizaciones que han llevado a cabo trabajos sobre esta temática, tales como: *Enecolo AG* (Suiza), *University of Applied Sciences en Neubrandenburg* (Alemania), *Pennsylvania State University* (EEUU), *Portland State University* (EEUU) y *Columbia University* (EEUU), entre otras.

Tabla 2. Listado de sistemas GRIPV existentes a nivel mundial.

Ref.	Año	Ubicación	Responsable	kWp	Latitud
[9]	1998	Chur, Suiza	Enecolo AG	10	46,9°
[10]	1999	Berlin, Alemania	Ufafabrik Univ. of Applied Sciences Neubrandenburg	10	52,5°
[11]	2000	Basel, Suiza	Enecolo AG	20	47,6°
[9]	2001	Zürich, Suiza	Enecolo AG	25	47,4°
[12]	2008	München, Alemania	Munich Technology Center Zinco	75	48,1°
[13]	2010	Portland (OR), EEUU	International Harvester Building	45,6	45,5°
[14]	2010	Pittsburgh, EEUU	Scalo Solar Solutions	16,6	40,0°
[15]	2011	Portland (OR), EEUU	Portland State University	2,8	45,5°
-	2015	Bucaramanga, Colombia	Universidad Industrial de Santander	5,9	7,1°

Figura 6. Sistema GRIPV de 75 kW instalado sobre Munich Technology Center en Munich, Alemania.



a. Vista aérea

b. Vista sobre terraza

1.2 ANTECEDENTES

El primer trabajo científico de integración entre paneles FV y techo verde data de 1997 con un trabajo titulado *Solgreen Flat Roof System for Green Roofs* publicado en *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference (1997)* (Barcelona, Spain) [16]. Algunos de los autores realizaron un trabajo posterior con la tecnología Solgreen para la versión 17 del mismo evento en 2001, celebrado en München, Alemania [17].

De acuerdo a [18], *Solgreen* es una estrategia modular para viabilizar y armonizar el montaje de paneles FV en techos verde para techos planos con vegetación de corta envergadura. Esta tecnología fue desarrollada e implementada en Suiza por Enecolo AG a partir de tres proyectos entre 1998 y 2001 en Chur (10kWp), Zürich (25kWp) [9] y Basel (20kWp) [11]. Este proyecto estuvo enmarcado en el *Community Research and Development Information Service – CORDIS* con el código SE./00319/98.

Otro sistema de montaje es *Solarver* desarrollado por la empresa alemana *Zinco*, a partir del cual se implementó en 2008 un sistema GRIPV de aproximadamente de 75kWp con 2 500 m² en la terraza del *Münich Technology Center* (Múnich, Alemania) [12].

Köhler *et al.* [10] y Köhler *et al.* [19] indican que varios sistemas FV fueron instalados sobre secciones de techo verde en UFAfactory en 1999 Berlín, con el fin de apreciar la interacción mutua de las dos tecnologías. Se puede decir que dicha experiencia es la más referenciada y posiblemente motivó las investigaciones subsecuentes. Sin embargo, el estudio realizado no se basó en un análisis detallado de tipo energético, sino fue más bien de tipo descriptivo.

La Tabla 3 muestra información sobre las investigaciones realizadas hasta la fecha. Todos los casos corresponden a zonas templadas, salvo uno realizado en Singapur. Según la literatura, se han realizado algunas investigaciones mayormente teóricas o experimentación en condiciones no reales de generación.

Tabla 3. Descripción de los trabajos realizados sobre desempeño de sistemas GRIPV.

Ref.	País (Lat., Long.)	Tiempo	Altura promedio de instalación (m)	Tipo de planta	Incremento de la potencia FV	Tipo de análisis
[20] 2010	-	1 año	-	<i>Sedum</i>	0,55% (GR vs BR) 0,077% (GR vs WR)	Modelado
[21] 2011	Hong-Kong China (22,4°;114,1°)	3 horas para un día soleado	-	<i>Sedum</i>	4,3% (GR vs GYR)	Experimento (pequeña escala - 35W)
[22], [23] 2012 2013	New York EEUU (40,7°;-74,0°)	8 meses	-	<i>Varietal Sedum</i>	2,42% (GR vs GVR)	Experimento (pequeña escala - 180W)
[24] 2013	Singapur Singapur (1,3°;103,8°)	3 tipos de día 1 año	30 cm	Shrub (<i>Complaya trilobata</i>)	2% para día despejado 2% para día intermedio 1% para día nublado 1,9% para escenario anual	Experimento (pequeña escala - 25W) Estimación
[14] 2013	Pittsburg, PA EEUU (40,4°;-80,0°) Phoenix, AZ EEUU (33,4°;-112,1°) San Diego, CA EEUU (32,7°;-117,2°) Hunsville, AL EEUU (34,7°;-86,6°)	16 meses (2011-2012) 1 año 1 año 1 año	63 cm	<i>Moss</i>	-0,5% (GR vs BR) 1,3% (GR vs BR) 0,7% (GR vs BR) 0,6% (GR vs BR)	Experimento (gran escala- 16,5kW) Estimación
[25] 2014	Lleida España (41,4°;-0,6°)	10 horas para 5 días soleados	13 cm	<i>Gazania Sedum</i>	1,29% (<i>Gazania</i>) y 3,33% (<i>Sedum</i>) (GR vs GVR)	Experimento (pequeña escala - 5W)

GR: Green roof GVR: Grave roof GYR: Gray roof BR: Black roof

La mayoría de experimentos consideran pequeños sistemas FV (5 W – 180 W), solamente Nagengast [14] presenta un estudio con una instalación FV con gran capacidad instalada (16,5 kW). En general, se utiliza la especie vegetal *Sedum*. En varios casos no se ofrece información sobre la altura de instalación, y menos aún se explora su influencia. El análisis comparativo se realiza con respecto a techos tradicionales (negro, grava o gris). La variación en la generación oscila entre -0,5% y 4,33%.

1.3 MODELADO Y SIMULACIONES

Witmer [20] y Witmer y Brownson [26], [27] son trabajos desarrollados en *Pennsylvania State University*. En 2010, Witmer [20] presentó un modelo térmico del GRIPV a partir de los modelo de un sistema FV en TRNSYS y de techo verde desarrollado por Erell [28].

El modelo desarrollado por Witmer [20] no realiza estimaciones del punto de operación del panel fotovoltaico. A partir de simulaciones, se sugirió que el mejor comportamiento fotovoltaico es cuando el panel es instalado sobre techo verde en comparación a los casos techo bituminoso blanco y techo bituminoso negro. Sin embargo, no hay suficiente información para concluir favorablemente sobre la validación del modelo y tampoco se realizó un análisis de la influencia de parámetros de diseño.

Scherba *et al.* [2] presentaron en 2011 un modelado del GRIPV desarrollado en *EnergyPlus*, el cual es un software ampliamente aceptado para la simulación energética de edificaciones. Esta investigación hace parte del quehacer del *Green Building Research Laboratory* de *Portland State University*. Con ese modelo se realizaron simulaciones para las nueve zonas geográficas de Estados Unidos a partir de archivos climáticos TMY2 considerando tres tipos de techo: Verde, blanco y negro. Con base en los resultados, los autores indicaron que la eficiencia fotovoltaica puede mejorar hasta en un 4% para las condiciones simuladas. Este modelo fue validado a partir de un experimento que empleó una configuración de cuatro (4) paneles FV SW175 durante una semana de operación, aunque sólo para los casos de techo blanco y techo negro. Este modelo no es lo suficientemente robusto como

para explorar la influencia de parámetros de instalación como los evaluados en esta investigación.

También en 2011, Hui and Chan [21] realizaron un análisis comparativo con *EnergyPlus* para cuatro casos según las condiciones climáticas de Hong Kong. Los casos considerados fueron: Techo verde, sistema FV sobre techo gris, techo gris desnudo y sistema GRIPV. Sin embargo, los hallazgos obtenidos con las simulaciones no pueden ser considerados relevantes debido a que estas simulaciones consideraron valores de eficiencia FV constantes. Por otro lado, la experimentación mostró que para condiciones de verano se podría obtener un incremento en la generación FV del 4,3%.

1.4 EXPERIMENTACIÓN

Los primeros estudios realizados no proveen información técnica detallada sobre la monitorización del desempeño de los GRIPV. Solamente un grupo reducido de estudios han documentado esta información, tales como Hui y Chan (2011) [21], Hendarti (2013) [24], Nagengast (2013) y Chemisana y Lamnatou (2014) [25]. Una descripción general de estos estudios es mostrada a continuación.

1.4.1 Caso A: Hui y Chan (2011) [21]

Hui y Chan [21] muestran un experimento menor para comparar dos sistemas, un sistema GRIPV y un sistema PVonGYR (*Photovoltaics on Gray Roof*), usando solamente dos paneles FV de aproximadamente 40W, uno por sistema. El experimento fue llevado a cabo en días soleados de 11 a.m. a 2 p.m.

De acuerdo a las mediciones, el sombreado de un panel FV redujo la temperatura del suelo en cerca de 5°C; además, la interacción entre el techo verde y el panel FV redujo la temperatura de la superficie de este último. Los resultados indican que los GRIPV pueden generar hasta un 4,3% más de energía que los sistemas PVonGYR para condiciones soleadas y cálidas.

1.4.2 Caso B: Perez *et al.* (2012) [23] and Perez *et al.* (2013) [22]

Perez *et al.* (2012) [23] y Perez *et al.* (2013) [22] presentan un experimento realizado por *Columbia University*; sin embargo, estos trabajos proveen poca información técnica. El experimento considera cuatro cámaras con un volumen de aproximadamente un metro cúbico construidas para diferentes tipos de techo: Grava, techo verde, PVonGYR y GRIPV. El modelo de panel FV utilizado es el JAM5(L)-72-180/SI (180W). Los resultados indican que el sistema GRIPV genera 2,42% más energía que el sistema PVonGR.

1.4.3 Caso C: Hendarti (2013) [24] (Tesis doctoral)

Hendarti [24] adelantó una investigación basada en experimentación con el objetivo de apreciar el efecto de la evapotranspiración sobre el desempeño de paneles FV para sistemas GRIPV. El análisis realizado considera: Dos paneles FV de 25 W instalados a 30 cm de altura, un techo verde 6,25 m², un techo de concreto y tres tipos de cielo (despejado, intermedio y cubierto).

De acuerdo a los resultados obtenidos, los techos verdes podrían reducir la temperatura operativa del panel FV, en 5°C, 2,5°C y 1°C para los tres tipos de cielo considerados, respectivamente. Adicionalmente, el incremento en la generación fotovoltaica fue del 2% para un nivel de radiación solar entre 600 W/m² y 900 W/m², y del 1% para una radiación solar por debajo de 600 W/m². La estimación anual del incremento en la generación de energía sería del 1,9% para condición de clima cálido tropical.

También se evidenció que la temperatura de superficie del techo verde fue menor para los tres casos analizados. La Tabla 4 presenta las diferencias máximas y promedios entre el techo verde y el techo de concreto. Las diferencias máximas se presentaron cerca del mediodía.

Tabla 4. Diferencias de temperatura entre el techo verde y el techo de concreto.

Diferencia	Cielo despejado	Cielo intermedio	Cielo cubierto
Máxima	20°C	10°C	4°C
Promedio	2°C	1,5°C	1°C

1.4.4 Caso D: Nagengast (2013) [14] (Tesis doctoral)

Nagengast [14] condujo un experimento por 16 meses (mayo de 2011 a octubre de 2012) analizando tres sistemas FV reales instalados sobre tres secciones de techo (blanco, negro y verde), en la terraza de un edificio comercial localizado en Pittsburgh, Pennsylvania. La capacidad de la instalación FV es 16,5 kW (60 paneles FV de 275 W) con una inclinación de 15°.

El aspecto de mayor importancia en este estudio fue la comparación del desempeño de los sistemas FV instalados sobre la secciones de techo negro y verde. Su conexión a la red se realizó por medio de inversores tipo *string*. Este tipo de inversor puede tener por desventaja que no garantiza la operación individual de los paneles FV en el punto de máxima potencia, siendo una mejor opción los microinversores.

Adicionalmente, las condiciones de operación de los dos sistemas no son las mismas. Las alturas de instalación de los techos negro y verde son de 23 cm y 63 cm, respectivamente. Por otro lado, la radiación solar incidente para cada sistema tiene ligeras diferencias debido al albedo del techo circundante, lo que en parte es causado por la altura de instalación.

A partir del análisis de los datos, Nagengast estableció que es posible expresar la potencia generada (PV_{out}) y la temperatura de la superficie posterior del panel (T_{BS}) como funciones de: La temperatura ambiente (T_{amb}), la temperatura operativa (T_{PVcell}) y la radiación solar (G). La Tabla 5 muestra las expresiones obtenidas.

Tabla 5. Análisis de regresión realizado por Nagengast [14].

Variable dependiente	Tipo de techo	Tipo de regresión	Ecuación	R ²
Temperatura en la superficie posterior del panel	Negro	Lineal	$T_{BS} = 1.2 + 1.5T_{amb} [^{\circ}C]$	0,75
	Verde		$T_{BS} = 1.3 + 1.3T_{amb} [^{\circ}C]$	0,80
Potencia generada	Negro		$PV_{out} = 0.17 - 0.0024T_{PVcell} + 0.013G [kW]$	0,98
	Verde		$PV_{out} = 0.10 - 0.00056T_{PVcell} + 0.013G [kW]$	0,98
Temperatura en la superficie posterior del panel	Negro	No lineal	$T_{BS} = 0.16 + 1.0T_{amb} + 0.02T_{amb}^2 [^{\circ}C]$	0,78
	Verde		$T_{BS} = 0.39 + 0.99T_{amb} + 0.01T_{amb}^2 [^{\circ}C]$	0,82
Potencia generada	Negro		$PV_{out} = -0.38 + 0.041T_{PVcell} - 0.00084T_{PVcell}^2 + 0.015G - 0.0000012G^2 [kW]$	0,98
	Verde		$PV_{out} = -0.39 + 0.041T_{PVcell} - 0.00091T_{PVcell}^2 + 0.015G - 0.0000013G^2 [kW]$	0,98

Nagengast encontró que los GRIPV pueden producir incrementos en la energía generada entre del 0,8% al 1,5% cuando la temperatura ambiente es igual o superior a 25°C. El desempeño será prácticamente igual cuando la temperatura ambiente esté entre 20°C y 25°C. Habrá una reducción cercana al 0,5% para el caso de temperatura ambiente por debajo de 20°C.

1.4.5 Caso E: Chemisana y Lamnatou (2014) [25]

Chemisana y Lamnatou [25] llevaron a cabo un experimento para analizar el desempeño de sistemas GRIPV para condiciones mediterráneas. Se presentan resultados de cinco días (10 horas por día) bajo condiciones soleadas en Lleida (España) durante junio y julio de 2013. La temperatura ambiente del lugar varía entre 24°C y 30°C. Se emplearon dos especies vegetales, *gazania rigens* y *sedums clavatus*.

Este experimento se basó en el uso de dos paneles de muy baja potencia (5W), instalados a una altura promedio de 13 cm sobre tres clases de techos: Techo verde con *gazania rigens* (A), techo verde con *sedums clavatus* (B) y techo de grava (C), donde C es el caso de referencia. Cada techo verde tenía un área de 1,2 m² con una capa de sustrato de 10 cm. Debido a las limitaciones de infraestructura, se debieron realizar tres análisis comparativos, A con B, B con C y A con C. Los paneles FV fueron caracterizados por medio de un medidor IV traces PVPM 2540C.

De acuerdo a los resultados, los techos con especies vegetales reducen la temperatura de operación del panel FV e incrementan la potencia generada en un 1,29% (*Gazania*) y un 3,33% (*Sedum*) con respecto al techo con grava.

1.5 EFECTOS DEL SOMBREADO OCASIONADO POR PANELES FV

Los paneles FV pueden actuar como sombrillas para el techo y reducir la exposición a la radiación solar. Nitta *et al.* [29] muestra como éstos redujeron la temperatura de 50°C a 35°C en un techo bituminoso desnudo durante un día en verano. Este efecto por sí mismo

ya logra reducir significativamente la ganancia solar de la envolvente de la edificación y contribuye a un menor uso de energía debida a aires acondicionados; sin embargo, la eficiencia de los paneles FV se redujo porque el aire circundante tuvo una temperatura mayor a la temperatura ambiente.

Köhler *et al.* [10] empleó una cámara termográfica para observar las temperaturas máximas de un techo desnudo y un techo con sistema GRIPV para un día soleado. El techo descubierto alcanzó una temperatura de 38°C, mientras que para el techo verde sombreado y no sombreado los valores fueron 19,5°C y 22°C, respectivamente. En este caso los paneles FV se instalaron a 50 cm de altura sobre el sustrato.

Köhler *et al.* [19] muestra que el sombreado de los paneles FV incrementó la altura de las especies vegetales de 15 cm a 38 cm, debido al menor estrés térmico por menor radiación solar y evapotranspiración. Köhler *et al.* [10] muestran los resultados de un estudio realizado por cinco (5) años, el cual indica que el sombreado tiende a incrementar el número de plantas, aunque la altura promedio de la vegetación no se vio afectada.

1.6 OTRAS ESTRATEGIAS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE LOS PANELES FV

La eficiencia de conversión energética de celdas solares FV de silicio decrece con el incremento de la temperatura de operación. Este efecto térmico es significativo y predecible; se puede estimar que las pérdidas son aproximadamente del 0,4% por cada grado Celsius de incremento [30], [31]. Por tanto, se pueden aplicar técnicas como la ventilación forzada y el riego para mitigar el incremento de la temperatura.

En *Portland State University* se realizaron dos trabajos por Smith *et al.* [30] y Smith *et al.* [31] para analizar el efecto en la generación térmica de: La ventilación forzada, el material particulado que se deposita sobre los paneles FV y la irrigación de los mismos.

Smith *et al.* [30] un experimento con 2 paneles FV SWI 75 para evidenciar el efecto de la ventilación forzada. Encontraron que la temperatura de operación del panel con ventilación

forzada varió entre 28°C y 42°C, mientras que el rango para el panel no ventilado osciló entre 42°C y 66°C, dado que su superficie posterior fue cubierta con un material aislante y ello evitó los procesos de transferencia de calor por radiación y convección. Eso significó una variación de hasta un 10% en la generación fotovoltaica para un día soleado.

En este mismo trabajo se expone cómo el material particulado existente en el aire puede causar una disminución en la captación de radiación solar cuando se deposita sobre el panel FV. Se encontró que la eficiencia FV puede disminuir cerca del 4% para una deposición de 0,045g/m²/día cuando el panel FV tiene una inclinación de 30°. Adicionalmente, que la lluvia moderada genera un beneficio casi igual al obtenido si se realiza una limpieza manual permanente.

Smith *et al.* [31] analizaron el efecto de la irrigación sobre paneles FV y se encontró que se puede obtener un beneficio del 5%, incluyendo el consumo energético debido a la bomba de agua empleada. La estructura del experimento consistió en el uso de tubería PVC y una bomba de 7 W para un panel FV.

En los experimentos descritos no se realizó la caracterización de la influencia de la variación de las variables como la velocidad del aire de la ventilación forzada, la tasa de deposición del material particulado y la tasa de riego. Tales análisis favorecerían la definición de lineamientos de diseño para estas aplicaciones.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN PROPUESTA

Este capítulo presenta la formulación del problema identificado, la alternativa de solución, los objetivos, los alcances y la metodología de la investigación realizada.

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La integración de paneles FV y techo verde (sistemas GRIPV) data de 1998 en Alemania. Sin embargo, el número de sistemas en operación permanente y de estudios científicos realizados es escaso. Por ello, es aún una alternativa tecnológica emergente en lugares con clima templado, y casi inexistente en la zona tropical.

Los sistemas GRIPV propenden por incrementar tanto la eficiencia energética de los paneles FV como el aislamiento térmico de los techos verdes. Esto último contribuye a reducir la carga térmica interior de los edificios.

Con base en la revisión del estado del arte, se establece que no es posible estimar de manera razonable el beneficio en la generación eléctrica debido a un sistema GRIPV en un entorno tropical cálido instalado para condiciones micro-climáticas y de instalación específicas. A continuación se presentan los argumentos que soportan esta afirmación.

- **Aplicabilidad de los hallazgos**

Los escasos experimentos desarrollados sobre sistema GRIPV se han llevado a cabo predominantemente en lugares templados como Alemania, Suiza y Estados Unidos; sólo un es-

tudio fue realizado en Singapur (zona tropical). Estos estudios mayormente consideran condiciones soleadas y cálidas (verano), tal como [21], [24], [25]. En estas condiciones el incremento de potencia generada puede llegar a casi el 5%.

De manera más específica, Nagengast [14] muestra que aparentemente, los techos verdes pueden incrementar la generación FV entre el 0,8% y el 1,5% sólo para condiciones cálidas (temperatura ambiente igual o superior a 25°C); mientras el incremento será despreciable cuando la temperatura ambiente esté entre 20°C y 25°C, y habrá una reducción cercana al 0,5% para el caso de temperatura ambiente por debajo de 20°C. Desafortunadamente, este experimento desconoce la influencia de la altura y no monitoriza la variación de la radiación solar debido al albedo ya que uno de los sistemas FV analizado se instaló a menos de 25 cm.

Sumado a esto, se aprecia que los resultados de validación experimental y de modelos propuestos no son satisfactorios debido a que se consideraron condiciones específicas poco variadas; adicionalmente, no se estudió el efecto de otros factores que pudiesen explicar parte de las variaciones documentadas de la potencia generada. Siendo esto más crítico para entornos tropicales por la ausencia de investigaciones. Por tanto, se evidencia la falta de validación de la eficiencia del sistema GRIPV para diversas condiciones climáticas, como en lugares tropicales con clima cálido, y de condiciones de operación, como la altura de instalación.

- **Dimensionamiento del sistema FV**

Los experimentos realizados sólo consideran paneles FV de baja potencia (5 W a 60 W), por lo que no es posible asegurar su operación en el régimen MPP (*Maximum Power Point*); salvo Scherba *et al.* [2] (180 W) y Nagengast [14] (275 W), ya que ello se logra con el uso de reguladores, inversores o microinversores con función MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).

Es importante notar que hay dos tipos de inversores, inversores tipo *string* (utilizado por Nagengast [14]) y microinversores (utilizado por Scherba *et al.* [2]). El primer tipo trabaja con varios paneles FV de manera simultánea, lo cual tiene como desventaja que los paneles

FV conectados en serie operan con la misma corriente, y no se asegura la operación individual en modo MPP. Esta desventaja se puede eliminar con el uso de microinversores. Estos dispositivos gestionan de manera individual cada panel FV entre 175 W y 300W (según el modelo), asegurando su operación en modo MPP.

- **Monitorización de variables eléctricas**

En general, se aprecia instrumentación de calidad para la monitorización de variables micro-climáticas y de temperatura de operación del panel FV; sin embargo, es precario el uso de medidores de energía de clase 0,5 o mejor para la monitorización de variables eléctricas, a pesar de que el criterio principal del beneficio de sistemas GRIPV es la potencia adicional generada en comparación con un caso base (sistema FV sobre techo tradicional), lo cual es indispensable debido a los reducidos valores de porcentuales de incremento de la potencia generada.

La determinación de la potencia se ha realizado desde dos estrategias de monitorización, indirecta (Hendarti [24] y Chemisana y Lamnatou [25]) y directa (Nagengast [14] 2013). El enfoque indirecto no incluye la medición de potencia, sino que se basa en la medición de la tensión de circuito abierto, corriente de circuito o temperatura de operación. La desventaja de este enfoque es el mayor margen de incertidumbre de los datos obtenidos (no se menciona en los estudios), lo cual afecta la confiabilidad de los hallazgos; sobre todo teniendo en cuenta los bajos valores porcentuales del potencial incremento en la potencia generada.

Tal desventaja se elimina con la medición directa de potencia, siempre y cuando se empleen medidores de energía de alta exactitud, lo cual no se ha evidenciado hasta el momento en un estudio donde se utilice un sistema FV de características reales (paneles de 180W o superior).

Scherba *et al.* [2] llevaron a cabo la medición directa de potencia generada a través del sistema de monitorización de los microinversores como única estrategia de medición de variables eléctricas. El inconveniente de esta estrategia es el nivel de exactitud de la medición, el cual es típicamente $\pm 5\%$, lo que significa que si el valor de potencia es 200W, el valor real podría estar entre 190W y 210W. Esto no es aceptable para llevar a cabo experimentación

con rigurosidad científica debido a que el beneficio porcentual potencial es típicamente inferior al 5%.

En definitiva, se aprecia en la literatura la existencia de algunos estudios sobre sistemas GRIPV orientados mayormente a evidenciar el incremento de potencia generada debido al uso de techos verdes. Sin embargo, se considera que la información existente no es concluyente para conocer cuál es el impacto del techo verde en la generación FV; más aún, se intuye que sólo habría un impacto positivo para condiciones específicas micro-climáticas y de instalación. Adicionalmente, se aprecia una oportunidad de investigación que aborde de manera satisfactoria el diseño del experimento, el dimensionamiento del sistema GRIPV y el método de medición de la potencia generada.

Por tanto, el objeto de este proyecto es resolver las siguientes preguntas de investigación: 1) ¿Los sistemas GRIPV son una solución válida para incrementar la potencia generada de los paneles FV en un entorno tropical específico con clima cálido?, en caso de ser así 2) ¿Para qué condiciones específicas se obtendría dicho incremento de potencia?

En consecuencia, se considera necesario llevar a cabo la caracterización del desempeño de sistemas GRIPV, a fin de establecer las condiciones para lograr un mejor desempeño (aumento de potencia generada). La estrategia seleccionada para resolver el problema de falta de información es un estudio de impacto de factores. A partir de esto, se podrían determinar las condiciones que produzcan efectos positivos o negativos.

Por ello, se llevó a cabo experimentación con monitorización intensiva de variables eléctricas (tensión, corriente, potencia, energía), climáticas (radiación solar, temperatura ambiente y viento) y térmicas operativas (temperatura del panel FV, temperatura del aire circundante). Tal experimento se basó en sistemas FV de operación real con microinversores y un sistema de monitorización robusto de variables micro-climáticas y de operación, con medidores de energía de clase 0,5 ($\pm 0,5\%$) o mejor.

Por último, este proyecto es una oportunidad para aportar significativamente en el estudio de esta tecnología emergente (sistema GRIPV) debido a la escasez de estudios a nivel mundial, y sobre todo, a la carencia de los mismos para entornos tropicales con clima cálido.

- **Contextualización del proyecto en el entorno colombiano**

Se considera que en Colombia existen condiciones favorables para la penetración de sistemas FV y techos verdes debido al marco legal existente y en desarrollo de la construcción verde y la generación distribuida, así como por la tendencia del sector de la construcción. La primera ha sido reglamentada principalmente por la Resolución 0549 de 2015 que establece porcentajes y medidas de ahorro de energía y agua en edificaciones nuevas.

En lo que respecta a la generación distribuida, se evidencia que es un tema de creciente interés para las empresas generadoras y distribuidas de energía eléctrica, la académica, los usuarios residenciales y los empresarios. Su marco legislativo fue definido por la Ley 1715 de 2014, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Actualmente, el proceso de reglamentación de esta Ley está en curso. Ello llevaría a que en los próximos años haya una implementación progresiva de sistemas fotovoltaicos (FV) en entornos urbanos.

2.2 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

Con base en los hallazgos obtenidos del estado del arte de sistemas GRIPV, se evidencia la falta de información técnica que describa con suficiencia el desempeño de paneles FV para este tipo de aplicaciones, específicamente la potencia generada. Por tal motivo, fue propósito de esta Tesis Doctoral, llevar a cabo un proceso de experimentación intensiva en condiciones de operación real para evaluar el desempeño de un modelo de panel FV ante variaciones de cuatro factores: altura de instalación, tipo de techo, velocidad del aire (ventilación) e irrigación.

El tipo de techo fue examinado para cuantificar el efecto real de la vegetación sobre la potencia generada en comparación con un techo tradicional (concreto con recubierto de

capa asfáltica). Tal efecto podría ser intensificado o anulado según la separación entre el panel FV y el techo, por lo que la altura de instalación fue incluida en el análisis.

Las dos técnicas de enfriamiento: Ventilación e irrigación (transferencia de calor por convección) son estudiadas debido a que pueden reducir la temperatura de operación de los paneles FV. Por otro lado, la irrigación se considera una opción viable debido a que el agua para riego de la vegetación puede ser de doble propósito, siendo usada antes para enfriar los paneles FV.

- **Hipótesis de la propuesta de investigación**

El planteamiento de la propuesta de investigación se basa en el siguiente conjunto de hipótesis:

- i. Una mayor generación de potencia por parte del panel FV es posible a partir de la mitigación significativa de la temperatura del panel FV. Tal mitigación puede ser lograda a partir de la combinación específica de: El tipo de techo, la altura de instalación, la velocidad del aire y la irrigación del panel (factores de estudio). Todo este fenómeno puede ser modelado de forma paramétrica considerando variables microclimáticas y de operación del panel FV.
- ii. El uso de techo verde por sí sólo no garantiza una mayor generación en los paneles FV. Tal efecto puede darse sólo para un rango específico de la variable altura de instalación.
- iii. La temperatura del aire alrededor del panel FV varía según la separación existente entre éste y el techo. Adicionalmente, la variación de la temperatura también dependerá del tipo de techo (verde o tradicional); por ello, la altura de instalación es un factor de influencia sobre el desempeño del panel FV. Esto se considera válido para alturas no mayores a un metro.
- iv. Es posible determinar un régimen de operación inteligente del sistema de irrigación, orientado a obtener el mayor beneficio energético neto (diferencia entre la energía adicional generada por la irrigación y el consumo de energía del sistema de irrigación).

- v. Aunque la ubicación y la orientación de un sistema FV depende primordialmente de la radiación solar incidente, es posible que se pueda aprovechar el viento en sitio para ayudar a reducir la temperatura de operación del panel FV. Por tanto, la velocidad y la dirección del aire son factores complementarios a ser tenidos en cuenta en la instalación de sistemas FV en terraza.

- **Aporte de la propuesta de investigación**

A partir del análisis de la veracidad de las hipótesis declaradas, se soporta el aporte de esta investigación doctoral; específicamente, se tiene como resultado la definición de las condiciones de los factores de estudio (altura de instalación, tipo de techo, irrigación y velocidad del aire), orientadas a incrementar la potencia generada por paneles FV en terrazas. Tal información permite definir lineamientos de diseño y de operación de sistemas FV útiles en entornos tropicales cálidos.

Esto fue posible a partir de la caracterización de las variables de operación del panel fotovoltaico (potencia generada y temperatura de operación) según las variaciones de los cuatro factores de estudio, de las variables micro-climáticas en sitio (radiación solar incidente, temperatura ambiente, temperatura del aire circundante) y de parámetros técnicos del panel FV.

Tales hallazgos tienen un nivel de aplicabilidad apreciable, inclusive para las variaciones más relevantes en cada caso de aplicación de sistemas FV en terrazas, tales como: Modelo del panel FV, latitud del lugar y características de los tipos de techos (tradicional y verde). Esto se expone a continuación:

- i. Los hallazgos de esta investigación son aplicables a otras latitudes de la zona tropical debido a que el rango de la radiación solar incidente se mantendrá en general entre 0 W/m^2 a 1200 W/m^2 para todos los casos. La latitud define el movimiento solar relativo, y por ende, la inclinación y la orientación recomendadas para el caso de seguimiento solar estático (estructura fija de montaje). Por tanto, valores específicos de latitud, inclinación y orientación solamente originarán variaciones de la distribución de frecuencia y la radiación diaria acumulada ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$).

- ii. Los resultados obtenidos puede ser extendidos a techos (tradicional o verde) de similares características a los usados en esta investigación, dado que su efecto sobre el desempeño de los paneles FV se analiza mayormente de forma indirecta por medio de la relación a ser establecida entre la temperatura del aire circundante al techo y la temperatura de operación del panel FV. Esto significa que se puede estimar el efecto del techo si se establece la curva de temperatura del aire sobre éste para un caso dado.

2.3 OBJETIVOS Y ALCANCES PROPUESTOS

A continuación se presenta el objetivo general de la propuesta de investigación:

Caracterizar la influencia de factores específicos (tipo de techo, altura de instalación, irrigación y viento) en la potencia generada por paneles FV a ser instalados en terrazas de edificaciones para condiciones de clima tropical cálido.

En esta investigación se considera que el mejoramiento del desempeño energético de los paneles FV se evidencia con el incremento de la potencia generada, lo cual puede ser logrado a partir de técnicas tales como: Techo verde, irrigación y ventilación. Adicionalmente, se incluye el factor de la altura debido a que la separación entre los paneles FV y el techo puede intensificar o anular la influencia del tipo de techo.

La investigación se soporta en el desarrollo de los siguientes tres (3) objetivos específicos:

OEI: *Cuantificar la potencia generada y la temperatura de operación de un modelo de panel FV según la variación de cada factor seleccionado.*

La cuantificación del impacto de los cuatro factores considerados se establece a partir de tres experimentos, lo que permite evidenciar la influencia por separado de cada factor. La información general sobre la experimentación y la variación de cada factor se presenta en la Tabla 6.

Cada experimento se ha estructurado para asegurar la operación simultánea de tres paneles FV, lo cual tiene como propósito llevar a cabo un análisis comparativo para diferentes

condiciones. Los paneles FV (*Canadian Solar 255W*) operan en el punto de máxima potencia debido al uso de microinversores (*Enphase M250*), que inyectan la energía generada a la red eléctrica.

Tabla 6. Descripción de las variaciones de los factores de influencia considerados (variables).

FACTOR	VARIACIONES	EXPERIMENTO	OBSERVACIONES
Altura	(i) 25 cm, (ii) 50 cm, (iii) 75 cm y (iv) 100 cm		
Tipo de techo	(i) Gris o techo de concreto (capa asfáltica) (ii) Techo verde (sustrato: 8-10cm vegetación: 5-10cm)	Experimento I	Inclinación 10°
Irrigación	(i) Sin irrigación (ii) Con irrigación (por tipo (película y flujos paralelos), diversos periodos de irrigación)	Experimento II	Control de la velocidad del aire (< 1m/s)
Velocidad del aire	(i) 0m/s, (ii) 1m/s y (iii) 2m/s	Experimento III	La velocidad del aire fue controlada para la superficie posterior del panel FV, y será menor a 1 m/s para la superficie frontal.

El experimento I está orientado a estudiar de forma simultánea los efectos de la altura de instalación y el tipo de techo verde. Mientras los experimentos II y III se llevan a cabo para analizar factores de forma separada.

OE2: *Establecer el modelado paramétrico de la potencia generada por un panel FV considerando variables climáticas en sitio (radiación solar incidente, temperatura ambiente y velocidad del aire) y características de instalación del sistema.*

El modelo propuesto tiene por propósito determinar la potencia generada (P_{PV}) por un panel FV en el punto de máxima potencia como función de las variables climáticas en sitio (radiación solar incidente, temperatura ambiente y velocidad del aire).

Las expresiones matemáticas del modelado se determinan a partir de un análisis estadístico de regresión, para un coeficiente de determinación (R^2) mayor a 0,9 entre el valor medido y el valor estimado de la potencia generada.

OE3: *Determinar las condiciones de operación para un panel FV instalado sobre terraza en un entorno tropical cálido orientadas al incremento de la potencia generada en régimen MPPT.*

Se determina el orden de importancia de los cuatro factores estudiados según el incremento en la potencia generada para clima tropical cálido. Esto incluye establecer los escenarios de mayor y de menor impacto positivo en la generación FV.

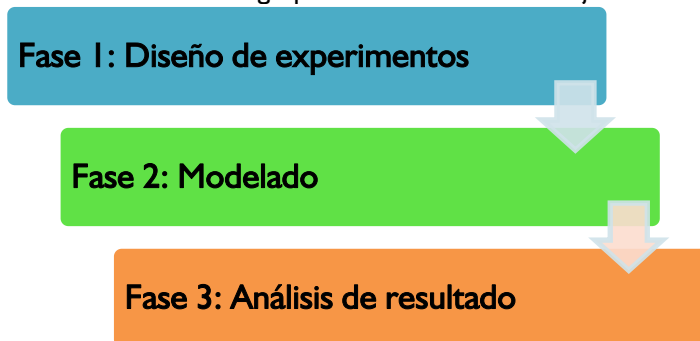
Con respecto al régimen de operación del sistema de riego (tipo, tiempo y frecuencia), se analiza para las condiciones operación permanente y operación inteligente. La operación permanente consiste en realizar el riego diario de forma periódica, definiendo un horario fijo para el inicio y la finalización del riego de los paneles FV. El periodo de riego está conformado por los tiempos de riego y no riego.

El régimen de operación inteligente del sistema de irrigación tiene por objeto obtener el mayor beneficio energético neto. Esto se logra determinando cuándo debe ser irrigado el panel FV de forma tal que la potencia neta (potencia adicional generada menos la potencia consumida por el sistema de irrigación) sea la mayor obtenida. Tal análisis involucra el estudio del tipo de irrigación, puesto que influye en el caudal de la irrigación, lo cual a su vez puede suponer un mayor o menor consumo de energía.

2.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo establecida para el desarrollo de la Tesis Doctoral está conformada por tres (3) fases, tal como se presenta en la Figura 7.

Figura 7. Fases de la metodología para el desarrollo del trabajo de investigación.



Fase 1: Experimentación. Para determinar la influencia de los factores en el desempeño del panel FV se desarrollaron un conjunto de experimentos que permitan apreciar el efecto

de cada factor según variaciones específicas, tal como sigue: El tipo de techo (gris o verde), la altura de instalación (25cm, 50cm, 75cm y 100cm), la velocidad del aire (0 m/s, 1 m/s y 2m/s) y la irrigación (existencia o no).

Fase 2: Modelado. Se realiza un modelado paramétrico a partir de un análisis por regresión para describir el comportamiento energético de un panel FV a partir de la potencia generada y la temperatura de operación.

Fase 3: Análisis de resultados. Se lleva a cabo el análisis del comportamiento del panel FV (potencia generada y temperatura de operación) para diversos escenarios con el fin de establecer las condiciones de operación con mayor impacto favorable en la generación de energía eléctrica. La irrigación es incluida siempre y cuando pueda generar un impacto energético neto positivo (cuando la generación sea mayor al consumo debido al sistema de irrigación), lo cual implica determinar el régimen de operación más conveniente en función de las condiciones de operación de cada instante de tiempo.

3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

Esta investigación se basa en el estudio por experimentación de la influencia de cuatro factores (altura de instalación, tipo de techo, irrigación y velocidad del viento) sobre el desempeño de paneles FV instalados en las terrazas de edificaciones localizadas en un entorno con clima tropical cálido.

La descripción de esta experimentación es presentada en este capítulo. Inicialmente, se hace referencia al Campus Central de la Universidad Industrial de Santander como el lugar de la experimentación; seguidamente, se describen las cubiertas vegetales tanto portátil como permanente y los sistemas FV construidos. Finalmente, se muestra la monitorización implementada y se presentan los tres experimentos puestos en marcha.

3.1 CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

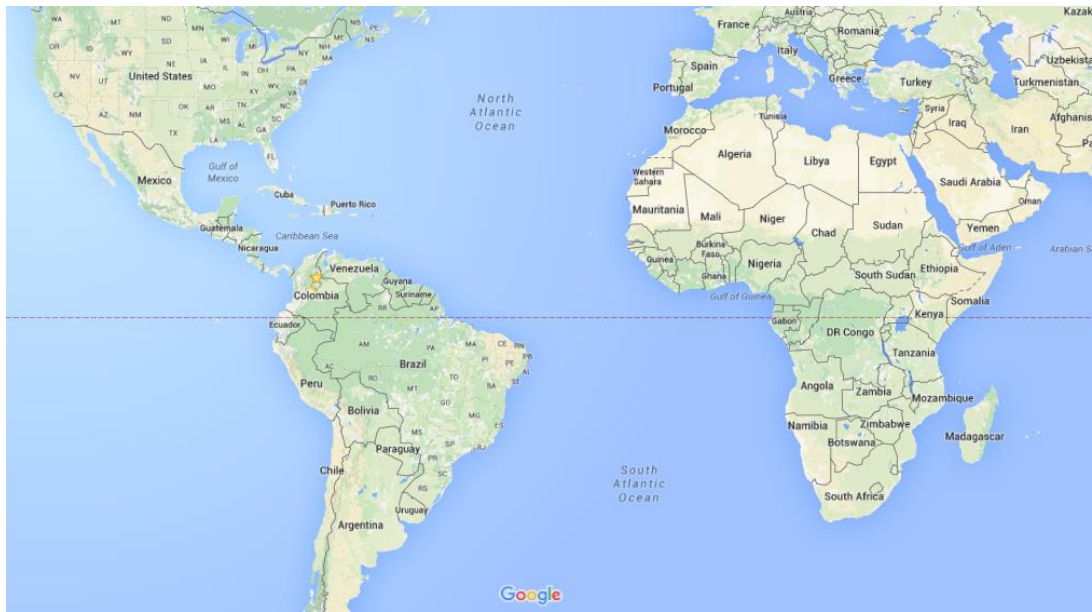
La Universidad Industrial de Santander (UIS) es una entidad pública de educación superior colombiana inaugurada en 1948, cuyo campus central está localizado en la ciudad de Bucaramanga (Colombia, Sur América). A 2016, también existen sedes regionales universitarias en los municipios de Socorro, Barrancabermeja, Málaga y Barbosa.

El Campus Central tiene una extensión de 25,5 hectáreas conformado por más de 30 edificaciones, siendo dos de éstas los Edificios de Ingeniería Eléctrica (piloto de construcción verde) y de Biblioteca (construcción tradicional), en los cuales se llevó a cabo la experimentación.

3.1.1 Condiciones climáticas de Bucaramanga

La ciudad de Bucaramanga se encuentra en la parte septentrional de Colombia, específicamente se ubica a $7,13^{\circ}$ latitud norte y $73,13^{\circ}$ longitud oeste, cerca al Ecuador como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Ubicación geográfica de la ciudad de Bucaramanga (Estrella).



Su clima es cálido y con altura sobre el nivel del mar cercana a los 960 msnm [32]. Tiene una temperatura ambiente promedio de 24°C y una máxima promedio de 31°C ; su precipitación anual promedio es de 1279mm. La radiación solar horizontal promedio es $4,8 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, que varía entre $2 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ y $7,6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, con un comportamiento cuasi-estable durante el año. La velocidad del viento en el campus central de la UIS se encuentran mayormente entre $1,0 \text{ m/s}$ y $1,5 \text{ m/s}$ [3].

3.1.2 Edificio de Ingeniería Eléctrica

El Edificio de Ingeniería Eléctrica, mostrado en la Figura 9, es un piloto de edificación verde de cinco niveles, con un área de 2700 m^2 distribuida en salones de clase, salas de estudio y oficinas, mayormente.

Figura 9. Edificio de Ingeniería Eléctrica.



En esta edificación se implementaron un conjunto de aplicaciones para el uso racional de la energía (URE) considerando las condiciones de clima tropical cálido, (cubierta vegetal, iluminación natural, iluminación híbrida inteligente, ventilación natural, climatización híbrida inteligente) para mitigar el impacto ambiental de su operación, a partir de la reducción de los consumos de energía eléctrica y de agua potable [3]. El techo verde mostrado en la Figura 10 fue utilizado para el desarrollo de esta investigación.

Figura 10. Techo verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



3.1.3 Edificio de Biblioteca

El Edificio de Biblioteca, mostrado en la Figura 11, cuenta con cuatro niveles y un área de 5415 m² distribuida en zonas de lectura general e individual, auditorios y oficinas, mayormente. Esta edificación se puede catalogar como de tipo tradicional debido a que no cuenta con aplicaciones URE para su operación. Por esta razón, se caracteriza por un alto consumo de energía eléctrica por la utilización de aires acondicionados e iluminación en todos sus niveles.

Figura 11. Edificio de Biblioteca.



El nivel 4 de esta edificación tiene una menor área útil centrada en su punto medio, por lo que su periferia es una terraza. Para esta investigación, se hizo uso de la zona sur de esta terraza debido a su mayor área, accesibilidad, no presencia de obstrucciones para la captación de radiación solar y al mayor aprovechamiento del movimiento solar en el hemisferio sur durante el periodo intensivo del experimento (septiembre de 2015 a marzo de 2016). La Figura 12 muestra la zona sur de la terraza.

Figura 12. Terraza descubierta en el lado sur del Edificio de Biblioteca.



3.2 CUBIERTAS VEGETALES

Para llevar a cabo la experimentación se hizo uso de tres secciones de cubierta vegetal, cuya área conjunta es de aproximadamente 120 m² y se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Cubiertas vegetales instaladas y utilizadas.

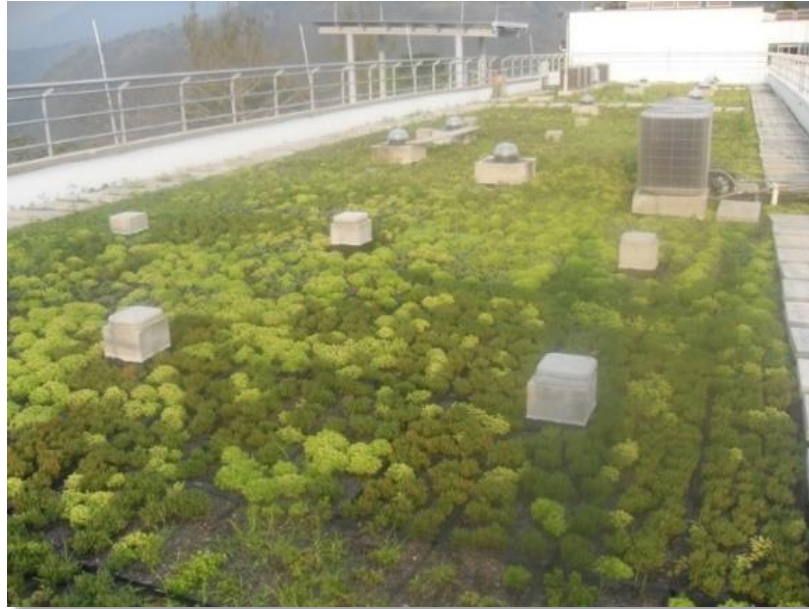
TECHO VERDE	UBICACIÓN	ÁREA (m ²)	ESPESOR (cm)		TIPO	INSTALACIÓN	VEGETACIÓN
			Vegetación	Sustrato			
1	Edificio de Ingeniería Eléctrica	30		7 cm	Fijo	Modular	<i>Sedum angelina</i>
2		50	7 cm - 10 cm	10 cm - 12 cm	Fijo	En sitio	<i>Sedum blue</i> <i>Sedum sexangulare</i>
3	Biblioteca	36		7 cm	Portable	Modular	

Las secciones 1 y 2 hacen parte del techo verde superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica de aproximadamente 440m² mostrado en la Figura 13 y que fue puesto en funcionamiento en 2012⁹. El tipo de instalación de la primera sección es modular (bandejas), y de instalación en sitio para la segunda sección.

Las tres secciones cuentan con la misma estructura de 6 capas: i) Geotextil base (1 mm), ii) Sikaplan impermeabilizante (2 mm), iii) Drenante – antiraíz (15 mm), iv) Geotextil complementario (1 mm), v) Sustrato (7 cm – 10 cm) y vi) Vegetación (10 cm). El espesor total es de aproximadamente 20 cm. El sustrato tiene un espesor de 7 cm cuando se utilice bandejas, en caso contrario es de 10 cm.

⁹ Las secciones de cubierta vegetal 1 y 2 ya contaban con 3 años de instalación al momento de la experimentación.

Figura 13. Cubierta vegetal en el nivel 6 del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



La tercera sección de techo verde se diseñó y se construyó específicamente para esta investigación en la terraza sur del Edificio de Biblioteca. Esta sección se dividió en dos módulos verdes de 18 m².

Dado que su instalación se llevó a cabo sobre un segmento de terraza de concreto con capa asfáltica, se debió construir preliminarmente un perímetro de confinamiento en bloques prefabricados de concreto puestos sobre piso de caucho para intemperie. Posteriormente, se instalaron las capas mencionadas.

La Figura 14 muestra el perímetro descrito y las capas de preliminares (geotextil base, Sikaplan, drenante, geotextil complementario).

Figura 14. Instalación de la cubierta vegetal portable en la terraza sur del Edificio de Biblioteca.



a. Ubicación y construcción perimetral.

b. Instalación de capas.

Las plantas usadas en las tres secciones de cubierta vegetal son del género *Sedum*, específicamente tres especies, *Sedum angelina*, *Sedum blue* y *Sedum sexangulare*, las cuales se muestran en la Figura 15. Este género vegetal es recomendado para techos verdes por sus hojas carnosas que almacenan agua y le permiten soportar condiciones de reducida irrigación.

Figura 15. Especies vegetales utilizadas.



El sustrato y la vegetación de las cubiertas 1 y 3 se instalaron en bandejas o módulos de germinación plásticos de 60 cm x 40 cm, los cuales son mostrados en la Figura 16.

Figura 16. Bandejas de siembra utilizadas en las cubiertas vegetales modulares.



3.3 GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Para el desarrollo de esta investigación fueron diseñados y puestos en marcha tres sistemas FV de inyección a la red eléctrica a partir de microinversores en el Campus Central de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia). La Tabla 8 lista los sistemas mencionados.

Tabla 8. Listado de sistemas FV utilizados en el experimento.

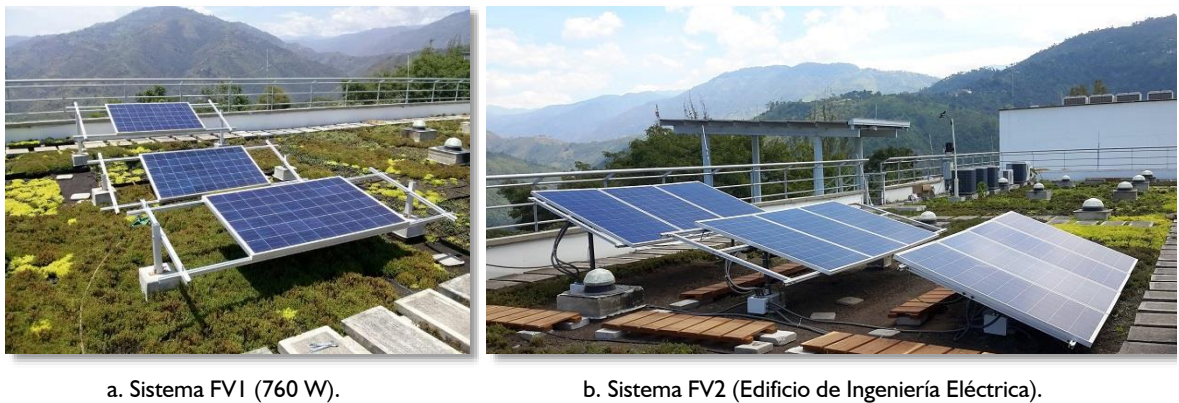
SISTEMA FV	CAPACIDAD		UBICACIÓN	EXPERIMENTO
1	3 paneles FV	760 W	Edificio de Ingeniería Eléctrica	Altura/Tipo de techo
2	10 paneles FV	2 550 W		Irrigación y velocidad del aire
3	10 paneles FV	2 540 W	Edificio de Biblioteca	Altura/Tipo de techo

Los dos primeros sistemas FV se instalaron sobre dos secciones de cubierta vegetal existente en el nivel superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica. El primer sistema FV permitió realizar una primera fase del experimento de altura y tipo de techo; mientras la experimentación sobre el efecto de la irrigación y la velocidad del aire se llevó a cabo en el segundo sistema FV.

Una segunda fase del experimento de altura y tipo de techo demandó la construcción de un tercer sistema FV sobre una terraza de una edificación tradicional. Por tal motivo, este sistema FV se instaló simultáneamente con una cubierta vegetal portátil en la terraza del Edificio de Biblioteca, la cual es de concreto recubierta con capa asfáltica de color gris (techo tradicional).

Esto permitió evaluar el comportamiento simultáneo de los paneles FV para dos tipos de techo (verde y tradicional) bajo las mismas condiciones climáticas. Los sistemas son presentados en la Figura 17.

Figura 17. Sistemas fotovoltaicos instalados.





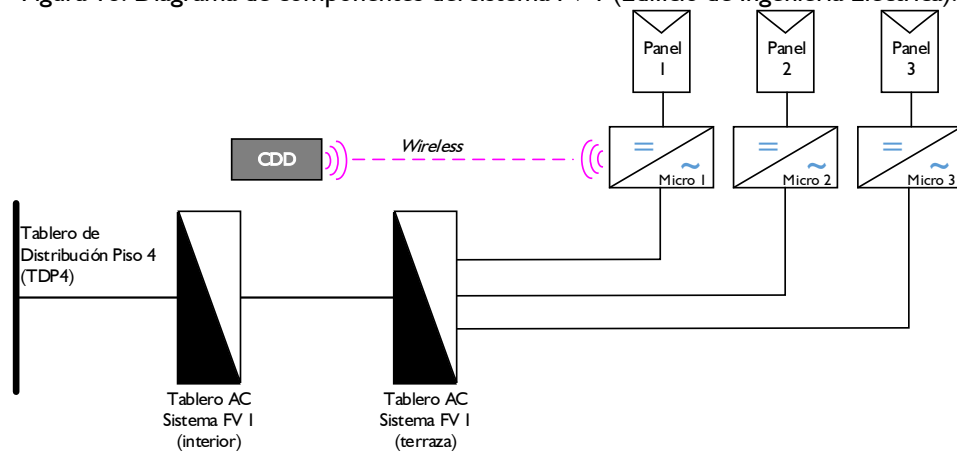
c. Sistema FV3 (Edificio de Biblioteca).

Las estructuras metálicas de montaje de los tres sistemas FV son de aluminio arquitectónico y acero inoxidable. Los parales de cada estructura se anclaron a bases de concreto.

3.3.1 Dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos

El sistema FV I utiliza tres paneles FV y tres microinversores ABB; éstos últimos son gestionados vía *Wireless* por medio de un módulo CDD (*Concentrator Data Device*). Su esquema de componentes es mostrado en la Figura 18. La inyección de energía eléctrica de este sistema se hace en el cuarto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica, a través del Tablero de Distribución del Piso 4 – TDP4. Los tres microinversores se conectaron en paralelo en su lado AC.

Figura 18. Diagrama de componentes del sistema FV I (Edificio de Ingeniería Eléctrica).



Los sistemas FV2 y FV3 utilizan cada uno diez paneles FV y diez microinversores Enphase M250; éstos últimos son gestionados por comunicación *power line* por medio de un módulo Envoy (*communication gateway*) para cada sistema. Sus esquemas de componentes son mostrados en el Sección A.1 del Anexo A.

Este anexo también presenta información sobre la inyección de energía a la red eléctrica en la Sección A.2 y de las protecciones eléctricas de los sistemas FV en la Sección A.3. En la Sección A.4 se presenta las razones de la selección de microinversores como unidades de gestión de los paneles FV en vez de inversores tipo *string*.

El uso de este tipo de sistemas FV implica que si la potencia inyectada es mayor a la demanda total del tablero donde se inyecta, entonces habrá una potencia restante que se redirigirá “aguas arribas” del punto de inyección, inclusive siendo posible su aporte a la subestación principal de la Universidad.

3.3.2 Paneles FV

Los paneles FV son componentes que pueden producir energía eléctrica a partir de la radiación solar incidente debido al efecto fotoeléctrico característico de las celdas que los conforman.

En total, se utilizaron 23 paneles FV policristalinos de dos potencias nominales, 250 W (3 unid.) y 255 W (20 unid.), de referencias UP-M250P (Upsolar) y CS6P-255 (Canadian Solar), respectivamente. Estos paneles FV tienen un área aproximada de 1,6 m² por unidad y eficiencia de conversión superior al 15%. El Anexo B (Sección B.1) muestra la información técnica de los paneles FV.

3.3.3 Microinversores

Los microinversores son dispositivos de alta eficiencia (>95%) que convierten la corriente eléctrica continua en corriente eléctrica alterna. Cada microinversor fue conectado a un sólo panel FV con el fin de garantizar la obtención de la máxima potencia posible en

cada instante, lo cual se logra a partir de un algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).

En total, se utilizaron 23 microinversores de dos modelos, ABB Micro-250 (3 unidades) y Enphase M250 (20 unidades). La información técnica de los microinversores es mostrada en el Anexo B (Sección B.1).

3.3.4 Sistemas de monitorización *Enlighten* y *Aurora Vision*

La Tabla 9 indica que cada uno de los sistemas FV tiene un módulo de comunicaciones para la operación de los microinversores, Envoy (Enphase) y CDD (ABB). A través de estos módulos se llevan a cabo tareas tales como configuración, captura datos de operación y comunicación con las interfaces *online* de tipo propietario (*Aurora Vision* y *Enlighten*).

Tabla 9. Descripción de la monitorización por microinversores para cada sistema fotovoltaico.

Sistema	Microinversores		Módulo de comunicaciones	Sistema de monitorización	Conexión eléctrica	Variables monitorizadas	Tiempo de muestreo
FV1	ABB	Micro-0,25 3 unid.	CDD	Aurora Vision	2F+GND	P_{AC}	15 minutos
FV2	Enphase	M250 10 unid.	Envoy	Enlighten	2F+N+GND	V_{DC} , I_{DC} , f_{AC} , V_{AC} , P_{AC} , E_{AC}	5 minutos
FV3		10 unid.					

Las interfaces *online* son herramientas tipo *webserver* que permiten visualizar información sobre la operación tanto de cada uno de los microinversores como del sistema integral. Son gratuitas y sólo se requirió para su puesta en operación la creación de una cuenta de usuario, de conexión a Internet vía *Ethernet* y del registro de la MAC o serial de cada módulo. El Anexo B (Sección B.2) presenta las interfaces.

3.4 MONITORIZACIÓN

Para llevar a cabo la experimentación propuesta en esta Tesis Doctoral, se diseñó un conjunto de sistemas de monitorización de variables micro-climáticas (radiación solar, tem-

peratura, velocidad del viento) y de operación del sistema FV (variables eléctricas y temperatura). Este sistema se implementó para los tres sistemas FV en las dos edificaciones. La Tabla 10 presenta los equipos de monitorización adquiridos.

Tabla 10. Listado de equipos de monitorización a ser utilizados.

EQUIPO DE MEDICIÓN		UNIDADES	OBJETO
Piranómetros (Kipp Zonen)	(2) SMP-3 (segunda clase) (1) SMP-11 (patrón secundario)	3	Radiación solar
Sensores de velocidad de aire (E+E ELEKTRONIK GES.M.B.H) (Yongse)	(2) EE576 (0m/s – 5 m/s) (2) EE671 (0m/s – 2m/s) (1) DC-12 (0m/s – 30m/s)	5	Velocidad del aire
Sensor de dirección de viento	JL-FSX2	1	Dirección de viento
Termocuplas K (OMEGA)	Termocupla tipo K 5TC-TT-KI-36-2M	20	Temperatura
Sensor de temperatura RTD	RTD PT100	6	
Cámara termográfica	Fluke Ti400	1	
Medidor de energía DC	AcuDC243	6	Variables eléctricas DC y AC
Medidor de energía AC	AcuREV2020 (9x1 ϕ /3x3 ϕ)	2	
Medidor de energía AC	AcuVim IIR (3 ϕ)	2	
Módulo para microinversores Enphase	Envoy (variables AC y DC)	1	
Módulo para microinversores ABB	CDD (energía AC)	1	
Datalogger OMEGA OM-CP-OC-TTEMP2000	Datalogger especializado de 8 canales para termocuplas y tipo <i>stand-alone</i> (con batería incluida).	1	Almacenamiento de datos
Dataloggers PACE XR5-SE-20mV	Datalogger de 8 canales multifuncional y tipo <i>stand-alone</i> (con batería incluida).	3	
CAMPBELL CR800X	Datalogger de 6 canales multifuncional y tipo <i>stand-alone</i> (con batería incluida).	2	

Tal como se mencionó en el Capítulo 2, la monitorización de variables eléctricas es un aspecto importante a considerar. Por lo cual, se seleccionaron y adquirieron un conjunto de medidores de energía de corriente continua y corriente alterna, y se ubicaron en los gabinetes eléctricos exteriores de los sistemas FV, junto a las protecciones de sobrecorriente y medios de desconexión.

En cada edificación es posible monitorizar de forma simultánea tres paneles FV y tres microinversores. Considerando esto, se adecuó la instalación eléctrica para facilitar la conexión de los medidores a cualquier panel FV y microinversor.

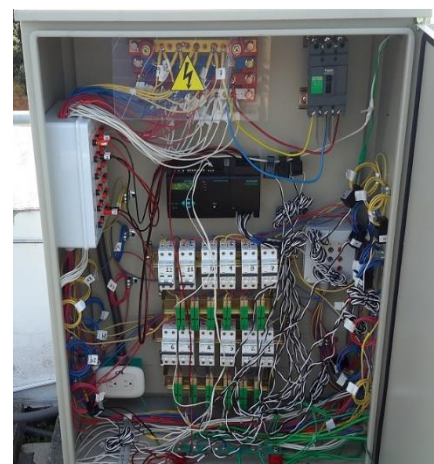
La selección de medidores se realizó considerando los siguientes criterios, clase 0,5 o mejor, almacenamiento de datos, software incluido y de fácil configuración. El segundo criterio se incluyó debido a que la oferta general de medidores de energía requiere de conexión *Ethernet* y de software especializado para la adquisición de los datos. Tal condición técnica hubiese implicado un sobrecosto al proyecto, un equipo de cómputo dedicado y la ubicación fija de los medidores.

Como resultado del proceso, se seleccionaron tres modelos de medidores Accuenergy, 6 unidades del medidor de energía DC AcuDC243 (clase 0,5 en potencia y con 4MB de memoria), 2 unidades del medidor AC Acuvim IIR (clase 0,2 en potencia y con 8MB de memoria), y 2 unidades del medidor AC AcuRev 2020 (clase 0,5 en potencia y con 8MB de memoria). El medidor AC Acuvim IIR puede ser configurado para diversos tipos de cargas eléctricas (1ϕ , 2ϕ y 3ϕ); y el medidor AcuRev 2020 puede monitorizar hasta tres circuitos trifásicos o 9 circuitos monofásicos. La Figura 19 muestra la ubicación de los medidores DC y AC en los tableros eléctricos exteriores. El Anexo C muestra los esquemas de conexión de los medidores de energía AC y DC de los tres sistemas FV.

Figura 19. Tableros eléctricos de los sistemas FV 2 y 3.



a. Tablero DC (AcuDC 243 y protecciones eléctricas).



b. Tablero AC (AcuRev 2020 y protecciones eléctricas).

Adicionalmente, se cuenta con la información suministrada por las interfaces *online Enlighten* y *Aurora Vision* asociadas a los microinversores Enphase y ABB, respectivamente. Sin

embargo, se recuerda que los datos suministrados por estos equipos, tienen una incertidumbre de $\pm 5\%$.

Con respecto a la monitorización de variables climáticas y de temperatura de los paneles FV, la Tabla 11 y las figuras 20 y 21 muestran la ubicación de sensores instalados en cada sistema FV, tales como: Piranómetros, sensores de velocidad de viento, sensor de dirección de viento y termocuplas. Los piranómetros se ubicaron en el mismo plano de trabajo de los paneles FV, a 10° de inclinación orientación sur. Los sensores de velocidad $SV1_2$, $SV2_2$, $SV1_3$ y $SV2_3$ midieron la velocidad del aire sobre los paneles FV; mientras el $SV3_3$ midió la velocidad y dirección del aire debajo de los paneles FV del sistema FV3.

Tabla 11. Identificación y ubicación de sensores de variables ambientales.

SENSOR		UBICACIÓN	SENSOR		UBICACIÓN
$T1_1$ - $T6_1$	Termocuplas	Sistema FV1	$T1_3$ - $T12_3$	Termocuplas	Sistema FV3
$Pi1_1$ y $Pi2_1$	Piranómetros		$SV1_3$ y $SV2_3$	Sensor de velocidad de viento	
$T1_2$ - $T12_2$	Termocuplas	$SV3_3$	Sensor de velocidad y dirección del viento		
$SV1_2$ y $SV2_2$	Sensor de velocidad de viento	$Pi1_3$ y $Pi2_3$	Piranómetros		
$Pi1_2$	Piranómetro	$TT1_3$ - $TT3_3$	Torre de termocuplas		
$TT1_2$	Torre de termocuplas				

Figura 20. Diagrama de sensores para la monitorización de variables ambientales de los sistemas FV1 y FV2.

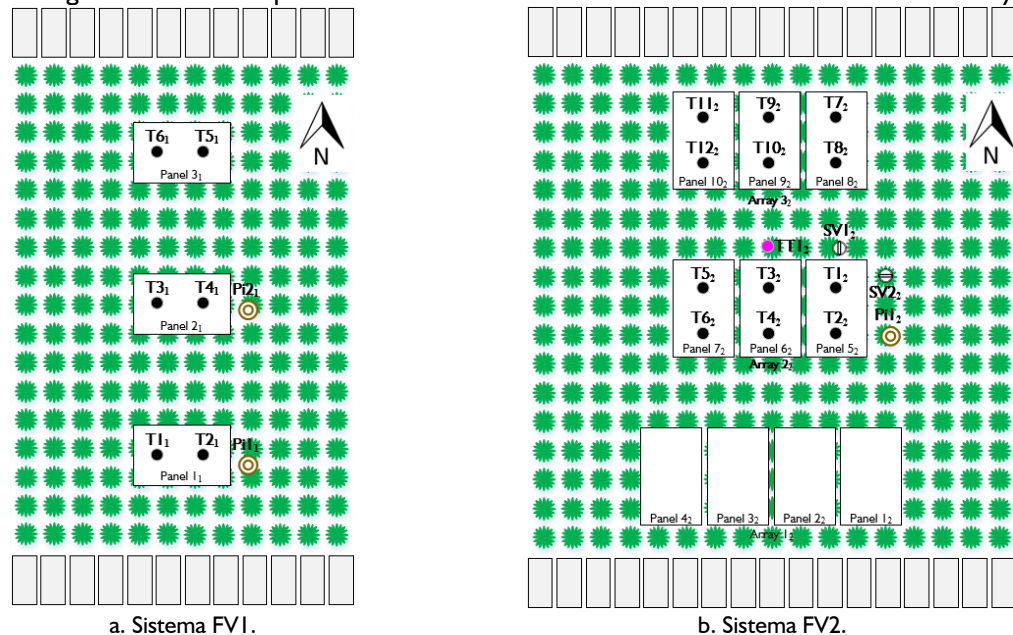
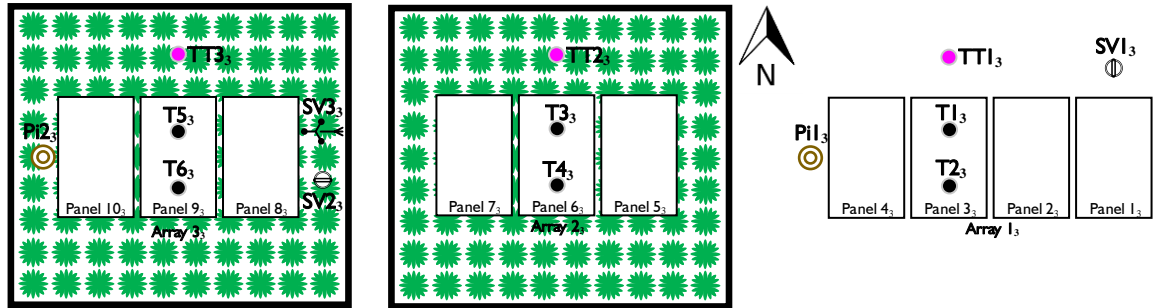


Figura 21. Diagrama de sensores para la monitorización de variables ambientales del sistema FV3.



Las termocuplas TI_1 - $T6_1$, TI_2 - $TI2_2$ y TI_3 - $TI2_3$ midieron la temperatura de la superficie posterior de los paneles FV, siendo ubicadas para ello a $\frac{1}{4}$ y a $\frac{3}{4}$ de la altura del panel FV (1,6m) medidos desde la parte inferior de éste. Por otro lado, las torres de termocuplas TTI_2 TTI_3 - $TT3_3$ midieron la temperatura del aire a diferentes alturas respecto del techo, mayormente 25 cm, 50 cm y 100 cm.

Adicionalmente, se utilizó una cámara termográfica Ti400 Fluke para medir simultáneamente la temperatura de los componentes de los sistemas FV para diversas condiciones de experimentación y momentos del día. Asimismo, se usaron módulos con RTD para medir la temperatura del agua de las cavas del experimento de irrigación.

3.5 EXPERIMENTOS DISEÑADOS E IMPLEMENTADOS

Se diseñaron e implementaron tres experimentos para estudiar la influencia de cuatro factores (altura de instalación, tipo de techo, irrigación y velocidad del viento) sobre el desempeño de paneles FV instalados en las terrazas de edificaciones localizadas en un entorno con clima tropical cálido. Tales experimentos se describen a continuación.

3.5.1 Experimento I: Variación de la altura y el tipo de techo

El primer experimento analiza el efecto simultáneo de dos factores, altura de instalación (distancia promedio entre un panel FV y el techo) y tipo de techo, y se desarrolló en los sistemas FV1 y FV3. Inicialmente, se llevaron a cabo los tratamientos presentados en la Tabla

12, para lo cual se consideraron tres tipos de altura: 25 cm, 50 cm y 75 cm. La Figura 22 muestra el potencial de variación de altura de los paneles FV del sistema FV1.

Tabla 12. Listado de tratamientos del experimento I – Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Tratamiento	Panel A		Panel B	
	Techo	Altura prom.	Techo	Altura prom.
I	Verde	75 cm	Verde	75 cm
II	Verde	75 cm	Verde	50 cm
III	Verde	75 cm	Verde	25 cm
IV	Verde	25 cm	Verde	50 cm

Figura 22. Variación de la altura de instalación (Edificio de Ingeniería Eléctrica).



Posteriormente, se desarrolló el experimento en una terraza tradicional (Edificio de Biblioteca), con el fin de garantizar el estudio de dos tipos de techo: Verde y gris, en condiciones reales, y también controlar la velocidad del viento. Se consideraron hasta 5 alturas de montaje: 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm y 125 cm.

Los tratamientos analizados se presentan en la Tabla 13. La Figura 23 muestra dos casos de variación de altura realizados. La monitorización se focalizó en un panel FV de cada uno de las tres configuraciones, específicamente en los paneles FV 3, 6 y 9. Los tratamientos 6 a 9 sólo emplearon dos paneles FV debido a que el panel FV 9 se empleó en otro experimento.

Tabla 13. Listado de tratamientos del experimento I – Edificio de Biblioteca.

Tratamiento	Panel 3 (Array #1)		Panel 6 (Array #2)		Panel 9 (Array #3)	
	Techo	Altura prom.	Techo	Altura prom.	Techo	Altura prom.
1	Gris	100 cm	Verde	100 cm	Verde	100 cm
2	Gris	75 cm	Verde	100 cm	Verde	125 cm
3	Gris	75 cm	Verde	100 cm	Verde	75 cm
4	Gris	75 cm	Verde	100 cm	Verde	50 cm
5	Gris	50 cm	Verde	50 cm	Verde	50 cm
6	Gris	50 cm	Verde	50 cm	-	-
7	Gris	50 cm	Verde	50 cm	-	-
8	Gris	25 cm	Verde	25 cm	-	-
9	Gris	75 cm	Verde	75 cm	-	-

Figura 23. Variación de la altura de instalación (Edificio de Biblioteca).



a. Altura promedio = 75cm



a. Altura promedio = 25cm

3.5.2 Experimento II: Variación del flujo y el tipo irrigación

Por medio del segundo experimento se analizó el efecto de la irrigación, considerando variaciones de flujo y de tipo de irrigación, y se desarrolló en la configuración #2 del sistema FV2 conformada por los paneles FV 6, 7 y 8.

Se analizaron los doce regímenes de operación (A a L) mostrados en la Tabla 14, a partir de los casos descritos en la Tabla 15. Se consideraron dos tipos de irrigación: Película y chorros; el primer tipo garantiza que el panel FV es cubierto por agua en su totalidad, mientras el segundo consiste en flujos de agua paralelos separados cada 10 cm o 20 cm en la parte superior del panel FV. La variación del régimen de operación tiene como propósito evidenciar los transitorios de enfriamiento y calentamiento de los paneles FV.

Tabla 14. Regímenes de irrigación.

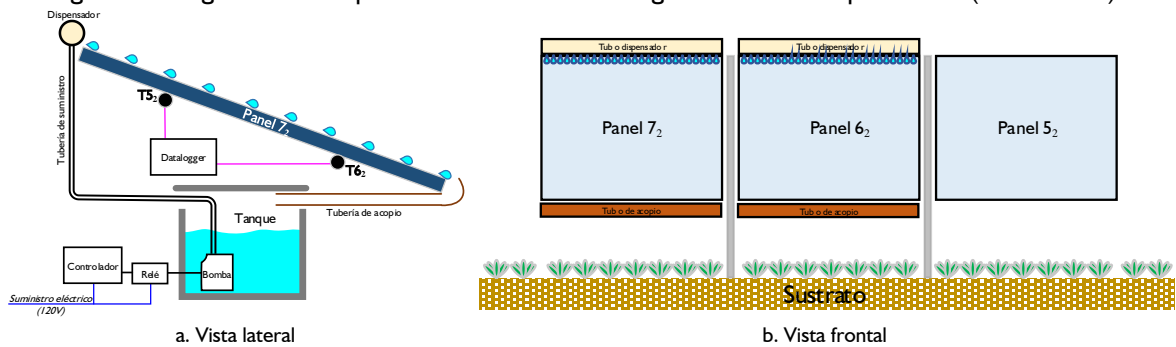
Régimen	$t_a: t_b$	Tipo	Caudal	Régimen	$t_a: t_b$	Tipo	Caudal
A	15':15'	Película	9,5 lts	G	Perm.	Película	4,75 lts
B	1':29'	Película	9,5 lts	H	15':15'	Película	4,75 lts
C	Perm.	Película	9,5 lts	I	15':15'	Flujos 10cm	3,75 lts
D	5':25'	Película	9,5 lts	J	1':29'	Flujos 10cm	3,75 lts
E	5':25'	Película	4,75 lts	K	1':29'	Flujos 20cm	1,75 lts
F	1':29'	Película	4,75 lts	L	15':15'	Flujos 20cm	1,75 lts

Tabla 15. Listado de tratamientos del experimento II.

Caso	Panel 5	Panel 6			Panel 7				
		$t_a: t_b$	Tipo	Caudal	Régimen	$t_a: t_b$	Tipo	Caudal	Régimen
I	Sin irrig.	15':15'	Película	9,5 lts	A	1':29'	Película	9,5 lts	B
II	Sin irrig.	15':15'	Flujos 10cm	3,75 lts	I	15':15'	Película	9,5 lts	A
III	Sin irrig.	15':15'	Flujos 10cm	3,75 lts	I	15':15'	Flujos 20cm	1,75 lts	L
IV	Sin irrig.	1':29'	Flujos 10cm	3,75 lts	J	1':29'	Flujos 20cm	1,75 lts	K
V	Sin irrig.	1':29'	Película	4,75 lts	F	15':15'	Película	4,75 lts	H
VI	Sin irrig.	1':29'	Flujos 10cm	3,75 lts	J	1':29'	Película	9,5 lts	B
VII	Sin irrig.	Perm.	Película	4,75 lts	G	Perm.	Película	9,5 lts	C
VIII	Sin irrig.	5':25'	Película	4,75 lts	E	Perm.	Película	9,5 lts	C
IX	Sin irrig.	1':29'	Película	4,75 lts	F	Perm.	Película	9,5 lts	C
X	Sin irrig.	1':29'	Película	9,5 lts	B	Perm.	Película	9,5 lts	C
XI	Sin irrig.	5':25'	Película	9,5 lts	D	Perm.	Película	9,5 lts	C

La Figura 24 muestra el diagrama del sistema irrigación diseñado e implementado en la configuración #2 del sistema FV2, el cual consta de los siguientes componentes: Tanque, bomba sumergible, tubería de suministro, tubería de acopio, dispensador, relé y controlador.

Figura 24. Diagrama de componentes del sistema de irrigación forzada de paneles FV (sistema FV2).



Se seleccionó un tipo de cava de poliestireno expandido de 40 litros de capacidad como tanque de acopio con el fin de evitar el calentamiento de la misma debido a la radiación solar. Se utilizaron bombas sumergibles de 22 W para garantizar todos los caudales de riego analizados (1,75 lts, 3,75 lts, 4,75 lts y 9,5 lts). Se utilizó tubería PVC de 1/2" para el suministro de agua y de 3" para la captación. El control horario de accionamiento de las bombas se realizó a partir de dos relés y un módulo Arduino. El panel FV 5 operó sin irrigación y se tomó como referencia para analizar los efectos de los dos casos de irrigación en los paneles FV 6 y 7. La Figura 25 muestra el sistema de irrigación implementado.

Figura 25. Montaje del sistema de irrigación en la configuración #2 (Edificio de Ingeniería Eléctrica).



a. Vista posterior.

b. Vista frontal

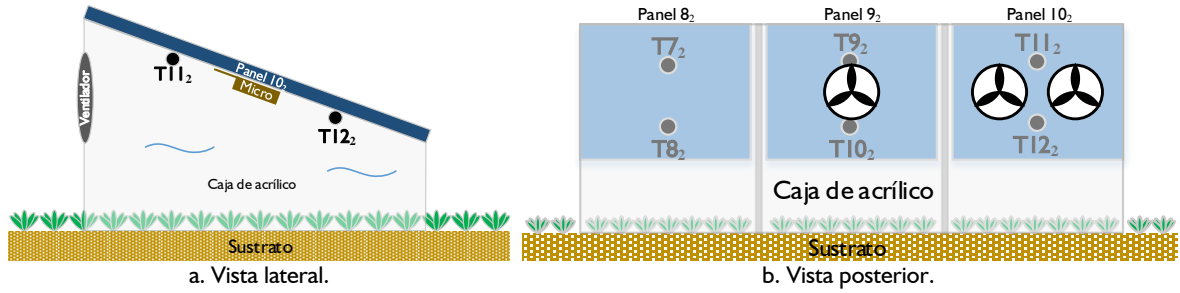
3.5.3 Experimento III: Variación de la velocidad del aire

El tercer experimento analiza el efecto de la velocidad del viento en la temperatura de operación del panel FV, y su vez en la potencia generada. Se consideraron tres casos de velocidad del aire: 0 m/s, 1 m/s y 2 m/s.

La Figura 26 muestra el diagrama del sistema de ventilación forzada diseñado e implementado en la configuración #3 del sistema FV2 conformada por los paneles FV 8, 9 y 10, el cual consta de tres cajas de acrílico y tres ventiladores eléctricos.

Las cajas de acrílico se ubicaron en la parte inferior de los tres paneles FV (8, 9 y 10). La caja del panel 8 no permitió el paso de viento (caso 0 m/s), mientras las cajas de los paneles 9 (caso 1, 15 m/s) y 10 (caso 2, 10 m/s) tenían una y dos aberturas respectivamente, para la instalación de tres ventiladores. Se seleccionó un ventilador de piso Bonaire BPF1696 con tres velocidades y temporizador para el apagado.

Figura 26. Diagrama de componentes del sistema de ventilación forzada (sistema FV2).



El panel FV 8 se empleó como referencia para analizar los efectos de los dos casos de ventilación forzada en los paneles FV 9 y 10. La Figura 27 muestra el sistema de ventilación forzada implementado.

Figura 27. Estructura de acrílico para la variación de la velocidad del aire.



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta el análisis de resultados de la experimentación conducida para estudiar el efecto de un conjunto de factores sobre el desempeño de los paneles FV instalados en terrazas de edificaciones localizadas en un entorno tropical cálido. La totalidad de la experimentación se llevó a cabo entre junio de 2015 y abril de 2016.

En total, se llevaron a cabo tres experimentos para abordar la influencia de la altura de instalación y tipo de techo (Sección 4.1), la ventilación (Sección 4.2) y la irrigación (Sección 4.3).

El tipo de techo fue objeto de estudio ya que influye en la temperatura del aire circundante sobre éste y en la transferencia de calor por radiación con objetos cercanos, lo cual puede afectar la temperatura de operación de un panel FV, y a su vez la potencia eléctrica generada por éste.

Por otro lado, la irrigación y la ventilación son estrategias documentadas de enfriamiento de paneles FV, ya que pueden remover calor del panel FV a través del proceso de transferencia de calor por convección; tal remoción de calor reduce la temperatura de operación y por consiguiente aumenta la potencia eléctrica generada. Se aclara que el agua utilizada en la irrigación no implicó un desperdicio de la misma, ya que su uso fue de doble propósito, puesto que posteriormente se utiliza para el riego de la vegetación.

Debido a la variedad de aspectos para caracterizar el efecto de la irrigación, la Sección 4.3 es más extensa que las secciones 4.1 y 4.2. Adicionalmente, se incluye la Sección 4.4 con hallazgos complementarios derivados de la experimentación.

Por otro lado, se indica que la investigación se desarrolló con paneles FV que no evidenciaron diferencias en sus características técnicas y que para la experimentación y el modelado se consideraron paneles FV operando en condiciones idóneas de radiación solar incidente (no sombreado).

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ALTURA DE INSTALACIÓN Y TIPO DE TECHO

Este experimento tiene como propósito caracterizar la influencia de la altura de instalación y el tipo de techo en el desempeño de un panel FV. Inicialmente, se estudia el comportamiento de la temperatura del aire para diferentes alturas (25 cm, 50 cm y 100 cm) sobre techo verde (vegetación) y techo de concreto. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos de los casos de experimentación indicados en la Tabla 13.

4.1.1 Comportamiento de la temperatura del aire según variación de la altura con respecto al techo

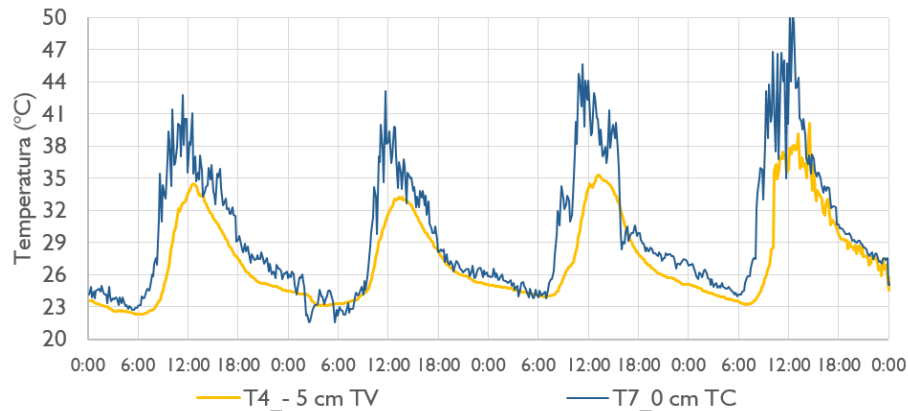
Se llevó a cabo la monitorización de la temperatura del aire sobre techo verde y techo de concreto sin sombreado por medio de ocho sensores de temperatura, distribuidos de la siguiente forma: tres sensores a 25 cm, 50 cm y 100 cm con respecto al techo de concreto, un sensor en contacto con la superficie del techo de concreto, tres sensores a 25 cm, 50 cm y 100 cm con respecto al techo de verde, y un sensor a 5 cm de profundidad en el sustrato del techo verde. La Tabla 16 lista los ocho sensores de temperatura utilizados.

Tabla 16. Identificación de las etiquetas de las curvas de temperatura monitorizadas.

Sensor	Etiqueta	Descripción
T1	T1_50 cm TV	Temperatura del aire a 50 cm de altura del techo verde
T2	T2_25 cm TV	Temperatura del aire a 25 cm de altura del techo verde
T3	T3_100 cm TV	Temperatura del aire a 100 cm de altura del techo verde
T4	T4_- 5 cm TV	Temperatura del sustrato a una profundidad de 5 centímetros
T5	T5_25 cm TC	Temperatura del aire a 25 cm de altura del techo de concreto
T6	T6_50 cm TC	Temperatura del aire a 50 cm de altura del techo de concreto
T7	T7_0 cm TC	Temperatura del aire a 0 cm de altura del techo de concreto
T8	T8_100 cm TC	Temperatura del aire a 100 cm de altura del techo de concreto

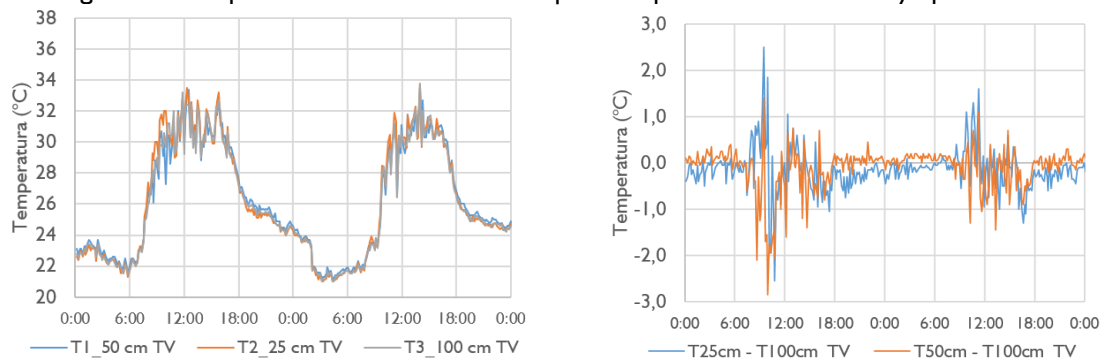
Se observa en la Figura 28 las temperaturas de la superficie superior del techo de concreto ($T7_0\text{ cm TC}$) y del sustrato del techo verde ($T4_ - 5\text{ cm TV}$). La temperatura máxima del concreto oscila entre 44°C y 50°C , mientras que para el techo verde varía entre 33°C y 36°C . La diferencia de temperatura cerca al mediodía ilustra la reducción de la transferencia de calor por conducción que brinda el techo verde a la edificación.

Figura 28. Temperaturas del techo verde y de la superficie del techo de concreto.

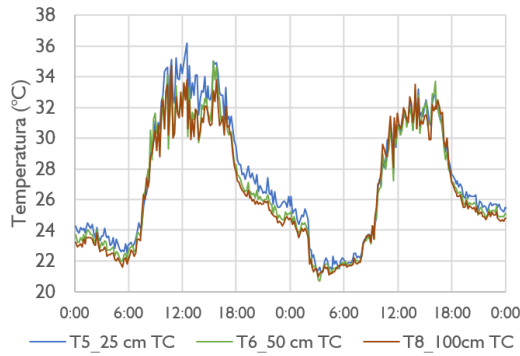


La Figura 29 muestra el comportamiento de las curvas de temperatura de los puntos monitorizados. La Figura 29.a muestra gran similitud de las temperaturas del aire sobre el techo verde para las tres alturas analizadas (25 cm, 50 cm y 100 cm); la Figura 29.b indica que la variación de temperatura de los puntos a 25 cm y 50 cm con respecto al punto de 100 cm es típicamente menor a 1°C . Esto difiere de lo sucedido para el caso del techo de concreto, tal como muestran las figuras 29.c y 29.d. Específicamente, revelan como la temperatura a 25 cm de altura fue generalmente mayor a la temperatura a 100 cm, entre 1°C y 2°C .

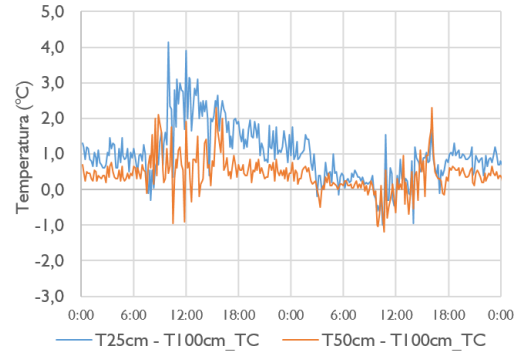
Figura 29. Comportamiento de las curvas temperatura para diferentes alturas y tipo de techo.



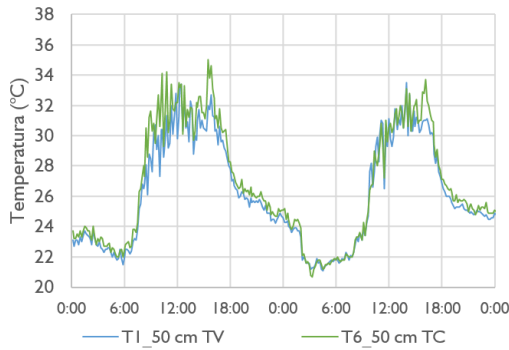
a. Curvas de temperatura a diferentes alturas sobre el techo verde. b. Diferencias de temperatura a 25 cm y 50 cm con respecto a 100 cm. Caso: techo verde.



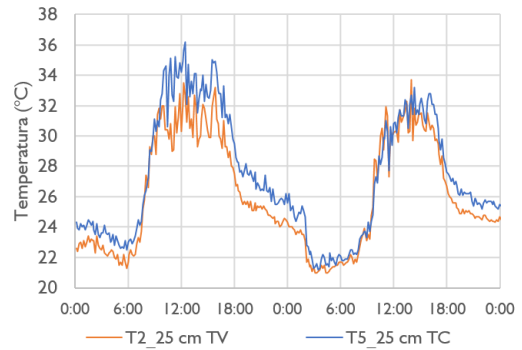
c. Curvas de temperatura a diferentes alturas sobre el techo de concreto.



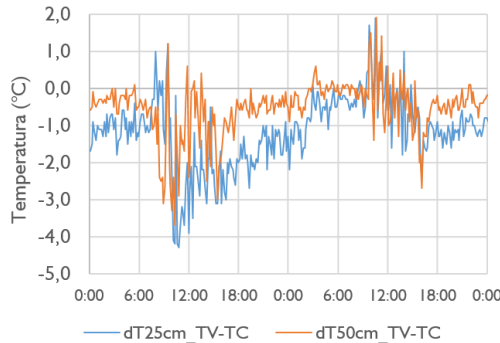
d. Diferencias de temperatura a 25 cm y 50 cm con respecto a 100 cm. Caso: techo de concreto.



e. Curvas de temperatura a 50 cm de altura sobre los techos.



f. Curvas de temperatura a 25 cm de altura sobre los techos.



g. Diferencia entre las curvas de temperatura a 25 cm y 50 cm para ambos techos.

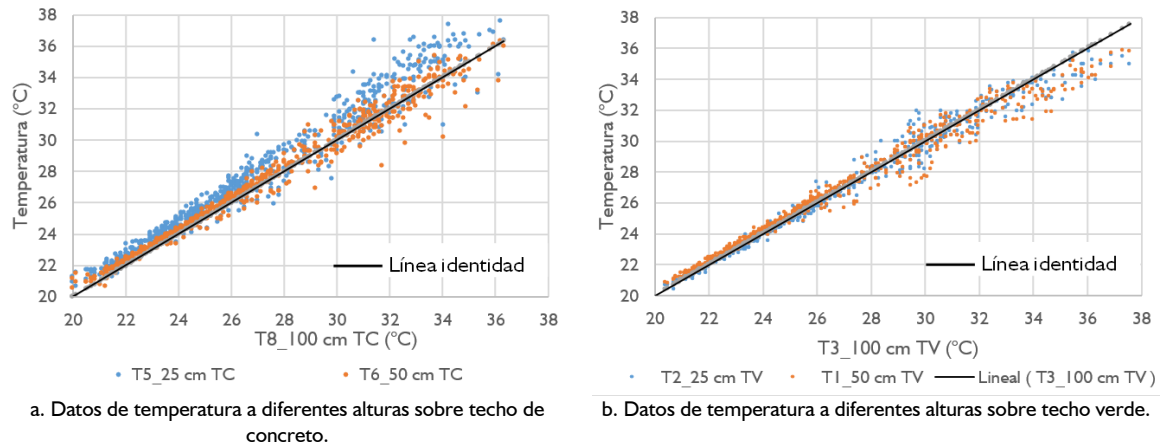
Tabla 17. Valores promedio, máximo y mínimo de las diferencias de temperatura analizadas.

	$T_{25cm} - T_{100cm}$ Techo de concreto	$T_{50cm} - T_{100cm}$ Techo de concreto	$T_{25cm} - T_{100cm}$ Techo verde	$T_{50cm} - T_{100cm}$ Techo verde	T_{25cm} techo verde - T_{25cm} techo de con- creto	T_{50cm} techo verde - T_{50cm} techo de con- creto
PROM.	1,1	0,3	-0,2	-0,4	-1,3	-0,7
MÁX.	4,4	2,3	2,5	1,4	1,9	2,5
MÍN.	-2,2	-2,1	-2,6	-2,9	-4,3	-3,7

Con el fin de apreciar si existe relación entre la temperatura del aire a 100 cm y los valores de la temperatura a 25 cm y 50 cm para ambos tipos de techo, se analizaron los gráficos de dispersión de los datos mostrados en la Figura 30. Inicialmente, se trazan las líneas identidad

de las curvas de temperaturas del aire a 100 cm para ambos techos, identificadas como $T8_{100cm TC}$ y $T3_{100cm TV}$. Ello crea dos zonas en las figuras 30.a y 30.b., arriba y debajo de las líneas identidad. Si un punto está arriba de la línea identidad significa que la temperatura del aire es mayor para esa altura específica, y es menor si está por debajo de la línea identidad.

Figura 30. Gráficos de dispersión de datos de temperatura.



Para el caso del techo de concreto, se aprecia que mayormente una menor altura producirá una mayor temperatura del aire, lo cual es válido para todo el rango de temperaturas medidas (20°C a 40°C) de $T8_{100cm TC}$.

Con respecto al caso de techo verde, se identifican dos rangos en el gráfico de dispersión según el valor de la temperatura $T3_{100cm TV}$. El primer rango corresponde a valores entre 20°C y 31°C , y se caracteriza en que el valor de la altura de instalación no ocasiona variaciones en la temperatura del aire sobre el techo verde. Por otro lado, se observa que existe una leve disminución de la temperatura del aire para las alturas de 25 cm y 50 cm cuando la temperatura del aire a un metro de altura supera los 31°C .

La variación de temperatura del aire antes descrita revela que un panel FV instalado sobre una terraza de una edificación opera con una temperatura de aire circundante influenciada por el tipo de techo.

Según lo observado en los resultados, este efecto es despreciable para alturas de un metro o más. Si el panel FV es instalado a menos de 50 cm del techo podrá experimentar de manera

leve una mayor temperatura del aire cuando sea instalado sobre un techo de concreto, y no experimenta variación alguna cuando sea instalado sobre techo verde. Lo anterior podría explicar en parte las variaciones del desempeño del panel FV para diferentes alturas que se presentan en el numeral 5.1.2.

4.1.2 Efecto de la altura de instalación y tipo de techo en la generación FV

La caracterización del efecto de la altura de instalación y tipo de techo se llevó a cabo de acuerdo al experimento descrito en el numeral 4.5.1. Se recuerda que los tratamientos 6 a 11 sólo emplearon dos paneles FV debido a que el panel FV C se asignó a otro experimento.

Inicialmente, se determinó la energía generada diaria promedio por panel FV para cada experimento; posteriormente, se estableció el valor del Factor de Ponderación de la Generación – FPG para cada panel FV en cada tratamiento. El valor de FPG indica el valor relativo de la energía promedio diaria generada por un panel FV con respecto a otro panel FV de referencia. En este caso, el panel FV de referencia es panel FV A.

La Tabla 18 muestra los resultados obtenidos para cada tratamiento. Por ejemplo, se observa que en el tratamiento 7 el panel FV B, instalado a 50 cm sobre techo verde genera 1,5% más que el panel FV A, instalado a la misma altura sobre techo de concreto.

Tabla 18. Valores de FPG para el experimento realizado.

Trat.	Panel FV A			Panel FV B			Panel FV C		
	Techo	Altura prom.	FPG	Techo	Altura prom.	FPG	Techo	Altura prom.	FPG
1	Gris	100 cm	100,0 %	Verde	100 cm	100,4 %	Verde	100 cm	99,8 %
2	Gris	75 cm	100,0 %	Verde	100 cm	101,1 %	Verde	125 cm	100,6 %
3	Gris	75 cm	100,0 %	Verde	100 cm	101,2 %	Verde	75 cm	99,5 %
4	Gris	75 cm	100,0 %	Verde	100 cm	101,4 %	Verde	50 cm	101,3 %
5	Gris	50 cm	100,0 %	Verde	50 cm	100,8 %	Verde	50 cm	100,6 %
6	Gris	50 cm	100,0 %	Verde	50 cm	101,1 %	-	-	-
7	Gris	50 cm	100,0 %	Verde	50 cm	101,5 %	-	-	-
8	Gris	25 cm	100,0 %	Verde	25 cm	99,4 %	-	-	-
9	Gris	75 cm	100,0 %	Verde	75 cm	102,2 %	-	-	-
10	Verde	25 cm	100,0 %	Verde	75 cm	101,6 %	-	-	-
11	Verde	50 cm	100,0 %	Verde	75 cm	99,9 %	-	-	-

Con base en los valores FPG de cada panel FV, se efectuó un proceso de normalización de los resultados, con el fin de integrar todos los datos obtenidos según una misma referencia. Este procedimiento consistió en cinco pasos. Primero, se seleccionó un valor de FPG de normalización; en este caso el valor seleccionado fue el FPG del panel FV B para una altura de 100 cm del experimento 1, el cual se divide en sí mismo por lo que toma un valor de 100%. Este valor se seleccionó ya que se repite en los primeros cuatro experimentos.

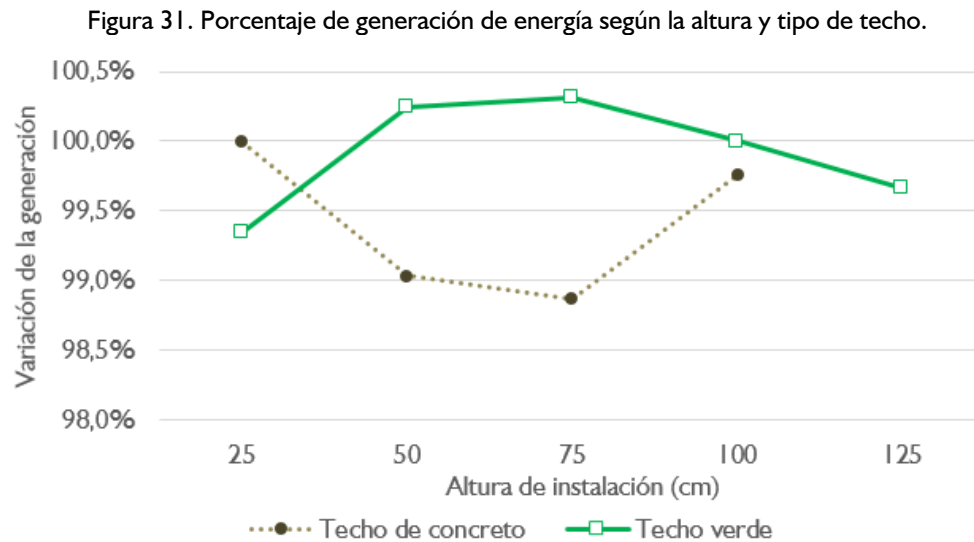
El segundo paso consistió en reemplazar los valores de FPG del panel FV B en los tratamientos 2, 3 y 4 por 100%, dado que relacionan el panel FV B para las mismas condiciones de experimentación de techo y altura del caso de normalización.

El tercer paso trató sobre la normalización de los valores FPG de los paneles FV A y C para los primeros cuatro tratamientos con respecto al valor FPG normalizado del panel FV B. En el cuarto paso se identificaron condiciones de operación coincidentes de los paneles FV de los tratamientos 5 a 11 con respecto a los tratamientos 1 a 4, con el fin de aplicar el proceso de normalización de forma indirecta. Como es el caso del valor FPG del panel FV C del experimento 5 que es reemplazado por el valor FGP normalizado de ese panel FV del experimento 4. Este nuevo valor de FPG del panel C permitió normalizar los valores FPG de los paneles A y B para ese experimento 5. Este paso se aplicó hasta que los tratamientos restantes fueron normalizados. Como resultado se obtuvo la Tabla 19.

Tabla 19. Valores de FPG normalizado.

Trat.	Panel FV A			Panel FV B			Panel FV C		
	Techo	Altura prom.	FPG	Techo	Altura prom.	FPG	Techo	Altura prom.	FPG
1	Gris	100 cm	99,64 %	Verde	100 cm	100,00 %	Verde	100 cm	99,41 %
2	Gris	75 cm	98,96 %	Verde	100 cm	100,00 %	Verde	125 cm	99,54 %
3	Gris	75 cm	98,81 %	Verde	100 cm	100,00 %	Verde	75 cm	98,36 %
4	Gris	75 cm	98,62 %	Verde	100 cm	100,00 %	Verde	50 cm	99,87 %
5	Gris	50 cm	99,28 %	Verde	50 cm	100,02 %	Verde	50 cm	99,87 %
6	Gris	50 cm	98,91 %	Verde	50 cm	100,02 %	-	-	-
7	Gris	50 cm	98,57 %	Verde	50 cm	100,02 %	-	-	-
8	Gris	25 cm	99,88 %	Verde	25 cm	99,23 %	-	-	-
9	Gris	75 cm	98,62 %	Verde	75 cm	100,81 %	-	-	-
10	Verde	25 cm	99,23 %	Verde	75 cm	100,81 %	-	-	-
11	Verde	50 cm	100,94 %	Verde	75 cm	100,81 %	-	-	-

Finalmente, el quinto paso consistió en promediar los valores FGP para las mismas condiciones de techo y altura, lo cual permitió construir la Figura 31 que describe el valor FPG de un panel FV con respecto a otro panel FV instalado a 1 m de altura sobre techo verde.



Como primer hallazgo se observa que en general las variaciones del FPG respecto de la altura son muy discretas, especialmente para el caso de un panel FV instalado sobre techo verde, ya que la generación puede ser incrementada en no más de 0,25% cuando la altura de instalación se reduce de 100 cm a 50 cm o 75 cm. Tal resultado está en consonancia con los hallazgos descritos en el numeral 5.1.1, respecto de la muy leve variación de la temperatura del aire para diferentes alturas sobre un techo verde.

En cuanto al caso del techo de concreto, se determinó que el valor de FPG indica que bajar la altura de instalación de 100 cm a 50 cm puede reducir la generación de energía en cerca de 1%. Esto se explica en parte por el leve aumento de la temperatura del aire a una menor altura de instalación.

Por otro lado, se aprecia un comportamiento singular del valor de FPG para dos techos cuando la altura de instalación es de 25 cm. Un panel FV tan cerca al techo se ve afectado por las obstrucciones menores existentes en la terraza, las cuales reducirían la radiación solar difusa, y por ende, la generación de energía, yendo en contra de la tendencia de valor de

FPG de 100 cm a 50 cm. Sin embargo, tal situación no parece afectar negativamente el valor de FPG del panel FV instalado sobre techo de concreto, el cual incluso describe un incremento. Esto se debe al recubrimiento reflectivo de la terraza, el cual aumenta levemente la radiación solar incidente sobre el panel FV (<2%) y que es suficiente para compensar la leve pérdida de generación por mayor temperatura del aire circundante a esa altura de instalación.

Por último, y de acuerdo a lo mostrado en la Figura 31 y lo expuesto en el numeral 5.1.1, se establece que el mejor escenario de instalación de un panel FV será a una altura de 50 cm sobre un techo verde.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

La caracterización de este factor se basa en la ejecución de un experimento con tres paneles FV del sistema FV2, denominados P8, P9 y P10, tal como se describe en el numeral 4.5.3., a los cuales se le aplicaron diferentes velocidades del viento en la superficie posterior, 0 m/s, 1,15 m/s y 2,1 m/s.

Se encontró que el aumento de energía diario promedio está oscila entre el 2% y el 3% para las dos velocidades de viento analizadas. Estos porcentajes equivalen a alrededor de 20 Wh y 30 Wh con respecto a un panel FV de 255 W que genera por día cerca de 1 kWh.

Con el fin de mostrar en detalle el efecto de la velocidad del viento en el comportamiento de un panel FV, se muestran a continuación los resultados del experimento para un día típico en el cual se dio ventilación forzada de 9 a.m. a 5 p.m.

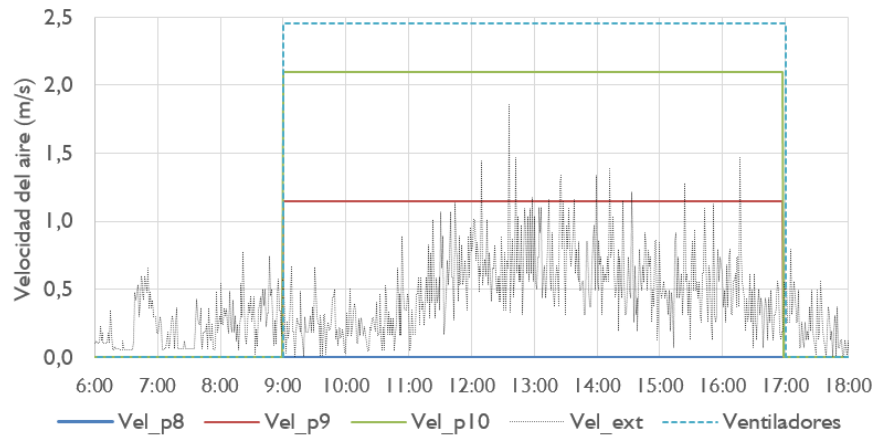
Los resultados más representativos se muestran en la Tabla 20, que indica que el aumento de la energía eléctrica generada fue de 2,1% y 2,9%, con reducciones de temperatura promedio de 3,99°C y 5,97%, de los paneles FV 9 y 10 con respecto al panel FV 8 el cual se aisló para que la velocidad del viento fuera de 0 m/s.

Tabla 20. Valores característicos del experimento – Velocidad del viento.

Panel	Velocidad del aire (m/s)	Incremento de energía generada (%)	Reducción de temperatura (°C)		Potencia adicional máxima generada (W)	
			Promedio	Máxima	Promedio	Máxima
P9	1,15	2,1%	3,99	9,8	1,98	7,9
P10	2,10	2,9%	5,97	14,9	2,44	12,1

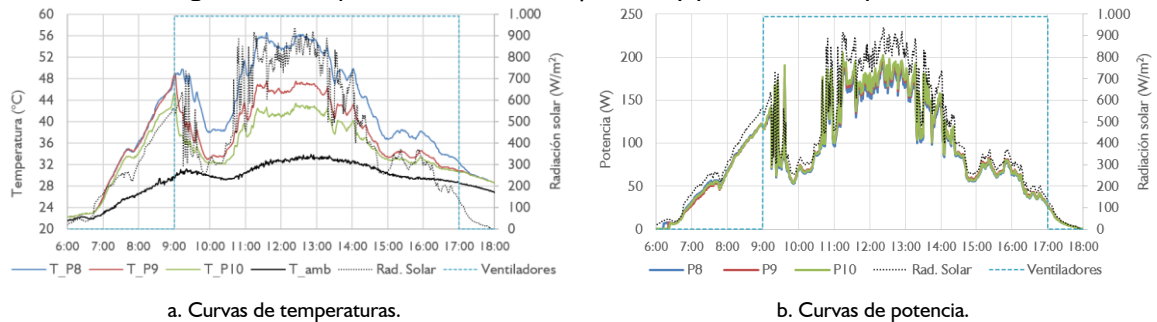
La Figura 32 muestra el perfil de la velocidad del viento debajo de los paneles FV (Vel_{p8} , Vel_{p9} y Vel_{p10}) y existente sobre la terraza (Vel_{ext}), con un valor promedio durante el experimento de 0,42 m/s. La curva *Ventiladores* describe la existencia de ventilación forzada.

Figura 32. Velocidades del viento para el día analizado.



Las figuras 33 y 34 muestran el efecto de la velocidad del viento en la temperatura de operación y la potencia eléctrica generada. Se aprecia que el máximo decremento de temperatura fue de 14°C y el máximo incremento de la potencia eléctrica generada es 11,2 W. También se observa que el efecto de la velocidad del viento es casi nulo para niveles de radiación inferiores a 300 W/m².

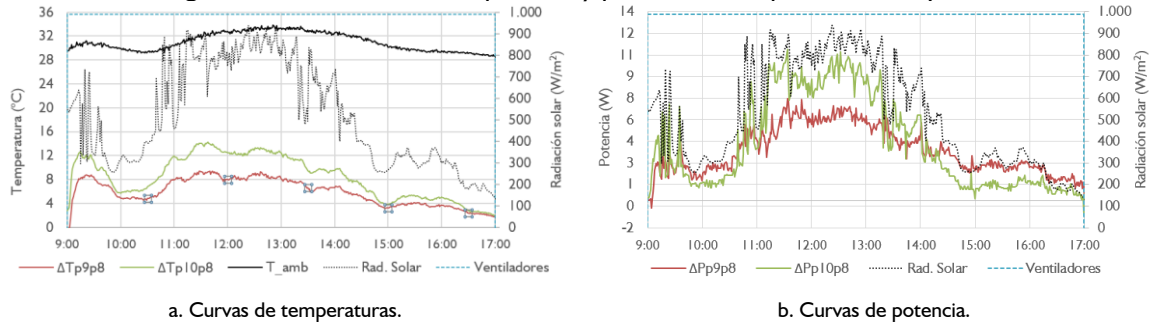
Figura 33. Comportamiento de la temperatura y potencia de los paneles FV.



a. Curvas de temperaturas.

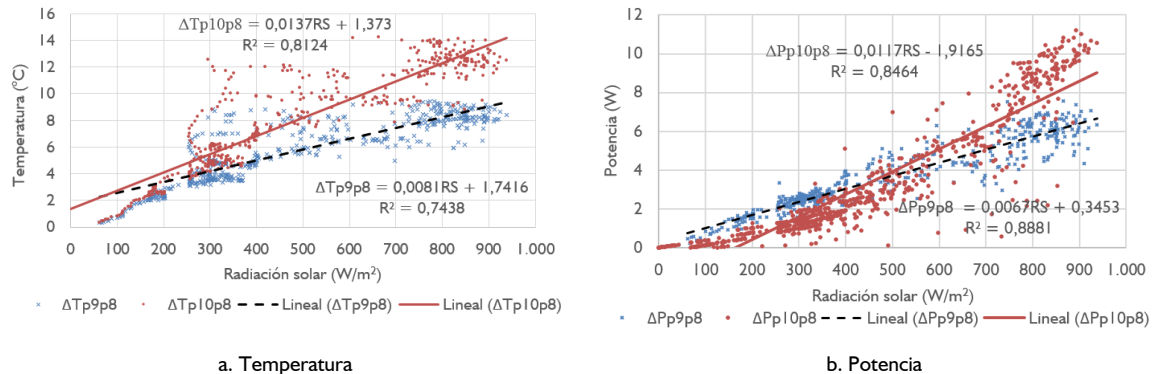
b. Curvas de potencia.

Figura 34. Variaciones de temperatura y potencia de los paneles FV P9 y P10.



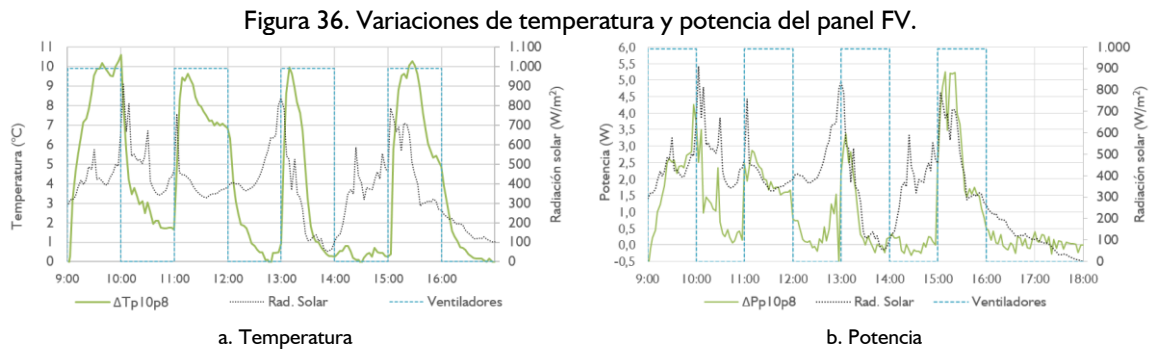
Con el fin de establecer la relación de las variaciones de temperatura y potencia eléctrica con respecto a la radiación solar, se establecieron las curvas de tendencia para ambos casos, tal como muestra la Figura 35. Se encontró que el nivel de dispersión es moderado para las variaciones de temperatura ya que los coeficientes de determinación fueron 0,7438 y 0,8124, mientras que para el caso de las variaciones de potencia eléctrica, los valores de los coeficientes fueron 0,8881 y 0,8464.

Figura 35. Comportamiento de la temperatura.



Finalmente, la

Figura 36 presenta un nuevo caso de análisis que describe el accionamiento temporizado de la ventilación forzada de 2,1 m/s para el panel FV P10. Los cambios térmicos y de potencia eléctrica son fluctuantes debido a la alta variación de la radiación solar que se presentó durante la experimentación.



4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR IRRIGACIÓN

La caracterización del factor de irrigación del panel FV se basa en la realización de un experimento con tres paneles FV, a partir del cual se analizaron doce regímenes de irrigación (A a L) presentados en el numeral 4.5.2. Un régimen de irrigación de un panel FV es definido por el caudal de irrigación y por el ciclo de operación $t_a : t_b$, donde t_a es el tiempo de irrigación y t_b es el tiempo de no irrigación, considerando un intervalo total de 30 minutos.

Este intervalo se definió a partir del análisis de pruebas preliminares, las cuales mostraron que esa ventana de tiempo permite apreciar los procesos de enfriamiento y calentamiento en el panel FV. Se hace notar que los resultados de esta caracterización son un insumo para análisis posteriores mostrados en los capítulos 7 y 8, y por ende, no fue propósito de esta Tesis Doctoral seleccionar un régimen determinado. Esto se debe a que un régimen de irrigación fijo no garantiza la obtención de beneficio energético; problema que se aborda en el Capítulo 8.

De acuerdo a la experimentación realizada, se puede indicar que la irrigación produce un efecto casi inmediato en la operación del panel FV. En general, cerca del 80% del transitorio de enfriamiento (disminución de la temperatura del panel FV) y el aumento de la potencia eléctrica generada obtenidas pueden ocurrir durante el primer minuto de la irrigación.

La Figura 37 muestra la evolución de la temperatura de tres paneles FV dispuestos como sigue: P5 está ubicado a la derecha, P6 en el medio y P7 a la izquierda. El panel P5 opera sin

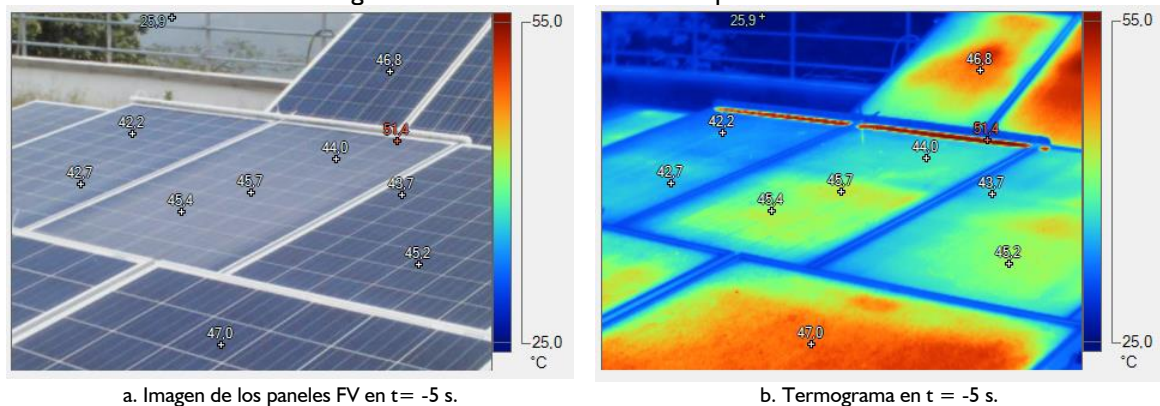
irrigación dado que es la referencia de análisis, mientras los paneles P6 y P7 son irrigados con ciclos de trabajo distintos: un minuto de irrigación por 29 minutos de no irrigación para el panel FV P6 y quince minutos de irrigación por quince minutos de no irrigación del panel FV P7.

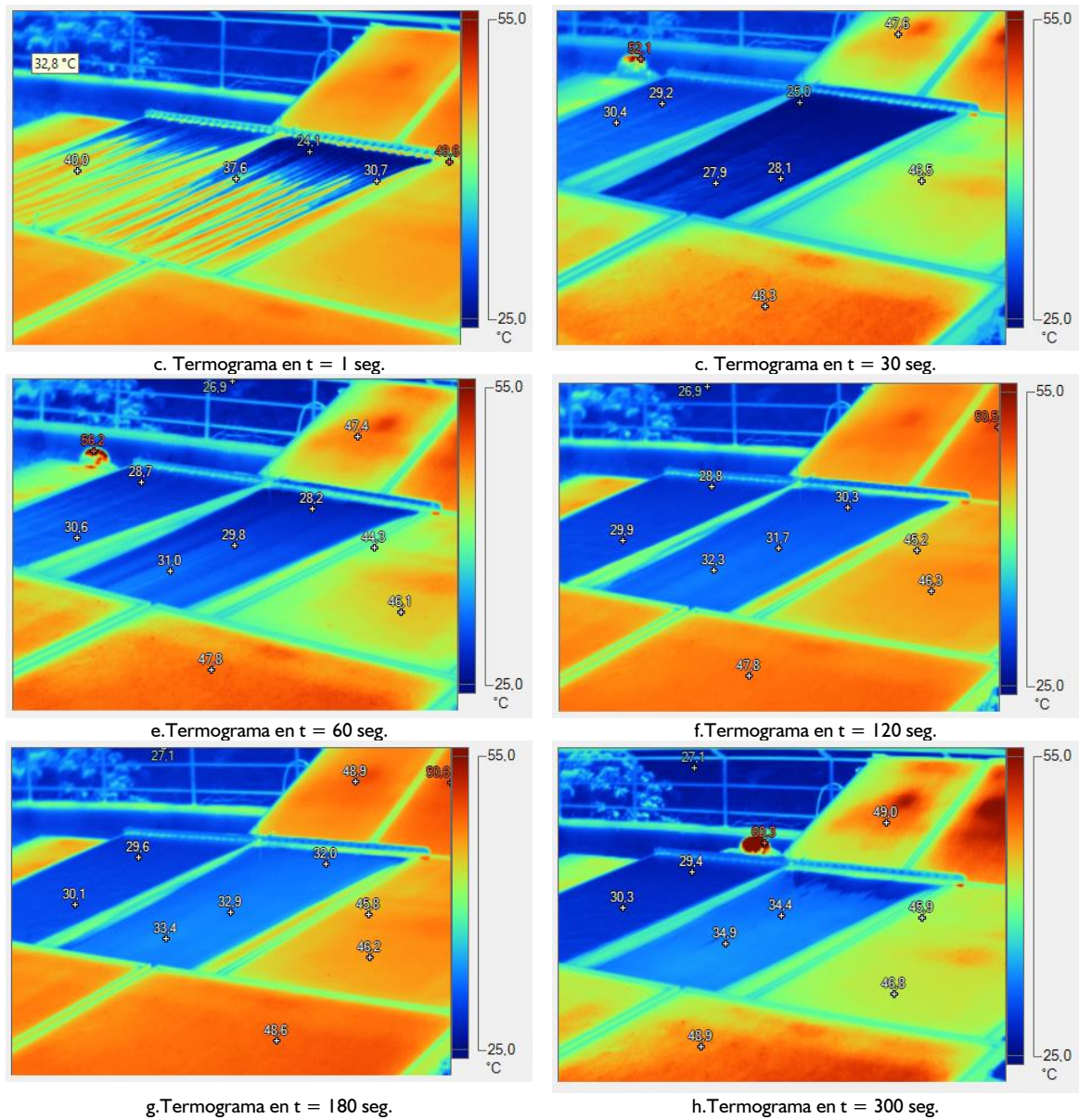
La temperatura de P6 en el instante anterior ($t = -5$ s) de la irrigación muestra que se encuentra en la misma condición de P5, lo cual indica que el efecto de la última irrigación ya ha cesado; por otro lado, el panel P7 tiene una temperatura entre 2°C y 3°C por debajo del panel P5, lo cual indica que aún experimenta el efecto de la irrigación del ciclo de operación anterior.

El agua se desliza de forma irregular al inicio de la irrigación ($t = 1$ s), aunque prontamente se forma la película, quedando como se muestra a los 30 segundos. Al finalizar el primer minuto se observa que la temperatura de los paneles FV irrigados (P6 y P7) pasó de 45°C a 30°C ; en este instante finaliza la irrigación del panel P6.

A los 5 minutos de iniciada la irrigación del panel P7, se aprecia que la temperatura del panel P7 se mantiene aproximadamente en 30°C , mientras la temperatura de P6 presenta un leve incremento entre 4°C y 5°C .

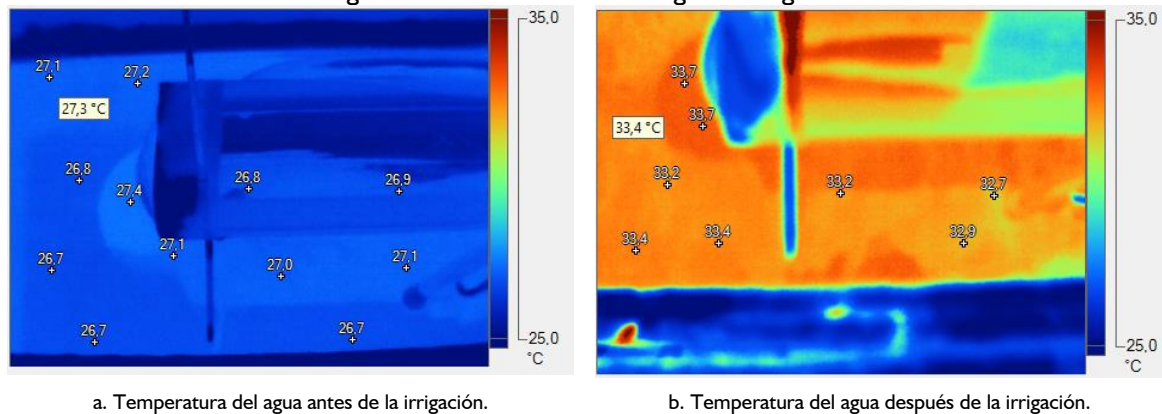
Figura 37. Evolución térmica de los paneles FV.





Otro aspecto considerado es el incremento de la temperatura del agua utilizada en la irrigación, debido al calor removido del panel FV. La remoción de calor del panel FV se logra por medio del contacto del agua con la superficie superior del panel FV y por consiguiente la temperatura del agua se incrementa. La Figura 38 muestra que la temperatura del agua se incrementó en 5°C, pasando de 27°C a 33°C.

Figura 38. Cambio térmico del agua de irrigación.



A continuación se presenta el análisis del Caso X de la experimentación a fin de describir en detalle el efecto de la irrigación. Seguidamente, se analizan los regímenes de irrigación a partir de dos índices propuestos, la diferencia relativa de temperatura (*DRT*) y el índice de potencia adicional generada (*IPG*). Finalmente, se presentan curvas descriptoras de la energía eléctrica generada por cada régimen.

4.3.1 Análisis del efecto de la irrigación para el caso X del experimento

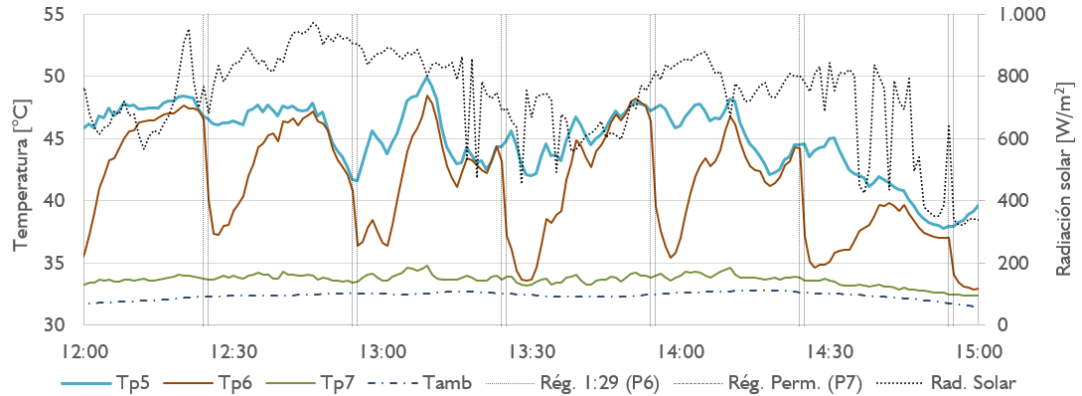
Con el fin de apreciar el efecto de la irrigación en el comportamiento de los paneles FV, se expone a continuación un día monitorizado del caso X de experimentación, que consisten en que el panel P5 opera sin irrigación, mientras los paneles P6 y P7 son irrigados con ciclos de trabajo de un minuto de irrigación por 29 minutos de no irrigación para el panel FV P6 y de forma permanente el panel FV P7.

El Anexo D presentan las curvas del impacto en la temperatura y potencia generada del panel FV para los todos casos de experimentación (I a XI).

Efecto sobre la temperatura del panel FV

La Figura 39 muestra las curvas de temperatura de los tres paneles FV, denominadas *Tp5*, *Tp6* y *Tp7*. Se aprecia que la temperatura de los paneles irrigados, P6 y P7, es delimitada por en la parte superior por la temperatura del panel FV sin irrigación (P5) y en la parte inferior por la temperatura ambiente.

Figura 39. Curvas de la temperatura de operación de los paneles FV.

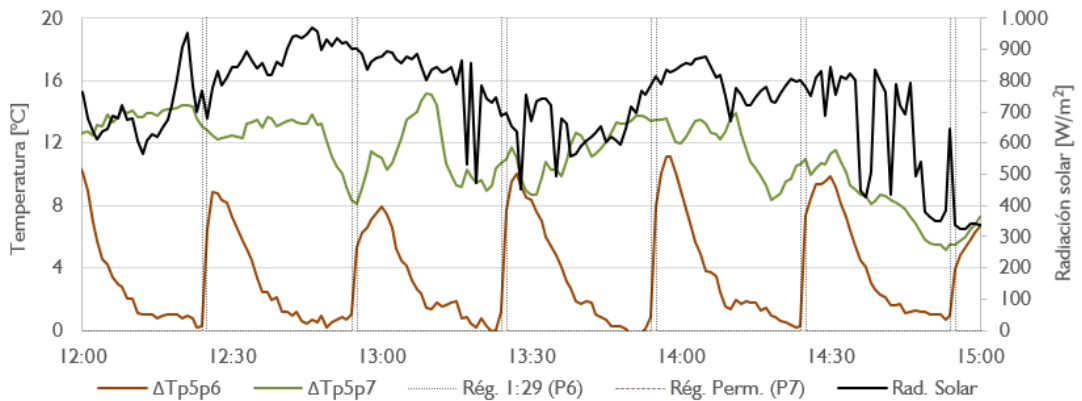


La irrigación constante garantiza que la temperatura del panel P7 se mantenga cercana a la temperatura ambiente; sin embargo, no son iguales, dado que el agua de irrigación tiene una temperatura mayor al ambiente por la extracción continua de calor del panel FV.

Por otro lado, T_{p6} decrece cerca al nivel de T_{p7} debido a la irrigación de un minuto; no obstante, el proceso de enfriamiento de P6 continúa entre uno y cinco minutos más. Esto se debe a la formación de una película muy delgada de agua residual de la irrigación, la cual se evapora lentamente por el calor extraído a P6.

La Figura 40 muestra las curvas ΔT_{p5p6} y ΔT_{p5p7} que indican el decremento de temperatura logrado por cada régimen de irrigación en los paneles P6 y P7, respectivamente, con respecto a P5.

Figura 40. Disminución de la temperatura de operación de los paneles FV.



Se aprecia que tal decremento varía entre 6°C y 15°C para el P7 y entre 0°C y 12°C para P6. Tal variación de la diferencia está ligada con la radiación solar, a menores valores de radiación solar, menor será la temperatura de los paneles FV, y por ende menores las diferencias de temperatura.

Es de notar que la variación de la temperatura mostrada en la Figura 40 no posibilita la generalización del impacto de irrigación dado que la magnitud de la variación depende de la radiación solar y de la temperatura del panel FV de referencia. Según los resultados experimentales, el valor máximo de la variación para un ciclo de operación de la irrigación podrá estar entre 0 °C y 35°C.

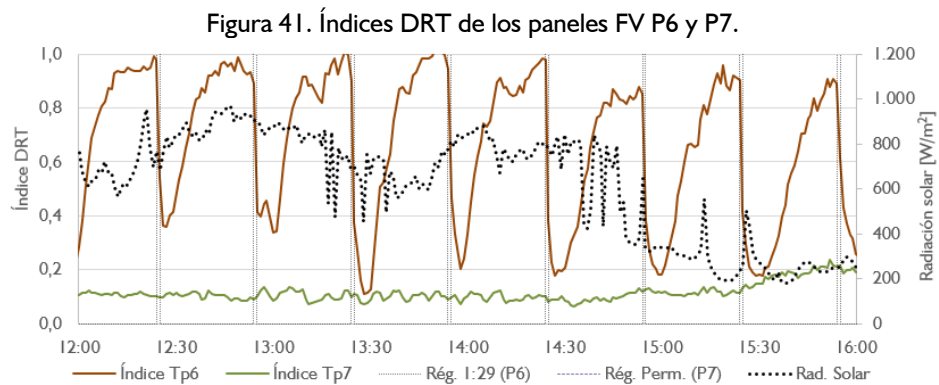
Para lograr la generalización deseada, se requiere valorar la variación de la temperatura con respecto a una referencia específica. Considerando esto, se procedió a definir el índice de diferencia relativa de temperatura (*DRT*), calculado por medio de la expresión (7), donde T_{P_Ir} es la temperatura del panel FV irrigado, T_{P_amb} es la temperatura ambiente y T_{P_NoIr} es la temperatura del panel FV no irrigado. El numerador representa el calentamiento del panel FV con respecto al mínimo valor posible, la temperatura ambiente, y el denominador representa la variación máxima posible o calentamiento máximo.

$$DRT = \frac{T_{P_Ir} - T_{P_amb}}{T_{P_NoIr} - T_{P_amb}} \quad (7)$$

El índice *DRT* cuantifica entre 0 y 1 el decremento logrado por la irrigación, donde cero indica la no existencia de calentamiento (el máximo beneficio) y es el mejor escenario; mientras 1 representa el máximo calentamiento y es el peor escenario. El mejor escenario ocurrirá cuando la irrigación lleve al panel FV a temperatura ambiente; el peor escenario será cuando un panel FV irrigado alcance la temperatura de un panel FV no irrigado. La variación de *DRT* se asemeja al comportamiento de la temperatura del panel FV irrigado mostrado en la Figura 39.

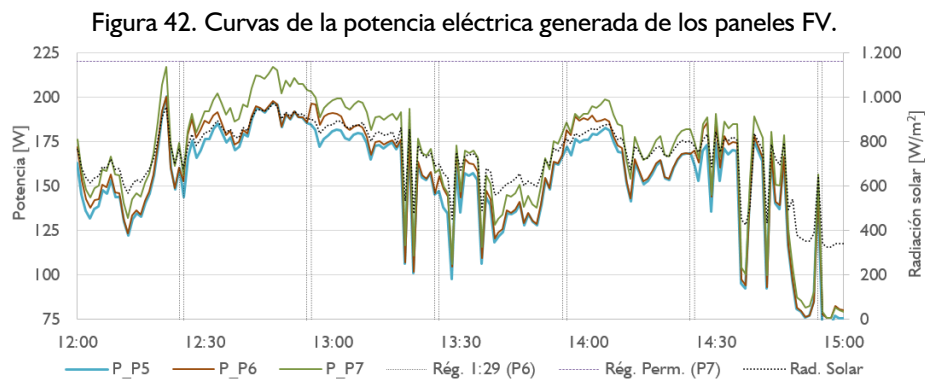
La Figura 41 muestra las curvas del índice *DRT* para los paneles FV P6 y P7 de acuerdo a lo mostrado por las figuras 39 y 40. Para el caso del panel P6 antes de cada irrigación, se aprecia que el valor de *DRT* es cercano a 1 debido al incremento de temperatura que sufrió

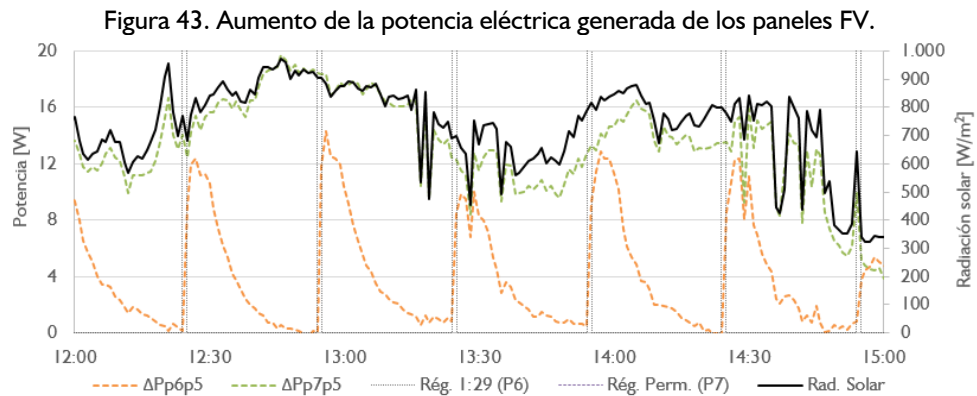
durante el tiempo de no irrigación; y desciende rápidamente a valores entre 0,2 y 0,4 al momento de la irrigación, no lográndose llegar a 0,0 dado que no se alcanza la temperatura ambiente. Para el caso del panel P7, se observa que el valor de DRT se mantiene entre 0,1 y 0,2, siendo el límite inferior del índice *DRT* del panel P6; no logra ser cero debido al calentamiento que sufre el agua de irrigación por causa de la remoción continua del calor que lleva a cabo.



Efecto sobre la potencia eléctrica generada del panel FV

La Figura 42 describe el comportamiento de la potencia eléctrica generada por los tres paneles FV a partir de las curvas *P_P5*, *P_P6* y *P_P7*. La curva *P_P7* establece el valor máximo de generación, mientras la curva *P_P5* el valor mínimo; la curva *P_P6* varía entre estas dos. Dada la alta variación de la radiación solar, no se aprecia claramente el efecto de la irrigación para P6, por lo cual la Figura 43 muestra las curvas de incremento de potencia ΔP_{p6p5} y ΔP_{p7p5} de los paneles P6 y P7, respectivamente, con respecto a P5.





Se observa que el máximo valor de incremento en la ventana de análisis es de 19,5 W para una irrigación continua a un nivel de radiación solar de 950 W/m²; en la experimentación realizada se registró que tal incremento puede ser de hasta 30 W. Por otro lado, se observa la correspondencia de la curva $\Delta Pp6p5$ con la curva $\Delta Tp5p6$ de la Figura 40; esto se debe a que la potencia eléctrica generada de un panel FV responde de forma directa a la variación de temperatura.

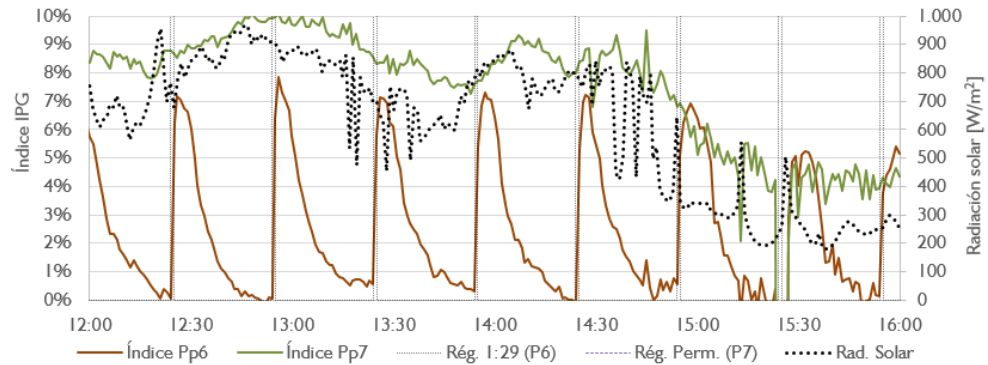
Con el fin de generalizar el aumento de potencia, se estableció el índice de incremento de potencia generada (IPG) que es el porcentaje de incremento con respecto a la condición más desfavorable, y es determinado por la expresión (8), donde P_{gen_Ir} es la potencia generada por el panel FV irrigado y P_{gen_NoIr} es la potencia generada por el panel FV no irrigado.

$$IPG = \frac{P_{gen_Ir} - P_{gen_NoIr}}{P_{gen_NoIr}} \quad (8)$$

La

Figura 44 muestra las curvas del índice IPG para los paneles FV P6 y P7. En general, se observa que el mayor incremento logrado de la potencia eléctrica generada en el panel FV P6 es del 8%, y del 10% en el panel FV P7. Se aprecia que el valor de IPG está ligado a la radiación solar; a niveles altos de radiación solar mayor será el IPG (e.g. 7% a 10%), lo cual sucederá cerca al mediodía (e.g. de 10 a.m. a 2 p.m.), y a niveles bajos de radiación solar (antes de las 9 a.m. y después de las 4 p.m.) menor será el IPG (e.g. 0% a 3%) en primeras horas de la mañana o finalizando la tarde.

Figura 44. Índices IPG de los paneles FV P6 y P7.

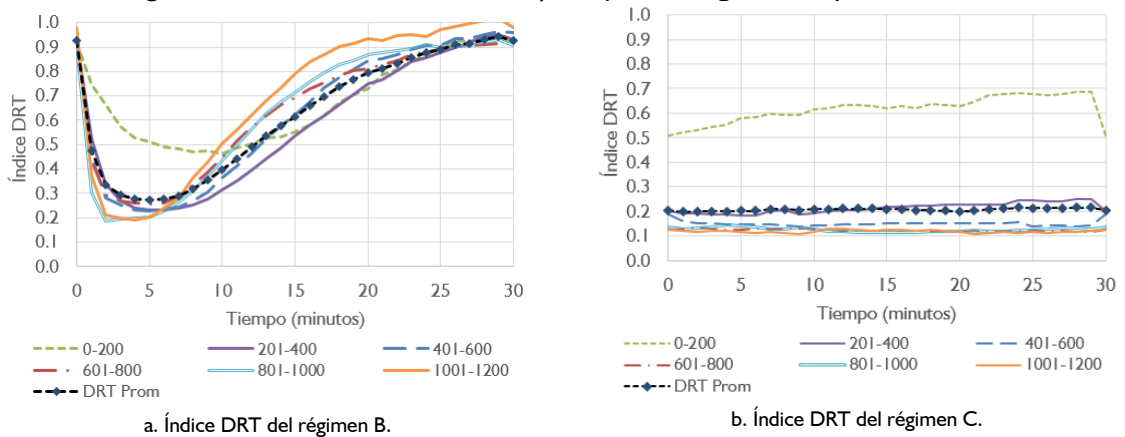


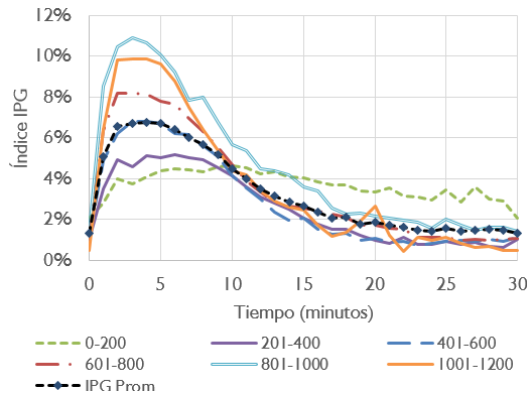
4.3.2 Caracterización de la influencia de los regímenes de irrigación a partir de los índices DRT e IPG

Los índices *DRT* e *IPG* tienen por objeto caracterizar el efecto producido por un régimen de irrigación en el comportamiento de un panel FV. A partir de las curvas obtenidas de estos índices, sería posible estimar el impacto de un régimen de irrigación determinado en un día cualquiera.

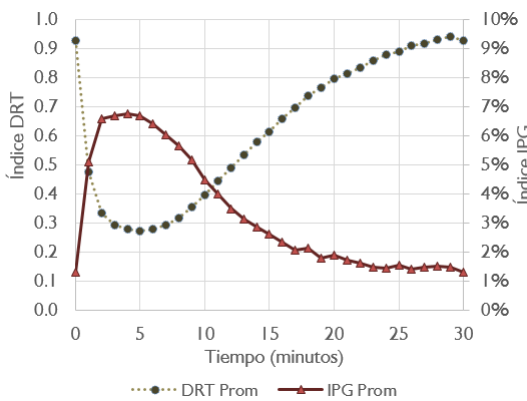
Teniendo en cuenta que la variable de mayor influencia en el comportamiento de un panel FV es la radiación solar, se hace necesario analizar la variación de los índices con respecto a esta variable. Para esto se continúa con el estudio del caso X del experimento expuesto en el numeral 5.3.1., tal como lo muestra la Figura 45. El Anexo E presentan las curvas típicas de los índices *DRT* e *IPG* para todos los doce regímenes analizados (A a L).

Figura 45. Índices característicos DRT y IPG para los regímenes B y C del caso X.

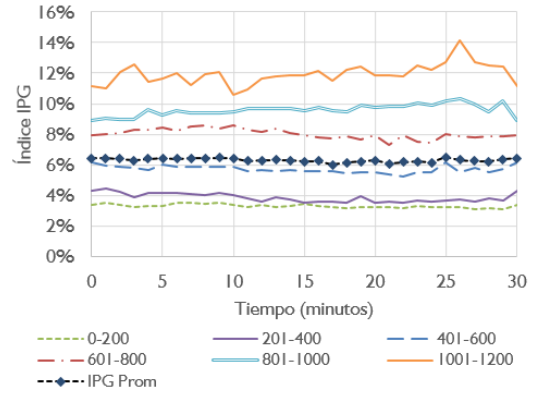




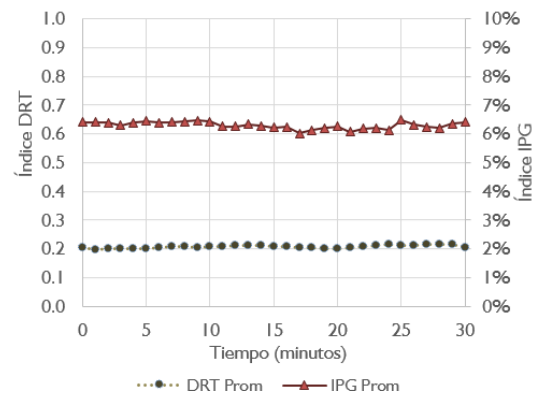
c. Índice IPG del régimen B.



e. Índices promedio DRT y IPG del régimen B.



d. Índice IPG del régimen C.



f. Índices promedio DRT y IPG del régimen C.

De acuerdo a lo mostrado por las figuras 45.a y 45.b, el índice *DRT* tiene un comportamiento similar para los intervalos de radiación solar superiores a 200 W/m², y sólo un comportamiento atípico se presenta para los valores comprendidos en el intervalo de 0 W/m² y 200 W/m², el cual no es relevante debido al reducido efecto que tiene sobre la generación.

Con respecto al índice *IPG* mostrado en las figuras 45.c y 45.d, se aprecia que las curvas tienen la misma forma para los diversos intervalos de radiación solar; sin embargo, el porcentaje de incremento tiende a ser mayor a medida que aumenta la radiación solar.

Las figuras 45.e y 45.f muestran las curvas promedio diarias de los índices para ambos regímenes. La curva promedio de *IPG* resultó ser muy cercana a la curva *IPG* característica para el rango de radiación solar de 400 W/m² a 600 W/m².

Tal como se aprecia, las curvas tienen comportamientos *DRT* e *IPG* contrarios, por tanto el incremento de un índice significa el decremento del otro.

Ahora, se proceden a mostrar las curvas promedio de los índices *DRT* e *IPG* en las figuras 46 y 47 para cada uno de los regímenes analizados. Se aprecia en el efecto intenso de la irrigación en el primer minuto, a excepción de las curvas de los regímenes C y G, ya que son de irrigación continúa.

Figura 46. Comportamiento del índice DRT para los regímenes analizados.

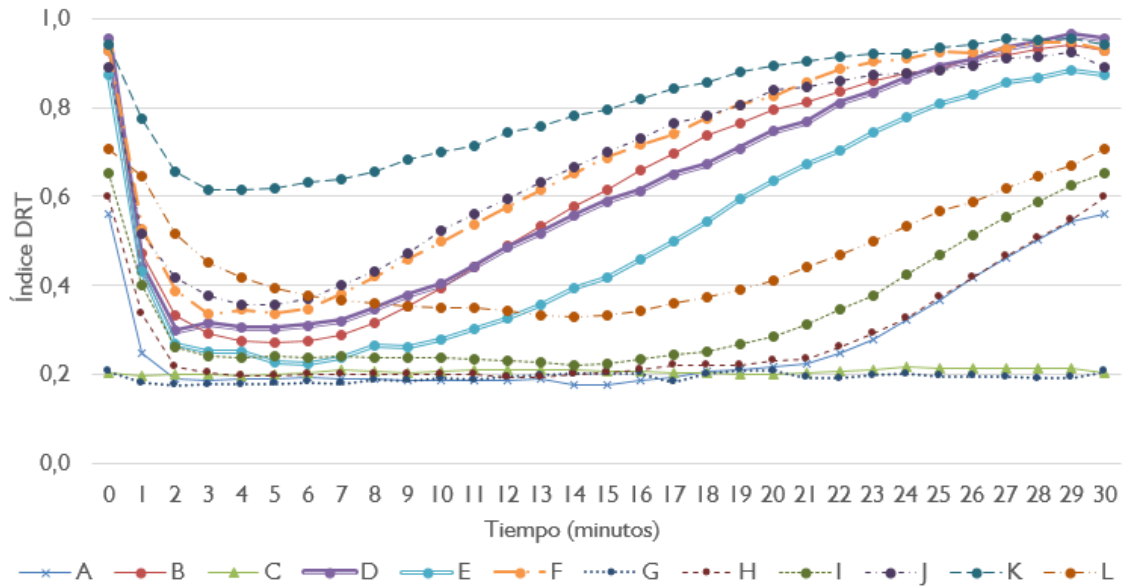
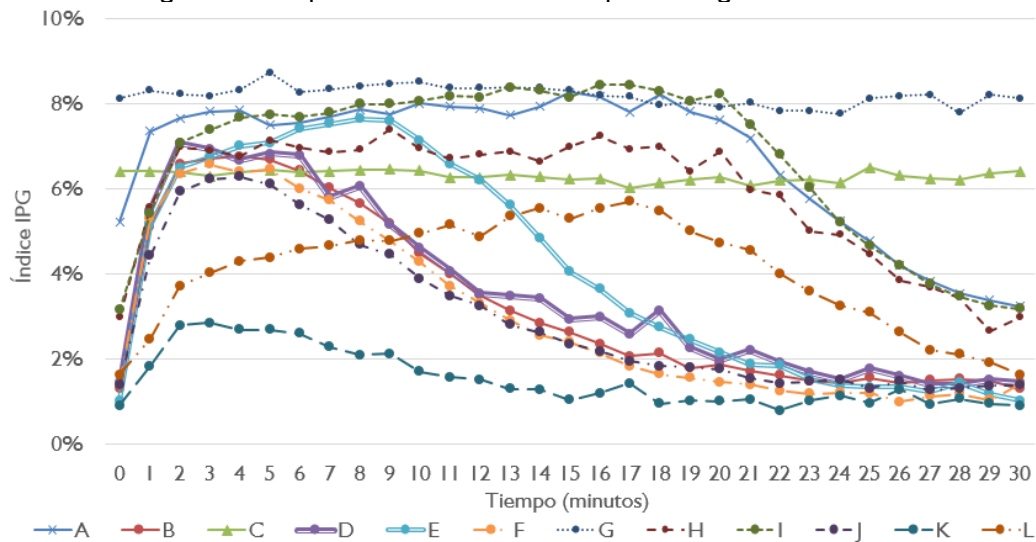


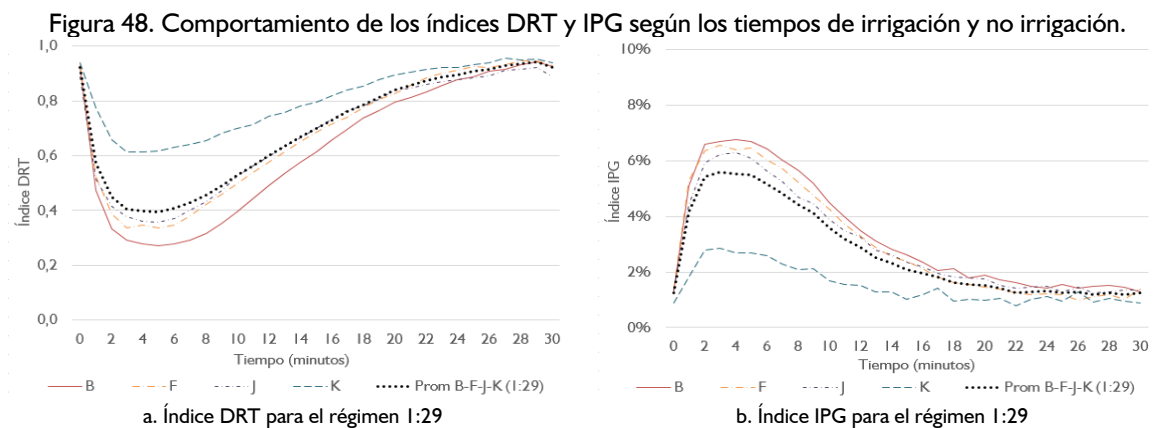
Figura 47. Comportamiento del índice IPG para los regímenes analizados.

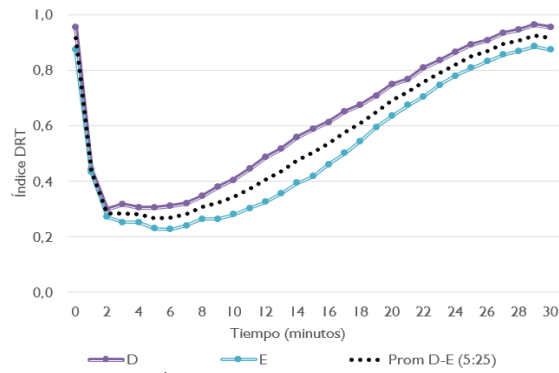


Los valores inicial y final de los índices *DRT* e *IPG* para cada régimen son similares, dado que corresponde al mismo instante, minuto 0 y minuto 30.

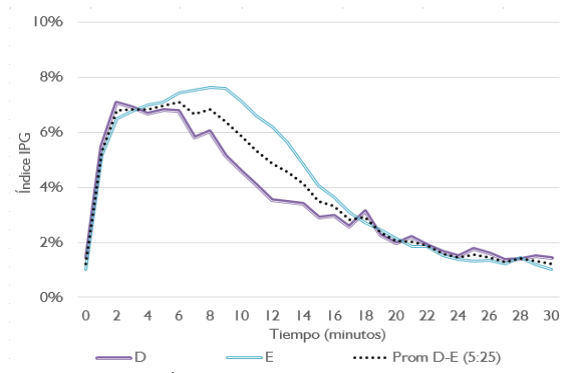
Los valores iniciales de *DRT* son mayores para aquellos regímenes con tiempos de irrigación de un minuto (B, F, J y K) y cinco minutos (A, H, I y L), dado que los tiempos de no irrigación (29 minutos y 25 minutos) son lo suficientemente extensos para que el panel FV alcance la temperatura de un panel FV no irrigado. De manera correspondiente, se aprecia que el valor inicial de *IPG* será menor para estos regímenes en comparación con aquellos cuya irrigación dura quince minutos.

Con el fin de analizar el efecto del caudal de irrigación en el comportamiento térmico del panel FV, se agrupan las curvas de los índices *DRT* e *IPG* de acuerdo a los tiempos de operación (1':29', 5':25', 15':15' y permanente). Inicialmente, la Figura 48.a muestra que el caudal determina el valor mínimo del índice *DRT*, siendo menor a 0,3 para un caudal de 9,5 l/min (régimen B), y aproximadamente 0,35 para caudales de 4,75 l/min (régimen F) y de 3,75 l/min (régimen J), lo que denota una baja sensibilidad del índice *DRT* para caudales mayores a éste último. En cuanto al régimen K, cuyo caudal es 1,75 l/min, se aprecia que el de *DRT* sólo desciende a 0,6, siendo por tanto un régimen con desempeño deficiente. Lo antes descrito se ve reflejado en la Figura 48.b, en la cual el máximo incremento de la potencia eléctrica generada está entre 6% y 7% para los regímenes B, F, y J, y solo es de 3% para el régimen K.

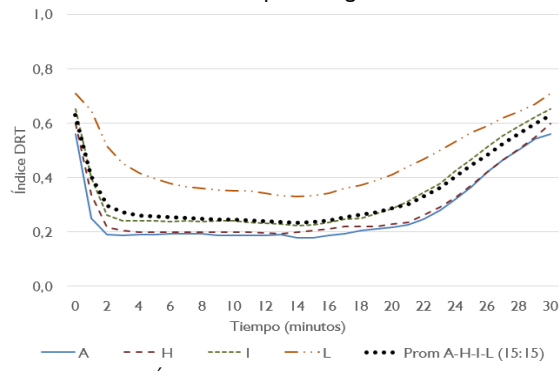




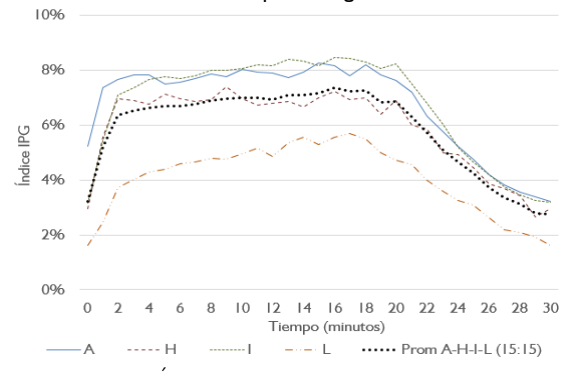
c. Índice DRT para el régimen 5:25



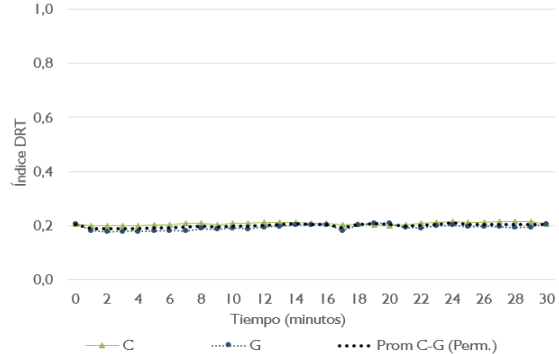
d. Índice IPG para el régimen 5:25



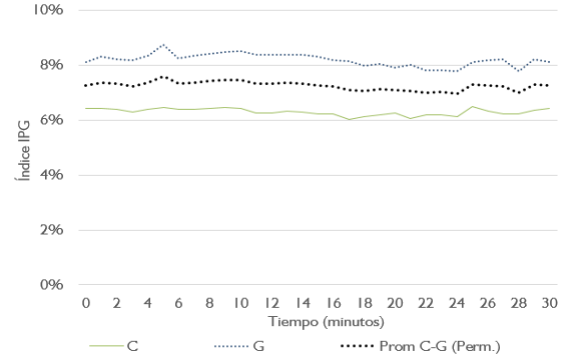
e. Índice DRT para el régimen 15:15



f. Índice IPG para el régimen 15:15



g. Índice DRT para el régimen permanente.



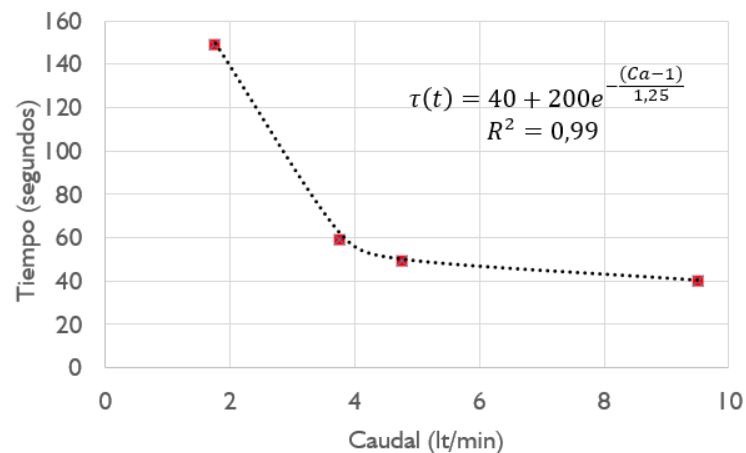
h. Índice IPG para el régimen permanente

Para el caso de los regímenes D y E con tiempos de irrigación 5 minutos, se observa en la Figura 48.c que un caudal de 4,75 l/min tiene un efecto ligeramente superior al producido por un caudal de 9,5 l/min. Esto concuerda con los incrementos de potencia mostrados por la Figura 48.d, en la cual se aprecia que un incremento máximo cercano al 7% para los dos regímenes. Tal efecto del caudal podría ser debido a la variabilidad de la experimentación o a que un mayor espesor de la película de agua puede causar la disminución de la radiación solar incidente en el panel FV.

De manera similar a lo observado para un tiempo de irrigación de un minuto, se aprecia en las figuras 48.e y 48.f que el efecto de un caudal de 4,75 l/min o de 9,5 l/min es prácticamente el mismo para un tiempo de irrigación de quince minutos. Por otro lado, se evidencia que un caudal de 1,75 l/min produce un efecto menor que los anteriores; sin embargo, logra incrementos de hasta 6% en la potencia generada. Esto es posible ya que el tiempo de irrigación de quince minutos es lo suficientemente extenso para que este caudal pueda remover el calor suficiente para reducir la temperatura. Lo anterior se relaciona con la constante de tiempo de enfriamiento característica del flujo de irrigación.

La Figura 49 muestra la variación de la constante de tiempo de enfriamiento (τ) en función del caudal. A partir del análisis de los datos observados, se pudo establecer que las constantes serán de aproximadamente 40 segundos, 50 segundos, 60 segundos y 150 segundos para caudales de 9,5 l/min, 4,75 l/min, 3,75 l/min y 1,75 l/min, respectivamente. Asimismo, se estableció una expresión para estimar el valor de τ aplicable sólo al rango de caudales usados en la experimentación, de 1,75 l/min a 9,5 l/min.

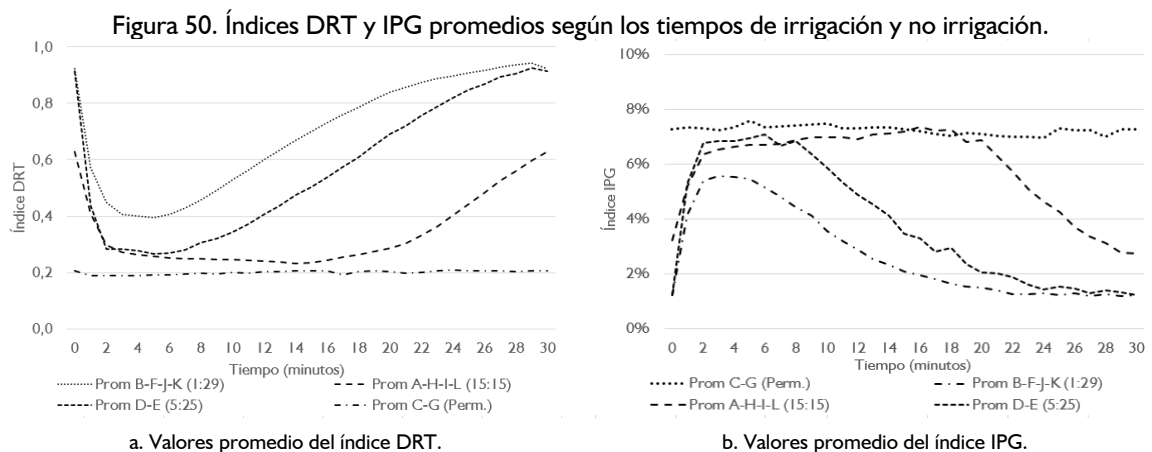
Figura 49. Variación de la constante de tiempo de enfriamiento del panel FV según el caudal de riego.



Se considera conveniente optar por caudales de aproximadamente 5 l/min para llevar a cabo la irrigación de un panel FV, dado que el valor de τ se estabiliza para valores superiores a 3,75 l/min y que los resultados obtenidos indican un comportamiento muy similar de los índices *DRT* e *IPG* para caudales de 4,75 l/min y 9,5 l/min. A menor caudal de operación se

podrá seleccionar una bomba de recirculación con menor potencia, y por ende, será menor el consumo energético por su operación.

Seguidamente, se muestra la Figura 50 con las curvas promedio de los *DRT* e *IPG* para los ciclos de operación 1':29', 5':25', 15':15' y permanente (30':0'). Se observa que los valores inicial y final de *DRT* para tiempos de irrigación de un minuto y cinco minutos es cercano a 1,0 debido a que el tiempo de no irrigación fue extenso y permitió el calentamiento del panel FV a condiciones de no irrigación. Según los resultados experimentales, los valores inicial y final serán menores a medida que el tiempo de irrigación sea de quince minutos o más.



Se encontró que el *DRT* será de 0,2 cuando la irrigación es permanente y producirá un incremento de la potencia eléctrica generada cercana al 8%. Los valores máximos de *IPG* para los ciclos de operación 1':29', 5':25' y 15':15' son 5,6%, 6,8% y 7,4%, respectivamente, obtenidos en los minutos 3, 6 y 17, lo que indica que ocurrieron después de terminada la irrigación.

Es importante aclarar que los valores de *IPG* obtenidos en este experimento están referidos al comportamiento del panel FV P5 (sin irrigación), el cual se encontraba instalado sobre una terraza verde y con velocidades de viento entre 0 m/s y 1 m/s. Por tanto, si la irrigación fuese realizar en otras condiciones menos favorables (e.g. techo de concreto sin viento), tales porcentajes de incremento de potencia eléctrica generada serían mayores.

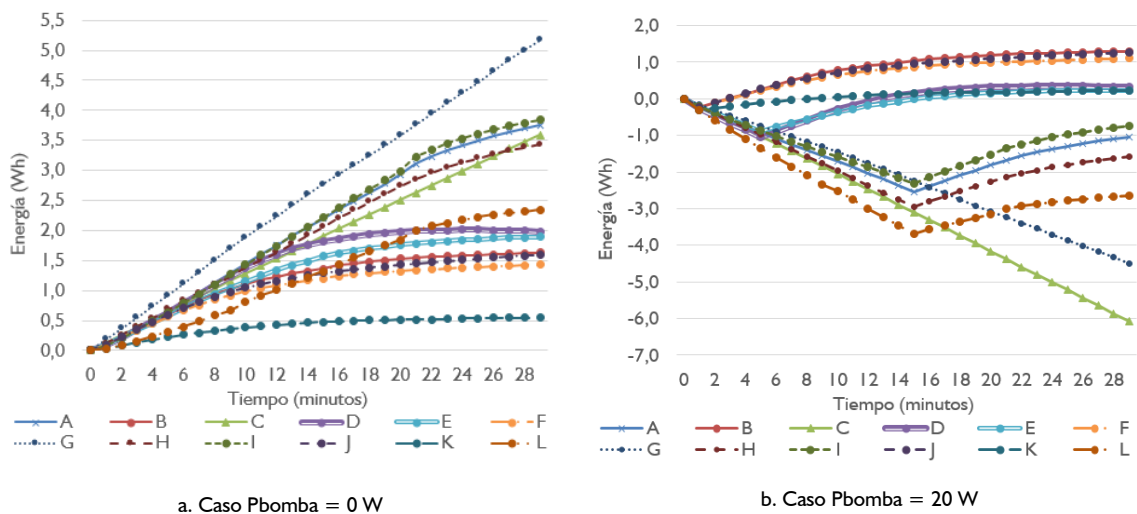
Adicionalmente, la información obtenida del proceso de caracterización de los regímenes de irrigación fue un insumo para la comprensión de la interacción entre el agua y el panel FV, y posterior modelado presentado en el Capítulo 7.

4.3.3 Curvas de energía eléctrica adicional generada

Posterior a la caracterización del efecto de la irrigación sobre la temperatura y la potencia eléctrica generada del panel FV, se procede a cuantificar la variación neta de la energía generada o energía neta generada, definida como la energía eléctrica adicional generada debida a la irrigación menos la energía eléctrica consumida por el sistema de irrigación, que en este análisis se determina a partir del régimen de operación y potencia de la bomba de irrigación – P_{bomba} . Es de notar que las curvas de energía adicional generada para un intervalo de 30 minutos variarían según el nivel de radiación solar, tal como se muestran en el Anexo F.

El Anexo G muestra las curvas de la energía eléctrica neta generada acumulada promedio de los doce regímenes analizados para un intervalo de 30 minutos considerando diversos valores de potencia eléctrica de la bomba P_{bomba} (0 W, 5 W, 10 W, 15 W, 20 W y 25 W). Estas curvas muestran su variación en el tiempo con el fin de apreciar tanto el efecto del consumo energético debido a la bomba de recirculación como la evolución del efecto energético de la irrigación. La Figura 51 muestra los casos para P_{bomba} igual a 0 W y 20 W.

Figura 51. Curvas de energía adicional generada por intervalo según la potencia de la bomba.



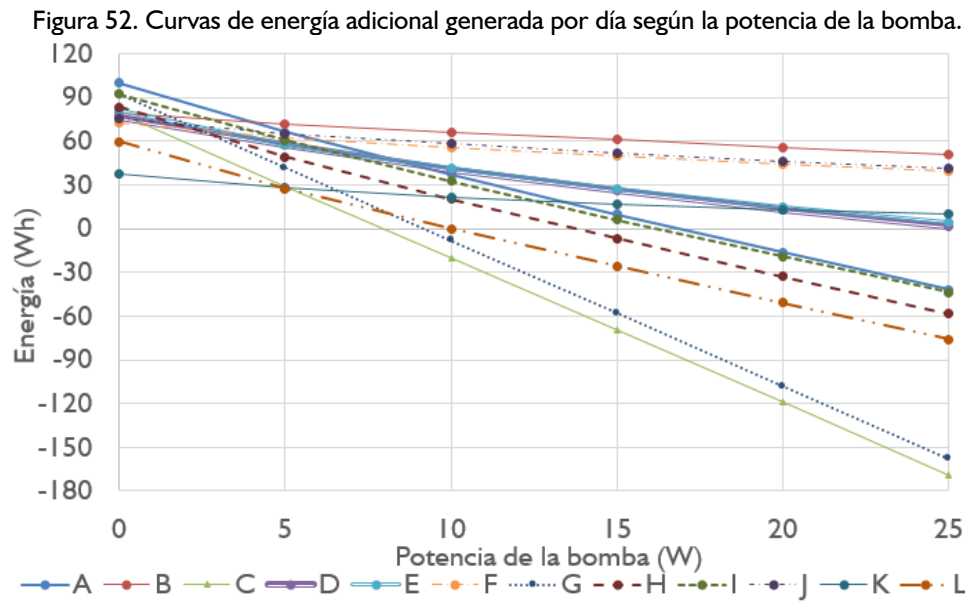
Cuando la potencia P_{bomba} es 0 W, la variación de energía para todos los regímenes es positiva dado que no hay consumo energético. Los mayores valores de energía eléctrica generada acumulada en el minuto 30 son producidos por los regímenes con mayor tiempo de irrigación (A, C, G, H e I), donde el máximo beneficio energético obtenido fue de 5,2 Wh; mientras el régimen con peor desempeño es registrado por el régimen K, cuyo ciclo de operación es 1':29' con un caudal de 1,75 l/min.

Una curva de energía adicional generada describe un crecimiento lineal durante el tiempo de irrigación, posterior a éste y debido al calentamiento del panel FV, la tasa de crecimiento disminuye y puede llegar a estabilizarse en un valor si el efecto de la irrigación se ha desvanecido.

La irrigación de paneles FV puede darse sin consumo de energía cuando por ejemplo el fluido es proveído por la red de suministro dada su presión de servicio. En tal caso, se deberá seleccionar un caudal eficiente de irrigación (e.g. 5 l/min) como el indicado en el numeral 5.3.3, pues es posible que el propósito final del agua utilizada sea el riego de la vegetación o el llenado del tanque de acopio para posterior recirculación; en ambos casos habrá una cantidad límite de agua a ser proveída por la red de suministro. A menor caudal de servicio se podrá aumentar el tiempo de irrigación desde la red, con lo cual se reducen el número de irrigaciones debidas a una bomba. En el Capítulo 8 se presenta una invención que acoge la idea descrita.

Para el caso de P_{bomba} igual a 20 W, se aprecia que las curvas de todos los regímenes describen un decremento durante el tiempo de irrigación, esto se debe a que la energía adicional generada no compensa el consumo energético requerido por la bomba. Luego, se aprecia un crecimiento durante el tiempo de no irrigación que puede compensar y proporcionar un beneficio energético de la irrigación. Se obtendrá un beneficio energético sólo para tiempos de irrigación de uno y cinco minutos.

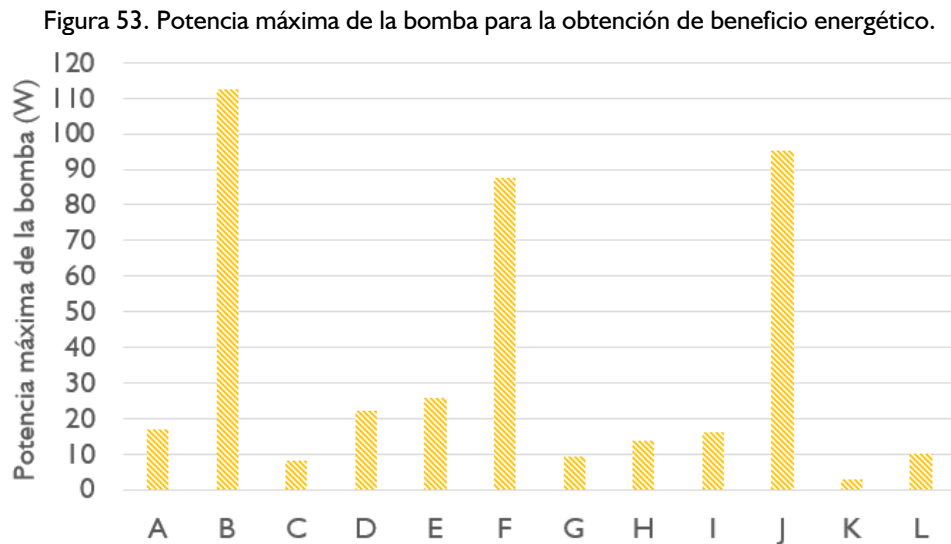
Con el fin de apreciar el efecto diario de la irrigación, se establecieron las curvas de la energía neta acumulada diaria por régimen en función de P_{bomba} , tal como muestra la Figura 52.



Estos valores deben ser referidos a un panel FV de 255 W que genera cerca de 1,0 kWh por día. Por lo que el incremento máximo sería 100 Wh, equivalente al 10%, para regímenes de operación continua y de ciclo de operación de 15':15'. Asimismo, se aprecia que la irrigación efectuada por una bomba de 25 W ocasionaría pérdidas de 170 Wh, equivalente al 17%. Los valores de energía neta acumulada diaria para diversos valores P_{bomba} se muestran en el Anexo G.

Las curvas decaen a medida que P_{bomba} aumenta, lo que representa el aumento de la energía consumida. Los regímenes con tiempos de irrigación de un minuto (B, F, J y K) y cinco minutos (D y E) pueden proveer un beneficio energético para todos los casos considerados de P_{bomba} .

A partir de los puntos de corte de cada curva con el eje horizontal (0 Wh), es posible determinar la potencia máxima de la bomba – $P_{bomba\acute{m}ax}$ que permite la obtención de beneficio energético, tal como muestra la Figura 53. A mayor tiempo de irrigación del régimen es menor el valor de la $P_{bomba\acute{m}ax}$.



El valor de $P_{bom bam\acute{a}x}$ es de aproximadamente 8 W para irrigación continua (regímenes C y G), de entre 10 W y 16 W para el ciclo de operación de 15':15' (regímenes A, H, I y L), de aproximadamente 24 W para el ciclo de operación de 5':25' (regímenes D y E), y entre 90 W y 110 W para el ciclo de operación de 1':29' propio de los regímenes B, F y J. El valor de $P_{bom bam\acute{a}x}$ para el régimen K (1':29') es de 3 W debido al modesto efecto de su caudal (1,75 l/min).

4.4 RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES DE LA EXPERIMENTACIÓN

Los factores analizados en esta investigación pueden clasificarse en dos niveles: bajo y alto; según el porcentaje de incremento de la potencia eléctrica generada. Se definió que el nivel es bajo cuando el incremento de potencia eléctrica sea menor o igual a 3%, lo cual es propio de la influencia positiva de la altura de instalación, el tipo de techo o la velocidad del viento. Este porcentaje está referido a un panel FV instalado a un metro de altura sobre un techo tradicional de concreto, el cual no experimenta viento (0 m/s). Por otro lado, el beneficio energético de la irrigación se considera de nivel alto dado que puede incrementar la generación de energía diaria hasta en un 10% según los regímenes analizados. Este beneficio depende de las características técnicas del sistema de irrigación que se implemente.

En esta sección se presentan recomendaciones técnicas para incrementar la potencia generada de acuerdo a los hallazgos más destacados de los resultados de la experimentación. Como parte final, se presentan algunos hallazgos complementarios no relacionados con los cuatro factores analizados.

4.4.1 Altura de instalación y tipo de techo

La determinación de la altura de instalación más conveniente para un sistema FV sobre una terraza depende del perfil de variación de la temperatura del aire en función de la altura. Tal perfil debe considerar la afectación del viento ocasionada por el sistema FV.

Según los resultados obtenidos, el proceso de calentamiento del techo de concreto hace que la temperatura del aire varíe según la altura; dicho calentamiento es más crítico a menor altura. Este efecto podrá ser considerado despreciable a una altura de un metro o más.

En consecuencia, la altura de instalación de un sistema FV sobre un techo tradicional (e.g. concreto) debería ser igual o superior a un metro. En cambio, si la altura es cercana a 25 cm, estará expuesto a una temperatura de aire circundante mayor, y por tanto la temperatura de operación se incrementará levemente ($<2^{\circ}\text{C}$), ocasionando una reducción en la potencia eléctrica generada cercana al 1%. Este porcentaje es válido si la velocidad de viento no es superior a 1 m/s. Este incremento de la temperatura de operación puede ser debido en parte a que la pérdida de calor por convección es menor. Es posible que el decremento de la potencia sea mayor si el techo tiene baja reflectancia (e.g. techo de concreto opaco o de grava). El porcentaje de pérdida será menor a medida que la velocidad del viento aumente.

Si el sistema FV se va a instalar sobre techo verde es recomendable que la altura de instalación sea cercana a 50 cm. A diferencia del caso anterior, la variación de la temperatura del aire sobre un techo verde irrigado puede describir una disminución de su valor a menor altura. El efecto de la vegetación a esta altura podrá incrementar la generación a lo sumo en 1% en comparación a un panel FV instalado sobre un techo de concreto a una altura de un metro. Este porcentaje es válido si la velocidad de viento no es superior a 1 m/s; será menor a medida que la velocidad del viento aumente.

Un caso especial de análisis consiste en comparar el efecto de una altura de instalación a 25 cm, considerando un techo verde y un techo de concreto con superficie reflectiva. En esta condición, la reflectancia del techo de concreto puede aumentar levemente la radiación solar incidente en el panel FV y contrarrestar los efectos negativos de la mayor temperatura del aire circundante.

Esto podría hacer que el panel FV sobre concreto genere más energía que el panel FV sobre techo verde, pues aunque la vegetación proporciona un ambiente más fresco que el concreto, el albedo de la vegetación es menor al albedo del recubrimiento reflectivo del concreto. Según los resultados experimentales, la mayor generación de energía será de aproximadamente un 1%.

La altura de instalación del panel FV sobre el techo verde también está supeditada a la altura máxima permisible de la vegetación, ya que los sombreamientos ocasionarán pérdidas mayores al reducido beneficio térmico que ofrece el techo verde.

Es importante indicar que un techo verde puede producir beneficio térmico siempre y cuando tenga un nivel de humedad satisfactorio, puesto que si no se convertirá en un acumulador de calor reduciendo la expectativa de vida de la vegetación e incrementando la temperatura del aire circundante.

4.4.2 Velocidad del viento

Las terrazas de las edificaciones son lugares que pueden tener pocas obstrucciones para el flujo del viento, por lo cual puede existir un potencial aprovechable de bajas velocidades del aire para la ventilación natural de los paneles FV.

Vientos de hasta 2 m/s pueden reducir la temperatura del panel FV hasta en un 20% (15 °C) en comparación con un panel FV no ventilado, esto según los resultados obtenidos en esta investigación. Tal reducción de la temperatura puede incrementar la generación de energía eléctrica diaria entre un 1% y 3%.

4.4.3 Irrigación de la superficie superior del panel FV

A partir de los resultados obtenidos con respecto al efecto de los doce regímenes analizados, se encontró que la obtención de un beneficio energético neto, el cual ocurre cuando la energía eléctrica adicional producida por la irrigación es mayor a la energía eléctrica consumida por el sistema de irrigación, depende mayormente de: la radiación solar, el tiempo de irrigación, el tiempo de no irrigación y el consumo de energía eléctrica del sistema de irrigación, entre otros.

Por lo cual, no se puede generalizar el uso de un régimen específico. Más aún, se observó que un ciclo de operación rígido no es conveniente para la irrigación, y en cambio, ésta debiese ser gestionada de forma automática según las condiciones específicas de cada instante, en el cual se definiría si se irriga o no y cada cuánto debe ser llevada a cabo la irrigación. Tal planteamiento se expone en el Capítulo 8 y corresponde a un aporte de esta Tesis Doctoral.

Como aspectos generales, se aprecia lo siguiente: la irrigación puede reducir la temperatura del panel FV a niveles cercanos a la temperatura ambiente; el beneficio energético máximo puede ser de hasta el 10% para la energía eléctrica generada durante todo un día; y en algunos instantes con alta radiación solar, se podrá incrementar la potencia eléctrica generada en hasta un 20%.

Se determinó que el caudal de irrigación debe ser de aproximadamente 5 l/min. Este caudal se caracterizará por una constante de tiempo de enfriamiento de aproximadamente 45 segundos; lo cual quiere decir que a los 135 segundos (poco más de dos minutos) la irrigación habrá reducido la diferencia de temperatura del panel FV con respecto a la temperatura ambiente en más del 90%.

Ahora bien, es importante indicar que el agua de irrigación proveniente del tanque aumentará su temperatura debido al calor removido del panel FV, que junto con la radiación solar causan que la temperatura del panel FV no logre descender al nivel de la temperatura ambiente.

La potencia eléctrica de la bomba de recirculación es un factor determinante en la viabilidad energética de la irrigación de un panel FV, ya que la energía consumida será definida mayormente por esta potencia y el tiempo de irrigación, que se recomienda no sea superior a 5 minutos. La potencia de la bomba es definida por el caudal requerido y por la diferencia de altura entre la parte alta del panel FV y la ubicación del tanque de agua. Entre menor sea la potencia eléctrica de la bomba mayor será el beneficio energético.

4.4.4 Hallazgos complementarios

La existencia de un sistema FV provee sombreadamiento¹⁰ a la terraza de una edificación, lo que reducirá la radiación solar incidente en la superficie exterior de ésta. En momentos cercanos al mediodía (de 10 a.m. a 3 p.m.), y con altos niveles de radiación solar ($> 700 \text{ W/m}^2$), el sombreadamiento en una terraza sin techo verde puede lograr que la temperatura de la superficie del techo sea de 35°C en comparación a una sección expuesta que estaría cerca a los 45°C . Si se considera que la temperatura interior es de 25°C , el sombreadamiento estaría reduciendo a la mitad la diferencia térmica, y por ende, de manera significativa la transferencia de calor al interior de la edificación.

El efecto antes descrito para una terraza sin paneles FV será mucho menor si existe cubierta vegetal, ya que ésta ofrece un aislamiento térmico a la edificación. En caso de que se instalen paneles FV, éstos producirán sombreadamiento a la vegetación, lo cual reduciría su estrés térmico, evidenciado en una menor temperatura y una menor tasa de evapotranspiración.

A partir de un estudio especializado desarrollado por Vásquez et al. [33], en el marco del proyecto COLCIENCIAS¹¹ referido al inicio de este documento, y que fue coordinado por el autor de esta Tesis Doctoral, se analizó durante tres meses el efecto del sombreadamiento

¹⁰ Se refiere a evitar la incidencia de la radiación solar.

¹¹ Título: Validación experimental del beneficio energético de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con techos verdes para entornos tropicales con clima cálido (Convocatoria 700 de 2014). (Código VIE #8574).

de los paneles FV en el crecimiento y el nivel de concentración de pigmentos fotosintéticos (Clorofila a y b y Carotenos) de tres especies del género *Sedum* (*Crassulacea*).

Se encontró que el sombreado produce los siguientes efectos: (i) reducción en el estrés hídrico de la vegetación dado que ayuda a mantener el nivel de humedad del sustrato; (ii) aumento del crecimiento de la vegetación en cerca del 50%, siendo 15,8 centímetros la altura promedio de la vegetación al final del análisis cuando el sombreado es del 100% y de sólo 10,5 centímetros cuando hubo exposición permanente a la radiación solar; (iii) los niveles de pigmentos se mantuvieron casi iguales para la vegetación con 100% de sombreado y se redujo en cerca del 50% para el caso con exposición permanente a la radiación solar, lo cual se debe a que el exceso de radiación solar puede inhibir el proceso de fotosíntesis.

5. MODELADO MATEMÁTICO POR REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN Y LA POTENCIA GENERADA POR UN PANEL FV

La predicción del comportamiento de un panel FV es fundamental para estimar su desempeño como fuente de generación renovable de energía, lo cual es tema de interés en los campos académico, comercial e industrial. En general, tal comportamiento depende del micro-clima del emplazamiento donde se encuentre ubicado el sistema FV y de sus características técnicas.

Uno de los alcances de esta investigación fue contribuir a la temática de predicción del comportamiento de paneles FV para un clima tropical cálido, a partir de los resultados obtenidos del análisis de la influencia de los factores presentado en el Capítulo 5. Por ello, se caracteriza el comportamiento de un panel FV a partir del modelado por regresión de la temperatura de operación (T_{oper}) y la potencia eléctrica generada (P_{gen}).

En el Capítulo 5 se determinó de manera experimental que dos de los cuatro factores, velocidad del viento e irrigación, generan un impacto importante en el comportamiento del panel FV, mientras que el tipo de techo y la altura de instalación pueden producir una leve afectación (positiva o negativa) a la potencia generada. En consecuencia, se aborda el modelado matemático de la temperatura de operación y de la potencia eléctrica generada por un panel FV considerando principalmente la influencia de factores como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento.

El modelado matemático se estableció desde dos enfoques, por regresión (Capítulo 6) y basado en analogías termoeléctricas (Capítulo 7). En cada capítulo se presenta la fundamentación para la obtención del modelado matemático y se determina su grado de utilidad a partir de un proceso de validación. El hecho de irrigación se aborda en el Capítulo 7.

Un modelo matemático es paramétrico o de regresión cuando está en función de un número finito de parámetros a ser estimados a partir de los datos obtenidos. Este tipo de modelado es viable para el desarrollo de esta investigación ya que se identificaron factores de influencia sobre el comportamiento del panel FV y se obtuvo un gran número de datos para diversos escenarios de operación de los paneles FV.

Adicionalmente, este tipo de modelo es atractivo por su usabilidad; sin embargo, es importante aclarar que su aplicabilidad como herramienta de predicción es válida cuando la variación de las variables de influencia se encuentra dentro del rango de valores de la experimentación que originó el modelo por regresión.

Para este modelado propuesto, se considera que el panel FV es operado por una unidad de gestión que garantiza su operación en el punto de máxima potencia (MPPT – *máximum power point*); tal unidad de gestión puede ser un micro-inversor, un inversor centralizado, o un regulador o controlador, entre otros. Tal consideración es válida ya que las unidades de gestión ofrecidas en el mercado se caracterizan por tal consigna de operación. Esta condición no se cumplirá en algunas ocasiones para los sistemas aislados, cuando la potencia demandada por el controlador sea menor a la potencia máxima que puede entregar el panel FV en el instante t . En esta condición, el controlador operará al panel FV en un punto distinto (de menor potencia) al punto de máxima potencia.

5.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

El modelado matemático por regresión busca determinar la relación de influencia de un conjunto de variables independientes sobre una variable dependiente. En esta investigación

hay dos variables dependientes, la temperatura de operación (T_{oper}) y la potencia eléctrica generada (P_{gen}).

La temperatura de operación (T_{oper}) podrá depender de una o varias variables independientes, específicamente de las variables micro-climáticas (radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente). También se considera la influencia de la otra variable dependiente, la potencia eléctrica generada, y de valores precedentes de variables independientes al instante de análisis, inclusive de la misma temperatura de operación.

En total, se consideraron diez (10) modelos de la temperatura de operación (T1 a T10), ya que éstos logran cubrir las posibilidades de variación de las variables consideradas como influyentes. La Tabla 21 lista las variables seleccionadas y la Tabla 22 presenta los coeficientes asociados a cada modelo propuesto de acuerdo a las variables de influencia.

Tabla 21. Variables consideradas para el modelado por regresión.

	Variable	Unidad
RS	Radiación solar	W/m^2
RS^2	Radiación solar al cuadrado	W^2/m^4
$T_{amb}(t)$	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
$T_{amb}^2(t)$	Temperatura ambiente al cuadrado	$^{\circ}C^2$
$v_{aire}(t)$	Velocidad del aire	m/s
$v_{aire}^2(t)$	Velocidad del aire al cuadrado	m^2/s^2
$P_{gen}(t)$	Potencia eléctrica generada	W
$RS(t-1)$	Radiación solar en el instante $t-1$	W/m^2
$T_{amb}(t-1)$	Temperatura ambiente en el instante $t-1$	$^{\circ}C$
$T_{oper}(t-1)$	Temperatura de operación en el instante $t-1$	$^{\circ}C$

Tabla 22. Coeficientes de los modelos de regresión de la temperatura de operación del panel FV.

Caso	Variables de influencia										
	Offset	$RS(t)$	$RS^2(t)$	$T_{amb}(t)$	$T_{amb}^2(t)$	$v_{aire}(t)$	$v_{aire}^2(t)$	$P_{gen}(t)$	$T_{oper}(t-1)$	$RS(t-1)$	$T_{amb}(t-1)$
T1	r_0	r_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	-	r_1	-	t_1	-	-	-	-	-	-	-
T3	-	r_1	-	t_1	t_2	-	-	-	-	-	-
T4	-	r_1	r_2	t_1	-	-	-	-	-	-	-
T5	-	r_1	r_2	t_1	t_2	-	-	-	-	-	-
T6	-	r_1	-	t_1	-	v_1	-	-	-	-	-
T7	-	r_1	r_2	t_1	t_2	v_1	v_2	-	-	-	-
T8	-	r_1	r_2	t_1	t_2	v_1	v_2	-	to_1	rs_1	ta_1
T9	-	r_1	-	t_1	-	v_1	-	-	to_1	-	-
T10	-	r_1	-	t_1	-	v_1	-	p_1	to_1	-	-

Para determinar el valor de la temperatura de operación en un instante t se consideraron dos enfoques, la dependencia exclusiva de variables micro-climáticas en tiempo real como muestran los modelos T1 a T7, y la dependencia de valores tanto en tiempo real como de instantes precedentes abordada por los modelos T8 a T10. La formulación matemática de los modelos propuestos es presentada en las expresiones (9) a (18).

$$T_{oper_1}(t) = r_0 + r_1 \cdot RS(t) \quad (9)$$

$$T_{oper_2}(t) = r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{amb}(t) \quad (10)$$

$$T_{oper_3}(t) = r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{amb}(t) + t_2 \cdot T_{amb}(t)^2 \quad (11)$$

$$T_{oper_4}(t) = r_1 \cdot RS(t) + r_2 \cdot RS(t)^2 + t_1 \cdot T_{amb}(t) \quad (12)$$

$$T_{oper_5}(t) = r_1 \cdot RS(t) + r_2 \cdot RS(t)^2 + t_1 \cdot T_{amb}(t) + t_2 \cdot T_{amb}(t)^2 \quad (13)$$

$$T_{oper_6}(t) = r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{amb}(t) + v_1 \cdot v_{aire}(t) \quad (14)$$

$$T_{oper_7}(t) = r_1 \cdot RS(t) + r_2 \cdot RS(t)^2 + t_1 \cdot T_{amb}(t) + t_2 \cdot T_{amb}(t)^2 + v_1 \cdot v_{aire}(t) + v_2 \cdot v_{aire}(t)^2 \quad (15)$$

$$T_{oper_8}(t) = r_1 \cdot RS(t) + r_2 \cdot RS(t)^2 + t_1 \cdot T_{amb}(t) + t_2 \cdot T_{amb}(t)^2 + v_1 \cdot v_{aire}(t) + v_2 \cdot v_{aire}(t)^2 + rs_1 \cdot RS(t-1) + ta_1 \cdot T_{amb}(t-1) + to_1 \cdot T_{oper}(t-1) \quad (16)$$

$$T_{oper_9}(t) = r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{amb}(t) + v_1 \cdot v_{aire}(t) + to_1 \cdot T_{oper}(t-1) \quad (17)$$

$$T_{oper_10}(t) = r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{amb}(t) + v_1 \cdot v_{aire}(t) + to_1 \cdot T_{oper}(t-1) + p_1 \cdot P_{gen}(t) \quad (18)$$

Con relación a la estimación de la potencia eléctrica generada (P_{gen}), ésta puede ser realizada a partir de varias expresiones basadas en las características técnicas del panel FV. La expresión (19) muestra un modelo teórico para el cálculo de la potencia eléctrica generada, denominada PI ($P_{gen_t1}(t)$), como función de la radiación solar ($RS(t)$), la eficiencia nominal (η_{nom}) y el área del panel FV (A_{PV}). Con el fin de evaluar la utilidad de tal planteamiento, se

considera conveniente establecer el modelo por regresión P1 ($P_{gen_1}(t)$), tal como es mostrado por la expresión (20).

$$P_{gen_t1}(t) = \eta_{nom} \cdot A_{PV} \cdot RS(t) \quad (19)$$

$$P_{gen_1}(t) = r_1 \cdot RS(t) \quad (20)$$

La expresión (21) presenta un segundo modelo de estimación de la potencia eléctrica generada, denominado P2 ($P_{gen_t2}(t)$). Este modelo introduce el coeficiente térmico de potencia nominal (β_{nom}) y la temperatura de operación ($T_{oper}(t)$). Las relaciones de dependencia de $P_{gen_t2}(t)$ dan origen al modelo propuesto $P_{gen_2}(t)$ indicado en la expresión (22).

$$\begin{aligned} P_{gen_t2}(t) &= P_{gen_1}(t) \cdot \left(1 + \beta_{nom}(T_{oper}(t) - 25)\right) \\ &= \eta_{nom} \cdot A_{PV} \cdot RS(t) \left(1 + \beta_{nom}(T_{oper}(t) - 25)\right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$P_{gen_2}(t) = r_1 \cdot RS(t) + r_1 t_1 \cdot RS(t) \cdot T_{oper}(t) \quad (22)$$

La expresión (23) presenta un tercer modelo de cálculo de la potencia eléctrica generada, denominado P3 ($P_{gen_3}(t)$), el cual considera que el coeficiente térmico de potencia no es un valor fijo y es función de la temperatura de operación y la radiación solar como muestra la expresión (24). En ese sentido, se origina un modelo no lineal como el mostrado en (25).

$$P_{gen_3}(t) = \eta_{nom} \cdot A_{PV} \cdot RS(t) \left(1 + \beta'(T_{oper}(t) - 25)\right) \quad (23)$$

$$\beta' = \beta_{nom} \cdot \left(c_0 + c_1 \cdot T_{oper}(t) + c_2 \cdot RS(t)\right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} P_{gen_3}(t) &= r_1 \cdot RS(t) + r_1 t_1 \cdot RS(t) \cdot T_{oper}(t) + r_1 t_2 \cdot RS(t) \cdot T_{oper}(t)^2 \\ &\quad + r_2 t_1 \cdot RS(t)^2 \cdot T_{oper}(t) + r_2 \cdot RS(t)^2 \end{aligned} \quad (25)$$

Otro modelo denominado P4 ($P_{gen_4}(t)$) es presentado por la expresión (26), el cual se basa en el modelo P3 e incluye otros factores como $T_{oper}(t)$, $T_{oper}(t)^2$, $RS(t) \cdot T_{oper}(t)$ y $RS(t)^2 \cdot T_{oper}(t)^2$.

$$\begin{aligned}
P_{gen_4}(t) = & r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{oper}(t) + r_2 \cdot RS(t)^2 + t_2 \cdot T_{oper}(t)^2 + r_1 t_1 \\
& \cdot RS(t) \cdot T_{oper}(t) + r_1 t_2 \cdot RS(t) \cdot T_{oper}(t)^2 + r_2 t_1 \cdot RS(t)^2 \\
& \cdot T_{oper}(t) + r_2 t_2 \cdot RS(t)^2 \cdot T_{oper}(t)^2
\end{aligned} \quad (26)$$

Finalmente, se consideran dos modelos denominados $P_{gen_5}(t)$ y $P_{gen_6}(t)$ para explorar otras combinaciones, los cuales son descritos por las expresiones (27) y (28), completando así el listado de modelos propuestos.

$$P_{gen_5}(t) = r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{oper}(t) \quad (27)$$

$$P_{gen_6}(t) = r_1 \cdot RS(t) + t_1 \cdot T_{oper}(t) + r_2 \cdot RS(t)^2 + t_2 \cdot T_{oper}(t)^2 \quad (28)$$

En total, se definieron seis (6) modelos de acuerdo a las consideraciones mencionadas, a partir de los cuales se podría estimar la potencia eléctrica generada (P1 a P6) como funciones en tiempo real de la radiación solar y la temperatura de operación. La Tabla 21 muestra las variables seleccionadas y la Tabla 23 presenta los coeficientes asociados a cada modelo y variables de influencia.

Tabla 23. Coeficientes de los modelos de regresión de la potencia eléctrica generada por el panel FV.

Caso	Variables de influencia							
	$RS(t)$	$RS^2(t)$	$T_{oper}(t)$	$T_{oper}^2(t)$	$RS(t) \cdot T_{oper}(t)$	$RS(t) \cdot T_{oper}(t)^2$	$RS(t)^2 \cdot T_{oper}(t)$	$RS(t)^2 \cdot T_{oper}(t)^2$
P1	r_1	-	-	-	-	-	-	-
P2	r_1	-	-	-	$r_1 t_1$	-	-	-
P3	r_1	r_2	-	-	$r_1 t_1$	$r_1 t_2$	$r_2 t_1$	-
P4	r_1	r_2	t_1	t_2	$r_1 t_1$	$r_1 t_2$	$r_2 t_1$	$r_2 t_2$
P5	r_1	-	t_1	-	-	-	-	-
P6	r_1	r_2	t_1	t_2	-	-	-	-

5.2 FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MODELOS POR REGRESIÓN

A continuación se presenta el procedimiento para la obtención del modelo, las consideraciones para evaluar la adecuación del mismo, e indicadores para evaluar las pruebas de validación. Esta fundamentación matemática se basa en lo expuesto por Montgomery y Runger [34] y Montgomery [35].

5.2.1 Procedimiento matemático

La estimación de la temperatura de operación y de la potencia eléctrica generada por un panel FV se basa en el modelado de la expresión (29), donde \mathbf{y} es el vector de la variable dependiente (temperatura de operación o potencia eléctrica generada), \mathbf{X} es la matriz de valores de las variables independientes o de influencia, $\boldsymbol{\beta}$ es el vector de coeficientes asociado a cada variable independiente (valores a ser hallados) y $\boldsymbol{\varepsilon}$ el vector de errores o residuos de observación (diferencia entre el valor real y el valor estimado por el modelo). La primera columna de \mathbf{X} será igual a 1 sólo si el modelo considera la existencia de una constante. Este modelo considera n observaciones y p coeficientes, y para que pueda ser resuelto se debe cumplir que n sea significativamente mayor a p .

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (29)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

La estimación de los coeficientes (β_i) del modelo se determinan por medio de la expresión (30), planteamiento que se basa en la minimización del valor de los elementos del vector $\boldsymbol{\varepsilon}$, donde $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ es el vector de estimación de $\boldsymbol{\beta}$. La expresión (31) establece el cálculo del vector $\hat{\mathbf{y}}$, el cual es la estimación del vector \mathbf{y} . La expresión (32) indica cómo estimar el valor de la variable dependiente para la observación i .

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{y} \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \cdot \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (31)$$

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij} \quad (32)$$

El error de la estimación se expresa por medio de un vector de residuales denominado e , tal como muestra la expresión (33).

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad (33)$$

5.2.2 Evaluación de la adecuación del modelo

Con el fin de determinar la calidad del modelo desde el enfoque estadístico, se realiza una evaluación con base en un conjunto de indicadores como lo son: el error estándar del modelo, el coeficiente de determinación, el error estándar de los coeficientes de la regresión, así como la realización de una prueba de la hipótesis. A continuación se presenta la formulación matemática para llevar a cabo la evaluación mencionada.

Inicialmente, se deben determinar las sumas de los cuadrados del error (SS_E), de la regresión (SS_R) y total (SS_T), por medio de las expresiones (34), (35) y (36), respectivamente.

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \mathbf{y}^T \cdot \mathbf{y} - \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{y} \quad (34)$$

$$SS_R = \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{y} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} = SS_T - SS_E \quad (35)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \mathbf{y}^T \cdot \mathbf{y} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} = \mathbf{y}^T \cdot \mathbf{y} - n \cdot \bar{y}^2 \quad (36)$$

Seguidamente, se calcula el error estándar del modelo ($\hat{\sigma}$) que indica la diferencia entre los valores reales y los estimados del modelo, y permite determinar si existe una correlación entre la regresión y los valores medidos; entre menor sea el valor, mejor será la calidad del modelo. El error estándar se calcula como la raíz cuadrada de la varianza del error ($\hat{\sigma}^2$), la cual se determina por medio de la expresión (37), donde n es el número de observaciones y p es número de coeficientes del modelo.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n - p} \quad (37)$$

El coeficiente de determinación (R^2) es un indicador que establece la variabilidad de los datos por medio del modelo establecido; su valor estará entre 0 y 1, y entre mayor sea, mejor se considera la calidad del modelo. Se obtiene como la relación entre las sumas de

cuadrados de la regresión (SS_R) y total (SS_T), tal como muestra la expresión (38). Una variante de este indicador es el coeficiente $R_{ajustado}^2$ que considera el número de coeficientes del modelo; se calcula por medio de la expresión (39). Ambos coeficientes tienden a ser iguales cuando se cumple que n sea significativamente mayor a p .

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (38)$$

$$R_{ajustada}^2 = 1 - \frac{SS_E / gl_E}{SS_T / gl_T} = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{SS_T / (n - 1)} = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - p} \right) (1 - R^2) \quad (39)$$

El error estándar de un coeficiente mide la exactitud con la que el modelo estima el valor desconocido del coeficiente. Es un valor siempre positivo y habrá tantos valores como coeficientes tenga el modelo. Para determinar estos valores se debe inicialmente determinar la matriz de covarianza estimada, tal como lo indica la expresión (40). Posteriormente, se selecciona la diagonal de la matriz resultante, lo cual genera un vector con las varianzas de error estándar de cada coeficiente, siendo $Se(\hat{\beta}_j)$ el error estándar del coeficiente de regresión $\hat{\beta}_j$.

$$Cov(\hat{\beta}) = \hat{\sigma}^2 \cdot (X^T X)^{-1} \quad (40)$$

$Se(\hat{\beta}_j)$ se obtiene como lo muestra la expresión (41), donde C_{jj} es el elemento de la diagonal de $(X^T X)^{-1}$ correspondiente a β_j .

$$Se(\hat{\beta}_j) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 \cdot C_{jj}} \quad (41)$$

Ahora, se continua con el cálculo de la tabla de análisis de la varianza del modelo, conocido como ANOVA (*Analysis of variance*). La Tabla 24 indica cómo calcular los cuadrados medios de la regresión y del error y el estadístico F_0 .

El cálculo del estadístico F_0 posibilita llevar a cabo una prueba de hipótesis sobre la significancia de los coeficientes β_j , la cual tiene la siguiente hipótesis nula $H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$. Se podrá rechazar la hipótesis si el estadístico F_0 cae fuera de la región de aceptación

comprendida entre 0 y el valor crítico $F_{\alpha,p,n-p-1}$, donde α es el nivel de significancia (e.g. 5%), y p y $n - p - 1$ son los grados de libertad. El valor $F_{\alpha,p,n-p-1}$ se obtiene por medio de tablas de la distribución estadística F.

Tabla 24. Esquema del análisis de la varianza de la significación de la regresión.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor crítico	Valor P
Regresión	SS_R	p	$MS_R = SS_R/p$	MS_R/MS_E	$F_{\alpha,p,n-p-1}$	$f(F_0)$
Error	SS_E	$n - p - 1$	$MS_E = \frac{SS_E}{(n - p - 1)} = \hat{\sigma}^2$			
Total	SS_T	$n - 1$				

También se puede hacer uso del valor P para inferir sobre H_0 ; específicamente, se rechazará la hipótesis nula si el valor P del estadístico F_0 es menor que α .

5.2.3 Prueba de validación del modelado obtenido

Con el fin de evaluar la capacidad de predicción de los modelos propuestos, se lleva a cabo un análisis comparativo de los valores reales (y_i) y los valores estimados (\hat{y}_i) por el modelo. El análisis se basa en dos indicadores: la raíz del error cuadrático medio o *root mean-square-error* – RMSE y la raíz del error cuadrático medio normalizado o *normalized root-mean-square error* – NRMSE, que son presentados en las expresiones (42) y (43).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{42}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{\max} - y_{\min}} \tag{43}$$

Se aclara que en esta investigación se conformaron dos conjuntos de datos (independientes), uno para la construcción de los modelos propuestos y otro para su validación; esto con el fin de propender por resultados confiables.

5.3 MODELADO DE REGRESIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL PANEL FV

Para llevar a cabo un modelado apropiado por regresión, se debe garantizar un número adecuado de observaciones que hayan sido adquiridas por medio de equipos de alta calidad (baja incertidumbre). Una observación hace referencia al conjunto de datos de las variables independientes y dependientes adquiridas en un instante de tiempo t .

En total, se utilizaron los datos de aproximadamente 25000 observaciones adquiridas por el sistema de monitorización presentado en el Capítulo 4. El tiempo de muestreo de la toma de observaciones fue de un minuto ($\Delta t = 1 \text{ min}$), debido a que es el menor tiempo de almacenamiento de datos de los medidores de energía AcuREV2020.

Los datos de las observaciones adquiridos por cada fuente (dataloggers y medidores de energía) se consolidaron en archivos de EXCEL, que posteriormente se importaron a MATLAB para llevar a cabo los cálculos requeridos.

A partir del procedimiento indicado en la Sección 5.2.1 se establecieron los modelos propuestos. La Tabla 25 presenta los valores de estimación de los coeficientes y sus errores estándar para cada uno de los modelos de regresión propuestos de la temperatura de operación del panel FV.

Se puede apreciar que los coeficientes de los factores de influencia: $RS(t)$, $RS^2(t)$, $T_{amb}(t)$, $T_{amb}^2(t)$, $P_{gen}(t)$, $T_{oper}(t - 1)$, $RS(t - 1)$ y $T_{amb}(t - 1)$ son estimaciones satisfactorias dado que los valores de los errores estándar son significativamente menores a éstos.

Por otro lado, se encontró que el error estándar de $v_{aire}(t)$ es satisfactorio para los modelos T9 y T10, aunque no para los modelos T6, T7 y T8. De manera similar se estableció que $v_{aire}^2(t)$ no es un factor de influencia que deba ser considerado en el modelado, dado los resultados obtenidos para los modelos T7 y T8.

Un aspecto a destacar de los modelos T8, T9 y T10 es la alta influencia de la temperatura de operación del instante precedente sobre sí misma en el instante t de análisis. Esto se debe

a que el panel FV es un cuerpo que experimenta de forma continua procesos de almacenamiento y liberación de calor, lo que ocasiona un régimen transitorio permanente; por tanto, el valor de la temperatura de operación en el instante t no puede ser definido solo por los valores de las variables de influencia de ese mismo instante, sino que depende de su estado en el instante de tiempo de análisis anterior.

Tabla 25. Valores de los coeficientes (en negro) y sus errores estándar (en azul) correspondientes a los modelos de regresión de la temperatura de operación.

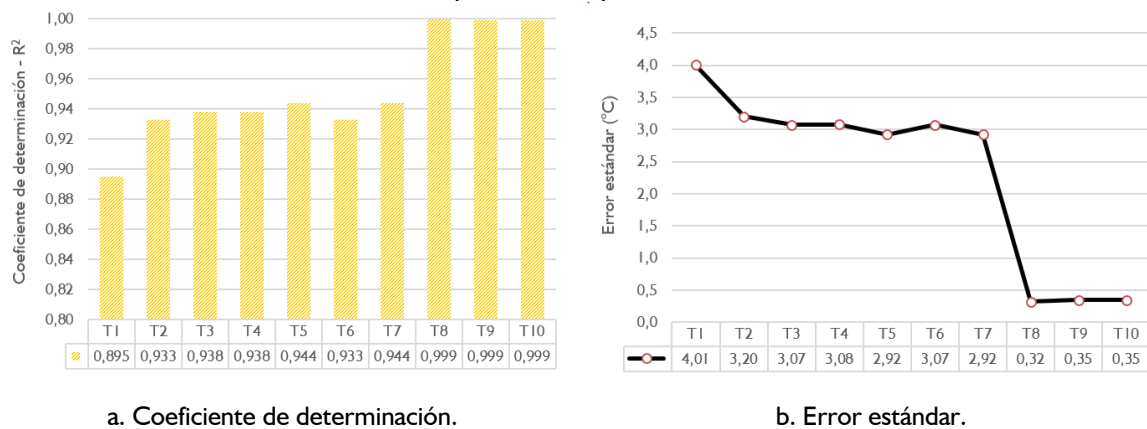
Caso	Variables de influencia										
	Offset	$RS(t)$	$RS^2(t)$	$T_{amb}(t)$	$T_{amb}^2(t)$	$v_{aire}(t)$	$v_{aire}^2(t)$	$P_{gen}(t)$	$T_{oper}(t-1)$	$RS(t-1)$	$T_{amb}(t-1)$
T1	23,14	0,0353	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,031	0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	-	0,0237	-	0,9918	-	-	-	-	-	-	-
	-	0,0001	-	0,0010	-	-	-	-	-	-	-
T3	-	0,0264	-	1,1702	-0,0074	-	-	-	-	-	-
	-	0,0001	-	0,0039	0,0002	-	-	-	-	-	-
T4	-	0,0333	$-10,6 \cdot 10^{-6}$	0,9722	-	-	-	-	-	-	-
	-	0,0022	$2 \cdot 10^{-6}$	0,0011	-	-	-	-	-	-	-
T5	-	0,0366	$-11,1 \cdot 10^{-6}$	1,1585	-0,0078	-	-	-	-	-	-
	-	0,0022	$2 \cdot 10^{-6}$	0,0037	0,0002	-	-	-	-	-	-
T6	-	0,0238	-	0,9922	-	-0,0573	-	-	-	-	-
	-	0,0001	-	0,0011	-	0,0368	-	-	-	-	-
T7	-	0,0366	$-11,0 \cdot 10^{-6}$	1,1576	-0,0078	0,1147	-0,0498	-	-	-	-
	-	0,0002	$2 \cdot 10^{-6}$	0,0038	0,0002	0,0871	0,0241	-	-	-	-
T8	-	0,00146	$9,19 \cdot 10^{-8}$	0,1726	-0,0010	-0,0353	-0,0160	-	0,9302	0,0008	-0,0808
	-	0,00005	$2,54 \cdot 10^{-8}$	0,0032	0,00002	0,0096	0,0027	-	0,0007	0,00004	0,0032
T9	-	0,0017	-	0,0571	-	-0,1036	-	-	0,9403	-	-
	-	0,00002	-	0,0007	-	0,0040	-	-	0,0006	-	-
T10	-	0,0016	-	0,0586	-	-0,1083	-	0,0010	0,9388	-	-
	-	0,00002	-	0,0007	-	0,0040	-	0,0001	0,0007	-	-

El coeficiente de determinación ajustado y el error estándar de cada uno de los modelos se presenta en la Figura 54. Se aprecia que 9 de los 10 modelos (T2 a T10) establecen de manera satisfactoria la variabilidad de los datos a partir de los factores de influencia seleccionados, dado que los valores de $R_{ajustada}^2$ son mayores a 0,9 (criterio definido para esta investigación). Se destaca que el $R_{ajustada}^2$ de los modelos T8, T9 y T10 es muy cercano a 1; ello se debe a la inclusión del valor precedente de la variable dependiente ($T_{oper}(t-1)$).

Por otro lado, se indica que los valores de R^2 y $R^2_{ajustada}$ pueden ser considerados iguales debido a la gran cantidad de observaciones analizadas ($\approx 25\ 000$).

Con respecto al error estándar de los modelos ($\hat{\sigma}$), se aprecia que a mayor número de factores de influencia se mejora la capacidad de predicción del modelo. El error estándar de los modelos T1 a T7 oscila entre 3°C y 4°C , y disminuye a $0,3^\circ\text{C}$ para los modelos T8, T9 y T10.

Figura 54. Coeficientes de determinación ajustados y errores estándar de los modelos de regresión de la temperatura de operación.



La Tabla 26 presenta los resultados del análisis de la varianza de cada uno de los modelos. Se aprecia para todos los casos que el valor del estadístico F_0 es significativamente mayor al valor crítico $F_{\alpha,p,n-p-1}$, lo cual permite rechazar la hipótesis nula con un nivel de significancia de 5%, evidenciándose la calidad de los modelos establecidos.

Ahora, con el fin de validar la efectividad de la predicción del modelado establecido, se determinaron los índices RMSD y NRMSD para dos casos de operación del panel FV, con ventilación natural en sitio (Caso A) y con ventilación forzada de dos metros por segundo ($2\ \text{m/s}$) (Caso B). Para este análisis se emplearon los modelos T5 y T9.

Las curvas obtenidas del análisis comparativo se muestran en las figuras 55 y 56, donde Top_Est_P5 y $Tope_Est_P9$ representan las temperaturas de operación del panel FV estimadas por medio de los modelos T5 y T9, respectivamente. La franja de color amarillo de la

Figura 56 representa el tiempo de operación de los ventiladores usados para brindar la ventilación forzada al panel FV. A partir de una apreciación cualitativa, se puede indicar que la predicción realizada por los modelos T5 y T9 es aceptable.

Tabla 26. Análisis de varianza de la significación de los modelos de regresión de la temperatura de operación.

MODELO	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	$F_{\alpha,p,n-p-1}$	α	Valor P
T1	Regresión	$3,454 \cdot 10^6$	2	$1,727 \cdot 10^6$	$107,6 \cdot 10^3$	2,9961	5%	0
	Error	$406,3 \cdot 10^3$	25 305	$16,06 = 4,007^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T2	Regresión	$3,6006 \cdot 10^6$	2	$1,800 \cdot 10^6$	$175,4 \cdot 10^3$	2,9961	5%	0
	Error	$259,7 \cdot 10^3$	25 305	$10,26 = 3,203^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T3	Regresión	$3,622 \cdot 10^6$	3	$1,207 \cdot 10^6$	$127,90 \cdot 10^3$	2,6053	5%	0
	Error	$238,8 \cdot 10^3$	25 304	$9,44 = 3,072^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T4	Regresión	$3,621 \cdot 10^6$	3	$1,207 \cdot 10^6$	$127,58 \cdot 10^3$	2,6053	5%	0
	Error	$239,4 \cdot 10^3$	25 304	$9,46 = 3,075^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T5	Regresión	$3,644 \cdot 10^6$	4	$0,911 \cdot 10^6$	$106,49 \cdot 10^3$	2,3723	5%	0
	Error	$216,5 \cdot 10^3$	25 303	$8,55 = 2,924^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T6	Regresión	$3,601 \cdot 10^6$	3	$1,200 \cdot 10^6$	$116,94 \cdot 10^3$	2,6050	5%	0
	Error	$259,7 \cdot 10^3$	25 304	$10,26 = 3,072^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T7	Regresión	$3,644 \cdot 10^6$	6	$0,607 \cdot 10^6$	$71,01 \cdot 10^3$	2,0990	5%	0
	Error	$216,4 \cdot 10^3$	25 301	$8,55 = 2,924^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T8	Regresión	$3,858 \cdot 10^6$	9	$0,4286 \cdot 10^6$	$4,11 \cdot 10^6$	1,8803	5%	0
	Error	$2,639 \cdot 10^3$	25 298	$0,1043 = 0,323^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T9	Regresión	$3,857 \cdot 10^6$	4	$0,964 \cdot 10^6$	$7,934 \cdot 10^6$	2,3723	5%	0
	Error	$3,072 \cdot 10^3$	25 303	$0,1215 = 0,349^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					
T10	Regresión	$3,857 \cdot 10^6$	5	$0,771 \cdot 10^6$	$6,386 \cdot 10^6$	2,2145	5%	0
	Error	$3,057 \cdot 10^3$	25 302	$0,1208 = 0,348^2$				
	Total	$3,860 \cdot 10^6$	25 307					

De manera contraria, se aprecia que el modelo T9 tiene un menor desempeño predictivo de lo esperado, ya que el error estándar se estimó en $0,35^\circ\text{C}$, y sin embargo, se cuantificó el RMSD en $3,77^\circ\text{C}$ y $2,96^\circ\text{C}$, con valores de NRMSD de 10,16% y 8,03%.

Figura 55. Predicción de la temperatura de operación de un panel FV – Caso A.

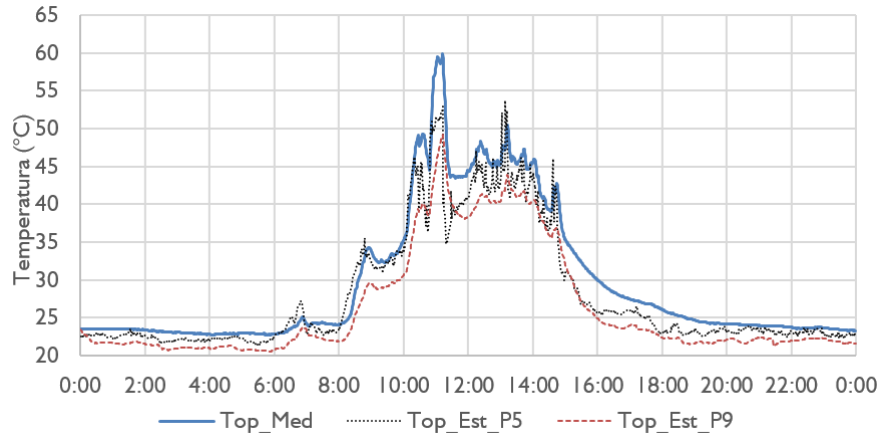


Figura 56. Predicción de la temperatura de operación de un panel FV – Caso B.

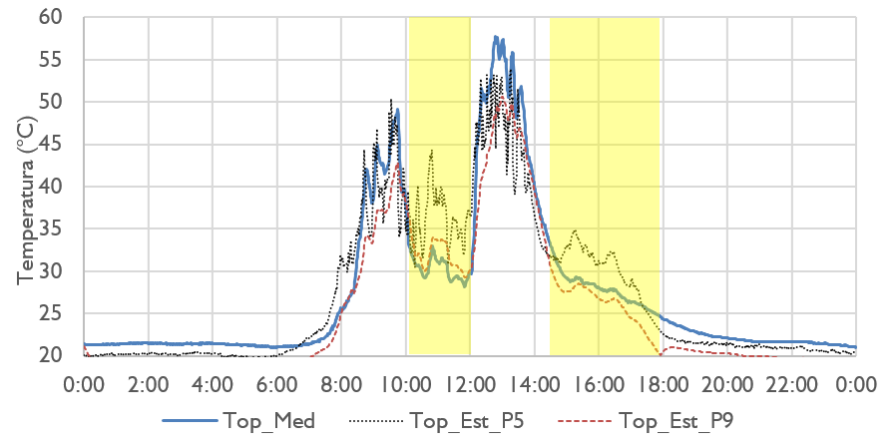


Tabla 27. Cuantificación de la calidad de la predicción de la temperatura operación a partir de los índices RMSD y NRMSD.

	Condición: Normal		Condición: Ventilación forzada (2 m/s)	
	Top_Est_T5	Top_Est_T9	Top_Est_T5	Top_Est_T9
RMSD	2,75 °C	3,77 °C	3,22 °C	2,96 °C
NRMSD	7,40%	10,16%	8,74%	8,03%

Estos resultados indican que aunque el modelo se base en el estado anterior para predecir de mejor manera el estado actual, es aparentemente afectado de forma significativa por el error intrínseco de la estimación precedente. Tal limitación lleva a que la capacidad predictiva de los modelos T5 y T9 sea similar.

Como prueba adicional, se llevó a cabo un análisis de la predicción del modelo T9 para un escenario de alta radiación solar. La Figura 57 muestra la curva estimada a partir del modelo T9, mientras la Figura 58 presenta la curva de residuos (Valor medido – Valor estimado) del caso analizado.

Los valores RMSD y NRMSD de la predicción del modelo T9 ascendieron a 2,33 °C y 5,42% respectivamente, siendo menores a los obtenidos anteriormente, lo que indica que el modelo paramétrico tiene limitaciones para predecir con calidad la temperatura de operación del panel FV en condiciones de alta variabilidad, como lo analizado por medio de la figuras 55 y 56.

Figura 57. Temperatura de operación estimada por el modelo T9.

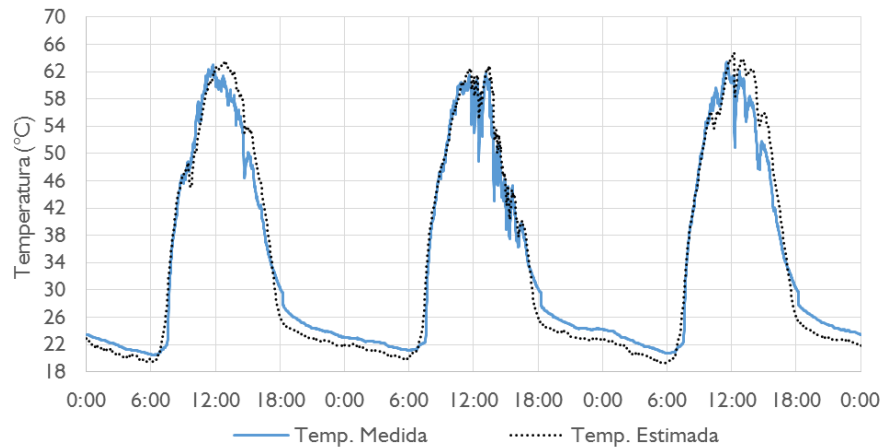
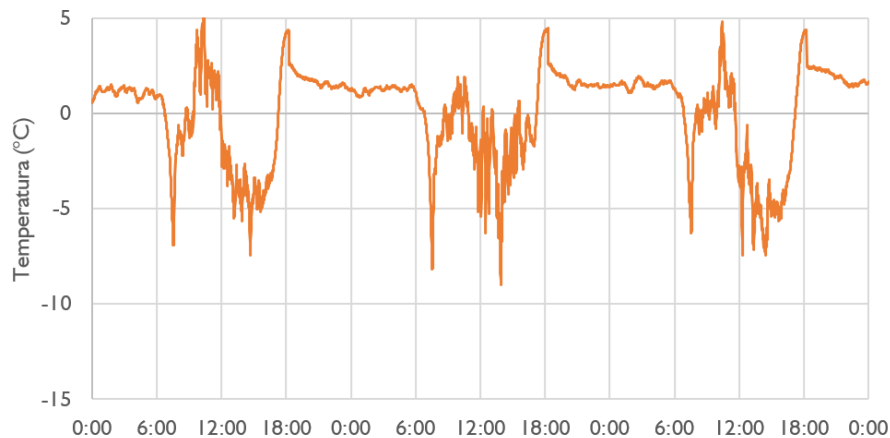


Figura 58. Curva de residuos de la Figura 57.



También se evaluaron estos índices para el modelo T5, dando como resultado errores de 3,00 °C y 6,98%, siendo el valor de RMSD muy cercano al error estándar del modelo (2,9 °C). Tal resultado muestra el comportamiento consistente del modelo T5.

5.4 MODELADO DE REGRESIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA DEL PANEL FV

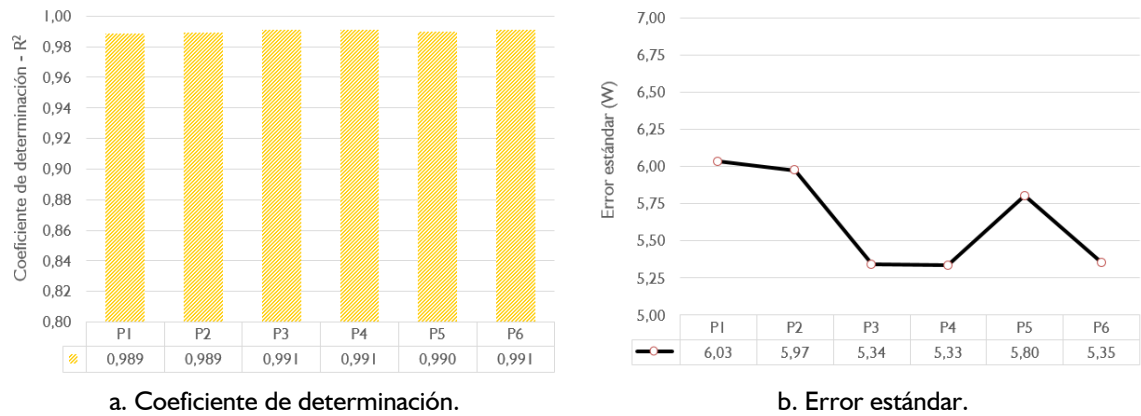
La Tabla 28 presenta los valores de estimación de los coeficientes y sus errores estándar para cada uno de los modelos propuestos de regresión de la potencia eléctrica generada por el panel FV. Se aprecia que los modelos P1, P2, P5 y P6 presentan valores satisfactorios de los errores estándar de sus coeficientes. Por otro lado, los errores de los coeficientes $rs2$ y $r2t1$ del modelo P3 y $rs2$, $t1$, $t2$, $r/t1$, $r2t1$ y $r2t2$ del modelo P4 presentan valores cercanos o mayores en magnitud al coeficiente estimado, por lo cual estos dos modelos (P3 y P4) no se consideran satisfactorios, a pesar de contar con valores del coeficiente de determinación cercanos a 1,0.

Tabla 28. Valores de los coeficientes (en negro) y sus errores estándar (en azul) correspondientes a los modelos de regresión de la potencia generada.

Casos	Variables de influencia							
	$RS(t)$	$RS^2(t)$	$T_{oper}(t)$	$T_{oper}^2(t)$	$RS(t) \cdot T_{oper}(t)$	$RS(t) \cdot T_{oper}(t)^2$	$RS(t)^2 \cdot T_{oper}(t)$	$RS(t)^2 \cdot T_{oper}(t)^2$
P1	0,2168	-	-	-	-	-	-	-
	$1,63 \cdot 10^{-4}$	-	-	-	-	-	-	-
P2	0,2312	-	-	-	$-0,3216 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
	$1,22 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	$0,0269 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
P3	0,1838	$-2,11 \cdot 10^{-5}$	-	-	$2,099 \cdot 10^{-3}$	$-19,5 \cdot 10^{-6}$	$-2,425 \cdot 10^{-7}$	-
	$5,89 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-6}$	-	-	$0,325 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$1,562 \cdot 10^{-7}$	-
P4	0,2028	$-5,64 \cdot 10^{-5}$	$-2,40 \cdot 10^{-3}$	$-9,35 \cdot 10^{-4}$	$1,471 \cdot 10^{-3}$	$-11,7 \cdot 10^{-5}$	$1,012 \cdot 10^{-6}$	$-1,285 \cdot 10^{-8}$
	$14,5 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-5}$	$28,31 \cdot 10^{-3}$	$9,29 \cdot 10^{-4}$	$0,678 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1,011 \cdot 10^{-6}$	$1,110 \cdot 10^{-8}$
P5	0,2093	-	0,0961	-	-	-	-	-
	$0,35 \cdot 10^{-4}$	-	$4,0 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-	-
P6	0,2381	$-3,18 \cdot 10^{-5}$	$-99,1 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-
	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-

El coeficiente de determinación ajustado ($R_{ajustado}^2$) y el error estándar ($\hat{\sigma}$) de cada uno de los modelos se presenta en la Figura 55. En general, los modelos tienen coeficientes aceptables de determinación y errores estándar que oscilan entre 5,3 W y 6,1 W.

Figura 59. Coeficientes de determinación ajustados y errores estándar de los modelos de regresión de la potencia eléctrica generada.



La Tabla 29 presenta los resultados del análisis de la varianza de cada uno de los modelos. Se aprecia para todos los casos que el valor de estadístico F_0 es significativamente mayor al valor crítico $F_{\alpha,p,n-p-1}$, lo cual permite rechazar de esta manera la hipótesis nula para un nivel de significancia de 5%.

Tabla 29. Análisis de varianza de la significación de los modelos de regresión de la temperatura de operación.

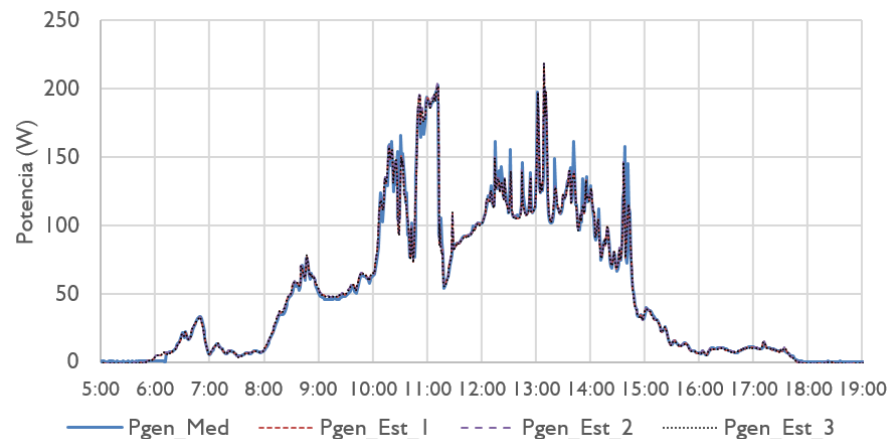
MODELO	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	$F_{\alpha,p,n-p-1}$	α	Valor P
P1	Regresión	$22,784 \cdot 10^6$	1	$22,784 \cdot 10^6$	$626,1 \cdot 10^3$	3,8428	5%	0
	Error	$260,9 \cdot 10^3$	7 169	$36,39 = 6,032^2$				
	Total	$23,045 \cdot 10^6$	7 170					
P2	Regresión	$22,789 \cdot 10^6$	2	$11,395 \cdot 10^6$	$319,3 \cdot 10^3$	2,9970	5%	0
	Error	$255,8 \cdot 10^3$	7 168	$35,69 = 5,974^2$				
	Total	$23,045 \cdot 10^6$	7 170					
P3	Regresión	$22,841 \cdot 10^6$	5	$4,568 \cdot 10^6$	$160,1 \cdot 10^3$	2,2153	5%	0
	Error	$204,4 \cdot 10^3$	7 165	$28,53 = 5,341^2$				
	Total	$23,045 \cdot 10^6$	7 170					
P4	Regresión	$22,841 \cdot 10^6$	8	$2,855 \cdot 10^6$	$100,3 \cdot 10^3$	1,9397	5%	0
	Error	$203,8 \cdot 10^3$	7 162	$28,45 = 5,334^2$				
	Total	$23,045 \cdot 10^6$	7 170					
P5	Regresión	$22,804 \cdot 10^6$	2	$11,40 \cdot 10^6$	$338,6 \cdot 10^3$	2,9970	5%	0
	Error	$241,4 \cdot 10^3$	7 168	$33,67 = 5,803^2$				
	Total	$23,045 \cdot 10^6$	7 170					
P6	Regresión	$22,840 \cdot 10^6$	4	$5,710 \cdot 10^6$	$199,1 \cdot 10^3$	2,3732	5%	0
	Error	$205,5 \cdot 10^3$	7 166	$28,67 = 5,354^2$				
	Total	$23,045 \cdot 10^6$	7 170					

Con base en los resultados obtenidos de los coeficientes de determinación, los errores estándar del modelo, los errores estándar de los coeficientes y el análisis de la varianza, se considera que el modelo de regresión P6 es la opción más conveniente para predecir la potencia generada por un panel FV y se presenta a continuación.

$$P_{gen_6}(t) = 0,2381 \cdot RS(t) - 0,0000318 \cdot RS(t)^2 - 0,0991 \cdot T_{oper}(t) + 0,00213 \cdot T_{oper}^2(t) \quad (W) \quad (44)$$

A continuación se analiza la calidad de la predicción del modelo P6. Este análisis consiste en la comparación de la potencia eléctrica generada medida con respecto a tres potencias estimadas por el modelo, las cuales se obtienen a partir de tres versiones de la temperatura de operación del panel FV. Estas temperaturas son la temperatura de operación medida, la temperatura de operación estimada por el modelo T5 y la temperatura de operación estimada por el modelo T9, que generan las curvas $P_{gen_Est_1}$, $P_{gen_Est_2}$ y $P_{gen_Est_3}$, respectivamente. La Figura 60 muestra las curvas de potencia medida y estimadas. Se observa que el comportamiento del modelo P6 no varía para los tres casos de temperatura de operación considerados.

Figura 60. Comportamiento predictivo de la potencia eléctrica generada por el modelo P6.



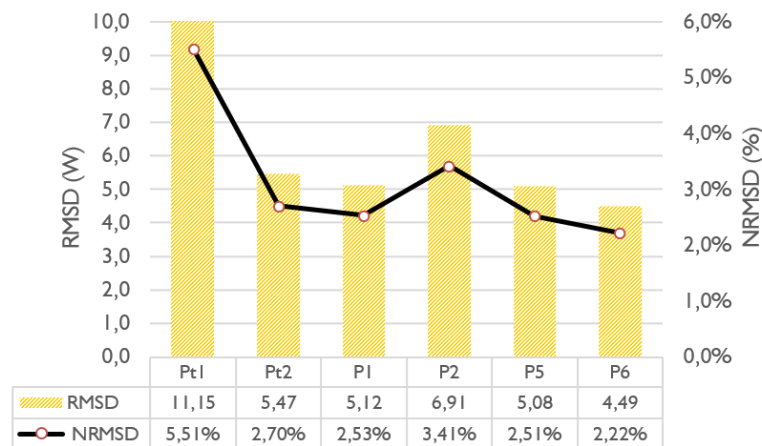
De acuerdo a lo mostrado por la Tabla 30, el modelo P6 se comporta mejor de lo esperado ya que el valor de RMSD es de 3,3 W, siendo menor al error estándar del modelo (5,54 W). El índice NRMSD para este caso es menor al 2,0%.

Tabla 30. Cuantificación de la calidad de la predicción de la potencia eléctrica generada a partir de los índices RMSD y NRMSD.

	Pgen_Est_1	Pgen_Est_2	Pgen_Est_3
RMSD	3,32 W	3,31 W	3,34 W
NRMSD	1,64%	1,64%	1,65%

Para terminar el análisis de validación de los modelos establecidos, se proceden a determinar los valores RMSD y NRMSD de los modelos de regresión *P1*, *P2*, *P5* y *P6*, y modelos teóricos *Pt1* y *Pt2* obtenidos a partir de los valores nominales del panel FV analizado. Los resultados se presentan en la Figura 61.

Figura 61. Análisis comparativo de la capacidad de predicción de los modelos analizados.



Es posible determinar que el modelo teórico *Pt1* presenta el desempeño menos favorable, y que el modelo teórico *Pt2* presenta un comportamiento similar a los modelos de regresión obtenidos.

En general, se aprecia que los valores RMSD de los modelos de regresión son de la misma magnitud de los errores estándar ($\hat{\sigma}$).

Por otro lado, el desempeño del modelo *P6* también fue evaluado a partir de su comparado con el modelo de regresión obtenidos por Nagengast *et al.* [14], mostrado por la expresión (45). Se encontró que los errores entre las estimaciones de los modelos son a lo sumo de 5% para niveles de radiación solar de hasta 1 000 W/m².

$$P(t) = 1,67 + 0,2167 \cdot RS(t) + 0,0093 \cdot T_{amb}(t) \text{ (W)} \quad (45)$$

Finalmente, se puede indicar que los modelos de la potencia eléctrica generada pueden responder satisfactoriamente a las variaciones a las que es sometido un panel FV en tiempo real, siendo diferente con los modelos por regresión de la temperatura de operación. Esto se debe a que la unidad de gestión del panel FV ajusta de manera casi instantánea (aproximadamente 1 segundo) el punto de operación de éste.

5.5 RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES DEL MODELADO PARAMÉTRICO

El modelado por regresión (lineal y no lineal) llevado a cabo de la temperatura y potencia del panel FV se basó en analizar el desempeño de varios modelos propuestos, con el fin de establecer la calidad de las predicciones a ser obtenidas y determinar las variables de influencia en el comportamiento del panel FV.

En total, se consideraron diez modelos de regresión de la temperatura de operación (T1 a T10), nueve de los cuales reportaron valores de $R^2_{ajustada}$ mayores a 0,9. El error estándar de los modelos T1 a T7 oscila entre 3 °C y 4 °C. Los modelos T8, T9 y T10 incluyeron el valor precedente de la variable dependiente ($T_{oper}(t - 1)$) como variable independiente, caso en el cual $R^2_{ajustada}$ es 0,99 y el error estándar es de sólo 0,3 °C. Se consideró que el más promisorio sería T9; sin embargo, la calidad de predicción real resultó similar a la del modelo T5 debido a que es afectado de forma significativa por el error intrínseco de la estimación precedente. En definitiva, se consideran que los dos modelos de mejor desempeño son T5 y T9, cuyos errores de predicción oscilan entre 5% y 10%.

Desafortunadamente, se observó que en general los modelos paramétricos de temperatura establecidos tienen limitaciones para predecir con calidad la temperatura de operación del panel FV en condiciones de alta variabilidad de la radiación solar o velocidad del viento.

Por otro lado, se consideraron seis modelos para predecir la potencia eléctrica generada, como funciones en tiempo real de la radiación solar y la temperatura de operación.

Con base en los resultados obtenidos de los coeficientes de determinación, los errores estándar del modelo, los errores estándar de los coeficientes y el análisis de la varianza, se considera que el modelo de regresión P6 es la opción más conveniente para predecir la potencia generada por un panel FV, con un error de aproximadamente 2%.

A diferencia de lo observado con los modelos de regresión de la temperatura, se puede indicar que los modelos de la potencia eléctrica generada pueden responder satisfactoriamente a las variaciones a las que es sometido un panel FV en tiempo real.

6. MODELADO TÉRMICO DE UN PANEL FV A PARTIR DE ANALOGÍAS TERMOELÉCTRICAS

El modelado establecido por regresión (Capítulo 6) predice la temperatura de operación de manera satisfactoria, ya que los valores RMSD y NRMSD son cercanos a 3°C y 6%. Esto es validado en condiciones de operación caracterizada por transitorios térmicos ocasionados por variaciones bajas o moderadas de las condiciones micro-climáticas en sitio.

Sin embargo, aparentemente a medida que se presentan altas variaciones de la radiación solar y la velocidad del viento en corto instantes de tiempo, la calidad de la predicción disminuye. Tales variaciones pueden ser causadas por un cielo nublado y en movimiento y por ráfagas de viento, las cuales ocasionan intensos transitorios térmicos.

Es importante indicar que el factor natural que causa mayor variación en la temperatura de operación de un panel FV son las precipitaciones, que obstruyen la radiación solar y enfrían el panel FV en cuestión de segundos hasta niveles cercanos a la temperatura ambiente.

Debido a la necesidad de proporcionar un modelo que pueda predecir el valor de la temperatura del panel FV ante diversos escenarios de operación, se abordó el enfoque de analogías termoeléctricas para analizar el comportamiento térmico del panel FV debido a su interacción con el entorno. En primera instancia se verificó que un modelo RC puede predecir de forma satisfactoria la temperatura de operación del panel FV ante variaciones abruptas de radiación solar y velocidad del viento. Posteriormente, y como parte del aporte de

esta Tesis Doctoral, se obtuvo un modelo RC modificado que puede predecir el comportamiento térmico del panel FV cuando es irrigado. Este modelo también pudiese ser empleado para estimar la temperatura del panel FV en caso de precipitaciones.

Los valores de los índices RMSD y NRMSD de este modelo RC son de similar valor a los alcanzados por el modelado por regresión y adicionalmente este modelo RC logra responder a cambios a transitorios rápidos, incluyendo los producidos cuando el panel FV es irrigado con agua en la superficie frontal.

La irrigación es una técnica de climatización explorada en esta investigación y que se aplica a los paneles FV para reducir la temperatura de operación a valores cercanos a la temperatura ambiente, y con ello aumentar la potencia eléctrica generada por el panel FV.

6.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Los modelos RC (resistencias y capacitancias) son un tipo de modelo caja blanca debido a que sus parámetros se basan en características físicas del sistema analizado [36], [37], [38]. Son mayormente de parámetros concentrados para simplificar el análisis del sistema real, ello implica que los componentes del sistema son representados por elementos eléctricos que describen un comportamiento uniforme para todo el componente, como puede ser asumir que un cuerpo tiene la misma temperatura en toda su extensión.

Los modelos RC puede ser aplicados tanto para predecir el comportamiento térmico [39] como para llevar a cabo el control predictivo del desempeño térmico [40]. Tienen gran aceptación en la comunidad científica por la rapidez y la confiabilidad de los resultados a ser obtenidos ([36], [37], [39], [41], [42]), y también por la representación gráfica como un circuito eléctrico equivalente [41], que facilita la comprensión del fenómeno físico objeto del modelado.


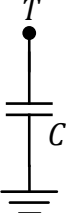
Es importante indicar que las analogías termoeléctricas están orientadas al análisis en régimen estacionario ([43]); sin embargo, dependiendo del análisis, pueden ser validadas para su uso en régimen transitorio ([39], [40], [41], [44], [45], [46], [47]).

Los parámetros R y C pueden ser determinados a partir de una asignación directa de los valores de las resistencias y capacitancias térmicas del componente que representan [48]. La efectividad de la valoración de los parámetros puede ser mejorada a partir de un proceso de optimización [36], [49], [48], o mediante la realización de experimentación. Según [36] y [48], la exactitud de un modelo RC depende tanto del número de parámetros R y C como del valor de los mismos.

Los modelos RC son establecidos a partir de analogías termoelectricas como las mostradas en la Tabla 31. Estas analogías permiten convertir un sistema térmico en un circuito eléctrico para simplificar su análisis y comprensión por medio de la teoría de circuitos. Es importante precisar que el análisis térmico que posibilita esta estrategia es unidireccional y basado en el uso de parámetros concentrados.

Tabla 31. Presentación de analogías termoelectricas.

Concepto	Descripción	Representación gráfica
Fuente de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> Una fuente de temperatura puede ser representada como una fuente independiente de tensión o como una capacitancia térmica con capacidad muy superior a los valores posibles del sistema, y operará a una temperatura T. Unidades: °C o K Ejemplo: Cuerpo de aire circundante. 	
Fuente de flujo de calor	<ul style="list-style-type: none"> Una fuente de calor puede ser representada como una fuente independiente de corriente, cuya magnitud será la tasa a la cual entregue el calor (\dot{Q}) con respecto al tiempo. Unidades: W Ejemplo: Radiación solar incidente absorbida por un cuerpo. 	
Transferencia de calor por conducción	<ul style="list-style-type: none"> La transferencia de calor por conducción se da al interior de un cuerpo que experimenta el movimiento de calor por medio del contacto directo de las moléculas del material. La tasa de calor transferido por conducción se obtiene como se muestra a continuación, donde λ es la conductividad térmica (W/mK), e es el espesor (m), A es el área (m²), T_A es la temperatura de la superficie más caliente, T_B es la temperatura de la superficie más fría. $\dot{Q}_{cond} = \frac{\lambda}{e} \cdot A \cdot (T_A - T_B) = \frac{T_A - T_B}{R_{th}}$	
Transferencia de calor por convección	<ul style="list-style-type: none"> La transferencia de calor por convección ocurre por el contacto de una superficie y un fluido (comunmente aire). La tasa de calor transferido por convección se evalúa como se muestra a continuación, donde h es el coeficiente superficial de transmisión de calor o conductancia superficial (W/m²K), A es el área (m²), T_A es la temperatura de la superficie más caliente, T_B es la temperatura de la superficie más fría. $\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_A - T_B) = \frac{T_A - T_B}{R_{th}}$	

Transferencia de calor por radiación	<ul style="list-style-type: none"> • La transferencia de calor por radiación ocurre cuando la superficie intercambia calor con el entorno debido a la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas. • La tasa de pérdida de calor por radiación se calcula como se muestra a continuación, donde ε es la emitancia de la superficie que varía entre 0 y 1 (adimensional), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), A es el área (m^2), T_A es la temperatura de la superficie más caliente, T_B es la temperatura de la superficie más fría. $\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_A^4 - T_B^4)$	
Capacitancia térmica	<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad calorífica o térmica de un cuerpo (C) se define como la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de un cuerpo en una unidad de temperatura. • Unidades: Joules por Kelvin (J/K) • La capacidad térmica de una sustancia homogénea es el producto del calor específico por la masa de ésta. • Se representa por medio de una capacitancia eléctrica, la cual se encuentra a una temperatura T, que puede variar en el tiempo si hay procesos de almacenamiento o liberación de calor. 	

6.2 MODELO GENERAL DEL PANEL FV

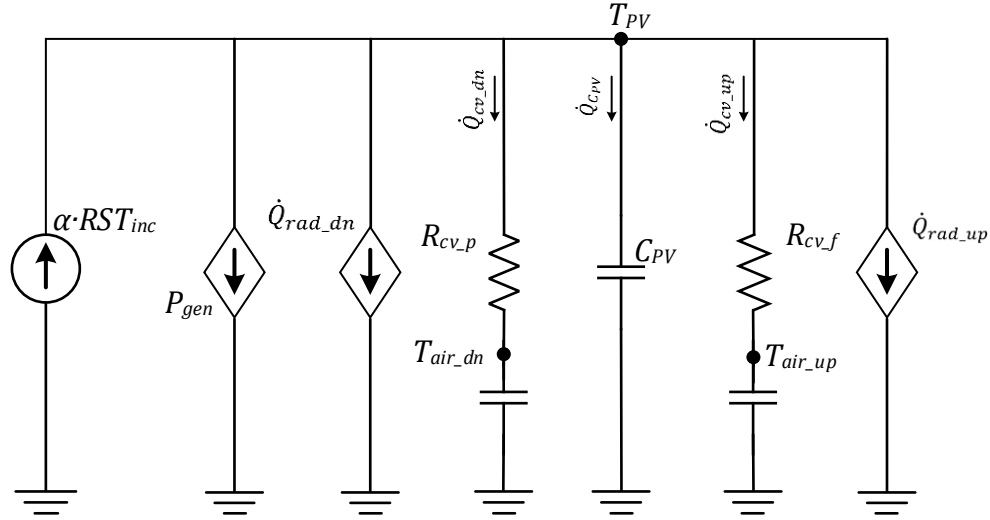
El modelo RC presentado en esta sección corresponde a la adaptación como circuito eléctrico de los modelos presentados por Hendarti [24], Armstrong and Hurley [50] y Jones and Underwood [51]. Posterior a la verificación de la utilidad del modelo, y con base en éste, se desarrolló un modelo RC que integra el sistema de irrigación de un panel FV.

La Figura 62 presenta el modelo RC de un panel FV. La construcción de este modelo inicia con la identificación de los nodos o puntos de temperatura tanto conocidos como por determinar. Para este caso, el nodo principal es la temperatura de operación del panel FV (T_{PV}), la cual es desconocida. Otros nodos identificados, aunque de valores conocidos, son las temperaturas del aire circundante sobre (T_{air_up}) y debajo (T_{air_dn}) de las superficies frontal y posterior del panel FV. Estos nodos son representados por capacitancias térmicas, siendo C_{PV} la capacitancia térmica del panel FV. Las porciones de aire sobre y debajo del panel FV se consideran sumideros térmicos con capacitancias térmicas de valores muy elevados. La temperatura de éstas porciones de aire se consideran no iguales ya que se encuentran a diferentes alturas respecto del techo, lo cual se expone en el Sección 4.1.

Para este modelo se considera que el panel FV es un cuerpo muy delgado ($<5\text{mm}$) por lo que su temperatura se supone uniforme en toda su extensión. Por tal motivo, el panel FV

es representado por una capacitancia térmica, sin resistencias internas de conducción. La expresión (46) presenta la ecuación de variación térmica del panel FV.

Figura 62. Modelo térmico RC del panel FV.



$$\dot{Q}_{C_{PV}} = C_{PV} \cdot \frac{dT_{PV}}{dt} = c_{sPV} \cdot A_{PV} \cdot \frac{dT_{PV}}{dt} \tag{46}$$

Dado que los paneles FV varían su potencia y área entre modelos, se considera útil determinar c_{sPV} como la capacidad térmica por unidad de área, la cual podría ser aplicable para cualquier modelo comercial de panel FV.

Otros procesos a determinar son los debidos a la transferencia de calor por conducción y convección, los cuales se identifican en el modelo mediante resistencias y fuentes dependientes de corriente.

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

Por otro lado, se identificaron dos procesos de transferencia de calor por convección entre el panel FV y el medio ambiente, los cuales ocurren entre las superficies frontal y posterior y el aire circundante a éstas. Tales procesos se representan por medio de las resisten-

cias térmicas R_{cv_f} y R_{cv_p} para las superficies frontal y posterior, respectivamente. Estas resistencias térmicas no están en paralelo, pues aunque parte del mismo nodo (T_{PV}), se conectan a temperaturas del aire que pueden ser levemente diferentes, ya que éstas pueden depender de la altura de ubicación del panel FV con respecto al techo, tal como se evidenció en la Sección 4.1. Las resistencias térmicas están en función de la conductancia superficial h y del área del panel FV. Las expresiones (47) y (48) presentan las ecuaciones térmicas respectivas.

$$\dot{Q}_{cv_p} = \frac{1}{R_{cv_p}} (T_{PV} - T_{air_up}) = h_{cv_p} \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV} - T_{air_dn}) \quad (47)$$

$$\dot{Q}_{cv_f} = \frac{1}{R_{cv_f}} (T_{PV} - T_{air_down}) = h_{cv_f} \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV} - T_{air_up}) \quad (48)$$

La tasa de pérdida por radiación se representa a partir de una fuente de corriente (flujo de calor) dependiente. La expresión de cálculo será no lineal debido a la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia. En total, se consideran dos fuentes dependientes, una para cada proceso de transferencia ocurrido en las dos superficies del panel FV, superficie frontal y superficie posterior, por lo que la transferencia de calor para éstas son \dot{Q}_{rad_f} y \dot{Q}_{rad_p} , respectivamente. Cada una de estas tasas de pérdida está conformada por dos componentes debido a la inclinación del panel FV, tal como lo muestran las expresiones (49) y (50). \dot{Q}_{rad_f1} y \dot{Q}_{rad_p2} describen la influencia de la superficie horizontal para los dos lados del panel FV, y \dot{Q}_{rad_f2} y \dot{Q}_{rad_p1} representan la influencia del cielo.

$$\dot{Q}_{rad_f} = \dot{Q}_{rad_f1} + \dot{Q}_{rad_f2} \quad (49)$$

$$\dot{Q}_{rad_p} = \dot{Q}_{rad_p1} + \dot{Q}_{rad_p2} \quad (50)$$

Las expresiones (51) a (54) presentan las ecuaciones de la tasa de pérdida por radiación para los cuatro componentes mencionados (\dot{Q}_{rad_f1} , \dot{Q}_{rad_f2} , \dot{Q}_{rad_p1} y \dot{Q}_{rad_p2}); donde ε_{PV_f} y ε_{PV_p} son las emitancias de las superficies del panel FV, cuyos valores son 0,9 y 0,85, respectivamente, tal como lo indica Armstrong y Hurley [50]; F_i es un factor que pondera la visibilidad de cada superficie del panel FV respecto del cielo y del techo, y por ende pondera

la tasa de pérdida; σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$); T_{PV} es la temperatura del panel FV, que se asume igual en ambos lados; T_{roof} es la temperatura del techo, en caso que sea techo verde, será igual a la temperatura de la vegetación; T'_{sky} es la temperatura del cielo ajustada.

$$\dot{Q}_{rad_f1} = \varepsilon_{PV_f} \cdot F_{f1} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV}^4 - T_{roof}^4) \quad (51)$$

$$\dot{Q}_{rad_f2} = \varepsilon_{PV_f} \cdot F_{f2} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV}^4 - T'_{sky}{}^4) \quad (52)$$

$$\dot{Q}_{rad_p1} = \varepsilon_{PV_p} \cdot F_{p1} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV}^4 - T'_{sky}{}^4) \quad (53)$$

$$\dot{Q}_{rad_p2} = \varepsilon_{PV_p} \cdot F_{p2} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV}^4 - T_{roof}^4) \quad (54)$$

Las expresiones (55) a (58) permiten calcular los factores F_{p1} , F_{p2} , F_{f1} y F_{f2} , donde δ es el ángulo de inclinación de los paneles FV.

$$F_{p1} = \frac{1}{2}(1 + \cos\delta) \quad (55)$$

$$F_{p2} = \frac{1}{2}(1 - \cos\delta) \quad (56)$$

$$F_{f1} = \frac{1}{2}(1 + \cos(180 - \delta)) \quad (57)$$

$$F_{f2} = \frac{1}{2}(1 - \cos(180 - \delta)) \quad (58)$$

En principio, la temperatura de cielo, T_{sky} , puede ser determinada por medio de la expresión (59), dando valores por debajo de 10°C para la ciudad de Bucaramanga, de acuerdo a la temperatura ambiente monitorizada. Sin embargo, se aprecia que el nivel de la nubosidad de la ciudad es considerable, siendo esto evidenciado en la afectación de la radiación solar incidente, y dado que la temperatura de las nubes estaría más cercana a la temperatura ambiente, se tiene un caso mixto de cielo parcialmente nubado. Esto conlleva a que la temperatura de cielo sea ajustada (T'_{sky}) según lo mostrado en la expresión (60), donde γ es un coeficiente de ajuste que representa el nivel de nubosidad del cielo.

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_{amb}^{3/2} \quad (59)$$

$$T'_{sky} = (1 - \gamma) \cdot T_{sky} + \gamma \cdot T_{amb} \quad (60)$$

En consecuencia, se pueden establecer ecuaciones para determinar el valor de las fuentes dependientes \dot{Q}_{rad_f} y \dot{Q}_{rad_p} como sigue:

$$\dot{Q}_{rad_p} = \varepsilon_{PV_p} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot \left(F_{p1} \cdot (T_{PV}^4 - T'_{sky}{}^4) + F_{p2} \cdot (T_{PV}^4 - T_{roof}{}^4) \right) \quad (61)$$

$$\dot{Q}_{rad_f} = \varepsilon_{PV_f} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot \left(F_{f1} \cdot (T_{PV}^4 - T_{roof}{}^4) + F_{f2} \cdot (T_{PV}^4 - T'_{sky}{}^4) \right) \quad (62)$$

Para finalizar, se incluyen en el modelo la radiación solar total incidente absorbida y la potencia eléctrica generada. La radiación solar incidente se representa como una fuente independiente de flujo de calor, donde α es el porcentaje de la radiación solar incidente total (RST_{inc}) que ingresa efectivamente al panel FV, y puede variar entre 80% y 90%. RST_{inc} está dada en watts y se obtiene como el producto de la radiación solar (RS) medida en watts por metro cuadrado multiplicada por el área del panel FV (A_{PV}) en metros cuadrados:

$$RST_{inc} = RS \cdot A_{PV} \quad (63)$$

La potencia eléctrica generada se considera como una fuente dependiente de la radiación solar incidente y la temperatura de operación del panel FV ($f(RS_{inc}, T_{PV})$), para lo cual se emplea el modelo paramétrico obtenido en el Capítulo 6. Es importante indicar que el planteamiento realizado lleva a mostrar la dependencia mutua entre T_{PV} y P_{gen} .

$$P_{gen} = 0,2381 \cdot RS(t) - 0,0000318 \cdot RS(t)^2 - 0,0991 \cdot T_{PV}(t) + 0,00213 \cdot T_{PV}^2(t) \quad (64)$$

Una vez establecido el modelo RC, se procede a obtener la temperatura de operación del panel FV (T_{PV}) aplicando teoría de circuitos. Se parte de la aplicación del método de análisis por nodos, el cual indica que la suma de corrientes que entran a un nodo son iguales a la suma de las corrientes que salen del mismo, tal como lo indica la expresión (65), siendo aplicada al circuito RC como muestra la expresión (66) para obtener la variación de calor del panel FV como se muestra en la expresión (67).

$$\sum I_{in} = \sum I_{out} \quad (65)$$

$$\alpha \cdot RST_{inc} = P_{gen} + \dot{Q}_{rad_p} + \dot{Q}_{cv_p} + \dot{Q}_{C_{PV}} + \dot{Q}_{cv_f} + \dot{Q}_{rad_f} \quad (66)$$

$$\dot{Q}_{C_{PV}} = \alpha \cdot RST_{inc} - P_{gen} - \dot{Q}_{rad_p} - \dot{Q}_{cv_p} - \dot{Q}_{cv_f} - \dot{Q}_{rad_f} \quad (67)$$

Debido a que el circuito obtenido no tiene una forma típica que pueda ser resuelto de manera analítica, se procede a su solución a partir de ecuaciones en diferencia como muestran las expresiones (68) y (69).

$$\frac{\Delta T_{PV}}{\Delta t} = \frac{1}{c_{SPV} \cdot A_{PV}} \dot{Q}_{C_{PV}} \quad (68)$$

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} + \frac{\Delta t}{c_{SPV} \cdot A_{PV}} \dot{Q}_{C_{PV_i}} \quad (69)$$

La expresión (70) permite determinar la temperatura de operación del panel FV del instante $i + 1$ ($T_{PV_{i+1}}$), en función de la temperatura de operación y de los flujos de calor del instante i , donde c_{SPV} es la capacidad térmica del panel FV por unidad de área y sus unidades son $J/(m^2 \cdot K)$.

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} + \frac{\Delta t}{c_{SPV} \cdot A_{PV}} \left(\alpha \cdot RST_{inc_i} - P_{gen_i} - \dot{Q}_{rad_{p_i}} - \dot{Q}_{cv_{p_i}} - \dot{Q}_{cv_{f_i}} - \dot{Q}_{rad_{f_i}} \right) \quad (70)$$

Finalmente, se establece la ecuación (71) para la predicción de la temperatura de operación.

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} + \frac{\Delta t}{c_{SPV} \cdot A_{PV}} \left(\alpha \cdot RS_{inc} \cdot A_{PV} - P_{gen_i} - \varepsilon_{PV_p} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot \left(F_{p1} \cdot (T_{PV_i}^4 - T'_{sky_i}{}^4) + F_{p2} \cdot (T_{PV_i}^4 - T_{roof_i}{}^4) \right) - h_{cv_p} \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV_i} - T_{air_{dn_i}}) - h_{cv_f} \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV_i} - T_{air_{up_i}}) - \varepsilon_{PV_f} \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot \left(F_{f1} \cdot (T_{PV_i}^4 - T_{roof_i}{}^4) + F_{f2} \cdot (T_{PV_i}^4 - T'_{sky_i}{}^4) \right) \right) \quad (71)$$

Se debe tener en cuenta que la potencia eléctrica generada por el panel FV es dada en corriente continua, por lo cual se deben ajustar los valores de potencia AC medidos en campo según la eficiencia de conversión de los microinversores, tal como lo muestra la expresión (72).

$$P_{genDC_i} = P_{genAC_i} / \eta_{PV_i} \quad (72)$$

Ahora bien, para llevar a cabo la validación del modelo y la predicción de la temperatura de operación del panel FV, se deben determinar previamente los valores de los parámetros c_{SPV} , h_{cv_p} y h_{cv_f} .

6.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

La determinación de los parámetros c_{SPV} , h_{cv_p} y h_{cv_f} se realizó a partir de dos experimentos.

6.3.1 Estimación de c_{SPV}

La estrategia para determinar el valor de c_{SPV} consiste en realizar un experimento que permita cuantificar un balance de energía basado en las variaciones de calor almacenado en el panel FV y en el agua del tanque debidas a la irrigación. Específicamente, se cuantifican la pérdida de calor del panel FV ($Q_{pérd_PV}$) y la ganancia de calor en el agua contenida en el tanque de irrigación (Q_{gan_agua}), tal como lo indica la expresión (73). Para esto, se lleva a cabo la monitorización de las temperaturas de operación del panel FV y del agua en el tanque de irrigación.

$$Q_{pérd_PV} + Q_{gan_agua} = 0 \quad (73)$$

Definición del experimento

Tal como se observa en el modelo presentado en la Figura 62, la variación térmica de un panel FV es debida a varios factores como la radiación solar incidente, las pérdidas de calor por convección (\dot{Q}_{cv_p} y \dot{Q}_{cv_f}), las tasas de pérdida de calor por radiación (\dot{Q}_{cv_p} y \dot{Q}_{rad_f}) y

la potencia eléctrica generada. Por ello, fue necesario reducir el número de factores de influencia, tal como se describe a continuación.

Como primer paso, se cubrió la superficie posterior del panel FV con poliestireno expandido de 2 centímetros con el fin de eliminar la transferencia de calor por convección (\dot{Q}_{cv_p}) y radiación (\dot{Q}_{rad_p}). Posteriormente, se llevó al panel FV a estado de generación, y se procedió a efectuar la irrigación con un régimen 1 minuto con irrigación, 29 minutos sin irrigación con un caudal de 9,5 litros por minuto. Durante el tiempo de irrigación de un minuto, se instaló una capa aislante y opaca (no permite el paso de la radiación solar) sobre la película de agua de irrigación, separada 5 centímetros de ésta, con lo cual se eliminó el efecto de $\alpha \cdot RST_{inc}$ y P_{gen} . La capa se conformó por una lámina de poliestireno expandido de 2 centímetros y cartón de 5 milímetros.

La película de agua obstruyó por sí misma la interacción de la superficie superior del panel FV con el entorno, por lo cual se eliminaron los factores restantes \dot{Q}_{cv_f} y \dot{Q}_{rad_f} ; sin embargo, la película de agua origina una transferencia de calor por convección y radiación, aunque se desprecian estos valores por el reducido tiempo de la irrigación y la menor temperatura del agua con respecto a la temperatura del panel FV antes de la irrigación.

La duración de la irrigación se fija en un minuto con el fin de superar la constante de tiempo ($\tau = 40 \text{ seg}$) del sistema térmico, lo que conlleva a que la pérdida de calor del panel FV sea aproximadamente del 80% en un tiempo igual a $1,5 \cdot \tau$. El paso de muestreo se fijó en 10 segundos.

Formulación matemática del balance energético

$Q_{pérd_{PV}}$ se cuantifica en Joules (J) y es función de C_{PV} (J/K) y de la variación de temperatura del panel FV (ΔT_{PV}) entre los instantes instante $t1$ y instante $t2$ dada en grados Kelvin, tal como lo muestran las expresiones (74) y (75).

$$Q_{pérd_{PV}} = C_{PV} \cdot \Delta T_{PV} \quad (J) \quad (74)$$

$$\Delta T_{PV} = T_{PV_{t2}} - T_{PV_{t1}} \quad (K) \quad (75)$$

Dado que la mayoría de paneles FV están constituidos mayormente con las mismas capas y materiales, es posible que el valor del calor térmico específico, la densidad y el espesor de diversos modelos de paneles FV sean similares. Por lo que la variación más representativa entre modelos de diferentes potencias sería sólo su área. Por tal motivo, se considera más útil determinar la capacidad térmica por unidad de área (c_{SPV}), tal como lo muestra la expresión (76), donde A_{PV} es el área del panel FV en metros cuadrados. Las unidades de c_{SPV} son $J/(m^2K)$.

$$C_{PV} = c_{SPV} \cdot A_{PV} \quad (J/K) \quad (76)$$

Con base en lo mencionado, $Q_{pérd_{PV}}$ se redefine como lo muestra la ecuación (77), donde c_{SPV} se determina de forma experimental, A_{PV} es un parámetro conocido del modelo del panel FV, y $T_{PV_{t1}}$ y $T_{PV_{t2}}$ se obtienen a través de la monitorización.

$$Q_{pérd_{PV}} = c_{SPV} \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV_{t2}} - T_{PV_{t1}}) \quad (J) \quad (77)$$

La ganancia neta de calor del agua ($Q_{gan_{agua}}$) se calcula por medio de la expresión (78), donde m_{agua} es la masa del agua contenida en el tanque de acopio del sistema de irrigación, ζ_{agua} es la capacidad de calor específico del agua e igual $4,18 \text{ kJ}/(m^2K)$ y ΔT_{agua} es la variación de la temperatura del agua contenida en el tanque de acopio (ΔT_{agua}) entre los instantes $t1$ y $t2$ en grados Kelvin, tal como se muestra en la expresión (79).

$$Q_{gan_{agua}} = m_{agua} \cdot \zeta_{agua} \cdot \Delta T_{agua} \quad (J) \quad (78)$$

$$\Delta T_{agua} = T_{agua_{t2}} - T_{agua_{t1}} \quad (K) \quad (79)$$

El parámetro m_{agua} se obtiene con la expresión (80) a partir de la densidad del agua (ρ_{agua}), que es igual a $1000 \text{ kg}/m^3$, y el volumen de agua (\forall_{agua}).

$$m_{agua} = \rho_{agua} \cdot \forall_{agua} \quad (kg) \quad (80)$$

Por tanto, $Q_{gan_{agua}}$ se redefine como se muestra en la ecuación (81) y puede ser conocida. Los parámetros ρ_{agua} y ζ_{agua} son constantes conocidas, \forall_{agua} es determinado según

las dimensiones del tanque de acopio y el nivel de agua que éste contiene (variable a ser medida), T_{agua_t1} y T_{agua_t2} se obtienen a través del sistema de monitorización.

$$Q_{gan_agua} = \rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot \zeta_{agua} \cdot (T_{agua_t2} - T_{agua_t1}) \quad (J) \quad (81)$$

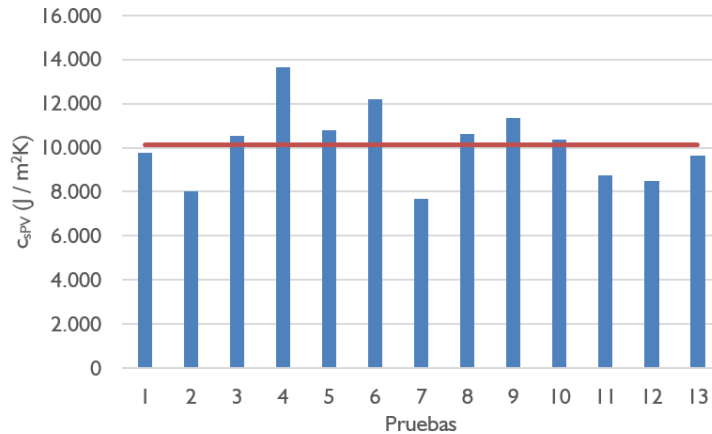
A partir del planteamiento presentado, se determina la expresión (82) para obtener el valor de c_{SPV} .

$$c_{SPV} = \frac{\rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot \zeta_{agua} \cdot (T_{agua_t2} - T_{agua_t1})}{A_{PV} \cdot (T_{PV_2} - T_{PV_1})} \quad (82)$$

Resultados

El experimento se llevó a cabo en trece (13) oportunidades, y se determinó que el valor promedio de c_{SPV} es 10,14 kJ/(m²K), tal como muestra la Figura 63; y así, la capacitancia térmica C_{PV} de un panel FV de 1,6 metros cuadrados sería de 16,22 kJ/K.

Figura 63. Valores resultantes de c_{SPV} obtenidos de forma experimental.



6.3.2 Estimación de h

Según lo mostrado por Armstrong y Hurley [50], el valor de la conductancia superficial h obtenida en diversos experimentos presenta una alta variación, entre 3 W/(m²K) y 15 W/(m²K) para una velocidad del aire de 0 m/s, y entre 10 W/(m²K) y 25 (W/m²K) si la velocidad del aire es de 2 m/s. Tal variación impide determinar el valor apropiado de h , ya

que ello afectaría la calidad de predicción del modelo; por tal razón, se procede a determinar el coeficiente h de forma experimental.

Definición del experimento

Al igual que en el caso de estimación de c_{SPV} , se define un experimento que permite aislar el efecto de la variación de h y se evalúa según el valor del índice RMSD. Asimismo, este experimento busca eliminar la mayor cantidad de factores de influencia posibles con el fin de definir un escenario en el cual se pueda caracterizar adecuadamente el coeficiente h . Este experimento no se basa en un balance de energía sino en la comparación de las temperaturas de operación del panel FV medida y estimada durante un intervalo de tiempo; esta última según diversos valores del coeficiente h .

El experimento se llevó a cabo para tres velocidades del viento: 0 m/s, 1 m/s y 2 m/s, para lo cual se hizo uso de la infraestructura (caja de acrílico) utilizada para el experimento de variación de la velocidad del viento, descrito en el Capítulo 4. El paso de muestreo se fijó en 10 segundos.

Como primer paso, el panel FV es puesto en condición de generación, y luego se cubrió (contacto directo) la superficie superior del panel FV con una capa aislante y opaca que no permite el paso de la radiación solar. Esta capa se conformó por dos láminas de poliestireno expandido de 2 centímetros y una lámina de cartón de 5 milímetros.

Esta obstrucción eliminó la radiación solar incidente (RST_{inc}), la pérdidas de calor por convección (\dot{Q}_{cv_f}) y radiación (\dot{Q}_{rad_f}) de la superficie superior y la potencia generada (P_{gen}). Por lo que se puede simplificar la expresión (71), quedando como lo indica (83).

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} - \frac{\Delta t}{c_{SPV}} \left(h_{cv_p} \cdot (T_{PV_i} - T_{air_dn_i}) + \varepsilon_{PV_p} \cdot \sigma \cdot \left(F_{p1} \cdot (T_{PV_i}^4 - T'_{sky_i}{}^4) + F_{p2} \cdot (T_{PV_i}^4 - T_{roof_i}{}^4) \right) \right) \quad (83)$$

Tal condición lleva al panel a FV liberar calor, como lo haría un capacitor en régimen transitorio de descarga, hasta alcanzar la condición de equilibrio e igualar su temperatura a

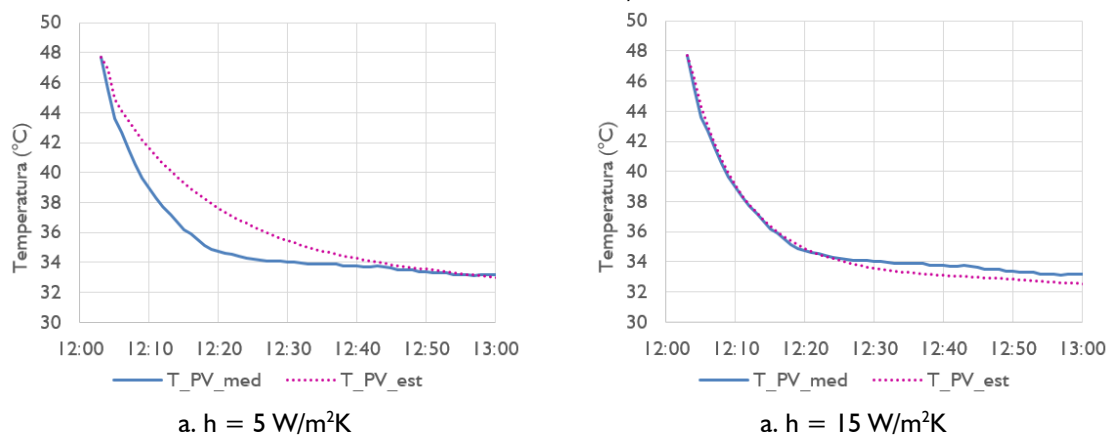
la del aire debajo de la superficie posterior. Por ello, este experimento permite a su vez determinar los valores de la constante de tiempo para transitorios debido a pérdida de calor por convección.

Seguidamente, se procede a comparar la temperatura de operación del panel FV medida, con la estimada por medio de la expresión (83) para un rango de valores del coeficiente h . Dicha comparación se evalúa a partir del índice RMSD. Finalmente, se selecciona el valor del coeficiente h con el menor error de predicción.

Resultados

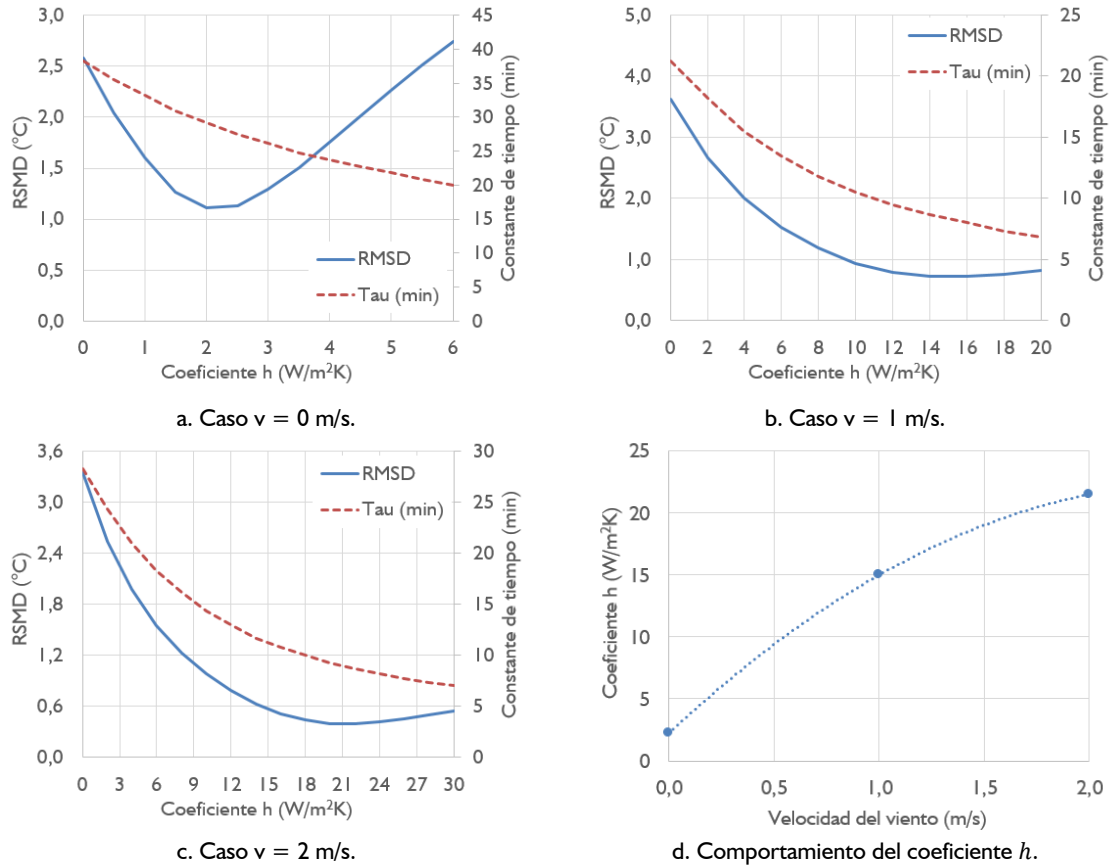
La Figura 64 muestra dos casos de variación del valor del coeficiente h que permiten apreciar el impacto que ocasionan sobre la temperatura de operación del panel FV.

Figura 64. Ajuste de la temperatura de operación para variaciones del valor de h considerando ventilación forzada de 1 m/s.



La Figura 65 presenta la variación del índice RMSD para diversos valores del coeficiente h para cada uno de los tres casos de velocidad del viento analizados. Las curvas establecidas permiten evidenciar la existencia de un punto mínimo de RMSD que representa el mejor valor estimado del coeficiente h para el valor medido de la temperatura de operación del panel FV. También muestra la variación de la constante de tiempo que se determinó a partir de la expresión (84), la cual indica que el tiempo t de evaluación será igual a τ si es igual al 63,2% de decremento del valor medido máximo con respecto al valor medido mínimo de la temperatura ocurridos durante el experimento.

Figura 65. Resultados del valor h obtenidos de forma experimental.



$$T_{PV_estimado}(t = \tau) = T_{PV_med_mín} + (T_{PV_max_mín} - T_{PV_med_mín}) \cdot e^{-1} \quad (84)$$

Los valores resultantes del análisis se presentan en la Tabla 32, siendo establecidos en 1,75 W/(m²K), 13,5 W/(m²K) y 21,5 W/(m²K) para velocidades del viento de: 0 m/s, 1 m/s y 2 m/s, respectivamente. También se introduce el criterio $\tau/20$ que tiene como fin indicar el valor máximo del paso de tiempo para llevar a cabo el proceso iterativo de estimación de una variable a partir de una ecuación en diferencia. Se encontró en todos los casos un valor significativamente mayor al paso empleado en la experimentación (10 segundos).

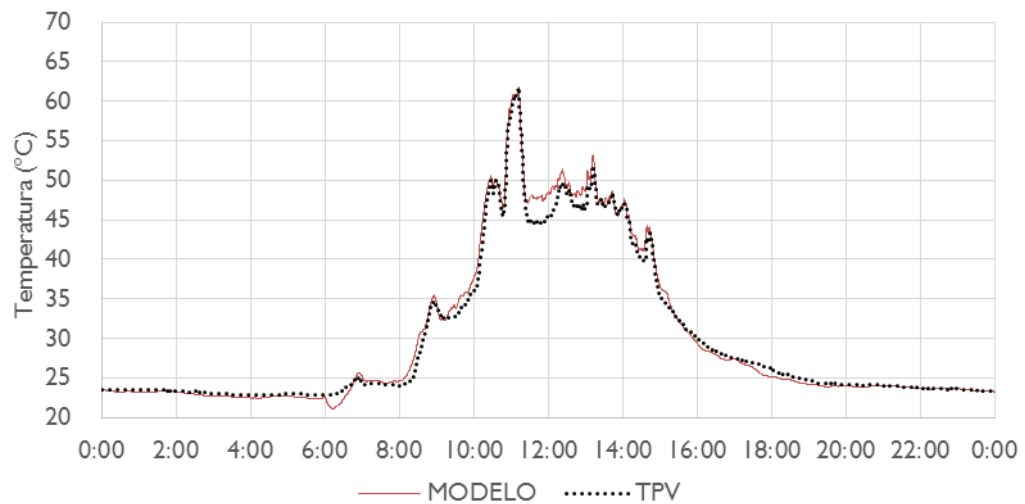
Tabla 32. Resultados de la obtención experimental del coeficiente h .

Velocidad del viento (m/s)	Coeficiente h (W/m ² K)	RMSD (°C)	Constante de tiempo (min)	Criterio $\tau/20$
0	2,25	1,10	28,3	84,9 s.
1	15,0	0,71	8,3	24,9 s.
2	20	0,39	7,8	23,4 s.

6.4 VALIDACIÓN DEL MODELO RC

Con el fin de validar la calidad de predicción del modelo RC establecido, se analizan tres casos de operación de un panel FV. El primer caso consiste en predecir la temperatura de operación en condiciones normales. Esta prueba se realizó durante 12 días. La Figura 66 presenta la comparación de las curvas de temperatura medida y estimada y la Tabla 33 presenta los resultados obtenidos. Se calcularon los índices RMSD y NRMSD para la totalidad del día y para la franja de radiación solar (6 a.m. y 6 p.m.), con leves variaciones en sus valores. En definitiva, el modelo puede predecir la temperatura de operación con un error promedio de 1,55°C, equivalente al 4,4%.

Figura 66. Comparación de las curvas de temperatura medida y estimada para el caso de validación I.



El segundo caso de validación consiste en predecir la temperatura de operación del panel FV en condiciones especiales de ventilación y radiación solar. La superficie posterior del panel FV fue objeto de ventilación forzada a un metro por segundo de 9 a.m. a 5 p.m.

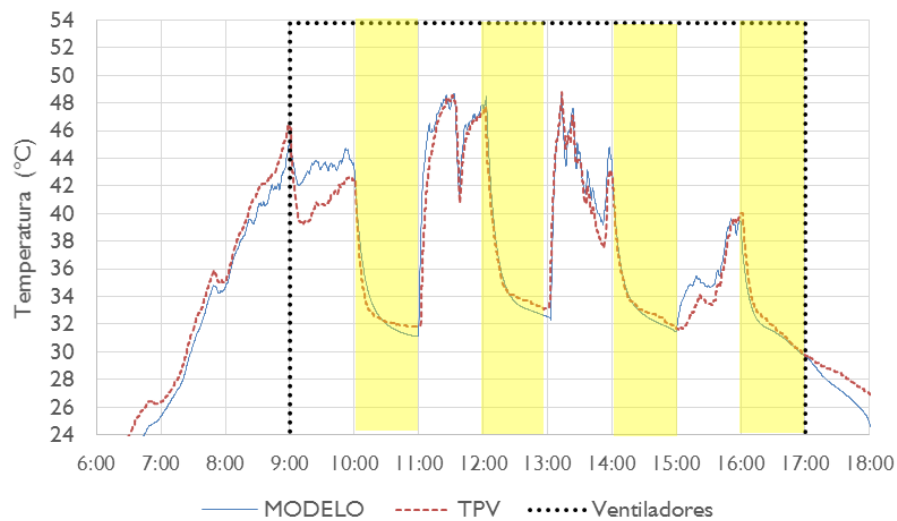
Tabla 33. Índices RMSD y NRMSD para la validación del caso de validación I.

Indicador	Unidad	Día												Prom.	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	RMSD	°C	1,51	0,96	1,04	1,20	0,91	1,20	1,18	0,89	1,18	1,27	1,21	1,27	1,15
2	NRMSD	%	3,6%	2,2%	2,3%	3,1%	2,3%	3,1%	3,9%	2,8%	3,9%	4,1%	3,6%	4,1%	3,3%
3	RMSD (6 a.m. a 6 p.m.)	°C	2,11	1,31	1,45	1,67	1,24	1,67	1,66	1,22	1,66	1,57	1,48	1,57	1,55
4	NRMSD (6 a.m. a 6 p.m.)	%	5,1%	3,0%	3,2%	4,3%	3,2%	4,3%	5,5%	3,9%	5,5%	5,1%	4,5%	5,1%	4,4%

Adicionalmente, se obstruyó la radiación solar con una capa combinada de poliestireno extendido de 4 centímetros y de cartón de 5 milímetros, con lo cual se evitó la generación de energía eléctrica y los procesos de transferencia de calor asociados con la superficie frontal. Dicha obstrucción se realizó cuatro veces durante el día con duración de una hora, tal como sigue: 10 a.m. a 11 a.m., 12 p.m. a 1 p.m., 2 p.m. a 3 p.m. y 4 p.m. a 5 p.m.

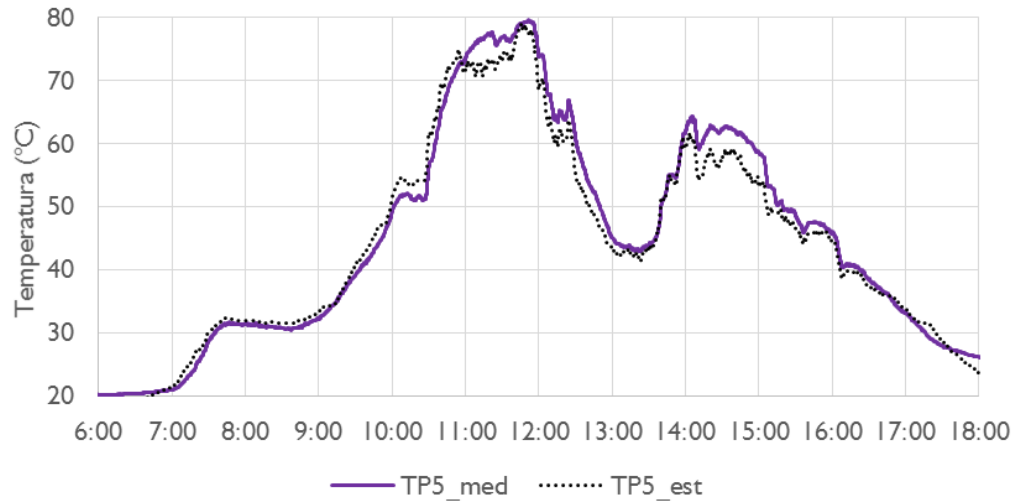
La Figura 67 presenta la comparación de las curvas de temperatura medida y estimada. También describe la franja de operación de los ventiladores (línea punteada) y las franjas de obstrucción a partir de un sombreado amarillo. Los valores de los índices RMSD y NRMSD para este caso fueron 1,39°C con 5,19%, respectivamente. Los resultados evidencian que el modelo responde satisfactoriamente a transitorios térmicos intensos debido al cambio abrupto de las condiciones de operación y del entorno.

Figura 67. Comparación de las curvas de temperatura medida y estimada para el caso de validación II.



El tercer caso de validación consiste en predecir la temperatura de operación del panel FV cuando la superficie posterior de éste es cubierta con poliestireno expandido de 2 centímetros de manera permanente, razón por lo que no hay en ese lado del panel FV transferencia de calor por convección y radiación. Ello implica que la temperatura de operación del panel FV se eleva, alcanzando valores cercanos a 80 °C, tal como se muestra en la Figura 68. Los valores de los índices RMSD y NRMSD obtenidos fueron 2,40 °C con 3,97.

Figura 68. Comparación de las curvas de temperatura medida y estimada para el caso de validación III.



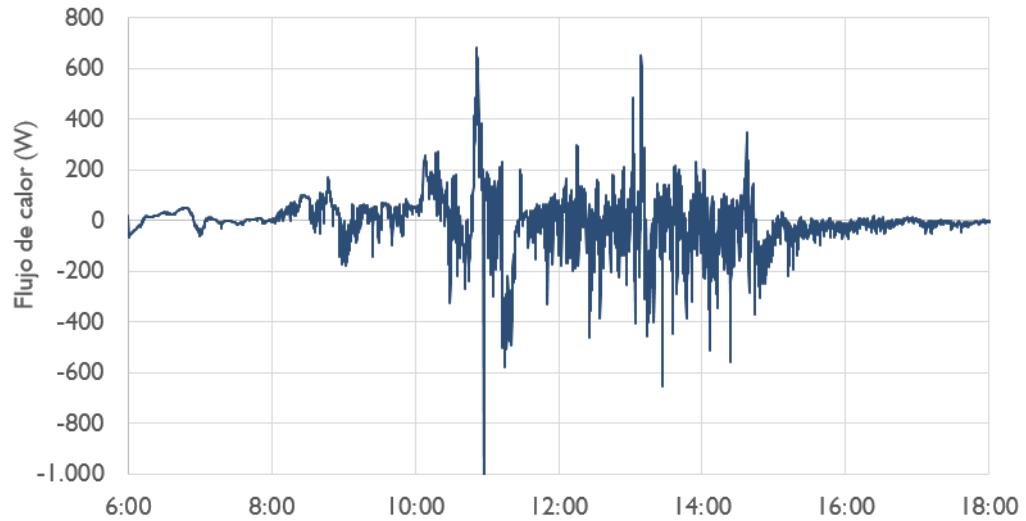
La Tabla 34 presenta el resumen de los casos de validación llevados a cabo, con lo cual se evidencia la utilidad del modelo RC para predecir la temperatura de operación del panel FV, tanto en condiciones normales como especiales.

Tabla 34. Resultados consolidados de los casos de validación del modelo RC.

Caso	Descripción	RMSD (°C)	NRMSD (%)
I	Panel FV en condición normal de operación	1,55	4,4
II	Panel FV sometido a convección forzada (1 m/s) en la superficie posterior y a obstrucción de la radiación solar	1,39	5,19
III	Panel FV con capa de poliestireno expandido de 2 cm en la superficie posterior.	2,4	4,0

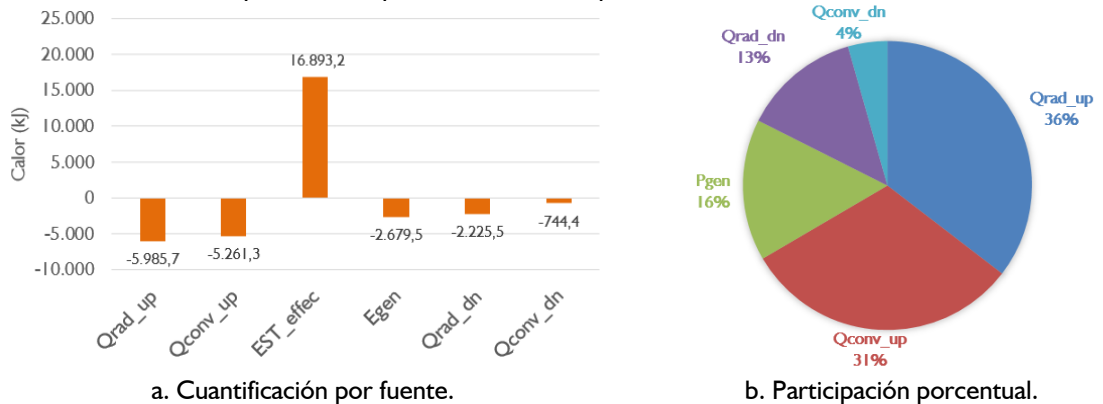
Una vez validado el modelo, se procede a mostrar en la Figura 69 el proceso continuo de almacenamiento (>0) y liberación (<0) de calor (carga – descarga) que experimenta un panel FV durante un día de operación. Se aprecia la existencia de cambios abruptos en la magnitud y sentido del flujo, entre -1100 W y 700 W, lo cual denota la existencia de transitorios térmicos intensos. Al finalizar la franja horaria de radiación solar, la variación tiende a cero y se puede asumir que el panel FV entra en un régimen cuasi-estacionario de su interacción con el ambiente circundante, donde la variación de la temperatura del panel FV es muy similar a la variación de la temperatura ambiente. El Anexo H presenta las curvas de comportamiento de cada uno de los procesos de transferencia de calor para este caso.

Figura 69. Variación del calor acumulado en el panel FV.



Por otro lado, la Figura 70 cuantifica la participación térmica de cada factor de incidencia, que indica que la energía entrante al sistema es debida a la radiación solar incidente (16 893,2 kJ), y que las mayores pérdidas de calor del panel FV corresponde a los procesos de transferencia de calor por convección y radiación en la superficie frontal, con 31% y 36% de participación, respectivamente. Esta participación será diferente para cada día debido al comportamiento cambiante de la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente.

Figura 70. Participación energética por factores de influencia en el comportamiento térmico de un panel FV para un día típico. Valores dados por metro cuadrado.



6.5 MODELO RC DE UN SISTEMA INTEGRADO PANEL FV-IRRIGACIÓN

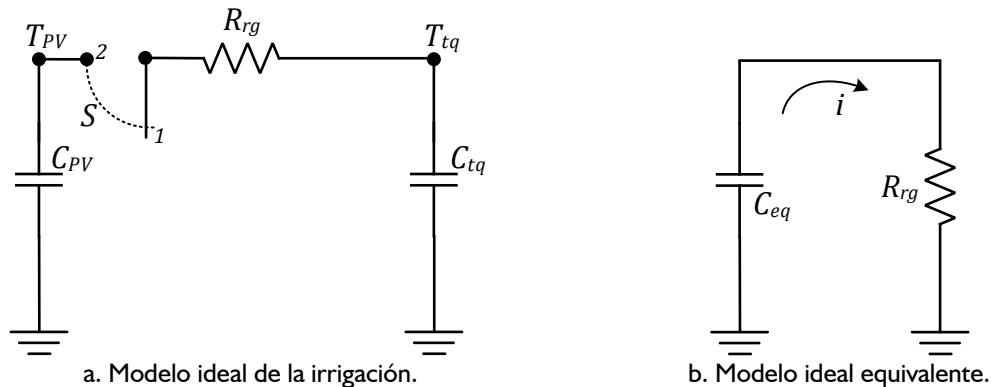
En el Capítulo 5 se analizó el impacto que la irrigación de un panel FV tiene en la generación de energía eléctrica del mismo, y se determinó que es una estrategia efectiva para reducir la temperatura de operación de un panel FV. Asimismo, se indicó que la aplicación de tal estrategia es energéticamente conveniente siempre y cuando se determine de manera inteligente si se debe o no irrigar y durante cuánto tiempo para un instante de análisis determinado, lo cual se aborda en detalle en el Capítulo 8.

Para lograr tal análisis, se requiere de un modelo que pueda predecir el efecto de la irrigación en el comportamiento térmico del panel FV. Por tanto, en esta sección se propone un modelo ajustado la versión presentada en la Sección 6.2. Este modelo ajustado comprende un aporte de esta Tesis Doctoral.

6.5.1 Modelado ideal del enfriamiento del panel FV debido a la irrigación

Con el fin de analizar de forma matemática el efecto de la irrigación sobre un panel FV, se procede establecer un modelo RC básico o ideal de la interacción entre el panel FV y el sistema de irrigación para el caso de enfriamiento, tal como muestra la Figura 71.a, donde C_{PV} representa la capacitancia térmica del panel FV a una temperatura T_{PV} , R_{rg} es una resistencia térmica debida al tipo de flujo y caudal de irrigación y C_{tq} es la capacitancia térmica del agua contenida en el tanque de recirculación a una temperatura T_{tq} .

Figura 71. Modelado ideal de la transferencia de calor por irrigación.



Este modelo solo considera el intercambio de calor entre el panel FV y el tanque de acopio, dado que el panel FV no recibe radiación solar y no genera energía, además se considera que los otros procesos de transferencia son significativamente menores para reducidos tiempos de irrigación (< 2 minutos). Por tanto, este modelo es la representación del circuito que describe el experimento detallado en la Sección 6.3.2, que fue utilizado para estimar el valor de C_{SPV} . El experimento realizado permite estimar la variación de la temperatura de los dos cuerpos, panel FV y agua contenida en el tanque, para el escenario de enfriamiento o descarga de la capacitancia térmica C_{PV} .

El circuito equivalente de la Figura 71.b se determina a partir del cálculo de la capacitancia equivalente (C_{eq}) tal como muestra la expresión (85). Con base en este valor y en el valor conocido de la constante de tiempo del transitorio de enfriamiento (τ_{eq}), es posible determinar la resistencia térmica de irrigación R_{rg} , de acuerdo a lo indicado por la expresión (86). La constante de tiempo se obtuvo de forma experimental y se determinó que es igual a 40 segundos para un caudal de 9,5 litros por minuto, tal como se indica en la Figura 49.

$$C_{eq} = \left(\frac{1}{C_{PV}} + \frac{1}{C_{tq}} \right)^{-1} \quad (85)$$

$$R_{rg} = \tau_{eq} / C_{eq} \quad (86)$$

Con el fin de establecer las ecuaciones que describen las variaciones de las temperaturas de operación del panel FV y del agua contenida en el tanque, se resuelve analíticamente el circuito tal como se muestra en el Anexo I. Las expresiones resultantes (87) y (88) se derivan del análisis realizado.

$$T_{PV}(t) = T_{PV_{forz}} + \frac{B \cdot \tau_{eq}}{C_{PV}} e^{-t/\tau_{eq}} \quad (87)$$

$$T_{tq}(t) = T_{tq_{forz}} - \frac{B \cdot \tau_{eq}}{C_{tq}} e^{-t/\tau_{eq}} \quad (88)$$

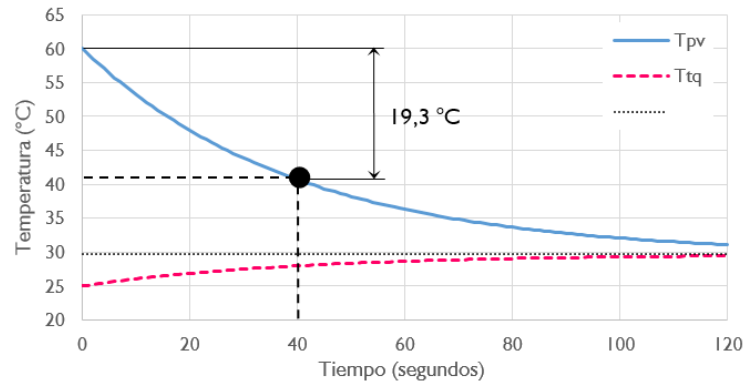
Para un caso ejemplo con un panel FV de 255 W (1,6 m²) y 25 litros de agua en el tanque de acopio, se tiene que las capacitancias C_{PV} y C_{tq} son iguales a 16,22 kJ/K y 104,5kJ/K, respectivamente, con una resistencia R_{rg} igual a 0,00285 °C/W. Las temperaturas iniciales del panel FV y del agua en el tanque de acopio se fijan en 60°C y 25°C, respectivamente. Las expresiones (89) y (90) presentan las expresión para la predicción de T_{PV} y T_{tq} .

$$T_{PV}(t) = 29,65 + 30,35e^{-t/40} \quad (89)$$

$$T_{tq}(t) = 29,65 - 4,65e^{-t/40} \quad (90)$$

Como resultado se tienen las curvas de comportamiento ideal de enfriamiento del panel FV y calentamiento del agua mostradas en la Figura 72. Se aprecia que la variación térmica del panel FV es significativamente mayor en comparación con el incremento de la temperatura del agua, lo cual se debe a la magnitud de sus capacitancias térmicas.

Figura 72. Curvas de enfriamiento del panel FV y calentamiento del agua de irrigación.

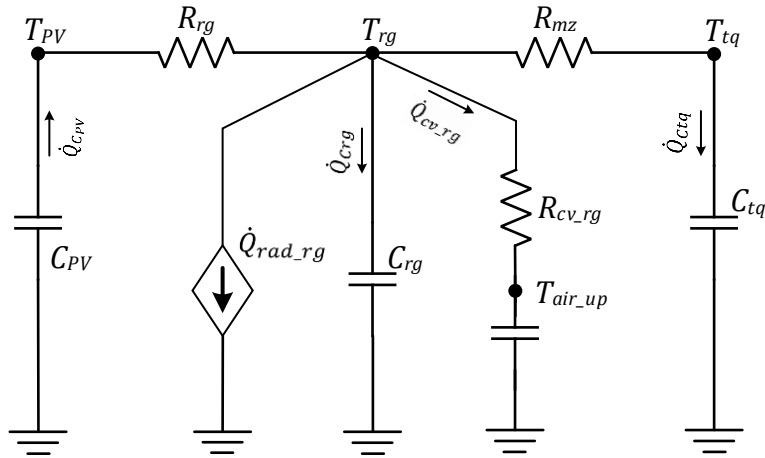


6.5.2 Modelo ajustado del enfriamiento del panel FV debido a la irrigación

El modelo del circuito de la Figura 71 representa el comportamiento ideal del enfriamiento del panel FV, y es utilizado como guía para determinar un modelo más realista del efecto de la irrigación que considere cada uno de los factores de influencia en el proceso de transferencia de calor. Este nuevo modelo es presentado en la Figura 73, el cual incorpora el nodo de la temperatura del agua de riego T_{rg} con el propósito de indicar que el agua sufre

variaciones en su temperatura en el mismo instante de tiempo, y por tanto no tiene una misma temperatura en toda su extensión.

Figura 73. Circuito representativo de los procesos de transferencia de calor en un panel FV irrigado sin radiación solar y con aislamiento térmico en la superficie posterior.



Se define que hay dos volúmenes de agua representados por las capacitancias C_{rg} y C_{tq} ; donde la primera es la cantidad de agua que puede ser suministrada para la irrigación en un minuto (e.g. 9,5 litros) y su temperatura en promedio será T_{rg} , la segunda capacitancia representa la cantidad de agua restante a una temperatura T_{tq} .

Es importante indicar que el modelo propuesto permite que el calor almacenado por C_{rg} fluya con rapidez hacia C_{tq} debido al reducido valor de R_{mz} . Después de finalizada la irrigación, las dos capacitancias, que representan el agua total contenida en el tanque de acopio, llegan a un equilibrio térmico.

La resistencia de mezclado R_{mz} se incluyó debido a que la recirculación y la mezcla de agua entrante y existente en el tanque de acopio no son instantáneas, por lo que el efecto de la ganancia de calor en el agua no se ve reflejado de manera inmediata en la variación de la temperatura del fluido que conforma la película de irrigación en un instante dado. En esta propuesta se definió que el valor de R_{mz} corresponde a una fracción del valor de R_{rg} .

En este modelo se considera que la capa de agua experimenta transferencia de calor con el entorno por convección y radiación. El flujo de calor por convección se representa por

medio de la resistencia R_{cv_rg} entre los nodos T_{rg} y T_{air_up} , y permite cuantificar la tasa de pérdida de calor del agua por aireamiento (\dot{Q}_{cv_rg}) cuando ésta se encuentra a una temperatura mayor a la temperatura ambiente, lo cual es común debido a la acumulación de calor en el agua del tanque de acopio. De acuerdo a los cálculos realizados, los valores de \dot{Q}_{cv_rg} son significativamente mayores en comparación al caso de convección de una superficie de un cuerpo sólido. Por otro lado, también se incluye la tasa de pérdidas por radiación de manera similar a lo mostrado en la Sección 6.2.

Dado que el circuito RC propuesto no tiene una forma típica que permita obtener una solución analítica, se procede a obtener una solución a partir de ecuaciones en diferencia. La solución consiste en calcular las temperaturas de los nodos T_{PV} , T_{rg} y T_{tq} de forma independiente para el instante $i + 1$ a partir de las corrientes resultantes para ese mismo instante de tiempo, las cuales a su vez se obtienen con base en las tensiones (temperaturas) del instante anterior i .

Se inicia con la estimación del valor $T_{PV_{i+1}}$ de acuerdo al planteamiento mostrado por las ecuaciones (91) a (94).

$$\dot{Q}_{CPV} = \frac{T_{PV} - T_{rg}}{R_{rg}} \quad (91)$$

$$\dot{Q}_{CPV} = c_{SPV} \cdot A_{PV} \cdot \frac{dT_{PV}}{dt} \quad (92)$$

$$\frac{dT_{PV}}{dt} = \frac{1}{c_{SPV} \cdot A_{PV} \cdot R_{rg}} (T_{PV} - T_{rg}) \quad (93)$$

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} + \frac{\Delta t}{c_{SPV} \cdot A_{PV} \cdot R_{rg}} (T_{PV_i} - T_{rg_i}) \quad (94)$$

De igual manera, se estima el valor de $T_{tq_{i+1}}$ tal como lo muestran las expresiones (95) a (98), \forall_{tq} y \forall_{rg} son los volúmenes de agua del tanque de acopio y de irrigación, que sumados son el volumen de agua total del tanque de acopio.

$$\dot{Q}_{Ctq} = \frac{T_{rg} - T_{tq}}{R_{mz}} \quad (95)$$

$$\dot{Q}_{Ctq} = \varsigma_{ag} \cdot (m_{tq} - m_{rg}) \cdot \frac{dT_{tq}}{dt} \quad (96)$$

$$\frac{dT_{tq}}{dt} = \frac{1}{\varsigma_{ag} \cdot \rho_{ag} \cdot (V_{tq} - V_{rg}) \cdot R_{mz}} (T_{rg} - T_{tq}) \quad (97)$$

$$T_{tq_{i+1}} = T_{tq_i} + \frac{\Delta t}{\varsigma_{ag} \cdot \rho_{ag} \cdot (V_{tq} - V_{rg}) \cdot R_{mz}} (T_{rg_i} - T_{tq_i}) \quad (98)$$

Seguidamente, se procede a cuantificar cada uno de los factores de influencia como son la variación del calor almacenado por el agua de riego (\dot{Q}_{Crg}), y la tasas de pérdida de calor por radiación (\dot{Q}_{radrg}) y convección (\dot{Q}_{cvrg}), tal como lo muestran las expresiones (99) a (101). Donde la resistencia R_{cvrg} es definida como el inverso de un coeficiente de aireamiento k_{air} .

$$\dot{Q}_{Crg} = \dot{Q}_{CPV} - \dot{Q}_{radrg} - \dot{Q}_{cvrg} - \dot{Q}_{Ctq} \quad (99)$$

$$\dot{Q}_{radrg} = \varepsilon' \cdot F \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV}^4 - T_{air_up}^4) \quad (100)$$

$$\dot{Q}_{cvrg} = \frac{T_{rg} - T_{airup}}{R_{cvrg}} = k_{air} \cdot (T_{rg} - T_{air_up}) \quad (101)$$

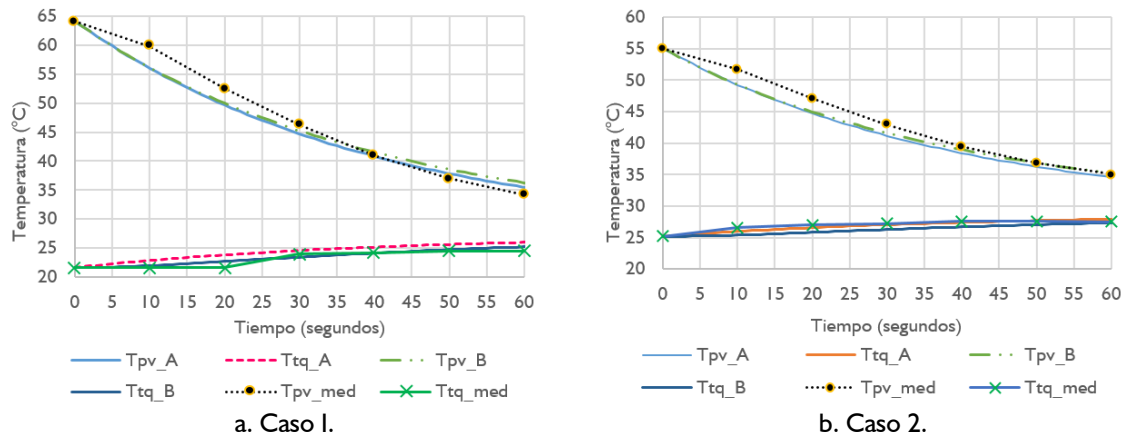
Finalmente, se determina el valor de $T_{rg_{i+1}}$ a partir de un análisis de nodos que considera la variación térmica de los flujos de calor mencionados.

$$T_{rg_{i+1}} = T_{rg_i} + \frac{\Delta t}{\varsigma_{ag} \cdot m_{rg}} \left(\frac{T_{PV_i} - T_{rg_i}}{R_{rg}} - \varepsilon' \cdot F \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot (T_{PV_i}^4 - T_{airup_i}^4) - k_{air} \cdot (T_{rg_i} - T_{airup_i}) - \frac{T_{rg_i} - T_{tq_i}}{R_{mz}} \right) \quad (102)$$

Con el fin de validar la utilidad de los modelos ideal y ajustado, se procede a comparar el comportamiento de las temperaturas del panel FV y del agua contenida en el tanque para dos casos durante un minuto, tal como lo muestra la Figura 74. La nomenclatura de las curvas

es la siguiente: T_{pv_A} y T_{tq_A} son las curvas obtenidas para el modelo ideal mostrado por la Figura 71, T_{pv_B} y T_{tq_B} son las curvas del modelo ajustado mostrado por la Figura 73, y T_{pv_med} y T_{tq_med} son las curvas obtenidas por medición.

Figura 74. Comparación de las curvas de temperatura medidas y estimadas del panel FV y el agua contenida en el tanque de acopio.



Tal como se aprecia, ambos modelos describen de manera satisfactoria la variación de la temperatura del panel FV y del agua de irrigación. Sin embargo, solo el segundo modelo puede ser integrado al modelo RC del panel FV debido a que considera los procesos de transferencia de calor con el entorno, los cuales serán más representativos cuando la duración de la irrigación sea mayor, situación que se aleja del comportamiento ideal descrito por el modelo inicial.

Estimación de k_{air} y R_{mz}

La película de agua pierde calor debido al aireamiento cuando la temperatura del agua de irrigación es mayor a la temperatura del aire circundante. La tasa de esta pérdida de calor depende de la velocidad del viento, ya que a mayor velocidad de éste, mayor será la tasa de pérdida de calor.

Para determinar la expresión de estimación del valor del coeficiente k_{air} se procedió a replicar el experimento descrito en la Sección 6.3.2, a partir del cual se determinó el valor

de c_{SPV} . Para este caso, la duración de la irrigación se fijó en 15 minutos con el fin de garantizar la culminación del transitorio de enfriamiento del panel FV y así apreciar la transferencia de calor de la película de agua hacia el entorno.

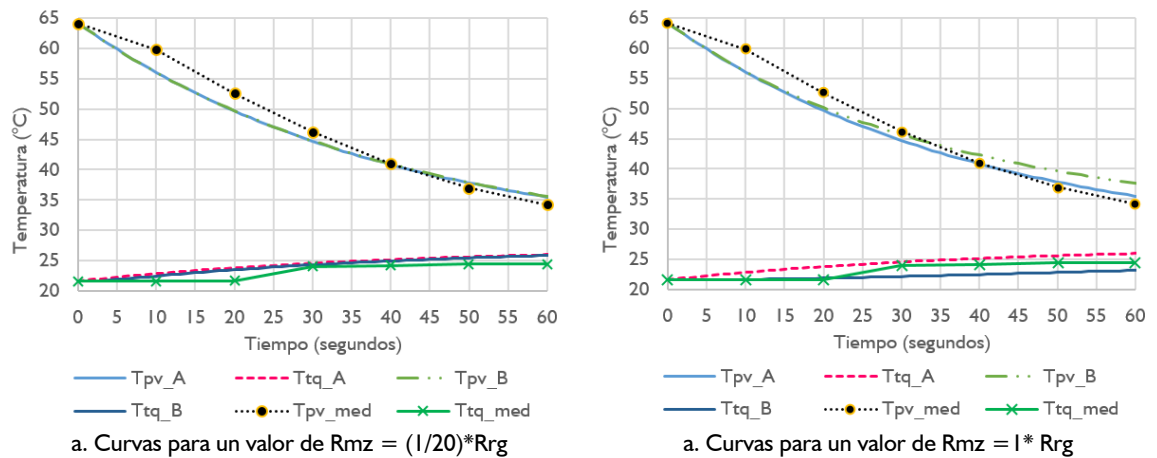
De acuerdo a los resultados obtenidos, se estableció la expresión (103) para determinar el valor k_n en función de la velocidad del viento (v). Esta expresión es válida hasta velocidades del aire de 2 m/s debido al comportamiento monitorizado de la variable. Por tanto, los valores de la resistencia R_{cv_rg} serán 0,0067 °C/W y 0,0042 °C/W para velocidades del viento de 0 m/s y 2 m/s, respectivamente.

$$k_n = 45,65 \cdot v + 148,95 \quad (W/^\circ C) \tag{103}$$

Es importante indicar que el valor de k_n se considera igual a cero cuando la temperatura del agua es menor a la temperatura ambiente, ya que según los resultados experimentales no se pudo cuantificar transferencia de calor del aire al fluido durante el tiempo de irrigación, ya sea porque no se da o porque su valor es muy bajo.

Por otro lado, se definió que el valor de la resistencia R_{mz} será una fracción de la resistencia R_{rg} . Con el fin de determinar un valor de fracción aceptable, se procedió a variar el escalar entre 1/20 y 1 para analizar el efecto respectivo en las curvas Tpv_B y Ttq_B . La Figura 75 presenta las curvas para los casos 1/20 y 1.

Figura 75. Efecto del valor de R_{mz} .

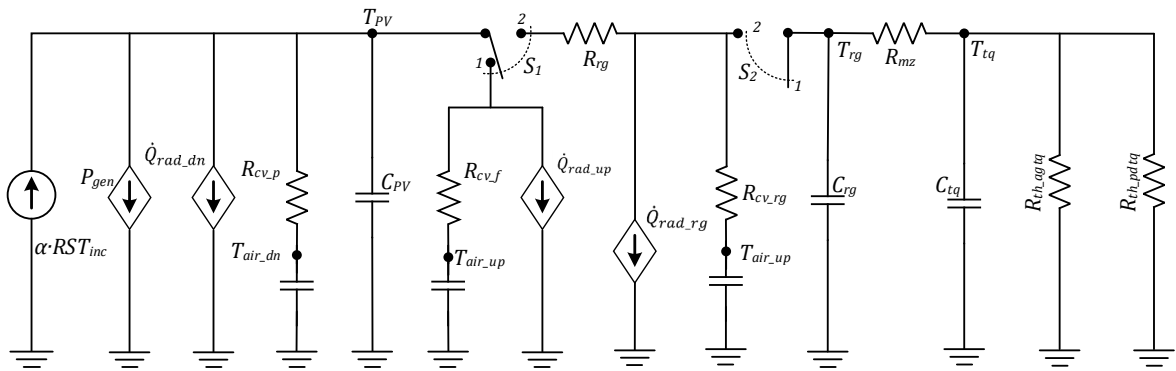


Cuando el escalon es 1/20 el modelo ajustado se comporta de manera muy similar al modelo ideal; en cambio cuando el escalon es igual a 1, se aprecia que los cambios en la temperatura son más lentos con respecto al comportamiento real. Al final se estableció un valor del escalon de 1/5, el cual fue el que se utilizó para obtener las curvas de la Figura 74.

6.5.3 Modelo térmico de un panel FV con irrigación (Modelo RC modificado)

Con base en el modelo RC del panel FV en condición de operación normal y el modelo ajustado del enfriamiento del panel FV debido a la irrigación, se estableció el modelo del comportamiento térmico de un panel FV con sistema de irrigación, el cual es mostrado en la Figura 76.

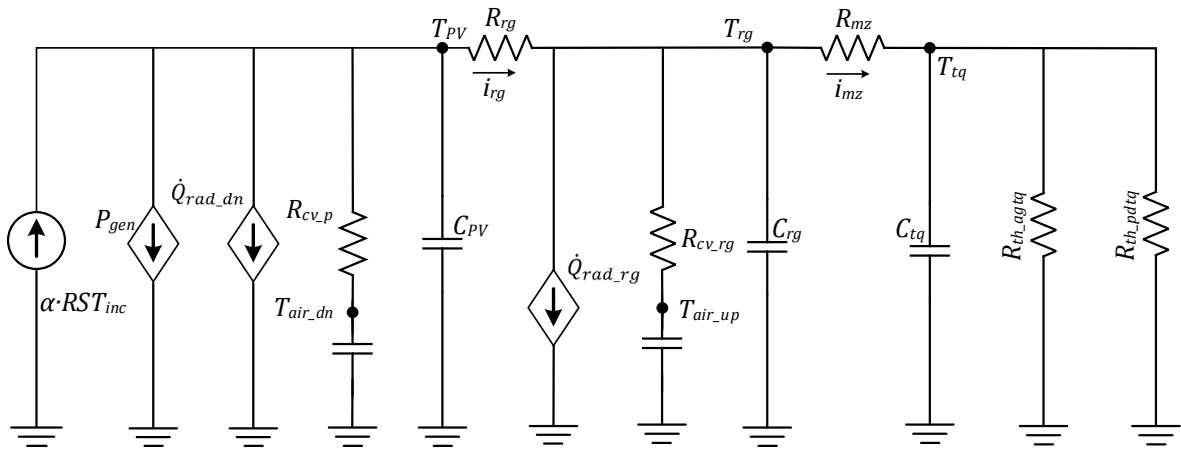
Figura 76. Modelo RC de un panel FV integrado con un sistema de irrigación.



Dado que el panel FV experimenta dos estados, irrigado y no irrigado, se consideran dos interruptores para ajustar el circuito según el estado. La posición 1 de los interruptores indica que el panel FV no está en estado de irrigación, en cuyo caso el circuito resultante es el mostrado en la Figura 62. La posición 2 representa el estado de irrigación que al ser activado define el circuito mostrado en la Figura 77.

El interruptor S1 define la interacción térmica de la película de riego. La posición 1 de este interruptor habilita los procesos de transferencia de calor de la superficie frontal del panel FV. La posición 2 anula los procesos térmicos de la superficie frontal y habilita la existencia de la película de agua, para la cual se introducen los procesos térmicos de convección y radiación.

Figura 77. Circuito térmico de un panel FV en estado de irrigación.



El interruptor S2 define el proceso de recirculación de agua del tanque de acopio. La posición I de este interruptor indica que no hay recirculación de agua y que toda ésta se encontrará en el tanque de acopio. Asimismo, que en caso de que se haya culminado un proceso de irrigación, se dará el mezclado del agua hasta alcanzar una temperatura de equilibrio donde T_{rg} y T_{tq} serán iguales. Se indica que la temperatura del agua T_{tq} posiblemente será mayor a la temperatura ambiente después de la irrigación del panel FV, por lo que ocurrirá un proceso de transferencia de calor al ambiente; por ello se incluyeron dos resistencias térmicas, R_{th_pdtq} y R_{th_agtq} que representan las transferencias de calor entre la envolvente y el ambiente y entre el agua del tanque y el aire en contacto con ésta.

Estimación de T_{PV}

Para estimar la temperatura del panel FV se debe dar solución a los circuitos de los dos estados, irrigación y no irrigación. Para el estado de no irrigación se hace uso del planteamiento presentado por la expresión (71) (Sección 6.2). Ahora bien, para el estado de irrigación se debe resolver el circuito de la Figura 77, y dado que es un circuito con forma no típica, se procede a buscar una solución a partir de ecuaciones en diferencia.

La solución consiste en calcular las temperaturas de los nodos T_{PV} , T_{rg} y T_{tq} de forma independiente para el instante $i + 1$, a partir de las corrientes (flujos de calor) en el instante de tiempo i .

Es importante indicar que debido a que la irrigación se puede llevar a cabo varias veces en un mismo día, se deberá estimar T_{PV} a partir de la aplicación intercalada del modelado matemático del circuito representativo del estado correspondiente, teniendo en cuenta que los valores finales de un análisis para un estado serán los valores iniciales del siguiente análisis para el otro estado.

A continuación se presenta la formulación matemática para estimar la temperatura T_{PV} durante la irrigación. Inicialmente, se lleva a cabo un análisis de nodos en T_{PV} como lo muestra la expresión (104), y a partir del cual se determina $T_{PV_{i+1}}$ según indica la expresión (105). La corriente i_{rg_i} se calcula según lo indica la expresión (106).

$$\alpha \cdot RST_{inc_i} = P_{gen} + \dot{Q}_{rad_dn} + \dot{Q}_{cv_dn} + \dot{Q}_{C_{PV}} + i_{rg} \quad (104)$$

$$T_{PV_{i+1}} = T_{PV_i} + \frac{\Delta t}{C_{PV}} \left(\alpha \cdot RST_{inc_i} - P_{gen_i} - \dot{Q}_{rad_dn} - \dot{Q}_{cv_dn} - i_{rg_i} \right) \quad (105)$$

$$i_{rg_i} = \frac{T_{PV_i} - T_{rg_i}}{R_{rg}} \quad (106)$$

Seguidamente, se establece otro análisis de nodos en T_{rg} para determinar el valor $T_{rg_{i+1}}$, tal como muestran las expresiones (107) y (108). Asimismo, se establecen las expresiones (109) a (111) para calcular los componentes $\dot{Q}_{rad_{rg_i}}$, $\dot{Q}_{cv_{rg_i}}$ e i_{mz_i} .

$$\dot{Q}_{rg} = i_{rg} - \dot{Q}_{rad_{rg}} - \dot{Q}_{cv_{rg}} - i_{mz} \quad (107)$$

$$T_{rg_{i+1}} = T_{rg_i} + \frac{\Delta t}{C_{rg}} \left(i_{rg_i} - \dot{Q}_{rad_{rg}} - \dot{Q}_{cv_{rg}} - i_{mz} \right) \quad (108)$$

$$\dot{Q}_{rad_{rg_i}} = \varepsilon' \cdot F \cdot \sigma \cdot A_{PV} \cdot \left(T_{rg_i}^4 - T_{sky_i}^4 \right) \quad (109)$$

$$\dot{Q}_{cv_{rg_i}} = k_n \cdot \left(T_{rg_i} - T_{amb_i} \right) \quad (110)$$

$$i_{mz_i} = \frac{T_{rg_i} - T_{tq_i}}{R_{rg}} \quad (111)$$

De manera similar se determina $T_{tq_{i+1}}$. Se parte de la sumatoria de corrientes en el nodo T_{tq} como lo muestran las expresiones (112) y (113). Los componentes $\dot{Q}_{th_agtq_i}$ y $\dot{Q}_{th_pdtq_i}$ se calculan como indican las expresiones (114) y (115).

$$i_{mz} = \dot{Q}_{tq} + \dot{Q}_{th_agtq} + \dot{Q}_{th_pdtq} \quad (112)$$

$$T_{tq_{i+1}} = T_{tq_i} + \frac{\Delta t}{C_{rg}} \left(i_{mz_i} - \dot{Q}_{th_agtq_i} - \dot{Q}_{th_pdtq_i} \right) \quad (113)$$

$$\dot{Q}_{th_agtq_i} = k_n \cdot (T_{tq_i} - T_{amb_i}) = \frac{T_{tq_i} - T_{amb_i}}{R_{th_agtq}} \quad (114)$$

$$\dot{Q}_{th_pdtq_i} = k_m \cdot (T_{tq_i} - T_{amb_i}) = \frac{T_{tq_i} - T_{amb_i}}{R_{th_pdtq}} \quad (115)$$

Por otra parte, cuando finaliza la irrigación del panel FV se inicia el proceso de enfriamiento del agua contenida en el tanque, lo cual se ha caracterizado mediante la estimación de la temperatura del agua a partir de la expresión (116), donde $R_{th_tq_eq}$ es la resistencia térmica equivalente que se calcula según la expresión (117).

$$T_{tq_{i+1}} = T_{tq_i} - \frac{\Delta t}{C_{rg}} \left(\frac{T_{tq_i} - T_{amb_i}}{R_{th_tq_eq}} \right) \quad (116)$$

$$R_{th_tq_eq} = \frac{R_{th_pdtq} \cdot R_{th_agtq}}{R_{th_pdtq} + R_{th_agtq}} \quad (117)$$

Valor del paso de tiempo Δt

El paso de tiempo Δt para el análisis de ecuaciones en diferencia depende de la constante de tiempo (τ) de los transitorios térmicos dominantes para cada estado. Se considera que el paso de tiempo Δt debe ser a lo sumo de 1/20 de τ .

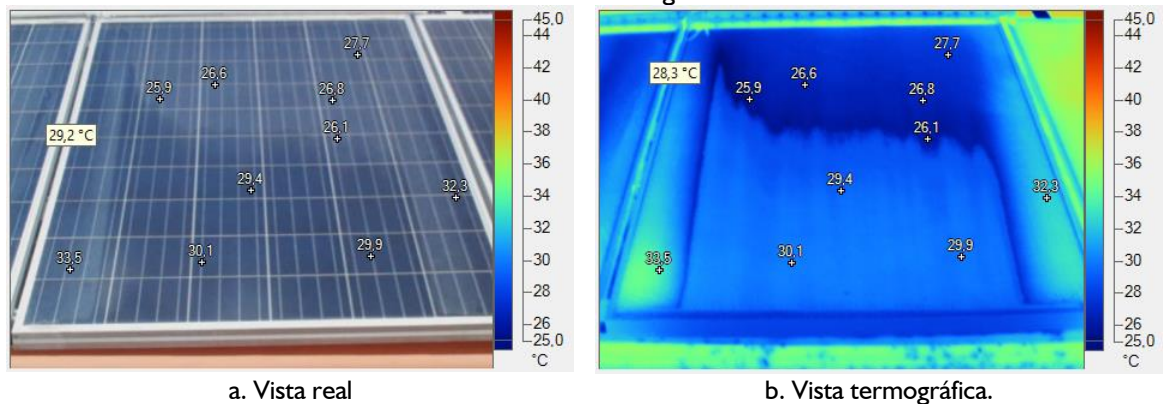
Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la parte experimental, se considera que el valor τ para el escenario de no irrigación es de 5 minutos o más, por lo cual Δt no debe ser mayor a 15 segundos. Para el escenario de irrigación, el valor de τ depende del caudal de irrigación; si se toma el flujo más alto logrado en el experimento (9,5 litros por minuto),

entonces se debe considerar τ igual a 40 segundos, y por lo cual Δt no debe ser mayor a 2 segundos. A partir de lo mencionado, se fijó el valor de Δt en 10 segundos para el escenario no irrigación, y de 1 segundo para el escenario de irrigación.

Enfriamiento por evaporación

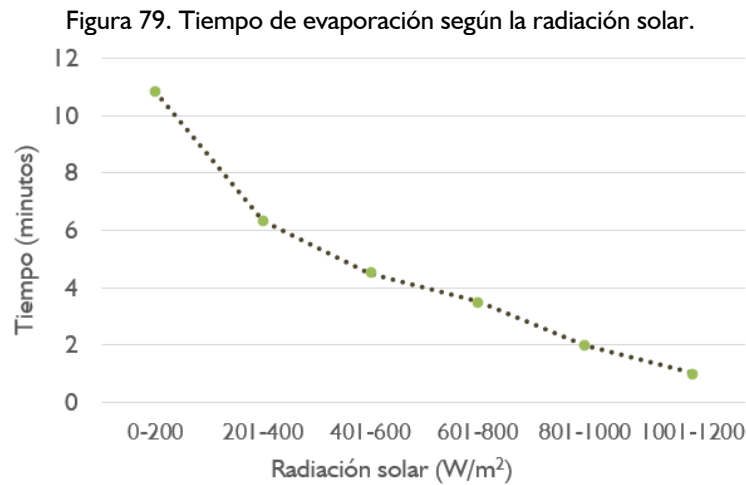
Una vez culminada la irrigación del panel FV es posible apreciar la existencia de una capa de agua residual muy delgada que se evapora por efecto de la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad del aire. La Figura 78 presenta un ejemplo de dicho evento.

Figura 78. Temperatura de la superficie frontal del panel FV cuando se evapora la capa de agua residual resultante al finalizar la irrigación.



Durante ese lapso de evaporación, se observó la continuación del efecto de la irrigación sobre la temperatura del panel FV; ello significa que el panel FV experimenta un proceso de enfriamiento debido a la evaporación de la capa de agua residual en su superficie frontal. Dicho proceso de evaporación sucede mayormente por la absorción de radiación solar incidente y la extracción de calor del panel FV.

A partir de la experimentación realizada, se pudo determinar una relación entre el tiempo de evaporación de la capa residual y la radiación solar, la cual se muestra la Figura 79. Se puede indicar que el efecto de la irrigación se extenderá de 1 o 2 minutos para altos niveles de radiación solar ($>800 \text{ W/m}^2$), y podrá ser mayor a 5 minutos para niveles bajos de radiación solar ($<400 \text{ W/m}^2$).



Dado el incremento en la potencia eléctrica generada por el panel FV que produce la temperatura de operación cuando su valor es cercano a la temperatura ambiente y de la magnitud del tiempo de evaporación, se debe considerar este fenómeno en el cálculo iterativo de $T_{PV_{i+1}}$. Ello se puede realizar de dos maneras, la primera consiste en fijar como constante el valor de T_{PV} obtenido al final de la irrigación por un tiempo igual al tiempo de evaporación de acuerdo al nivel de radiación solar, tal como lo ilustra la 7.18.

Otra estrategia consiste en aplicar un circuito alterno (o ficticio) que simule la continuación de la irrigación por un tiempo igual al tiempo de evaporación. Este circuito alterno tomará como valores iniciales los valores del estado final del circuito principal al finalizar la irrigación. Esto permitirá que el circuito principal prosiga los procesos de mezcla y enfriamiento del agua en el tanque de acopio una vez finalizada la irrigación.

Para ambos casos se debe tener en cuenta, que posterior a la finalización del tiempo de evaporación, se dará paso a la aplicación del circuito para el estado de no irrigación.

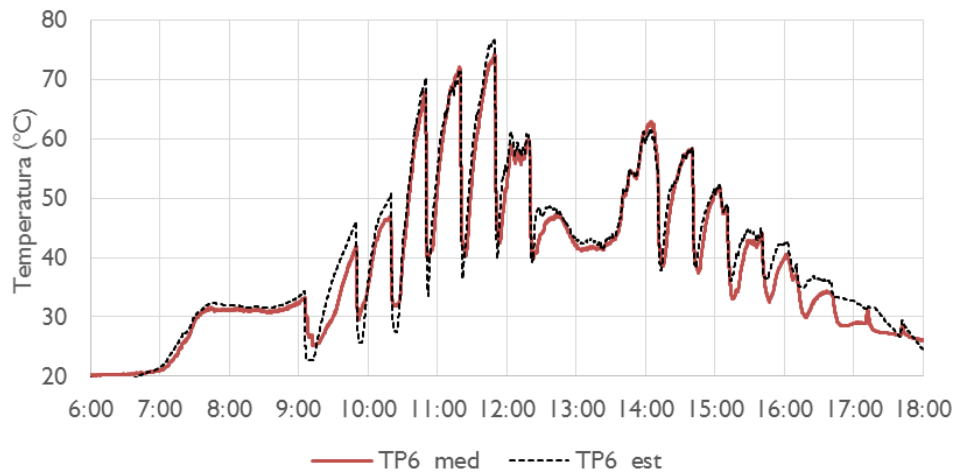
Validación del modelo RC modificado

Con el fin de validar el desempeño del modelo RC integrado panel FV – irrigación, se procedió a determinar la calidad de la predicción de la temperatura de operación del panel FV y del agua en tanque de acopio. Para ello, se realizó la irrigación de un panel FV con

régimen de 1 minuto de irrigación y 29 minutos de no irrigación en dos franjas horarias (9 a.m. a 12 p.m. y 2 p.m. a 6 p.m.) en condición de generación.

La Figura 80 muestra el desempeño de los modelos RC y RC modificado, donde se aprecia la similitud de las curvas medida ($TP6_med$) y estimada ($TP6_est$). Se calculó el valor de RMSD en $2,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el valor de NRMSD en $5,47\%$ entre 6 a.m. y 6 p.m. Por lo cual, se considera que el desempeño conjunto de los dos modelos RC es competente para predecir la temperatura de operación de un panel FV cuando está integrado con un sistema de irrigación.

Figura 80. Comparación de las curvas medida y estimada de la temperatura de operación del panel FV para un régimen de irrigación 1min:29 min.



El anterior cálculo consideró el enfriamiento por evaporación debido a la capa de agua residual después de la irrigación. En caso de que no se considere tal efecto, los valores RMSD y NRMSD desmejorarían levemente siendo $3,89^{\circ}\text{C}$ y $7,20\%$, respectivamente. La Figura 81 muestra los tiempos de evaporación asociados a cada etapa de irrigación, realizada de acuerdo al valor de la radiación solar en el tiempo.

De igual manera, se procede a comparar las temperaturas medida ($Ttq6_med$) y estimada ($Ttq6_est$) del agua contenida en el tanque de acopio, tal como lo muestra la Figura 82. Los valores de los índices RMSD y NRMSD se calcularon en $0,86\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $5,59\%$ entre 6 a.m. y 6 p.m.

Figura 81. Variación el tiempo de evaporación de acuerdo al nivel de radiación solar.

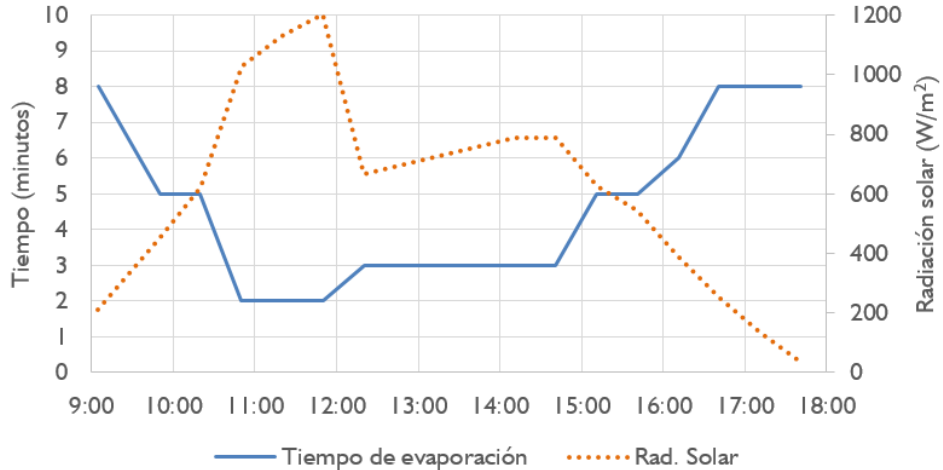
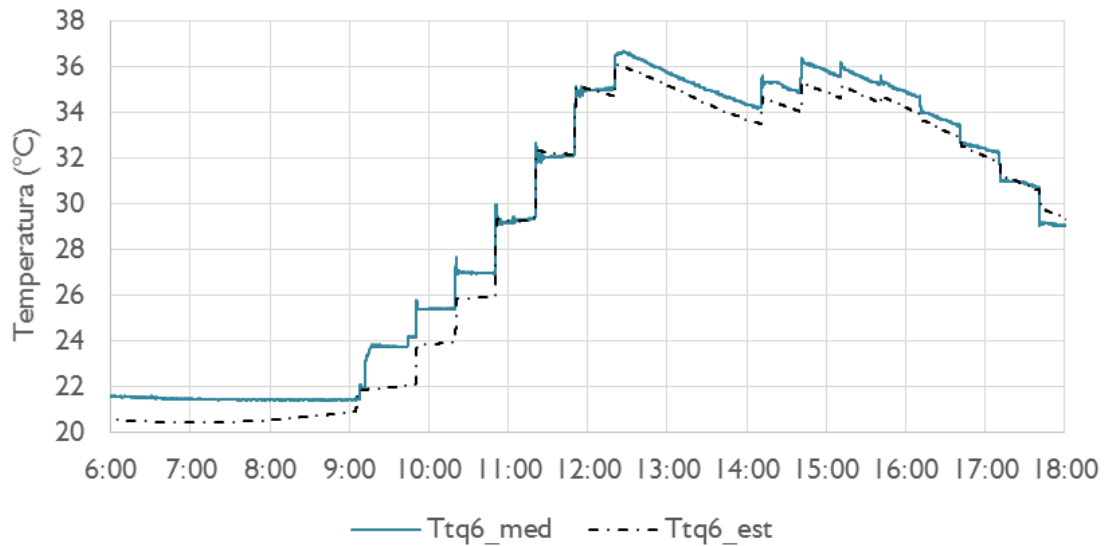
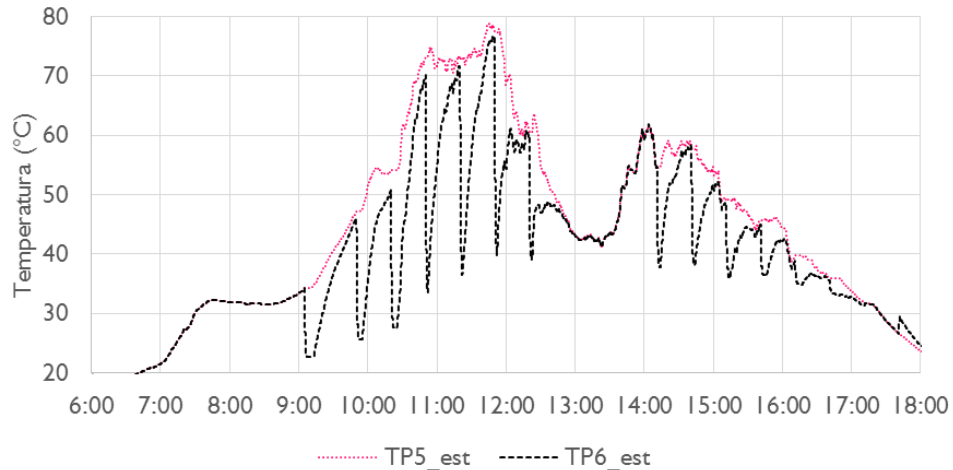


Figura 82. Comparación de las curvas medida y estimada de la temperatura del agua almacenada en el tanque de acopio.



Finalmente, con el fin de apreciar el efecto de la irrigación, la Figura 83 muestra la predicción de la temperatura para dos paneles FV, uno sin irrigación (*TP5_est*) y otro irrigado (*TP6_est*) con un régimen de 1 minuto de irrigación y 29 minutos de no irrigación en dos franjas horarias (9 a.m. a 12 p.m. y 2 p.m. a 6 p.m.). Por tanto, se concluye que el modelo RC modificado permite apreciar el efecto de la irrigación en la temperatura de operación de un panel FV, siendo una herramienta útil para gestionar un sistema de control de irrigación.

Figura 83. Comparación de las temperaturas estimadas de dos paneles FV de la temperatura del agua contenida en el tanque de acopio.



6.6 RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES DEL MODELADO A PARTIR DE ANALOGÍAS TERMOELÉCTRICAS

En primera instancia se verificó que un modelo RC del panel FV puede predecir de forma satisfactoria su temperatura de operación ante variaciones abruptas de radiación solar y velocidad del viento. Los errores de predicción establecidos oscilan entre 4% y 5%.

A partir del modelado mencionado del panel FV, se obtuvo un modelo RC modificado que puede predecir el comportamiento térmico del panel FV cuando es irrigado, lo cual constituye un aporte de esta Tesis Doctoral.

Se determinó que el error de predicción de la temperatura del panel FV en condición de irrigación sería cercano al 6 %, similar al error de predicción de la temperatura del agua de irrigación almacenada en el tanque de acopio.

Como parte del proceso de construcción del modelado, se determinaron de forma experimental el valor de la capacidad térmica del panel FV y el coeficiente superficial de transmisión. También se definió el valor de las resistencias térmicas de irrigación y de mezclado del agua.

7. CONSIDERACIONES PARA INCREMENTAR EL BENEFICIO ENERGÉTICO DE LA IRRIGACIÓN EN LA GENERACIÓN DE UN PANEL FV

Con base en el análisis de resultados presentado en el Capítulo 5, se identificó que la irrigación es el factor, de los cuatro analizados, que puede producir el mayor beneficio energético. También se estableció que la obtención y la magnitud del beneficio energético dependen de la radiación solar, el tiempo de irrigación y la potencia de la bomba de irrigación.

En este capítulo se presentan consideraciones para incrementar el beneficio energético de la irrigación, que permitió el desarrollo de un sistema de riego inteligente de paneles FV. El incremento del beneficio energético se basa en determinar si se debe o no irrigar y cuándo debe ser realizado este análisis. Este proceso de toma de decisiones requiere de la proyección en el tiempo del comportamiento del panel FV, lo cual puede ser logrado a partir del uso de los modelos de temperatura de operación y potencia generada establecidos en los capítulos 6 y 7.

Es de notar que este planteamiento hace que la irrigación del panel FV ya no se rija por tiempos de operación constantes, como fue el caso de los regímenes analizados en el Capítulo 5. La duración del tiempo de no irrigación será determinada en cada instante de tiempo según las condiciones analizadas.

La Sección 7.1 explica la estrategia desarrollada para mejorar el efecto de la irrigación a partir de la maximización de la potencia adicional generada. La Sección 7.2 presenta la valoración del efecto energético de los regímenes de irrigación a partir de la aplicación de los índices potencia neta promedio máxima ($P_{pm\acute{a}x}$) y tiempo de beneficio energético máximo ($t_{bm\acute{a}x}$).

Finalmente, la Sección 7.3 refiere una breve reseña de una invención desarrollada con base en el análisis mostrado en la Sección 7.1 y en hallazgos de la experimentación y el modelado obtenidos en esta Tesis Doctoral. La invención desarrollada se denominó MÉTODO Y SISTEMA DE IRRIGACIÓN PARA PANELES FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS CON TECHOS VERDES, de la cual ya se solicitó el otorgamiento de una patente de invención. Esta invención consta dos partes, la infraestructura para la irrigación del panel FV y del techo verde y los métodos para que dicha irrigación sea realizada de forma inteligente.

7.1 ESTRATEGIA PARA LA OBTENCIÓN DEL BENEFICIO ENERGÉTICO NETO MÁXIMO

Esta sección presenta los lineamientos para el incremento del beneficio energético; seguidamente, se expone la obtención y la aplicación de dos índices en un caso de análisis, denominados potencia neta promedio máxima ($P_{pm\acute{a}x}$) y tiempo de beneficio energético máximo ($t_{bm\acute{a}x}$). También se expone que hay dos opciones para determinar la curva de potencia de referencia (P_{genref}) con respecto a la cual se cuantifica el beneficio energético.

7.1.1 Lineamientos para la obtención de un beneficio energético neto máximo

En esta investigación se caracterizó el impacto de la irrigación en el comportamiento de un panel FV para diversos regímenes de operación. De manera general, se aprecia que el impacto de la irrigación varía significativamente entre los diferentes modos de operación, incluso para un mismo régimen cuando varía la radiación solar.

De este análisis se observó que la obtención de un beneficio energético neto, el cual ocurre cuando la energía adicional producida por el panel FV como consecuencia de la irrigación

del mismo es mayor a la energía consumida por el sistema de irrigación, depende de la temperatura de operación previa a la irrigación, la radiación solar, la temperatura del fluido de irrigación, el régimen de irrigación y el consumo de energía del sistema de irrigación, entre otros.

Dado que en el Capítulo 5 se identificó que en varios casos no es posible recuperar el consumo energético, se concluye que es necesario identificar las condiciones que impiden la obtención de un beneficio energético.

Una primera causa tiene que ver con la inconveniencia de un régimen con horario diario de inicio y fin de operación, ya que la variación de las condiciones micro-climáticas puede llevar a que haya ciclos de operación con ganancias de energía y otros ciclos con pérdidas de energía. Inclusive es posible que las condiciones de un día determinado no permitan que se pueda obtener un beneficio energético en algún momento.

Un segundo problema es la condición estática del régimen de irrigación ($t_a:t_b$), representada por los tiempos fijos de irrigación (t_a) y de no irrigación (t_b). Esto se refiere a que en ocasiones es posible que un mismo tiempo t_b lleve a una irrigación tardía o a una irrigación prematura del panel FV para diferentes momentos del día. El primer caso ocurre cuando la temperatura del panel FV irrigado alcanza el mismo valor de la temperatura de un panel FV no irrigado durante el tiempo t_b , lo que implica que no hay una potencia eléctrica adicional generada.

La irrigación prematura ocurre cuando se da inicio a un nuevo ciclo de irrigación, existiendo condiciones para seguir aprovechando el impacto de la irrigación del ciclo anterior; inclusive puede ocurrir que ni siquiera se haya recuperado la energía consumida de la irrigación ya efectuada.

En definitiva, la situación descrita se puede resumir en dos interrogantes ¿se debe o no irrigar? y ¿cuándo debería irrigarse de nuevo?

En esta investigación se considera posible dar solución a estas preguntas a partir de un procedimiento orientado a maximizar el beneficio energético de la irrigación. Este planteamiento tiene por objeto posibilitar 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 sería 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).

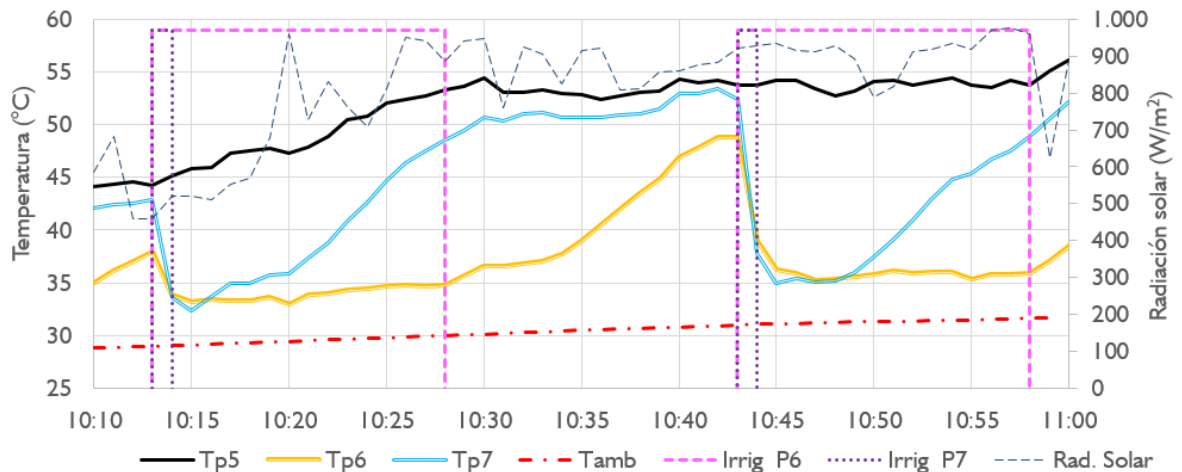
7.1.2 Cálculo de los índices de beneficio energético $P_{pm\acute{a}x}$ y $t_{bm\acute{a}x}$

Con el fin de exponer la aplicación de los pasos a), b) y c) indicados en el numeral 8.1.1, se procede a analizar el desempeño de tres paneles FV (P5, P6 y P7) con iguales condiciones de operación, salvo que los paneles P6 y P7 son irrigados.

Las curvas de temperatura de operación y potencia eléctrica generada utilizadas en este análisis no son proyectadas sino obtenidas por medio del sistema de monitorización asociado al experimento de irrigación. Las curvas correspondientes al panel P5 (no irrigado) se consideran las curvas de referencia $T_{oper_{ref}}(t)$ y $P_{gen_{ref}}(t)$.

La ventana de tiempo para este análisis es de aproximadamente una hora (de 10:10 a.m. a 11:00 a.m.). El panel P6 es irrigado con régimen de 15 minutos de irrigación y 15 minutos de no irrigación de 10:13 a.m. a 10:28 a.m. y de 10:43 a.m. a 10:58 a.m.; mientras el panel P7 es irrigado con régimen de 1 minuto de irrigación y 29 minutos de no irrigación de 10:13 a.m. y 10:14 a.m. y entre 10:43 a.m. y 10:44 a.m., tal como muestra la Figura 84.

Figura 84. Comportamiento de las temperaturas de operación y variables micro-climáticas.

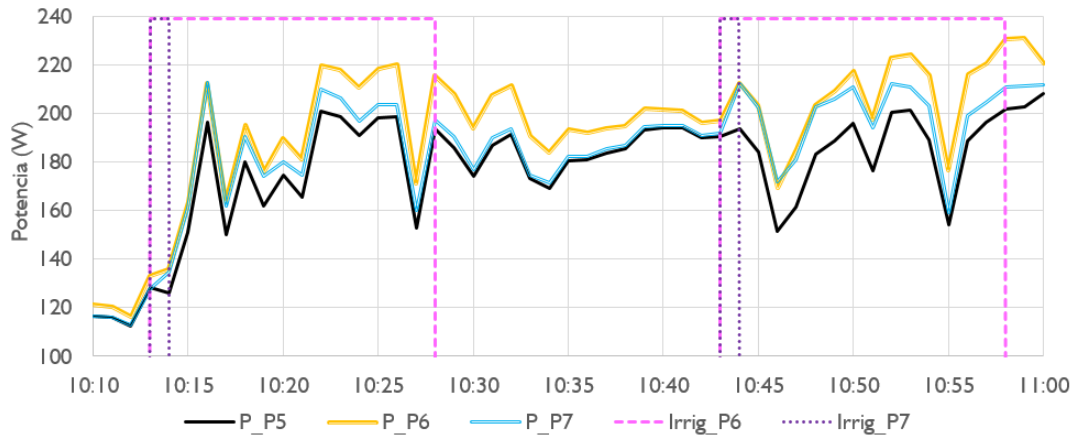


Se aprecia que el nivel de radiación solar dentro de la ventana de análisis estuvo mayormente sobre 750 W/m^2 y la temperatura ambiente ascendió de 28°C a 32°C .

El panel FV P6 mantiene su temperatura durante la irrigación y se incrementa rápidamente durante el tiempo de no irrigación. Por otro lado, el panel FV P7 alcanza una temperatura similar a la temperatura del panel FV P5 (no irrigado) al finalizar el tiempo de no irrigación (10:43 a.m.), por lo que es probable que se deba haber irrigado antes.

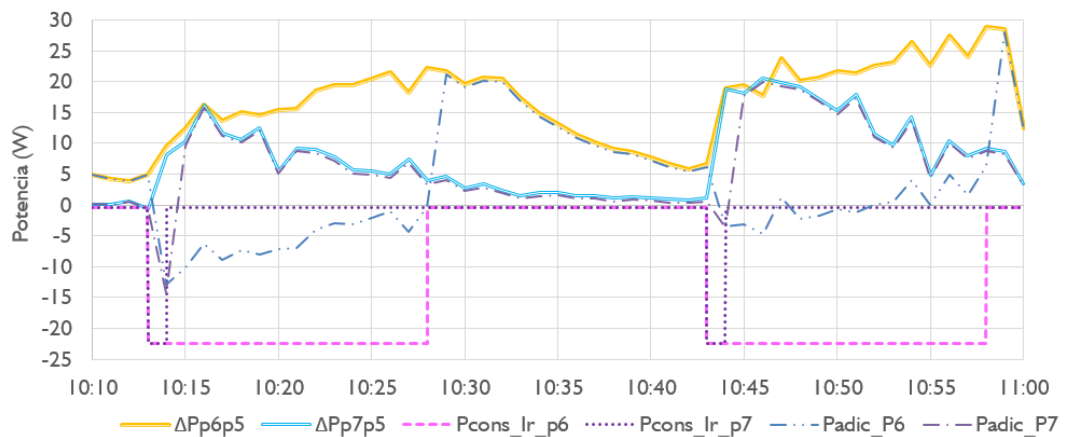
Los paneles FV generan potencias eléctricas cercanas a 125W al inicio del ciclo de irrigación (10:13 a.m.), tal como muestra la Figura 85. Asimismo, el aumento de potencia en los paneles FV P6 y P7 se hace evidente por efecto de la irrigación, y disminuyen a medida que aumenta su temperatura, acercándose a los valores registrados por el panel FV P5, siendo este el comportamiento esperado.

Figura 85. Comportamiento de las potencias generadas por los paneles FV P5, P6 y P7.



La Figura 86 muestra las curvas de potencia eléctrica adicional producida por los dos regímenes de operación de los paneles P6 y P7, denominadas $\Delta Pp6p5$ y $\Delta Pp7p5$. Asimismo, muestra las curvas de consumo energético para los casos de irrigación de los paneles P6 y P7, denominadas $Pcons_Ir_p6$ y $Pcons_Ir_p7$. Las curvas de potencias de consumo se deben a dos bombas sumergibles de 22 W ubicadas en los tanques de acopio y a varios componentes como controladores y los sensores con una potencia conjunta de 0,5 W; por tanto, la potencia consumida durante el tiempo de irrigación es de 22,5 W y de 0,5 W cuando no se irriga. A partir de las curvas de potencial adicional y de consumo energético, se establecen las curvas de potencia adicional o neta generada, $Padic_P6$ y $Padic_P7$.

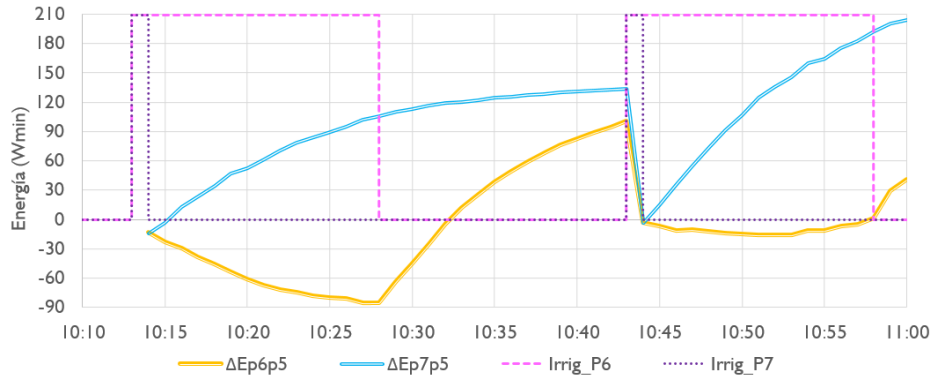
Figura 86. Curvas de potencia adicional o neta generada por los paneles FV P6 y P7.



A partir de las curvas $P_{adic}(t)$, se calculan las curvas de energía adicional generada como la sumatoria del producto de la potencia por el paso de tiempo de análisis – Δt_a (e.g. 1 min.), tal como muestra la expresión (118). Las curvas resultantes se muestran en la Figura 87.

$$E_{adic} = \sum P_{adic}(t) \cdot \Delta t_a \quad (118)$$

Figura 87. Curvas de la energía adicional o neta generada obtenida por los paneles FV P6 y P7.



En ambos regímenes de irrigación, la energía adicional generada fue positiva al final del ciclo de irrigación, por lo cual se recuperó la energía consumida.

Para el caso del panel FV P6, se aprecia que la energía adicional generada es negativa (-88 Wmin o -1,47 Wh) al final del intervalo de irrigación (10:28 a.m.) en el primer ciclo de irrigación. Esto indica que el consumo energético durante los 15 minutos fue mayor al beneficio obtenido, tal como muestra la Figura 86. Adicionalmente, el instante de retorno de la inversión energética se da sólo 5 minutos después de finalizar la irrigación (10:33 a.m.). En el segundo ciclo de irrigación, se observa que el beneficio energético es mayor, incluso la recuperación energética ocurre al finalizar el intervalo de irrigación (10:58 a.m.).

Para el panel FV P7, se observa que se requieren 2 minutos para recuperar la energía consumida; al final del primer ciclo de irrigación, la energía adicional generada es de 135 Wmin (2,25 Wh). Para el segundo ciclo de irrigación, la recuperación de la energía consumida ocurre durante la irrigación; esto se debe al alto valor de la radiación solar ($> 900 \text{ W/m}^2$), razón por la cual, la curva de energía adicional tiene un crecimiento más rápido que en el primer ciclo mostrado.

De acuerdo a lo mencionado, los tiempos de recuperación del consumo energético varían tanto por el tipo de régimen como por el nivel de radiación solar, lo cual significa que los ciclos de intervalo fijo (e.g. 30 minutos) no favorecen el mejor aprovechamiento del efecto de la irrigación.

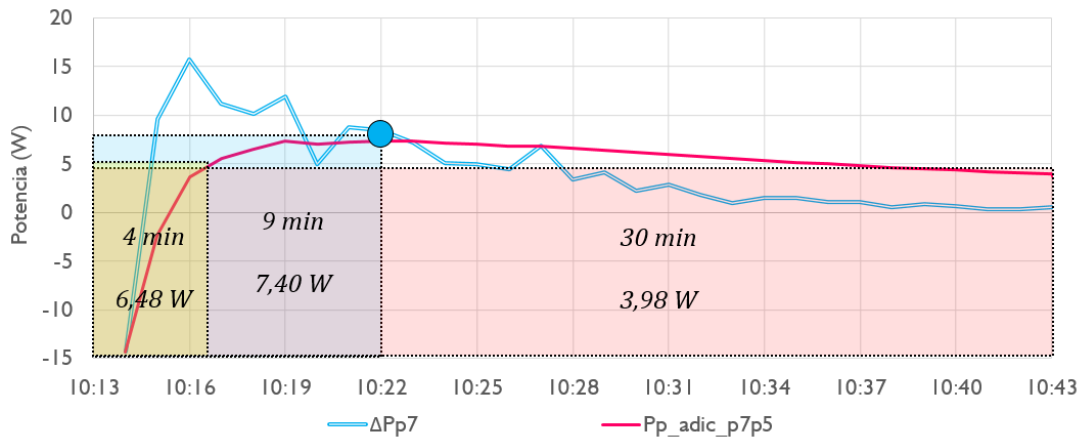
Por consiguiente, es prioritario determinar cuándo deberían iniciar los ciclos posteriores de irrigación para ambos paneles FV. La determinación de este tiempo debe basarse en el mayor aprovechamiento posible del efecto de la irrigación.

Se definió que es posible cuantificar el efecto energético de la irrigación en el tiempo a partir de una variable denominada *potencia generada adicional acumulada en el tiempo* $P_{p_adic}(t_i)$, la cual se calcula a partir de la expresión (119).

$$P_{p_adic}(t_i) = \frac{E_{adic}(t_i)}{t_i} \tag{119}$$

La Figura 88 muestra la curva P_{p_adic} para el primer ciclo de irrigación del panel FV P7 y cuantifica el beneficio energético en función del tiempo posterior al inicio de la irrigación. Indica que el efecto de la irrigación genera una potencia promedio adicional de 6,88 W al minuto 4 de ciclo de irrigación, de 7,85 W al minuto 9 y de 4,46 W al finalizar el ciclo de trabajo. Esta curva se caracteriza por un incremento rápido en la parte inicial que corresponde a la mayor potencia adicional generada (curva ΔP_{p7p5} de la Figura 86) en este intervalo de tiempo.

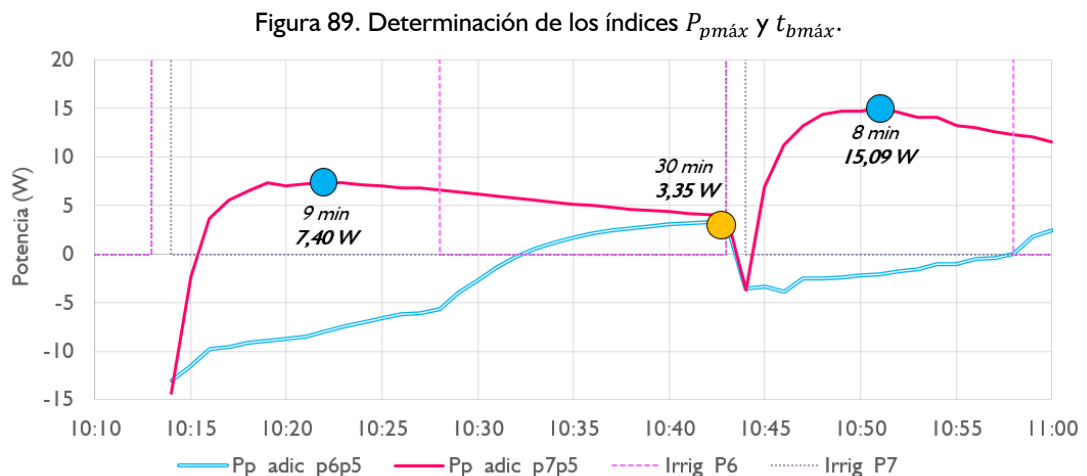
Figura 88. Curva de potencia promedio adicional del panel P7.



El valor máximo de la curva P_{p_adic} se denomina *potencia promedio adicional máxima* – $P_{pmáx}$, e indica el instante de tiempo en el cual se obtiene el mayor beneficio energético de una irrigación para un ciclo determinado, que se denomina *tiempo de beneficio energético máximo* – $t_{bmáx}$. Este valor será diferente para cada análisis.

Los valores $P_{pmáx}$ para regímenes estáticos pueden ocurrir durante el tiempo de no irrigación o en el instante final del ciclo, instante previo para una nueva irrigación. El primer caso indica que el mayor beneficio energético ocurre antes de finalizar el ciclo y por lo cual se debería haber irrigado antes del tiempo programado; el segundo caso muestra que la curva fue interrumpida mientras incrementaba su valor, lo que da entender que se requería más tiempo para obtener el valor máximo; en este caso el inicio del nuevo ciclo de irrigación no permitió obtener el mayor beneficio energético.

La Figura 89 muestra las curvas de potencia promedio adicional $P_{p_adic_p6p5}$ y $P_{p_adic_p7p5}$ de los paneles P6 y P7 con respecto a P5, e identifica los puntos máximos para cada régimen. El valor $P_{pmáx}$ del panel FV P6 para el primer ciclo es de 3,35 W y ocurre en minuto 30 para el primer ciclo. Con respecto al panel FV P7, $P_{pmáx}$ es 7,40 W y 15,09 W para el primer y segundo ciclos analizados, respectivamente, con tiempos $t_{bmáx}$ de 9 minutos y 8 minutos.



Se aclara que si el panel FV P7 se hubiese irrigado de acuerdo al criterio $P_{pm\acute{a}x}$ ocasionaría que la curva $P_{p_adic_p7p5}$ fuese diferente a lo ilustrado en la Figura 89 a partir las 10:22 a.m., tal como se explica en el numeral 8.1.3.

Dado que $P_{pm\acute{a}x}$ se obtiene en el minuto 9 (10:22 a.m.), es el instante de tiempo en el cual se debe llevar a cabo un proceso de toma de decisión para establecer si se debe irrigar o no. Para ello, inicialmente se proyectan en el tiempo tres curvas hipotéticas: (i) la potencia generada del panel FV debido al nuevo ciclo de irrigación, (ii) la potencia de consumo debido a la operación del sistema y (iii) la potencia generada del panel FV de referencia ($P_{genref}(t)$). Seguidamente, se establece la curva de la potencia adicional generada ($P_{adic}(t)$) a partir de las tres curvas mencionadas.

El criterio principal para tomar la decisión de irrigar es que $P_{pm\acute{a}x}$ sea mayor a un valor de referencia que según lo indicado en el numeral 8.1.3.

7.1.3 Impacto de la selección de la curva de potencia de referencia – P_{genref}

Es importante indicar que hay dos opciones para definir la curva $P_{genref}(t)$, y que según la selección variará la curva $P_{p_adic}(t)$, y por ende, la decisión del proceso de toma de decisión sobre la irrigación.

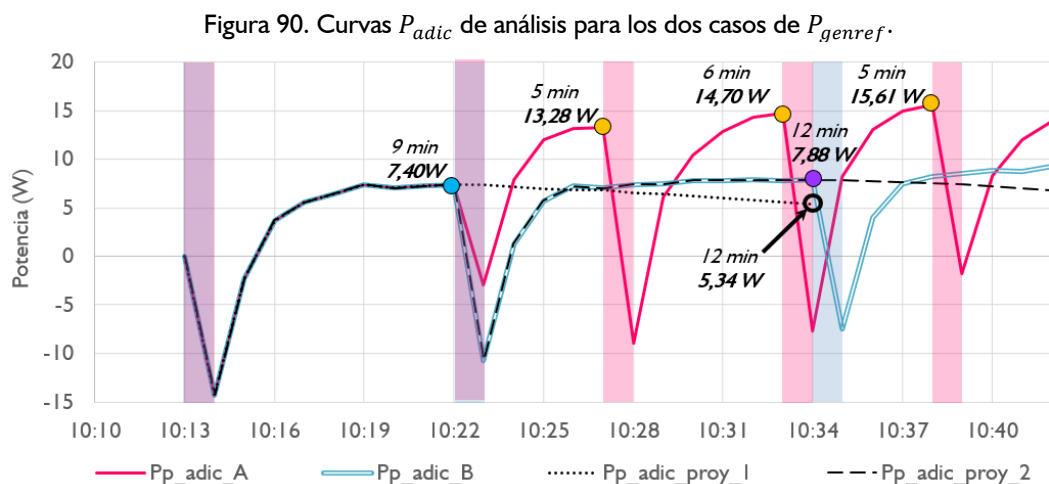
La primera opción de $P_{genref}(t)$ corresponde a la curva de potencia eléctrica generada por un panel FV que nunca recibe irrigación; y se denomina P_{genref_I} . La segunda opción hace referencia al panel FV que es objeto de irrigación, aunque considerando que no será irrigado en el instante de análisis – t en el cual se efectúa el proceso de toma de decisión; y se denomina P_{genref_II} . Esto tiene por objeto considerar en el análisis el efecto residual de la última irrigación en la potencia generada por el panel FV.

Si se opta por P_{genref_I} , entonces los nuevos valores de $P_{pm\acute{a}x}$ y $t_{bm\acute{a}x}$ definirán de forma directa el proceso de toma de decisión sobre la irrigación. Se efectuará la irrigación en el instante de análisis, siempre y cuando $P_{pm\acute{a}x}$ sea mayor a cero, y se proyectará un nuevo análisis de acuerdo al tiempo $t_{bm\acute{a}x}$.

Ahora bien, si se selecciona a P_{genref_II} , entonces se deben seguir los siguientes pasos: (i) calcular los nuevos valores de $P_{pmáx}$ y $t_{bmáx}$ de la curva $P_{adic}(t)$, definida como la curva hipotética de la potencia eléctrica generada por el efecto de la irrigación estimada en el instante de análisis menos la curva hipotética de potencia eléctrica del consumo del sistema menos la curva de potencia eléctrica generada considerando la última irrigación; (ii) evaluar la curva $P_{p_adic}(t)$ obtenida en (i) en el instante de tiempo determinado por el nuevo $t_{bmáx}$, el cual se denominará potencia residual de referencia – P_{resref} ; (iii) comparar los valores $P_{pmáx}$ obtenido en (i) y $P_{genref_II}(t_{bmáx})$ obtenido en (ii), y (iv) irrigar si $P_{pmáx}$ es mayor a $P_{genref_II}(t_{bmáx})$, en caso contrario no se irrigará.

La decisión de no irrigar que podría tomarse en el paso (iv) hace referencia a que el efecto residual de la anterior irrigación es aún significativo, y que por ende una nueva irrigación no logrará aún producir un incremento en la potencia tal que supere el beneficio de la anterior irrigación.

La Figura 90 presenta un ejemplo de aplicación para las dos opciones de P_{genref} . Las franjas de color rosado indican las irrigaciones correspondientes al uso de P_{genref_I} , la franja azul a la irrigación cuando se hace uso de P_{genref_II} , mientras las franjas violeta son comunes para ambas opciones.



La curva Pp_adic_A hace referencia al proceso de obtención de $P_{pm\acute{a}x}$ para P_{genref_I} , la cual evidencia que el tiempo $t_{bm\acute{a}x}$ es calculado en cuatro ocasiones, indicando los tiempos de análisis correspondientes (10:22 a.m., 10:28 a.m., 10:33 a.m. y 10:38 a.m.), para los cuales se decidió efectuar la irrigación dado que cada valor de $P_{pm\acute{a}x}$ (7,40 W, 13,28 W, 14,70 W y 15,61 W) fue mayor a cero.

En caso que de que el valor $P_{pm\acute{a}x}$ hubiese sido negativo, se procedería a establecer un nuevo instante de análisis, el cual se ejecutará en un intervalo de tiempo posterior e igual al paso de tiempo de análisis Δt (e.g. 1 min).

También se muestra la curva Pp_adic_B que resulta del cálculo de $P_{pm\acute{a}x}$ y $t_{bm\acute{a}x}$ para P_{genref_II} cuando se considera el efecto residual de la última irrigación descritas por las curvas $Pp_adic_proy_1$ y $Pp_adic_proy_2$, y cuyo proceso de análisis es más complejo que el anterior.

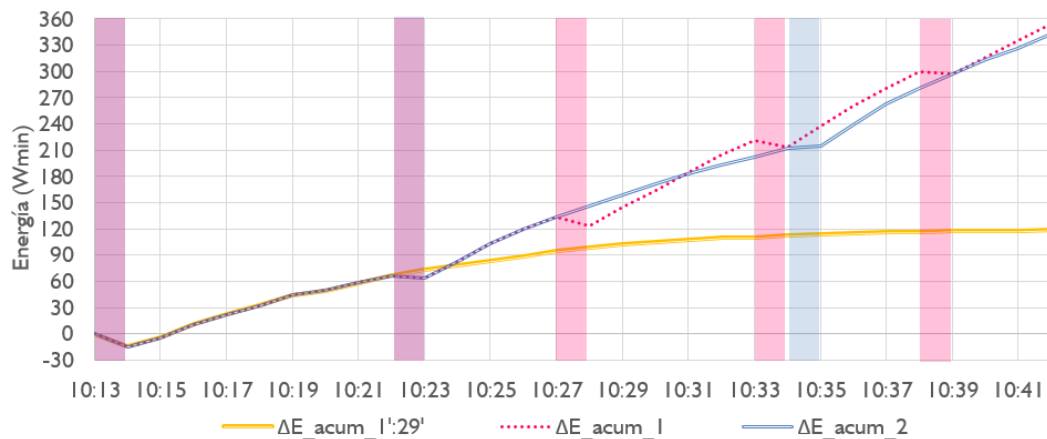
Dado que la primera irrigación se efectuó a las 10:13 a.m., se obtuvo un valor $t_{bm\acute{a}x}$ que es aplicado para ambos casos, y que lleva a la realización de un análisis de irrigación a las 10:22 a.m. A partir de este instante se proyecta una curva de P_{p_adic} que considera la irrigación en ese instante de tiempo y a partir de la cual se obtienen los valores $P_{pm\acute{a}x}$ y $t_{bm\acute{a}x}$, que son 7,88 W y 12 minutos, respectivamente. Seguidamente, se proyecta la curva P_{adic} correspondiente a la última irrigación realizada (10:13 a.m.) denominada $Pp_adic_proy_1$, la cual se evalúa en el instante de tiempo correspondiente al valor de $t_{bm\acute{a}x}$ (10:34 a.m.), siendo obtenido un valor de P_{resref} igual a 5,34 W. Puesto que el valor de $P_{pm\acute{a}x}$ es mayor al valor residual P_{resref} de la última irrigación, se toma la decisión de irrigar. De igual manera se lleva a cabo este procedimiento en el instante 10:34 a.m.

Si como resultado se obtiene que P_{resref} es mayor a $P_{pm\acute{a}x}$, significa que no irrigar es energéticamente más conveniente para seguir aprovechando el efecto residual de la última irrigación. De ahí, se procede a establecer un nuevo instante de análisis que será determinado según el paso de tiempo de operación del sistema (e.g. 1 o 2 minutos).

En resumen, la selección de una de las dos opciones de P_{genref} ocasiona una variación apreciable de los tiempos de nuevos ciclos de irrigación y en la cantidad de irrigaciones en la ventana de tiempo analizada.

La Figura 91 muestra tres curvas de energía acumulada neta debida a la irrigación para una ventana de análisis comprendida entre 10:13 a.m. a 10:42 a.m.; la curva $\Delta E_{acum_1':29'}$ corresponde a un régimen de irrigación de 1 minuto de irrigación por 29 minutos de no irrigación, las curvas ΔE_{acum_1} y ΔE_{acum_2} son producto del efecto de las curvas Pp_{adic_A} y Pp_{adic_B} de la Figura 90 y corresponden a las opciones 1 y 2 para seleccionar entre P_{genref_1} y P_{genref_II} , respectivamente. Las tres curvas permiten estimar que en el minuto 10:42 a.m. se producirían 118,7 Wmin (1,98 Wh), 354,8 Wmin (5,91 Wh) y 343,0 Wmin (5,72 Wh), respectivamente, lo que triplica el beneficio energético que sería obtenido por la aplicación del régimen 1':29'.

Figura 91. Curvas de energía neta acumulada.



Según los resultados mostrados, el efecto energético de las dos opciones de P_{genref} descritas por las curvas ΔE_{acum_1} y ΔE_{acum_2} resulta similar, por lo que sería indistinto la selección de alguna opción. Sin embargo, existen atenuantes a favor y en contra de ambas opciones.

Tal como se apreció en la Figura 90, tomar como referencia un panel FV sin irrigación hace que los tiempos de espera para la siguiente irrigación sean significativamente menores

en comparación a P_{genref_II} . Un menor tiempo de espera hace que los errores de la estimación de la proyección de la potencia generada sean menores, ya que a mayor tiempo será más probable que las condiciones micro-climáticas cambien. Este aspecto puede ser mejorado para el caso de P_{genref_II} si se lleva a cabo la renovación continua de las curvas proyectadas con base en los datos suministrados por el sistema de monitorización de acuerdo al paso de tiempo de análisis. Tal mejoramiento continuo de las curvas proyectadas hace parte del trabajo futuro identificado en esta investigación.

Ahora bien, la selección de P_{genref_II} tienen tres ventajas. La reducción del número de irrigaciones ocasiona un menor incremento de la temperatura del agua en el tanque de acopio por la menor cantidad de calor removida de los paneles FV. Esto es beneficioso ya que a menor temperatura del agua de irrigación mayor será el decremento que se logre de la temperatura de operación del panel FV. Asimismo, un menor número de irrigaciones reduce las pérdidas acuíferas (evaporación) debidas a la exposición del agua en forma de película al ambiente y a la película de agua residual que queda en el panel FV al finalizar la irrigación. Finalmente, la selección de P_{genref_II} permite la obtención de más energía neta acumulada, pues a pesar de tener un impacto similar que P_{genref_I} en niveles altos de radiación solar, se estableció que el aprovechamiento del efecto residual de la irrigación es la mejor opción para valores medios y bajos de radiación solar.

Es importante indicar que el instante de tiempo específico para llevar a cabo la primera irrigación debe ser determinado cada día, y éste se establece con base en P_{genref_I} , dado que la selección de P_{genref_II} solo es factible cuando ya se ha irrigado al menos una vez.

Es de notar que la siguiente observación ha de ser aplicada en el caso de obtener valores elevados de $t_{bmáx}$, es decir mayor a 20 minutos (criterio fijado por el autor con base en la observación de la experimentación realizada). Se considera inconveniente fijar el nuevo instante de análisis de la siguiente irrigación a partir de un valor elevado de $t_{bmáx}$, ya que el procedimiento para determinar el beneficio energético de la irrigación se basa en proyecciones, las cuales pueden tener diferencias apreciables con lo que realmente suceda si las condiciones micro-climáticas varían de forma significativa, siendo esto más probable a medida

que el tiempo $t_{bmáx}$ aumenta. Por tal razón, se recomienda fijar el valor máximo permisible de $t_{bmáx}$ en 20 minutos, para que en el instante correspondiente a este valor se ajuste la proyección según la necesidad.

Por último, se indica que el procedimiento detallado para la obtención del beneficio energético máximo de la irrigación se presenta en el numeral 8.3.7.

7.2 ANÁLISIS DEL EFECTO ENERGÉTICO PRODUCIDO POR LOS RÉGIMENES DE IRRIGACIÓN A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LOS ÍNDICES $P_{pmáx}$ Y $t_{bmáx}$

En esta sección se presenta una evaluación del efecto energético de los doce regímenes de irrigación analizados en el Capítulo 5 a partir del uso de los índices $P_{pmáx}$ y $t_{bmáx}$. Para ello, se obtienen las curvas de potencia adicional o neta generada (P_{p_adic}), se cuantifica el efecto energético de cada uno de los regímenes de irrigación según el nivel de radiación solar, y finalmente, se estiman la energía eléctrica adicional máxima y la potencia máxima de la bomba de irrigación de acuerdo a cuatro tiempos de irrigación, un minuto, cinco minutos, quince minutos y permanente (treinta minutos).

7.2.1 Curvas de potencia adicional o neta generada – P_{p_adic}

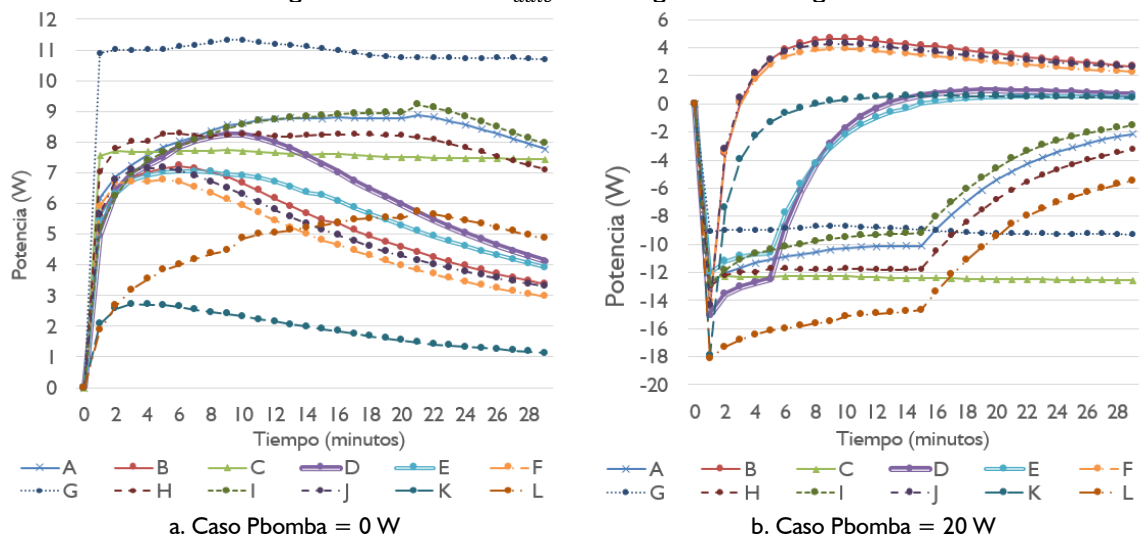
Inicialmente, se establecen las curvas P_{p_adic} para cada uno de los regímenes considerando diversos valores de potencia de la bomba de recirculación de agua (P_{bomba}). El Anexo J presenta las curvas obtenidas para seis variaciones de P_{bomba} , de 0 W hasta 25 W, de las cuales se aprecia la alta sensibilidad de P_{p_adic} , lo cual es más crítico para los regímenes con tiempos de irrigación de 15 minutos y 30 minutos (permanente).

Las curvas obtenidas permiten establecer, según el valor de P_{bomba} , si la inversión energética es recuperada, si la irrigación de cada régimen es prematura o tardía y cuál es el tiempo estimado de $t_{bmáx}$ según el tiempo de irrigación (1, 5 o 15 minutos). Es importante indicar que las curvas analizadas corresponden a los valores promedio, y que los hallazgos pueden variar según el nivel de radiación solar.

El valor de P_{p_adic} en el minuto 30 indica el beneficio promedio otorgado por el régimen de irrigación, el cual es el producto de $P_{p_adic}(t = 30)$ por un intervalo de tiempo de 30 minutos. El efecto de un régimen específico de irrigación permite recuperar la inversión energética si $P_{p_máx}$ es positivo. Si $P_{p_máx}$ se obtiene en el minuto 30 significa que la irrigación es prematura ya que el máximo beneficio posible no fue alcanzado y que se requiere extender el ciclo de operación. Si $P_{p_máx}$ se obtiene antes del minuto 30 se sabe que la irrigación es tardía, y debiese ser reajustada según el valor de $t_{b_máx}$.

La Figura 92 presenta las curvas P_{p_adic} para dos valores P_{bomba} , 0 W y 20 W. Para el caso de P_{bomba} igual a 0 W, todas las curvas P_{p_adic} son positivas, dado que el consumo energético es despreciable y corresponde sólo al controlador y a los sensores. Los valores más altos de $P_{p_máx}$ se deben a los regímenes con mayores tiempos de irrigación, tales como: A (15':15'), C (30':0'), G (30':0'), H (15':15'), I (15':15'), a excepción del régimen L (15':15') por el bajo caudal de irrigación (1,75 litros por minuto); asimismo, los valores más bajos de $P_{p_máx}$ corresponden a los regímenes B (1':29'), F (1':29'), J (1':29') y K (1':29'). Los valores máximo y mínimo al finalizar la ventana de análisis son 10,8 W y 1,2 W y conciernen a los regímenes G (30':0') y K (1':29'), respectivamente.

Figura 92. Curvas de P_{adic} de los regímenes de irrigación.



Cuando P_{bomba} es igual a 20 W se aprecia una fuerte variación de las curvas con respecto al caso de 0 W. Se aprecia que sólo seis regímenes generan más energía de la que consumen, específicamente son B (1':29'), D (5':15'), E (5':25'), F (1':29'), J (1':29') y K (1':29'), cuyos intervalos de irrigación son sólo 1 o 5 minutos. Los regímenes B (1':29'), F (1':29') y J (1':29') producen una potencia promedio de 2,5 W durante los 30 minutos; mientras D (5':15'), E (5':25') y K (1':29') no sobrepasan 1 W.

Los otros seis regímenes no logran generar un beneficio energético por el alto consumo que representa la bomba durante el intervalo de irrigación. Los valores más bajos de $P_{pmáx}$, y por tanto el peor desempeño, corresponden a los regímenes C (30':0'), G (30':0') con valores de -12,5 W y -9 W, respectivamente. Estos regímenes representan la irrigación permanente del panel FV.

7.2.2 Efecto energético de los regímenes de irrigación según el nivel de radiación solar

Seguidamente, se establecen las curvas $P_{pmáx}$ y $t_{bmáx}$ como funciones del nivel de radiación, considerando diversos valores de P_{bomba} . Cada valor de la curva corresponde a un valor promedio durante un intervalo de 30 minutos. El Anexo J presenta las curvas obtenidas para seis variaciones de P_{bomba} , de 0 W hasta 25 W. A partir de estas curvas es posible estimar el impacto de cada régimen para una condición específica de radiación solar.

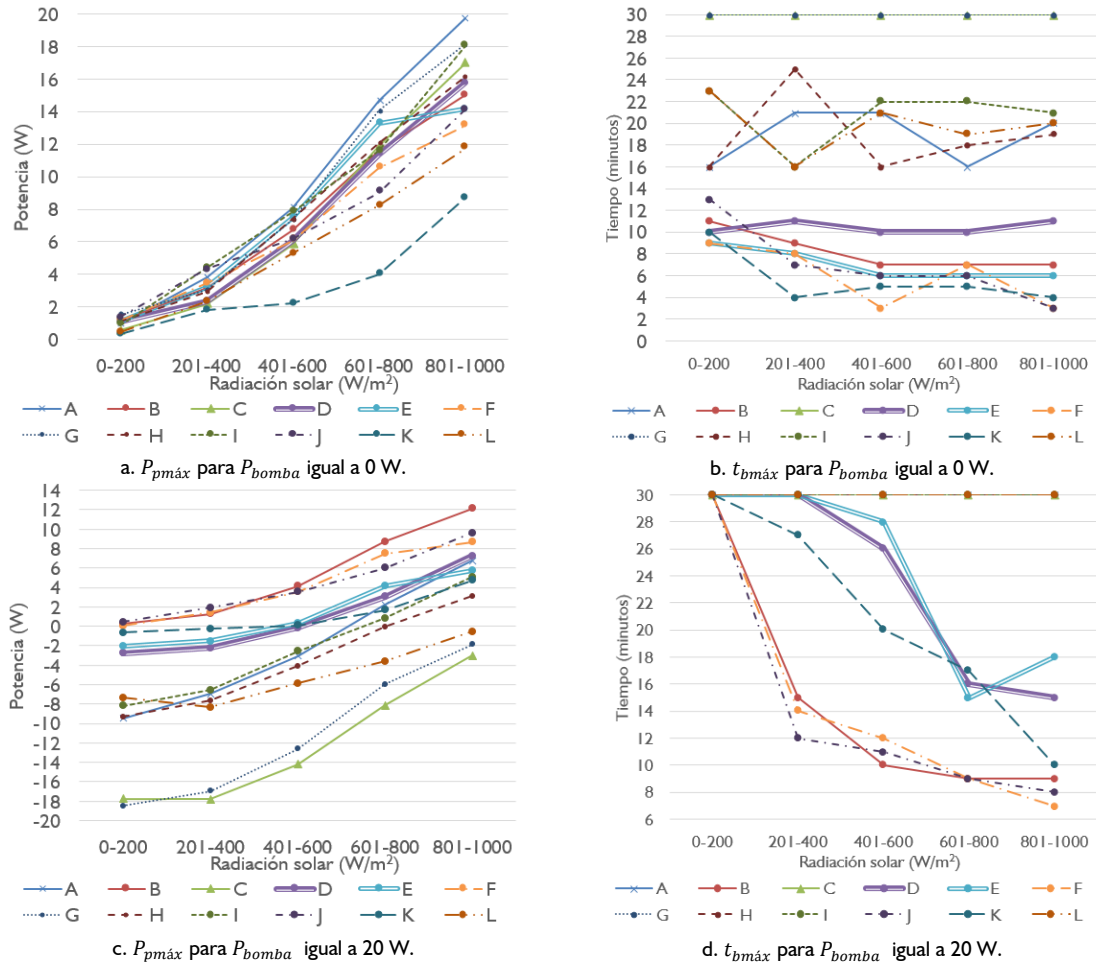
La Figura 93 presenta las curvas obtenidas para valores de P_{bomba} de 0 W y 20 W. Para el caso de P_{bomba} igual a 0 W, todas las curvas $P_{pmáx}$ son positivas dado que no existe consumo y las curvas $t_{bmáx}$ no presentan una tendencia en función de la radiación solar.

En cuanto al caso de P_{bomba} igual a 20 W, se observa que los valores $P_{pmáx}$ son significativamente menores al caso anterior debido al consumo energético de la bomba. Las curvas $P_{pmáx}$ permiten establecer si un panel FV debe ser irrigado por un régimen específico según el nivel de radiación solar, a continuación se presenta tres casos.

El régimen B (1':29') puede ser aplicado en cualquier nivel de radiación solar dado que $P_{pmáx}$ siempre es positivo; caso contrario ocurre con el régimen C (30':0') debido a que sin

importar el nivel de radiación no logra producir más de lo que consume la bomba. Un caso intermedio es el régimen D (5':25') que sólo debe ser aplicado cuando el nivel de radiación solar es superior a 600 W/m².

Figura 93. Variación de la potencia adicional máxima y tiempo de beneficio energético máximo de acuerdo a la potencia de la bomba.



Con respecto a las curvas $t_{bm\acute{a}x}$, varias de éstas describen una tendencia de decremento a medida que aumenta la radiación solar; ello es propio de los regímenes que producen beneficio energético. Específicamente, se observa que en todos los casos en los cuales $t_{bm\acute{a}x}$ es menor a 30 minutos, $P_{pm\acute{a}x}$ es positivo. Ahora bien, si el valor $t_{bm\acute{a}x}$ es igual a 30 minutos indica la mayoría de las veces que no hay beneficio energético ya que $P_{pm\acute{a}x}$ es negativo.

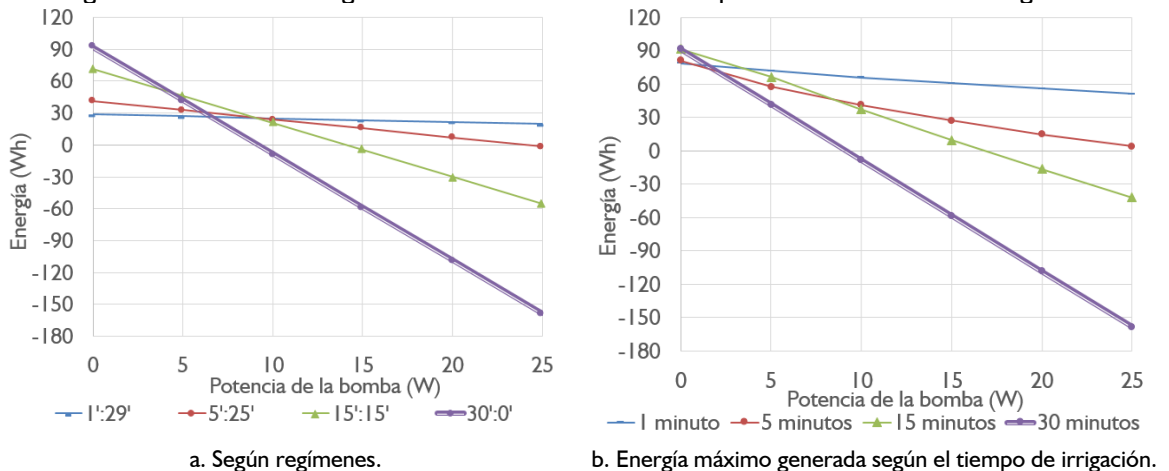
7.2.3 Estimación de la energía adicional máxima y de la potencia máxima de la bomba

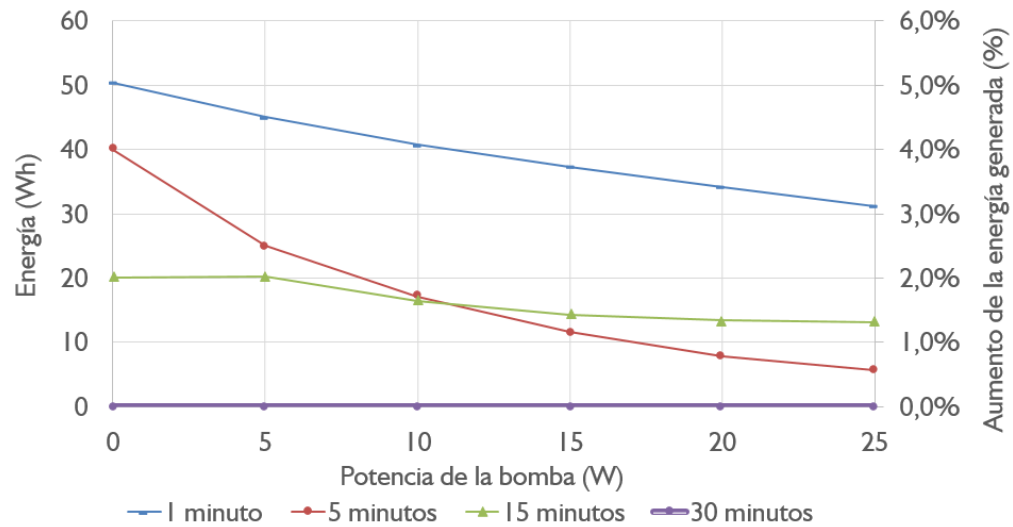
Con el fin de analizar el impacto de la aplicación del criterio $P_{pm\acute{a}x}$, la Figura 94 muestra las curvas de energía adicional diaria a ser obtenida tanto por la aplicación de un ciclo de operación fijo como por la aplicación del procedimiento de incremento de la potencia generada descrito en el numeral 8.1.

Los valores allí presentados deben ser contextualizados con respecto al valor promedio de energía generado por un panel FV de 255 W, el cual asciende a aproximadamente a 1 kWh para un día típico en la ciudad de Bucaramanga. Teniendo en cuenta esto, se aprecia que el incremento máximo a ser obtenido por la irrigación sería de casi 10% cuando P_{bomba} es de 0 W con tiempos de irrigación de 15 minutos o permanente, y sería de casi 6% cuando P_{bomba} es de 25 W con un tiempo de irrigación de 1 minuto.

La Figura 94.c muestran las curvas de impacto adicional a ser obtenido que corresponden a las diferencias entre las curvas Figura 94.a y Figura 94.b. Estas curvas evidencian la utilidad del procedimiento propuesto. Específicamente, se observa que el mayor impacto ocurre para un tiempo de irrigación de un minuto, que oscilaría entre 3% y 5% para los diversos valores considerados de P_{bomba} .

Figura 94. Curvas de energía adicional diaria en función de la potencia de la bomba de irrigación.



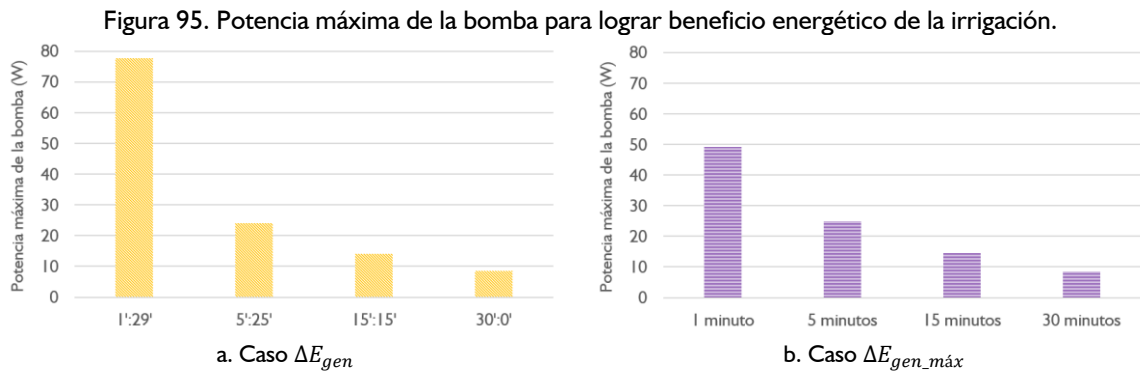


c. Aumento de la energía adicional generada debido al procedimiento de incremento de la potencia generada.

Se aprecia que las curvas decaen a medida que P_{bomba} aumenta, lo que representa el aumento de la energía consumida por el sistema de irrigación. En cuanto mayor sea el tiempo de irrigación mayor será la pendiente negativa de la curva. Sólo es posible garantizar un beneficio energético cuando el tiempo de irrigación no supera los 5 minutos. La irrigación de 15 minutos y permanente ofrecen un mejor desempeño que los casos de 1 minuto y 5 minutos sólo cuando no hay consumo energético debido a la bomba, lo cual sólo podría ser logrado cuando el agua sea proveída por la red de suministro, ya que la presión de servicio reemplazará el uso de una bomba.

Esta información lleva a preferir la definición de tiempos de irrigación cercanos a un minuto, y a tener claro que existe una estrecha relación entre el tiempo de irrigación y P_{bomba} .

Por otro lado, y a partir de los resultados presentados en el Capítulo 5 y de los puntos de corte de las curvas con el eje horizontal (0 Wh) en la Figura 94, se pudo establecer la potencia máxima de la bomba – $P_{bombam\acute{a}x}$, como muestra la Figura 95 que permite la obtención de beneficio energético. Esta estimación se llevó a cabo desde dos enfoques: por ciclos de operación fija (basada en la caracterización de los regímenes presentada en la Sección 4.3) y por tiempos de irrigación.



El primer enfoque consistió en estimar la potencia máxima de la bomba para cada uno de los regímenes, valores que fueron promediados de acuerdo a la siguiente agrupación: 1':29' (B, F, J y K), 5':25' (D y E), 15':15' (A, H, I y L) y 30':0' (C y G); y es presentada en la Figura 95.a. El segundo enfoque agrupa los resultados por tiempo de irrigación (1', 5', 15' y 30' o permanente) y no por régimen, dado que la aplicación del criterio $P_{pm\acute{a}x}$ hace que los ciclos de operación ya no sean fijos (30 minutos), sino definidos de acuerdo al valor de $t_{bm\acute{a}x}$. Los resultados de este enfoque se muestran en la Figura 95.b.

Se puede indicar que a mayor tiempo de irrigación menor debe ser la potencia de la bomba. Se aprecia que el valor de $P_{bombam\acute{a}x}$ es prácticamente el mismo cuando el tiempo de irrigación es de cinco minutos o más; específicamente se determinó que el valor de $P_{bombam\acute{a}x}$ no debe ser superior a 24 W, 14 W y 8 W para los tiempos de irrigación de 5', 15' y 30' (permanente), respectivamente.

Con respecto al caso de un minuto de irrigación, se encontró que las bombas no deben superar 78 W cuando el ciclo de operación es de 30 minutos y de 49 W si se aplica el criterio $P_{pm\acute{a}x}$. La menor tolerancia al valor de $P_{bombam\acute{a}x}$ en el segundo enfoque se debe a que el valor de $t_{bm\acute{a}x}$ será en general menor a 30 minutos, lo que incrementará el número de irrigación por día aumentando el consumo energético, y ello se debe compensar con un menor valor permisible de $P_{bombam\acute{a}x}$.

7.2.4 Aplicabilidad de los resultados obtenidos según el tipo de panel FV

Se considera que los resultados obtenidos en esta investigación son aplicables a paneles policristalinos dado que se utilizaron dos paneles FV de este tipo, Canadian Solar 255W y Upsolar UP-M250P.

Ahora bien, para inferir sobre la aplicabilidad de los resultados obtenidos en paneles FV monocristalinos, se debe analizar la similitud de dos factores de influencia en el comportamiento térmico de estos dos tipos de paneles FV, el coeficiente térmico de la potencia generada (β) y la capacitancia térmica.

El coeficiente β permite estimar la variación negativa (decremento) de la potencia generada debido al incremento de la temperatura de operación; mientras la capacitancia térmica permite cuantificar la variación térmica que sufre el panel FV, lo cual se traduce en la variación de la temperatura de operación.

Con base en la revisión de las fichas técnicas de paneles FV monocristalinos, se pudo establecer que los valores del coeficiente β de este tipo de paneles FV pueden ser similares a los correspondientes de los paneles FV policristalinos utilizados en la investigación, cuyo valor es de $-0,43\%/^{\circ}\text{C}$. Por ejemplo, el panel FV monocristalino SUNIVA de 265W (OPT 265-60-4-1B0) tiene un valor del coeficiente β de $-0,42\%/^{\circ}\text{C}$.

Dado que la ficha técnica de los paneles FV no suministra el valor de su capacitancia térmica, se procedió a analizar su constitución física. Según lo expuesto por Armstrong and Hurley [50], un panel FV está compuesto principalmente por las siguientes capas: (1) Glass, (2) ARC (anti-reflection coatings), (3) PV cells, (4) EVA (ethylene vinyl acetate), (5) rear contact y (6) Tedlar. En ese sentido, la capa que variaría entre los dos tipos de paneles FV (monocristalino y policristalino) es la capa 3, y dado su reducido espesor ($<0,5$ mm), se considera que la variación de la capacidad térmica no sería significativa.

Con el fin de validar la aplicabilidad de los resultados obtenidos en esta tesis doctoral en paneles FV monocristalinos, se considera conveniente llevar a cabo un proceso experimental con este tipo de paneles FV.

7.3 BREVE RESEÑA DE UNA PATENTE DE INVENCIÓN DESARROLLADA

Una contribución especial de esta Tesis Doctoral consiste en el desarrollo de una invención en el marco del proyecto COLCIENCIAS titulado *Validación experimental del beneficio energético de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con techos verdes para entornos tropicales con clima cálido*¹². Este proyecto fue ejecutado por investigadores del Grupo de Investigación GISEL.

Inicialmente, se exponen las generalidades de la invención y hallazgos del estado del arte; seguidamente, se describe la invención y los subsistemas que la conforman; para finalmente presentar los métodos de irrigación inteligente del panel FV y el techo verde.

7.3.1 Generalidades sobre la invención desarrollada

La invención desarrollada se tituló MÉTODO Y SISTEMA DE IRRIGACIÓN PARA PANELES FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS CON TECHOS VERDES. Tiene por objeto principal incrementar la energía eléctrica generada por los paneles FV a partir de la irrigación de la superficie superior de éstos. Asimismo, la invención en la modalidad preferida puede llevar a cabo la irrigación del techo verde cuando los paneles FV estén instalados sobre éste.

Se considera que la invención satisface el criterio de novedad porque va más allá del estado del arte debido a: i) la integración en una sola tecnología de paneles FV, techo verde y sistema de irrigación de éstos, ii) el sistema es modular y adaptable a sistemas FV existentes

¹² Proyecto de investigación desarrollado según los lineamientos de la Convocatoria 700 de 2014, con código institucional UIS-VIE #8574.

que varíen la orientación de los paneles FV, y iii) la operación se basa en obtener un beneficio energético neto y realizar un uso racional del agua.

Asimismo, se entiende que la invención satisface el criterio de actividad inventiva dado que tanto el diseño de la infraestructura de riego del panel FV y del techo verde como los métodos de irrigación inteligente establecidos tiene un grado de complejidad significativo dado que están orientados a maximizar el beneficio energético en la generación de energía eléctrica y garantizar el uso racional del agua, aspectos no evidentes en la integración de un panel FV irrigado con un techo verde.

El 29 de abril de 2016, se registró una solicitud para el otorgamiento de la patente de invención por esta tecnología ante la Superintendencia de Industria y Comercio.

7.3.2 Descripción del estado del arte

A partir de la revisión de diversas invenciones relacionadas con la climatización por agua de paneles FV, se encontraron los siguientes registros: JP2011100782A (2011), US20150033783A1 (2015), GB2504802A (2014), CN104686254 (2015) y GR20100100590 (2012). A continuación se presentan los aspectos por mejorar de las invenciones identificadas y que fueron abordados por esta invención.

- iii. Las invenciones JP2011100782A y GB2504802A pueden reducir la temperatura del panel FV rápidamente porque logran remover una gran cantidad de calor por la evaporación de agua, y con ello mejoran el desempeño de los paneles FV; sin embargo, se aprecia como desventaja crítica el consumo continuo de agua, ya que ésta se evapora y va al ambiente. Dicho consumo de agua puede ser inadmisibles para los usuarios, dado que la climatización de paneles FV no es una tarea prioritaria frente al uso racional del agua.
- iv. Todas las invenciones identificadas presentan como desventaja principal la ausencia del criterio de balance energético neto positivo del sistema, que consiste en garantizar que la energía generada adicional por la irrigación sea mayor al consumo energético debido a la operación de la invención. Esta desventaja es causada principalmente

por la selección de la temperatura de operación del panel FV como criterio de decisión, en lugar de la potencia adicional generada. Adicionalmente, la mayoría de invenciones hacen uso de componentes que pueden tener gran consumo energético, como es el caso de un compresor para el proceso de atomización del agua en la invención JP2011100782A, lo cual hace menos probable la obtención un balance energético neto positivo. Lo anterior, evidencia la necesidad de definir un procedimiento para la toma inteligente de decisiones concerniente a la irrigación de los paneles FV.

- v. Las invenciones identificadas (JP2011100782A, GB2504802A, US20150033783A1, CN104686254 y GR20100100590) no consideran la integración de los paneles FV con un techo verde, por lo cual, no presentan la infraestructura y el método para la irrigación del mismo.
- vi. Las invenciones encontradas no consideran la variación de la orientación del panel FV, y por ende, la infraestructura de éstas no puede ser adaptada fácilmente para tal cambio, que permitiría captar mayor radiación solar y aumentar la generación en sistemas FV ubicados en la zona tropical. Específicamente, se requiere que el lado que suministra agua pueda posteriormente ser capaz de captar agua. De igual modo debe pasar con el lado que inicialmente está captando el agua de irrigación; luego debe estar en capacidad de suministrar agua.

7.3.3 Descripción general de la invención

La invención divulga un sistema inteligente de irrigación de paneles fotovoltaicos y techo verde que consta de dos partes, aparato y procedimiento de operación. El aparato es el sistema de irrigación de los paneles FV y el techo verde, que consiste en el conjunto integrado de los componentes para el suministro y el control de la irrigación. Este sistema está conformado por tres subsistemas, a saber: i) el subsistema de suministro del fluido para la irrigación del panel FV; ii) el subsistema de monitorización y control; y iii) el subsistema de suministro del fluido para la irrigación del techo verde.

La invención puede ser implementada en un sistema FV donde los paneles FV estén dispuestos sobre una estructura mecánica que puede variar su inclinación y un techo verde que coexiste con la estructura mecánica.

El fluido de irrigación en la modalidad preferida de esta invención es agua, pero debe entenderse que puede ser cualquier otro fluido que permita reducir la temperatura de los paneles FV, esparciéndose en forma de película sobre la superficie frontal de éste.

El procedimiento de operación de la invención consta de dos métodos: un método de irrigación de los paneles FV y un método de irrigación del techo verde, siendo el primero el principal y el segundo complementario en la modalidad preferida de esta invención.

En definitiva, la integración de las dos partes de la invención, aparato y procedimiento, crea un sistema inteligente de irrigación. El término “inteligente” hace referencia a que esta invención puede determinar por sí misma las condiciones de operación de acuerdo a las circunstancias en tiempo real, siendo el balance energético neto positivo de la operación del panel FV el criterio principal de decisión.

Las figuras 96 y 97 presentan el esquema de la invención. Para facilitar la identificación de los elementos que conforman la invención, a continuación se presenta una lista de los elementos con los respectivos números de referencia utilizados.

5	Unidad de difusión/captación	125	Boquilla de ingreso de agua
10	Válvula de distribución	130	Tubería interna de abastecimiento
15	Tanque de acopio	135	Pieza para sujeción mecánica
20	Electroválvula de varias vías	140	Pieza de contacto
25	Tubería de suministro de fluido de la red	145	Boquilla de desagüe
30	Tubería flexible	150	Superficie curva a desnivel
35	Tubería de irrigación del techo verde	155	Secciones laminares
40	Caja de control	160	Conductos
45	Sensor de temperatura de contacto	165	Aletas de soporte mecánico
50	Sensor de nivel de fluido	170	Abertura superior para el ingreso de agua
55	Sensor de temperatura de fluido	175	Abertura superior para el paso de tubería
60	Sensor de humedad de sustrato	180	Abertura lateral para el paso de tubería
65	Sensor de temperatura ambiente	185	Abertura lateral de rebose
70	Sensor de velocidad de viento (anemómetro)	190	Abertura para el paso de cableado
75	Sensor de radiación solar (piranómetro)	195	Abertura lateral para conexión de tubería
80	Bomba sumergible 1	200	Panel fotovoltaico (FV)
85	Bomba sumergible 2		
90	Relé de operación 1		
95	Relé de operación 2		

100	Relé de operación 3	205	Área de celdas FV
105	Controlador	210	Marco del panel FV
110	Base de instalación	215	Estructura de soporte
115	Difusores	220	Vegetación
120	Captadores	225	Sustrato

Figura 96. Esquema del sistema desarrollado.

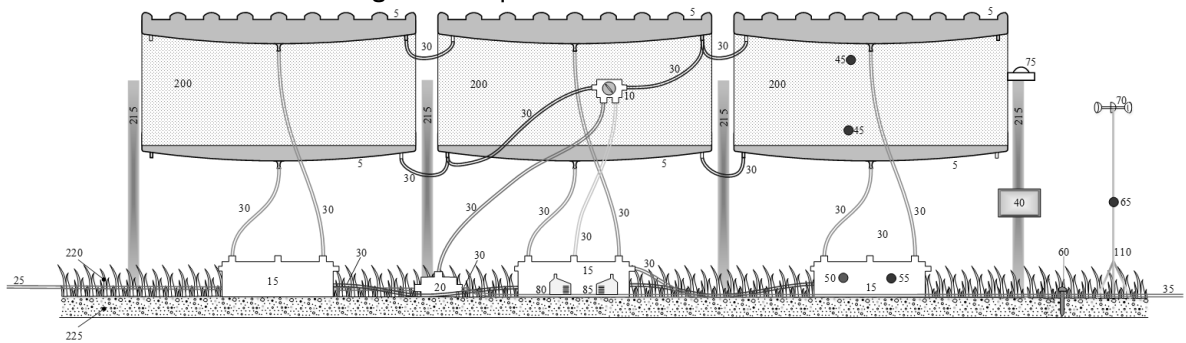
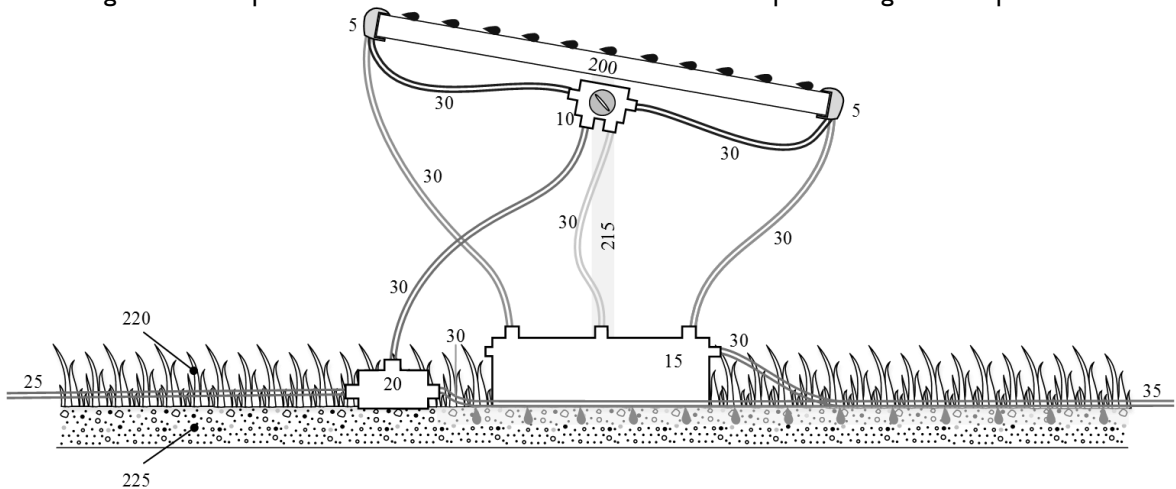


Figura 97. Componentes del subsistema de suministro de fluido para la irrigación del panel FV.



Una de las ventajas del presente invento es su diseño modular y liviano que permite su integración con la infraestructura existente de un sistema FV instalado sobre techo verde. Por tal motivo, algunos componentes se pueden instalar de la siguiente manera: las unidades de difusión/captación (5) se fijan al marco del panel FV (210), la caja de control (40) y el piranómetro (75) se pueden instalar en la estructura de soporte (215) de los paneles FV (200), y los sensores de temperatura de contacto (45) se ubican en la parte posterior del panel FV (200).

7.3.4 Subsistema de suministro del fluido para la irrigación del panel FV

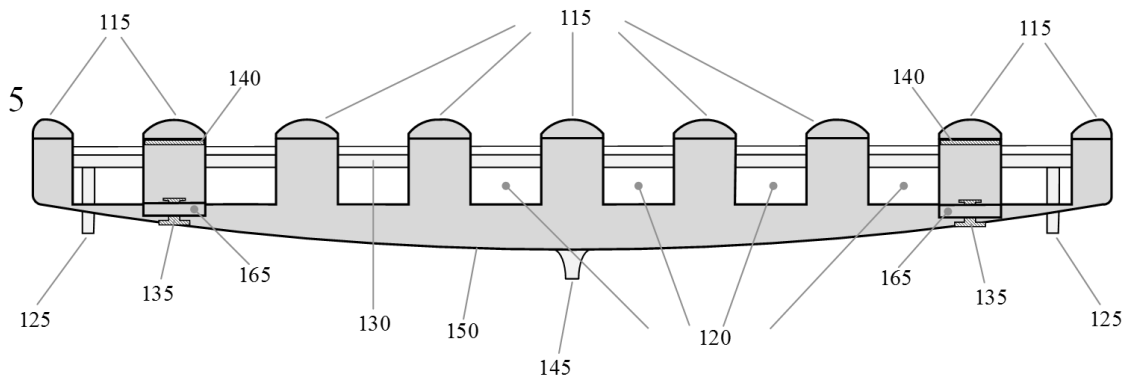
Los componentes principales para la irrigación de los paneles FV son las unidades de difusión/captación (5), la válvula de distribución (10), los tanques de acopio (15), la tubería flexible (30), la electroválvula de varias vías (20) y la bomba sumergible I (80).

Las unidades de difusión/captación (5) son instaladas sobre el marco en los lados alto y bajo¹³ de los paneles FV (200), tal como lo muestra la Figura 97. Pueden cumplir dos funciones (no de forma simultánea): (i) la difusión del fluido de irrigación en forma de película sobre la superficie superior panel FV (200) y (ii) la captación del fluido de irrigación cuando está instalada en el lado bajo del panel FV. La función a ser realizada por la unidad dependerá del lado de instalación de la unidad.

La unidad de difusión/captación (5) es una estructura hueca delimitada por una superficie curva con desnivel curva con desnivel (150). Dicho desnivel direcciona el fluido de irrigación a la boquilla de desagüe (145), desagüe (145), punto más bajo del componente como lo indica la Figura 98. Esta unidad se instala sobre el panel FV tal como muestra la

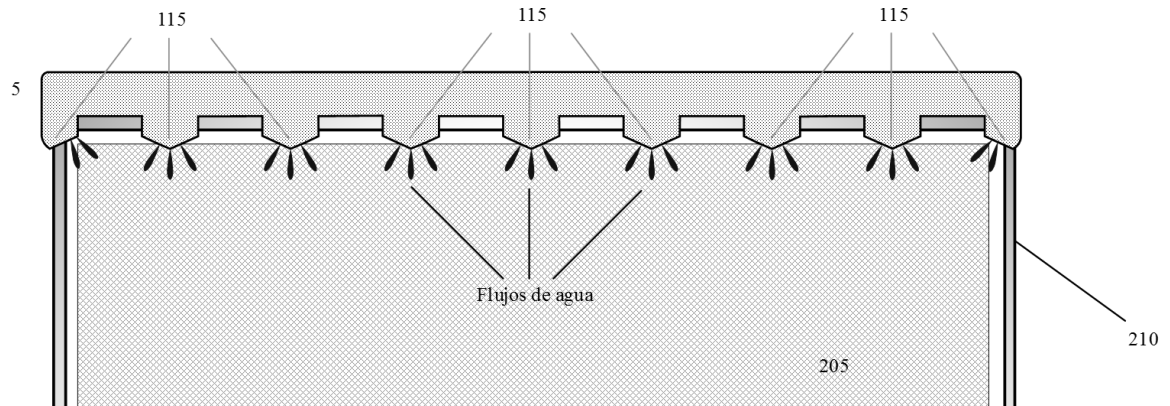
Figura 99.

Figura 98. Vista frontal de la unidad de difusión/captación.



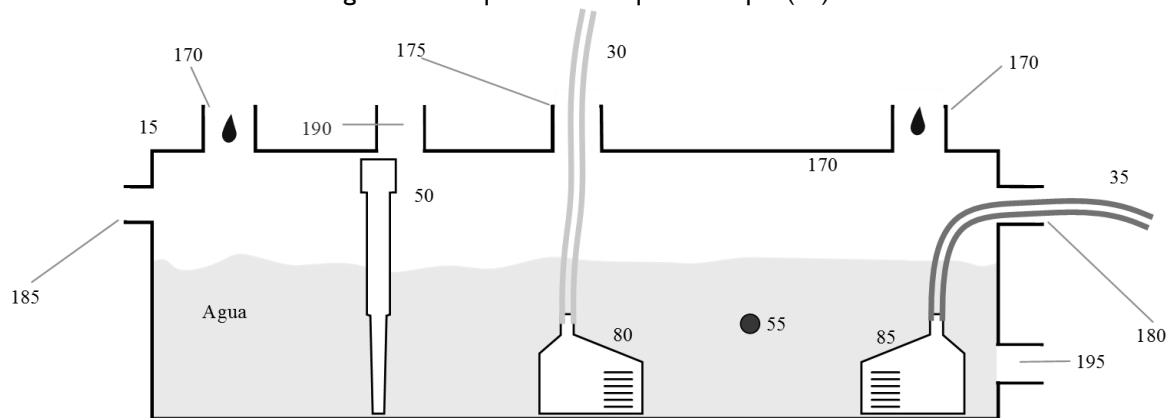
¹³ En las modalidades de la presente invención cuando un panel FV (200) de forma rectangular está inclinado, dos de sus lados están paralelos a la superficie horizontal de referencia, aunque a diferente altura. El lado paralelo a la superficie horizontal a mayor altura se denomina "lado alto"; mientras, el lado paralelo a la superficie horizontal a menor altura se denomina "lado bajo".

Figura 99. Vista de la unidad de difusión/captación (5) en operación instalada en el lado alto de un panel FV.



El tanque de acopio (15) mostrado en la Figura 100 tiene como funciones almacenar el agua captada por la unidad de difusión/captación (5) y abastecer de agua a la bomba sumergible I (80) para la irrigación del panel FV. Este proceso describe el ciclo de recirculación del fluido de irrigación de la presente invención.

Figura 100. Esquema del tanque de acopio (15).

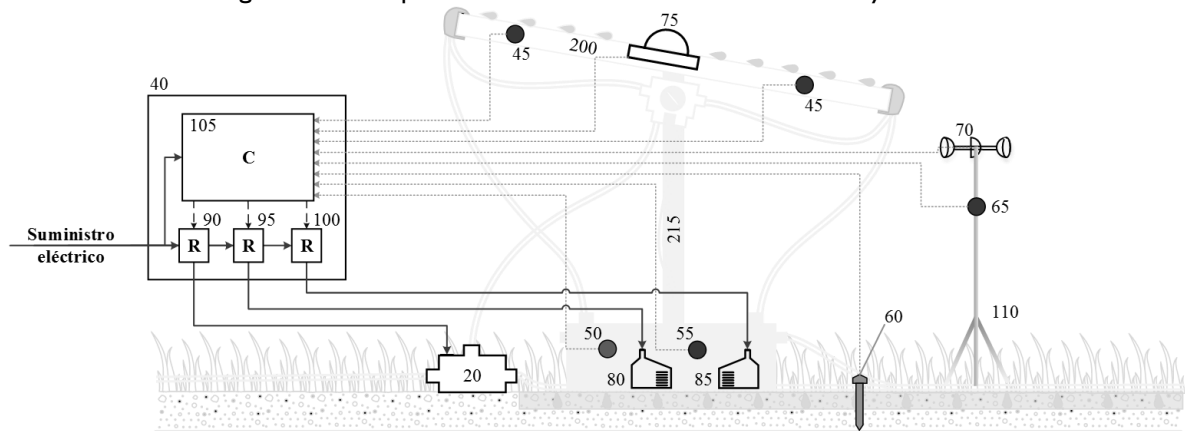


El tanque de acopio (15) podrá contener dos bombas sumergibles (80 y 85), las cuales son componentes electromecánicos que toman fluido en reposo y lo mueven para transportarla a determina presión y altura con respecto al punto donde fue captada. La bomba sumergible I (80) tiene por objeto suministrar agua a las unidades de difusión/captación (5); mientras que, la bomba sumergible 2 (85) lleva agua a la tubería de irrigación del techo verde (35).

7.3.5 Subsistema de monitorización y control

El subsistema de monitorización y control mostrado por la Figura 101 está conformado por: i) sensores de temperatura, radiación solar, nivel del fluido en un tanque de acopio y humedad del techo verde; ii) una unidad que controla el flujo del agua sobre el panel FV y el techo verde mediante el sensado de variables micro-climáticas, y el nivel del fluido en el tanque de acopio, junto con el accionamiento de una bomba sumergible y una electroválvula.

Figura 101. Componentes del subsistema de monitorización y control.



Este subsistema determina las condiciones de operación de los subsistemas de suministro del fluido para la irrigación del panel FV y de suministro del fluido para la irrigación del techo verde, de acuerdo con las variables sensadas y los métodos de control de irrigación instalados en el controlador (105). Asimismo, monitoriza condiciones micro-climáticas del lugar de instalación, tales como: radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa del aire, entre otras.

Las acciones a ser ejecutadas por el controlador (105) pueden ser: activar la electroválvula de varias vías (20) para irrigar los paneles FV (200), activar la electroválvula de varias vías (20) para irrigar el techo verde, activar la bomba sumergible 1 (80) para irrigar los paneles FV (200), activar la bomba sumergible 2 (85) para irrigar el techo verde. El tiempo de inicio y duración de cada una de las acciones es determinada por el método instalado en el controlador (105).

7.3.6 Subsistema de suministro del fluido para la irrigación del techo verde

Los componentes principales del subsistema de suministro del fluido para la irrigación del techo verde son: el tanque de acopio (15), la electroválvula de varias vías (20), la tubería flexible (30), la tubería de irrigación del techo verde (35) y la bomba sumergible 2 (85).

La operación del subsistema de suministro del fluido para la irrigación del techo verde es determinada por las consignas de un método programado en el controlador (105) y el nivel de humedad del sustrato, el cual es monitorizado por medio de un sensor de nivel de humedad (60).

La irrigación del techo verde puede ser llevada a cabo con agua de la red de suministro (25), o del tanque de acopio (15) y puede ser realizada varias veces en el día, o no realizarse; esto depende de la variación en el tiempo del nivel de humedad del sustrato.

Para la presente invención, se considera que la modalidad preferida de irrigación es goteo, ya que permite llevar a cabo suministro del fluido al techo verde en cualquier momento, así haya radiación solar, y reduce el consumo del fluido dado que el suministro se hace directamente al sustrato. La irrigación por goteo se caracteriza porque la tubería de irrigación perforada se instala sobre el sustrato y deja salir el agua en forma de gotas por efecto de la presión de la fuente de suministro de agua.

7.3.7 Método de irrigación inteligente del panel FV

El método de irrigación inteligente de los paneles FV tiene por objeto la obtención de un balance energético neto positivo de la operación, que consiste en que la energía adicional producida por los paneles FV debido a la irrigación sea mayor a la energía consumida por la operación de los dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema.

Para ello, el método determina cuándo se debe iniciar la irrigación de los paneles FV, durante cuánto tiempo se debe irrigar, y cuál debe ser la fuente de irrigación, la red de suministro o el tanque de acopio. Adicionalmente, tales respuestas deben ser obtenidas de

manera recurrente debido a la variación en el tiempo de las condiciones micro-climáticas y de operación de los paneles FV.

Fuente de irrigación de los paneles FV en un instante de tiempo

El método considera a la red de suministro como la primera opción de irrigación, debido al menor consumo energético que representa. La red puede impulsar el agua por efecto de la presión; caso contrario a lo que sucedería si la fuente es el tanque de acopio, pues se hace necesario el uso de una bomba para llevar el agua hasta los paneles FV.

Los pasos generales para determinar la fuente son los siguientes:

1. Determinar el intervalo de tiempo de irrigación y el volumen de agua necesarios por cada fuente de irrigación (red de suministro o tanque de acopio) para llevar la temperatura de operación del panel FV a un valor específico.
2. Calcular el volumen de agua disponible¹⁴ en el tanque de acopio.
3. Seleccionar a la red de suministro como fuente de irrigación si el volumen de agua de irrigación que aportaría es inferior al volumen disponible en el tanque de acopio para el instante t del análisis. En caso contrario, seleccionar al tanque de acopio como fuente de suministro.
4. Proyectar la curva de potencia consumida según la fuente de irrigación seleccionada.

¿Irrigar o no irrigar?

Con base en la información suministrada por el numeral 8.1, se estableció un procedimiento orientado a garantizar el beneficio energético de la irrigación, y a partir del cual se determina si se debe o no irrigar y cuándo se debe realizar dicho análisis. Los pasos del procedimiento se enuncian a continuación.

¹⁴ El volumen disponible en el tanque de acopio se refiere al volumen de agua adicional al existente que pudiese ser almacenado.

1. Medir las variables en el instante de tiempo de análisis – t .
2. Establecer las curvas proyectadas de la temperatura de operación ($T_{oper,ref}(t)$) y la potencia generada ($P_{genref}(t)$) del panel de referencia. El panel de referencia podrá ser un panel FV no irrigado o el mismo panel FV de análisis en condición de no irrigación. El numeral 8.1.3 describe las consideraciones a tener en cuenta de acuerdo a cada caso.

Las curvas proyectadas se pueden obtener de dos maneras: (i) por medio de la aplicación de los modelos obtenidos en esta investigación presentados en los capítulos 6 y 7, en los cuales se usarán los valores de las variables para ese mismo instante de tiempo de análisis t , por lo cual se considerarán valores constantes durante el intervalo de tiempo de proyección. Una segunda manera consiste proyectar las curvas a partir de las curvas DRT e IPG. Este segundo enfoque tendría un nivel aceptable de exactitud aunque menor con respecto al uso de los modelos obtenidos.

Aunque las condiciones micro-climáticas varían a cada instante de tiempo, se encontró en la experimentación que los valores de beneficio máximo se obtienen la mayoría de las veces antes de los 15 minutos. En caso de no irrigarse, se realizará un nuevo proceso de análisis en un intervalo de tiempo Δt_a (e.g. 1, 2 o 5 minutos)

3. Determinar la duración (t_{irrig}) y la fuente de irrigación para disminuir la temperatura de operación del panel FV a un valor objetivo. La fuente de irrigación puede ser la red de suministro o un tanque de acopio. El valor objetivo de la temperatura del panel FV será fijado por el usuario.
4. Establecer la curva proyectada de la potencia eléctrica consumida por el sistema de irrigación ($P_{cons}(t)$) de acuerdo a las condiciones de duración y fuente de irrigación determinadas en (3). Las cargas eléctricas asociadas pueden ser: controladores, sensores, bombas sumergibles y electroválvulas, entre otros. El consumo energético de controladores y sensores es continuo dentro de la franja de tiempo de operación definida del

sistema; mientras el consumo de las bombas y electroválvulas sólo ocurre cuando son accionadas.

En caso que la fuente de irrigación sea la red de suministro, se considerará sólo el consumo energético del controlador, los sensores y las electroválvulas.

5. Establecer las curvas proyectadas de la temperatura de operación ($T_{oper_Ir_est}(t)$) y la potencia generada ($P_{gen_Ir_est}(t)$) del panel FV de acuerdo a las condiciones de duración y fuente de irrigación calculadas en (3). Será potencial dado que es una proyección en el tiempo, y no necesariamente se ejecutará la irrigación. Las curvas proyectadas se obtienen por medio de la aplicación de los modelos obtenidos en esta investigación, los cuales harán uso de los valores de las variables medidas en el mismo instante de tiempo de análisis t , por lo cual se considerarán valores constantes.
6. Calcular la curva de potencia adicional generada o potencia neta ($P_{adic}(t)$) debido a la irrigación para un intervalo de tiempo determinado posterior al instante de tiempo t . Esta curva se define como la curva de potencia generada debido a la irrigación ($P_{gen_Ir_est}(t)$) calculada en (5) menos la curva de potencia generada del panel FV de referencia ($P_{genref}(t)$) calculada en (2) menos la curva de potencia de consumo del sistema ($P_{cons}(t)$) calculada en (4), tal como muestra la expresión (120).

$$P_{adic}(t) = P_{gen_Ir_est}(t) - P_{genref}(t) - P_{cons}(t) \quad (120)$$

7. Calcular la curva de energía adicional o neta acumulada en el tiempo, definida como la sumatoria del producto de la potencia neta calculada en (6) por el paso del tiempo de análisis, tal como muestra la expresión (118).
8. Calcular la curva de potencia promedio adicional o neta promedio en el tiempo, definida como la relación entre la curva de la energía neta acumulada en el tiempo, calculada en (7) y el tiempo correspondiente a cada valor calculado, tal como muestra la expresión (119).

9. Determinar el valor máximo de la curva calculada en (8) y su tiempo correspondiente, los cuales se denominan potencia neta promedio máxima ($P_{pm\acute{a}x}$) y tiempo de beneficio energético máximo ($t_{bm\acute{a}x}$), respectivamente, tal como muestran la expresiones (121) y (122).

$$P_{pm\acute{a}x} = MAX(P_{p\acute{a}dic}(t_i)) \quad (121)$$

$$P_{pm\acute{a}x} = P_{p\acute{a}dic}(t_{bm\acute{a}x}) \quad (122)$$

10. Establecer el instante de tiempo para una nueva etapa de irrigación definido como el instante de tiempo actual más el tiempo de beneficio energético máximo determinado en (9), tal como muestra la expresión (123).

$$t_{nei} = t + t_{bm\acute{a}x} \quad (123)$$

11. Irrigar el panel FV durante el tiempo t_{irrig} determinado en (3) únicamente si se cumplen las siguientes condiciones: (i) la potencia $P_{pm\acute{a}x}$ es mayor a un valor de referencia determinado según la curva P_{genref} seleccionada, (ii) el tiempo $t_{bm\acute{a}x}$ es menor a un tiempo límite preestablecido (e.g. 30 minutos), y (iii) el instante de tiempo de análisis es igual o posterior a t_{nei} , establecido la última vez que se irrigo.

7.3.8 Modalidad preferida de la aplicación del método de irrigación del panel FV

La Figura 102 describe la modalidad preferida de la operación general del método de irrigación inteligente de panel FV. Su aplicación es diaria, por lo que comienza cada nuevo día (331). El tiempo de análisis diario (333) hace referencia a un instante de tiempo posterior a la franja de tiempo útil para la generación de energía (e.g. 6 a. m. a 6 p. m.), para el cual se calcula el impacto energético de la irrigación sobre el panel FV.

La ejecución diaria del método es repetitiva solo durante el tiempo en el que haya radiación solar (e.g. 6 a. m. a 6 p. m.) (335), con el fin de limitar el consumo energético del sistema. La lectura de variables (337) se encarga de adquirir la información de cada uno de los sensores del subsistema de monitorización y control.

Con el fin de posibilitar el inicio de las estimaciones, se lleva a cabo la determinación de las condiciones iniciales de las variables en el primer instante del tiempo de radiación solar (339) (e.g. 6 a.m.).

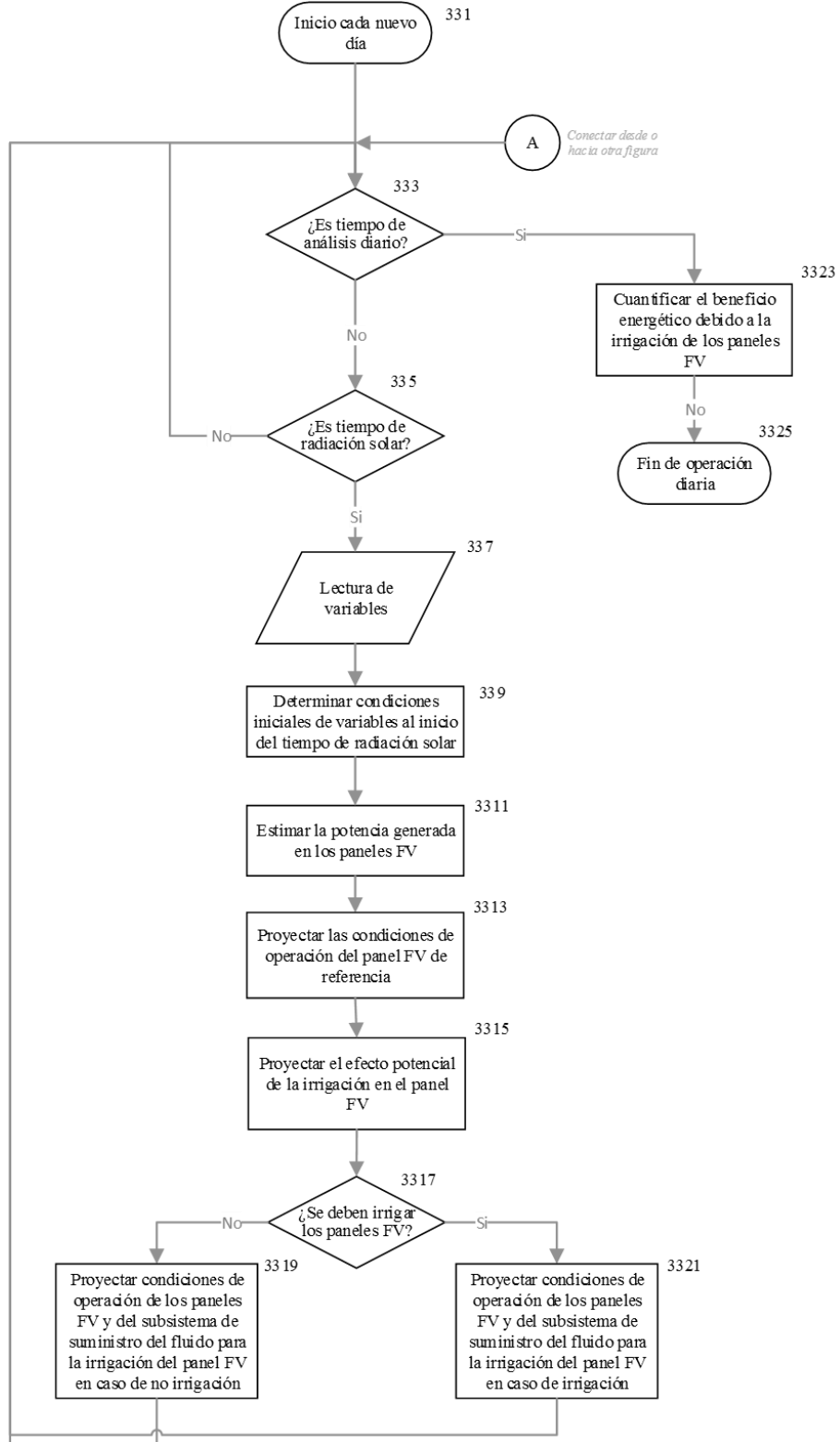
Cada vez que se inicie un nuevo ciclo de trabajo según el intervalo de tiempo de análisis - Δt_a (e.g. 1, 2 o 5 minutos), se estima la potencia eléctrica generada en los paneles FV (3311) según el estado (irrigado o no irrigado) en ese instante de tiempo. Esta potencia se determina en tiempo real a partir de la lectura de la radiación solar y la temperatura de operación del panel FV para el tiempo t . Esta curva de potencia eléctrica que se construye durante el día describe el efecto real de la irrigación ejecutada, y es a partir de la cual se cuantifica el beneficio energético diario al final del día.

Posteriormente, se proyectan las condiciones de operación del panel FV de referencia (3313). Dicha proyección se realiza para una ventana de tiempo determinada contada a partir instante del tiempo t de análisis, considerando solamente los valores sensados de las variables monitorizadas en ese instante de tiempo t . La potencia proyectada del panel FV de referencia se denomina *línea base*.

De manera similar, se estima el efecto de la irrigación en cada uno de los paneles FV (3315) como la proyección en el tiempo de la temperatura de operación y la potencia eléctrica generada. Esta curva de potencia eléctrica será la línea de mejora potencial. A partir de un análisis comparativo de la línea base y la línea de mejora potencial, se puede establecer si se deben o no irrigar los paneles FV (3317). Se irriga siempre y cuando se cumplan varias condiciones, como que la existencia de balance energético neto positivo.

Dependiendo de la decisión que se tome, se lleva a cabo la determinación de las condiciones del subsistema de suministro del fluido de irrigación para paneles FV, estado de operación de las electroválvulas y de las bombas sumergibles I, ya sea para el caso de no irrigación (3319) o para el caso de irrigación (3321). Posterior a la culminación de cualquiera de estas actividades, el método inicia un nuevo ciclo de análisis de acuerdo al intervalo de tiempo de análisis - Δt_a (e.g. 1 min, 2 min) mientras haya radiación solar.

Figura 102. Diagrama de bloques de la implementación preferida de la operación general del método de irrigación del panel FV.



Posterior a la finalización del tiempo de radiación solar, se espera a que sea el instante de tiempo de análisis diario (333), para cuantificar el beneficio energético debido a la irrigación de los paneles FV (3323). Posterior a ello, se finaliza la operación diaria del método (3325).

7.3.9 Método de irrigación inteligente del techo verde

La irrigación automática de un techo verde puede ser llevada a cabo a partir de un régimen horario, una o varias veces al día, para el cual se programa(n) la(s) hora(s) de inicio y la duración de la(s) sesión(es). Puede ser ejecutada cada día o sólo algunos días de la semana. Esta modalidad de irrigación se caracteriza por no garantizar el uso racional del agua, puesto que puede suministrar más agua de la requerida.

El método de irrigación inteligente del techo verde definido en esta invención tiene por objeto garantizar el uso racional y eficiente del agua, por lo cual se determina de manera recurrente si se debe irrigar, cuándo se debe iniciar la irrigación de la vegetación, cuándo se debe detener y cuál debe ser la fuente de irrigación en un instante determinado (red de suministro o tanque de acopio).

La operación del subsistema de suministro del fluido para la irrigación del techo verde es determinada por las consignas del método para la irrigación inteligente del techo verde y el nivel de humedad del sustrato, el cual es monitorizado por medio de un sensor de nivel de humedad, logrando un uso racional del fluido, a partir de dos niveles de operación del sustrato del techo verde, nivel de humedad crítico y nivel de humedad aceptable.

7.4 RESUMEN DE HALLAZGOS RELEVANTES

Este capítulo presenta un procedimiento para incrementar el beneficio energético de la irrigación, que se basan en determinar si se debe o no irrigar y cuándo debe ser realizado este análisis, lo cual constituye un aporte de esta Tesis Doctoral. Tal procedimiento establecido es la base de un sistema de riego inteligente de paneles FV. Este planteamiento hace que la irrigación de un panel FV no se rija por tiempos de operación constantes, como fue el caso de los regímenes analizados en el Capítulo 5.

También se presenta una breve reseña de una invención desarrollada denominada MÉTODO Y SISTEMA DE IRRIGACIÓN PARA PANELES FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS CON TECHOS VERDES, de la cual ya se solicitó el otorgamiento de una patente de invención.

8. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este capítulo inicia con una breve exposición de los resultados de la investigación (Sección 8.1); posteriormente, se presentan las conclusiones sobre los hallazgos obtenidos más relevantes, especialmente aquellos que constituyen el aporte de conocimiento de esta Tesis Doctoral (Sección 8.2); luego se comentan los aspectos técnicos identificados que debiesen ser abordados en futuras investigaciones (Sección 8.3) y finalmente, se comparten algunas observaciones relacionadas con la investigación desarrollada (Sección 8.4).

8.1 RESULTADOS

Se diseñaron e implementaron tres experimentos que permitieron monitorizar el comportamiento real de paneles FV, con el fin de caracterizar la influencia de cuatro factores en la potencia eléctrica generada; estos factores son: la altura de instalación, el tipo de techo, la irrigación y la velocidad del viento en el comportamiento del panel FV.

Se estableció un modelado que permitió describir el comportamiento del panel FV; específicamente, se obtuvieron modelos por regresión para predecir la temperatura de operación y la potencia eléctrica generada por el panel FV. Asimismo, se validó el uso de analogías termoeléctricas a partir de lo cual se propuso un modelo que puede predecir la variación de la temperatura de operación del panel FV debida a la irrigación de la superficie frontal de éste.

Se estableció un procedimiento para potenciar el efecto de la irrigación en los paneles FV, el cual permite determinar si se debe o no irrigar y cuándo debe ser realizado este análisis.

A partir de los hallazgos de la investigación, y dentro del marco del proyecto COLCIENCIAS titulado *Validación experimental del beneficio energético de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con techos verdes para entornos tropicales con clima cálido*, se desarrolló una invención titulada *Método y sistema de irrigación para paneles fotovoltaicos integrados con techos verdes*. El 29 de abril de 2016 se registró la solicitud para el otorgamiento de la patente de invención ante la Superintendencia de Industria y Comercio.

El proceso de divulgación al instante de la presentación de este documento consta de tres ponencias realizadas en el CIIMCA 2015 (evento académico) organizado por la Universidad Pontificia Bolivariana - Sede Bucaramanga. Adicionalmente, el artículo titulado *The impact of height on the power performance of PV panels integrated in a green roof in tropical conditions* ha sido aceptado para su publicación en el Volumen 205 del *WIT Transactions on Ecology and the Environment* (ISSN: 1743-3541) durante el segundo semestre de 2016. Tanto las ponencias como el artículo científico corresponden solo a hallazgos relacionados con los resultados de la experimentación, dado que se recomienda evitar la divulgación de información relevante relacionada con la tecnología hasta tanto no se haya realizado el registro de la solicitud de patente.

Por otra parte, se promovieron dos trabajos de grado titulados: (i) *Caracterización de la operación de paneles fotovoltaicos en condiciones tropicales bajo la influencia de un techo verde. Caso Bucaramanga* e (ii) *Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico de 250 W instalado sobre techo verde en la ciudad de Bucaramanga*. Estos proyectos fueron desarrollados por cinco estudiantes: tres de Ingeniería Eléctrica y dos de Ingeniería Electrónica.

Por último, se indica que se realizó una pasantía doctoral de 6 meses (agosto de 2014 a febrero de 2015) en el *Green Building Research Laboratory* de la Portland State University, Portland, Oregon, EEUU. Durante esta experiencia se estudiaron temas como: sistemas FV

conectados a la red eléctrica, techos verdes y otras aplicaciones URE para edificaciones. Asimismo, se pudo llevar a cabo un proceso de apropiación tecnológica de instrumentación relacionada con el comportamiento energético de sistemas en edificaciones.

8.2 CONCLUSIONES

Un primer aporte de esta Tesis Doctoral fue la caracterización experimental de la influencia de cuatro factores: la altura de instalación del panel sobre un techo, el tipo de techo, la velocidad del viento y la irrigación en el comportamiento de un panel FV. La comprensión de tal influencia permitió determinar aquellas condiciones que producen efectos positivos o negativos en el comportamiento del panel FV, específicamente en la curva de potencia eléctrica generada. Tal información permite definir lineamientos de diseño y de operación de sistemas FV útiles en entornos tropicales cálidos.

Estos factores pueden ser clasificados según el porcentaje de incremento de la potencia eléctrica generada en dos niveles, bajo y alto. Se definió que un factor es de nivel bajo cuando el incremento de la potencia eléctrica sea igual o menor a 3%, lo cual es propio de la influencia positiva de la altura de instalación, el tipo de techo o la velocidad del viento. El aprovechamiento de estos leves incrementos sólo es posible a partir de la definición de características específicas de la instalación del sistema FV, ya que dependen de las condiciones del sitio y del tipo de techo existente.

Por otro lado, el beneficio energético de un factor se considera de nivel alto cuando la generación de energía diaria se incrementa hasta en un 10%, lo cual puede ser logrado con la irrigación del panel FV. Tal aprovechamiento depende de las características técnicas del sistema de irrigación que se implemente.

Con respecto a los procesos de transferencia de calor que sufre el techo de una edificación, se debe mencionar que producen la variación de la temperatura del aire en función de la altura con respecto a éste. Tal variación depende del tipo de techo. Se evidenció que para el caso de un techo de concreto, la temperatura del aire es mayor a medida que haya más cercanía con el techo; tal efecto será nulo para alturas de un metro o más, siendo está la

altura de instalación recomendada para los paneles FV para este tipo de techo. Ahora, si es un techo verde la temperatura tendrá un comportamiento contrario al anterior, y se recomienda que la altura de instalación de paneles FV sea cercana a los 50 cm.

Un segundo aporte de la investigación se refiere al modelado matemático de la temperatura del panel FV en condición de irrigación basado en analogías termoeléctricas.

Un tercer aporte consiste en la definición de un procedimiento para incrementar el beneficio energético de la irrigación del panel FV, el cual se basa en un proceso de maximización de la potencia adicional generada que establece dos índices denominados *potencia neta promedio máxima* ($P_{pmáx}$) y *tiempo de beneficio energético máximo* ($t_{bmáx}$), a partir de los cuales se determina si se debe o no realizar la irrigación y cuándo se debería llevar a cabo nuevamente un proceso de toma de decisiones. Este procedimiento es la esencia de un método de irrigación inteligente de un panel FV que hace parte de la invención desarrollada.

8.3 TRABAJO FUTURO

A continuación se presentan las temáticas de trabajo futuro derivadas de esta tesis doctoral:

- ✓ El modelo de analogías termoeléctricas propuesto se basó en procesos de transferencia de calor sensible; por lo cual, podrían ser incluidos procesos de transferencia de calor latente. Esto permitiría evaluar el impacto de la humedad del aire y de la influencia de la tasa de evapotranspiración del techo verde, que a su vez depende del nivel de humedad del sustrato del techo verde.
- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos, la ventilación natural es una estrategia de mitigación térmica del panel FV y de incremento de la potencia generada. Por tal razón, sería conveniente incorporar en el diseño de sistemas FV el aprovechamiento del viento del emplazamiento. Tal investigación podría definir recomendaciones sobre la altura de instalación y disposición de cada panel FV para lograr la canalización del viento.

- ✓ Teniendo en cuenta el mutuo efecto entre paneles FV y techo verde, se podría estudiar el potencial de la horticultura urbana integrada con sistemas FV.
- ✓ Cada ciclo de irrigación de un panel FV ocasiona el incremento de la temperatura del fluido de irrigación, lo cual reduce el beneficio de cada irrigación subsecuente. Por tal razón, se considera conveniente establecer estrategias para enfriar el fluido de irrigación. Ello puede suponer la definición de características técnicas del tanque de acopio que fomenten la disipación de calor, como podría ser su integración con el sustrato del techo verde, si éste se considera un sumidero térmico.
- ✓ El modelado RC (estado no irrigado y estado irrigado) se validó para la condición de no sombreado; por tanto, se considera conveniente explorar la adaptación del modelado en condiciones de sombreado parcial, puesto que tal escenario el panel FV no tendrá una temperatura que pueda ser asumida como uniforme, y adicionalmente, afectará la potencia generada.

Tal análisis podría ser abordado incrementando el nivel de desagregación del nodo de temperatura del panel FV, considerando la existencia de tantos nodos como módulos posea el panel FV, lo cual implicará que la temperatura y la potencia de cada módulo podrán ser diferentes a los correspondientes de los otros módulos. Para este nivel de desagregación se deberá analizar en detalle los casos en los cuales el sombreado sólo afecte a un número reducido de celdas del módulo.

- ✓ Teniendo en cuenta que la afectación que ocasiona el efecto de *mismatching* en la operación de los paneles FV, es conveniente desarrollar una nueva fase de investigación que permita apreciar tales efectos en los resultados obtenidos (caracterización experimental, modelos y demás análisis).
- ✓ Aunque se considera que los resultados obtenidos son aplicables tanto a paneles FV policristalinos como monocristalinos, es necesario corroborar esta hipótesis a partir del análisis de un conjunto de paneles FV con diversos valores de coeficiente térmico de la potencia generada (β) y capacitancia térmica.

8.4 OBSERVACIONES

El desarrollo de esta investigación en el marco proyecto COLCIENCIAS¹⁵ permitió dotar al campus central de la Universidad Industrial de Santander de tres sistemas FV de inyección a la red eléctrica a partir de micro-inversores, con una capacidad instalada combinada de 5,75 kW y una generación anual cercana a 8 000 kWh. Asimismo, el Grupo de Investigación de Sistemas de Energía Eléctrica – GISEL fue proveído de equipos de monitorización y herramientas para desarrollar futuras investigaciones.

En el transcurso de los estudios de doctorado, se exploró el modelado energético de diversos sistemas para uso racional de la energía en edificaciones ubicadas en entornos con clima cálido. Específicamente, se analizaron temáticas tales como: iluminación natural lateral y cenital, sistemas híbridos de iluminación y de climatización, comportamiento térmico en espacios interiores, sistemas de automatización de edificaciones y sistemas FV integrados con techo verde, siendo esta última la temática de la Tesis Doctoral desarrollada. Como resultado de este proceso, se lideró o apoyó las publicaciones listadas en la Tabla 35.

Tabla 35. Publicaciones realizadas.

1	Forecast about energy behavior and the indoor quality of a tower of social dwellings in Bucaramanga (Colombia)	WIT Transactions on Ecology and the Environment	WESSEX	2016 Aceptado
2	Characterization of environmental and energy performance of an average social dwelling in a tropical region of Colombia	WIT Transactions on Ecology and the Environment	WESSEX	2016 Aceptado
3	Modeling of lighting behaviour of a hybrid lighting system in inner spaces of Building of Electrical Engineering	Materials Science and Engineering (MSE)	IOP Conf. Series	2016
4	Characterization of hybrid lighting systems of the electrical engineering building in the Industrial University of Santander	Materials Science and Engineering (MSE)	IOP Conf. Series	2016
5	Building energy analysis of electrical engineering building from desingbuilder tool: Calibration and simulations	Materials Science and Engineering (MSE)	IOP Conf. Series	2016
6	Building automation systems as tool to improve the resilience from energy behavior approach	Procedia Engineering	ELSEVIER	2015
7	Generalities about design and operation of microgrids	Revista DYNA	UNAL	2015
8	Energy considerations of social dwellings in Colombia according to the NZEB concept	Revista DYNA	UNAL	2015
9	Control of a Hybrid Illumination System in a Tropical Zone	Applied Mechanics and Materials	Trans Tech Publications	2015

¹⁵ Proyecto titulado Validación experimental del beneficio energético de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con techos verdes para entornos tropicales con clima cálido.

10	Design of energy generation system by using spinning bikes	Materials Science and Engineering	IOP Conf. Series	2014
11	Wind and Solar Energy Potential Assessment for Development of Renewables Energies	Materials Science and Engineering	IOP Conf. Series	2014
12	Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia	Revista UIS Ingenierías	UIS	2014

Asimismo, se indica que debido al proceso de investigación exploratorio se promovió el desarrollo de treinta y cuatro (34) trabajos de grado, a parte de los dos relacionados con esta Tesis Doctoral. En estos trabajos participaron 58 estudiantes de Ingeniería Eléctrica y 20 estudiantes de Ingeniería Electrónica, para un total de 78 estudiantes. También se promovieron tres trabajos de investigación de maestría y dos monografías de especialización.

REFERENCIAS

- [1] L. X. Sheng, T. S. Mari, A. R. M. Ariffin, and H. Hussein, “Integrated Sustainable Roof Design,” *Procedia Eng.*, vol. 21, pp. 846–852, Jan. 2011.
- [2] A. Scherba, D. J. Sailor, T. N. Rosenstiel, and C. C. Wamser, “Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 12, pp. 2542–2551, Dec. 2011.
- [3] G. A. Osma Pinto, “Master project in Electrical Engineering: Rational Use of Energy from of the design of sustanaible applications in the Electrical Building of Industrial University of Santander (Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en,” Industrial University of Santander. Master Work advised by PhD. Gabriel Ordóñez Plata, 2011.
- [4] W. Jianqiang and L. Jingxin, “Design and experience of grid-connecting photovoltaic power system,” *2008 IEEE Int. Conf. Sustain. Energy Technol.*, pp. 607–610, Nov. 2008.
- [5] UPME, “Mapas de Radiación Solar Global Sobre una Superficie Plana,” in *ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA*, Primera ed., I. UPME, Ed. BOGOTA, 2005, pp. 23–40.
- [6] H. Takebayashi and M. Moriyama, “Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 8, pp. 2971–2979, Aug. 2007.

- [7] L. Kosareo and R. Ries, "Comparative environmental life cycle assessment of green roofs," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 7, pp. 2606–2613, Jul. 2007.
- [8] D. Sailor, "A green roof model for building energy simulation programs," *Energy Build.*, vol. 40, no. 8, pp. 1466–1478, 2008.
- [9] S. R. Energy, *Photovoltaic Programme Edition 2003 Summary Report , Project List , Annual Project Reports 2002 (Abstracts)*, vol. 2002, no. April. 2003.
- [10] M. Köhler, W. Wiartalla, and R. Feige, "Interaction between PV-systems and extensive green roofs," *Green. rooftops Sustain. communities. Minneapolis, USA.*, pp. 1–16, 2007.
- [11] Demosite, "Solgreen. Exhibition flat roots.," 2008. [Online]. Available: <http://www.demosite.ch/page/anime/solgreen.swf>.
- [12] ZINCO, "Solar energy and green roofs," 2014. [Online]. Available: http://www.zinco-greenroof.com/EN/downloads/pdfs/Solar_Energy_and_Green_Roofs.pdf. [Accessed: 01-Jan-2015].
- [13] P. K. Vuppuluri, "Impact of Sustainable Cool Roof Technology on Building Energy Consumption (master thesis)," Portland State University, 2014.
- [14] A. L. Nagengast, "Energy Performance Impacts from Competing Low-slope Roofing Choices and Photovoltaic Technologies (Doctoral Dissertation)," Carnegie Mellon University, 2013.
- [15] S. S. Moody, "Development of Dynamic Thermal Performance Metrics For Eco-roof Systems by Seth S . Moody A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering Thesis Committee : Graig Spolek Sergio Pa," Portland State University, 2012.
- [16] "h_Solgreen Flat Roof System for Green Roofs_1997_14th Conf_Barcelona.pdf." .
- [17] E. Commission and P. Helm, "Seventeenth European Photovoltaic Solar Energy Conference Space Cells and Systems," vol. III, 2001.

- [18] S. M. Basel, P. Power, P. With, and G. Roofs, "SOLGREEN MESSE BASEL - PHOTOVOLTAIC POWER PLANT IN COMBINATION WITH ' GREEN ROOFS ' ' GREEN ROOFS ," pp. 1–2.
- [19] M. Köhler, M. Schmidt, M. Laar, U. Wachsmann, and S. Krauter, "Photovoltaic-panels on greened roofs: positive interaction between two elements of sustainable architecture," *RIO 02 - World Clim. Energy Event*, no. 1, pp. 151–158, 2002.
- [20] L. Witmer, "Quantification of the passive cooling of photovoltaics using a green roof (master thesis)," Pennsylvania State University, 2010.
- [21] S. C. M. Hui and S. C. Chan, "Integration of green roof and solar photovoltaic systems," in *Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability*, 2011, vol. 2011, pp. 1–12.
- [22] M. Perez, W. McGillis, and V. Fthenakis, "Update: the Green-Roof Integrated Pv Canopy Study At Bronx Design and Construction Academy (Proceeding)," in *Annual Conference of American Solar Energy Society 2013*, 2013, p. 7.
- [23] M. Perez, N. Wight, V. Fthenakis, and C. Ho, "Green roof integrated PV canopies - An empirical study and teaching tool for low income student in the south Bronx (Proceeding)," in *World Renewable Energy Forum 2012*, 2012, no. 1, pp. 1–7.
- [24] R. Hendarti, "The influence of the evapotranspiration process of green roof tops on PV modules in the tropics (Doctoral thesis)," National University of Singapore, 2013.
- [25] D. Chemisana and C. Lamnatou, "Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance," *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 246–256, Apr. 2014.
- [26] L. Witmer and Jeffrey Brownson, "An energy balance model of green roof integrated photovoltaics: a detailed energy balance including microclimatic effects (Proceeding)," in *Annual Conference of American Solar Energy Society SOLAR 2011*, 2011, pp. 1–7.
- [27] L. Witmer and J. Brownson, "System integrative design in the 2009 Penn State Solar Decathlon net-zero energy home (Proceeding)," in *Annual Conference of American*

- Solar Energy Society SOLAR 2010 (Phoenix, Arizona)*, 2010, pp. 1–4.
- [28] E. Erell, *Roof cooling techniques: A design handbook*, First. Routledge, 2005.
- [29] Y. Nitta, H. Yamagishi, T. Nomura, K. Minabuchi, M. Kondo, and M. Hatta, “New photovoltaic system exploited by the unique characteristics in thin film Si modules,” *Energy Convers.*, pp. 1903–1907, 2003.
- [30] M. K. Smith, C. C. Wamser, K. E. James, S. Moody, D. J. Sailor, and T. N. Rosenstiel, “Effects of Natural and Manual Cleaning on Photovoltaic Output,” *J. Sol. Energy Eng. Asme*, vol. 135, no. August 2013, p. 4, 2013.
- [31] M. K. Smith, H. Selbak, C. C. Wamser, N. U. Day, M. Krieske, D. J. Sailor, and T. N. Rosenstiel, “Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 136, no. August, pp. 1–4, 2014.
- [32] J. LAZAR, Reinhold. EDER, *Estudio sobre el clima urbano de Bucaramanga. Convenio de cooperación entre el municipio de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander*. Bucaramanga, 2001.
- [33] S. Vásquez, G. Osma, and G. Ordóñez, “Evaluación del impacto del sombreado de paneles FV en tres especies sedums (Crassulacea).” Universidad Industrial de Santander, UIS, Bucaramanga, Colombia, p. 10, 2016.
- [34] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería = Applied statistics and probability for engineers*, 2a edition. México: Limusa Wiley, 2012.
- [35] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos = Design and analysis of experiments*. Limusa Wiley, 2006.
- [36] R. Kramer, J. van Schijndel, and H. Schellen, “Simplified thermal and hygric building models: A literature review,” *Front. Archit. Res.*, vol. 1, no. 4, pp. 318–325, Dec. 2012.

- [37] B. Bueno, L. Norford, G. Pigeon, and R. Britter, "A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate," *Build. Environ.*, vol. 54, pp. 116–125, Aug. 2012.
- [38] Z. Ma and S. Wang, "Building energy research in Hong Kong: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1870–1883, Oct. 2009.
- [39] N. Zhu, S. Wang, X. Xu, and Z. Ma, "A simplified dynamic model of building structures integrated with shaped-stabilized phase change materials," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 9, pp. 1722–1731, Sep. 2010.
- [40] B. Lehmann, D. Gyalistras, M. Gwerder, K. Wirth, and S. Carl, "Intermediate complexity model for Model Predictive Control of Integrated Room Automation," *Energy Build.*, vol. 58, pp. 250–262, Mar. 2013.
- [41] J. H. Kämpf and D. Robinson, "A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows," *Energy Build.*, vol. 39, no. 4, pp. 445–453, Apr. 2007.
- [42] P. a. Mirzaei and F. Haghighat, "Modeling of phase change materials for applications in whole building simulation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 5355–5362, Sep. 2012.
- [43] J. C. DeBlois, M. M. Bilec, and L. a. Schaefer, "Design and zonal building energy modeling of a roof integrated solar chimney," *Renew. Energy*, vol. 52, pp. 241–250, Apr. 2013.
- [44] K. J. Kontoleon, "Dynamic thermal circuit modelling with distribution of internal solar radiation on varying façade orientations," *Energy Build.*, vol. 47, pp. 139–150, Apr. 2012.
- [45] A. Bontemps, M. Ahmad, K. Johannès, and H. Sallée, "Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls," *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2456–2461, Sep. 2011.
- [46] A. Zarrella and M. De Carli, "Heat transfer analysis of short helical borehole heat

- exchangers,” *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 1477–1491, Feb. 2013.
- [47] M. C. Rodríguez-Hidalgo, P. a. Rodríguez-Aumente, a. Lecuona, and J. Nogueira, “Instantaneous performance of solar collectors for domestic hot water, heating and cooling applications,” *Energy Build.*, vol. 45, pp. 152–160, Feb. 2012.
- [48] X. Xu and S. Wang, “Optimal simplified thermal models of building envelope based on frequency domain regression using genetic algorithm,” *Energy Build.*, vol. 39, no. 5, pp. 525–536, May 2007.
- [49] S. Wang and X. Xu, “Parameter estimation of internal thermal mass of building dynamic models using genetic algorithm,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 13–14, pp. 1927–1941, Aug. 2006.
- [50] S. Armstrong and W. G. Hurley, “A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 11–12, pp. 1488–1495, 2010.
- [51] a. D. Jones and C. P. Underwood, “A thermal model for photovoltaic systems,” *Sol. Energy*, vol. 70, no. 4, pp. 349–359, 2001.
- [52] A. Aganza-Torres, V. Cárdenas, M. Pacas, and M. González, “An efficiency comparative analysis of isolated multi-source grid-connected PV generation systems based on a HF-link micro-inverter approach,” *Sol. Energy*, vol. 127, pp. 239–249, 2016.
- [53] P. Rodrigo, R. Velázquez, E. F. Fernández, F. Almonacid, and P. J. Pérez-Higueras, “Analysis of electrical mismatches in high-concentrator photovoltaic power plants with distributed inverter configurations,” *Energy*, vol. 107, pp. 374–387, 2016.
- [54] H. P. Ikkurti and S. Saha, “A comprehensive techno-economic review of microinverters for Building Integrated Photovoltaics (BIPV),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 997–1006, 2015.

BIBLIOGRAFÍA

- AGANZA-TORRES, A.; CÁRDENAS, V. PACAS, M; GONZÁLEZ, M. An efficiency comparative analysis of isolated multi-source grid-connected PV generation systems based on a HF-link micro-inverter approach. *Solar Energy*, vol. 127, pp. 239–249, 2016.
- ARMSTRONG, S. and HURLEY, W. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 11–12, pp. 1488–1495, 2010.
- CHEMISANA, D. y LAMNATOU, C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. *Applied Energy*. Vol. 119, pp. 246–256, Apr. 2014.
- ERELL, E. *Roof cooling techniques: A design handbook*, First. Routledge, 2005.
- HENDARTI, Religiani. The influence of the evapotranspiration process of green roof tops on PV modules in the tropics. Doctoral thesis. National University of Singapore, 2013.
- HUI, S. C. M. y CHAN, C. Integration of green roof and solar photovoltaic systems. *Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability*, 2011, vol. 2011, pp. 1–12.
- IKKURTI, H and SAHA, S. A comprehensive techno-economic review of microinverters for Building Integrated Photovoltaics (BIPV). *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 997–1006, 2015.
- JONES, D and UNDERWOOD, C. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, vol. 70, no. 4, pp. 349–359, 2001.

MONTGOMERY, D. Diseño y análisis de experimentos - Design and analysis of experiments. Limusa Wiley, 2006.

MONTGOMERY, D and RUNGER, G. Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería - Applied statistics and probability for engineers, 2a edition. México: Limusa Wiley, 2012.

NAGENGAST, Amy. Energy Performance Impacts from Competing Low-slope Roofing Choices and Photovoltaic Technologies. Doctoral Dissertation. Carnegie Mellon University, 2013.

OSMA, German. Rational Use of Energy from of the design of sustainable applications in the Electrical Building of Industrial University of Santander. Universidad Industrial de Santander. Master Work advised by PhD. Gabriel Ordóñez Plata, 2011.

PEREZ, M; WIGHT, N.; FTHENAKIS, V; HO, C. Green roof integrated PV canopies - An empirical study and teaching tool for low income student in the south Bronx (Proceeding). World Renewable Energy Forum 2012, 2012, no. 1, pp. 1-7.

RODRIGO, P.; VELÁZQUES, R.; FERNÁNDEZ, E.; ALMONACID, F.; PÉREZ-HIGUERAS, P. Analysis of electrical mismatches in high-concentrator photovoltaic power plants with distributed inverter configurations. Energy, vol. 107, pp. 374-387, 2016.

SMITH, M.; SELBAK, H.; WAMSER, N.; KRIESKE, M.; SAILOR, D.; ROSENTIEL, T. Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules. Journal of Solar Energy Engineering -ASME, vol. 136, no. August, pp. 1-4, 2014.

SMITH, M; WAMSER, C.; JAMES, K. MOODY, S. SAILOR, D; ROSENTIEL, T. Effects of Natural and Manual Cleaning on Photovoltaic Output. Journal of Solar Energy Engineering - ASME, vol. 135, no. August 2013, p. 4, 2013.

VÁSQUEZ, S.; OSMA, G.; ORDÓÑEZ, G. Evaluación del impacto del sombreado de paneles FV en tres especies sedums (Crassulacea). Universidad Industrial de Santander, UIS, Bucaramanga, Colombia, p. 10, 2016.

WITMER, L. Quantification of the passive cooling of photovoltaics using a green roof. Master thesis. Pennsylvania State University, 2010.

WITMER, L. y BROWNSON, Jeffrey. An energy balance model of green roof integrated photovoltaics: a detailed energy balance including microclimatic effects (Proceeding). Annual Conference of American Solar Energy Society SOLAR 2011, 2011, pp. 1–7.

ANEXOS

ANEXO A. Información eléctrica de los sistemas fotovoltaicos

ANEXO B. Información técnica de paneles y microinversores

ANEXO C. Conexión de medidores de energía

ANEXO D. Curvas de comportamiento diario de los casos analizados del experimento de irrigación

ANEXO E. Curvas características de los índices DRT y IPG por régimen de irrigación

ANEXO F. Curvas características de potencia y energía de cada régimen de irrigación

ANEXO G. Curvas características de la energía generada por régimen según la potencia de bomba de irrigación

ANEXO H. Flujos de calor asociados con el comportamiento térmico del panel FV

ANEXO I. Solución analítica al circuito ideal de enfriamiento de un panel FV

ANEXO J. Curvas características de las variaciones de P_{p_adic} , $P_{p_m\acute{a}x}$ y $t_{b_m\acute{a}x}$ para cada régimen de irrigación

Anexo A. Información eléctrica de los sistemas fotovoltaicos

Este anexo contiene información eléctrica sobre los sistemas fotovoltaicos instalados (FV1, FV2 y FV3).

A.1 DIAGRAMA DE COMPONENTES DE LOS SISTEMAS FV2 Y FV3

Los sistemas FV2 y FV3 utilizan cada uno 10 paneles FV y 10 microinversores Enphase M250 con comunicación *power line* con un módulo Envoy (*communication gateway*) para cada sistema. Sus esquemas de componentes son mostrados por las figuras A.1 y A.2.

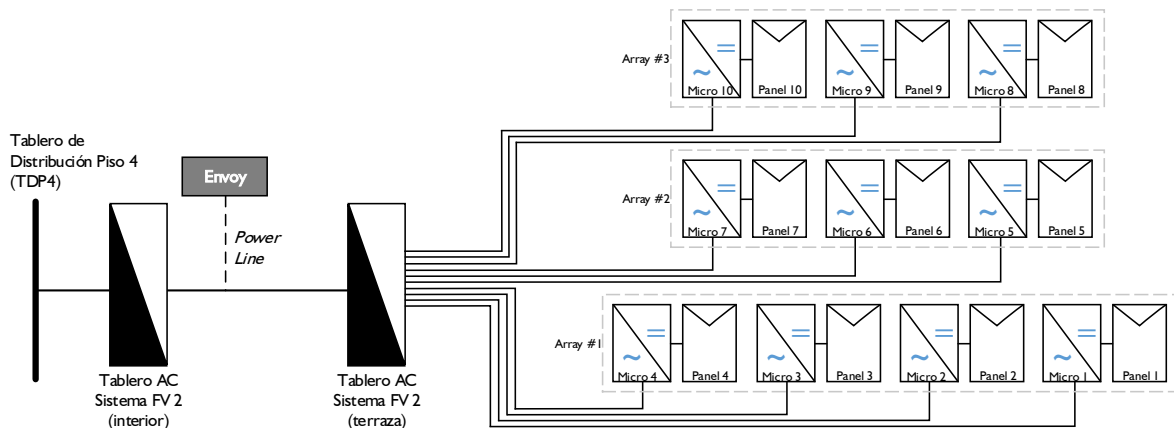


Figura A.1 Diagrama de componentes del sistema FV2 (Edificio de Ingeniería Eléctrica).

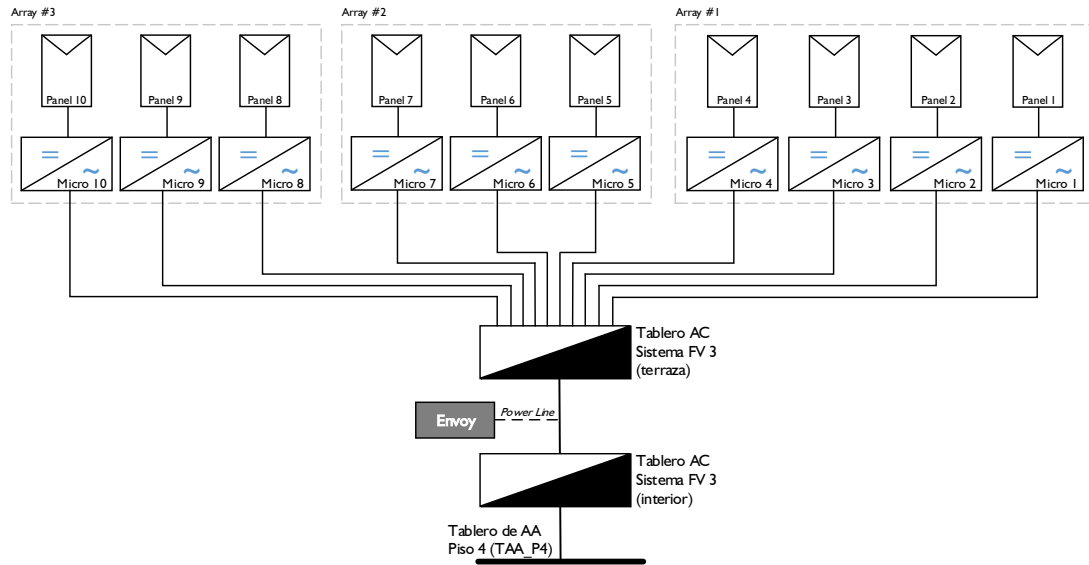
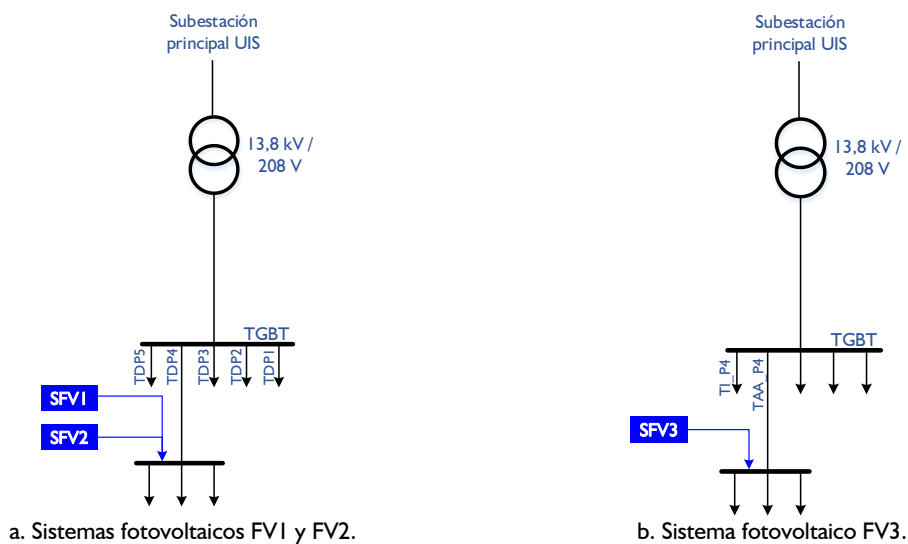


Figura A.2 Diagrama de componentes del sistema FV3 (Edificio de Biblioteca).

A.2 INYECCIÓN A LA RED ELÉCTRICA

La inyección de energía eléctrica de los sistemas FV1 y FV2 se hace en el piso 4 del Edificio de Ingeniería Eléctrica, a través del Tablero de Distribución del Piso 4 – TDP4; mientras la inyección del sistema FV3 se lleva a cabo en el Tablero de Aires Acondicionados del Piso 4 del Edificio de Biblioteca; tal como se indica en la Figura A.3. La conexión de los 10 microinversores de cada sistema FV es Y en su lado AC (4 entre A-B, 3 entre B-C y 3 entre C-A).



a. Sistemas fotovoltaicos FV1 y FV2.
b. Sistema fotovoltaico FV3.
Figura A.3 Diagrama de conexión para la inyección de energía a la red eléctrica.

Las características eléctricas nominales de la red del campus universitario son de un valor eficaz de la tensión de línea nominal de 208 V y frecuencia de 60 Hz; sin embargo, el nivel de tensión varía de una edificación a otra debido a la regulación de tensión de la acometida y la subestación interna de cada edificación. El valor eficaz de la tensión de línea oscila mayormente entre 215 V y 227 V; aunque alcanza valores de 230 V, en algunos momentos, en días de baja demanda, como domingos y festivos. Es importante, indicar que en general los microinversores no operan cuando la tensión de red está por encima de 228 V.

A.3 PROTECCIONES ELÉCTRICAS

El esquema de conexión en el lado AC es 2F+GND para microinversores ABB y 2F+N+GND para microinversores Enphase, como muestran los diagramas de protecciones de las figuras A.4.a y A.4.b. Allí se aprecia que cada microinversor tiene un fusible de 2A por fase como protección de sobrecorriente dado que la corriente nominal es 1,2 A. Adicionalmente, cuenta con un interruptor automático bipolar de 16 A como medios de desconexión. Se aclara que el neutro es utilizado como referencia para la tensión en los microinversores *Enphase*. Estas protecciones se encuentran ubicadas en los tableros AC de la terraza.

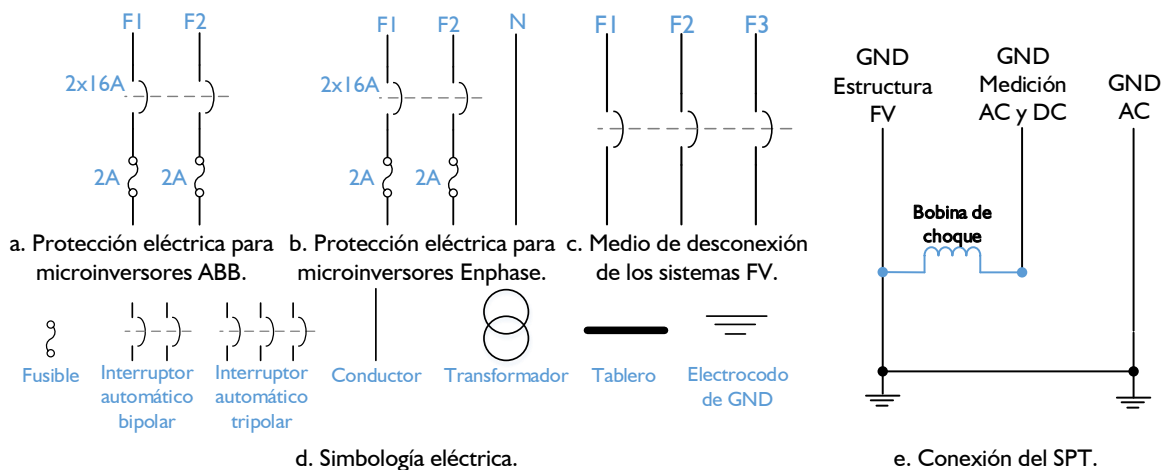


Figura A.4 Detalle eléctrico de conexión a tierra y protecciones eléctricas.

El medio de desconexión de los tres sistemas FV es un totalizador tripolar, tal como muestra la Figura A.4.c. Este se encuentra ubicado en los tableros AC de terraza (exterior) y de inyección (interior), junto al punto de energía eléctrica a la red.

Otro componente de protección de cada sistema es el sistema de puesta a tierra (SPT), la cual se construyó por edificio considerando que se deben conectar tres puntos al SPT: i) El generador fotovoltaico (esto incluye paneles FV, carcasa de los microinversores y estructura metálica de soporte), ii) Los equipos sensibles (medidores AC y DC, y algunos sensores), y iii) El lado AC de los microinversores. Este último se conecta directamente a la conexión del SPT existente en el tablero de inyección de cada edificación (TDP4 y TAA_P4). Los dos primeros puntos deben conectarse cerca de los electrodos del SPT, protegiendo el conductor del SPT de los equipos sensibles con una bobina de choque ($L = 80 \mu\text{H}$) para evitar que haya perturbaciones provenientes del sistema eléctrico general manteniendo la equipotencialidad, tal como muestra la Figura A.4.e.

A.4 SELECCIÓN DE UNIDADES DE GESTIÓN

Existen dos tipos de unidades de gestión de paneles FV potencialmente aplicables a sistemas FV de pequeña escala ($< 10 \text{ kW}$), microinversores e inversores tipo *string*.

Se consideró más conveniente el uso de microinversores con respecto a inversores tipo *string* debido a la gestión del punto de máxima potencia y la practicidad para la ejecución de la experimentación.

Gestión del punto de máxima potencia

Los microinversores pueden llevar cada panel FV al punto de mayor generación posible en un instante de tiempo determinado según las condiciones microclimáticas y las características técnicas de éstos (en condiciones de no sombreado parcial).

La potencia DC obtenida de un *array*¹⁶ por parte de un inversor tipo *string* puede ser igual o menor a la suma de las potencias DC individuales a ser obtenidas por microinversores. Será igual cuando todos los paneles FV tengan las mismas características técnicas; en caso contrario será menor. Esta variación puede estar presente en uno o todos los módulos FV¹⁷ que conforman el panel FV. Por ende, un módulo de un panel FV puede causar afectar negativamente la potencia generada de todos los demás paneles FV del *array*.

Es importante indicar que tal variación puede afectar el punto de operación de un panel FV, tanto cuando es gestionado por un inversor tipo *string* como por un microinversor. Sin embargo, el microinversor elimina la afectación mutua entre paneles FV.

Por ello, a mayor número de paneles FV que conformen un *array* mayor será la probabilidad de la existencia de variaciones de las características técnicas en los paneles FV, y en consecuencia, la potencia total generada por el *array* sería menor a la suma de potencias individuales que podrían entregar los paneles FV si son gestionados de forma individual por un microinversor.

Por otro lado, se aclara que lo mencionado no trata de inferir que los microinversores tengan una mayor eficiencia que los inversores tipo *string*, pues los primeros se caracterizan por una eficiencia levemente menor a los segundos; lo que sin embargo, no implica que no puedan obtener mayor potencia DC de un panel FV en comparación a un inversor tipo *string*.

La eficiencia tanto de inversores tipo *string* como microinversores se encuentra mayormente sobre el 95% para valores medios y altos de radiación solar, tal como lo indican las fichas técnicas de inversores tipo *string* de marca SMA (eficiencia entre 97% y 98%) y microinversores Enphase (eficiencia de hasta 96,5%).

¹⁶ Conjunto de paneles FV conectado eléctricamente a un inversor o una entrada de éstos.

¹⁷ Un módulo FV es un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas en serie, el cual tiene asociado un diodo *bypass*. Un panel FV puede estar conformado por uno o varios módulos FV.

Con base en la monitorización de potencia realizada tanto en el lado de corriente continua (DC) como en el lado de corriente alterna (AC) del microinversor, se evidenció que la eficiencia promedio de los microinversores Enphase M250 es superior al 96%, con una mínima del 95% y una máxima de 97% para valores medios y altos de radiación solar.

Practicidad para la ejecución de la experimentación

Cada experimento se basó en la comparación del comportamiento de tres paneles FV ubicados con idénticas condiciones microclimáticas. Específicamente, para el caso del experimento de irrigación y velocidad del viento, los tres paneles FV a ser comparados se instalaron uno al lado del otro, en el mismo plano de trabajo (igual orientación, igual inclinación e igual altura de instalación sobre el techo).

Se optó por el uso de microinversores debido a que estas unidades pueden gestionar de forma individual cada uno de los paneles FV y llevarlos al punto de máxima potencia (en condiciones de no sombreado y no existencia de diferencias técnicas entre los módulos), lo cual permite estudiar el efecto de la influencia de un factor específico sobre el comportamiento de un panel FV determinado.

En caso de haberse seleccionado inversores tipo *string*, se tendrían que haber considerado los siguientes aspectos:

- ✓ La operación de tres paneles FV contiguos con operación independiente entre ellos supondría la existencia de tres arrays a ser gestionados por dos o tres inversores con un número determinado de paneles FV por *array*. El número de inversores depende del número de entradas que tiene el inversor (en general, una o dos). Cada entrada puede gestionar un *array* de forma independiente.
- ✓ La operación independiente de los paneles FV es la base para diferenciar el impacto de los factores en la potencia generada por éstos. Esto hace que la pertenencia de un panel FV a un *array* implique que todos los paneles FV del *array* deban

ser sometidos a las mismas condiciones de operación para que en conjunto pudiesen ser comparados con los paneles FV que integrarían los otros dos arrays, los cuales operarían en condiciones diferentes. En este escenario, la comparación ya no se realizaría a nivel de un solo panel FV sino según el número de paneles FV que conformasen cada *array*. Lo anterior supondría una mayor infraestructura para llevar a cabo la experimentación.

Hallazgos en la literatura

A continuación se presentan algunas consideraciones técnicas expuestas en tres artículos científicos publicados en revistas reconocidas, que describen ciertas ventajas de los microinversores con relación a los inversores tipo string.

Artículo 1. Aganza-Torres *et al.* [52] indica:

- ✓ La eficiencia de los inversores tipo *string* llega al 98%, lo cual es típico de dispositivos comerciales con potencias nominales entre 1,5 kW y 10 kW para conexión monofásica y de hasta 30 kW para conexión trifásica (Se consideran datos de inversores de marcas Fronius, ABB y SMA).
- ✓ Por otro lado, los microinversores gestionan de forma individual cada panel FV, lo que ocasiona una menor eficiencia y mayor costo por watt en comparación a los inversores tipo *string*. Sin embargo, esto es compensado por un mayor nivel de MPP que éstos pueden lograr (Se consideran datos de microinversores Enecsys, Enphase y SunPower de hasta 300 W).
- ✓ Adicionalmente, los microinversores son una buena alternativa para sistemas FV de pequeña escala a ser instalados en techos con arquitectura compleja y con existencia de sombreado. Estos sistemas son más confiables, no operan a elevadas tensiones DC, por lo que se puede reducir la infraestructura eléctrica DC.

Artículo 2. Rodrigo *et al.* [53] indica:

- ✓ En este artículo se presenta una investigación sobre el efecto de mismatching sobre paneles FV con concentradores. Tal efecto es cuantificado a partir de las pérdidas de energía para diversos tipos de unidades de gestión de paneles FV, incluyendo microinversores e inversores tipo *string*.
- ✓ Los autores destacan que las pérdidas de energía para el caso de microinversores por causa de *misalignment* (alineación imperfecta de cada módulo cuando está instalado en el seguidor solar) y *shading* son de 1,1% y 0,1%, respectivamente; siendo éstos valores menores con respecto a los encontrados para los inversores tipo *string*, que se registraron en 2,7% y 0,5%. Estos resultados permiten inferir que los microinversores son una buena opción tecnológica.

Artículo 3. Ikkurtti and Saha [54] indica:

- ✓ Este artículo presenta una revisión de los microinversores como solución tecnológica para sistemas *Building Integrated Photovoltaics* – BIPV, lo cual incluye un análisis comparativo con inversores centralizados y de tipo *string*.
- ✓ Como resultado del análisis, se destaca que los microinversores tienen las siguientes ventajas: simplicidad de conexión eléctrica, inteligencia en la monitorización, detección rápida de fallas, confiabilidad y menor tensión DC de operación, entre otras.
- ✓ También se indica que los microinversores pueden proveer generación adicional anual en condiciones de sombreado, dado que si un solo panel FV es afectado ocasionará sólo la disminución de la generación en un microinversor; sin embargo, tal circunstancia afectará a todo un *array* de paneles FV si están conectados a un inversor tipo *string*.

Anexo B. Información técnica de paneles y microinversores

Este anexo contiene información técnicas de los paneles FV y microinversores que conformación los sistemas fotovoltaicos instalados (FV1, FV2 y FV3), también presenta las interfaces de operación de los microinversores.

B.1 PANELES FOTOVOLTAICOS Y MICROINVERSORES





La Tabla B.1 muestra información técnica detallada de los dos modelos utilizados.

Tabla B.1. Características técnicas de los paneles FV seleccionados.

Modelo	CS6P-255	UP-M250P
Marca	CANADIAN SOLAR	UPSOLAR
Cantidad	20	3
Sistema FV	FV1, FV2 y FV3	FV1 y FV3
Potencia nominal [W]	255 W	250 W
Eficiencia nominal STC	15,85 %	15,40 %
Tensión de máxima potencia nominal – V_{mpp}	30,20 V	30,60 V
Corriente de máxima potencia nominal – I_{mpp}	8,43 A	8,17 A
Tensión de circuito abierto nominal – V_{oc}	37,40 V	38,00 V
Corriente de corto circuito nominal – I_{sc}	8,87 A	8,55 A
Coefficiente térmico de P_m	-0,43 %/°C	-0,43 %/°C
Tipo de celda	Policristalino	Policristalino
Configuración de las celdas	6 X 10 = 60	6 X 10 = 60
Dimensiones	1638mm X 982mm X 40mm	1640mm X 992mm X 40mm
Peso	18 kg	19 kg

La Tabla B.2 muestra información técnica detallada de los dos modelos utilizados.

Tabla B.2. Características técnicas de los microinversores seleccionados.

	MICRO-0.25-I-OUT-US-208/240	M250-60-2LL-S22
Modelo		
Marca	ABB	Enphase
Potencia nominal de salida	250W	250W
Rango operacional de tensión	183V – 228V	183V-229V
Rango operacional de frecuencia	57Hz – 60,5Hz	57Hz – 62,5Hz
Eficiencia nominal	96%	96,5%
Conexión	2F + GND	2F + N + GND
Tamaño	266mm X 246mm X 35mm	171mm X 173mm X 30mm
Peso	1,65kg	1,60kg
Comunicación	Wireless (Wi-Fi)	Power line
	CDD	ENVOY
Módulo de comunicaciones		

Una ventaja de los microinversores consiste en la escalabilidad, ya que es posible ir aumentando la capacidad instalada de un sistema solo dependiendo del espacio disponible y de la capacidad de la instalación eléctrica. Sin embargo, estos dispositivos son más costosos comparativamente que los inversores FV tipo *string*¹⁸.

¹⁸ Inversor FV que acoge una o varias configuraciones de paneles FV de forma simultánea.

B.2 INTERFACES DE OPERACIÓN DE LOS MICROINVERSORES

La Figura B.1 muestra la interfaz *Aurora Vision* con información del sistema FV1. Permite apreciar y descargar archivos en formato CSV de la potencia generada total del sistema cada 15 minutos, así como la curva de potencia diaria y los consolidados de energía generada semanal, mensual y anual.

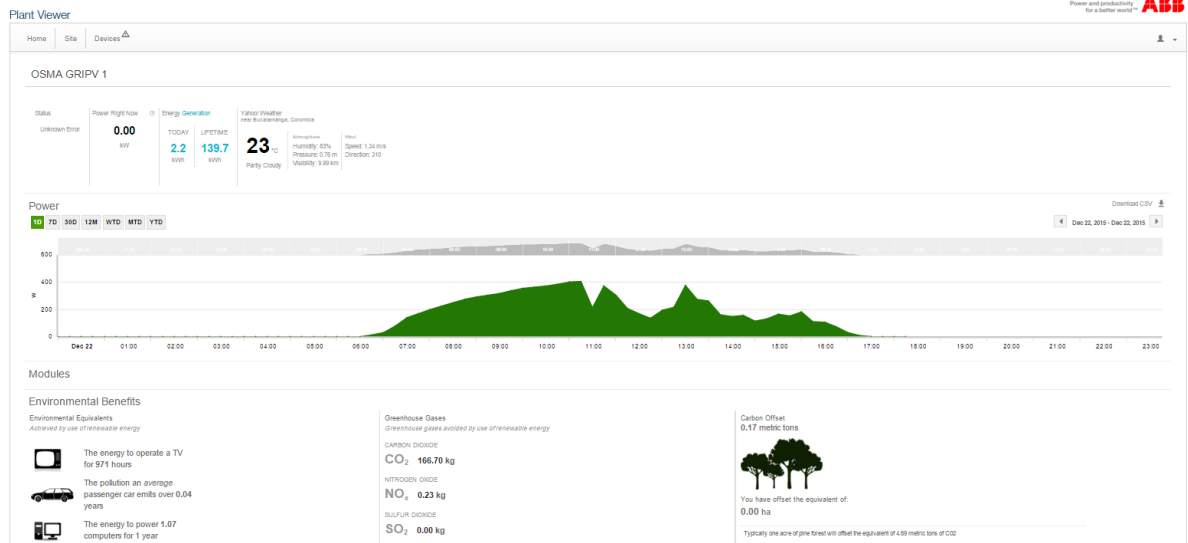


Figura B.1 Interfaz *Aurora Vision* para sistemas fotovoltaicos con microinversores ABB (captura de pantalla).

La Figura B.2 muestra la interfaz *Enlighten* con información del sistema FV3. Esta herramienta presenta la disposición física de los paneles FV, la ubicación geográfica, y los datos de operación de cada microinversor y de todo el sistema. Permite visualizar y descargar datos de tensión DC, corriente DC, valor eficaz de tensión AC, potencia activa, frecuencia y factor de potencia de cada microinversor cada 5 minutos, así como datos de energía diaria, mensual y anual, en formatos **txt** y **csv**.

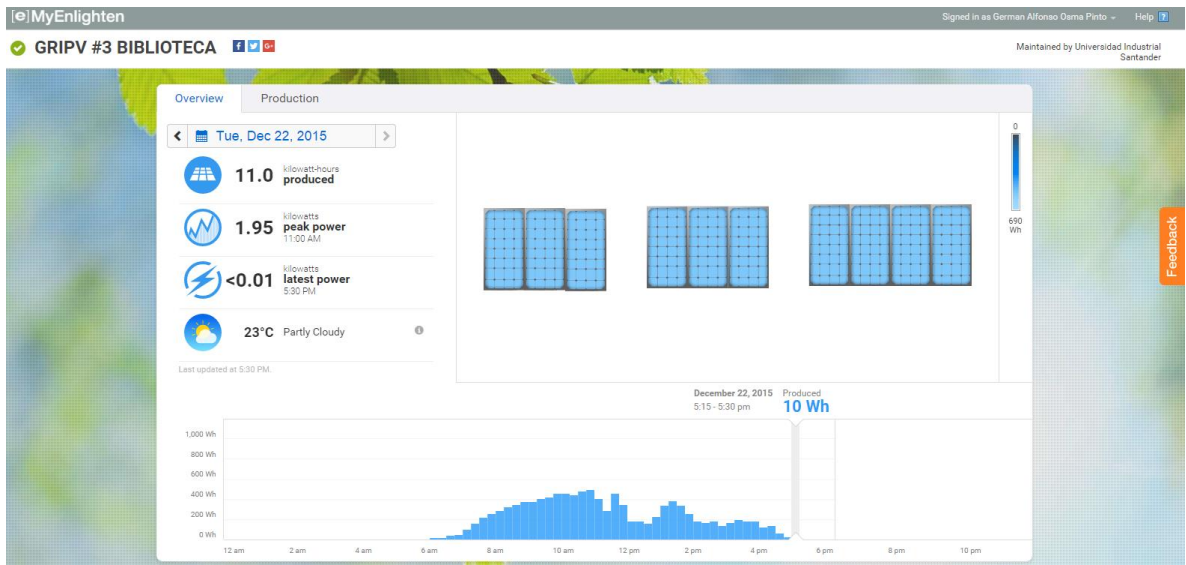


Figura B.2. Interfaz *Enlighten* para sistemas fotovoltaicos con microinversores Enphase (*captura de pantalla*).

Anexo C. Conexión de medidores de energía

Este anexo presenta los esquemas de conexión de los medidores de energías en los sistemas fotovoltaicos instalados (FV1, FV2 y FV3).

Las figuras C.1 y C.2 muestran los esquemas de conexión de los medidores de energía AC AcuRev 2020 y medidores de energía DC AcuDC243. La medición de corriente continua se llevó a cabo a partir de sensores de efecto Hall para los sistemas FV1 y FV2, y sensores *shunt* para el sistema FV3. El uso de estos dos modelos de sensores se debió a la disponibilidad de los medidores de energía por parte del fabricante canadiense (*Accuenergy*).

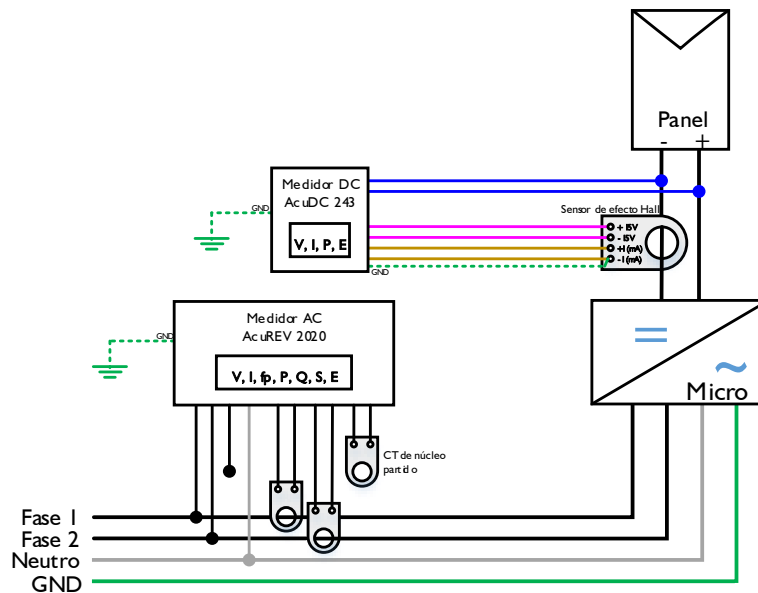


Figura C.1. Diagrama de componentes de la monitorización de variables eléctricas de los sistemas FV1 y FV2.

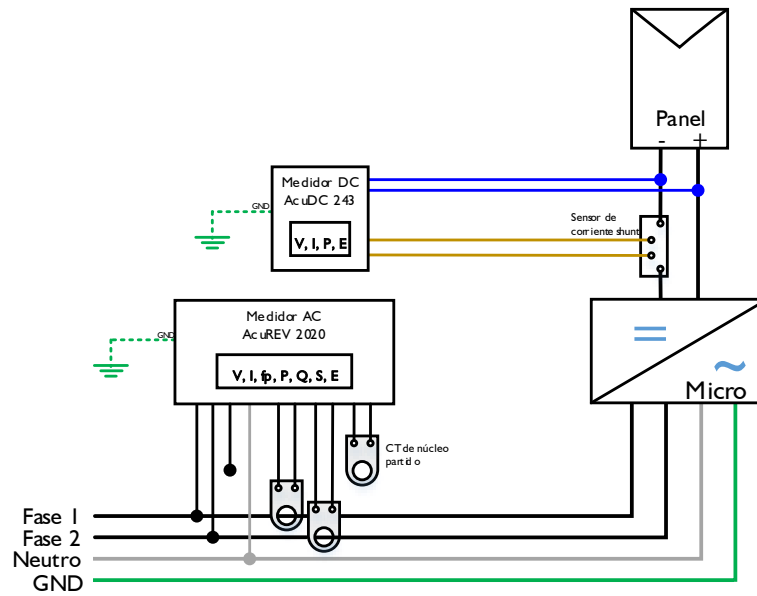


Figura C.2. Diagrama de componentes de la monitorización de variables eléctricas del sistema FV3.

Anexo D. Curvas de comportamiento diario de los casos analizados del experimento de irrigación

Este anexo contiene las curvas de comportamiento de los paneles FV del experimento de irrigación para cada uno de los casos referidos en la Tabla I 5. Para cada caso se muestran las curvas de un día típico.

Caso I

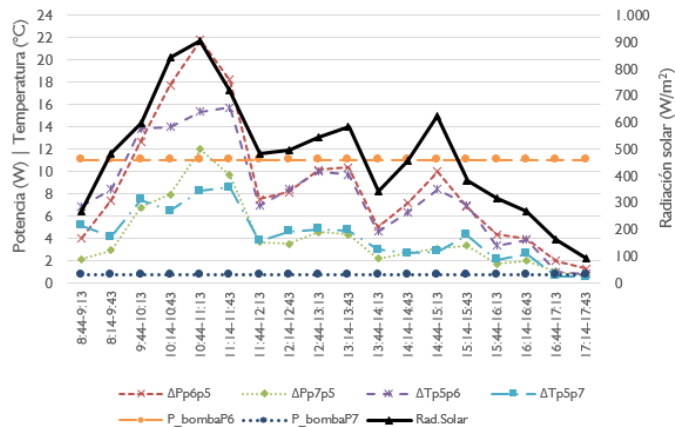


Figura D.1. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso I.

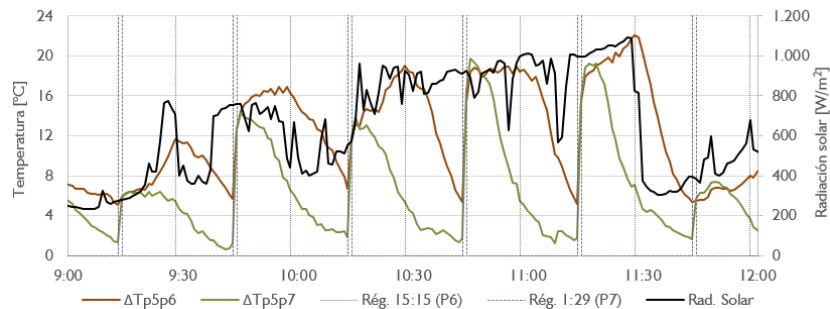


Figura D.2. Diferencias de temperatura en un día tipo del caso I.

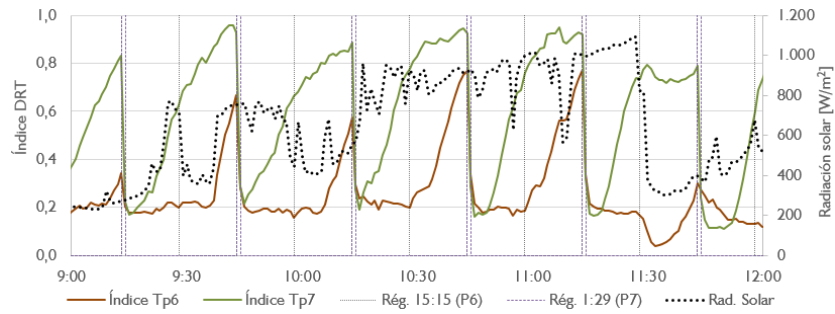


Figura D.3. Índice DRT en un día tipo del caso I.

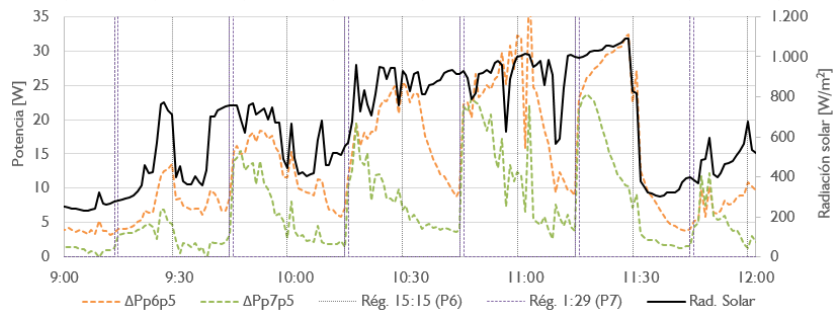


Figura D.4. Diferencias de potencia generada en un día tipo del caso I.

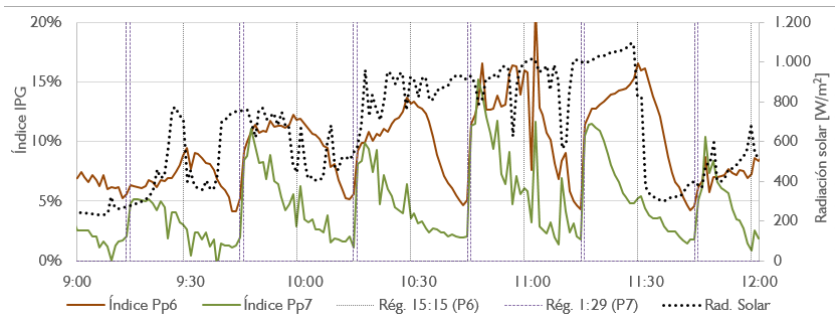


Figura D.5. Índice IPG en un día tipo del caso I.

Caso II

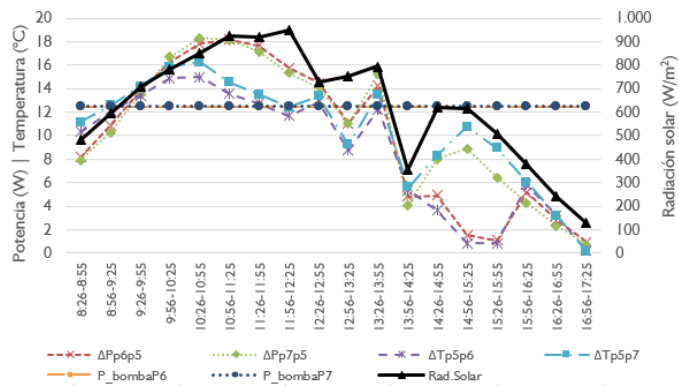


Figura D.6. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso II.

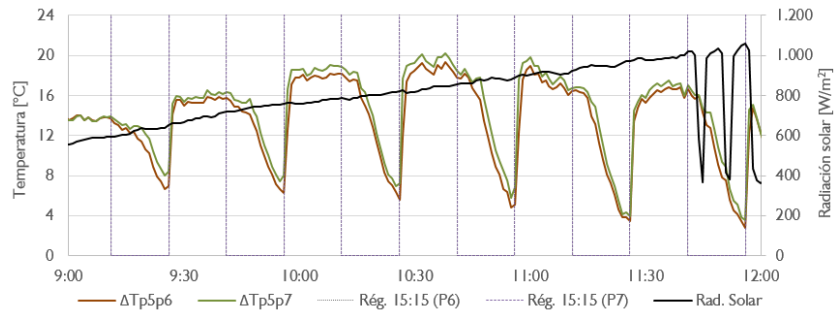


Figura D.7. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso II.

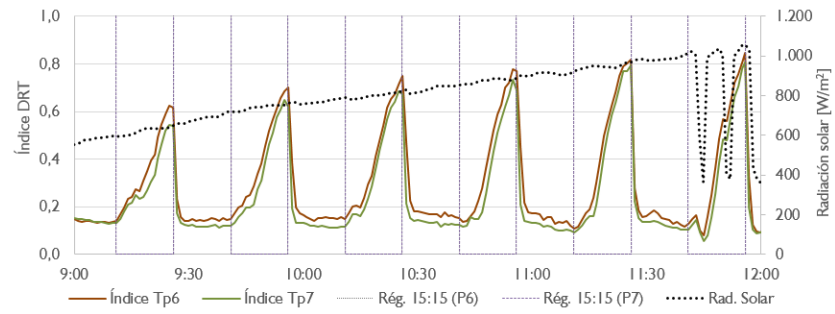


Figura D.8. Índice DRT en un día tipo del caso II.

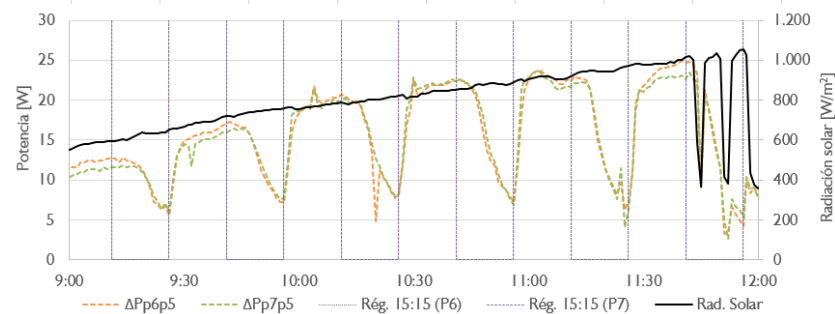


Figura D.9. Diferenciales de potencia generada en un día tipo del caso II.

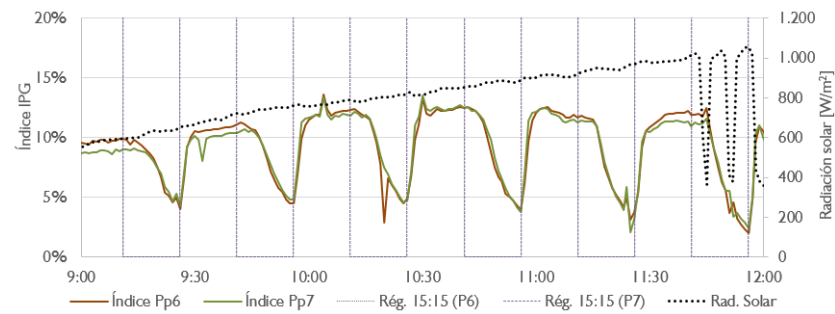


Figura D.10. Índice IPG en un día tipo del caso II.

Caso III

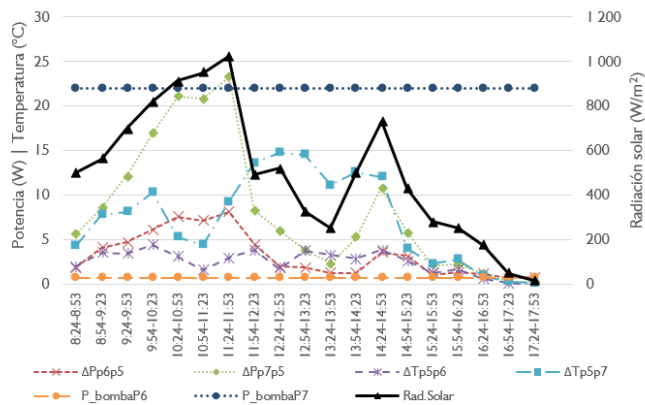


Figura D.11. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso III.

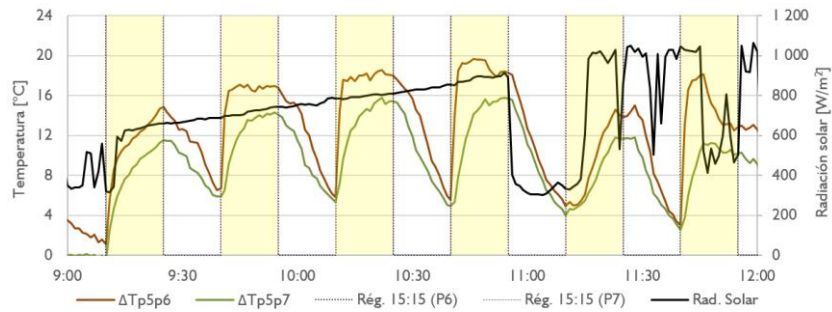


Figura D.12. Diferencias de temperatura en un día tipo del caso III.

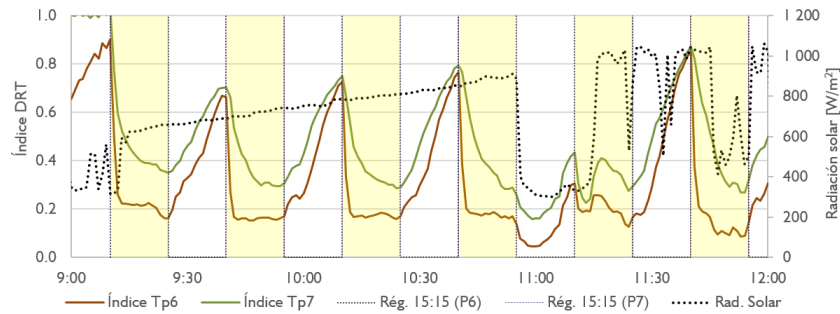


Figura D.13. Índice DRT en un día tipo del caso III.

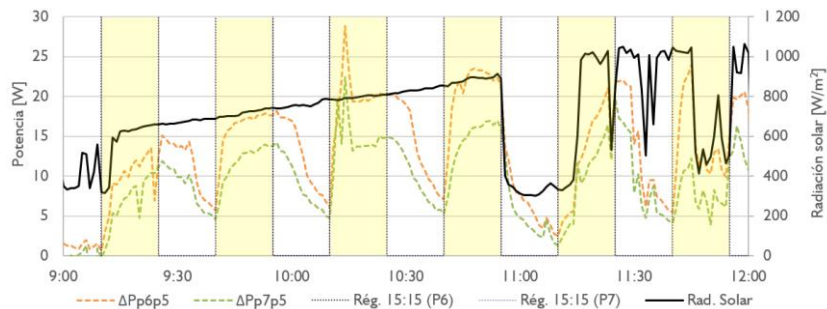


Figura D.14. Diferencias de potencia generada en un día tipo del caso III.

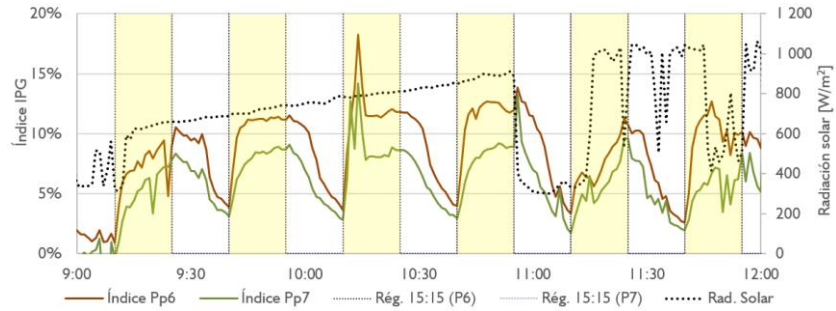


Figura D.15. Índice IPG en un día tipo del caso III.

Caso IV

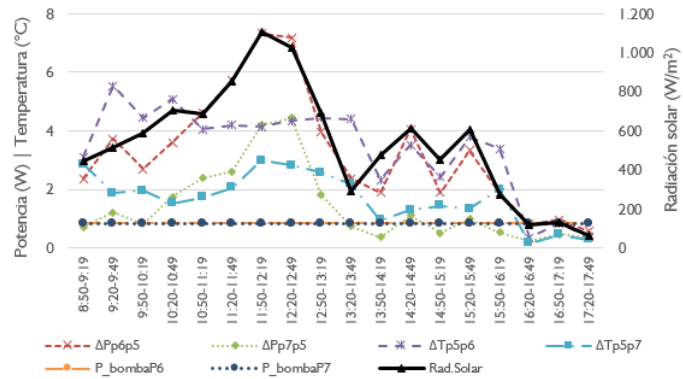


Figura D.16. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso IV.

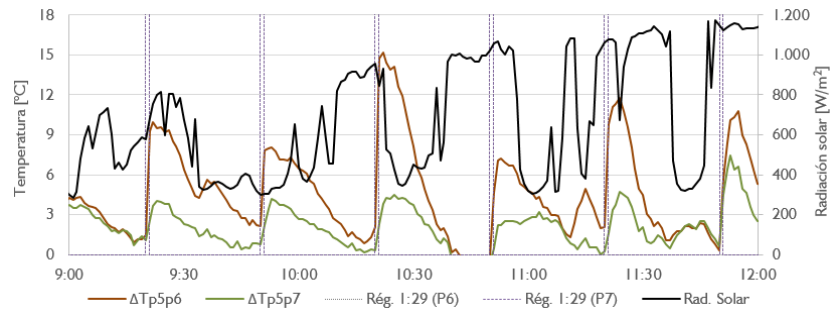


Figura D.17. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso IV.

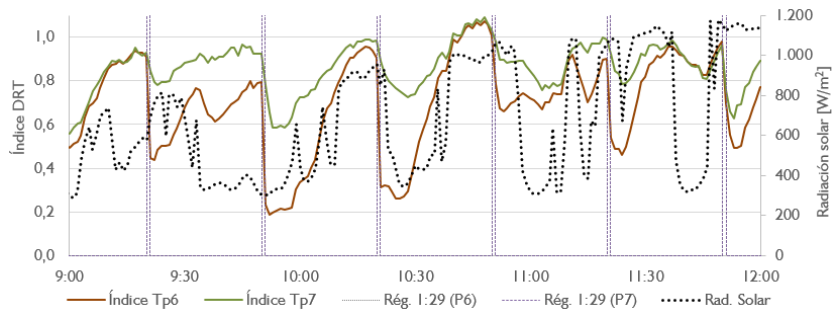


Figura D.18. Índice DRT en un día tipo del caso IV.

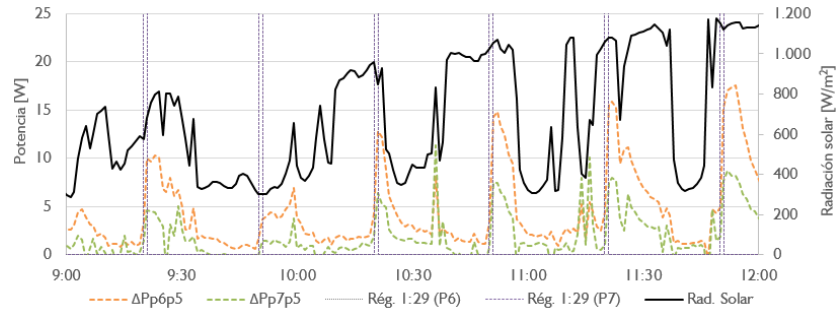


Figura D.19. Diferenciales de potencia generada en un día tipo del caso IV.

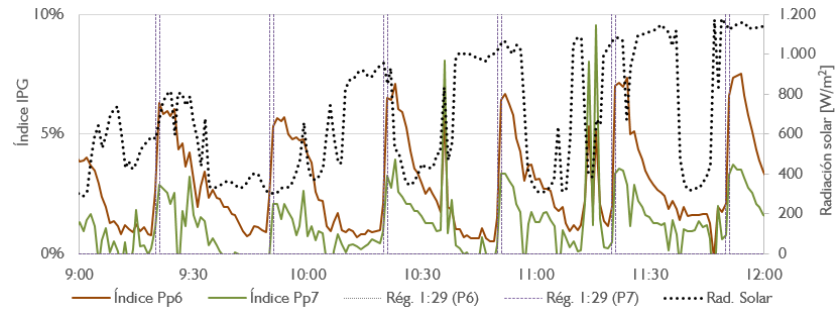


Figura D.20. Índice IPG en un día tipo del caso IV.

Caso V

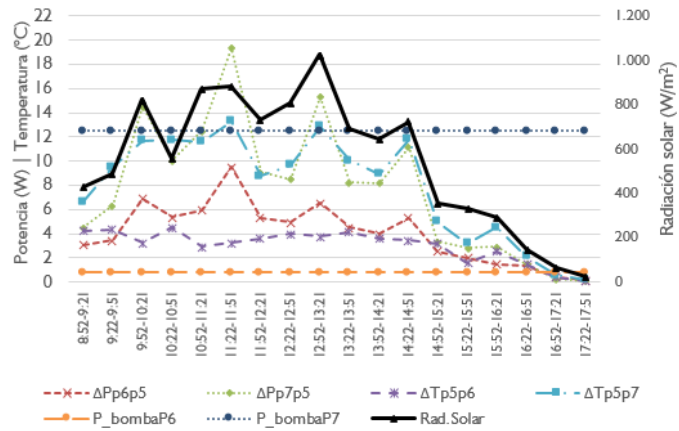


Figura D.21. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso V.

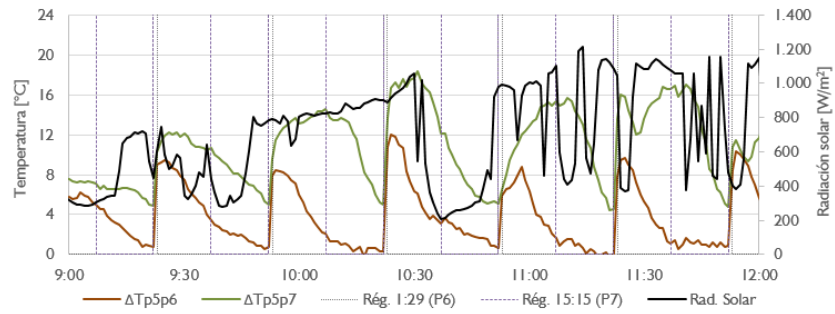


Figura D.22. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso V.

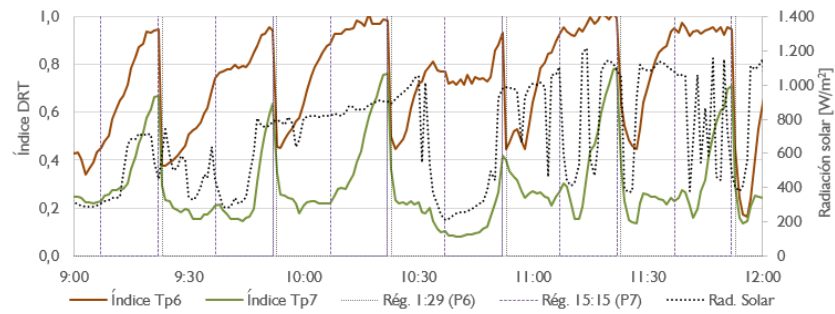


Figura D.23. Índice DRT en un día tipo del caso V.

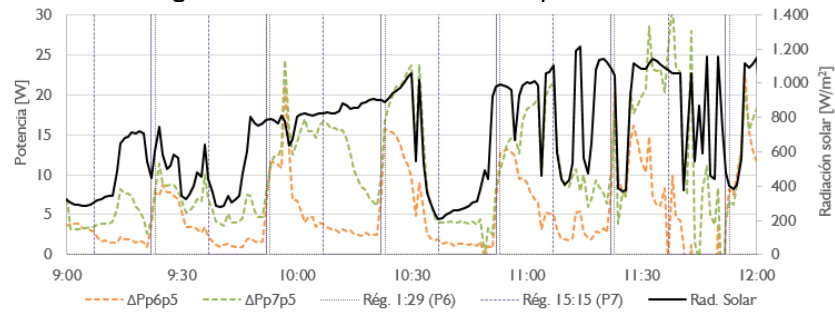


Figura D.24. Diferenciales de potencia generada en un día tipo del caso V.

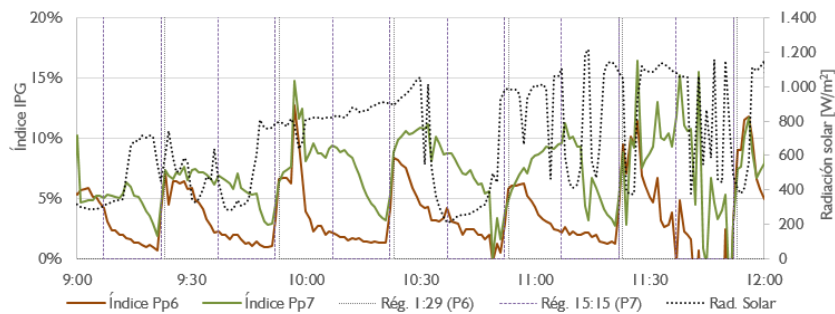


Figura D.25. Índice IPG en un día tipo del caso V.

Caso VI

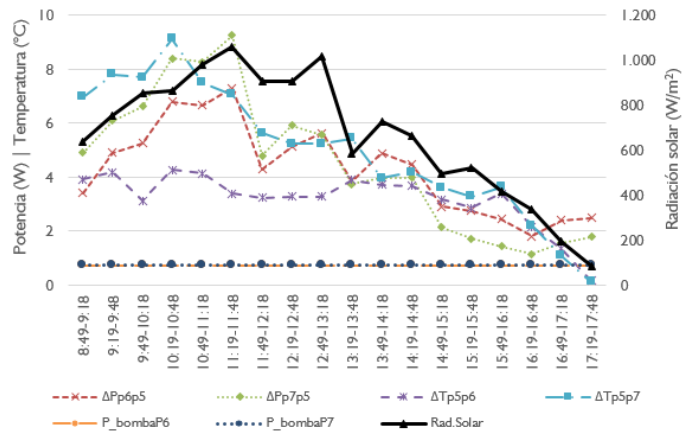


Figura D.26. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso VI.

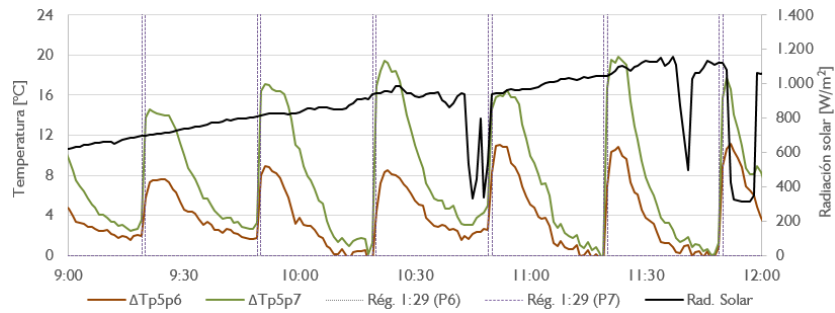


Figura D.27. Diferencias de temperatura en un día tipo del caso VI.

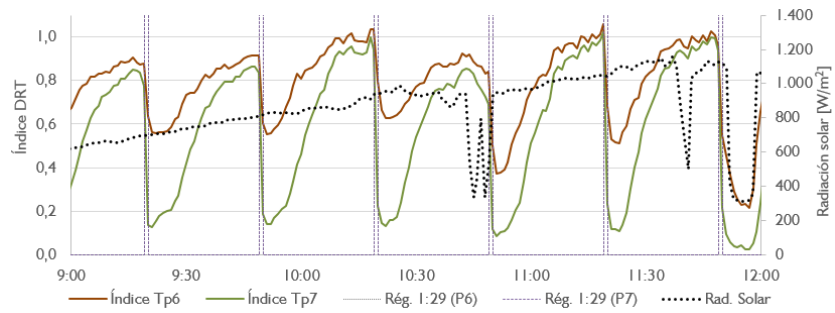


Figura D.28. Índice DRT en un día tipo del caso VI.

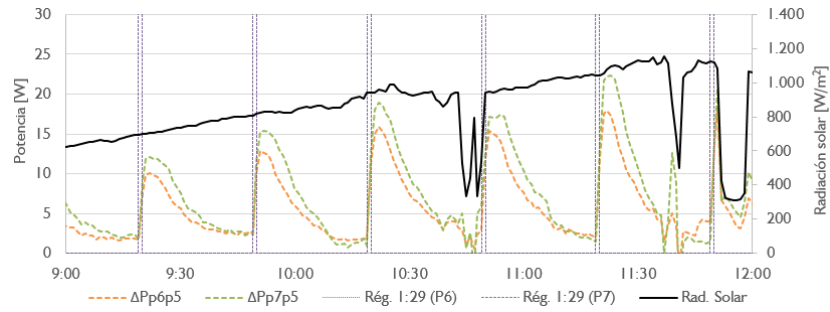


Figura D.29. Diferencias de potencia generada en un día tipo del caso VI.

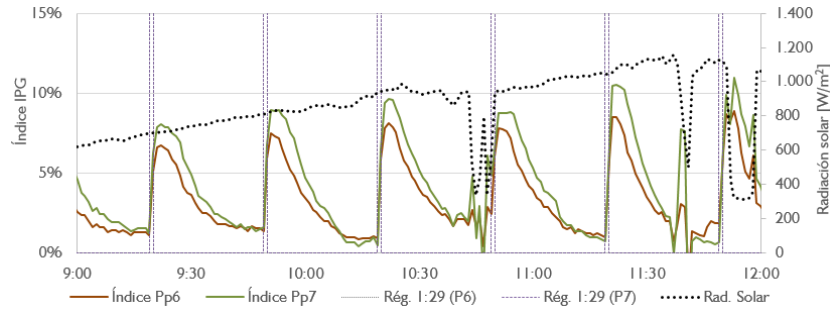


Figura D.30. Índice IPG en un día tipo del caso VI.

Caso VII

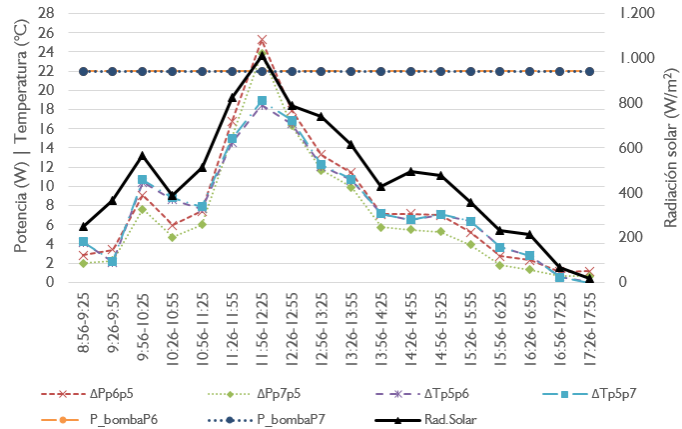


Figura D.31. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso VII.

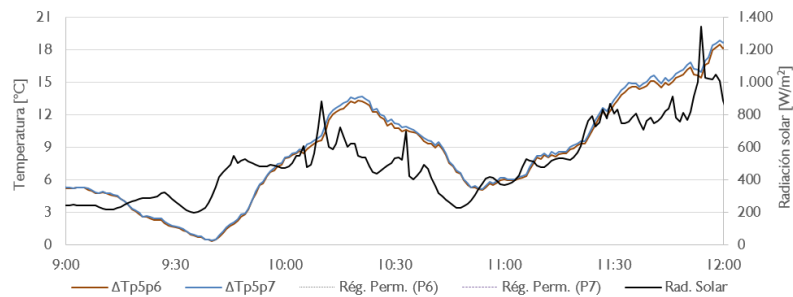


Figura D.32. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso VII.

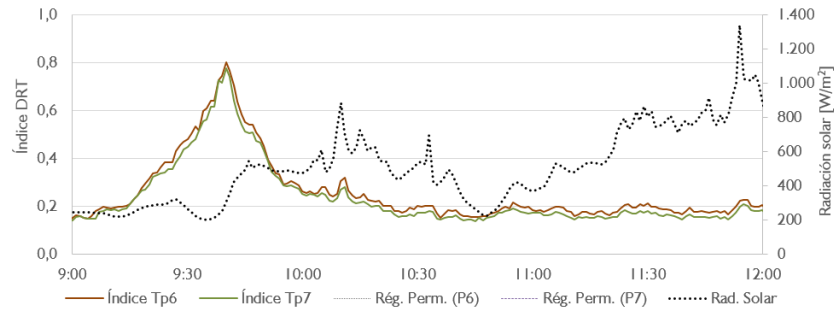


Figura D.33. Índice DRT en un día tipo del caso VII.

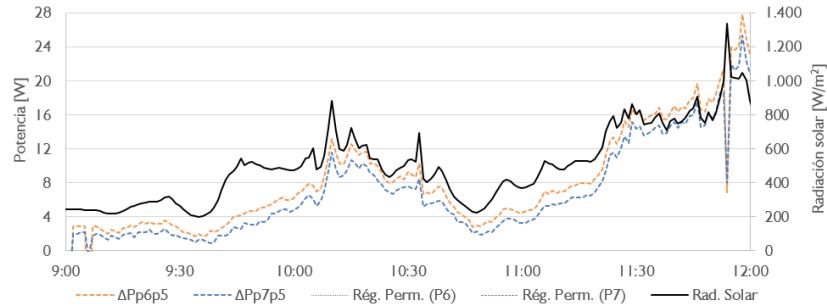


Figura D.34. Diferencias de potencia generada en un día tipo del caso VII.

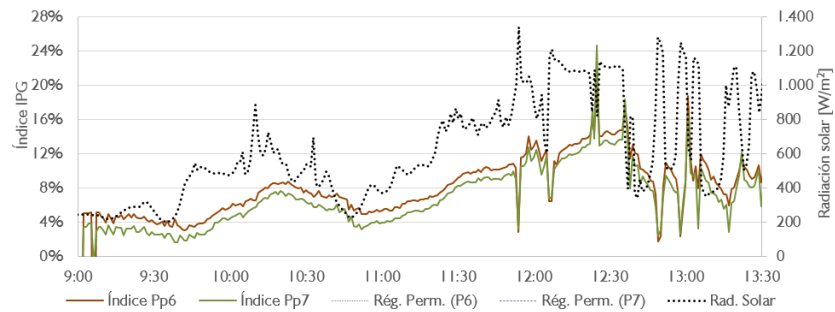


Figura D.35. Índice IPG en un día tipo del caso VII.

Caso VIII

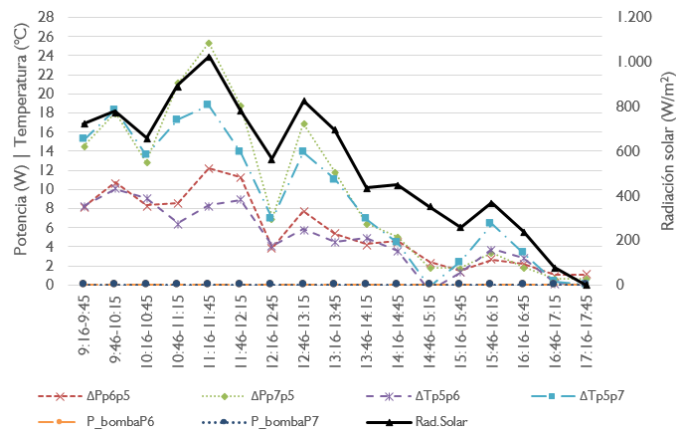


Figura D.36. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso VIII.

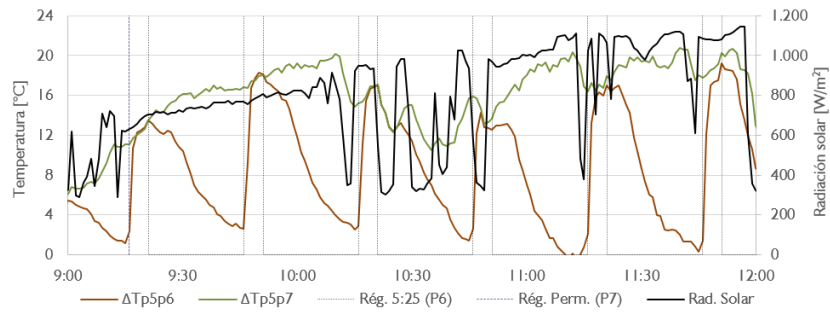


Figura D.37. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso VIII.

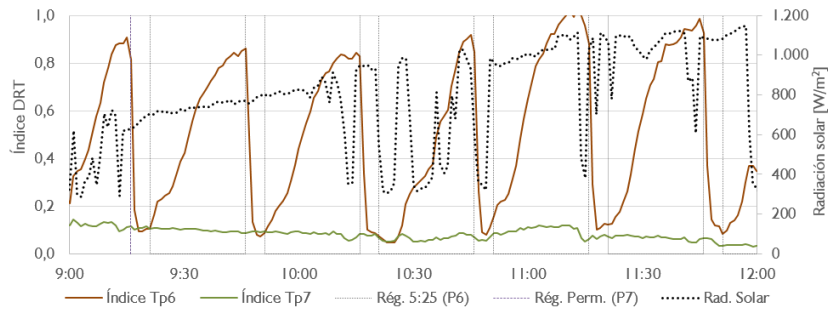


Figura D.38. Índice DRT en un día tipo del caso VIII.

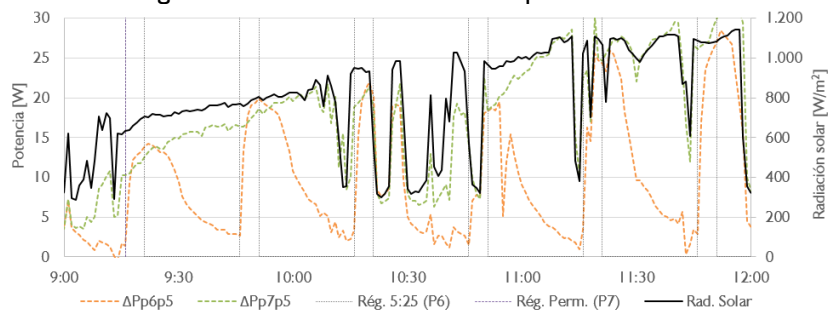


Figura D.39. Diferenciales de potencia generada en un día tipo del caso VIII.

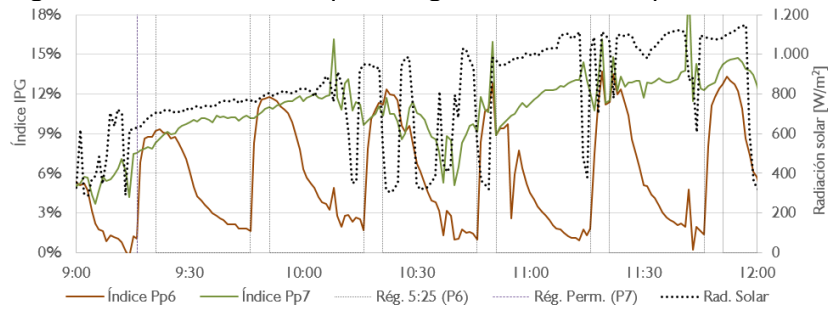


Figura D.40. Índice IPG en un día tipo del caso VIII.

Caso IX

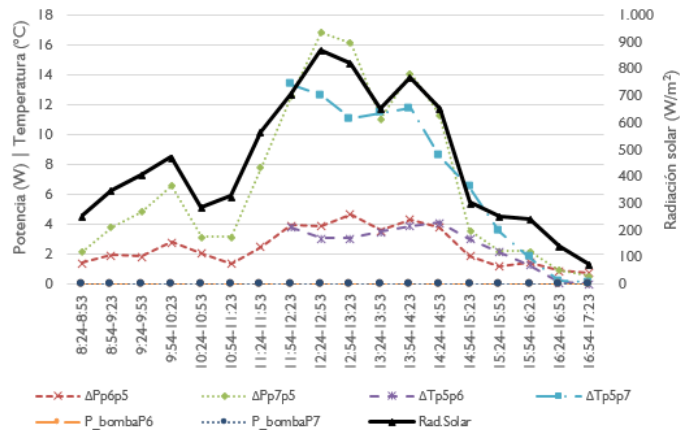


Figura D.41. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso IX.

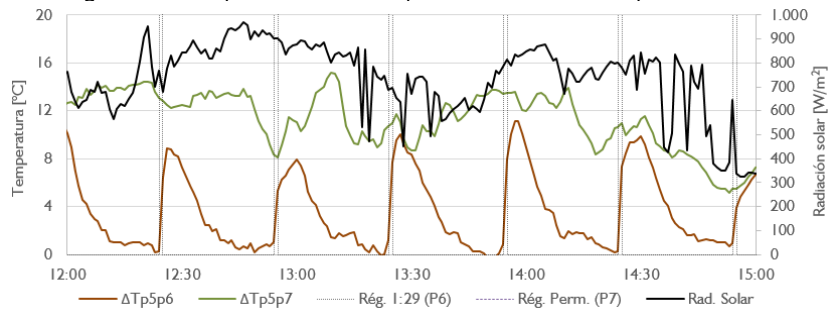


Figura D.42. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso IX.

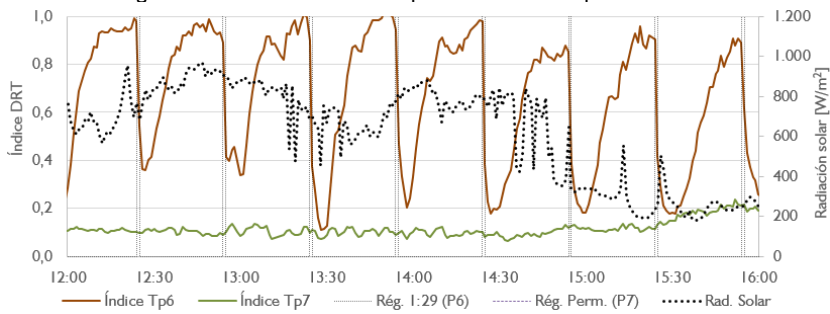


Figura D.43. Índice DRT en un día tipo del caso IX.

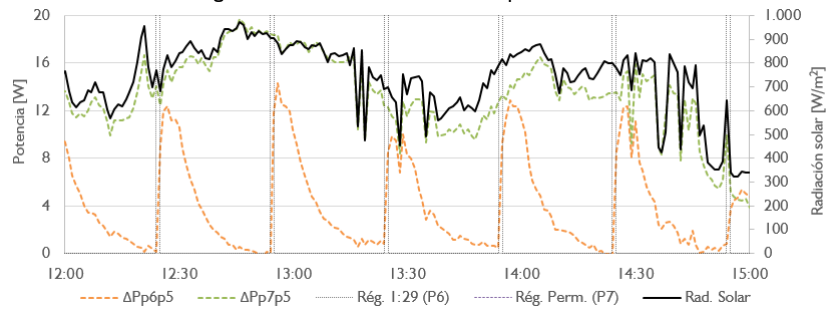


Figura D.44. Diferenciales de potencia generada en un día tipo del caso IX.

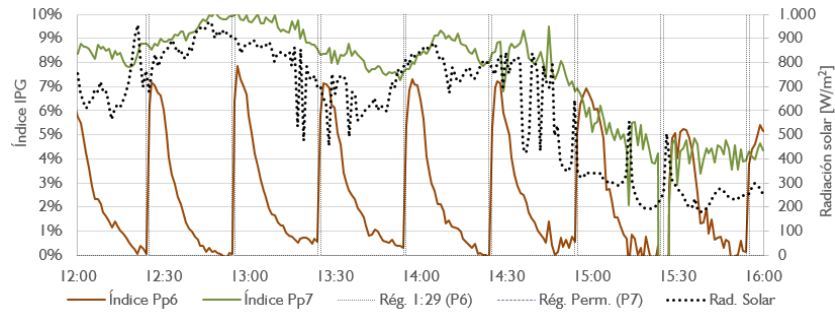


Figura D.45. Índice IPG en un día tipo del caso IX.

Caso X

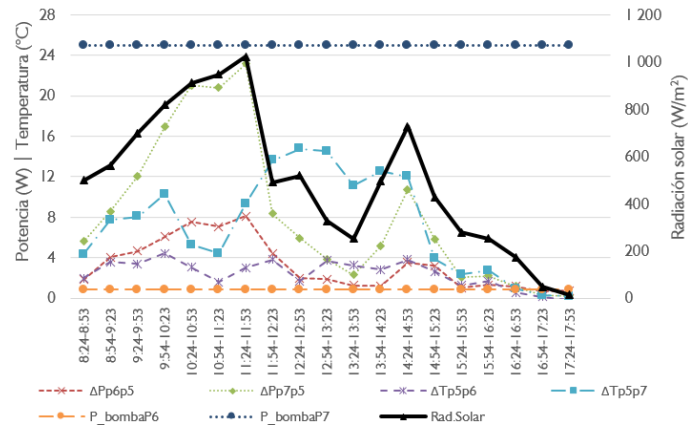


Figura D.46. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso X.

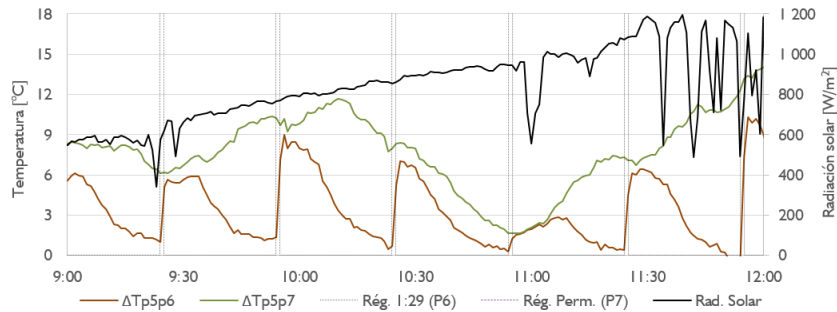


Figura D.47. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso X.

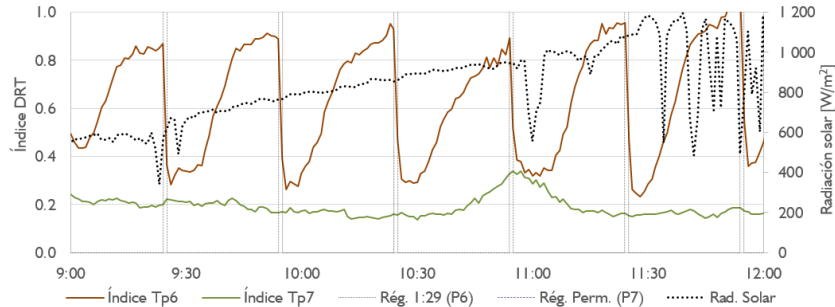


Figura D.48. Índice DRT en un día tipo del caso X.

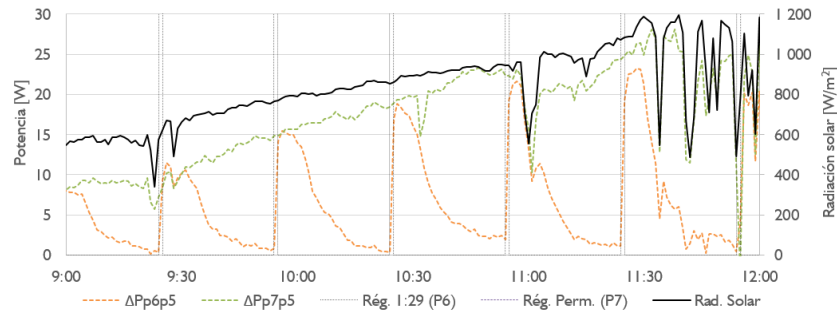


Figura D.49. Diferenciales de potencia generada en un día tipo del caso X.

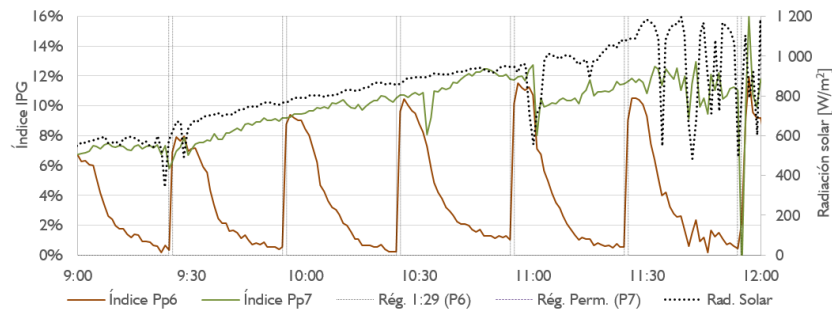


Figura D.50. Índice IPG en un día tipo del caso X.

Caso XI

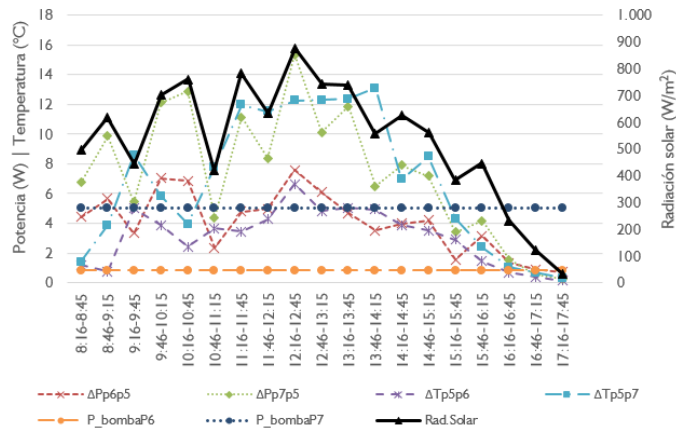


Figura D.51. Comportamiento horario promedio durante un día tipo del caso XI.

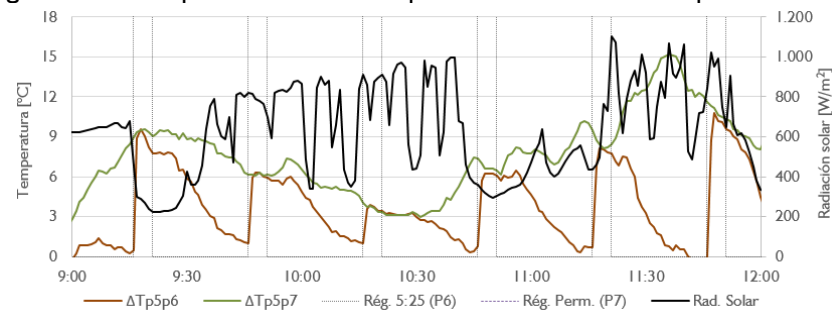


Figura D.52. Diferenciales de temperatura en un día tipo del caso XI.

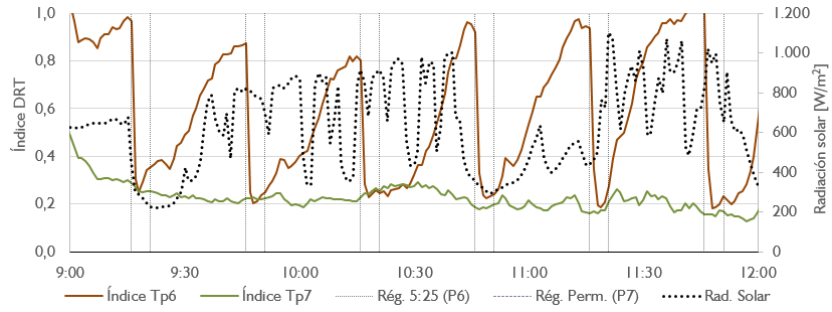


Figura D.53. Índice DRT en un día tipo del caso XI.

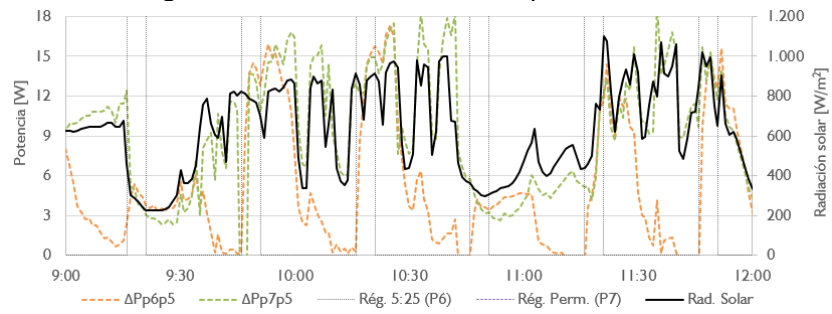


Figura D.54. Diferenciales de potencia generada en un día tipo del caso XI.

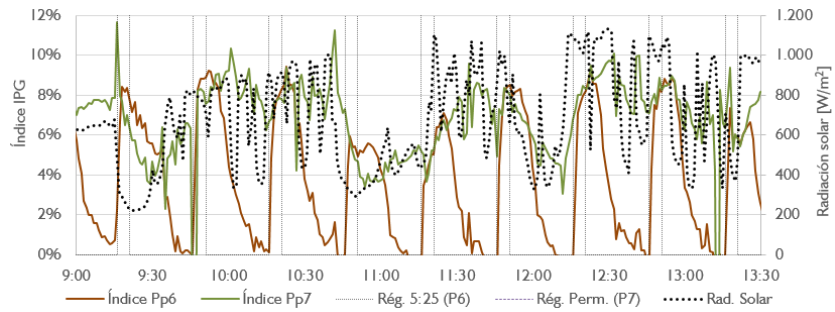


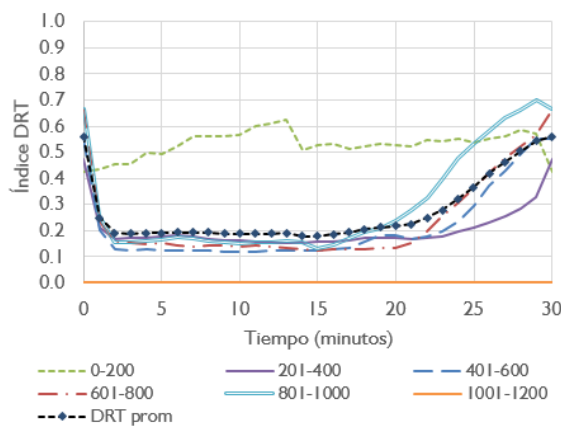
Figura D.55. Índice IPG en un día tipo del caso XI.

Anexo E. Curvas características de los índices DRT y IPG por régimen de irrigación

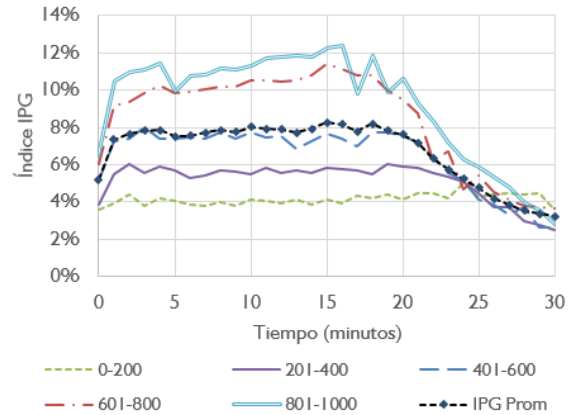
Este anexo contiene las curvas características de los índices DRT y IPG promedio y para diversos niveles de radiación solar. También se incluyen las curvas DRT normalizadas determinadas como lo indica la expresión (E.1), con el fin de determinar si existe relación entre los transitorios de enfriamiento y calentamiento con el nivel de radiación solar.

$$DRT_{norm}(t) = \frac{DRT(t)}{Max(DRT(t))} \tag{E.1}$$

Régimen A



a. Índice DRT



b. Índice IPG

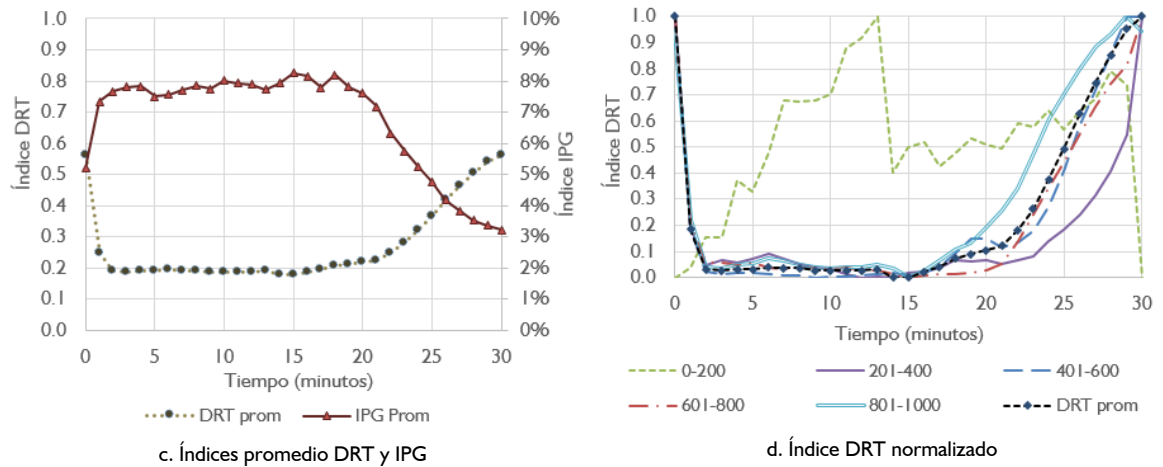


Figura E.1. Índices características DRT y IPG para el régimen A.

Régimen B

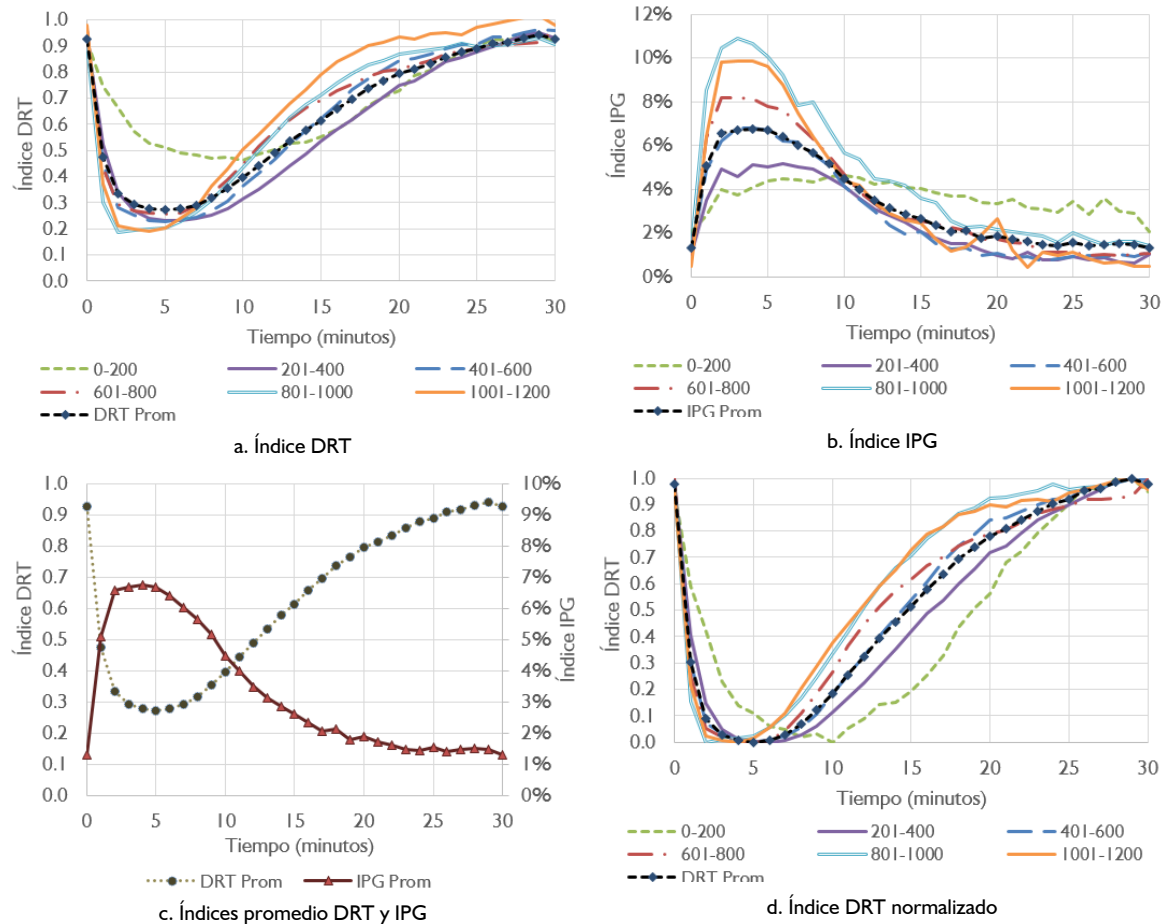
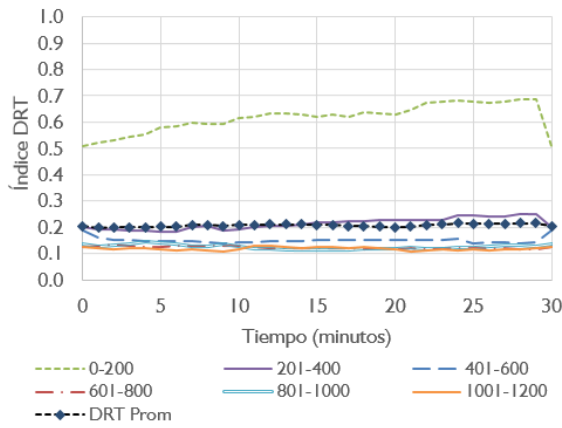
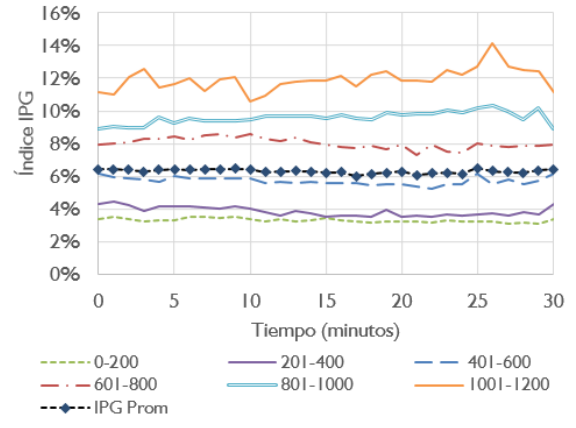


Figura E.2. Índices características DRT y IPG para el régimen B.

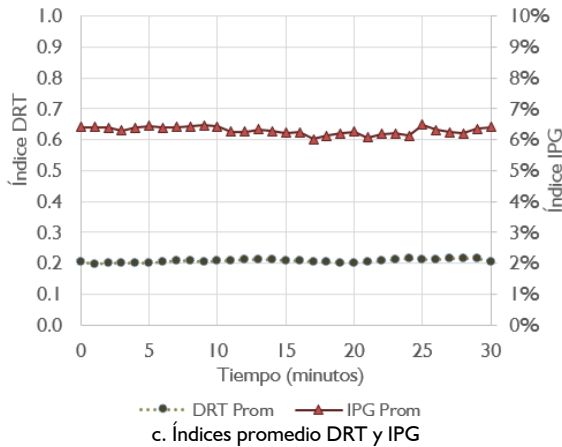
Régimen C



a. Índice DRT



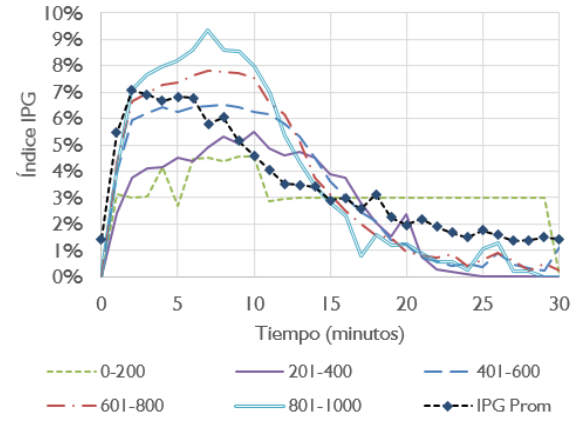
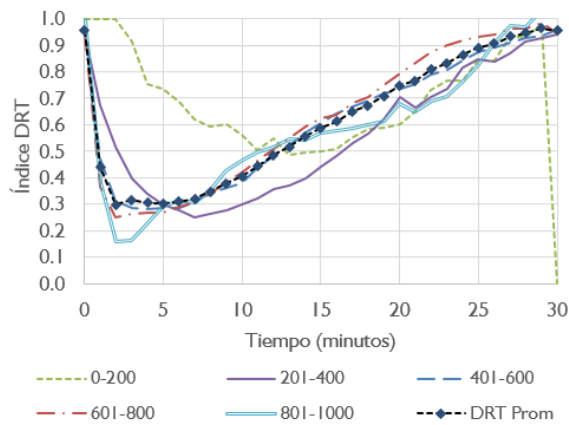
b. Índice IPG



c. Índices promedio DRT y IPG

Figura E.3. Índices características DRT y IPG para el régimen C.

Régimen D



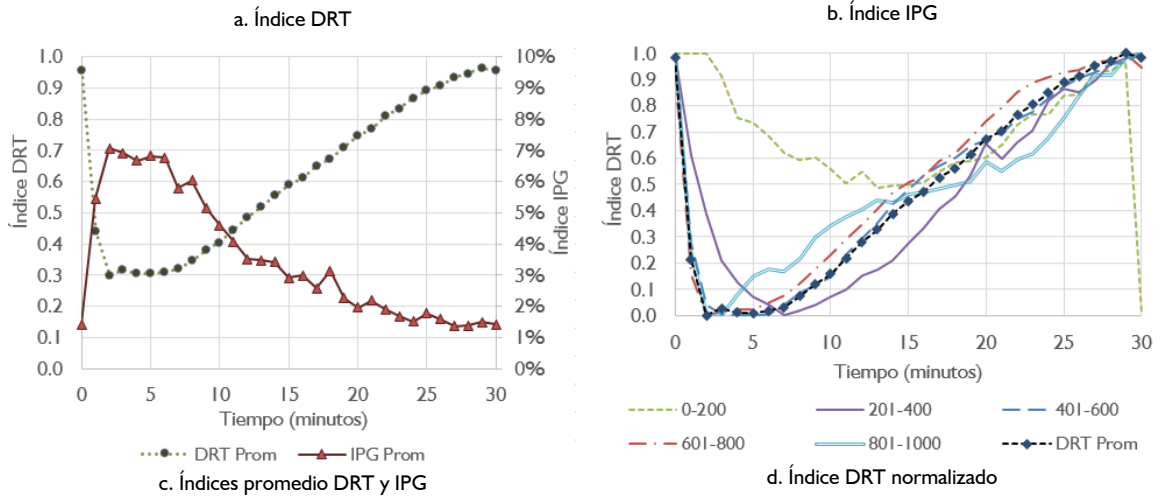


Figura E.4. Índices características DRT y IPG para el régimen D.

Régimen E

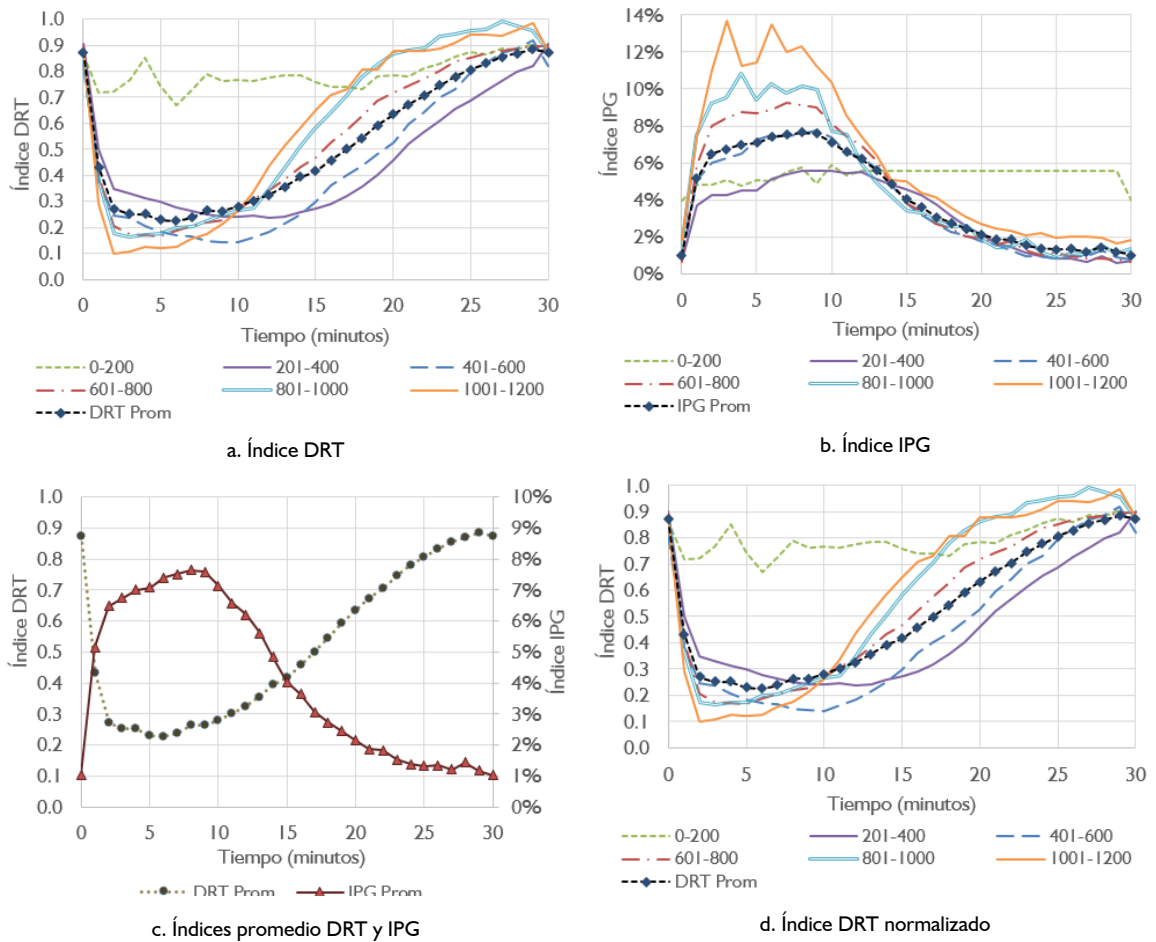
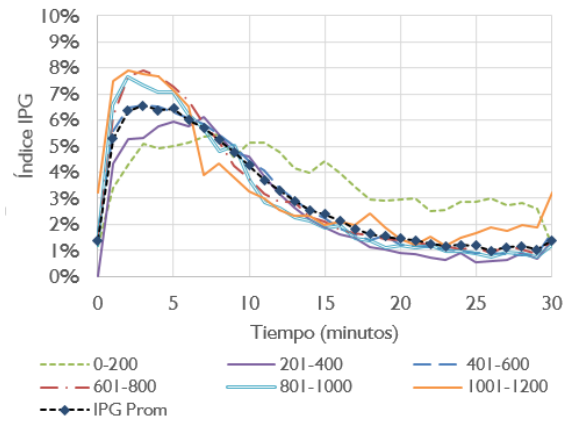
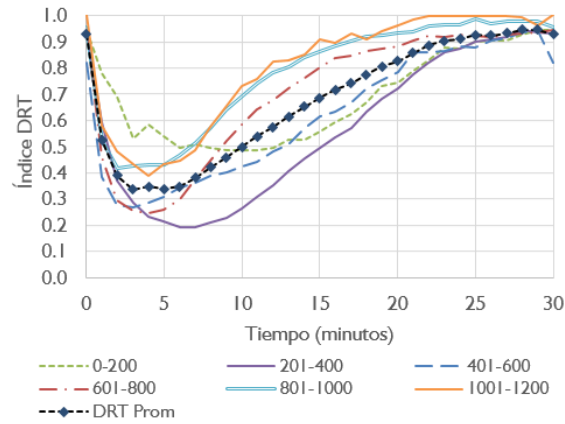


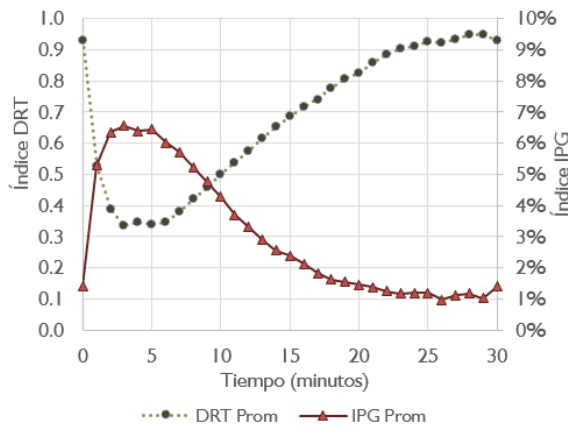
Figura E.5. Índices características DRT y IPG para el régimen E.

Régimen F

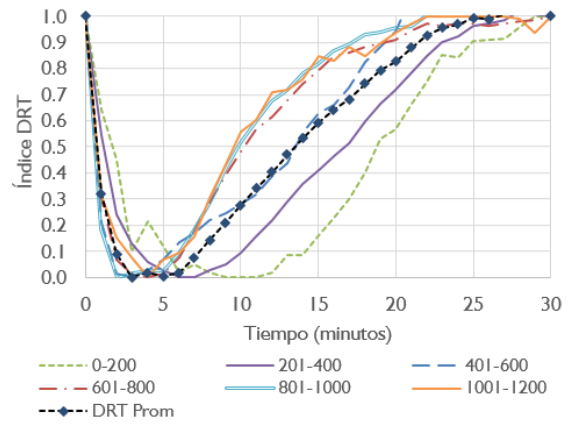


a. Índice DRT

b. Índice IPG



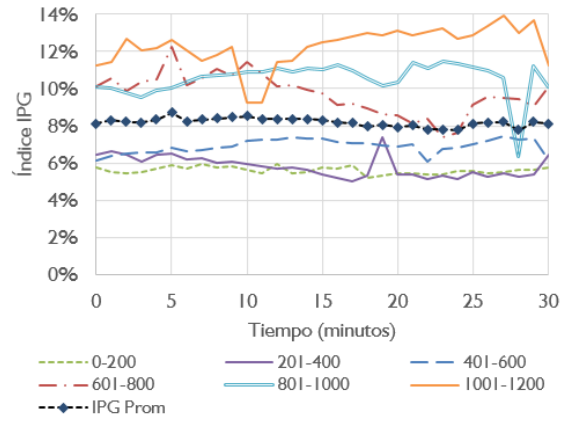
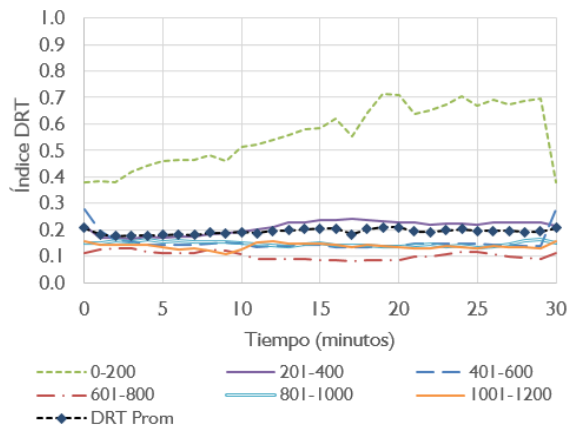
c. Índices promedio DRT y IPG



d. Índice DRT normalizado

Figura E.6. Índices características DRT y IPG para el régimen F.

Régimen G



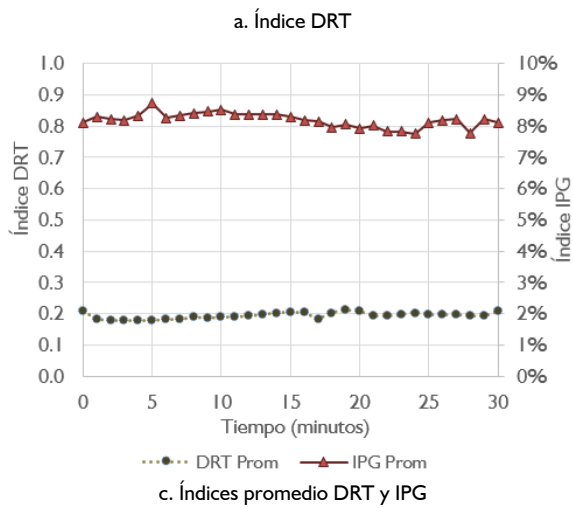


Figura E.7. Índices características DRT y IPG para el régimen G.

Régimen H

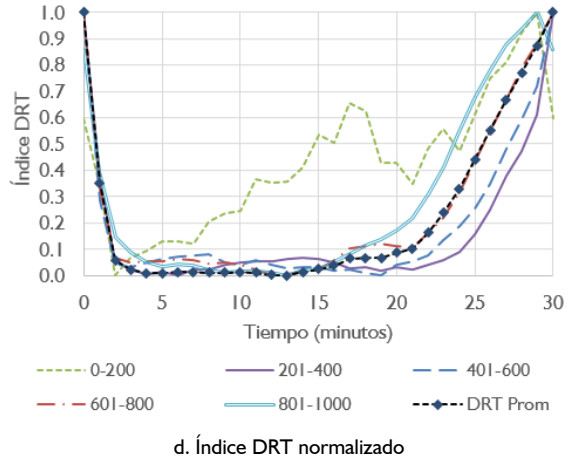
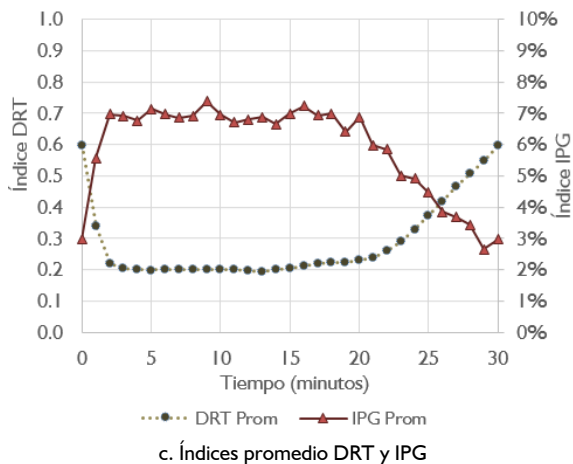
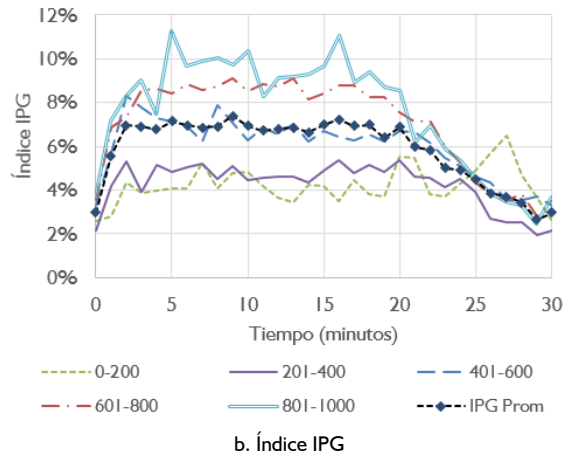
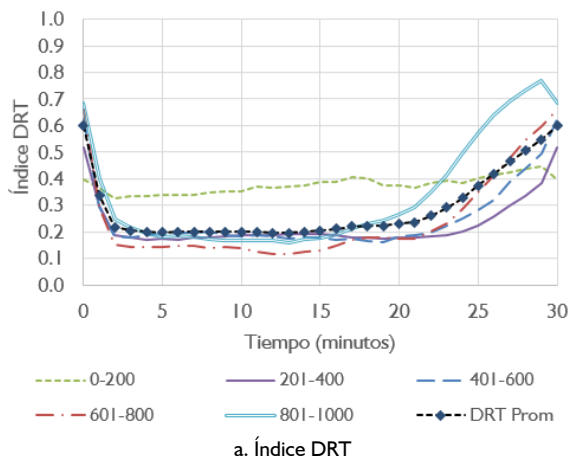
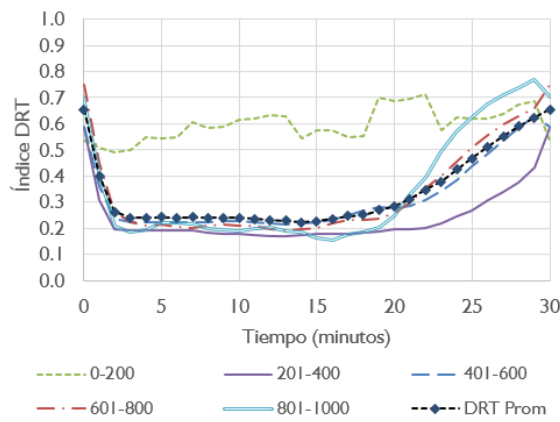
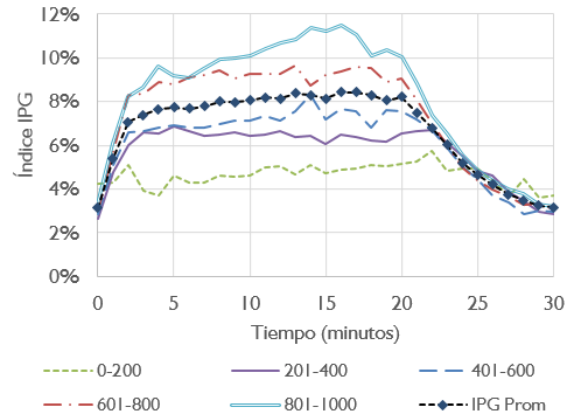


Figura E.8. Índices características DRT y IPG para el régimen H.

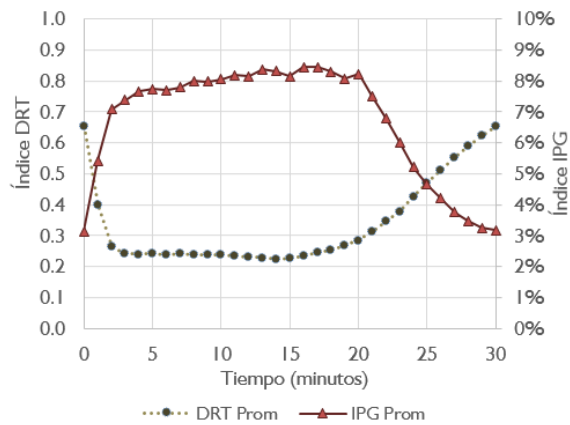
Régimen I



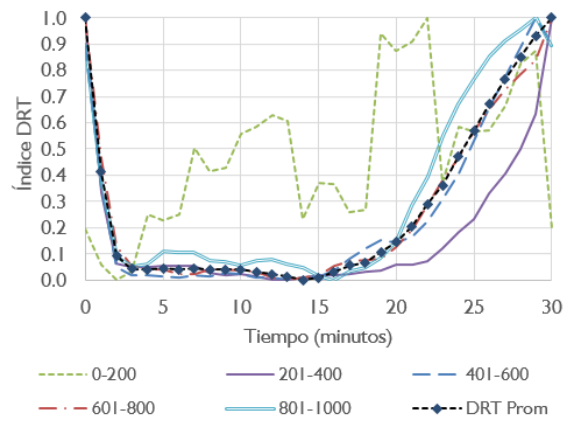
a. Índice DRT



b. Índice IPG



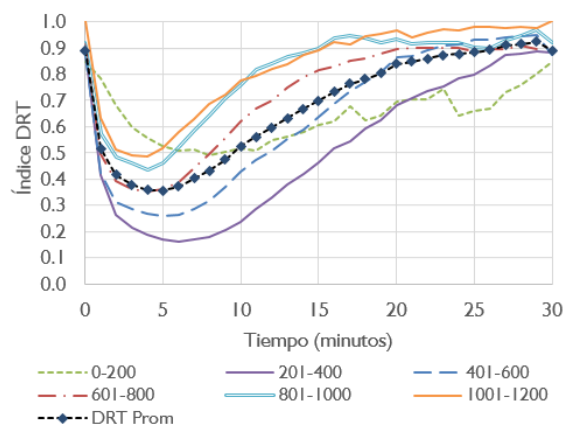
c. Índices promedio DRT y IPG



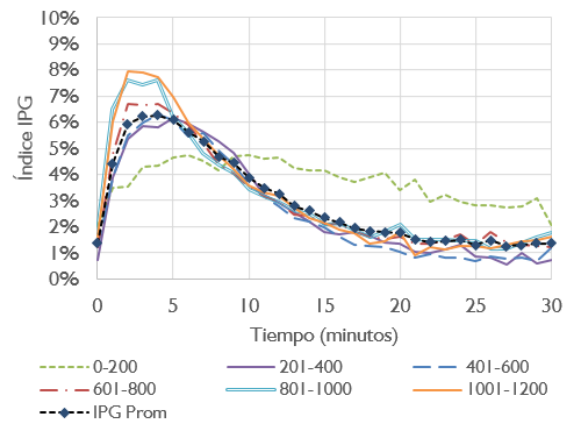
d. Índice DRT normalizado

Figura E.9. Índices características DRT y IPG para el régimen I.

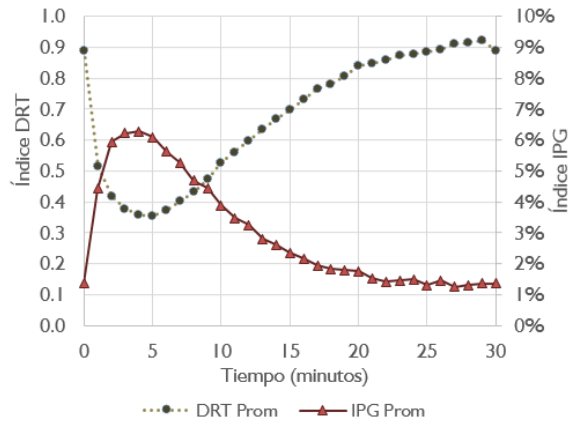
Régimen J



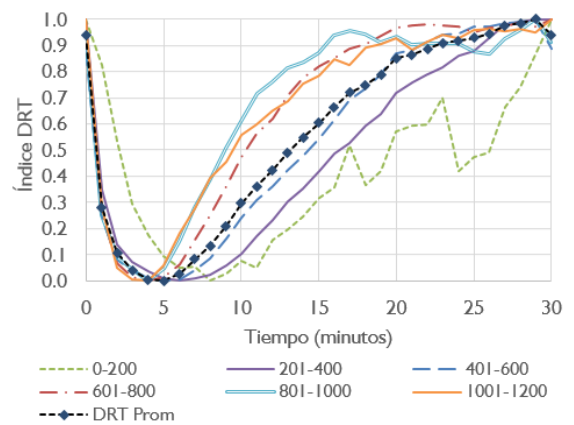
a. Índice DRT



b. Índice IPG



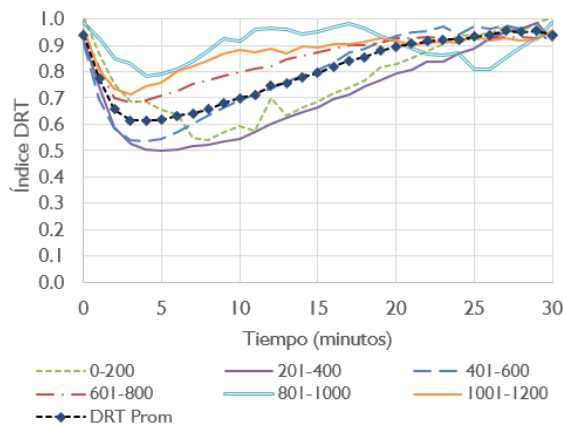
c. Índices promedio DRT y IPG



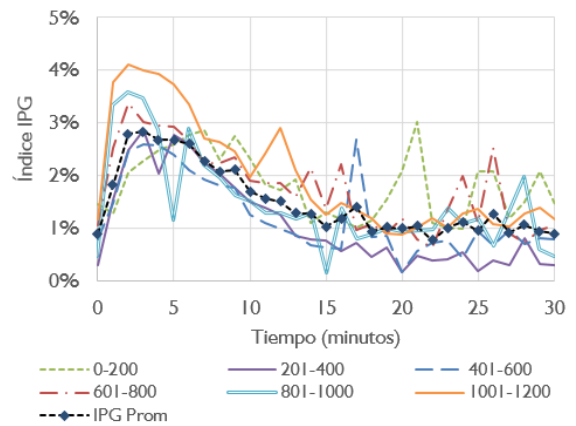
d. Índice DRT normalizado

Figura E.10. Índices características DRT y IPG para el régimen J.

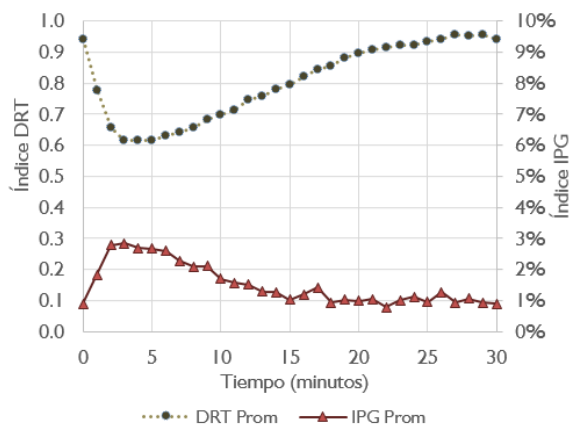
Régimen K



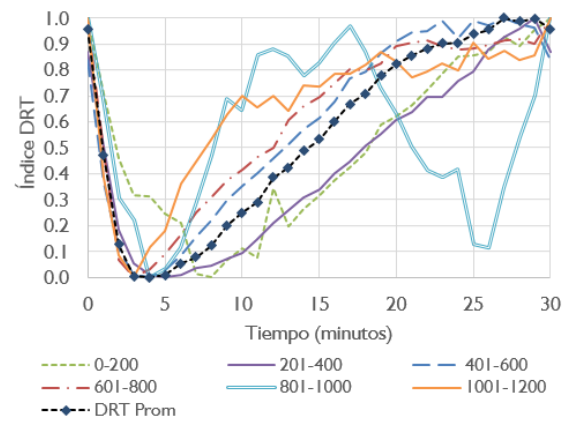
a. Índice DRT



b. Índice IPG



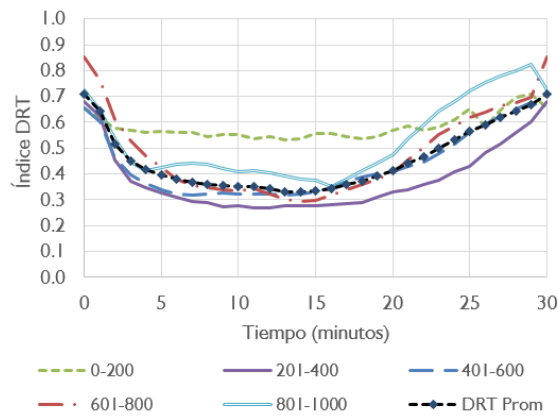
c. Índices promedio DRT y IPG



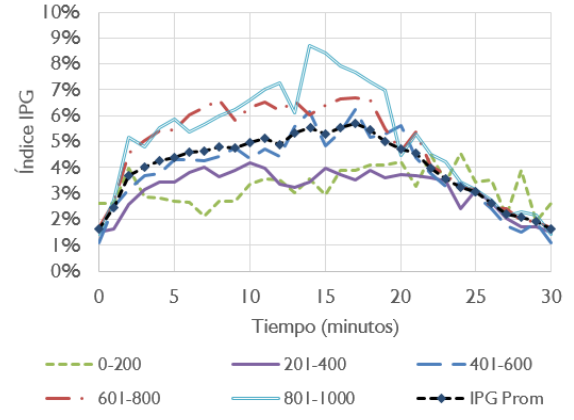
d. Índice DRT normalizado

Figura E.11. Índices características DRT y IPG para el régimen K.

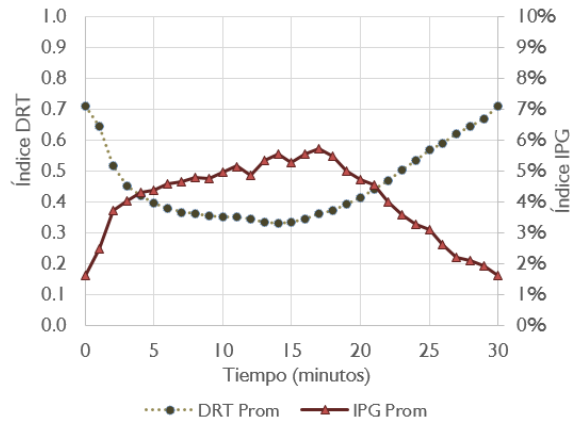
Régimen L



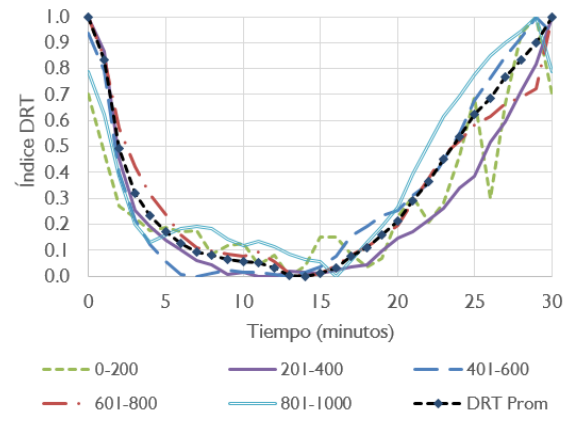
a. Índice DRT



b. Índice IPG



c. Índices promedio DRT y IPG



d. Índice DRT normalizado

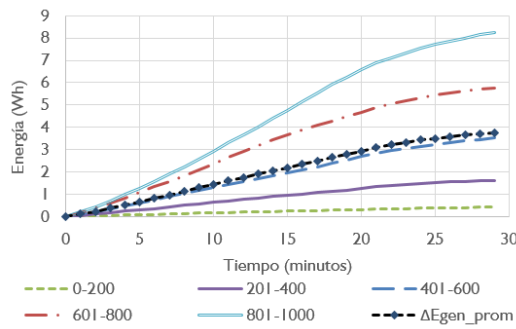
Figura E.12. Índices características DRT e IPG para el régimen L.

Anexo F. Curvas características de potencia y energía de cada régimen de irrigación

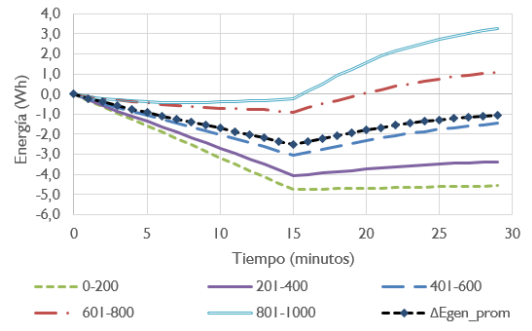
Este anexo contiene las curvas características de la energía adicional generada promedio y para diversos niveles de radiación solar considerando un intervalo de 30 minutos. También se incluyen las curvas DRT normalizadas determinadas como lo indica la expresión (E.1), con el fin de determinar si existe relación entre los transitorios de enfriamiento y calentamiento con el nivel de radiación solar.

- Energía adicional generada promedio y para diversos niveles de radiación solar
- Potencia adicional promedio para dos potencia de la bomba de irrigación (0 W y 20 W), la cual se determina según lo indicado en el numeral 8.1.2.
- Energía promedio adicional para diversos valores de potencia de la bomba de irrigación (0 W, 5 W, 10 W, 15 W, 20 W y 25 W).

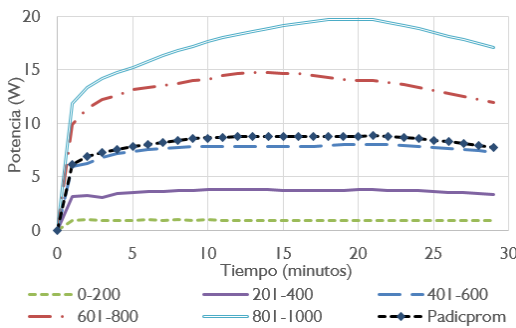
Régimen A



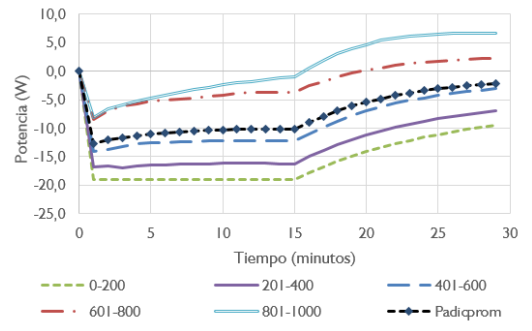
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



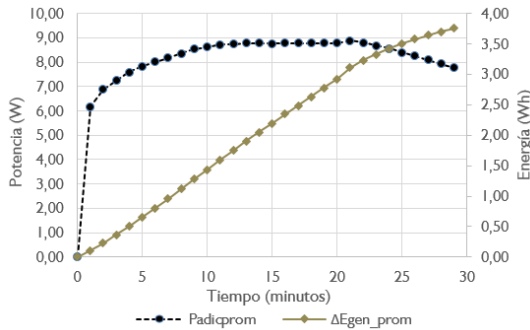
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



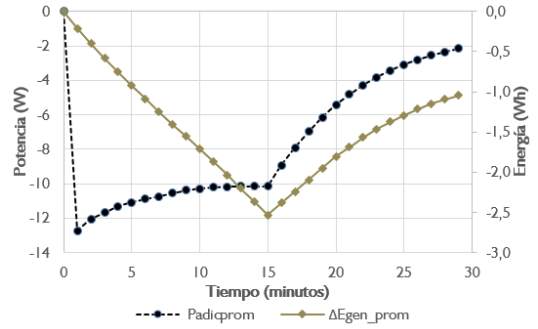
c. Padiq ($P_{bomba} = 0$ W)



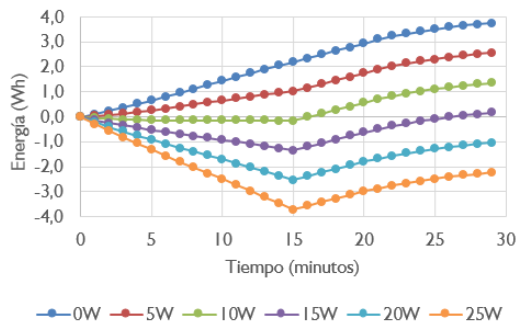
d. Padiq ($P_{bomba} = 20$ W)



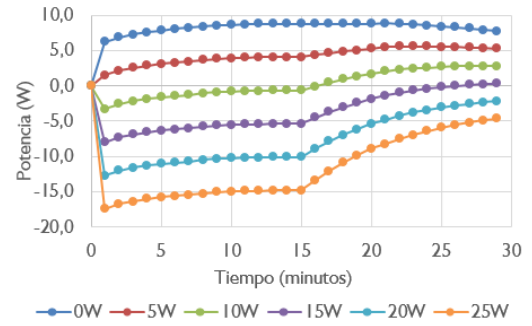
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y Padiq ($P_{bomba} = 0$ W)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y Padiq ($P_{bomba} = 20$ W)



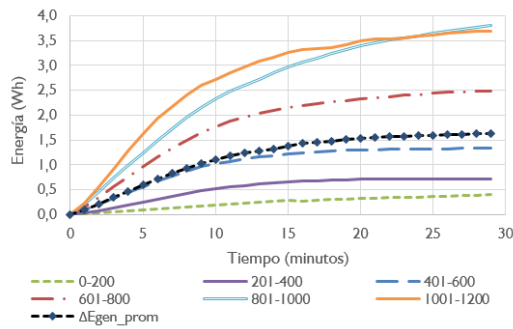
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



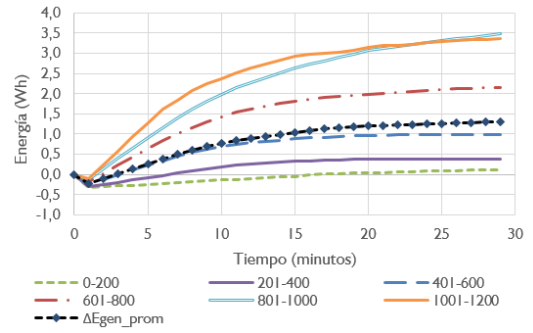
h. Curvas promedio de Padiq para valores de P_{bomba}

Figura F. I. Curvas características de ΔE_{gen} y Padiq del régimen A para ventana de tiempo de 30 minutos.

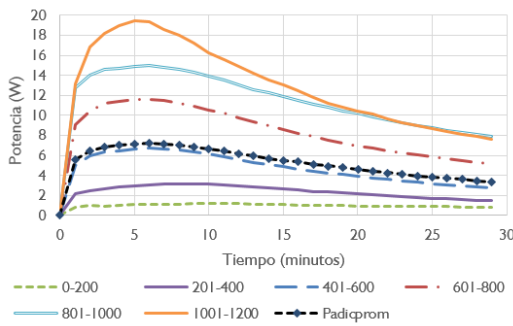
Régimen B



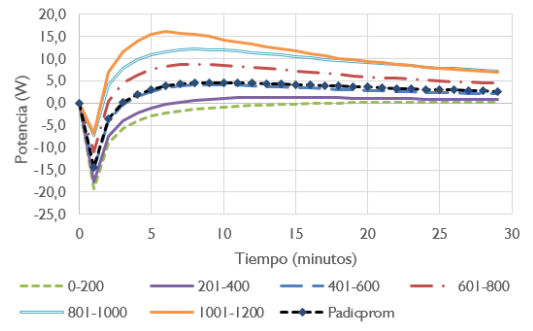
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



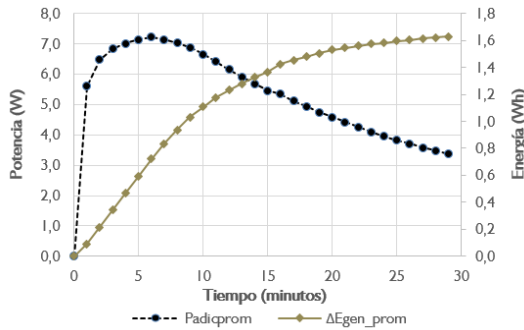
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



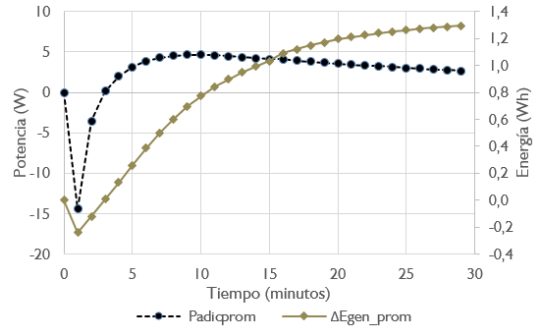
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



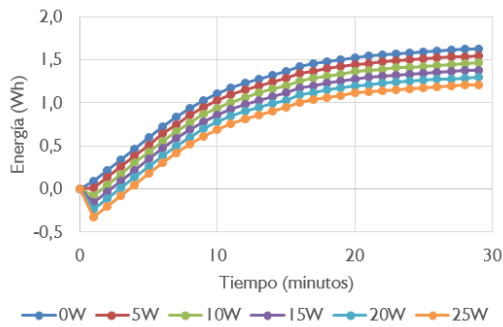
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



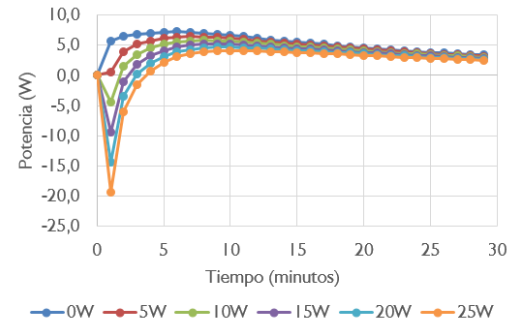
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



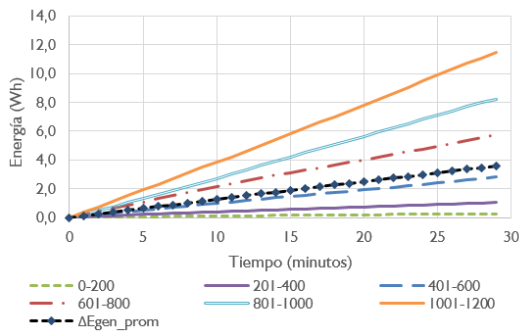
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



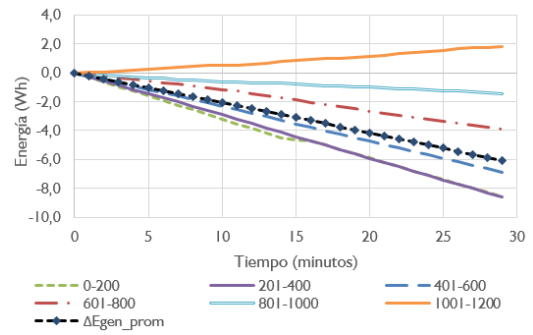
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.2. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen B para ventana de tiempo de 30 minutos.

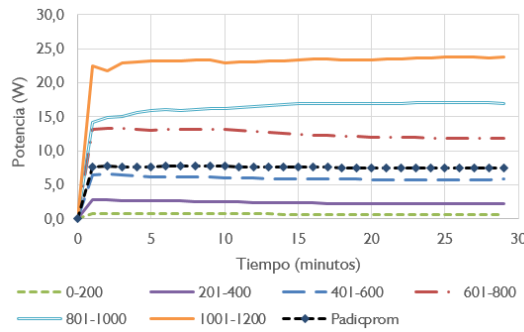
Régimen C



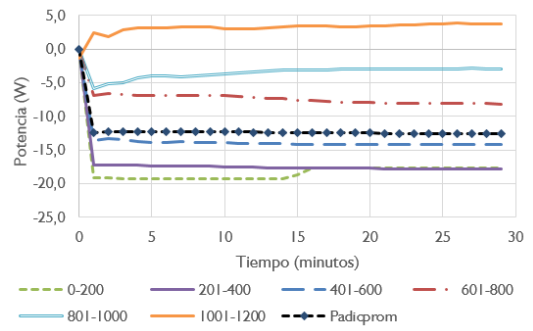
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



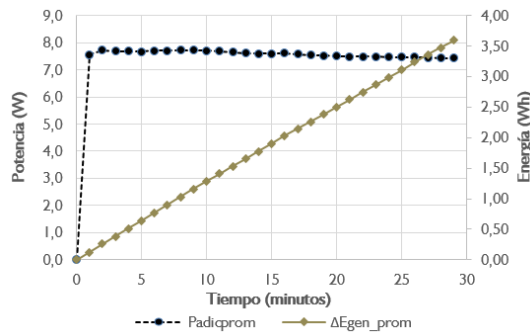
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



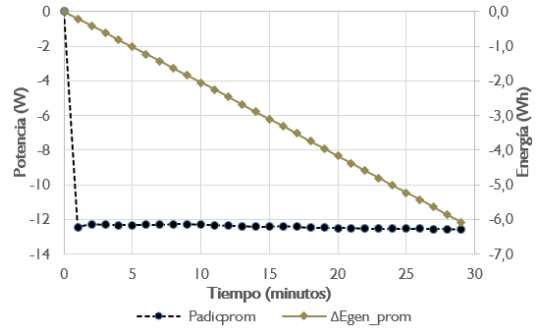
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



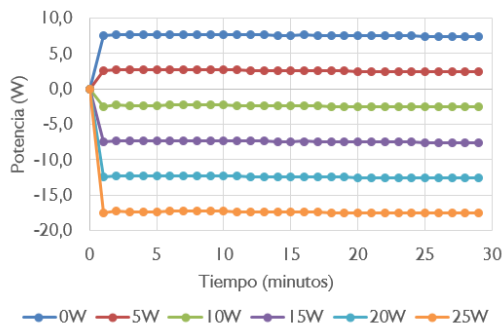
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



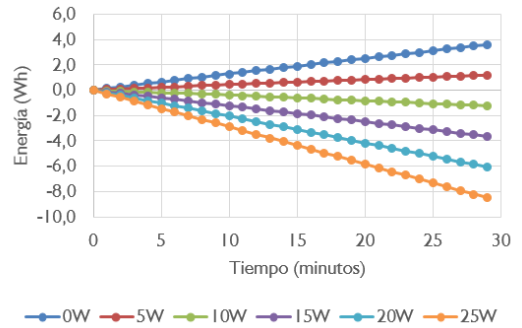
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



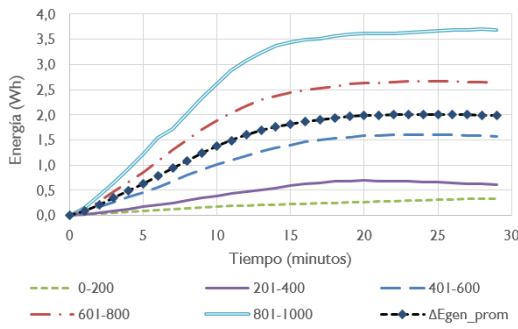
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



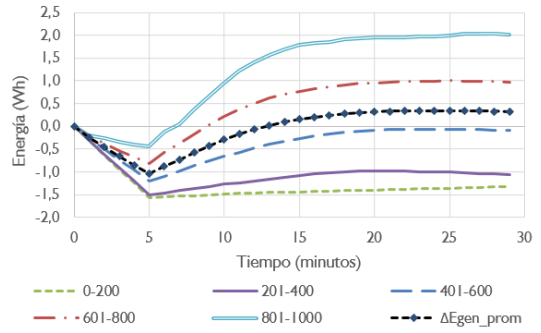
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.3. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen C para ventana de tiempo de 30 minutos.

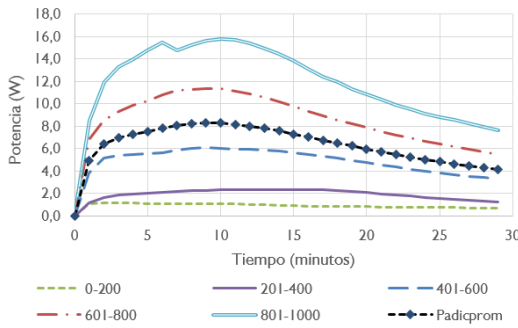
Régimen D



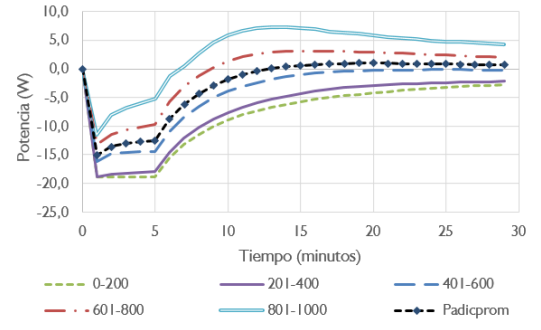
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



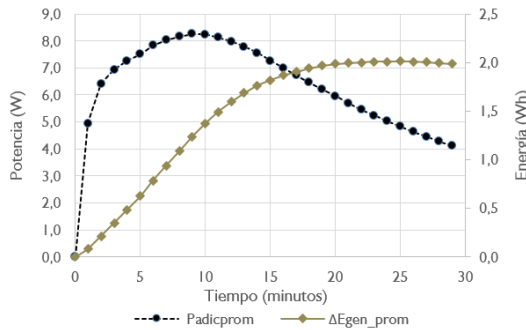
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



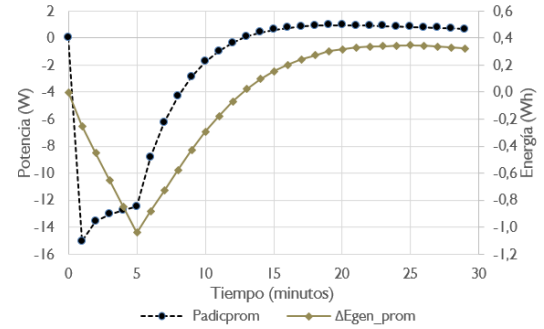
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



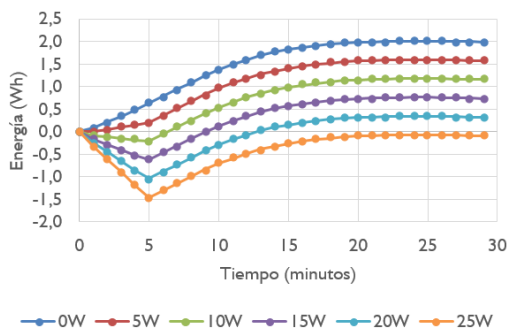
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



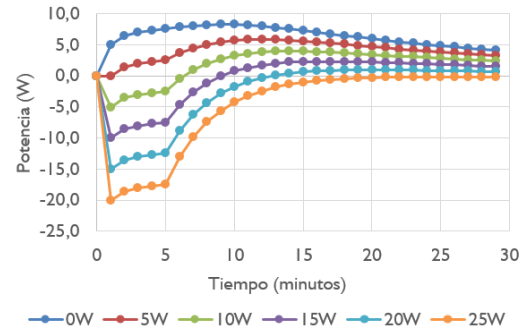
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



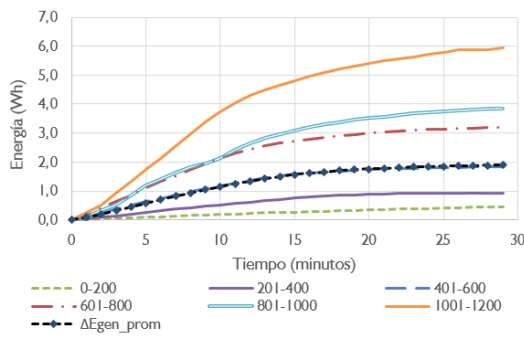
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



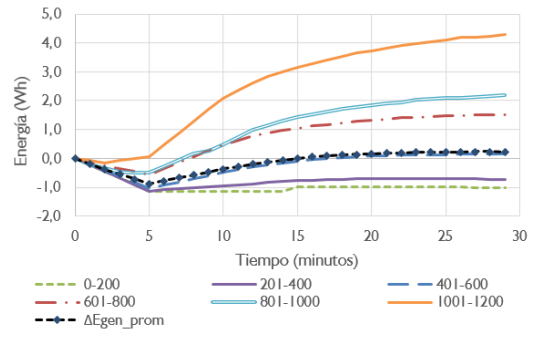
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.4. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen D para ventana de tiempo de 30 minutos.

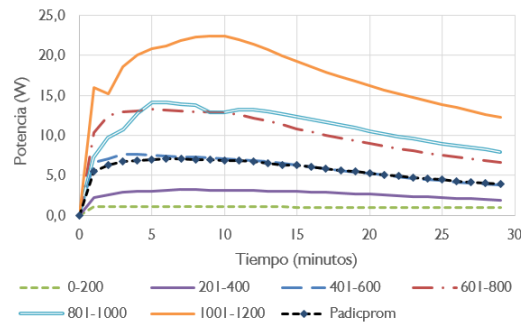
Régimen E



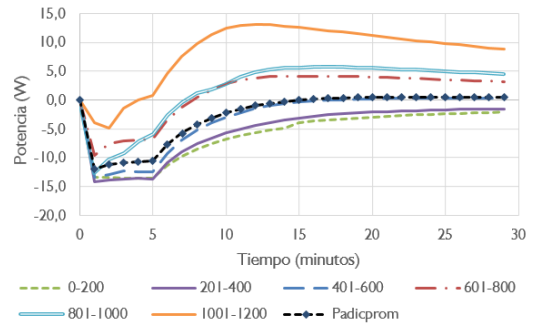
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



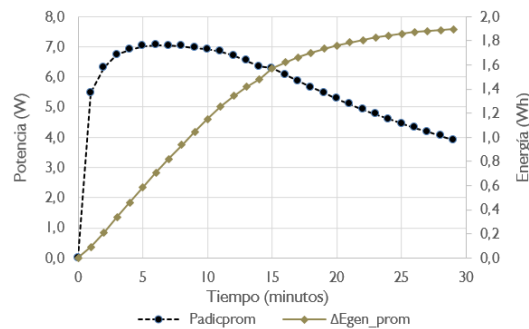
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



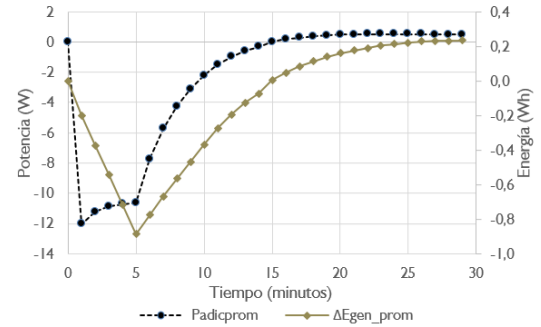
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



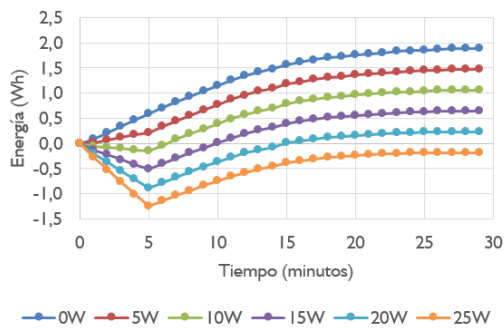
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



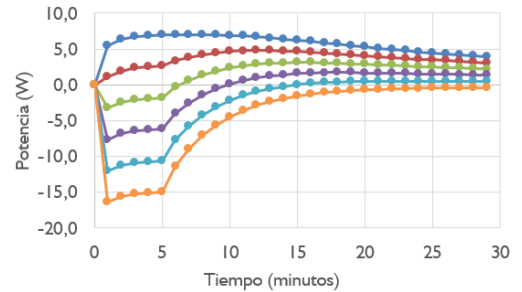
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



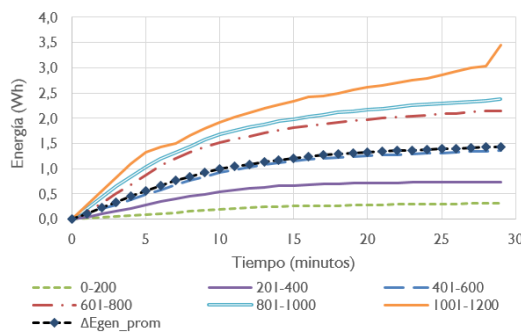
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



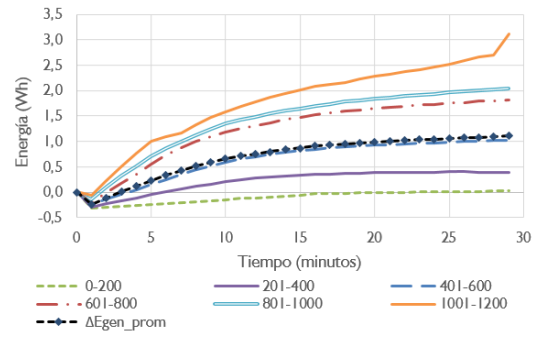
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.5. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen E para ventana de tiempo de 30 minutos.

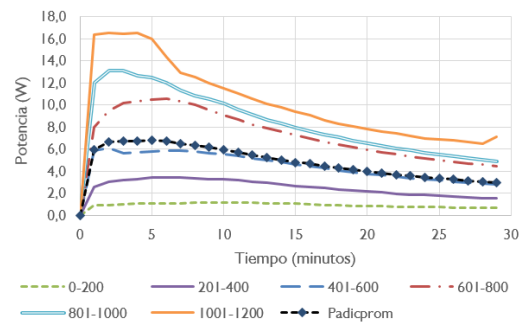
Régimen F



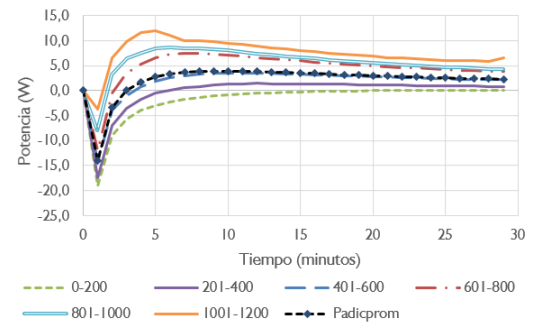
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



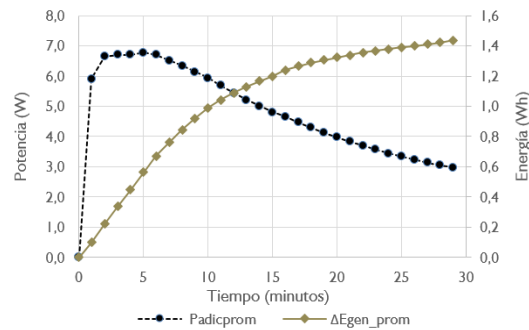
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



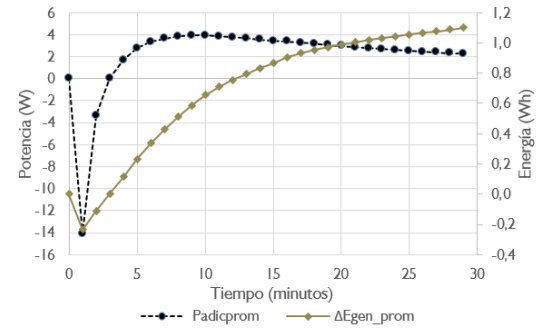
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



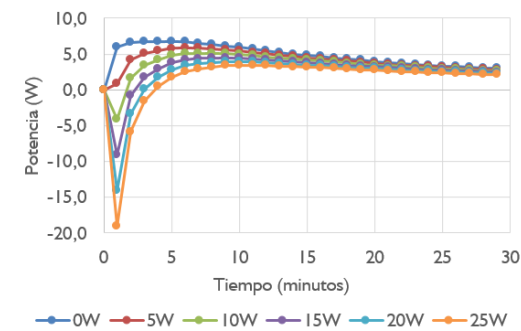
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



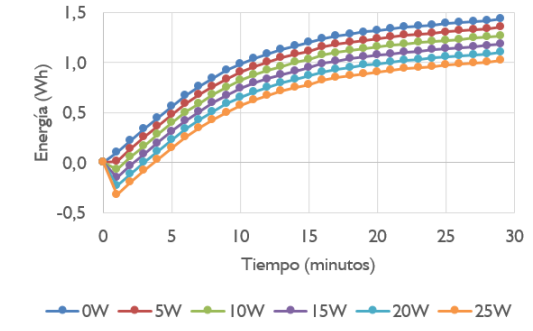
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



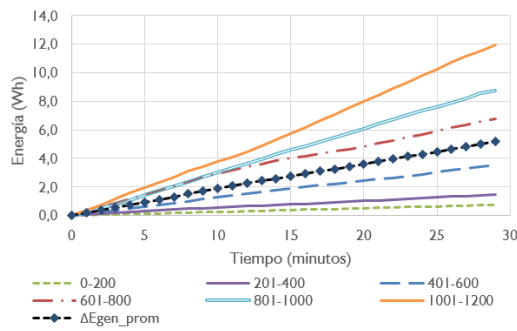
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



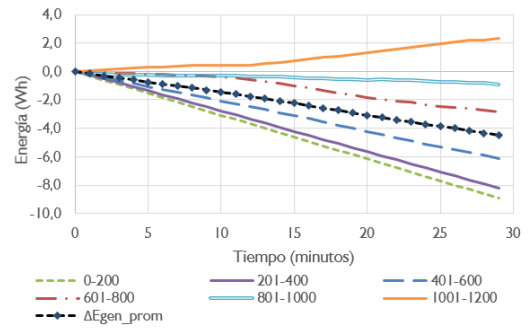
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.6. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen F para ventana de tiempo de 30 minutos.

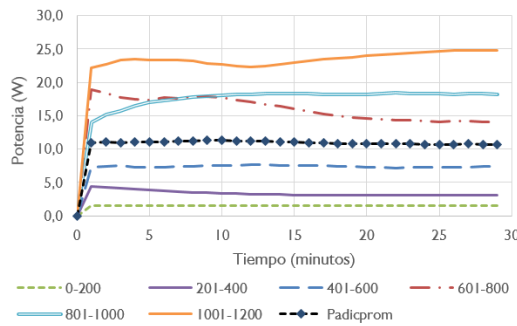
Régimen G



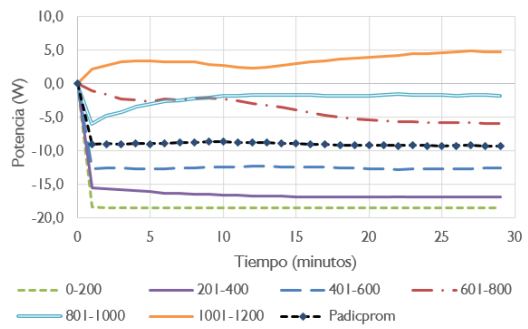
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



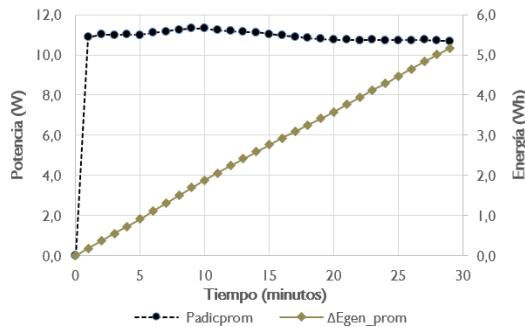
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



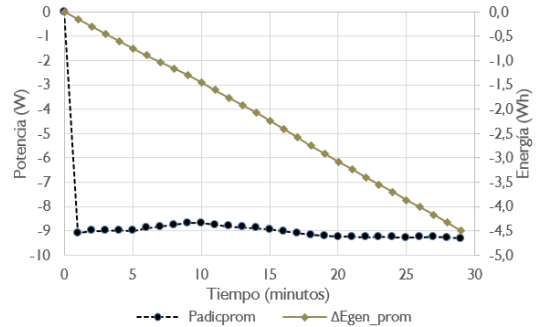
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



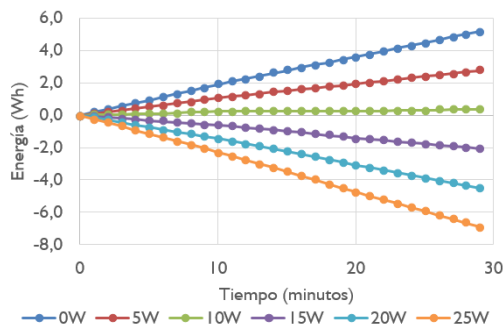
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



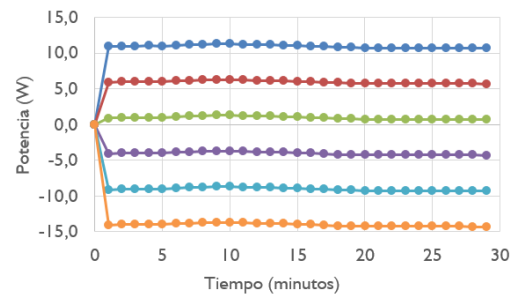
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



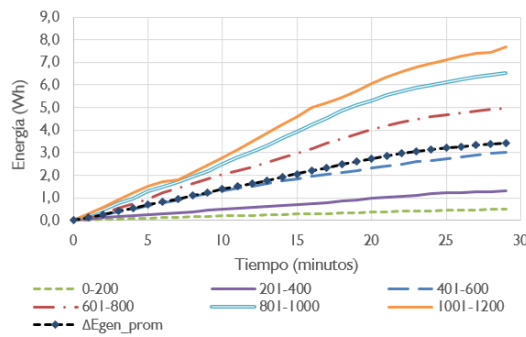
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



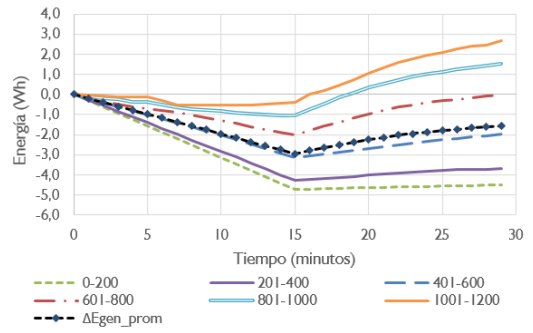
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.7. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen G para ventana de tiempo de 30 minutos.

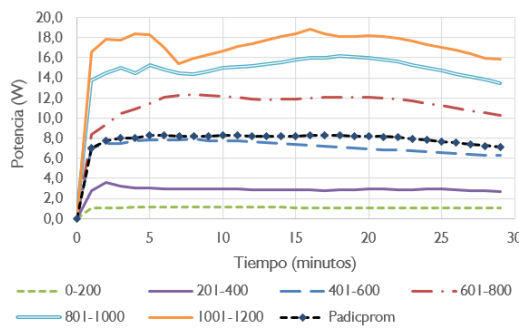
Régimen H



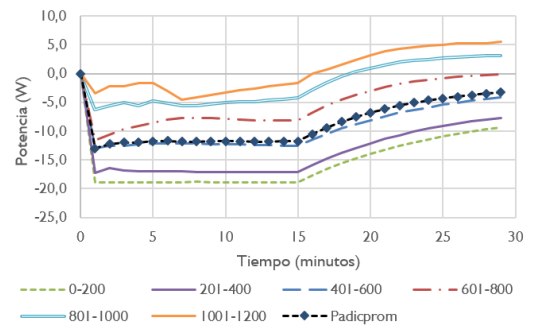
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



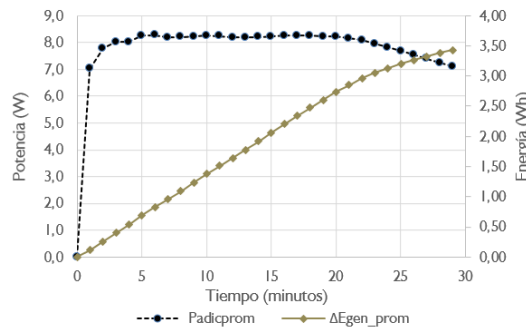
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



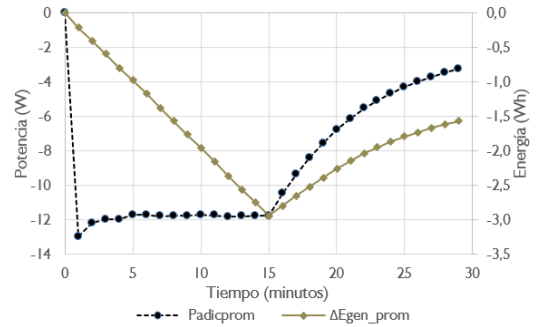
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



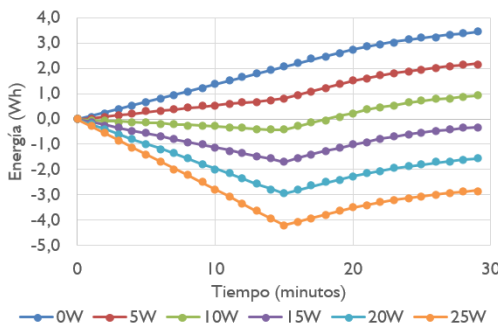
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



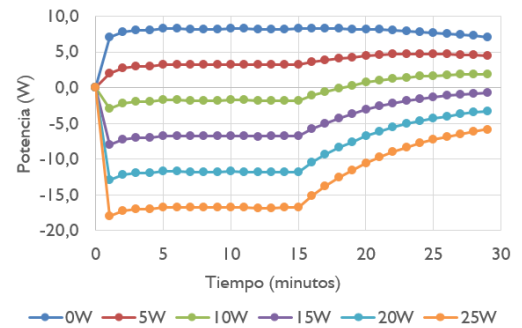
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



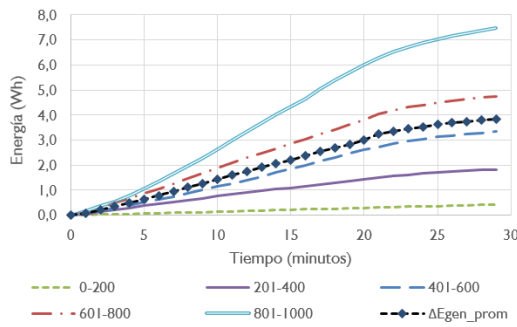
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



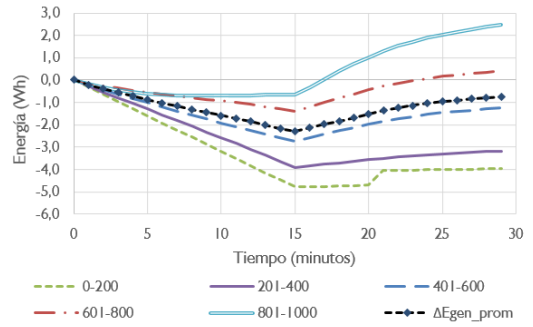
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.8. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen H para ventana de tiempo de 30 minutos.

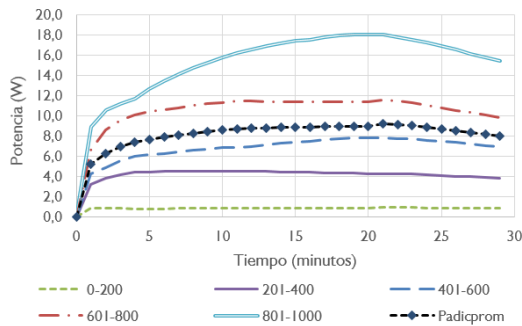
Régimen I



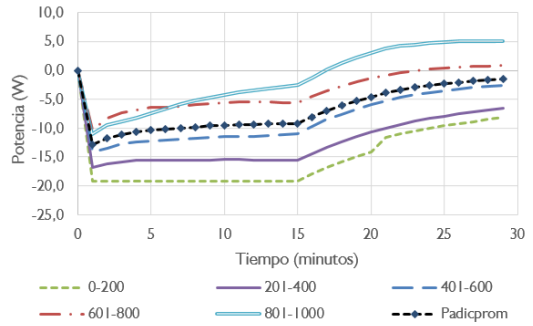
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



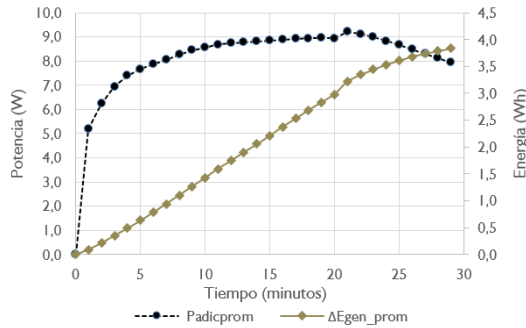
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



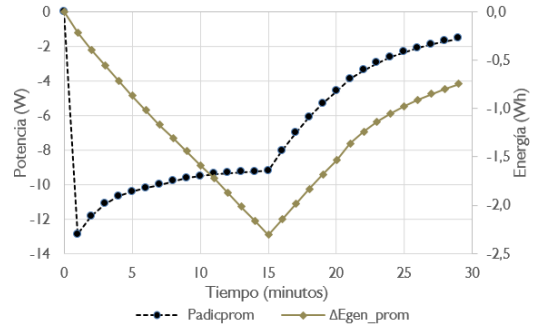
c. Padiç ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



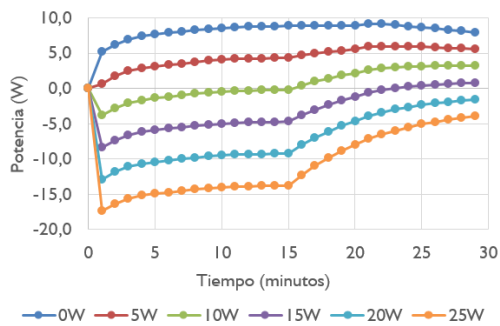
d. Padiç ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



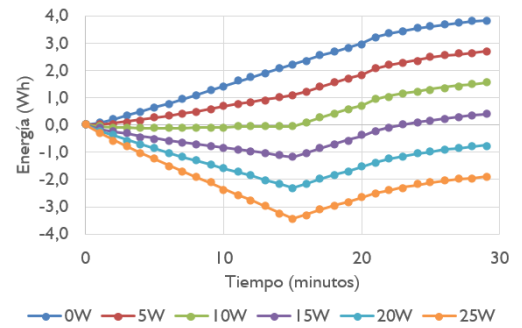
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y Padiç ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y Padiç ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



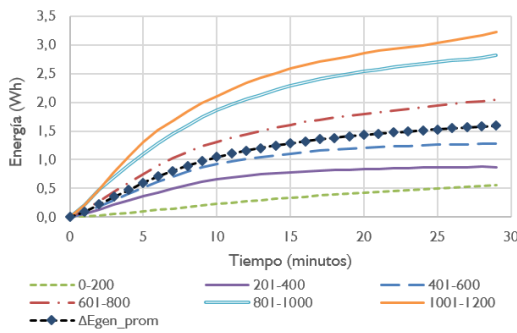
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



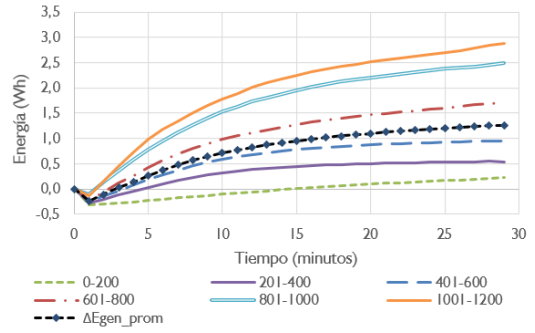
h. Curvas promedio de Padiç para valores de P_{bomba}

Figura F.9. Curvas características de ΔE_{gen} y Padiç del régimen I para ventana de tiempo de 30 minutos.

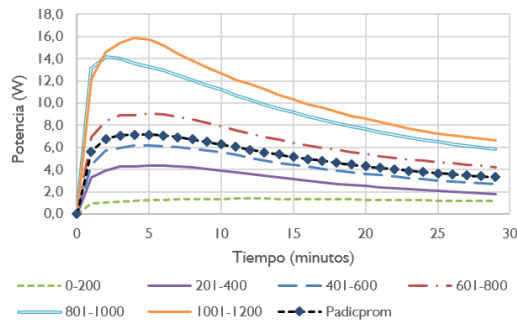
Régimen J



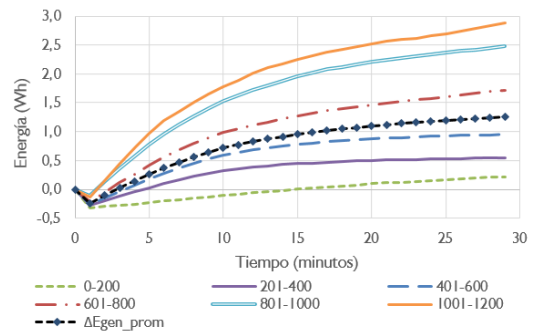
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



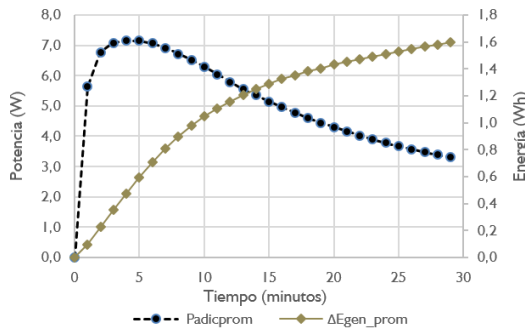
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



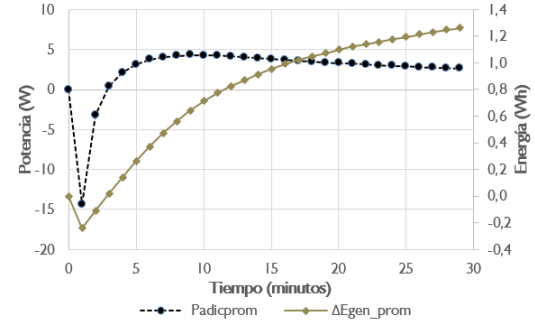
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



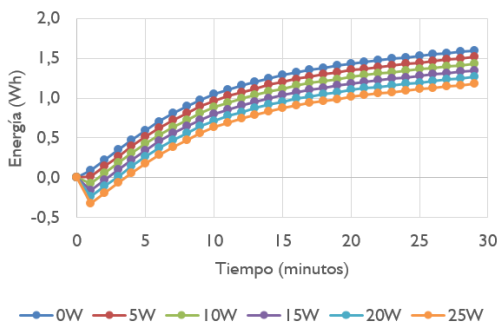
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



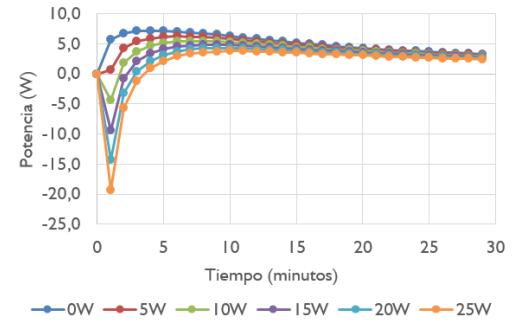
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0$ W)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20$ W)



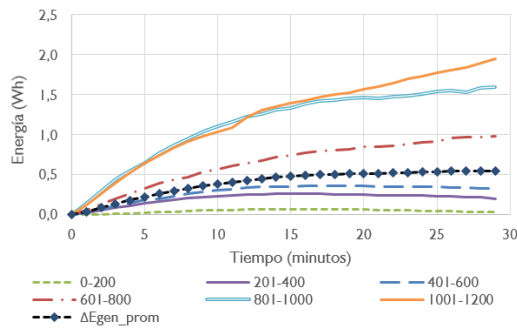
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



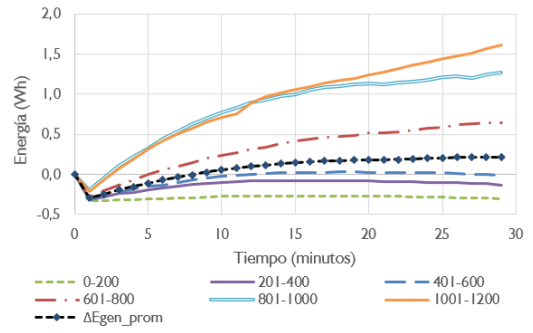
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.10. Curvas características de ΔE_{genic} y P_{adic} del régimen J para ventana de tiempo de 30 minutos.

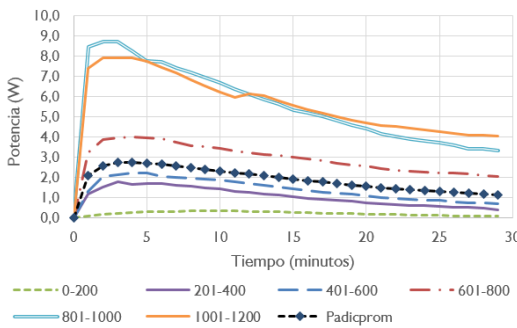
Régimen K



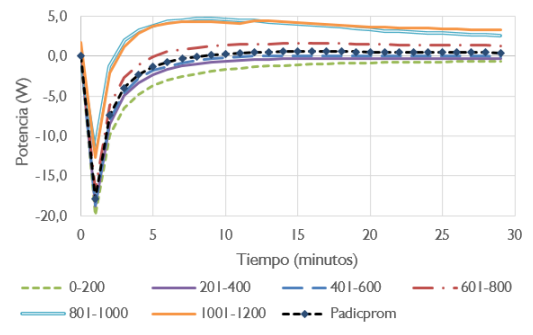
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



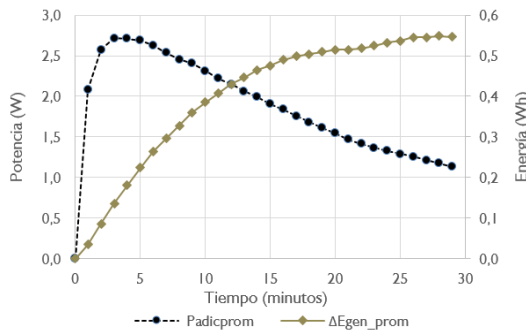
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



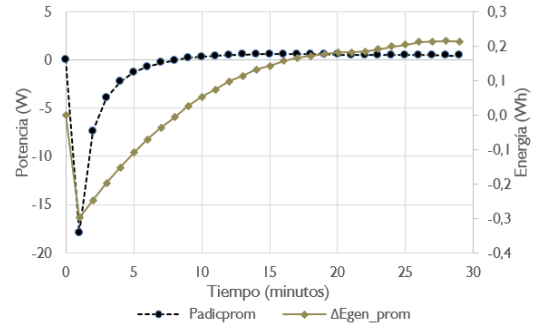
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



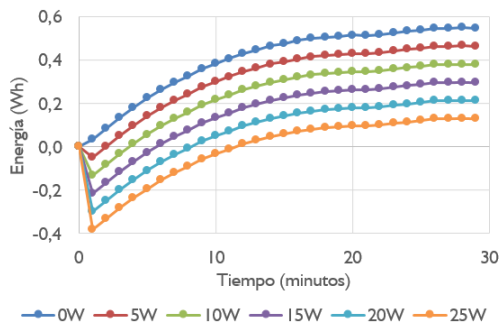
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



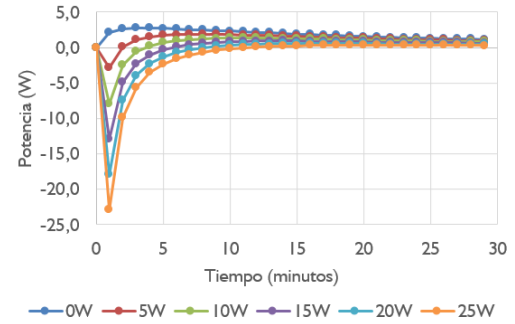
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0\text{ W}$)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20\text{ W}$)



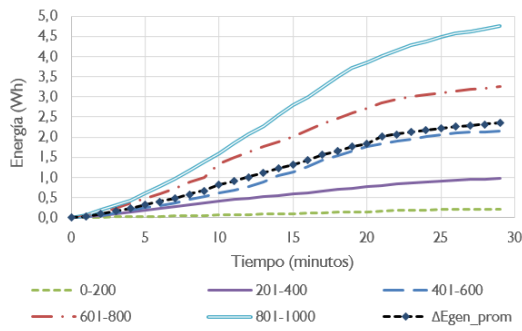
g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}



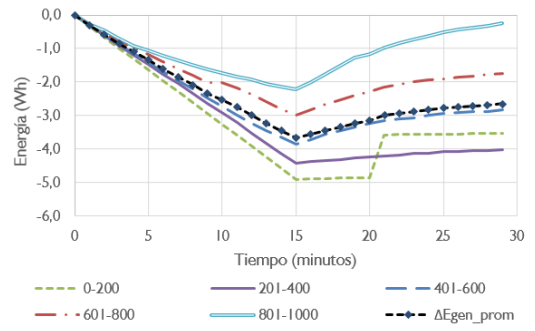
h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

Figura F.11. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen K para ventana de tiempo de 30 minutos.

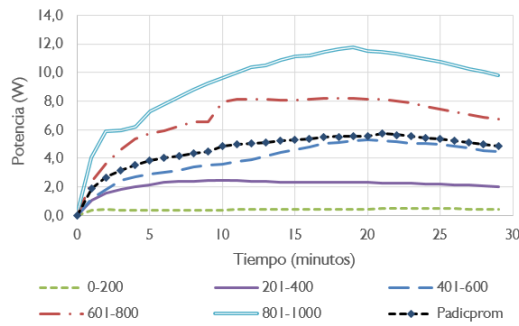
Régimen L



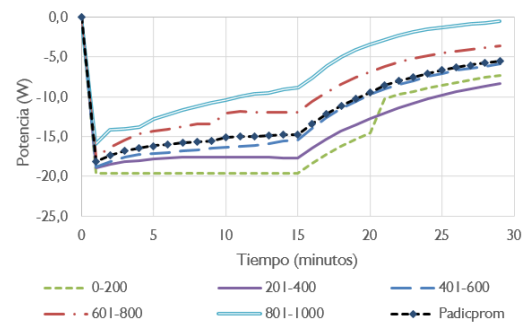
a. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



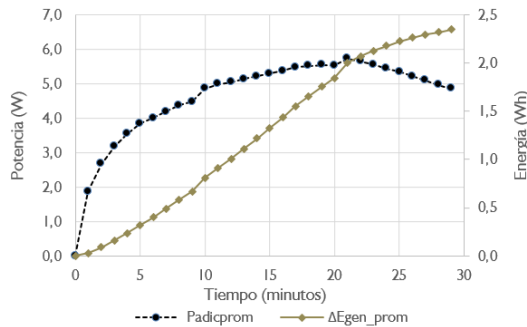
b. ΔE_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



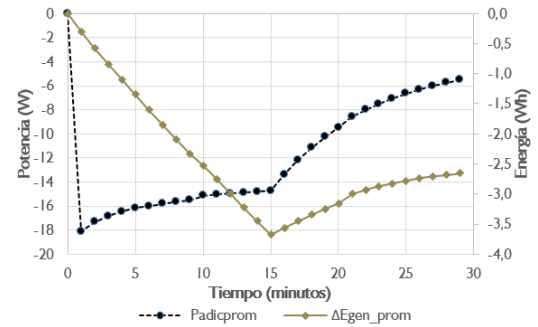
c. P_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



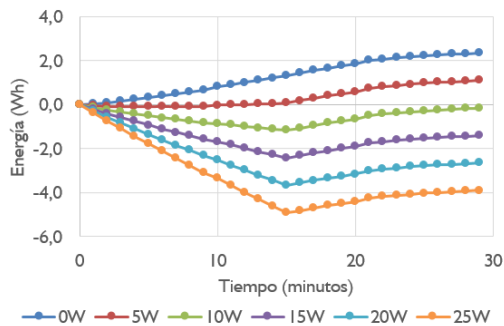
d. P_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



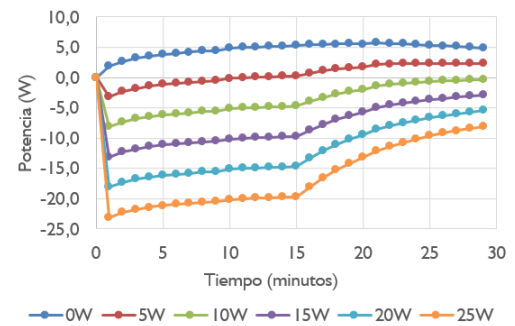
e. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 0 \text{ W}$)



f. Curvas promedio de ΔE_{adic} y P_{adic} ($P_{bomba} = 20 \text{ W}$)



g. Curvas promedio de ΔE_{adic} para valores de P_{bomba}

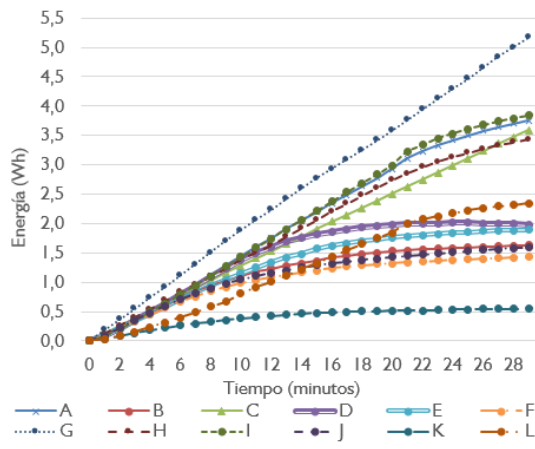


h. Curvas promedio de P_{adic} para valores de P_{bomba}

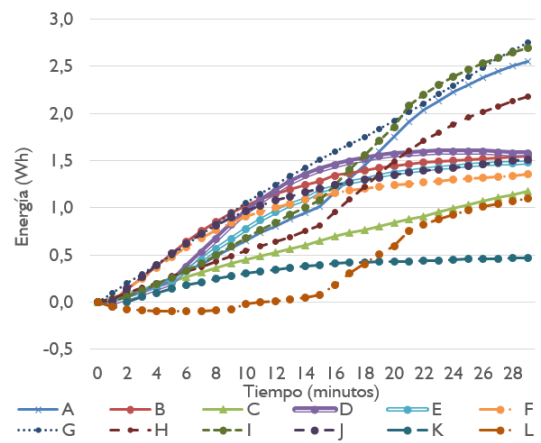
Figura F.12. Curvas características de ΔE_{gen} y P_{adic} del régimen L para ventana de tiempo de 30 minutos.

Anexo G. Curvas características de la energía generada por régimen según la potencia de bomba de irrigación

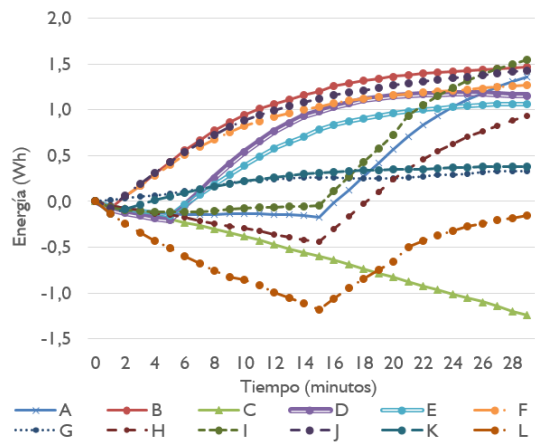
Este anexo contiene las curvas características de la energía adicional generada promedio estimada por intervalo (30 minutos y diaria) y las curvas de energía adicional generada según la radiación solar por intervalo (30 minutos).



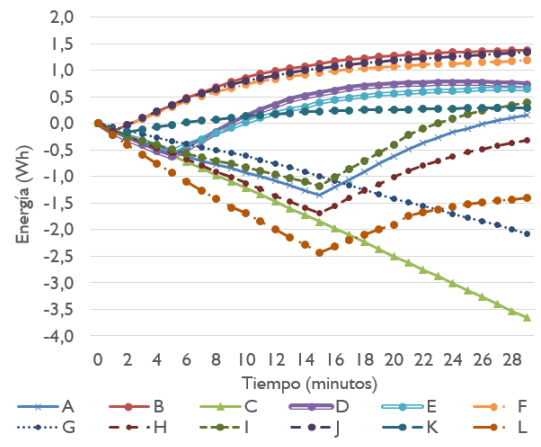
a. Caso Pbomba = 0 W



b. Caso Pbomba = 5 W



c. Caso Pbomba = 10 W



c. Caso Pbomba = 15 W

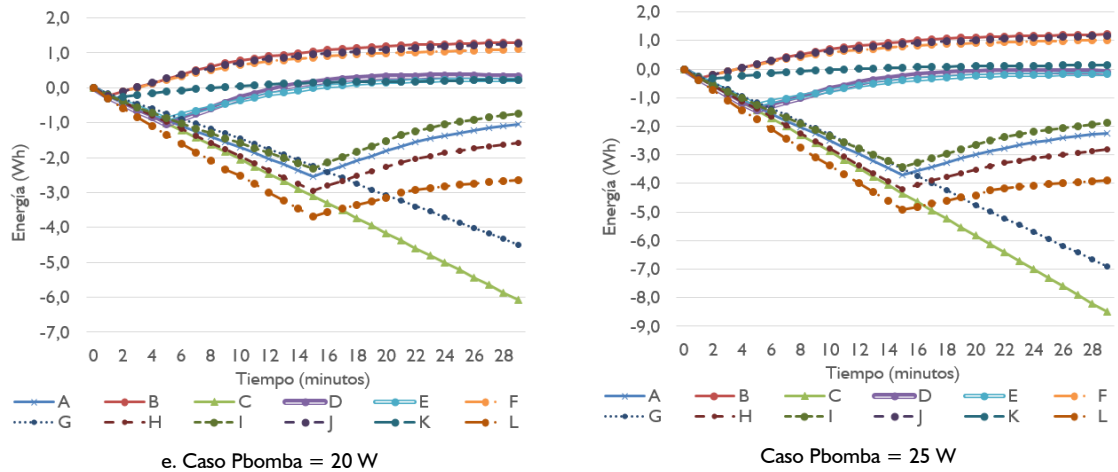
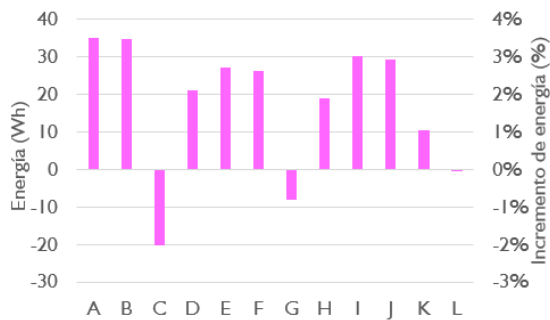
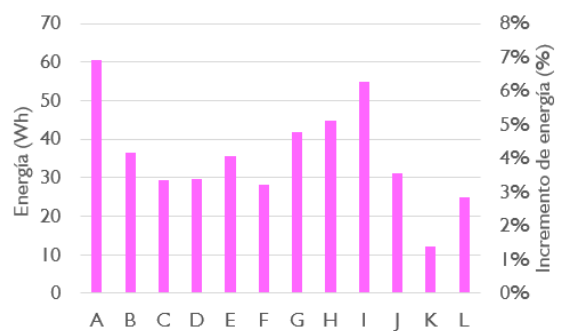
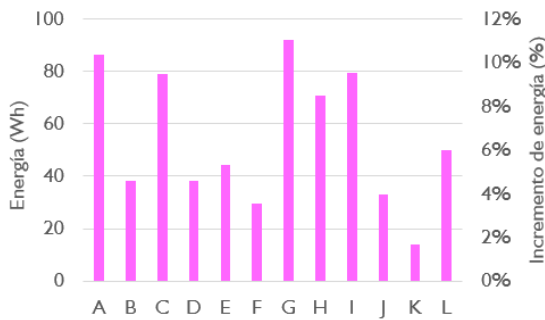
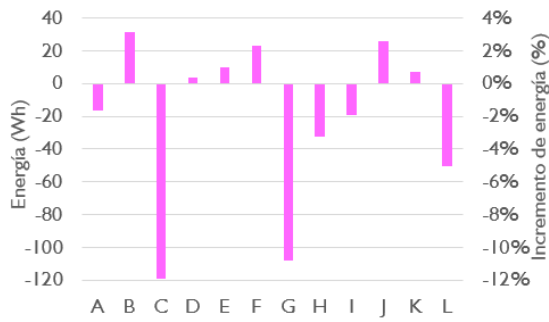
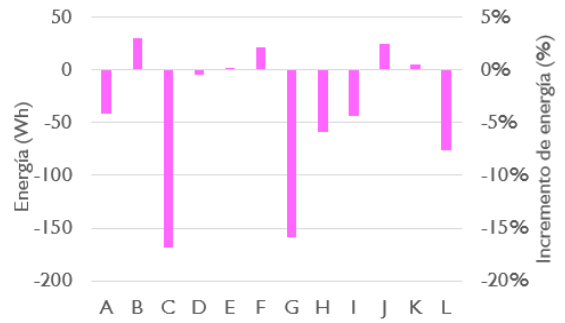


Figura G.1. Curvas características de ΔE_{gen} promedio por intervalo de 30 minutos según la potencia de la bomba.



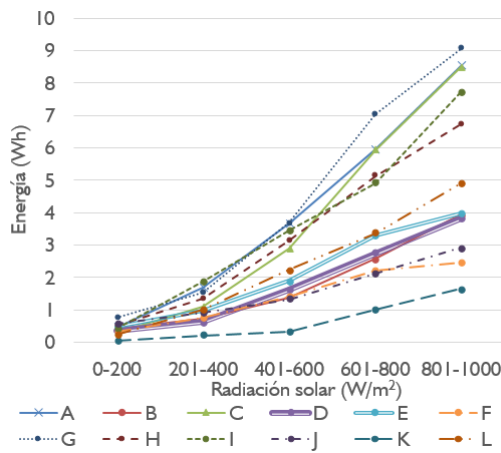


e. Caso Pbomba = 20 W

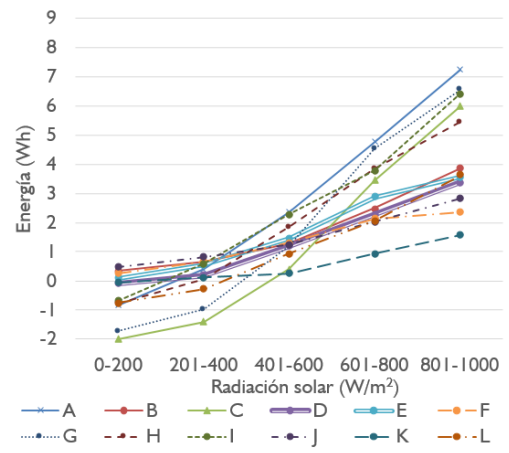


Caso Pbomba = 25 W

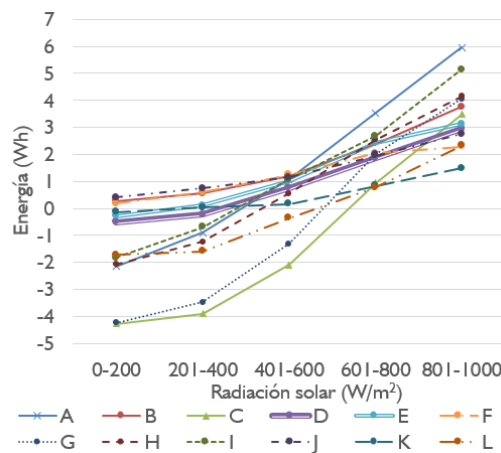
Figura G.2. Energía adicional generada por día (estimación) según la potencia de la bomba de irrigación.



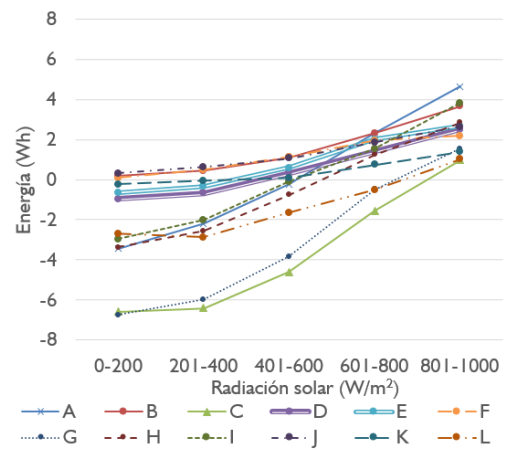
a. $\Delta E_{gen} - P_{bomba} = 0 W$



b. $\Delta E_{gen} - P_{bomba} = 5 W$



c. $\Delta E_{gen} - P_{bomba} = 10 W$



d. $\Delta E_{gen} - P_{bomba} = 15 W$

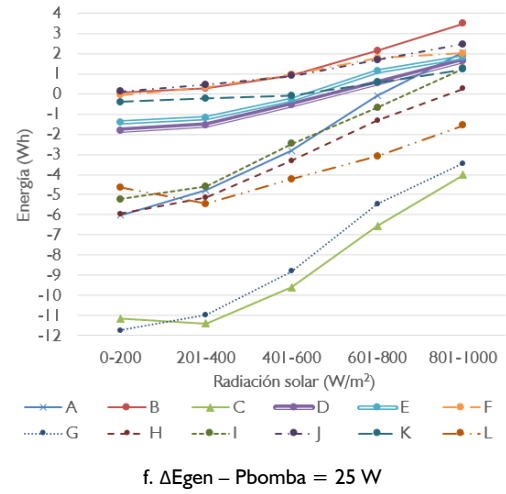
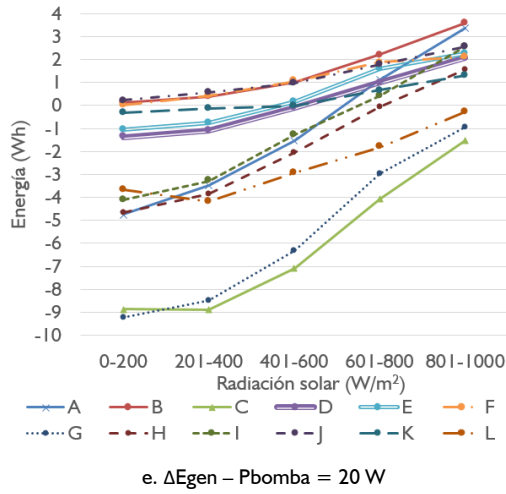


Figura G.3. Energía adicional generada según la radiación solar de acuerdo a la potencia de la bomba.

Anexo H. Flujos de calor asociados con el comportamiento térmico del panel FV

Este anexo contiene las curvas de los flujos de calor para un panel FV de 255 watts asociadas al caso de estudio mostrado por las figuras 7.8 y 7.9. Las curvas fueron obtenidas por medio del modelo RC presentado en la Sección 6.2

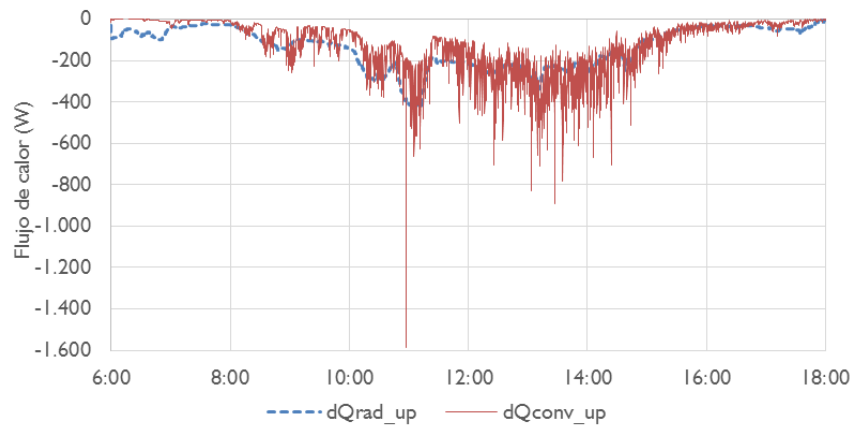


Figura H.1. Flujos de calor (pérdidas) de radiación y convección de ocurridos en la superficie frontal del panel FV.

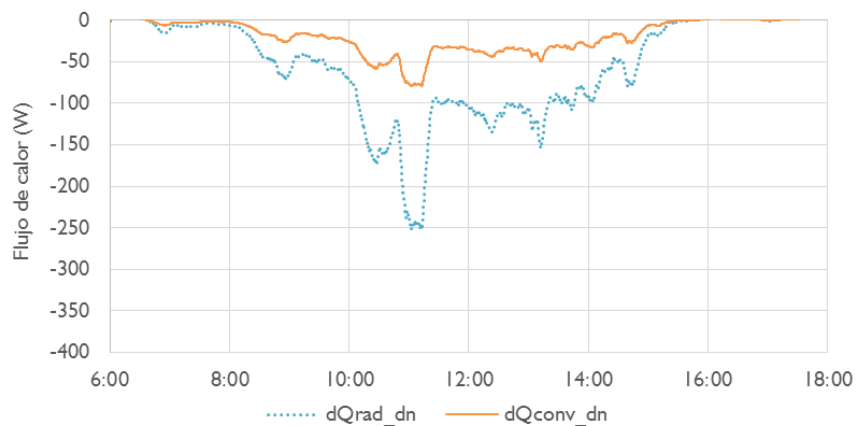


Figura H.2. Flujos de calor (pérdidas) de radiación y convección de ocurridos en la superficie posterior del panel FV.

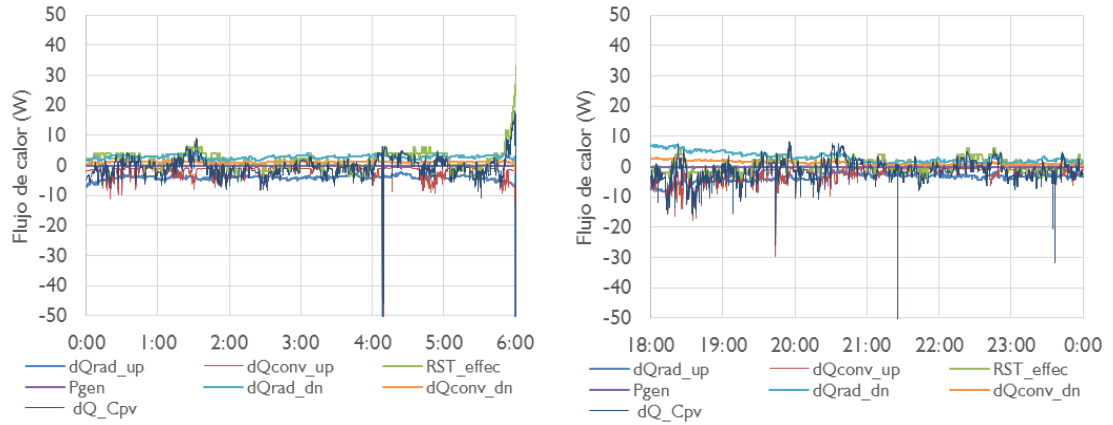


Figura H.3. Flujos de calor del panel FV ocurridos durante el tiempo de no radiación solar (6 p.m. a 6 a.m.).

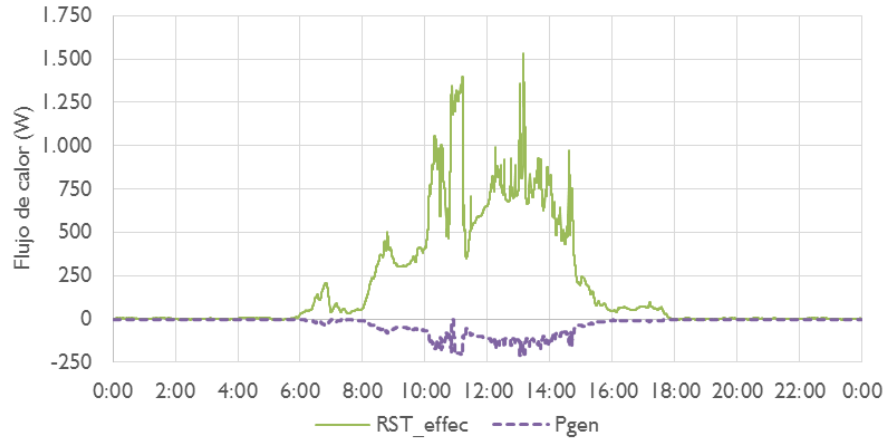


Figura H.4. Radiación solar absorbida y potencia eléctrica generada por el panel FV.

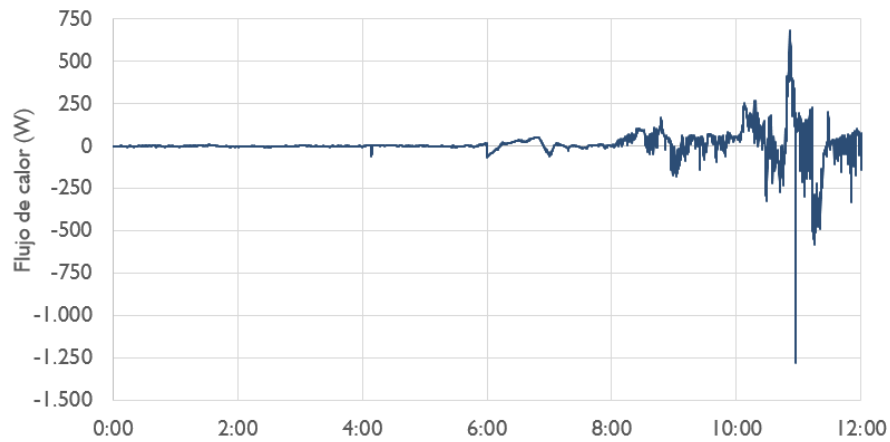


Figura H.5. Variación del calor almacenado por el panel FV de 12 a.m. a 12 p.m.

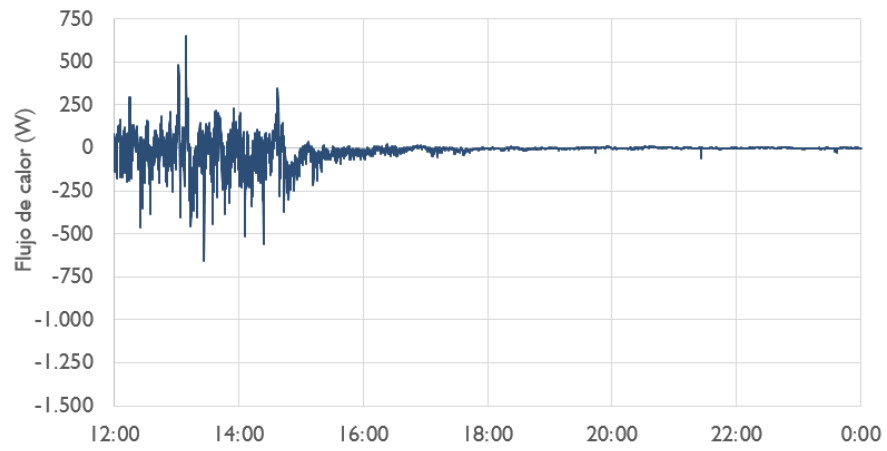


Figura H.6. Variación del calor almacenado por el panel FV de 12 p.m. a 12 a.m.

Anexo I. Solución analítica al circuito ideal de enfriamiento de un panel FV

Este anexo presenta la solución analítica de la representación circuital del enfriamiento de un panel FV a partir de la irrigación. El circuito es mostrado en la Figura 71 y sólo considera la interacción con el agua de enfriamiento, por lo que quedan excluidos los efectos de la radiación solar y los procesos de transferencia de calor de radiación y convección.

$$-T_{PV} + i \cdot R_{rg} + T_{tq} = 0 \quad (1.1)$$

$$i = -i_{PV} = i_{tq} \quad (1.2)$$

$$T_{PV} = T_{PV_{forz}} + \frac{1}{C_{PV}} \int i_{PV} dt \quad (1.3)$$

$$T_{tq} = T_{tq_{forz}} + \frac{1}{C_{tq}} \int i_{tq} dt \quad (1.4)$$

Dado que se asume que $T_{PV_{forz}}$ es igual $T_{tq_{forz}}$, entonces

$$T_{tq} = T_{tq_{forz}} + \frac{1}{C_{tq}} \int i_{tq} dt \quad (1.5)$$

$$T_{tq} = T_{tq_{forz}} + \frac{1}{C_{tq}} \int i_{tq} dt \quad (1.6)$$

$$-\frac{1}{C_{PV}} \int i_{PV} dt + i \cdot R_{rg} + \frac{1}{C_{tq}} \int i_{tq} dt = 0 \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{C_{PV}} \int i dt + i \cdot R_{rg} + \frac{1}{C_{tq}} \int i dt = 0 \quad (1.8)$$

$$i \cdot R_{rg} + \left(\frac{1}{C_{PV}} + \frac{1}{C_{tq}} \right) \int i dt = 0 \quad (1.9)$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_{PV}} + \frac{1}{C_{tq}} \quad (1.10)$$

$$i = -\frac{1}{R_{rg} \cdot C_{eq}} \int i dt \quad (1.11)$$

$$\tau_{enf} = R_{rg} \cdot C_{eq} \quad (1.12)$$

$$i = B \cdot e^{-t/\tau_{eq}} \quad (1.13)$$

Al inicio de la irrigación, el panel FV y el agua del tanque tienen temperaturas iniciales $T_{PV}(0)$ y $T_{tq}(0)$, respectivamente.

Para $t=0$

$$i(0) = B = \frac{T_{PV}(0) - T_{tq}(0)}{R_{rg}} \quad (1.14)$$

$$T_{PV} = T_{PV_{forz}} + \frac{1}{C_{PV}} \int (-B \cdot e^{-t/\tau_{eq}}) dt = T_{PV_{forz}} + \frac{B \cdot \tau_{eq}}{C_{PV}} e^{-t/\tau_{eq}} \quad (1.15)$$

$$T_{tq} = T_{tq_{forz}} + \frac{1}{C_{tq}} \int (B \cdot e^{-t/\tau_{eq}}) dt = T_{tq_{forz}} - \frac{B \cdot \tau_{eq}}{C_{tq}} e^{-t/\tau_{eq}} \quad (1.16)$$

Se evalúa cualquiera de las expresiones para hallar los valores forzados de temperatura, a partir de un análisis en t igual a cero. Reemplazando los valores de B y τ_{eq} .

$$T_{PV}(0) = T_{PV_{forz}} + \frac{B \cdot \tau_{eq}}{C_{PV}} = T_{PV_{forz}} + \frac{(T_{PV}(0) - T_{tq}(0)) \cdot C_{eq}}{C_{PV}} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} T_{PV_{forz}} &= T_{PV}(0) - \frac{C_{eq}}{C_{PV}} (T_{PV}(0) - T_{tq}(0)) = T_{tq_{forz}} \\ &= T_{tq}(0) - \frac{C_{eq}}{C_{PV}} (T_{tq}(0) - T_{PV}(0)) \end{aligned} \quad (1.18)$$

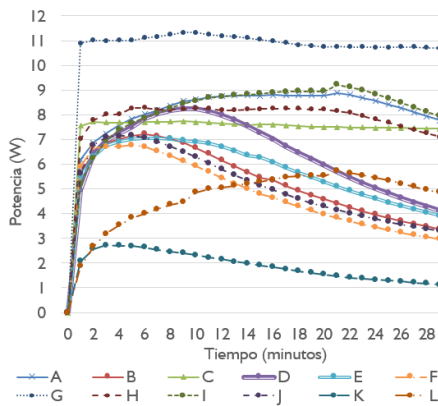
Las expresiones (1.19) y (1.20) presentan las expresiones para determinar la descarga y la carga térmica del panel FV y el agua de irrigación, respectivamente.

$$T_{PV}(t) = T_{PV_{forz}} + \frac{B \cdot \tau_{eq}}{C_{PV}} e^{-t/\tau_{eq}} \quad (1.19)$$

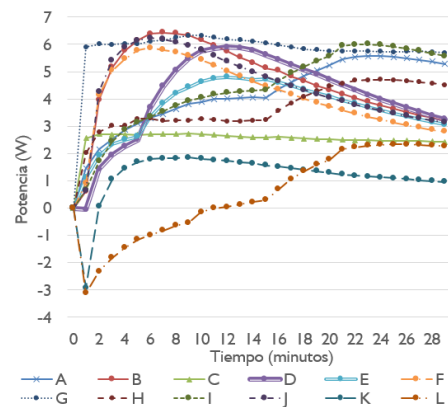
$$T_{tq}(t) = T_{tq_{forz}} - \frac{B \cdot \tau_{eq}}{C_{tq}} e^{-t/\tau_{eq}} \quad (1.20)$$

Anexo J. Curvas características de las variaciones de P_{p_adic} , $P_{pm\acute{a}x}$ y $t_{bm\acute{a}x}$ para cada régimen de irrigación

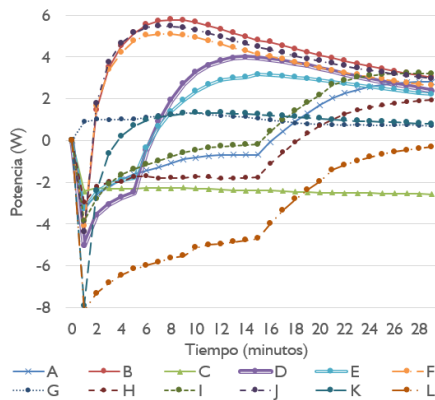
Este anexo contiene las curvas características de cada régimen de la potencia promedio adicional de acuerdo a la potencia de la bomba y de la variación de la potencia promedio adicional máxima y el tiempo de beneficio energético máximo según la radiación solar de acuerdo a la potencia de la bomba.



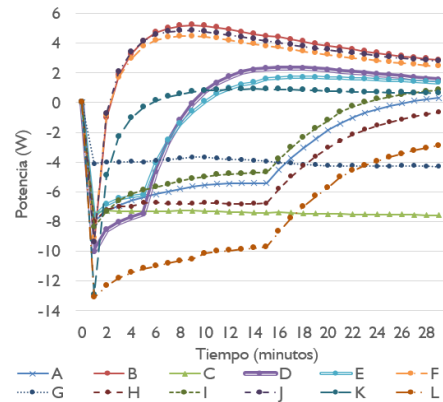
a. Caso Pbomba = 0 W



b. Caso Pbomba = 5 W



c. Caso Pbomba = 10 W



c. Caso Pbomba = 15 W

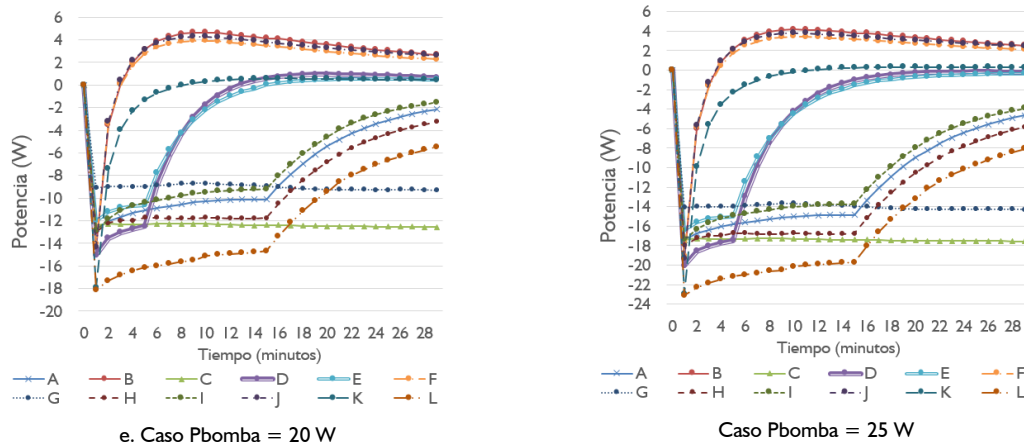
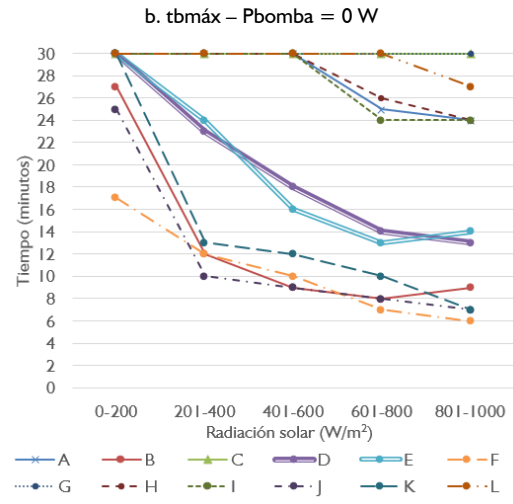
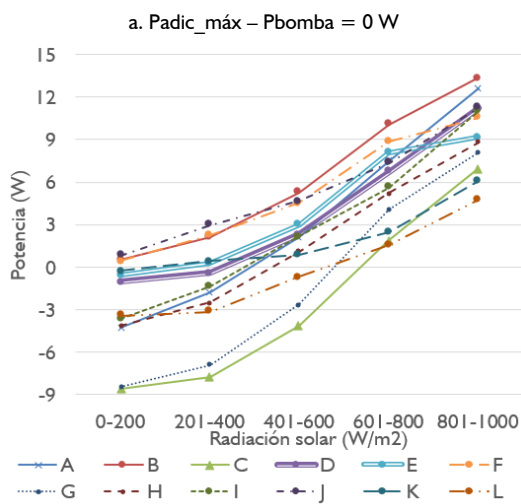
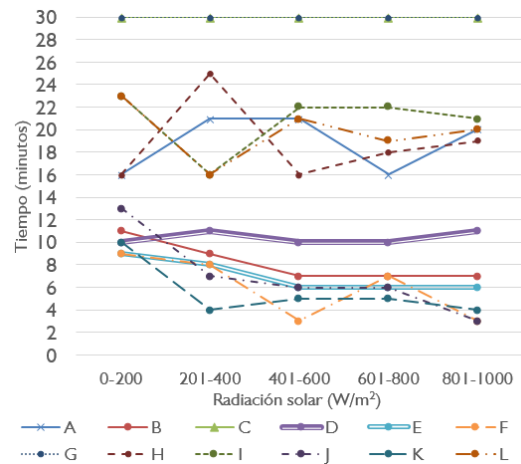
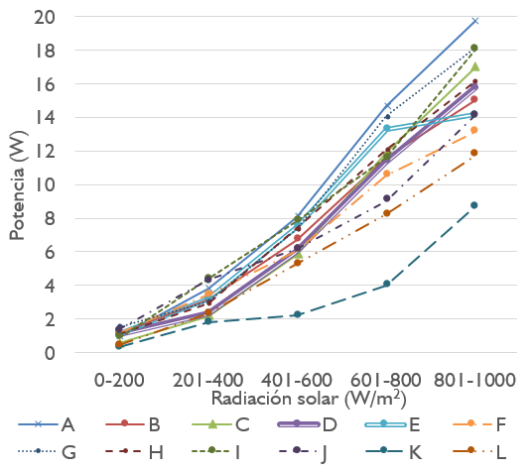


Figura J.1. Curvas de la potencia promedio adicional de acuerdo a la potencia de la bomba.



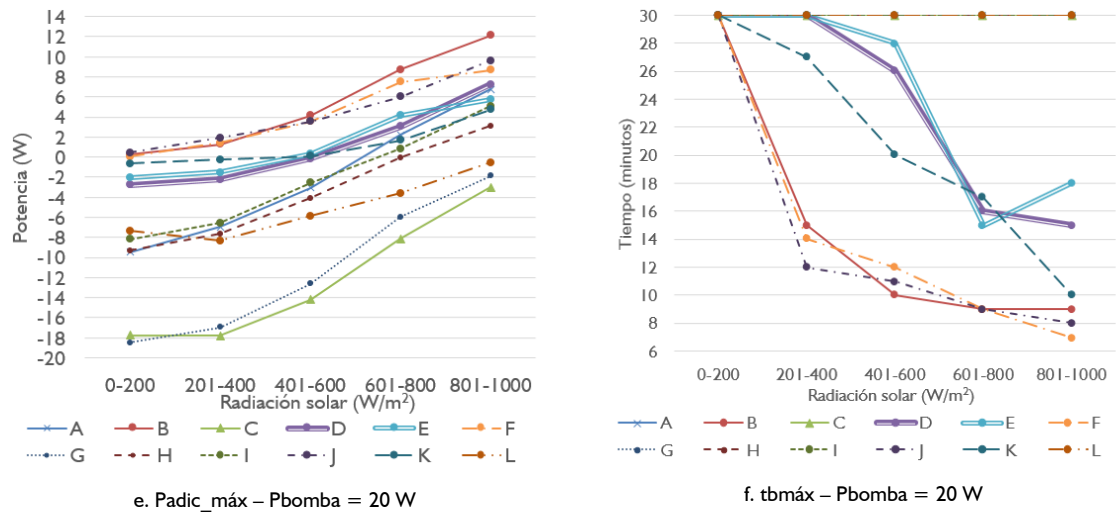


Figura J.2. Variación de la potencia promedio adicional máxima y el tiempo de beneficio energético máximo según la radiación solar de acuerdo a la potencia de la bomba.