

**IMPACTO DE DOS ESTRATEGIAS DE IRRIGACIÓN EN LA POTENCIA
GENERADA Y LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE UN PANEL
FOTOVOLTAICO UPSOLAR 250W INSTALADO SOBRE TECHO VERDE EN LA
CIUDAD DE BUCARAMANGA**

**WILMER YOHANNY ROJAS ZAMBRANO
CARLOS ENRIQUE FLOREZ GOMEZ**



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

2016

**IMPACTO DE DOS ESTRATEGIAS DE IRRIGACIÓN EN LA POTENCIA
GENERADA Y LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE UN PANEL
FOTOVOLTAICO UPSOLAR 250W INSTALADO SOBRE TECHO VERDE EN LA
CIUDAD DE BUCARAMANGA**

**CARLOS ENRIQUE FLOREZ GOMEZ
WILMER YOHANNY ROJAS ZAMBRANO**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico**

Director

**GERMAN ALFONSO OSMA PINTO
Magister en Ingeniería Eléctrica**

Codirector

**GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista, Ph.D**

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

2016

DEDICATORIA

A Dios por guiar mis pasos y darme fuerza para perseverar y superar los obstáculos que se presentaron durante mi formación universitaria.

A mi familia por el apoyo, en especial a mis padres y mi hermana por los buenos consejos, por la confianza depositada y el esfuerzo que día a día hicieron para contribuir a la consecución de esta meta.

A mi amigo y compañero de proyecto por su buena disposición al trabajo y ayudarme cuando lo necesité.

A mis amigos y compañeros con los que compartí tanto buenos como malos momentos a lo largo de mi formación profesional.

Carlos Enrique Florez Gomez

A mi familia por su apoyo, cariño y comprensión, en especial a mi madre y a mi hermana por su constante animo a no desfallecer , quienes creyeron en mi aun cuando yo no lo hacia.

A mis amigos y compañeros con quienes comparti innumerables jornadas de estudio, dificultades y alegrías.

Gracias a Diego y Ana que nos apoyaron de una u otra manera en las jornadas que se desarrollaron los experimentos.

Un agradecimiento especial a mi amigo y compañero de proyecto por su buen animo y entrega durante la ejecucion de nuestro proyecto.

Por último y no menos importante gracias a Dios por colocarme en el camino a las personas que me apoyaron durante la constancia para superar cada una de las dificultades que se presentaron en el transcurso de mi formacion profesional.

Wilmer Rojas Zambrano

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos los espacios de formación y lograr ser profesionales, a la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones y a COLCIENCIAS por brindarnos las herramientas necesarias para el buen desarrollo de este trabajo de grado.

Al MSc. German Alfonso Osma Pinto, por su orientación y dedicación en este trabajo de grado. Igualmente agradecemos a nuestro codirector Dr. Gabriel Ordóñez Plata por su acompañamiento y apoyo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	21
2. JUSTIFICACIÓN.....	22
3. OBJETIVOS	23
3.1. OBJETIVO GENERAL.	23
3.1.1 Objetivos Específicos	23
4. CONSIDERACIONES GENERALES	24
4.1. PANELES FOTOVOLTAICOS Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN.....	24
4.2. EFECTO TÉRMICO EN LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	25
4.3. ANTECEDENTES.....	28
4.4. MICRO INVERSORES.....	30
5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN	33
5.1. MONTAJE.....	33
5.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA	35
5.2.1. Termistor.	36

5.2.2 Sensor analógico de circuito integrado (IC).	36
5.2.3. Termocupla.	37
5.2.4. RTD.	38
5.3. MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO	39
5.3.1. Sensor Vegetronix de humedad del suelo.....	39
5.4. MÓDULO DE CONTROL	41
5.5. MEDICIÓN DEL NIVEL DE AGUA.....	42
5.6. MEDICIÓN LA RADIACIÓN SOLAR.....	44
5.7. MEDICIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.....	44
6. DESCRIPCIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO ..	46
6.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	48
6.2 EXPERIMENTO 1: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS.	51
6.3 EXPERIMENTO 2: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN UNA CON PELÍCULA DE AGUA Y OTRA DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 15 MINUTOS.....	54

6.4	EXPERIMENTO 3: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (15 MINUTOS) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.....	57
6.5	EXPERIMENTO 4: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (1 MINUTO) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.....	59
6.6	EXPERIMENTO 5: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS. EL CAUDAL DE LA PELÍCULA DE AGUA ES DEL 50% CON RESPECTO AL EXPERIMENTO 1.	60
6.7	EXPERIMENTO 6: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN UNA CON PELÍCULA DE AGUA Y OTRA DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 1 MINUTO.	63
6.8.	EXPERIMENTO 7: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN PERMANENTE CON PELÍCULA DE AGUA. EL CAUDAL DE LA PELÍCULA DE AGUA DE UN PANEL ES DEL 50% CON RESPECTO AL OTRO.	64

7.	ANÁLISIS DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR LOS PANELES FOTVOLTAICOS.....	67
7.1	EXPERIMENTO 1: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS.....	70
7.2	EXPERIMENTO 2: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN UNA CON PELÍCULA DE AGUA Y OTRA DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 15 MINUTOS.....	72
7.3	EXPERIMENTO 3: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (15 MINUTOS) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.	74
7.4	EXPERIMENTO 4: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (1 MINUTO) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.....	76
7.5	EXPERIMENTO 5: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON	

PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS. EL CAUDAL DE LA PELÍCULA DE AGUA ES DEL 50% CON RESPECTO AL EXPERIMENTO 1.	78
7.6 EXPERIMENTO 6: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA Y DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 1 MINUTO.....	79
7.7 EXPERIMENTO 7: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DEL INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN PERMANENTE CON PELÍCULA DE AGUA.	81
7.8 ANÁLISIS	83
8. CONCLUSIONES.....	88
CITAS	92
BIBLIOGRAFIA	95
ANEXOS	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estudios realizados sobre el impacto de la irrigación de agua en paneles fotovoltaicos.	29
Tabla 2. Complemento de los estudios realizados sobre el impacto de la irrigación de agua en paneles fotovoltaicos	30
Tabla 3. Especificaciones PACE XR5-SE.....	39
Tabla 4. Características Sensor VH400	40
Tabla 5. Análisis de diferentes módulos de control [30].....	41
Tabla 6. Especificaciones piranómetro SMP11	44
Tabla 7. Especificaciones AcuRev 2020	45
Tabla 8. Experimentos realizados.....	46
Tabla 9. Resultados de las mediciones de la temperatura de operación de los paneles y de la energía consumida por la bomba cada día	50
Tabla 10. Resultados del experimento 1	71
Tabla 11 Resultados del experimento 2.....	73
Tabla 12. Resultados del experimento 3.....	75
Tabla 13. Resultados del experimento 4.....	77
Tabla 14 Resultados del experimento 5.....	79
Tabla 15. Resultados del experimento 6.....	81
Tabla 16. Resultados del experimento 7	83
Tabla 17. Ganancia neta de energía.....	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Eficiencia eléctrica en función de la temperatura del panel fotovoltaico.....	26
Figura 2. Variación de la potencia eléctrica durante el día para diferentes flujos de agua.....	28
Figura 3. Techo de la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de a UIS.	33
Figura 4. Diseño de la unidad de riego	35
Figura 5. Datalogger PACE XR5-SE 20mV	39
Figura 6. Sensor HC-SR04	43
Figura 7. Experimento1- Dia 1, 8-12 am	52
Figura 8. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 1- Dia 1	53
Figura 9. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 1, día 1	54
Figura 10. Experimento 2-Dia 2, 8-1 pm	55
Figura 11. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 2- Dia 1.....	56
Figura 12. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 2, día 1	56
Figura 13. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 3- Dia 1.....	58
Figura 14. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 3, día 1	58
Figura 15. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 4 - Dia 1.....	59
Figura 16. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 4 - Dia 1.	60

Figura 17. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 5 - Dia 1.....	61
Figura 18. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 5 - Dia 1.	62
Figura 19. Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control	63
Figura 20. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 6 - Dia 1.	64
Figura 21. Diferencias promedio de la temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 7 - Día 2.....	65
Figura 22. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 6 - Dia 1.	66
Figura 23. Delta de potencia [W] y Delta de temperatura [°C], irrigación de película de agua permanente con caudales del 100% y del 50%	68
Figura 24. Delta de potencia [W] y Delta de temperatura [°C], irrigación de película de agua con duraciones de 1min y 15min	69
Figura 25. Delta de potencia [W] y Delta de temperatura [°C], irrigación de película de agua y chorros de agua separados cada 10cm y duración de 15 minutos	69
Figura 26. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 1.	71
Figura 27. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 2.	73
Figura 28. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 3.	75
Figura 29. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 4.	77
Figura 30. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 5.	78

Figura 31. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 6.80

Figura 32. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 7.82

Figura 33. Correlación de la eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos con respecto a la radiación solar.....84

Figura 34. Comparación de los resultados de la eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos para la experimentación realizada.85

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. UNIDAD DE RIEGO	96
ANEXO B. TEMPERATURAS DE OPERACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS PARA LOS DIFERENTES EXPERIMENTOS REALIZADOS	101
ANEXO C. GRÁFICAS DEL ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE TEMPERATURA	130
ANEXO D. GRÁFICAS DE LA POTENCIA GENERADA POR PANELES FOTOVOLTAICOS	153
ANEXO E. GRÁFICAS DEL ANÁLISIS DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	181
ANEXO F. ANÁLISIS PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRES	185

RESUMEN

TÍTULO: IMPACTO DE DOS ESTRATEGIAS DE IRRIGACIÓN EN LA POTENCIA GENERADA Y LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO UPSOLAR 250W INSTALADO SOBRE TECHO VERDE EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA¹

AUTORES: CARLOS ENRIQUE FLOREZ GOMEZ
WILMER YOHANNY ROJAS ZAMBRANO²

PALABRAS CLAVE: Eficiencia, radiación solar, temperatura

En la eficiencia de un panel fotovoltaico, las propiedades del material semiconductor, velocidad del viento, la radiación solar y la temperatura son los factores dominantes. En las zonas tropicales cálidas, esto es causado por los altos niveles de la temperatura ambiente y la radiación solar. La eficiencia del panel fotovoltaico disminuye un 0,5% por cada grado Celsius de aumento de la temperatura.

Este trabajo presenta un estudio sobre el impacto del riego sobre los paneles fotovoltaicos integrados a un tejado con vegetación de clima tropical cálido. De acuerdo con estudios recientes para climas templados, el riego reduce la temperatura del panel fotovoltaico, lo que mejora su eficiencia. Este tipo de estudios son casi inexistentes para el clima tropical cálido. Por esta razón, se realizó un experimento que se compone de tres paneles fotovoltaicos, dos con riego y otro sin riego, para las mismas condiciones de instalación. El experimento considera techo con vegetación, dos tipos de irrigación (de película y chorros de agua) y dos tiempos de riego (1 minuto y 15 minutos), cada 30 minutos. El sistema fotovoltaico se ha instalado en el techo del edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia).

Este experimento se realizó para las condiciones tropicales y cálidas y fue posible percibir el efecto positivo del riego en la generación de energía eléctrica por parte de los paneles fotovoltaicos para las condiciones analizadas. Este efecto se da por la reducción de la temperatura en la superficie posterior del panel, debido a la irrigación, específicamente por la pérdida de calor por convección entre el agua y la superficie del panel fotovoltaico y al enfriamiento adicional por evaporación, incluyendo el enfriamiento del aire circundante.

¹ Trabajo de grado.

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

ABSTRACT

TITLE: IMPACT OF TWO STRATEGIES IRRIGATION ON THE GENERATED POWER AND TEMPERATURE OF OPERATION OF A PHOTOVOLTAIC PANEL UPSOLAR 250W INSTALLED ON GREEN ROOF IN THE CITY OF BUCARAMANGA³

AUTHORS: CARLOS ENRIQUE FLOREZ GOMEZ
WILMER YOHANNY ROJAS ZAMBRANO⁴

KEY WORDS: Efficiency, solar radiation, temperature.

In the efficiency of a PV, the properties of the semiconductor material, wind speed, solar radiation and temperature are the dominant factors. In tropical warm areas, this is caused by high levels of room temperature and solar radiation. The PV efficiency decreases 0.5 % for each Celsius degree of increasing temperature.

This work presents a study about the impact of irrigation on PV panels integrated to a vegetated roof for warm tropical climate. According to recent studies for temperate climates, irrigation reduces the temperature of the PV panel, which improves its efficiency. This type of studies are almost non-existing for tropical-warm climate. For this reason, an experiment was conducted that is composed of three PV panels, two with irrigation and another without irrigation, for same installation conditions. The experiment considers one type of roof (vegetated), two types (film and jets) and two time of irrigation (1 minute and 15 minutes), with periods of 30 minutes. The PV system was installed on the roof of the Electrical Engineering Building from Industrial University of Santander (Bucaramanga, Colombia).

This experiment was done for tropical and warm conditions and it was possible to perceive the positive effect of irrigation on power output for the conditions analysed. This effect is due to reducing the temperature of the back surface due to irrigation, specifically heat loss by convection between the water and the surface of the photovoltaic panel and the additional cooling by evaporation, including cooling of the surrounding air.

³ Degree project.

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

INTRODUCCIÓN

El efecto que tiene la temperatura de funcionamiento en la eficiencia energética de una instalación fotovoltaica está bien documentada. En la referencia⁵ [1] se presenta una situación donde se encontró que la célula solar sin climatización forzada alcanzó una eficiencia de 8% a 9%; sin embargo, su eficiencia aumentó hasta 12% y 14% cuando se le aplicó climatización por aire forzado a través de una serie de ductos.

La temperatura es un factor determinante en la disminución o aumento de la eficiencia de un panel fotovoltaico. Otros factores de influencia sobre la eficiencia son las propiedades del material semiconductor, la velocidad del viento, la radiación solar, etc.

En⁶ [2] se concluyó que en las zonas tropicales cercanas al Ecuador hay que preocuparse por tratar de mitigar el aumento de la temperatura del módulo ya que por ejemplo la velocidad del viento tiende a ser baja y la incidencia de los rayos solares sobre el modulo son mayores, provocando un mayor calentamiento del panel fotovoltaico.

A raíz de la necesidad de mitigar este aumento de temperatura se han llevado acabo algunos experimentos alrededor del mundo para estudiar el fenómeno, como por ejemplo la colocación de células fotovoltaicas dentro de una cámara de temperatura controlada, el ajuste de la temperatura ambiente o usando una placa de vacío de

⁵ H. G. TEO, P. S. Lee, and M. N. a Hawlader, "An active cooling system for photovoltaic modules," *Appl. Energy*, vol. 90, no. 1, pp. 309–315, 2012.

⁶ T. REINDL, J. OUYANG, A. M. KHAING, K. DING, Y. S. KHOO, T. M. WALSH, AND A. G. ABERLE, "Investigation of the Performance of Commercial Photovoltaic Modules under Tropical Conditions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, p. 4, 2012.

temperatura controlada. Hay que tener en cuenta que la mayoría de estos métodos requieren la utilización de equipos de alto costo [3].

Por otro lado, investigadores han encontrado que el flujo constante de agua en la cara frontal del panel fotovoltaico no solo actúa como un refrigerante, sino también como un agente que reduce la suciedad del panel. En Rio de Janeiro, Krauter (2012) [4] encontró que se podía lograr una ganancia de eficiencia energética diaria del 8,9% por el bombeo de agua sobre la superficie del panel. También vale citar que en Irán se realizó un experimento con irrigación de agua donde se logró aumentar la potencia máxima de un panel de 52 Watts a 78 Watts [5].

Teniendo en cuenta lo mencionado y que la ciudad de Bucaramanga tiene un clima tropical-cálido con temperatura ambiente de hasta 32°C y radiación solar diaria promedio de 4,8kWh/m², es de gran importancia estudiar el potencial beneficio de la irrigación en un panel fotovoltaico, lo cual será abordado en este trabajo de grado y gracias a este se pudo desarrollar un paper que tiene como título “Impact of irrigation in the operation of a photovoltaic panel in Bucaramanga”.

El documento consta de seis capítulos; sus dos primeros son introductorios a la temática; en un tercer capítulo se aborda la implementación del sistema de riego. Asimismo, el cuarto capítulo trata el análisis comparativo de la potencia eléctrica generada y la eficiencia del panel para las condiciones de riego y no riego. En el quinto capítulo se describe la variación de la temperatura de operación del panel fotovoltaico en función del tiempo para las condiciones con y sin riego. Las conclusiones y recomendaciones se exponen en el sexto capítulo. La parte final del documento contiene los anexos que complementan y profundizan la realización del trabajo de grado.

1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La eficiencia de un panel fotovoltaico se ve reducida en 0,5% aproximadamente por cada grado Celsius de aumento de la temperatura⁷ [6]. Se estima que la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos comunes puede ser reducida hasta en un 15% debido al aumento de la temperatura del panel [4]. Todo esto debido al efecto térmico de la temperatura ambiente, la incidencia de los rayos solares sobre el panel y las cubiertas de las edificaciones. Tales pérdidas son significativas y pueden ser mitigadas mayormente a partir de la utilización de un techo verde debajo del panel [7], [8], la ventilación forzada [1], [9] y la irrigación forzada del panel con agua [3], [6], [10]–[13].

El objeto de este trabajo es analizar el impacto de la técnica de irrigación como estrategia de mitigación térmica en un panel fotovoltaico instalado sobre un techo verde en operación en un entorno tropical cálido. Se hará un estudio del impacto de la técnica de irrigación por chorros y la irrigación por película de agua en la eficiencia y la temperatura del panel fotovoltaico. Esto con el fin de analizar cuál es la técnica de irrigación que se traduce en el mayor incremento de la eficiencia del panel, el menor consumo de recursos (agua, energía) y una mayor generación de energía eléctrica.

⁷ F. JU AND X. FU, "Research on impact of dust on solar photovoltaic(PV) performance," 2011 Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2011 - Proc., pp. 3601–3606, 2011.

2. JUSTIFICACIÓN

Las células fotovoltaicas pueden suministrar energía para sistemas con niveles de potencia que van desde 1 W hasta el nivel de los MW [14]. La producción de energía eléctrica a partir de energía solar constituye un campo potencial de desarrollo sostenible. Sin embargo, su costo elevado ha impedido un avance de las aplicaciones.

El uso de la energía solar ha aumentado en un 20% durante los últimos 15 años gracias a la caída de los precios y las ganancias en eficiencia. Japón, Alemania y Estados Unidos son los principales mercados para las células fotovoltaicas. Con los incentivos fiscales la electricidad solar a menudo se puede pagar por sí misma en cinco o diez años⁸ [15].

En cuanto al desempeño de sistemas fotovoltaicos, se puede indicar que la temperatura es un factor de impacto negativo debido a que el aumento de temperatura disminuye la eficiencia del panel fotovoltaico. Como solución a este problema se plantean alternativas para mitigar este aumento de temperatura, como por ejemplo la irrigación forzada.

⁸ NATIONAL GEOGRAPHIC, "Solar Energy," 2015. [en línea]. [citado 10 de marzo de 2016] Disponible en : <http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/solar-power-profile>.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL.

Realizar un estudio sobre el impacto de la irrigación variando el método de riego (película de agua y chorros) en un panel fotovoltaico instalado sobre un techo verde con aprovechamiento de agua para riego de la vegetación.

3.1.1 Objetivos Específicos

- Implementar un sistema de irrigación de agua para paneles fotovoltaicos que permita su reusó posterior para el riego.
- Realizar un análisis comparativo de la potencia generada y la eficiencia energética para un modelo de panel específico considerando condiciones de riego y no riego.
- Describir la variación de la temperatura en función del tiempo del panel fotovoltaico para los dos casos analizados (con y sin riego).

4. CONSIDERACIONES GENERALES

A continuación se presentan las bases teóricas referentes a la temática analizada en este trabajo de grado; además de los resultados de investigaciones realizadas previamente.

4.1. PANELES FOTOVOLTAICOS Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Las células solares también llamadas células fotovoltaicas convierten directamente luz solar en electricidad. Las células fotovoltaicas tienen ese nombre por el proceso de convertir luz (protones) en electricidad (tensión), lo que es llamado efecto fotovoltaico. Las células solares tradicionales están hechas de silicio y son por lo general de placa plana.

Las células solares de segunda generación son llamadas de película delgada porque están hechas a partir silicio amorfo o diferente al silicio tales como telurio de cadmio. Las células de tercera generación son hechas de nuevos materiales además de silicio, incluyendo tintas solares, colorantes solares, lentes de plástico o espejos para concentrar la luz solar en una pequeña pieza de material⁹ [16].

Un sistema eléctrico solar se compone de varias células fotovoltaicas. Una célula fotovoltaica es generalmente pequeña, normalmente produciendo alrededor de 1 o 2 W de potencia. Para aumentar la potencia de salida de las células fotovoltaicas éstas deben ser conectadas entre sí para formar unidades más grandes llamadas paneles fotovoltaicos.

⁹ NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, "Solar photovoltaic technology basics," 2015. [en línea] [citado 15 de marzo de 2016]. disponible en: http://www.nrel.gov/learning/re_photovoltaics.html.

Para entender el funcionamiento de un panel fotovoltaico es necesario considerar la naturaleza del material que está hecho. Los paneles fotovoltaicos se componen de dos tipos de materiales; silicio tipo p y silicio tipo n. Luz de ciertas longitudes de onda es capaz de ionizar los átomos de silicio y el campo interno producido por los cruces separa algunas de las cargas positivas (agujeros) de las cargas negativas (electrones) dentro del panel fotovoltaico. Los agujeros son barridos dentro de la capa p y los electrones son barridos dentro de la capa n.

Por lo tanto, en un panel fotovoltaico la potencia puede ser producida a partir de las células bajo iluminación, ya que los electrones libres tienen que pasar a través de la carga para recombinarse con los agujeros positivos [17]. La conversión fotovoltaica es más efectiva en el área cercana al cruce p-n del semiconductor, situado cerca de la superficie de las células solares. Esta conversión depende de varios factores: espectro de la luz solar, la sensibilidad espectral de células, la reflectividad de una superficie de la célula, el tipo de semiconductor, la distancia de una unión p-n de una superficie y la temperatura de la célula¹⁰ [18].

4.2. EFECTO TÉRMICO EN LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

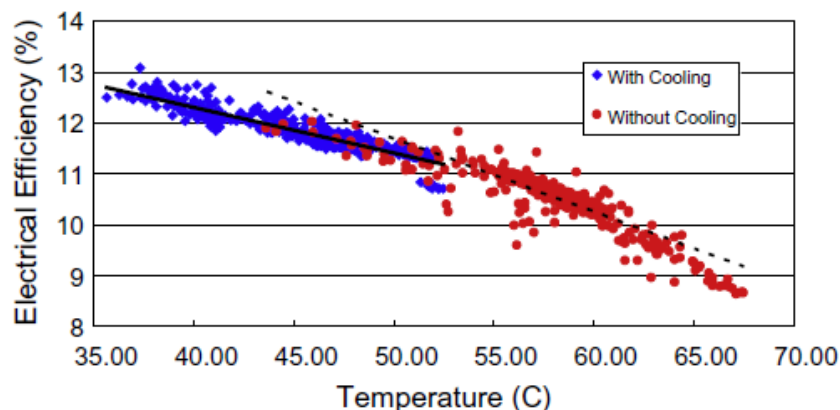
Según su principio de funcionamiento, el aumento de la temperatura da como resultado una disminución de la banda GAP del semiconductor [18]. La disminución de la brecha se traduce en la disminución significativa de la tensión de circuito abierto [18], [19]. Este es uno de los principales obstáculos que enfrenta la operación de sistemas fotovoltaicos debido a la radiación solar fuerte y a la temperatura ambiente elevada.

¹⁰ J. M. OLCHOWIK, et al , "Influence of temperature on the efficiency of monocrystalline silicon solar cells in the South-eastern Poland conditions," Mater. Sci., vol. 24, no. 4, p. 6, 2006.

El rendimiento de un sistema fotovoltaico no solo depende de sus características eléctricas básicas: potencia máxima, tensión máxima, corriente máxima, tensión de circuito abierto o corriente de corto circuito. Como se mencionó, también se ve influida negativamente por la temperatura ambiente, así como por la humedad, suciedad por polvo, sombreado o la intensidad de radiación solar¹¹ [20].

En su investigación Ju y Fu [6] dicen que al aumentar 1°C la temperatura, la disminución de la eficiencia de generación de energía es aproximadamente del 0,5%. La Figura 1 muestra la variación de la eficiencia en función de la temperatura del panel fotovoltaico para un estudio realizado en Singapur en el año 2010 [1].

Figura 1. Eficiencia eléctrica en función de la temperatura del panel fotovoltaico



Fuente. Teo and Hawlader [1]

La reducción de la eficiencia eléctrica de los paneles fotovoltaicos debido al aumento de la temperatura puede evitarse parcialmente por métodos como:

(i) La circulación de aire natural o forzado es un método simple y de bajo costo para disminuir el calor de los módulos fotovoltaicos, pero es menos eficaz si la

¹¹ H. A HUSSEIN, A. H. NUMAN, AND A. R. ABDULMUNEM, "Improving of the photovoltaic / thermal system performance using water cooling technique," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 78, p. 012020, 2015.

temperatura del aire ambiente es superior a 20 °C, lo cual es habitual en zonas de baja latitud (cerca de Ecuador) y altitud (con respecto al nivel del mar) [20].

(ii) Lamnatou y Chemisana (2015) [7], (2014) [8] mencionan en sus trabajos que los techos verdes tienen múltiples beneficios como moderación del efecto de calor, regulación de la temperatura, aislamiento del sonido, protección del exterior del edificio etc. Su trabajo consistía en comparar la generación de un panel fotovoltaico sobre techo normal con paneles fotovoltaicos instalados sobre dos tipos de techo verde (especies vegetales *Ganzania* y *Sedum*). Finalmente concluyeron que esta tecnología aplicada a los paneles fotovoltaicos puede aumentar desde 1,29% hasta 3,33% la eficiencia de la generación dependiendo de las condiciones climáticas o las especies de las plantas.

(iii) Chong y Tan (2012) [21] proponen un radiador de automóvil con un bloque de refrigeración para la disipación de calor de un sistema fotovoltaico. Durante su trabajo lograron observar que la eficiencia del panel fotovoltaico ha mejorado desde 22,39% a 26,85%. Además, se logró reducir la temperatura del panel fotovoltaico de 59,4 °C a 37,1 °C.

(iv) El Dr. Abdul Hai Alami en el año 2014 propuso incorporar una fina capa de arcilla sintética a la parte posterior del módulo permitiendo que una fina película de agua se evapore, reduciendo así la temperatura del módulo¹² [22].

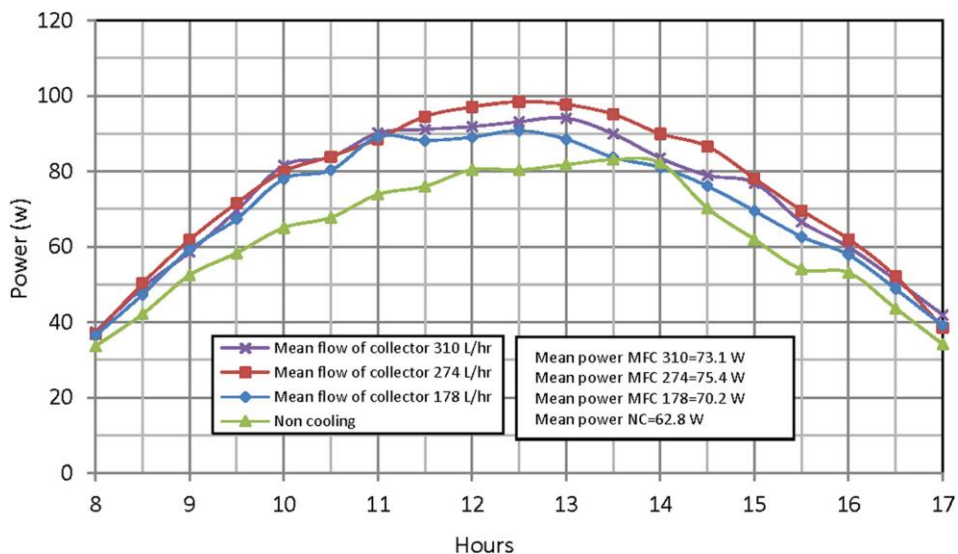
(v) La extracción de calor del panel por medio del agua es más costosa que la extracción por aire, pero se considera más práctica [20]. En países como Arabia Saudita, Irak, Egipto, Australia y China entre otros, se han desarrollado estudios usando el agua como refrigerante; utilizando el agua lluvia en algunos casos y diferentes métodos de irrigación como pueden ser el goteo [11], chorro de choque

¹² A. H. ALAMI, "Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules," *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 668–679, 2014.

[23] o una corriente de agua [3]. Este método de refrigeración permite disipar el calor de los módulos fotovoltaicos debido a la pérdida de calor por convección (es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido) entre el agua y la superficie del panel fotovoltaico, lo cual produce un aumento en la potencia eléctrica de salida [20].

La Figura 2 muestra la variación de la potencia eléctrica con respecto a la temperatura del panel durante el día para diferentes flujos de agua en el estudio realizado por Habiballahi en Irán en 2011 [24].

Figura 2. Variación de la potencia eléctrica durante el día para diferentes flujos de agua



Fuente. M. Habiballahi, M. Ameri, y S. H. Mansour [24]

4.3. ANTECEDENTES

Diversos estudios han prestado atención a la afectación térmica en los paneles fotovoltaicos [8], [9], [11], sólo unos pocos se han desarrollado en las regiones

tropicales del mundo, donde constantemente prevalecen temperaturas altas [2], [4], [11].

A continuación se presentan algunos resultados de investigaciones realizadas utilizando el agua como refrigerante en paneles fotovoltaicos. En algunas de las investigaciones mostradas en la Tabla 1 para medir la temperatura del panel se han usado termopares tipo K [10], [20], también detectores de temperatura resistivos como una PT100 [4], [13], [24]. Algunos para la medición del caudal usaron un Ultrasonic Flow Meter Tds 100H [20]. La Tabla 2 es complemento de lo mostrado en la Tabla 1, mostrando las estrategias de irrigación, tamaños de los paneles utilizados, caudal y el tiempo de duración del experimento.

Tabla 1. Estudios realizados sobre el impacto de la irrigación de agua en paneles fotovoltaicos.

Referencia	Año	País	Latitud	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura sin riego [°C]	Temperatura con riego [°C]	Aumento de eficiencia [%]
[4]	1999	Brasil	-22,92	20	60	38	10,3
[13]	2008	Irán	30,283	25-34	25-59	25-36	3,66
[11]	2009	Australia	-33,8	22-25	58	40	4-10.
			-32				
			-12				
[24]	2011	Irán	30	30-34	34-61	33-41	20
[10]	2012	Arabia Saudita	26,25	20	37,8	30,5	9
[12]	2012	Sudáfrica	-30,55	26	44,8-58,64	30,1-34,34	3,63
[5]	2012	USA	45,52	17-25	55	40	8,3
[23]	2014	Arabia Saudita	26,3	25-35	30-78,5	30	9
[20]	2015	Irak	33,22	30-35	76,8	70,1	9,8

Tabla 2. Complemento de los estudios realizados sobre el impacto de la irrigación de agua en paneles fotovoltaicos

Referencia	Tamaño del panel [mm]	Tiempo de Experimento	Estrategia de irrigación	Caudal [L/min]
[4]	1290 x 330	1 día	Flujo constante	2
[13]	-	4 meses	Flujo constante	5-12
[11]		12 meses	Goteo	4
[24]	1200 x 900	1 mes	Flujo constante	3-5,2
[10]	1559 x 798	1 mes	Flujo constante	1-2,5
[12]		1 día	Flujo constante	NHI
[5]	1610 x 810	4 meses	Flujo constante	7
[23]	1000 x 125		Chorro de choque	NHI ¹
[20]			Flujo constante	6-18

La zona tropical abarca latitudes que van de los 24° latitud norte hasta los 24° latitud sur aproximadamente. Reindl et al ([2]) concluyeron que en las zonas tropicales cercanas al Ecuador se debe tratar de mitigar el aumento de la temperatura del módulo, debido a que se provoca un mayor sobrecalentamiento del panel, pero la mayoría de las investigaciones encontradas en la Tabla 1 se han desarrollado en lugares alejados de la zona tropical.

Estas investigaciones han arrojado como resultado un aumento en la eficiencia del panel fotovoltaico cuando se usa el agua para la climatización, debido a la disminución de la temperatura del panel cuando se le aplica riego.

4.4. MICRO INVERSORES

Los inversores de sistemas fotovoltaicos agrupan varios paneles para lograr condiciones de operación, tanto en tensión como en corriente. Un caso específico

de estos dispositivos son los micro-inversores, los cuales sólo se conectan a un panel fotovoltaico e inyectan la energía generada a la red eléctrica previa sincronización con ésta en tensión y frecuencia.

Un micro-inversor realiza un rastreo óptimo del punto máximo de potencia del panel y son de fácil instalación. Sin embargo, también hay inconvenientes tales como el costo por watt de un micro-inversor que es mayor al de un inversor de tipo centralizado, lo cual se debe a las prestaciones de control y de seguridad que cada unidad incluye. Otro inconveniente es la baja entrada de tensión al micro inversor [25]. Convertir esta baja entrada de tensión y llevarla a una tensión útil es el reto fundamental del micro-inversor manteniendo una eficiencia lo más alta posible (típicamente por encima de 90%)¹³ [26].

Los micro-inversores funcionan conectados a la red eléctrica. Sin embargo, Rodríguez et al. (2013) [27] proponen hacer funcionar a los micro-inversores en modo “isla”. La condición de “isla” es un fenómeno que se produce cuando la energía suministrada por la red eléctrica se interrumpe. De manera que el micro-inversor alimenta las cargas, ofreciendo características de forma de onda similares tanto en tensión y frecuencia como la red de distribución. Ahora, cuando la red se vuelve a conectar, es posible interconectar el micro-inversor a la red. Esto se hace mediante la sincronización de la fase de salida del micro-inversor con la fase de la red.

De acuerdo con lo expresado, es factible implementar sistemas capaces de conectarse a la red con el fin de transferir la energía procedente de las fuentes renovables, así como para alimentar cargas locales cuando hay ausencia de la red eléctrica de distribución. Según estudios realizados, los inversores modernos son

¹³ H. A. SHER AND K. E. ADDOWEESH, “Micro-inverters - Promising solutions in solar photovoltaics,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 4, pp. 389–400, 2012.

capaces de operar con eficiencias pico superiores al 90% con muy buena calidad de potencia [28].

Finalmente, las características deseables para un inversor DC-AC son alta eficiencia para un amplio rango de potencias, bajo consumo en vacío, alta fiabilidad (resistencia a los picos de arranque), protección contra cortocircuitos, buena regulación de tensión y frecuencia de salida¹⁴ [29].

¹⁴ T. DIAZ AND G. CARMONA, Instalaciones solares fotovoltaicas, McGraw-Hil. 2010.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE IRRIGACIÓN

La parte experimental de este trabajo de grado se llevó a cabo en la terraza superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS, cuya terraza verde asciende a 440 m², la cual se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 3. Techo de la escuela de Ingeniera Eléctrica y Electrónica de a UIS.



A continuación se describen las consideraciones para la selección de componentes como sensores de humedad del suelo y temperatura de los paneles fotovoltaicos y las fases a partir de las cuales se realizó la implementación del sistema de irrigación de agua para paneles fotovoltaicos que permita su reusó posterior para el riego del techo verde.

5.1. MONTAJE

Se implementó un sistema de riego para un panel fotovoltaico, el montaje consistió en la instalación de:

(i) Un sistema de bombeo. Este sistema consta de dos bombas una de 8W para la irrigación del techo verde y otra para el riego del panel fotovoltaico. Dada la altura

de instalación de los paneles (anotar altura) y la necesidad de tener un caudal cercano a los 10 l/min se utilizó la una bomba de 22W.

(ii) Sensor de humedad en el sustrato, el cual indicara el momento adecuado en que la bomba de 8W se activa para iniciar la irrigación del techo verde.

(iii) Dos sensores de temperatura instalados a la misma distancia en la parte posterior de los paneles.

(iv) Una electroválvula, la cual cumplirá dos funciones. La primera será el llenado del tanque de almacenamiento de agua, y la segunda la irrigación del panel con el fin de aprovechar la presión del punto húmedo de la terraza.

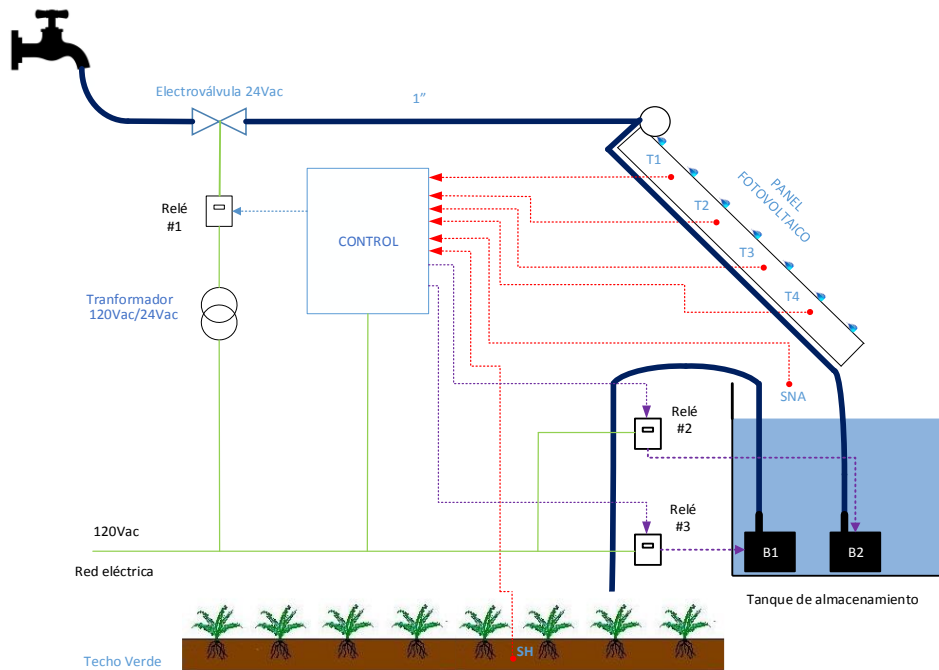
(v) Un transformador 120/24, el cual se encargara de la alimentación de la electroválvula.

(vi) Un tanque que aislé térmicamente lo mayor posible el agua almacenada.

(vii) Un sensor que permita identificar el momento en que el nivel de agua del tanque se encuentre bajo y sea necesario ser llenado.

La Figura 4 muestra el diseño realizado de la unidad de riego del sistema panel fotovoltaico, techo verde.

Figura 4. Diseño de la unidad de riego



5.2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Un sensor de temperatura convierte una señal térmica en una señal física de otra naturaleza; en donde se obtiene como salida generalmente una señal de tensión. Dado que la señal eléctrica generada es de baja amplitud, es necesario determinar el circuito de acople adecuado para la señal sin perder las características de exactitud; para ello es importante analizar:

- La influencia de las señales.
- El error generado por el convertidor A/D.
- Si la salida del sensor es o no lineal.
- La capacidad del sensor de medir una y otra vez el mismo valor en similares condiciones; es decir, la trazabilidad del sensor.

- El tiempo de respuesta del sensor

Por esta razón, se compararon 4 tipos de sensores analógicos entre ellos: termistores, termocuplas, RTD y circuitos integrados (IC). A continuación se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de cada uno.

5.2.1. Termistor. Los termistores pueden medir temperaturas desde -50°C hasta los 300°C ; este rango es adecuado para la implementación del sistema, porque miden temperatura ambiente. Además de ello son sensores resistivos, la exactitud de la medición no se afecta por la tensión de alimentación, son de fácil implementación al solo usar dos hilos y por ultimo tienen un bajo costo.

Debido a que los termistores no son lineales, estos presentan una curva exponencial; por lo tanto a mayor resistencia mayor será la incertidumbre en la medición. Comúnmente presentan tolerancias de 1, 3 y 5% en su resistencia, esto significa que a menor resistencia, su corriente de alimentación es mayor; sin embargo, estos termistores deben tener una corriente de excitación pequeña para evitar el auto calentamiento y de paso el incremento de la incertidumbre de la medida.

A temperaturas altas y bajas la curva del termistor se empieza a saturar, en estos rangos se afecta la exactitud en la medición de la temperatura. Para contrarrestar este efecto, se utiliza un ADC de alta resolución.

5.2.2 Sensor analógico de circuito integrado (IC). Son sensores de temperatura analógicos formados por circuitos integrados todos en un encapsulado; presentan salidas lineales proporcionales a la temperatura, con una medida de temperatura máxima de 150°C . Una ventaja es que no requiere componentes adicionales, que si necesita el termistor, y su consumo de corriente es mínimo y constante; una consideración importante en aplicaciones de ahorro de energía.

La impedancia de estos sensores es baja en comparación con la del termistor, sin requerir amplificación para casos específicos y su implementación es sencilla.

Las desventajas del sensor son el limitado rango de temperatura, la necesidad de alimentación y el auto calentamientos por ser un IC. Por esta razón, su aplicación para la medición de la temperatura ambiente a la intemperie sobre radiación directa es restringida; porque estas condiciones afectarían su funcionamiento e inclusive su vida útil. Por último estos sensores necesitan un amplificador con alta ganancia para lograr una mayor resolución.

5.2.3. Termocupla. El funcionamiento se basa en la unión de dos alambres metálicos de diferente composición, los cuales producen una diferencia de potencial en sus extremos en función de la temperatura a la cual se encuentra la unión; esto a su vez produce una tensión del orden de mV con una salida no lineal.

De acuerdo al tipo de metales que forman la termocupla, existen diversos tipos de éstas en función a la composición de la unión.

La medición con termocuplas requiere la compensación de la unión de referencia, siendo una diferencia significativa entre la termocupla y los sensores anteriormente mencionados. Aunque se pueden usar termocuplas de 3 o 4 hilos para realizar una medida más adecuada en cuanto a exactitud y precisión, sin embargo su implementación es más difícil.

La ventaja es que no requieren fuente de alimentación, además, son económicas y de fácil construcción, poseen amplios rangos de medición; las más populares son las de tipo J, K y T.

Por otro lado, las desventajas son la exigencia de una instrumentación con poca incertidumbre debido a la magnitud pequeña de la tensión que generan y su baja

sensibilidad; asimismo, necesitan otro sensor para realizar la compensación de la unión fría.

5.2.4. RTD. Se caracteriza por su alta exactitud y precisión y excelente estabilidad. Mide temperaturas entre 0°C a 450°C; su resistencia metálica es de alambres finos o de película de metales como cobre, plata, oro, tungsteno, níquel y platino, este último es el más común por su alta estabilidad y resistividad con respecto a los otros metales. Su resistencia varía proporcionalmente con la temperatura. Las RTD de platino son mayormente conocidas como pt100.

Entre las desventajas se resaltan las siguientes:

- Costo elevado
- Baja resistencia (100Ω a 0°C) y sensibilidad (0,4 Ω/°C), esta condición afecta la medición a dos hilos, por lo tanto exige utilizar 4 hilos; de los cuales dos llevan y traen la corriente necesaria para alimentar el sensor y los otros dos se emplean para la medición de la tensión de salida.
- Debido a la excitación de corriente constante disipa potencia, generando calentamiento de manera que incrementa la temperatura en la medición; por lo tanto necesita una corriente de excitación lo más pequeña posible para reducir esta incertidumbre de medición.

De acuerdo a lo mencionado, se decidió el uso de termocuplas OMEGA 5TC-TT-KI-36-2M para medir la temperatura del panel por las siguientes características: bajo costo, robustez y rango adecuado de temperatura. Adicionalmente, se hizo uso de un datalogger PACE XR5-SE-20mV que se muestra en la Figura 5. Para las medidas de temperatura, se tuvo en cuenta las especificaciones mostradas en la Tabla 3.

Figura 5. Datalogger PACE XR5-SE 20mV



Tabla 3. Especificaciones PACE XR5-SE

Especificaciones	PACE XR5-SE- 20mV	Termocupla OMEGA 5TC-TT-KI-36-2M
Rango	-40 °C a + 150 °C	-270 °C a + 1372 °C
Exactitud (0 °C a +60 °C)	0,50%	0.5%
Compensación de unión fría	Si	No aplica
Resolución (-25 °C a +75 °C)	0,06 °C	0.1°C

USER`S GUIDE: XR5-SE Data Logger™ and LogXR™ Software™

5.3. MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

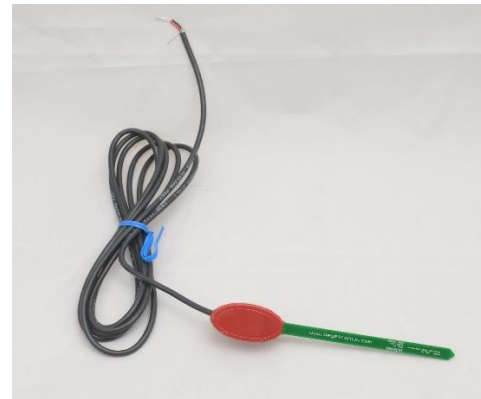
Los sensores de humedad miden la conductividad eléctrica del suelo, puesto que al ser de tipo capacitivo la conductividad eléctrica del sustrato varía de acuerdo al nivel de agua; es decir, es mayor la tensión de salida cuando éste tiene mayor nivel de agua en el sustrato.

5.3.1. Sensor Vegetronix de humedad del suelo. El sensor VH400 es de bajo consumo de energía, durabilidad, alta precisión, tamaño compacto, insensible a la sal, entrada de tensión regulada y un amplio rango de tensión de entrada. Es de

gran exactitud, precisión y calidad. En la Tabla 4 se muestran las principales características del sensor

Tabla 4. Características Sensor VH400

Sensor VH400	
Tensión de alimentación	3.5 V a 20 V
Impedancia de Salida	10 kΩ
Temperatura Operativa	-40°C a 85°C
Precisión a 25 °C	2%
Salida	0 a 3 V
Desnudo	Tierra
Rojo	Vcc
Negro	Out



El sensor cuenta con una tensión de alimentación entre 3,3 (V) a 20 (VDC), con una temperatura de operación de -40 a 85 (°C); por lo tanto debe ser alimentado mínimo por 400 (ms) para dar una medición estable. Esta varía entre 0 (V) y 3 (V) de acuerdo al contenido volumétrico de agua del suelo (VWC-siglas en inglés), 3 (V) es el punto más alto de agua en el sustrato; sin embargo, aunque sea el valor máximo no alcanza un valor de tal magnitud por la capilaridad del suelo; es decir, cuando se sature, el agua se deposita por encima del sustrato, en este caso se presenta un contenido volumétrico de agua VWC máximo de 50 aproximadamente, que corresponde de acuerdo a los datos del fabricante a una salida de tensión de 2,2 (V).

$$VWC = \text{contenido volumetrico de agua} = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{agua}} + V_{\text{suelo}} + V_{\text{espacio vacio}}}$$

El consumo de potencia del sensor es de 7 (mW), que representa un consumo bajo acorde para la aplicación en este proyecto. El sensor tiene una exactitud del 2% a

25 (°C), considerado un buen valor, dado que al brindar una salida máxima de 3 (V), tendrá una incertidumbre de $\pm 0,06$ (V). Se realizara riego cuando el sensor suministra una señal inferior 1.4[V] que representan 20 VWC.

5.4. MÓDULO DE CONTROL

Para definir el sistema de control se analizaron algunas opciones disponibles en el mercado; entre ellas el Controlador Lógico Programable (PLC) y tres tarjetas de desarrollo, Beaglebone Black (BBB), Arduino Uno y Arduino Nano. Estas son las herramientas más comunes y de fácil adquisición; a continuación en la Tabla 5 se resaltan las ventajas y desventajas de cada sistema.

Tabla 5. Análisis de diferentes módulos de control [30]

MÓDULOS DE CONTROL	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Controlador Lógico Programable (PLC)	Son utilizados en grandes áreas de automatización por su diseño para múltiples señales de entrada y salida que permite su aplicación en numerosos campos de forma fácil y eficiente. Con este sistema se pueden realizar subrutinas, interrupciones, contadores, etc.	<input type="checkbox"/> Fácil implementación <input type="checkbox"/> Fácil programación <input type="checkbox"/> Robusto	<input type="checkbox"/> Alto costo <input type="checkbox"/> Interfaz de programación paga en algunos casos
Beaglebone Black (BBB)	Es un computador construido en una simple placa de circuito, con un micro-procesador, memoria, periféricos y demás elementos; que permite desarrollar aplicaciones de manera rápida en distintos sistemas operativos como Linux, Android, Ubuntu y muchos otros.	<input type="checkbox"/> Gran versatilidad <input type="checkbox"/> Bajo costo <input type="checkbox"/> Alta capacidad de procesamiento	<input type="checkbox"/> Requiere algo de experiencia para su programación e implementación <input type="checkbox"/> Requiere sistema operativo
Arduino Uno	Tarjeta basada en el microcontrolador ATmega328, compuesto por 14 pines digitales, 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, conexión USB y otros componentes	<input type="checkbox"/> Programación amigable con el usuario <input type="checkbox"/> No necesita un sistema operativo <input type="checkbox"/> Interfaz de programación gratuita <input type="checkbox"/> Bajo costo <input type="checkbox"/> Conector para alimentación por medio de un cargador	<input type="checkbox"/> Capacidad de procesamiento baja en comparación a la de un microprocesador

MÓDULOS DE CONTROL	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Arduino Nano	Tarjeta pequeña basada en el microcontrolador ATmega328, compuesta 8 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, conexión mini USB y otros componentes	<input type="checkbox"/> Programación amigable con el usuario <input type="checkbox"/> No necesita un sistema operativo <input type="checkbox"/> Interfaz de programación gratuita <input type="checkbox"/> Bajo costo <input type="checkbox"/> Pequeño tamaño	<input type="checkbox"/> No tiene conector para alimentación por medio de un cargador <input type="checkbox"/> Necesita tarjetas para adaptar a otros sistemas

Con base en lo anterior, se selecciona el Arduino Uno para el control, ya que no se necesita una gran capacidad de procesamiento además de su reducido costo y tamaño a comparación del PLC; además de tener una programación más sencilla que el BBB y cuenta con un conector para alimentación por medio de un cargador.

5.5. MEDICIÓN DEL NIVEL DE AGUA

Dado que el nivel del agua del tanque de almacenamiento va a disminuir debido: a la evaporación del agua, filtraciones o riego del techo verde, es necesario el uso de un dispositivo que cense el nivel de agua en el tanque para su posterior llenado. A continuación se describe un sensor que cumple esta función.

SENSOR HC-SR04. El HC-SR04 es un sensor de distancias por ultrasonidos capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra en un rango de 2 a 450 cm. El sensor funciona por ultrasonidos y contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición. El funcionamiento no se ve afectado por la luz solar o material negro como telémetros ópticos (aunque acústicamente materiales suaves como telas pueden ser difíciles de detectar). Su uso es sencillo, ya que sólo se requiere enviar el pulso de arranque y medir la anchura del pulso de retorno. De muy pequeño tamaño, el HC-SR04 se destaca por su bajo consumo, gran precisión

y bajo precio por lo que está reemplazando a los sensores polaroid en los robots más recientes.

En la Figura 6 se observar el sensor HC-SR04 el cual es compatible con la mayoría de los microcontroladores del mercado, incluyendo el Arduino UNO, Arduino MEGA y otras tarjetas compatibles que funcionen con 5 V. Existen bibliotecas para este módulo que hacen que la parte del software quede resuelta de manera muy sencilla.

Las principales características del HC-SR04:

- Alimentación de 5 V
- Interfaz sencilla: Solamente 4 hilos Vcc, Trigger, Echo, GND
- Rango de medición: 2 cm a 400 cm
- Corriente de alimentación: 15 mA
- Frecuencia del pulso: 40 kHz
- Apertura del pulso ultrasónico: 15°
- Señal de disparo: 10uS
- Dimensiones del módulo: 45x20x15 mm

Figura 6. Sensor HC-SR04



Debido a la fácil implementación, costo y precisión se decide usar el sensor de ultrasonido HC-SR04 para determinar el nivel del agua dentro del tanque de almacenamiento.

5.6. MEDICIÓN LA RADIACIÓN SOLAR

Para medir la radiación solar se utilizó un piranómetro Kipp&Zonen SMP11. Cuando está funcionando el piranómetro, su rendimiento está relacionado con un número de parámetros, como la temperatura, nivel de irradiancia, ángulo de incidencia. Las especificaciones del piranómetro utilizado se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones piranómetro SMP11

Especificaciones		SMP10 y SMP11
Clasificación ISO 9060		Patrón Secundario
Rango		0 a 1600W/m
Tiempo de respuesta		2 s
Exactitud instrumento	Error Direccional	< 10 W/m ²
	Sensibilidad de dependencia de la temperatura (-20 °C a +50 °C)	<1%

KIPP&ZONEN Instruction Manual SMP series Smart Pyranometer

5.7. MEDICIÓN LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

La medición de la potencia eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos se realizó con un AcuRev 2020, las especificaciones del medidor de las variables eléctricas utilizado se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones AcuRev 2020

Parámetro	Exactitud	Rango	Resolución
kWh	1%	0 a 999999.9 kWh	0,01 kWh
V	0,50%	10 a 400 V	0,1 V
I	0,50%	5mA a 10000A	0,001 A
P	1%	4000 kW	0,1 W
Q	1%	4000 kvar	0,1 var
S	1%	4000 kVA	0,1 kVA

AcuRev 2000 Multi-Circuit Power and Energy Meter

6. DESCRIPCIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Un factor fundamental en el aumento o disminución de la eficiencia de un panel fotovoltaico es la temperatura. Para cuantificar el impacto de la disminución de la temperatura en el incremento de la potencia eléctrica generada por el panel, se realizó una experimentación, que consistió en el desarrollo de una serie de pruebas considerando diferentes flujos de agua en la cara frontal del panel para que actué como refrigerante y a su vez disminuya la suciedad del panel.

Los datos de temperatura se tomaron con un tiempo de muestreo de 15 segundos y se almacenaban en el datalogger PACE XR5-SE.

En la Tabla 8 se muestra el resumen de los experimentos realizados, los cuales tuvieron un periodo de 30 minutos, es decir cada 30 minutos se activaba el riego nuevamente. El experimento número 7 tuvo riego permanente.

Tabla 8. Experimentos realizados

Experimento	Panel fotovoltaico número 1			vs	Panel fotovoltaico número 2		
	Técnica de riego	Tiempo [min]	Caudal [l/min]		Técnica de riego	Tiempo [min]	Caudal [l/min]
1	Película	15	9 a 10		Película	1	9 a 10
2	Película	15	9 a 10		Chorros 10cm	15	3,5 a 4
3	Chorros 10cm	15	3,5 a 4		Chorros 20cm	15	1,5 a 2
4	Chorros 10cm	1	3,5 a 4		Chorros 20cm	1	1,5 a 2
5	Película	15	4 a 5		Película	1	4 a 5
6	Película	1	9 a 10		Chorros 10cm	1	3,5 a 4
7	Película	Permanente	9 a 10		Película	Permanente	4 a 5

La primera prueba consistió en la comparación de las técnicas de película de agua, variando sus tiempos de irrigación. El primer panel fue irrigado con una película de agua y un caudal del 100% (9-10 l/min) con un régimen de irrigación de 15 minutos activo y 15 minutos inactivo. El segundo panel fotovoltaico conservó las mismas características de técnica y caudal, pero variando el régimen de irrigación. Este fue de 1 minuto activo y 29 minutos inactivo. Las gráficas de las mediciones de temperatura de estas pruebas se presentan en el ANEXO B, figuras B1 a B4.

En el segundo experimento el primer panel fotovoltaico tuvo irrigación por película de agua con 100% de caudal y régimen de irrigación de 15 minutos activo y 15 minutos inactivo. El segundo panel fotovoltaico se irrigó mediante chorros de agua separados 10 [cm] con un caudal del 100% (3,5-4 l/min) y el mismo régimen de operación que el primer panel fotovoltaico. Las gráficas de las mediciones de temperatura de estas pruebas se presentan en el ANEXO B, figuras B5 a B8.

En el tercer experimento se usó la misma técnica del riego por chorros, pero variando su separación. En el primer panel fotovoltaico se irrigó por chorros separados 10 [cm] con caudal del 100% y régimen de riego de 15 minutos activo y 15 minutos inactivo. El segundo panel fotovoltaico se irrigó por chorros separados 20 [cm] con un caudal del 100% (1,5-2 L/min) con régimen de irrigación de 15 minutos activo y 15 minutos inactivo. Las gráficas de las mediciones de temperatura de estas pruebas se presentan en el ANEXO B, figuras B9 a B12.

El cuarto experimento mantuvo las técnicas de riego del experimento tres, con la diferencia de que el régimen de riego fue variado. Los tiempos de riego para los dos paneles fotovoltaicos fueron 1 minuto activo y 29 minutos inactivo. Las gráficas de las mediciones de temperatura de estas pruebas se presentan en el ANEXO B, figuras B13 a B16.

El quinto experimento consistió en la técnica de película de agua pero con un caudal del 50% (4-5 l/min). Para el primer panel fotovoltaico el régimen de irrigación fue de 15 minutos activo y 15 minutos inactivo. Para el segundo panel fotovoltaico el régimen de irrigación fue de 1 minuto activo y 29 minutos inactivo. Las gráficas de las mediciones de temperatura de estas pruebas se presentan en el ANEXO B, figuras B17 a B20.

En el sexto experimento se contrastaron de nuevo las técnicas de película de agua contra chorros de agua 10 [cm] pero esta vez con riego activo de 1 minuto e inactivo de 29 minutos. Las gráficas del desarrollo total del experimento a lo largo de los dos días se presentan en el ANEXO B, figuras B.21 a B.24.

Se realizó una prueba extra que consistió en mantener la irrigación de los paneles durante todo el día activada. Uno de los paneles se le aplicó película de agua con caudal del 100%. El otro panel fotovoltaico se le aplicó película de agua con un caudal del 50%. El total de las gráficas del desarrollo del experimento se presentan en el ANEXO B, figuras B.25 a B.28.

6.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para este análisis se mide la relación que existe entre las variables (ya sea directa o inversa) y se establecen las correlaciones entre estas variables y que tan fuerte es este grado de correlación. El parámetro utilizado para medir este grado de relación entre dos variables recibe el nombre de “Coeficiente de Correlación” y puede tener valores entre -1 y +1. Entre más cercano este el valor numérico del coeficiente de correlación a +1 o -1, entonces es mayor el grado de correlación entre las variables y si no están correlacionadas el coeficiente de correlación tiende a cero [31].

Al elevar al cuadrado el coeficiente de correlación se obtiene el coeficiente de determinación (se cumple para la regresión lineal simple), el cual es una medida de la capacidad de la ecuación de regresión para obtener predicciones válidas. Si da un valor de 0 significa que la capacidad de la variable predictora sobre la variable a predecir es nula; si el valor del coeficiente de determinación es 1, la variable predictora permitirá establecer toda la variación de la variable a predecir. Este coeficiente se utiliza para establecer la relación entre la temperatura y la radiación.

$$\rho = R^2$$

Donde ρ es el coeficiente de determinación y R es el coeficiente de correlación.

En la Tabla 3, Tabla 6 y Tabla 7 se presentan las especificaciones de exactitud de los equipos utilizados para medir temperatura, radiación solar y potencia eléctrica. Las incertidumbres que se generan en el proceso de experimentación de las mediciones realizadas con estos equipos son adecuadas para establecer las relaciones entre las variables estimadas en estos procesos de experimentación, a partir de las cuales se establece el comportamiento de los paneles fotovoltaicos en el entorno donde se encuentran instalados.

En la Tabla 9 sólo se presentan los valores estimados sin sus incertidumbres para efectos de claridad en la presentación, sin embargo en el Anexo F se realiza un análisis completo de la estimación de las incertidumbres de cada una de las variables estimadas.

En la Tabla 9 se presenta un resumen con los resultados obtenidos de las mediciones de la temperatura en las pruebas realizadas. La tabla presenta la temperatura de operación del panel y la disminución de temperatura del panel al cual se le aplico riego con respecto al panel sin riego (Panel SR).

Tabla 9. Resultados de las mediciones de la temperatura de operación de los paneles y de la energía consumida por la bomba cada día

Exp.		Técnica	Caudal [l/min]	Tiempo [min]	T. Max [°C]	T. Min [°C]	T. prom total [°C]	Disminución prom T.[°C]
Nº	Día							
1	1	Panel SR	Referencia	Referencia	61,8	27,2	40,38	Referencia
1	1	Película	9 a 10	1	51,45	26,5	35,64	4,74
1	1	Película	9 a 10	15	49,5	26,1	32,23	8,14
1	2	Panel SR	Referencia	Referencia	63,2	27,1	37,5	Referencia
1	2	Película	9 a 10	1	59,1	24,05	33,43	4,07
1	2	Película	9 a 10	15	52,75	24,75	30,72	6,78
2	1	Panel SR	Referencia	Referencia	57,9	28,4	43,56	Referencia
2	1	Película	9 a 10	15	49,85	26,45	33,6	9,96
2	1	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	15	50,55	25,06	33,81	9,74
2	2	Panel SR	Referencia	Referencia	58,3	28,3	45,37	Referencia
2	2	Película	9 a 10	15	50,35	25,45	34,24	11,13
2	2	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	15	51,1	25,7	35,89	9,48
3	1	Panel SR	Referencia	Referencia	58,8	28	43,33	Referencia
3	1	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	15	52,4	24,3	33,91	9,42
3	1	Chorro 20[cm]	1,5 a 2	15	52,45	27,7	36,23	7,09
3	2	Panel SR	Referencia	Referencia	51,7	23,5	35,78	Referencia
3	2	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	15	45,5	22,55	29,64	6,12
3	2	Chorro 20[cm]	1,5 a 2	15	46,45	22,6	30,86	4,91
4	1	Panel SR	Referencia	Referencia	62,6	26,4	41,02	Referencia
4	1	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	1	57,5	24,6	36,78	4,23
4	1	Chorro 20[cm]	1,5 a 2	1	57	25,7	38,36	2,65
4	2	Panel SR	Referencia	Referencia	56,5	26,5	38,83	Referencia
4	2	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	1	51,65	26,5	35,22	3,61
4	2	Chorro 20[cm]	1,5 a 2	1	51,4	26,5	36,32	2,51
5	1	Panel SR	Referencia	Referencia	55,5	27,4	40,71	Referencia
5	1	Película	4 a 5	1	53,95	25	36,65	4,06
5	1	Película	4 a 5	15	49	23,9	32,18	8,53
5	2	Panel SR	Referencia	Referencia	54,3	27,3	40,82	Referencia
5	2	Película	4 a 5	1	55,5	27,05	36,73	4,09
5	2	Película	4 a 5	15	49,85	26,45	32,59	8,23
6	1	Panel SR	Referencia	Referencia	63,4	29,1	47,48	Referencia

Exp.		Técnica	Caudal [l/min]	Tiempo [min]	T. Max [°C]	T. Min [°C]	T. prom total [°C]	Disminución prom T.[°C]
N°	Día							
6	1	Película	9 a 10	1	59,4	27,7	41,28	6,21
6	1	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	1	60,75	28,9	43,01	4,47
6	2	Panel SR	Referencia	Referencia	57	28,8	42,72	Referencia
6	2	Película	9 a 10	1	55,05	28,8	41,62	1,09
6	2	Chorro 10[cm]	3,5 a 4	1	55,95	28,8	41,71	1,01
7	1	Panel SR	Referencia	Referencia	63,4	26,4	39,07	Referencia
7	1	Película	9 a 10	Permanente	38,7	26,3	31,14	7,93
7	1	Película	4 a 5	Permanente	39,4	26,3	31,26	7,81
7	2	Panel SR	Referencia	Referencia	63,1	27,9	45,24	Referencia
7	2	Película	9 a 10	Permanente	38,75	26,25	33,44	11,79
7	2	Película	4 a 5	Permanente	39,1	27,05	33,68	11,56

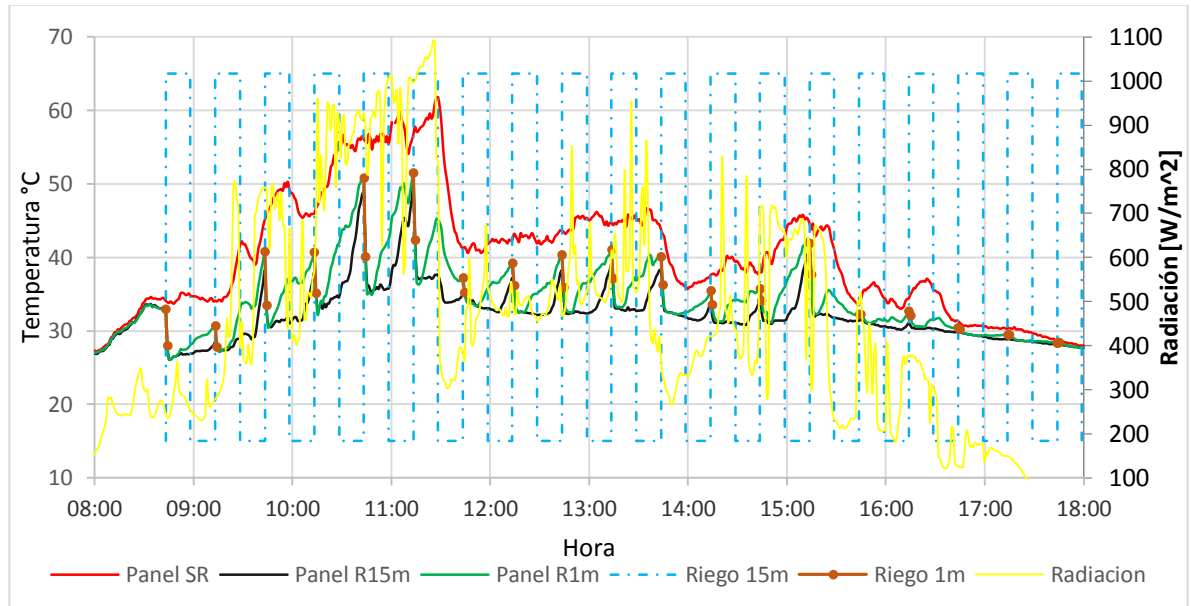
A continuación se presenta en detalle la variación de la temperatura a lo largo del experimento.

6.2. EXPERIMENTO 1: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS.

En la Figura 7 se observa la variación de la temperatura de los paneles respecto al panel de control sin riego (Panel SR), para la prueba de riego por película con intervalos de tiempo de riego de 15 minutos para un panel y de 1 minuto para el otro. Se observa que los tres paneles fotovoltaicos parten con la misma temperatura al inicio de la prueba, además se evidencia que el panel sin riego alcanza las temperaturas más elevadas, entre 50°C y 65°C durante las horas de mayor radiación solar. Por su parte al panel que se le realiza riego por película durante un minuto disminuye rápidamente su temperatura, pero esta reducción dura poco

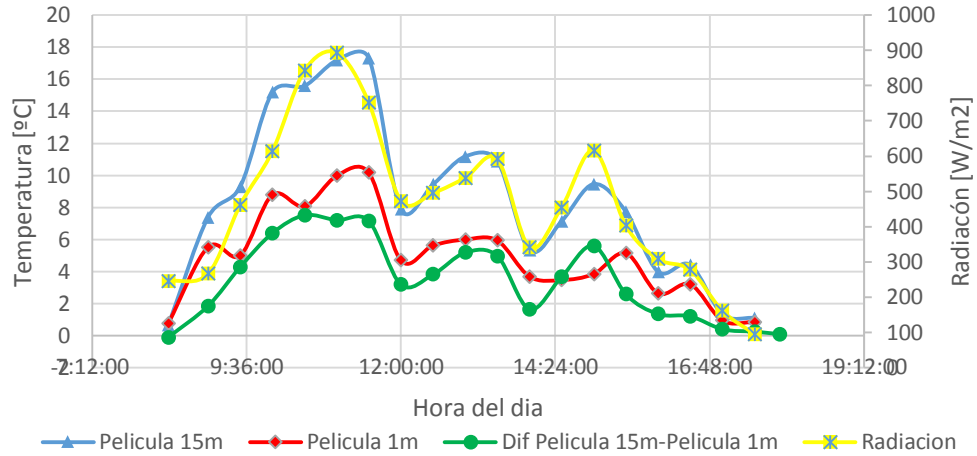
tiempo. En el riego por película durante 15 minutos se observan mejores resultados pues tiende a mantener su temperatura siempre por debajo del panel sin riego, llegando a tener diferencias de hasta 18°C; acercándose más a una temperatura apropiada de operación.

Figura 7. Experimento1- Dia 1, 8-12 am



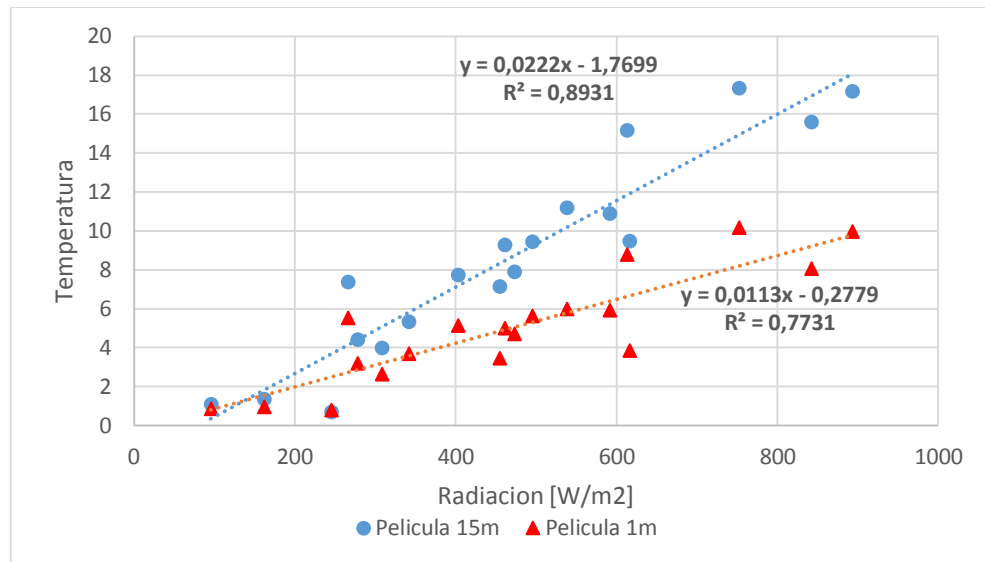
La Figura 8 muestra la reducción de la temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control. En la figura se observa que se obtienen mayores reducciones de temperatura del panel con película de agua durante 15 minutos, con un promedio en la reducción de la temperatura de 8,15°C respecto al panel sin riego.

Figura 8. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 1- Dia 1



En la Figura 9 se observa la correlación existente entre la radiación solar y la reducción de temperatura. La disminución de temperatura es directamente proporcional a la radiación solar; a mayor radiación mayor es la reducción en la temperatura. Como se puede ver en esta figura, cuando la radiación solar tiene valores inferiores a $300\text{[W/m}^2\text{]}$, el aplicar riego a los paneles no genera cambios importantes en la temperatura respecto al panel de control. Por otro lado el coeficiente de determinación del riego por película durante 15 minutos es de 0,89; por consiguiente, existe una buena correlación entre las variables de temperatura y radiación solar debido a que es un valor cercano a 1. La totalidad de las gráficas de análisis se pueden encontrar en el ANEXO C, figuras C.1 a C.7.

Figura 9. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 1, día 1

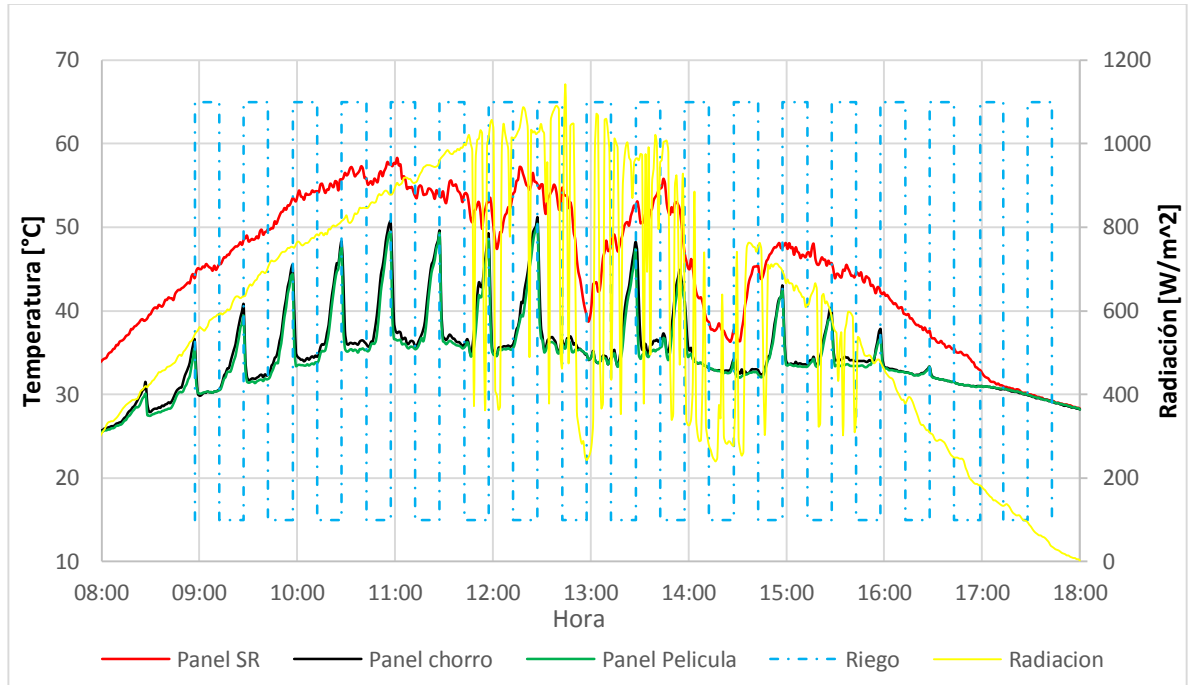


6.3. EXPERIMENTO 2: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN UNA CON PELÍCULA DE AGUA Y OTRA DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 15 MINUTOS.

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos de la medición de temperatura de operación de los paneles fotovoltaicos considerando dos tipos de irrigación con igual tiempo de riego (15 minutos) e igual período de experimentación (30 minutos).

En la Figura 10 se muestra la variación de la temperatura a lo largo de un día. En ella se puede observar la temperatura de operación de los paneles fotovoltaicos para las diferentes técnicas de irrigación y para el panel de control, además de la radiación solar.

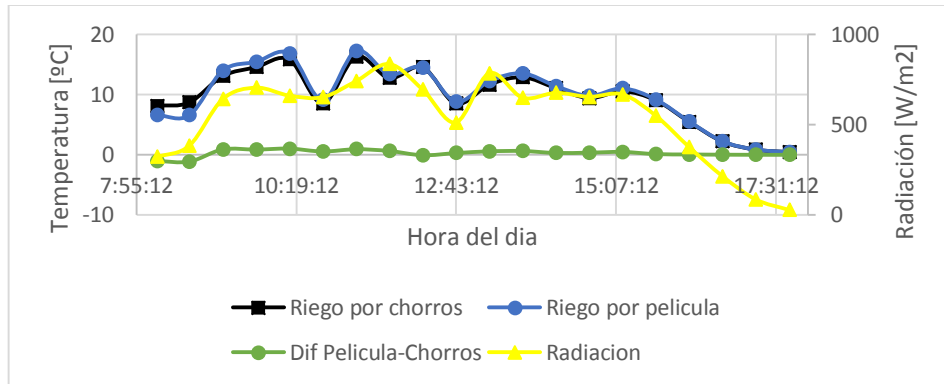
Figura 10. Experimento 2-Día 2, 8-1 pm



En la Figura 10 se observa que el comportamiento de temperatura del panel con chorro y del panel con película es muy similar y cumplen con el objetivo de mantener la temperatura por debajo de la del panel de control. Además es un hecho a resaltar que el caudal de la técnica de chorro (3.5-4 l/min) es menor que el caudal de la técnica de película (9-10 l/min) y aun así consigue mantener un comportamiento muy similar, lo que da a entender que no es necesario que la técnica de película de agua emplee un caudal de esa magnitud.

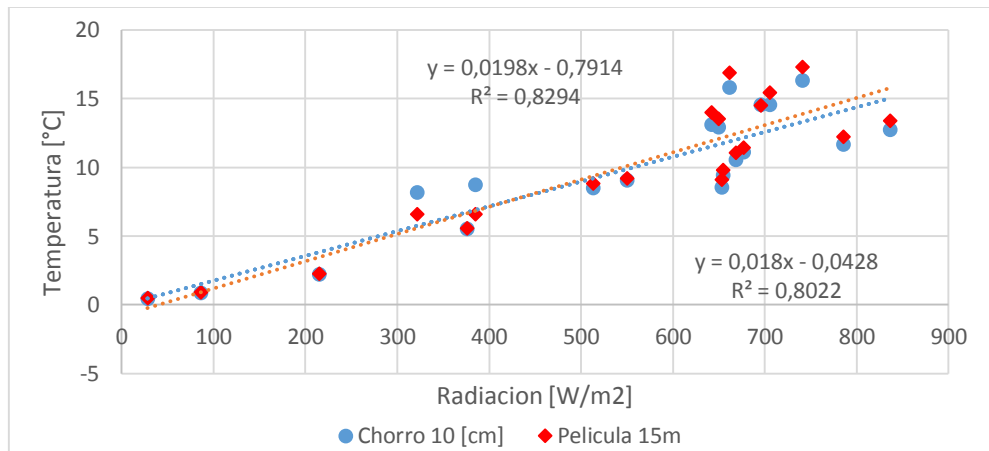
En la Figura 11 se observa la reducción de la temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control. En ella se corrobora que el comportamiento de la reducción de la temperatura en los paneles, es similar en ambas técnicas a lo largo del día. También se observa que se alcanzó una diferencia máxima de 17,27 °C y un promedio durante este día de 9,96 °C.

Figura 11. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 2- Dia 1.



La Figura 12 presenta la correlacion entre la temperatura de los paneles y la radiación solar del dia 1 del experimento 2. En ella se observa que la mayor concentración de puntos y donde hay mayor reducción de temperatura con respecto al panel de control es cuando la radiación solar es alta. Al igual que el experimento 1, se puede afirmar que para radiaciones menores a 250 [W/m²] la reducción es muy baja siendo de cierta manera innecesario el riego. Las gráficas de análisis para el total de los datos se pueden observar en el ANEXO C, figuras C.8 a C.14.

Figura 12. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 2, día 1



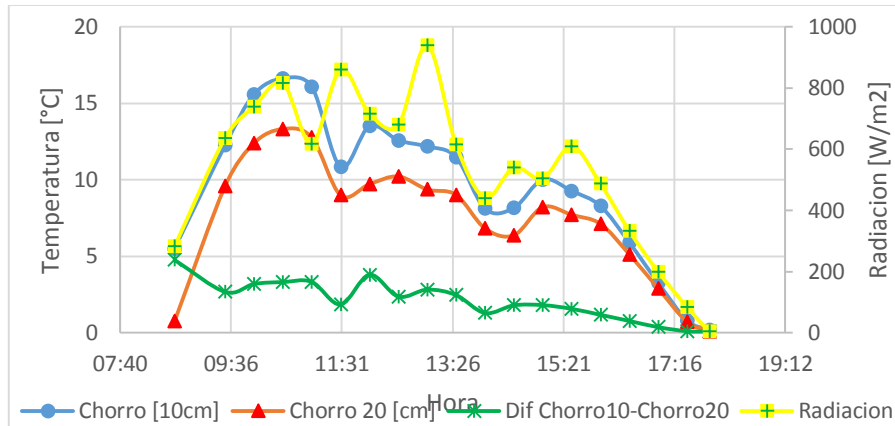
6.4. EXPERIMENTO 3: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (15 MINUTOS) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.

Este tercer experimento se diseñó para comparar la misma técnica de irrigación con chorros de agua, pero variando la distancia entre ellos, con lo cual se tienen dos caudales diferentes de agua. En el ANEXO B figuras B.9 a B.12 se muestra el comportamiento de la temperatura de operación de los paneles durante el desarrollo del experimento.

En estas figuras se logra evidenciar que tanto los chorros de agua separados 10 [cm] como los separados 20 [cm] son efectivos para la disminución de la temperatura de operación de los paneles, logrando reducir en promedio la temperatura para un día de operación en 9,4 °C y 7,1°C respectivamente.

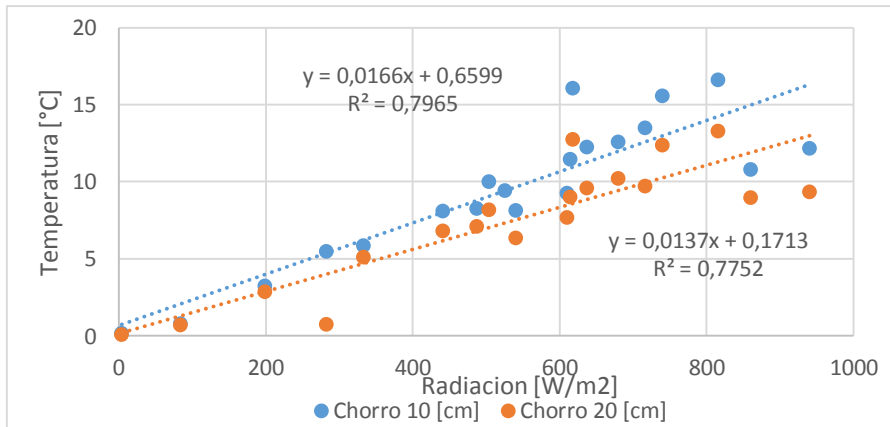
En la Figura 13 se presenta la reducción de las temperaturas promedio con respecto al panel control (sin riego) para un día de operación, además está incluida una curva donde se muestra la diferencia de las temperaturas del panel irrigado con los chorros de agua separados 10[cm] y el panel irrigado con los chorros de agua separados 20[cm]. Esto con el fin de observar cuál de los dos es más efectivo, ya que anteriormente se corroboró que los dos métodos reducían la temperatura de operación de los paneles. La temperatura de los chorros de agua separados 10 [cm] estuvo en promedio 2,3 °C por debajo de los chorros de agua separados 20 [cm] con una diferencia máxima de 3,79 °C. La totalidad de las gráficas del comportamiento de la temperatura para este experimento se encuentran en el ANEXO C, figuras C.15 a C.21.

Figura 13. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 3- Dia 1.



La Figura 14 presenta la correlación entre la temperatura de los paneles y la radiación solar del día 1 del experimento 3. En esta se observa que la mayor reducción de temperatura con respecto al panel de control es cuando la radiación solar es alta; para este día de operación se logró una máxima reducción de temperatura de 16,6 °C para los chorros de agua separados 10 [cm] y 13,3 °C para los chorros de agua separados 20 [cm]. Al igual que el experimento 1 y 2, se puede afirmar que para radiaciones menores a 250 [W/m²] la reducción es muy baja (5°C) siendo de cierta manera innecesario el riego.

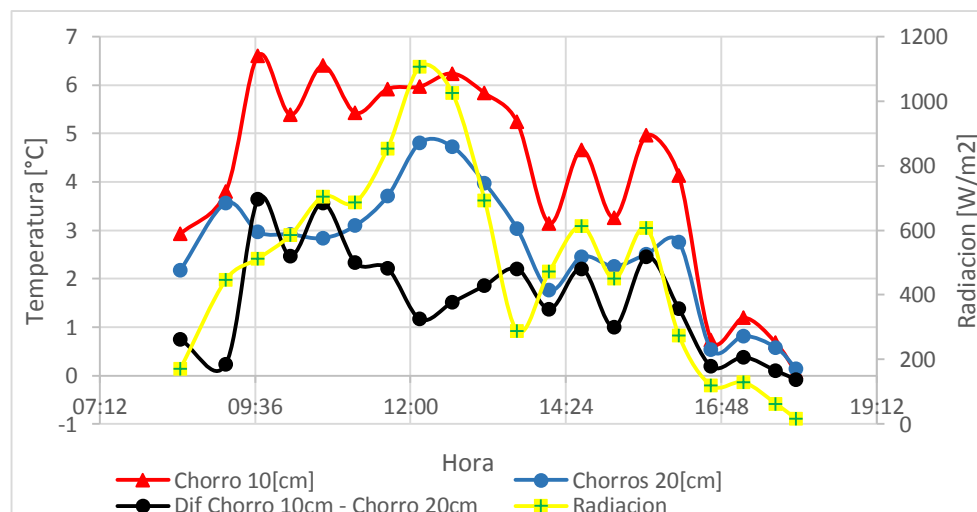
Figura 14. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 3, día 1



6.5. EXPERIMENTO 4: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (1 MINUTO) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.

En la Figura 15 se observa que el riego con chorros de agua separados 10 [cm] es más efectivo en la reducción de la temperatura de operación del panel fotovoltaico. En promedio los chorros de agua separados 10 [cm] logran disminuir la temperatura en 4,23 °C, mientras que los chorros de agua separados 20 [cm] logran disminuir en promedio la temperatura del panel 2,67 °C. Las gráficas relacionadas con este experimento se presentan en el ANEXO C, figuras C.22 a C.27.

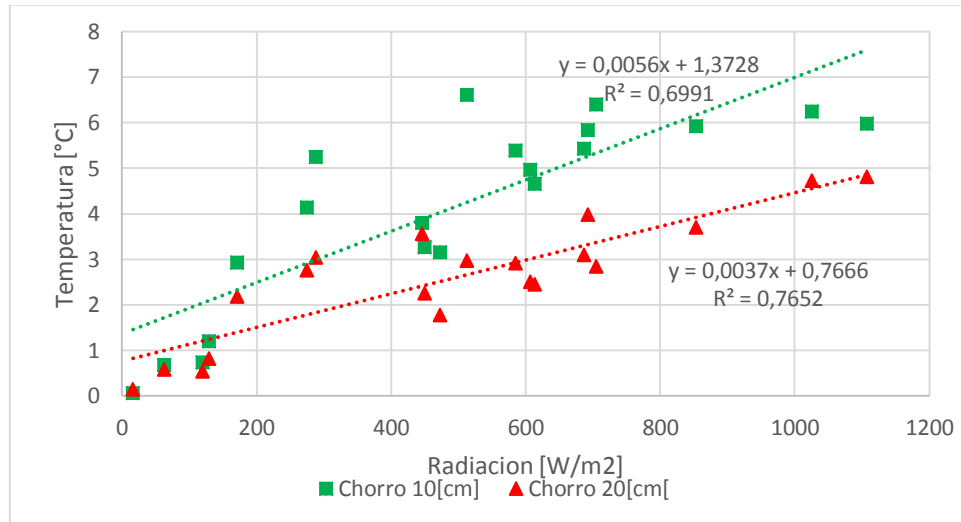
Figura 15. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 4 - Dia 1.



En la Figura 16 se observa la correlación que existe entre la temperatura de los paneles y la radiación solar. A pesar que se tuvieron radiaciones superiores a 1000 [W/m²] el descenso de temperatura de los paneles con un riego activo no superó los 7 [°C]. Este descenso en temperatura no reflejaría un cambio considerable en la

potencia generada por los paneles fotovoltaicos. A pesar de esto se observa un mejor comportamiento del panel con riego por chorros 10 [cm] pues tiene una pendiente más pronunciada que el riego por chorros 20[cm].

Figura 16. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 4 - Día 1.



6.6. EXPERIMENTO 5: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS. EL CAUDAL DE LA PELÍCULA DE AGUA ES DEL 50% CON RESPECTO AL EXPERIMENTO 1.

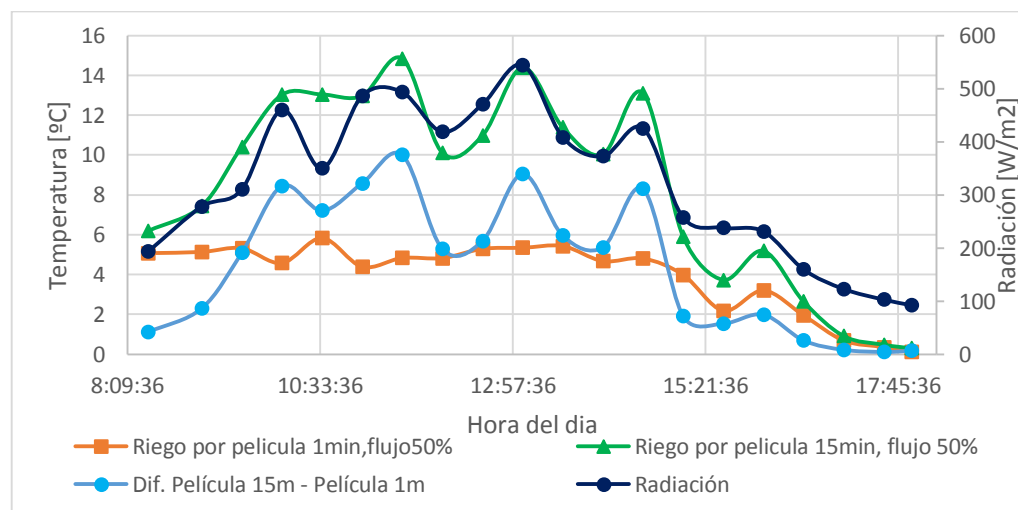
El objeto de este experimento es establecer si con menor caudal de agua (el 50% con respecto al Experimento 1), el efecto de reducción de la temperatura de los paneles fotovoltaicos permanecía. El diseño de este experimento es idéntico al realizado en el Experimento 1; es decir el sistema de riego de un panel es con película de agua con intervalos de tiempo de riego de 15 minutos y el en el otro

panel el tiempo de riego es de 1 minuto. En ambos casos el periodo de experimentación establecido es de 30 minutos.

En las gráficas presentadas en el ANEXO B, figuras B.17 a B.20 se observa que el riego por 15 minutos es más efectivo en la reducción de la temperatura que el riego por un minuto.

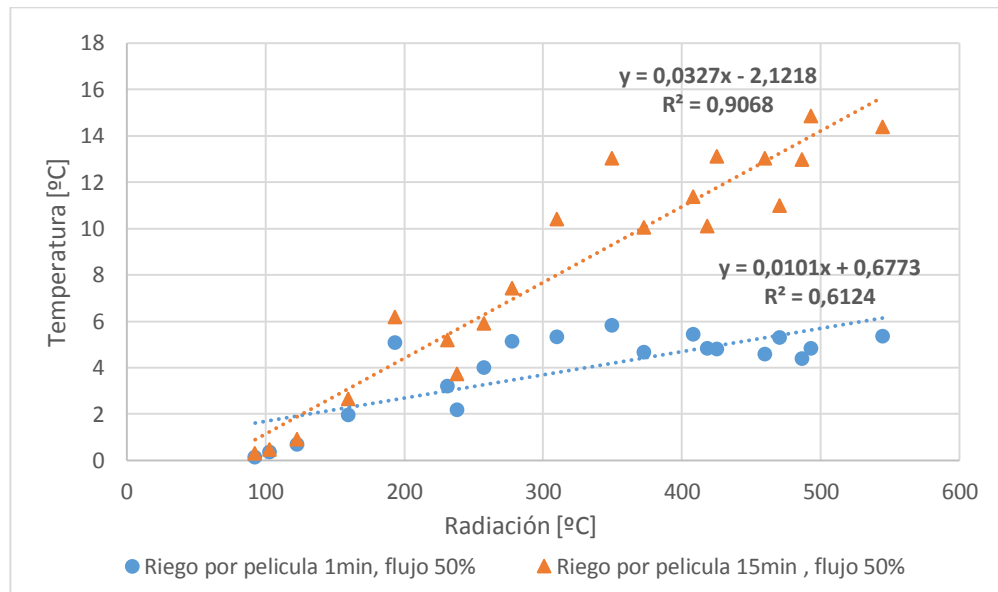
En la Figura 17 se muestran las diferencias promedio de las temperaturas de los paneles irrigados con respecto al panel de control. Estos promedios fueron obtenidos por intervalos de 30 minutos. Se observa en esta figura, la mayor efectividad en la reducción de la temperatura del riego con película de agua cada 15 minutos, alcanzando una reducción máxima de 14,8 °C con respecto al panel de control, mientras que el riego por película de agua cada minuto tuvo una reducción máxima de 5,83 °C. Además en promedio durante la prueba de este día el riego por película de agua cada 15 minutos redujo la temperatura en 8,53 °C en contraste con el panel con riego por película de agua cada minuto, que redujo la temperatura del panel en 4,06 °C.

Figura 17. Diferencias promedio de las temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 5 - Dia 1.



El descenso de la temperatura de los módulos fotovoltaicos es linealmente proporcional a la radiación solar cuando se aplica riego, como se muestra en la Figura 18. Con un riego activo de película de agua cada minuto y flujo de 50%, el coeficiente de correlación no es concluyente pues se observa una gran dispersión de los datos, pero se aprecia que la influencia en la disminución temperatura no supera los 6 °C. Por otro lado el riego por película de agua cada 15 minutos y flujo de 50% nos confirma que los efectos de ambos riegos son diferentes a pesar de tener los mismos caudales; si se evalúa la ecuación del riego con duración de 15 minutos a una radiación de 1000 W/m² la temperatura de operación del panel fotovoltaico lograría descender hasta 30°C. Las gráficas de estos análisis se presentan en el ANEXO C, figuras C.28 a C.33.

Figura 18. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 5 - Día 1.

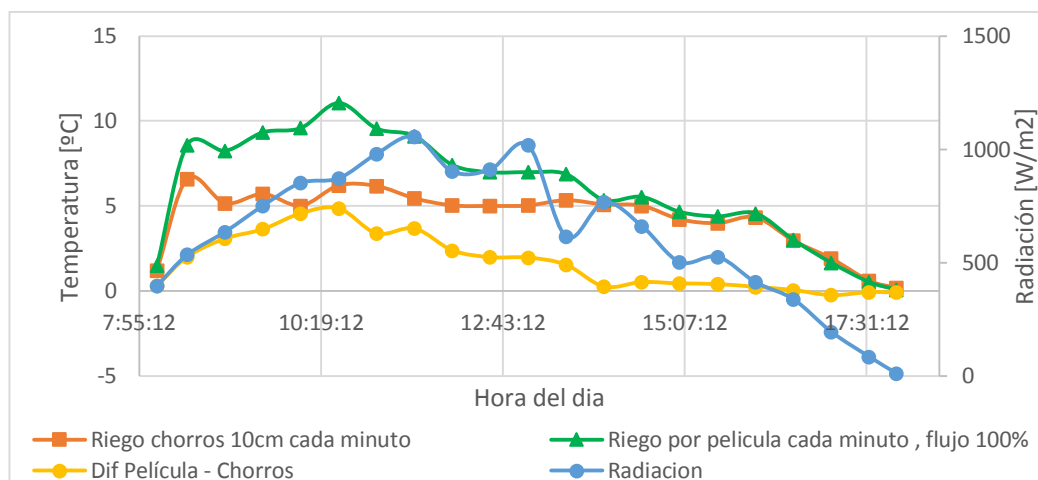


6.7. EXPERIMENTO 6: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN UNA CON PELÍCULA DE AGUA Y OTRA DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 1 MINUTO.

Este experimento es similar al 2, se diferencia en que el tiempo de riego se cambia de 15 minutos a 1 minuto. El período de experimentación es el mismo en ambos casos (30 minutos). Las figuras con los resultados obtenidos en este experimento se presentan en el ANEXO B, figuras B.21 a B.24. En ellas se observa que cuando la radiación solar es menor a 400 [W/m²], el riego es de cierta manera innecesario, pues las temperaturas de los paneles irrigados son similares al del panel sin irrigación.

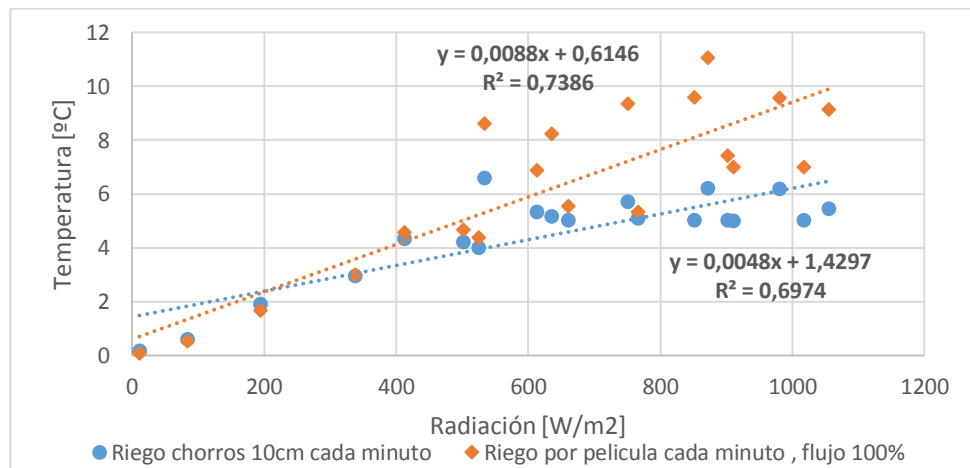
En la Figura 19 se muestran las diferencias promedio de las temperaturas de los paneles irrigados con respecto al panel sin riego. En ella se observa que hay pequeñas diferencias entre los dos métodos de irrigación cuando la radiación solar aumenta. En promedio, la disminución de la temperatura del panel irrigado con película de agua fue de 6,2 °C; mientras que la reducción de temperatura del panel irrigado con chorros de agua fue en promedio de 4,47°C.

Figura 19. Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control



En la Figura 20 se observa la correlación que existe entre la temperatura de los paneles y la radiación solar. Para el panel sin riego por cada incremento de 100 [W/m²] de la radiación solar incrementa su temperatura 3,09 °C, mientras que los paneles irrigados aumentan en menor proporción la temperatura. El panel con película de agua aumenta 2,18 °C y el panel con chorros 2,58 °C, corroborando una vez más que son similares los efectos de los dos métodos en la reducción de la temperatura en los paneles fotovoltaicos.

Figura 20. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 6 - Día 1.

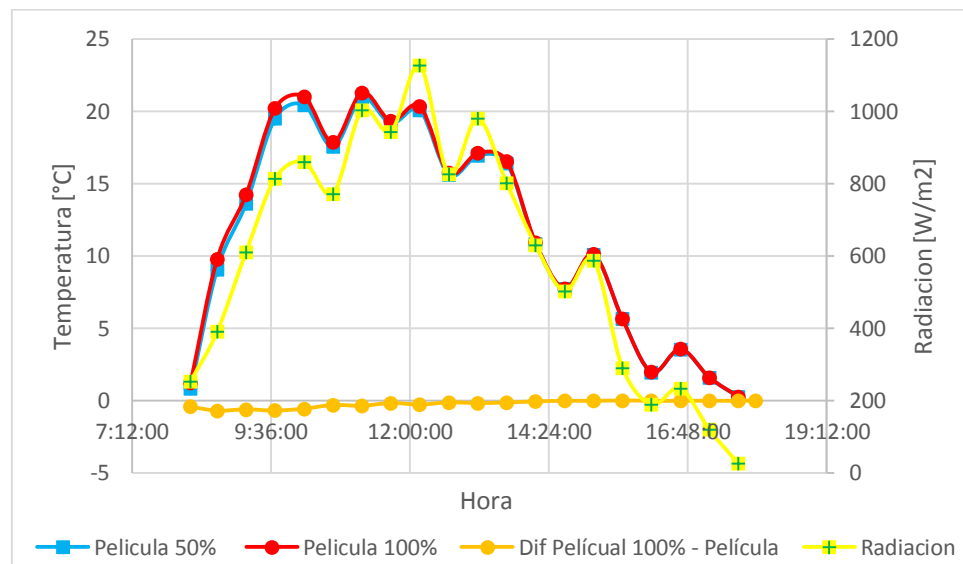


6.8. EXPERIMENTO 7: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN PERMANENTE CON PELÍCULA DE AGUA. EL CAUDAL DE LA PELÍCULA DE AGUA DE UN PANEL ES DEL 50% CON RESPECTO AL OTRO.

En la Figura 21 se observa que los resultados de las mediciones de temperatura de los paneles durante este experimento, presentan un comportamiento similar para las dos condiciones de riego (caudal 100% y caudal 50%). A lo largo de todo el día efectivamente logran disminuir la temperatura de sus respectivos paneles. Sin

embargo cuando la radiación alcanza picos mínimos de $250 \text{ [W/m}^2\text{]}$ esta diferencia de temperatura con respecto al panel sin riego se reduce considerablemente. Caso contrario cuando la radiación es superior a $950 \text{ [W/m}^2\text{]}$ existiendo por ejemplo una diferencia de 21°C por citar un caso. Además cabe destacar que la película 50% opera con la mitad del caudal que la película 100% obteniendo resultados similares en la disminución de la temperatura. Esto quiere indicar que la película 100% está bombeando un flujo mayor, sin necesidad.

Figura 21. Diferencias promedio de la temperatura de los paneles con riego con respecto al panel de control (sin riego). Experimento 7 - Día 2.

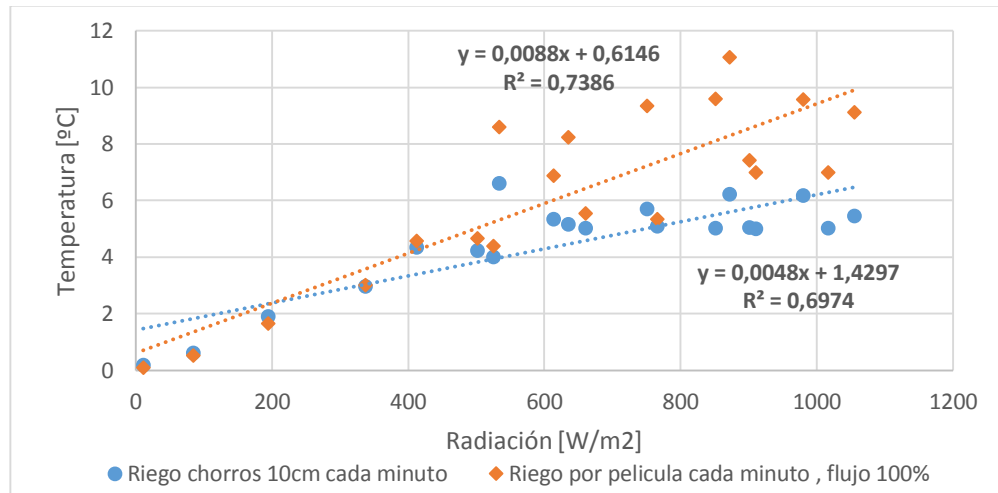


En el Anexo B, figuras B.25 a B.28 se encuentra el comportamiento de las temperaturas a lo largo de todo el experimento. Por otra parte en el Anexo C, figuras C.39 a C.44 se presentan las gráficas del análisis.

En la Figura 22 se observa la correlación que existe entre el descenso de la temperatura de los paneles y la radiación solar. Observamos un mayor descenso de la temperatura del panel con riego por película respecto al panel con riego por chorros $10[\text{cm}]$, pero a pesar de tener datos con radiaciones superiores a 1000W/m^2 .

el descenso de la temperatura no superó los 10°C (en la mayoría de los datos) en ninguna de las dos pruebas.

Figura 22. Correlación entre la diferencia promedio de temperatura y la radiación solar promedio. Experimento 6 - Día 1.



Finalmente analizados estos resultados se puede observar que los métodos que logran reducir mayormente la temperatura del panel son película de agua permanente con caudal de 50 y 100%, película por 15 minutos y chorros 10 [cm] con riego de 15 minutos. Pero se destaca el método chorros 10[cm] el cual presenta resultados similares a los otros dos y cuenta con el caudal más bajo (3,5-4 lt/min) lo que nos representa un ahorro de agua.

7. ANÁLISIS DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Como se estableció en el Capítulo 4, los equipos de medición utilizados para estimar las variables que determinan el comportamiento de los paneles fotovoltaicos se seleccionaron con las exactitudes requeridas para la experimentación que se realizó.

Para el análisis del comportamiento de la potencia eléctrica generada por los paneles para las diferentes situaciones planteadas en la experimentación sólo se utilizarán los valores estimados (sin la incertidumbre asociada) de las variables: potencia, temperatura y radiación solar. En el Anexo F se realiza un análisis completo de la estimación de las incertidumbres de cada una de las variables estimadas.

El cálculo de la eficiencia de los paneles se llevó a cabo con la siguiente fórmula.

$$n\% = \frac{Pg}{Area * Radiacion}$$

Donde Pg es la potencia generada por el panel.

En las Figura 23 a Figura 25 se verifica la relación existente entre la potencia eléctrica adicional generada y la disminución de la temperatura de los paneles fotovoltaicos para diferentes condiciones de irrigación. Los mejores resultados se obtienen cuando se aplica irrigación continua (Figura 23), obteniendo una generación adicional de potencia de hasta 19,69 W. Esto sucede cuando se disminuye la temperatura en 20,81 °C y hay una radiación superior a 1000 W/m². La potencia adicional generada en las otras dos pruebas mostradas alcanza valores de 17,75 W con irrigación por película con duración de 15 minutos (Figura 24), y valores

similares en la prueba de chorros y película con duración de 15 minutos (Figura 25) con un pico máximo de 12,38W. Las diferencias en estos resultados se encuentra en la radiación, pues en ninguno de estos dos días la radiación supero los 1000 W/m².

La potencia nominal de la bomba usada para la experimentación es de 22 W, pero no quiere decir que el experimento no sea viable, pues se puede lograr el mismo flujo de agua si la altura de instalación es menor y se puede irrigar con la misma cantidad de agua pero con una bomba de menor potencia. Por consiguiente, para replicar el experimento se puede utilizar una bomba de menor potencia.

Figura 23. Delta de potencia [W] y Delta de temperatura [°C], irrigación de película de agua permanente con caudales del 100% y del 50%

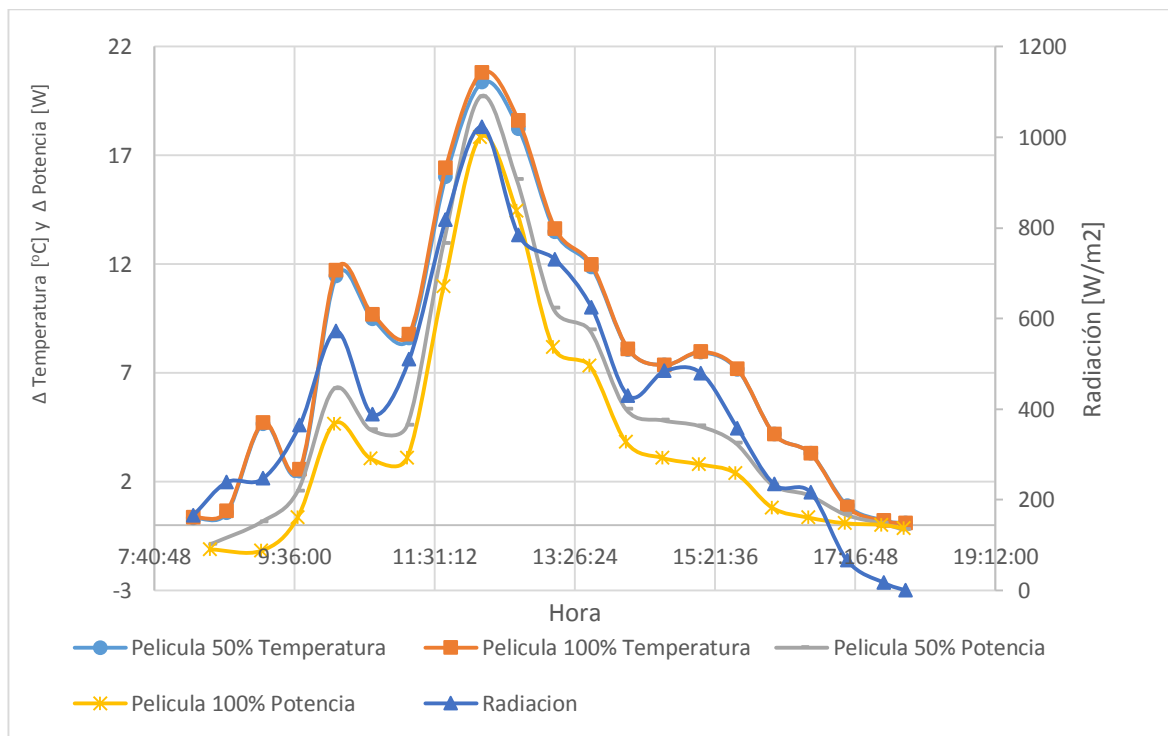


Figura 24. Delta de potencia [W] y Delta de temperatura [°C], irrigación de película de agua con duraciones de 1min y 15min

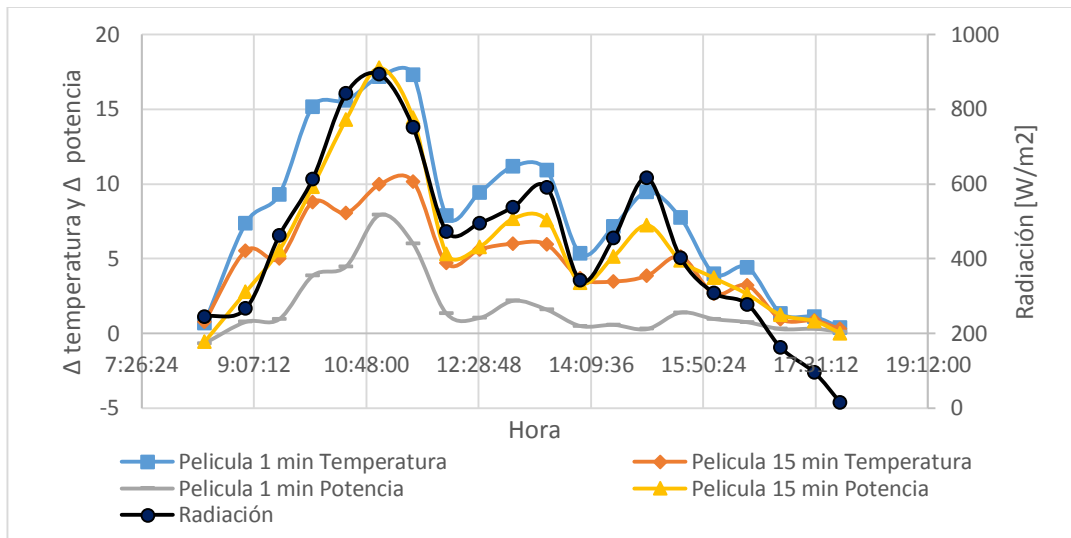
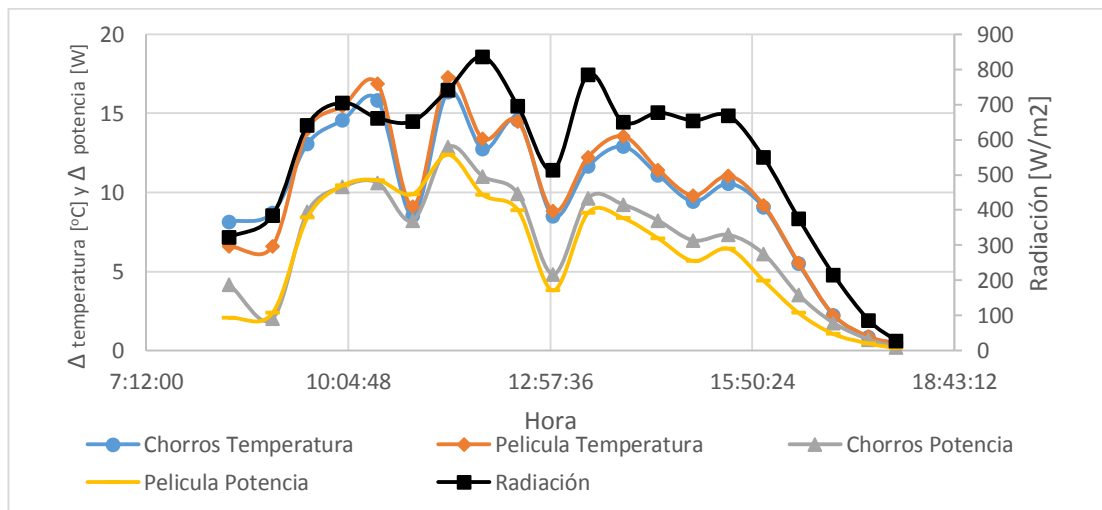


Figura 25. Delta de potencia [W] y Delta de temperatura [°C], irrigación de película de agua y chorros de agua separados cada 10cm y duración de 15 minutos



A continuación se presenta en detalle los resultados de cada uno de los experimentos realizados. Donde se presenta una tabla con el delta de temperatura, potencia generada promedio, energía consumida por la bomba, aumento de energía

generada por el panel fotovoltaico, la eficiencia y el aumento de la eficiencia de los paneles con riego respecto al panel sin riego.

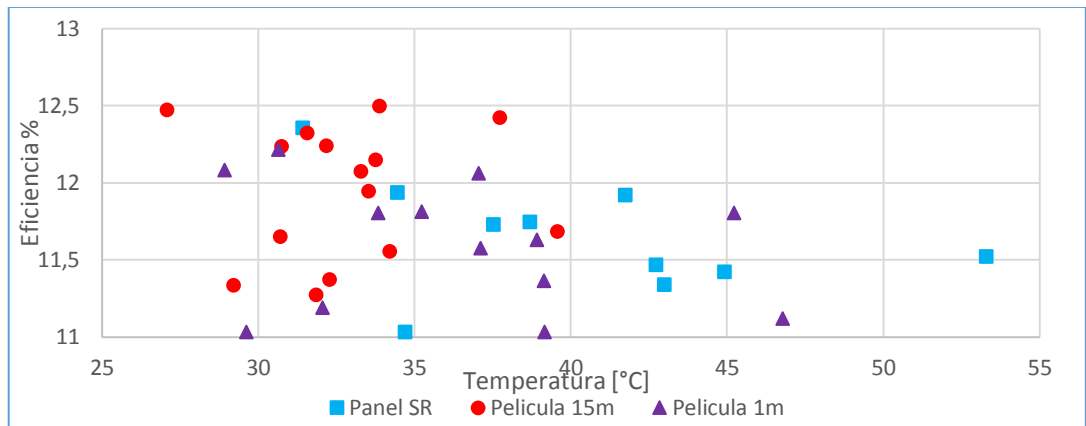
7.1. EXPERIMENTO 1: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS.

Los resultados de este experimento arrojaron que el 87% del tiempo de la prueba, el panel irrigado durante 15 minutos generó más potencia que el panel sin riego. Esta potencia generada fue en promedio 102,96 [W] superando a la potencia generada por el panel sin riego en 5,95 [W]. A su vez el panel irrigado durante 1 minuto también generó más potencia que el panel sin riego durante el 57% del tiempo de la prueba, generando en promedio 98,69 [Watts] superando al panel sin riego en tan solo 1,6 [W].

Una condición a tener cuenta fue la radiación solar. Para valores menores a 400 [W/m²] las potencias generadas por los tres paneles fotovoltaicos (Panel sin riego, panel con película 15 minutos y panel con película 1 minuto) eran muy similares a pesar del riego. Cuando la radiación superaba los 1000 [W/m²] el panel con riego de 15 minutos alcanzó a generar hasta 35,75 [Watts] más que el panel sin riego.

En la Figura 26 se presenta la variación de la eficiencia en función de la temperatura. Se observa como a medida que la temperatura es más elevada la eficiencia del panel disminuye. El panel sin riego alcanzó las eficiencias más bajas, caso contrario a los paneles con irrigación. Además se observa que las eficiencias más altas se presentaban en el panel con riego de 15 minutos, alcanzando una eficiencia hasta de 12,5%.

Figura 26. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 1.



En la Tabla 10 se muestran en resumen los resultados relevantes del experimento.

Tabla 10. Resultados del experimento 1

Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	T prom total [°C]	Δ Temp. prom [°C]	Consumo de bomba [Wh]/día	P. Generada prom. [W]	Aumento de energía [Wh]/día	n prom. [%]	Mejora n%
1	Sin riego	Ref	Ref	40,38	Ref.	Ref.	97,008	Ref.	10,8	Ref.
1	Película	15	9 a 10	32,23	8,14	104,5	102,96	56,52	11,5	5,34
1	Película	1	9 a 10	35,64	4,74	6,966	98,69	15,96	11	1,65
2	Sin riego	Ref	Ref	37,5	Ref.	Ref.	78,84	Ref.	10,8	Ref.
2	Película	15	9 a 10	30,72	6,78	104,5	81,44	24,7	11,05	2,33
2	Película	1	9 a 10	33,43	4,07	6,96	80,16	12,54	10,97	1,72

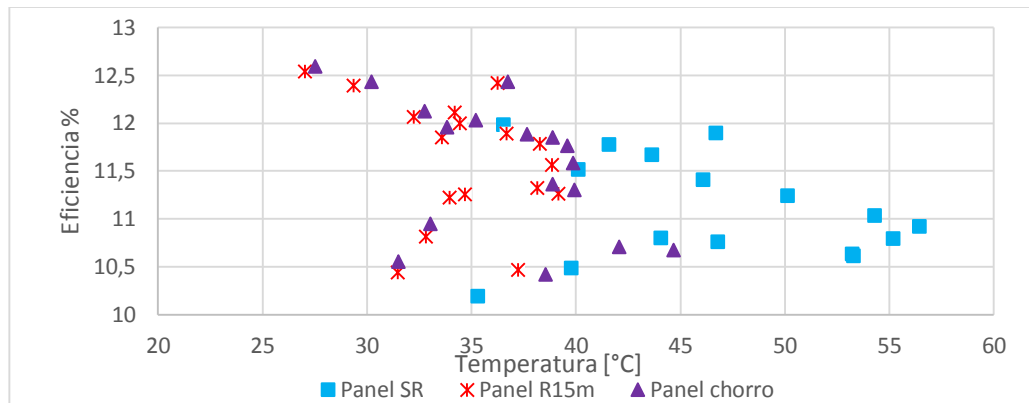
7.2. EXPERIMENTO 2: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN UNA CON PELÍCULA DE AGUA Y OTRA DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 15 MINUTOS.

En las gráficas del ANEXO D, figuras D.5 a D.8 es evidente que aplicar irrigación al panel ayuda a generar más potencia respecto a el panel sin riego, pero como se mencionó anteriormente para radiaciones menores a $400 \text{ [W/m}^2\text{]}$ el riego es innecesario pues la potencia generada es la misma tanto para los paneles con riego como para el panel sin riego. El mayor beneficio se da cuando las radiaciones son altas. El comportamiento de las curvas de potencia de los paneles con riego es muy similar a pesar de que los flujos de agua son diferentes. Caso similar a lo ocurrido en el análisis de temperatura de operación del panel. En este experimento los paneles con irrigación generaron más potencia que el panel sin riego durante el 90% del tiempo de la prueba.

En promedio el panel sin riego generó $119,2 \text{ [W]}$, mientras que el panel con irrigación por chorros generó en promedio $125,97 \text{ [W]}$ similar a lo generado por el panel con irrigación por película de agua.

En la Figura 27 se presenta la variación de la eficiencia en función de la temperatura. Se observa como a medida que la temperatura es más elevada la eficiencia del panel disminuye. El panel sin riego alcanzó las eficiencias más bajas, caso contrario a los paneles con irrigación.

Figura 27. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 2.



En la Tabla 11 se muestran en resumen los resultados relevantes del experimento.

Tabla 11 Resultados del experimento 2

Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	T prom total [°C]	Δ Temp. prom [°C]	Consumo de bomba [Wh]/día	P. Generada prom [W]	Aumento de energía [Wh]/día	n prom[%]	Mejora n%
1	Sin riego	Ref.	Ref.	43,56	Ref.	Ref.	114,71	Ref.	10,72	Ref.
1	Chorro 10cm	15	4 a 5	33,81	9,74	104,5	121,51	64,6	11,32	5,65
1	Película 15m	15	9 a 10	33,6	9,96	104,5	120,87	58,52	11,24	4,87
2	Sin riego	Ref.	Ref.	45,37	Ref.	Ref.	123,78	Ref.	10,71	Ref.
2	Chorro 10cm	15	4 a 5	35,89	9,48	104,5	130,44	63,27	11,21	4,61
2	Película 15m	15	9 a 10	34,24	11,13	104,5	130,91	67,73	11,23	4,83

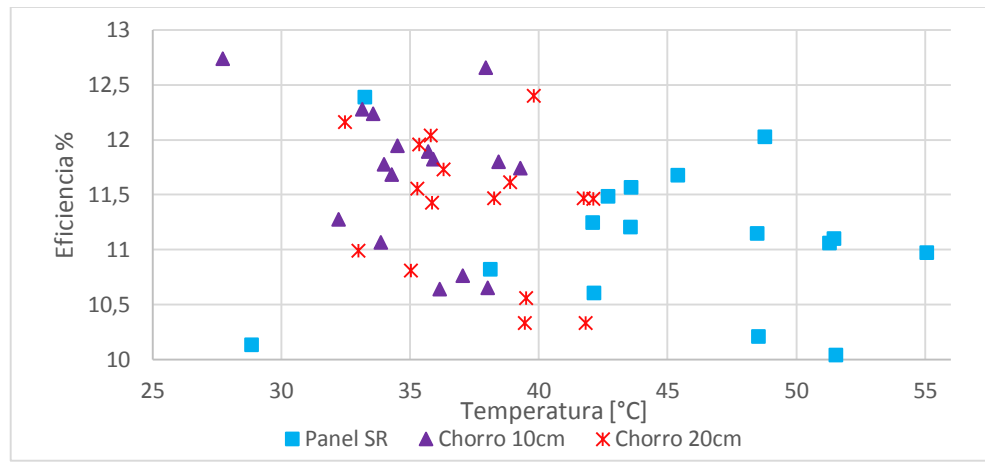
7.3. EXPERIMENTO 3: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (15 MINUTOS) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.

En las gráficas presentadas en el ANEXO D, figuras D.9 a D.12 se puede apreciar que el panel irrigado con chorros separados 10 [cm] genera más potencia que el panel sin riego. Este panel con irrigación generó en promedio 4,5% más potencia que el panel de control, mientras que el panel con irrigación con chorros separados 20 [cm] generó en promedio 2% más potencia que el panel de control.

A simple vista se puede observar en estas gráficas que el panel con chorros 10[cm] es el más efectivo. Durante el 91% del tiempo de la prueba la potencia generada por este panel fue mayor a la potencia generada por el panel sin riego. Y durante el 90,5% del tiempo este panel generó más potencia que el panel con chorros separados 20 [cm].

En la Figura 28 se observa el comportamiento de la eficiencia en función del tiempo. Se observa que la mayor concentración de puntos para las eficiencias más altas son las pertenecientes a los paneles con irrigación. Mientras que la mayoría de los puntos referentes al panel sin riego se concentran en bajas eficiencias debido a la alta temperatura de operación del panel.

Figura 28. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 3.



En la Tabla 12 se muestran en resumen los resultados relevantes del experimento.

Tabla 12. Resultados del experimento 3

Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	T prom total [°C]	Δ Temp. prom [°C]	Consumo de bomba [Wh]/día	P. Generada prom [W]	Aumento de energía [Wh]/día	n prom [%]	Mejora n%
1	Sin riego	Ref.	Ref.	43,33	Ref.	Ref.	112,12	Ref.	10,83	Ref.
1	Chorro 10cm	15	3,5 a 4	33,91	9,42	99	118,27	55,35	11,34	4,69
1	Chorro 20cm	15	1,5 a 2	36,23	7,09	99	115,29	28,53	11,07	2,27
2	Sin riego	Ref.	Ref.	35,78	Ref.	Ref.	85,42	Ref.	11,28	Ref.
2	Chorro 10cm	15	3,5 a 4	29,64	6,12	104,5	88,39	28,22	11,59	2,66
2	Chorro 20cm	15	1,5 a 2	30,86	4,91	104,5	86,47	9,98	11,38	0,96

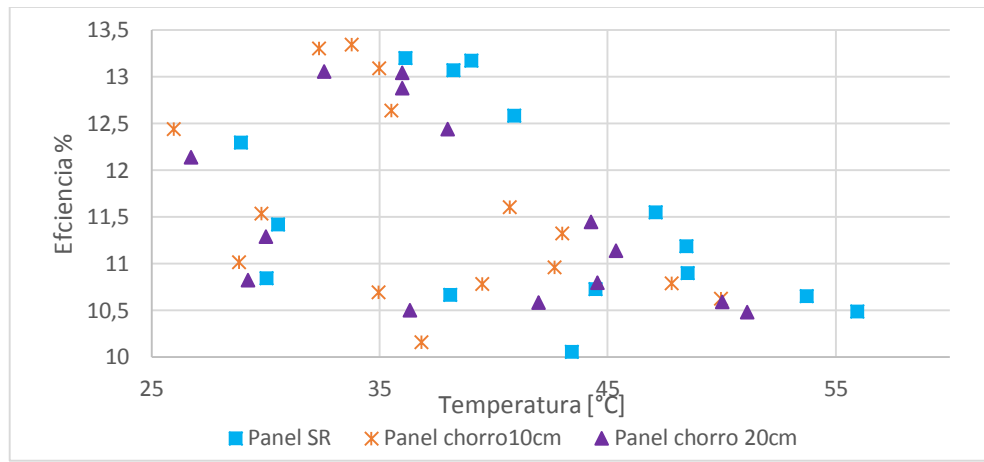
7.4. EXPERIMENTO 4: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON CHORRO DE AGUA PARA DOS SEPARACIONES DISTINTAS 10[CM] Y 20[CM] CON IGUAL TIEMPO DE RIEGO (1 MINUTO) Y UN PERÍODO DE 30 MINUTOS.

Para esta prueba se observa en las gráficas que las potencias generadas por los tres paneles fotovoltaicos se asemejan bastante (ANEXO D, figuras D.13 a D.16). Solo hay unos pequeños intervalos en donde los paneles con irrigación generan más que el panel de control, esto se da justamente cuando la radiación es alta y se aplica el riego en los paneles. En promedio el panel de chorro 10[cm] generó más potencia que el panel de control durante el 54% del tiempo de la prueba, mientras que el panel con chorros 20[cm] solo el 17% del tiempo. No obstante la diferencia promedio fue solo de 1 [W] más generado que el panel sin riego.

En la Figura 29 se observa que los puntos de eficiencia para cada experimento se concentran unos muy cercanos a otros dada cierta temperatura, lo que traduce en muy poca variación entre los paneles con irrigación y el panel sin irrigación.

Esto permite deducir que aplicar riego solo durante un minuto no es lo suficientemente adecuado para mejorar la potencia generada y la eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico.

Figura 29. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 4.



En la Tabla 13 se muestran en resumen los resultados relevantes del experimento.

Tabla 13. Resultados del experimento 4

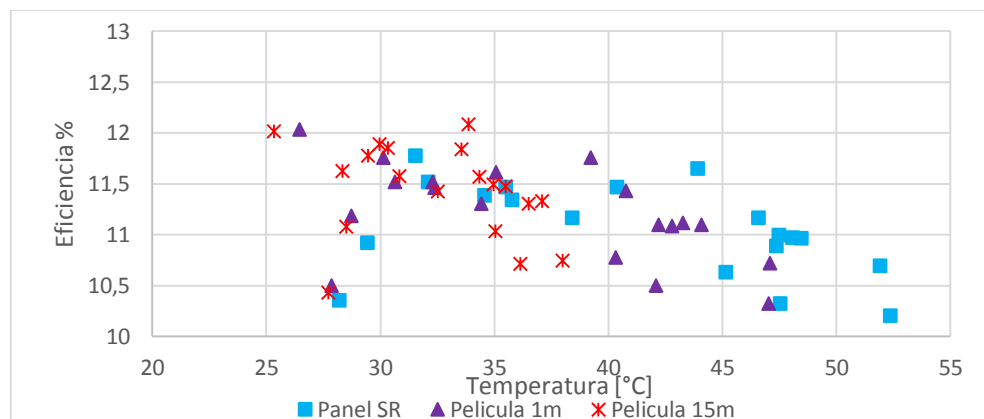
Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	T prom total [°C]	Δ Temp. prom [°C]	Consumo de bomba [Wh/día]	P. Generada prom [W]	Aumento de energía [Wh/día]	n prom[%]	Mejora n%
1	Sin riego	Ref	Ref	41,02	Ref.	Ref.	105,13	Ref.	10,83	Ref.
1	Chorro 10cm	1	3,5 a 4	36,78	4,23	6,96	106,08	9,03	10,94	1,18
1	Chorro 20cm	1	1,5 a 2	38,36	2,65	6,96	104,24	--	10,74	-0,74
2	Sin riego	Ref	Ref	38,83	Ref.	Ref.	89,68	Ref.	11,07	--
2	Chorro 10cm	1	3,5 a 4	35,22	3,61	7,33	90,62	9,4	11,18	1,01
2	Chorro 20cm	1	1,5 a 2	36,32	2,51	7,33	89,06	--	11	-0,5

7.5. EXPERIMENTO 5: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN CON PELÍCULA DE AGUA PARA DOS TIEMPOS DE RIEGO DISTINTOS. EL CAUDAL DE LA PELÍCULA DE AGUA ES DEL 50% CON RESPECTO AL EXPERIMENTO 1.

En las gráficas del ANEXO D, figuras D.17 a D.20 se puede observar que el panel irrigado por 15 minutos fue el que durante algunos intervalos generó más potencia que los otros dos paneles fotovoltaicos. Este panel generó en promedio durante los dos días de las pruebas 120,4 [W] superando al panel sin riego en 5 [W] y al panel con riego de 1 minuto en 3,6 [W]. Además el 87% del tiempo la potencia generada por el panel con riego de 15 minutos superó a la potencia generada por el panel sin riego.

En la Figura 30 se observa que el panel con riego de 15 minutos concentró la mayoría de sus puntos por encima de los puntos de los otros paneles. Esto quiere decir que el panel con riego de 15 minutos presentó mejor eficiencia. Nuevamente se aprecia como la mayor concentración de puntos del panel sin riego son de baja eficiencia y de elevada temperatura de operación.

Figura 30. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 5.



En la Tabla 14 se muestran el resumen de los resultados relevantes del experimento.

Tabla 14 Resultados del experimento 5

Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	T prom total [°C]	Δ Temp. prom [°C]	Consumo de bomba [Wh]/día	P. Generada prom [W]	Aumento de energía [Wh]/día	n prom[%]	Mejora n%
1	Sin riego	Ref	Ref	40,71	Ref.	Ref.	109,16	Ref.	11,18	Ref.
1	Película	15	4 a 5	32,18	8,53	104,5	113,72	43,32	11,59	3,68
1	Película	1	4 a 5	36,65	4,06	6,96	110,55	13,21	11,32	1,31
2	Sin riego	Ref	Ref	40,82	Ref.	Ref.	101,06	Ref.	11,26	Ref.
2	Película	15	4 a 5	32,59	8,23	110	105,5	44,4	11,65	3,51
2	Película	1	4 a 5	36,73	4,09	7,33	102,28	12,2	11,39	1,17

7.6. EXPERIMENTO 6: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DE INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO DOS TIPOS DE IRRIGACIÓN UNA CON PELÍCULA DE AGUA Y OTRA DE CHORROS DE AGUA SEPARADOS 10 [CM] CON TIEMPO DE RIEGO DE 1 MINUTO.

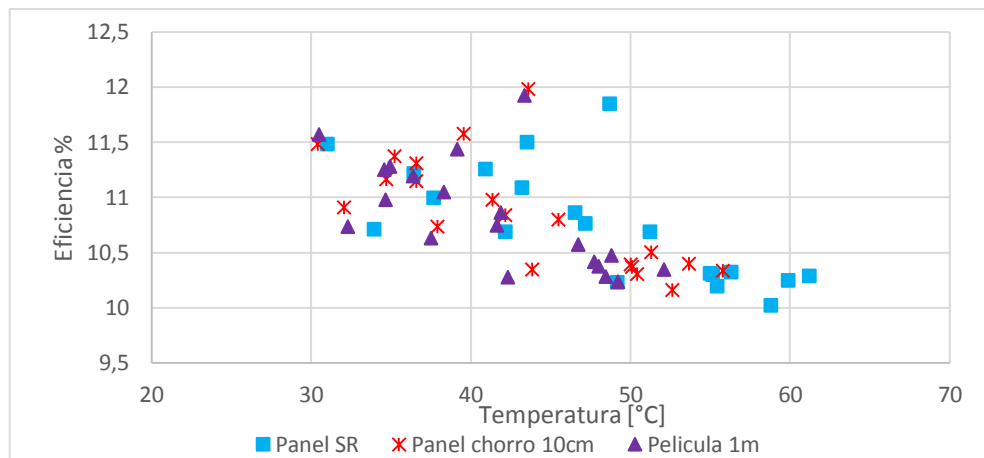
Durante este experimento tanto el panel irrigado por película como el panel irrigado con chorros tuvieron un comportamiento muy similar. Las diferencias considerables de estos dos paneles con respecto al panel sin riego se hicieron evidentes cuando se reúnen dos condiciones (radiación y riego) como se puede observar en la figuras D.21 a D.22 del ANEXO D.

La potencia generada por los paneles con irrigación fue tan solo 1,5 [W] superior a la potencia generada por el panel sin riego. Como se mencionó anteriormente el riego de un minuto no evidencia mejoras sustanciales en la generación de potencia de los paneles.

En la Figura 31 se observa que los puntos de eficiencia para cada experimento se concentran unos muy cercanos a otros dada cierta temperatura, lo que traduce en muy poca variación entre los paneles con irrigación y el panel sin irrigación.

Esto permite deducir como se mencionó anteriormente, que aplicar riego solo durante un minuto no es lo suficientemente adecuado para mejorar la potencia generada y la eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico.

Figura 31. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 6.



En la Tabla 15 se muestran el resumen de los resultados relevantes del experimento.

Tabla 15. Resultados del experimento 6

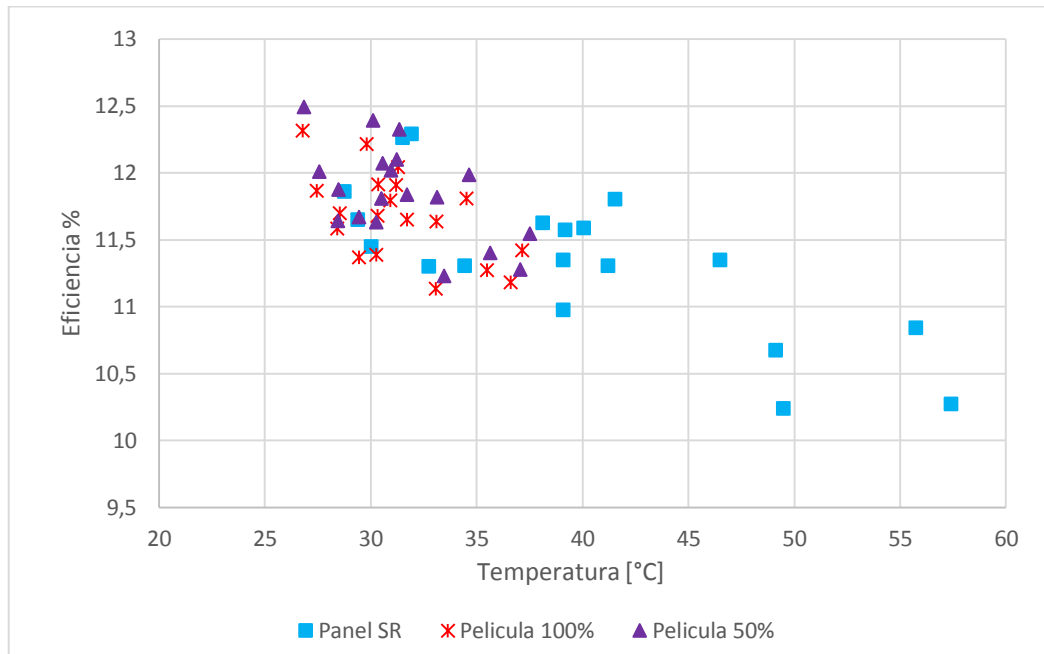
Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [L/min]	T prom total [°C]	T. disminución prom [°C]	Consumo de bomba [Wh]/día	P. Generada prom [W]	Aumento de energía [Wh]/día	Eficiencia prom[%]	Mejora n%
1	Sin riego	Ref.	0	47,48	Ref.	Ref.	130,62	Ref.	10,75	Ref.
1	Chorros	1	3,5-4	43,01	4,47	6,96	131,94	9,19	10,85	0,93
1	Película	1	9-10	41,28	6,20	6,96	131,97	9,40	10,83	0,74
2	Sin riego	Ref.	0	42,72	Ref.	Ref.	105,44	Ref.	12,84	Ref.
2	Chorro	1	3,5-4	41,71	1,01	6,96	104,12	-9,19	12,68	-1,24
2	Película	1	9-10	41,62	1,1	6,96	103,44	-13,92	12,59	-1,94

7.7. EXPERIMENTO 7: COMPARACIÓN DE LOS EFECTOS DEL INCREMENTO DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES CONSIDERANDO UNA IRRIGACIÓN PERMANENTE CON PELÍCULA DE AGUA. EL CAUDAL DE LA PELÍCULA DE AGUA DE UN PANEL ES DEL 50% CON RESPECTO AL OTRO.

En el desarrollo de este experimento como era de esperarse los paneles con irrigación generarían más potencia que el panel sin riego. Además se observa que el panel con película 100% tiene un comportamiento muy similar al panel con riego del 50% a pesar de tener un caudal de agua mayor. Fue necesario mirar los días por separado dado que uno de los días de prueba la radiación fue baja (solo el 39% del tiempo fue superior a 450 [W/m²]) para estas condiciones de clima los paneles con riego generaron en promedio 109 [Watts] superando al panel sin riego en 5 [Watts]. El siguiente día de prueba las condiciones de radiación mejoraron (60% del tiempo la radiación fue superior a 450 [W/m²]) obteniendo mejores resultados. Los paneles con irrigación generaron en promedio 146 [Watts] superando en 10 [Watts] al panel sin riego. El desarrollo del experimento se puede evidenciar en las figuras D.25 a D.28.

Para esta prueba la Figura 32 fue la que más se asemejó a la Figura 1. En ella se observa con mayor claridad que los paneles con irrigación presentaron una mayor eficiencia gracias a la disminución de la temperatura. Las eficiencias más bajas son las del panel sin riego en el cual también se presentaron las temperaturas más altas.

Figura 32. Eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos en función de la temperatura para el experimento 7.



En la Tabla 16 se muestran en resumen los resultados relevantes del experimento.

Tabla 16. Resultados del experimento 7

Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	T prom total [°C]	Δ Temp. prom [°C]	Consumo de bomba [Wh]/día	P. Generada prom [W]	Aumento de energía [Wh]/día	n prom[%]	Mejora n%
1	Sin riego	Ref	Ref	39,07	Ref.	Ref.	94,4	Ref.	11,35	Ref.
1	Película 50%	Permanente	4 a 5	31,26	7,81	198	99,7	47,7	11,85	4,46
1	Película 100%	Permanente	9 a 10	31,14	7,93	198	98,4	36	11,67	2,97
2	Sin riego	Ref	Ref	45,24	Ref.	Ref.	123,8	Ref.	11,09	Ref.
2	Película 50%	Permanente	4 a 5	33,68	11,56	209	133,5	92,15	11,74	5,97
2	Película 100%	Permanente	9 a 10	33,44	11,79	209	132,4	81,7	11,64	5,06

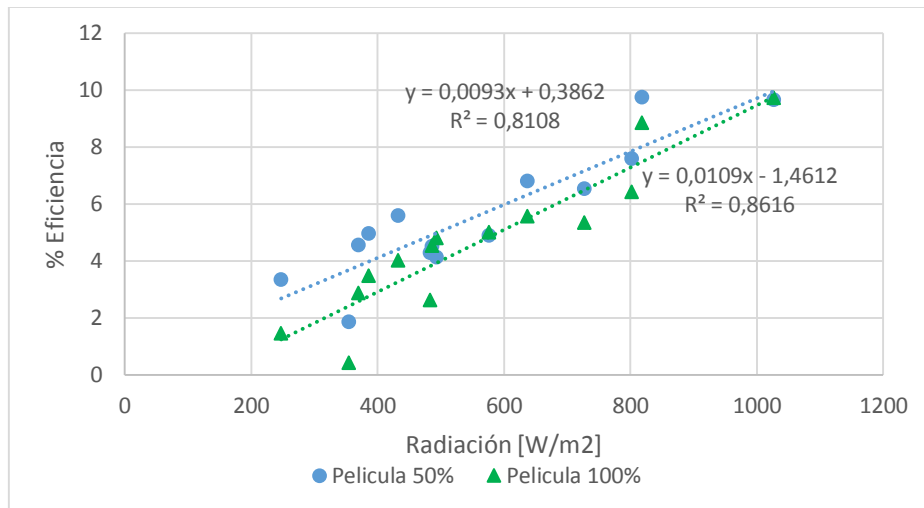
7.8. ANÁLISIS

Al realizar una comparación entre el aumento de la eficiencia con respecto al panel sin riego y la radiación se obtienen gráficas como las de la Figura 33. Para realizar estas gráficas se hace un análisis por intervalos de 30 minutos a lo largo del día, en esta gráfica se muestra el comportamiento de la eficiencia cuando se aplica un riego continuo por película pero con dos flujos distintos, uno de 9-10 l/min y el otro de 4-4,5 l/min. La tendencia apreciada al menos en esta prueba es que el aumento de eficiencia es directamente proporcional a la radiación. Se observa que el coeficiente de determinación es cercano a 1, con lo cual se podría intentar predecir el comportamiento para valores de radiaciones superiores.

El aumento de la eficiencia respecto al panel sin riego se calculó como se muestra a continuación:

$$\%Eficiencia = \frac{Eficiencia\ del\ panel\ con\ riego - Eficiencia\ del\ panel\ sin\ riego}{Eficiencia\ del\ panel\ sin\ riego}$$

Figura 33. Correlación de la eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos con respecto a la radiación solar.



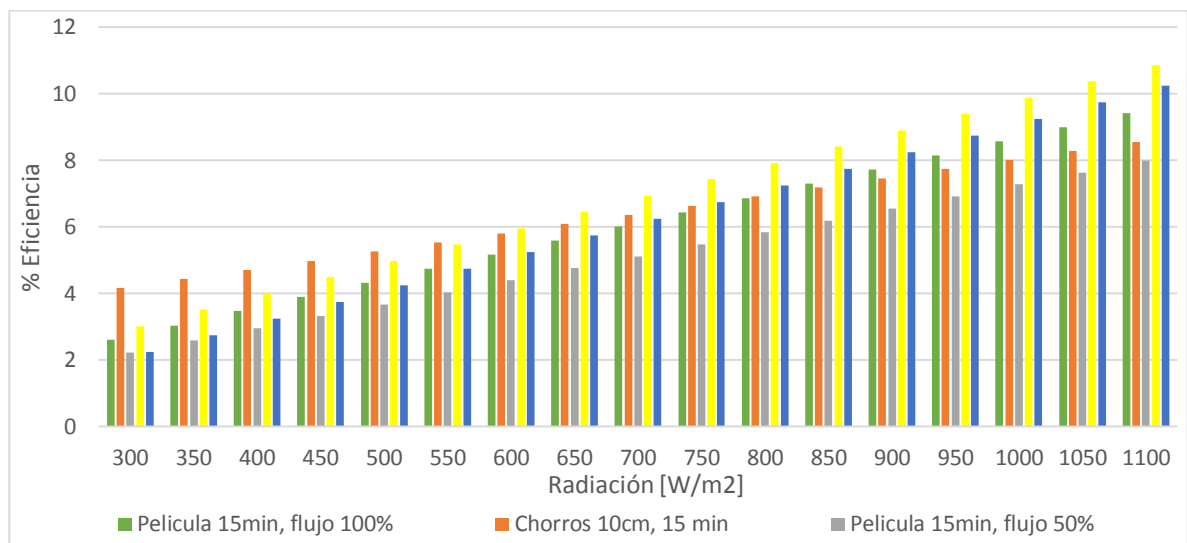
Para realizar el mismo análisis para las diferentes pruebas y las diferentes técnicas de riego, se realizaron las gráficas del ANEXO E (figuras E.1 a E.7), en ellas se aprecian los cambios de la eficiencia energética del panel fotovoltaico, dependiendo de la radiación y la técnica de riego aplicada.

Algunos de los resultados de la experimentación realizada no se toman en cuenta, debido a que los datos se encontraban muy dispersos, con lo cual la aproximación no sería válida y algunas otras porque no generan un impacto significativo en el aumento de la eficiencia del panel fotovoltaico. Una vez realizada esta selección, se recopila la información de las gráficas que tenían un coeficiente de determinación alto y se hace un conglomerado de los datos para hacer un balance de las diferentes pruebas realizadas y obtener algunas conclusiones de la experimentación realizada.

La comparación en el aumento de eficiencia respecto al panel de control con las pruebas que arrojaron mejores resultados, se pueden apreciar en la Figura 34, en ella se aprecia que para las radiaciones inferiores a 500W/m² la técnica que mejores resultados obtiene es chorros cada 10cm, con un tiempo activo de riego de 15

minutos; a medida que aumenta la radiación la tendencia cambia hasta superar los $800\text{W}/\text{m}^2$, punto donde se mantiene hasta el final y se encuentra que la técnica que mejores resultados arroja es la del riego con película continua con un flujo del 50% y le sigue película continua con un flujo del 100% , ambas técnicas alcanzan a mejorar la eficiencia en un 10%.

Figura 34. Comparación de los resultados de la eficiencia en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos para la experimentación realizada.



Un factor importante a tener en cuenta en el diagrama anterior es el caudal, debido a que la película con un flujo al 100% corresponde a un promedio entre 9-10 l/min, por su parte la técnica de riego por chorros cada 10cm, con duración de 15 minutos tiene un flujo entre 3,5 y 4 l/min, y la técnica con mejores resultados tiene un flujo entre 4-5 l/min. Se podría decir que en la técnica de riego por película continua con un flujo del 100% se ha pasado a un valor donde no importa cuánto aumente el flujo de agua, el efecto será el mismo.

Teniendo en cuenta que la prueba con película de agua con un caudal entre 4 y 5l/min y el riego por chorros cada 10cm con un caudal entre 3.5 a 4 l/min, fueron las pruebas que mejores resultados obtuvieron, se logró replicar la técnica de chorro de

agua cada 10[cm] con un flujo de 3.5 a 4 l/min con una bomba de 8[W], esto se hace aumentando la altura del tanque en 10[cm] respecto al suelo.

Tomando como referencia los datos de las pruebas 2,4 y 6, se calcula la ganancia neta en potencia en ambos casos, con la bomba de 22W y con la bomba de 8W. Los resultados se muestran en la Tabla 17.

Los cálculos nos arrojan que en los experimentos con duración de un minuto de riego se obtiene una ganancia cercana a 7 [Wh]/día, pero también se obtuvo una pérdida de 11.72 [Wh]/día. Los resultados obtenidos para el riego por chorros cada 10[cm] con duración de 15 minutos son mejores, se logra una ganancia en ambos casos superior a 25 [Wh]/día, indicando un beneficio de la irrigación. Adicional a esto, se especificó que para radiaciones inferiores a 400W/m², no era conveniente hacer riego; se decide realizar un cálculo adicional, si se realizara riego desde las 9am hasta las 4pm, donde normalmente la radiación supera el valor anteriormente mencionado, se encuentra que la ganancia neta en potencia [Wh/día] sería 34.33 [Wh/día] el cual supera a los 25 [Wh/día] encontrados anteriormente.

Tabla 17. Ganancia neta de energía.

Exp.	Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	Δ Temp. prom [°C]	Bomba		Aumento de energía [Wh]/día	Bomba	
						22W	8W		22W	8W
						Consumo [Wh]/día	Consumo [Wh]/día		Ganancia neta de energía [Wh]/día	Ganancia neta de energía [Wh]/día
2	1	Sin riego	Ref	Ref	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
	1	Chorro 10cm	15	4 a 5	9,74	104,5	38	64,6	-39,9	26,6
	2	Sin riego	Ref	Ref	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
	2	Chorro 10cm	15	4 a 5	9,48	104,5	38	63,27	-41,23	25,27
4	1	Sin riego	Ref	Ref	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
	1	Chorro 10cm	1	3,5 a 4	4,23	6,96	2,53	9,03	2,07	6,5

Exp.	Día	Técnica	Tiempo de riego [min]	Caudal [l/min]	Δ Temp. prom [°C]	Bomba		Aumento de energía [Wh]/día	Bomba	
						22W	8W		22W	8W
						Consumo [Wh]/día	Consumo [Wh]/día		Ganancia neta de energía [Wh]/día	Ganancia neta de energía [Wh]/día
	2	Sin riego	Ref	Ref	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
	2	Chorro 10cm	1	3,5 a 4	3,61	7,33	2,66	9,4	2,07	6,74
6	1	Sin riego	Ref.	0	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
	1	Chorros 10cm	1	3,5-4	4,47	6,96	2,53	9,19	2,23	6,66
	2	Sin riego	Ref.	0	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
	2	Chorro 10cm	1	3,5-4	1,01	6,96	2,53	-9,19	-16,15	-11,72

8. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del trabajo de grado se logró cumplir con las actividades establecidas para abordar los tres objetivos específicos previstos. La experimentación realizada permitió establecer el comportamiento de un panel fotovoltaico considerando las condiciones climáticas de una ciudad como Bucaramanga ubicada en una zona tropical húmeda, aspecto que es novedoso, ya que las publicaciones relacionadas con este tópico corresponde a sitios con condiciones diferentes.

A continuación se resaltarán las conclusiones más relevantes que se han logrado establecer con relación a la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos de acuerdo con la experimentación realizada.

Para los valores de irradiación por debajo de $400\text{W}/\text{m}^2$, y para el horario posterior a las 4:30 p.m. y anterior a las 7:30 a.m., la diferencia entre la temperatura del módulo con riego activo con respecto al panel sin riego, son pequeñas no superaban los 5°C independientemente de la técnica de riego utilizada. Por lo tanto el efecto que trae reducir la temperatura de operación del panel en la eficiencia de generación de energía eléctrica, para radiaciones solares bajas, no es apreciable. Esto debe considerarse para realizar el control del módulo de irrigación de forma tal que se realice el riego del panel cuando la radiación solar sea lo suficientemente alta para que la generación de energía eléctrica del panel se mejore.

En la experimentación se evidenció que entre mayor sea la radiación solar, mayor es la disminución en temperatura cuando se realiza el riego del panel fotovoltaico, logrando con ello que la potencia eléctrica generada aumente, lo que se traduce en un aumento en la eficiencia. Con refrigeración activa, el panel fotovoltaico mediante el riego puede llegar a mejorar su eficiencia hasta en un 10% respecto al panel sin

riego o llegar a tener una diferencia de potencia con el panel sin riego de hasta de 18W (alrededor de un 7,2% de potencia generada adicional).

Aunque los sistemas de enfriamiento se han estudiado anteriormente, este estudio revela que existen escenarios en los que un sistema de refrigeración por riego puede ser ventajoso. Una película de agua que fluye por la parte superior del panel se hace más eficaz cuando se utiliza con valores de radiación elevados. Los requisitos para un sistema de este tipo son una bomba, un mecanismo de dispersión de una película o de chorros de agua, y un depósito para poder recircular el agua. La potencia eléctrica requerida por la bomba debe ser sustancialmente menor que la mejora de potencia creada por el efecto de irrigación. Las pérdidas de agua debidas a la evaporación son pequeñas, pero es necesario un sensor para saber el nivel de agua y hacer una reposición cuando sea necesario.

Existe un caudal que generara el mayor descenso de la temperatura de operación del panel fotovoltaico y un menor consumo de agua. Prueba de esto fue la comparación de los experimentos realizados con película de agua del 50% (4L/min a 5L/min) versus película de agua del 100% (9L/min-10L/min) o película de agua del 100% con riego de 15 minutos versus chorros de agua cada 10 [cm] con riego de 15 minutos (3,5-4 L/min). En estas pruebas se obtuvieron resultados similares tanto en la potencia eléctrica generada por los paneles como en temperatura de trabajo del panel aun teniendo caudales diferentes (Película 50%: 4-5 L/min, Película 100%: 9-10 L/min, Chorros: 3,5-4 L/min). Por lo tanto es necesario establecer el caudal de agua requerido para realizar la irrigación, para no desperdiciar ni agua ni energía eléctrica en el funcionamiento de la bomba requerida para mover el agua.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas arrojan que dos tipos de riego sobresalen por encima de las demás, cada técnica con ventajas. Una es el riego por película de agua permanente con un caudal entre 4 y 5 L/min, es la que obtiene el

mayor aumento en la eficiencia con respecto al panel sin riego cuando la radiación solar supera los $600\text{W}/\text{m}^2$. Esta técnica logra un aumento en la eficiencia respecto al panel sin riego del 10% cuando la radiación es igual o mayor a $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Por otro lado se tiene el riego por chorros de agua cada 10cm con un tiempo de riego de 15 minutos y periodos de 30 minutos, esta técnica a pesar de no ser la que aumenta la eficiencia en mayor medida (aumento de eficiencia de 5% en promedio respecto al panel sin riego), cuenta con dos ventajas. La primera es que de las 5 técnicas que arrojan mejores resultados es la que tiene el caudal de agua más bajo, el cual está entre 3,5 l/min y 4 l/min lo que nos representa un ahorro de agua. Una segunda ventaja es el tiempo que debe estar encendida la bomba que realiza el riego, la cual comparada con la técnica de película permanente se utiliza la mitad del tiempo. Esto ayudaría a reducir el consumo de la energía eléctrica de la bomba.

Al replicar el experimento con una bomba de 8 [W] para el riego del panel con chorros cada 10 [cm] se lograría un ganancia neta de energía superior a 25 [Wh/día], pero si se realizara riego de 9 am a 4pm que es la franja horaria en que la radiación solar generalmente supera los $400\text{W}/\text{m}^2$ la ganancia de energía neta sería de 33 [Wh/día]. Esto demuestra el beneficio en términos de energía de la irrigación forzada en los paneles fotovoltaicos.

Como resultados complementarios, gracias a este trabajo se logró la publicación de un paper con el título de “Impact of the irrigation in the operation of the photovoltaic panel in Bucaramanga” en el 2n^o International congress of mechanical engineering and agricultural science. Además este proyecto sirve de insumo de una tesis doctoral que contó con el apoyo de COLCIENCIAS.

Finalmente los autores consideran que la realización de este trabajo de grado les permitió conocer a fondo una parte de las energías renovables, en este caso la energía fotovoltaica y la utilización de estrategias sustentables para mejorar la

eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos, para desarrollar un mejor y adecuado uso de la energía eléctrica.

CITAS

- [1] H. G. Teo, P. S. Lee, and M. N. a Hawlader, "An active cooling system for photovoltaic modules," *Appl. Energy*, vol. 90, no. 1, pp. 309–315, 2012.
- [2] T. Reindl, J. Ouyang, a M. Khaing, K. Ding, Y. S. Khoo, T. M. Walsh, and a G. Aberle, "Investigation of the Performance of Commercial Photovoltaic Modules under Tropical Conditions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, p. 4, 2012.
- [3] G. George, X. Kanavas, and D. Zissopoulos, "ADAM, intelligent integrated self-enhanced photovoltaic panel with Rainwater harvesting for Irrigation, unit cooling and cleaning," *Proc. 24th Int. Conf. Eur. Assoc. Educ. Electr. Inf. Eng. EAEEIE 2013*, pp. 174–177, 2013.
- [4] S. Krauter, "Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 82, no. 1–2, pp. 131–137, 2004.
- [5] 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. 3, pp. 5–8, 2014.
- [6] F. Ju and X. Fu, "Research on impact of dust on solar photovoltaic(PV) performance," *2011 Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2011 - Proc.*, pp. 3601–3606, 2011.
- [7] C. Lamnatou and D. Chemisana, "A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 264–280, 2015.
- [8] D. Chemisana and C. Lamnatou, "Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance," *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 246–256, 2014.
- [9] A.-M. Croitoru and A. Badea, "Air cooling of photovoltaic panels from passive house located inside the University Politehnica of Bucharest," *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng.*, vol. 75, no. 3, pp. 277–290, 2013.
- [10] H. M. Bahaidarah, S. Rehman, P. Gandhidasan, and B. Tanweer, "Experimental Evaluation of the Performance of a Photovoltaic Panel with Water Cooling," *IEEE Electron Devices Soc*, pp. 2987–2991, 2013.
- [11] S. Odeh and M. Behnia, "Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling," *Heat Transf. Eng.*, vol. 30, no. 6, pp. 499–505, 2009.

- [12] E. L. Meyer and M. Busiso, "Comparative study of a directly cooled PV water heating system to a naturally cooled module in South Africa," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 1296–1299, 2012.
- [13] A. Kordzadeh, "The effects of nominal power of array and system head on the operation of photovoltaic water pumping set with array surface covered by a film of water," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1098–1102, 2010.
- [14] R. Van Overstraeten, R. Mertens, and J. Nijs, "Progress in photovoltaic energy conversion," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 1041, 1982.
- [15] NATIONAL GEOGRAPHIC, "Solar Energy," 2015. [Online]. Available: <http://environment.nationalgeographic.com/environment/global-warming/solar-power-profile>.
- [16] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, "Solar photovoltaic technology basics," 2015. [Online]. Available: http://www.nrel.gov/learning/re_photovoltaics.html.
- [17] S. Rustemli and F. Dincer, "Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in Matlab/Simulink," *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 3, no. 3, pp. 35–40, 2011.
- [18] J. M. Olchowik, S. Gulkowski, K. J. Cieslak, J. Banas, I. Jozwik, D. Szymczuk, K. Zabielski, J. Mucha, M. Zdrojewska, J. Adamczyk, and R. Tomaszewski, "Influence of temperature on the efficiency of monocrystalline silicon solar cells in the South-eastern Poland conditions," *Mater. Sci.*, vol. 24, no. 4, p. 6, 2006.
- [19] A. Molki, "Temperature effect on photovoltaic cells," *Phys. Educ.*, vol. 46, no. 5, pp. 523–525, 2011.
- [20] H. a Hussien, A. H. Numan, and A. R. Abdulmunem, "Improving of the photovoltaic / thermal system performance using water cooling technique," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 78, p. 012020, 2015.
- [21] K. K. Chong and W. C. Tan, "Study of automotive radiator cooling system for dense-array concentration photovoltaic system," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2632–2643, 2012.
- [22] A. H. Alami, "Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules," *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 668–679, 2014.
- [23] H. M. S. Bahaidarah, A. A. B. Baloch, and P. Gandhidasan, "Modeling and Comparative Analysis of Jet Impingement Cooling and Conventional Channel Cooling for Photovoltaic Strings," *IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 748–753, 2014.

- [24] M. Habibollahi, M. Ameri, and S. H. Mansouri, "Efficiency Improvement of Photovoltaic Water Pumping Systems by Means of Water Flow Beneath Photovoltaic Cells Surface," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 137, no. 4, p. 044501, 2015.
- [25] C. Felgemacher, J. Philipp, A. Kobeissi, J. Pfeiffer, D. Wiegand, W. Kruschel, B. Dombert, S. V. Ara, and P. Zacharias, "Design of Photovoltaic Microinverter for Off-Grid and Grid-Parallel Applications," vol. 8, pp. 25–27, 2014.
- [26] H. A. Sher and K. E. Addoweesh, "Micro-inverters - Promising solutions in solar photovoltaics," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 4, pp. 389–400, 2012.
- [27] C. T. Rodríguez, D. Velasco, D. Fuente, G. Garcerá, E. Figueres, S. Member, and J. A. G. Moreno, "Reconfigurable Control Scheme for a PV Microinverter Working in Both Grid-Connected and Island Modes," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1582–1595, 2013.
- [28] J. Dunlop, "Study Guide for Photovoltaic System Installers and Sample Examination Questions," *Contract*, 2003.
- [29] T. Diaz and G. Carmona, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, McGraw-Hil. 2010.
- [30] L. V. Pacheco and J. F. Suarez, "Diseño de un sistema de riego automatico con monitorizacion de nivel de humedad," Universidad Industrial de Santander, 2015.
- [31] A. Garcia Pinzon, *Estadística*. Bucaramanga, 1985.

BIBLIOGRAFIA

ALAMI, Abdul Hai. Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management*. [online] 2014. vol. 77 [cited : 3 Oct. 2015] pp. 668–679 Available from: SCIENCE DIRECT

GARCÍA PINZÓN, Álvaro. *Estadística*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1985. 95p

FELGEMACHER, Christian *et.al* . Design of photovoltaic microinverter for off-grid and grid-parallel applications. *Browse Conference Publications* [online] CIPS 2014. February 25 – 27, 2014. Nuremberg/Germany [cited: 3 March 2016] Available from: IEEE Explore.

KORDZADEH, Azadeh. The effects of nominal power of array and system head on the operation of photovoltaic water pumping set with array surface covered by a film of water. *Renewable Energy*. [Online] 2010. vol. 35 [cited: 10 Oct. 2015] pp. 1098–1102.

MOLKI, Arman. Temperature effect on photovoltaic cells. *IOPscience*. [Online] 2011. vol. 46. [cited: 15 Oct. 2015] pp. 523–525.

OLCHOWIK, J. M *et.al* . Influence of temperature on the efficiency of monocrystalline silicon solar cells in the South-eastern Poland conditions. *Materials Science*. [Online] 2006. vol. 24 [cited: 10 Oct. 2015] p. 6.

SMITH, Matthew. Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules. *Solar Energy*. [Online] 2014. vol. 136 [cited: 10 Oct. 2015] p. 5–8.

ANEXOS

ANEXO A. UNIDAD DE RIEGO

CÓDIGO DE CONTROL

```
const int bomba = 13; /*Se definen los pines de la salida temporizada para la
bomba que irrigara el panel*/
const int bomba2 = 12; /*Se definen los pines de la salida temporizada para la
bomba que irrigara el panel2*/
int estado = HIGH; /*Se inicializa estado en bajo*/
int estado2 = HIGH;
int estado3 = LOW;
int estado4 = HIGH;
long previousMillis = 0;
long previousMillis2 = 0;
long previousMillis3 = 0;
long previousMillis4 = 0;
long interval_on = 60000; /*Intervalo de duración que durara activa la bomba que
irrigara el panel*/
long interval_off = 1740000; /*Intervalo de duración que durara desactivada la
bomba*/
long interval_on2 = 900000; /*Intervalo de duración que durara activa la bomba que
irrigara el panel_2*/
long interval_off2 = 900000; /*Intervalo de duración que durara desactivada la
bomba_2*/
long interval_on3 = 4320000; /*Intervalo de duración que durara activa la bomba
que irrigara el panel_2*/
long interval_off3 = 4320000; /*Intervalo de duración que durara desactivada la
bomba_2*/
```

```

long interval_on4 = 86400000; /*Intervalo de duración que durara activa la bomba
que irrigara el panel_2*/
long interval_off4 = 259200000; /*Intervalo de duración que durara desactivada la
bomba_2*/
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(bomba,OUTPUT); /*activación del pin 13 como salida cuando el tiempo
lo indique*/
  pinMode(bomba2,OUTPUT); /*activación del pin 13 como salida cuando el
tiempo lo indique*/
  pinMode(9, OUTPUT); /*activación del pin 9 como salida: para el pulso
ultrasónico_____Trigger*/
  pinMode(8, INPUT); /*activación del pin 8 como entrada: tiempo del rebote del
ultrasonido_____Echo*/
  pinMode(NivelAgua, OUTPUT); /*activación del pin 7 como salida cuando el
sensor de ultrasonido lo indique*/
  pinMode(humedad, OUTPUT); /*activación del pin 6 como salida cuando el
sensor de humedad lo indique*/
}

void loop(){

  unsigned long currentMillis = millis();

  if (estado == LOW) {
    if(currentMillis - previousMillis > interval_off) {
      previousMillis = currentMillis;
      estado = HIGH;
    }
  } else {

```

```
if(currentMillis - previousMillis > interval_on) {  
    previousMillis = currentMillis;  
    estado = LOW;  
}  
}
```

```
unsigned long currentMillis2 = millis();
```

```
if (estado2 == LOW) {  
    if(currentMillis2 - previousMillis2 > interval_off2) {  
        previousMillis2 = currentMillis2;  
        estado2 = HIGH;  
    }  
} else {  
    if(currentMillis2 - previousMillis2 > interval_on2) {  
        previousMillis2 = currentMillis2;  
        estado2 = LOW;  
    }  
}
```

```
if (estado3 == LOW) {  
    if(currentMillis - previousMillis3 > interval_off3) {  
        previousMillis3 = currentMillis;  
        estado3 = HIGH;  
    }  
} else {  
    if(currentMillis - previousMillis3 > interval_on3) {
```

```

        previousMillis3 = currentMillis;
        estado3 = LOW;

    }
}

if (estado4 == LOW) {
    if(currentMillis - previousMillis4 > interval_off4) {
        previousMillis4 = currentMillis;
        estado4 = HIGH;

    }
} else {
    if(currentMillis - previousMillis4 > interval_on4) {
        previousMillis4 = currentMillis;
        estado4 = LOW;

    }
}

```

```

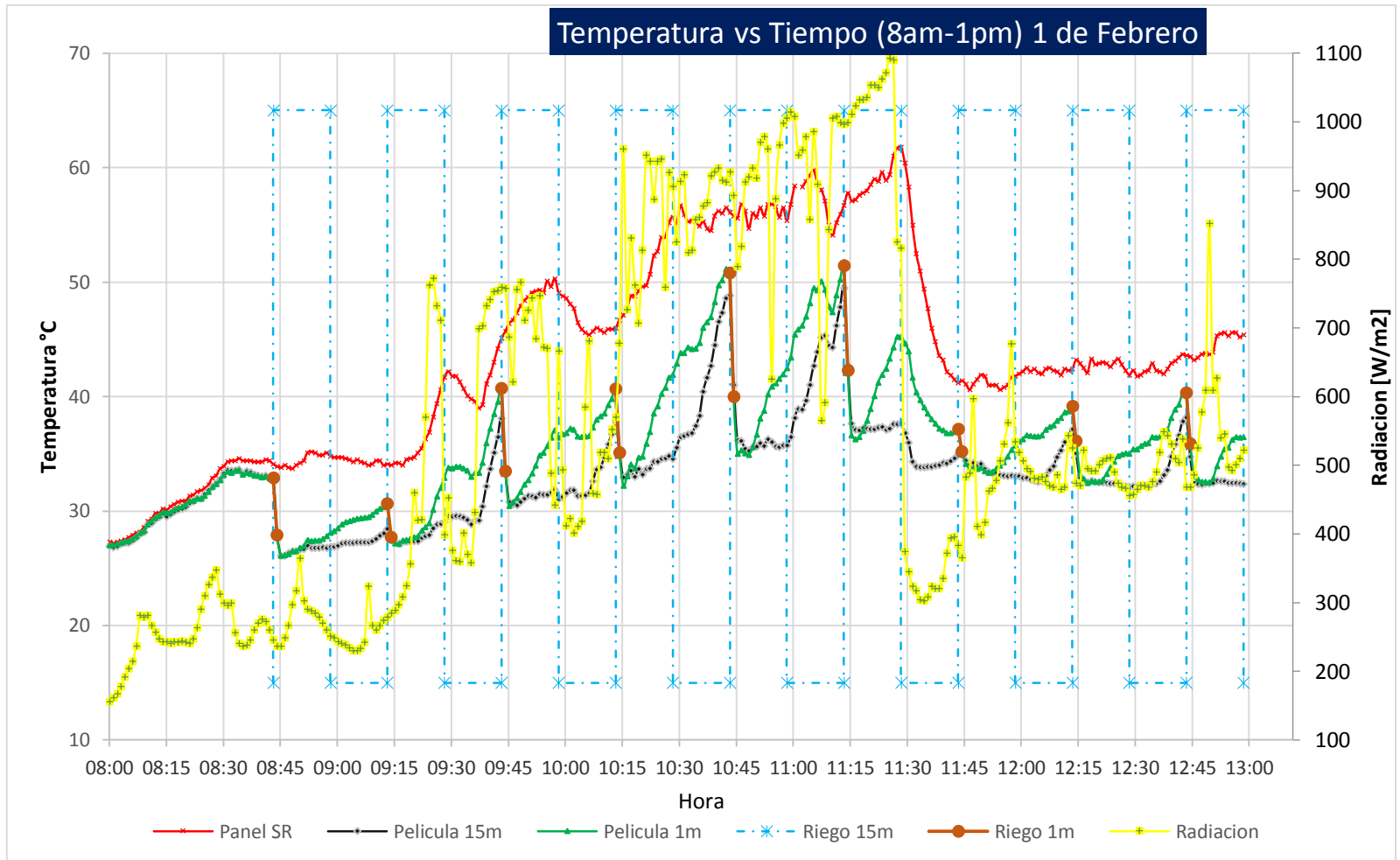
if (estado3 == HIGH) {
    if (estado4 == HIGH) {
        if (estado2 == HIGH) {
            digitalWrite(bomba2, HIGH);
        } else if (estado2 == LOW) {
            digitalWrite(bomba2, LOW);
        }
    }
}

```

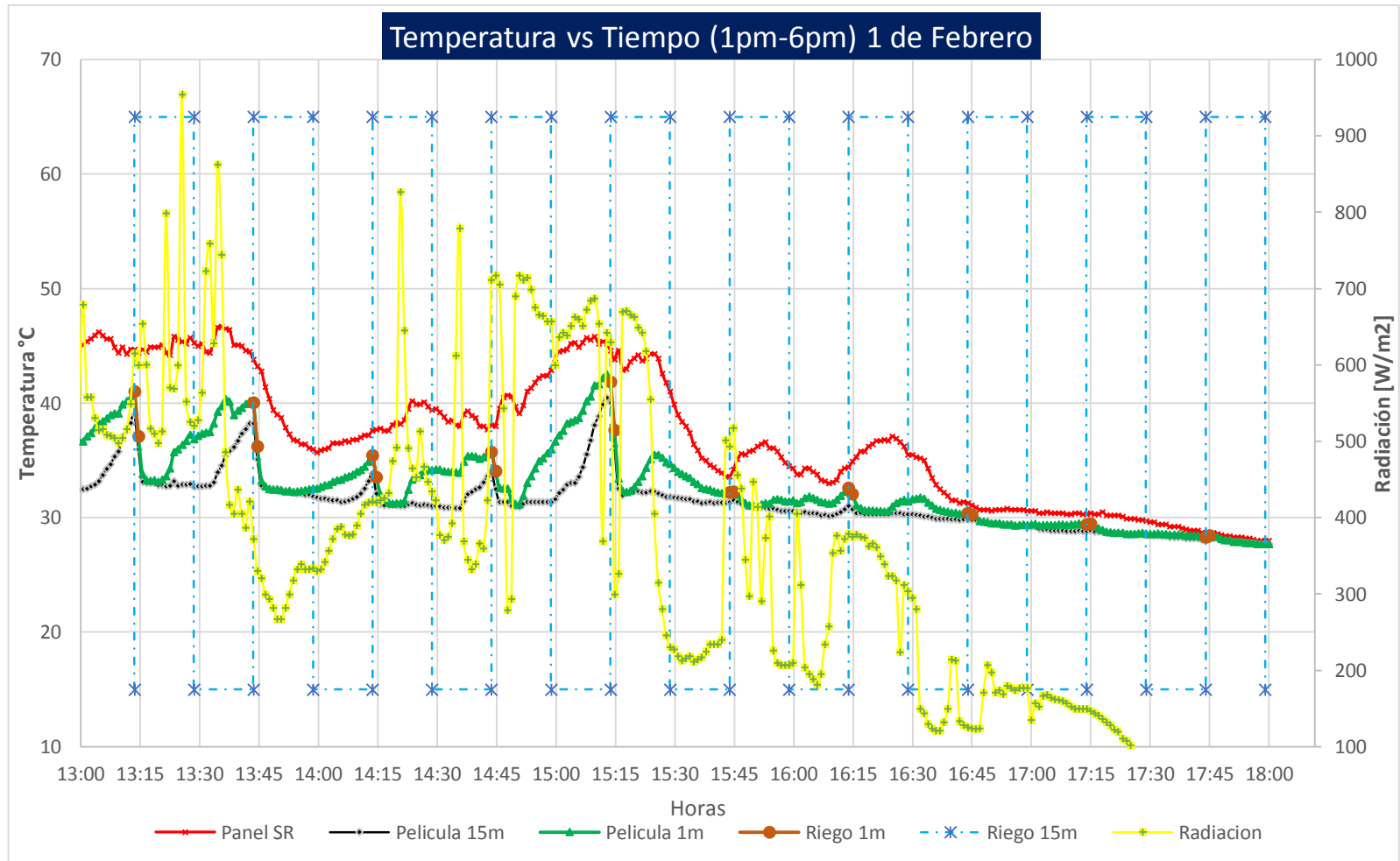
```
    }  
  }  
  
  if (estado3 == HIGH) { if (estado4 == HIGH) {  
    if (estado == HIGH) {  
      digitalWrite(bomba, HIGH);  
    } else if (estado == LOW) {  
      digitalWrite(bomba, LOW);  
    }  
  }  
}  
  
}
```

ANEXO B. TEMPERATURAS DE OPERACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS PARA LOS DIFERENTES EXPERIMENTOS REALIZADOS

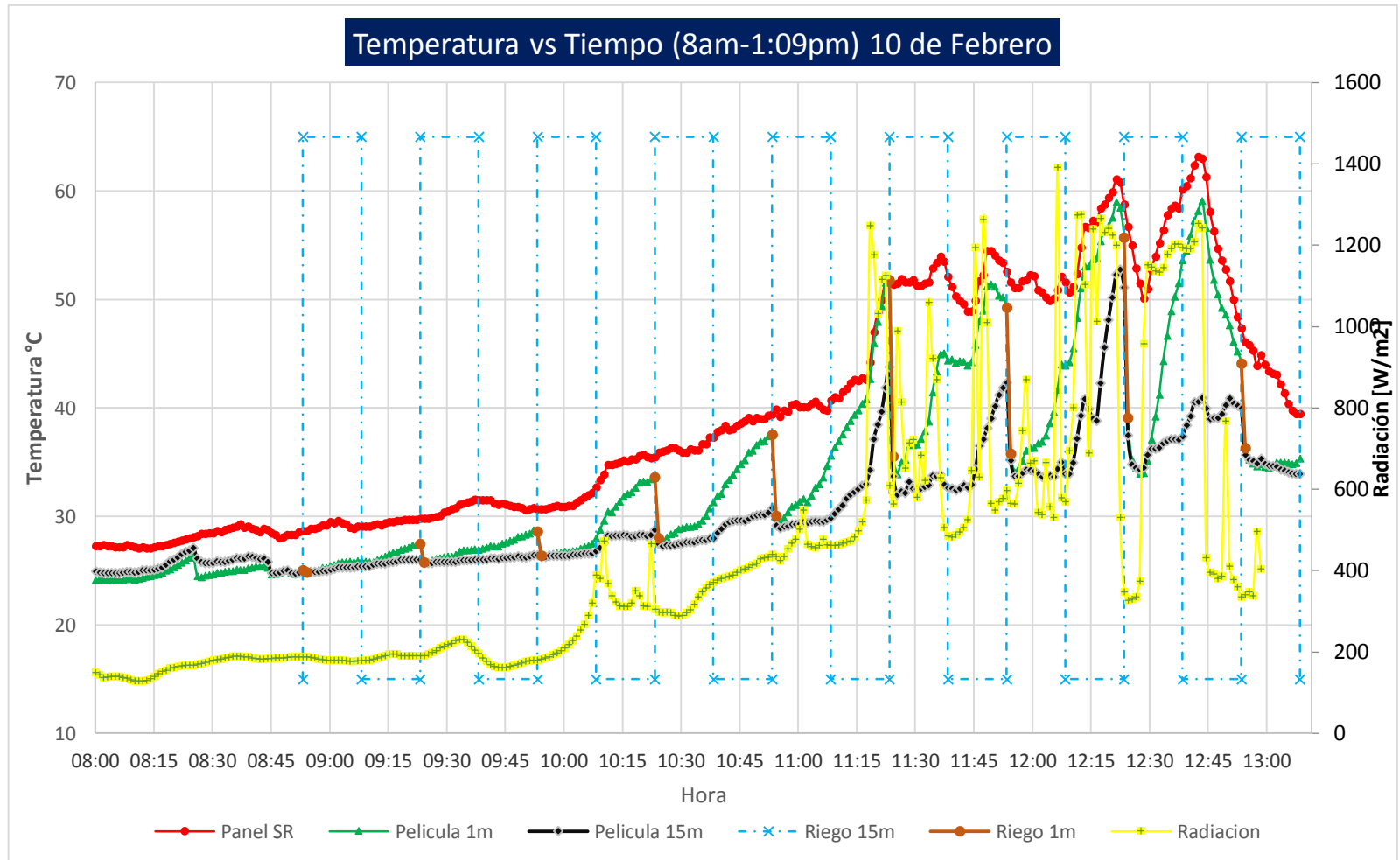
En este anexo se presentan las gráficas de los experimentos realizados durante el total del tiempo de ejecución. En ellas se puede observar la temperatura de operación de cada uno de los paneles en función del tiempo y el valor de la radiación solar. También está especificado el tiempo de riego de los paneles.



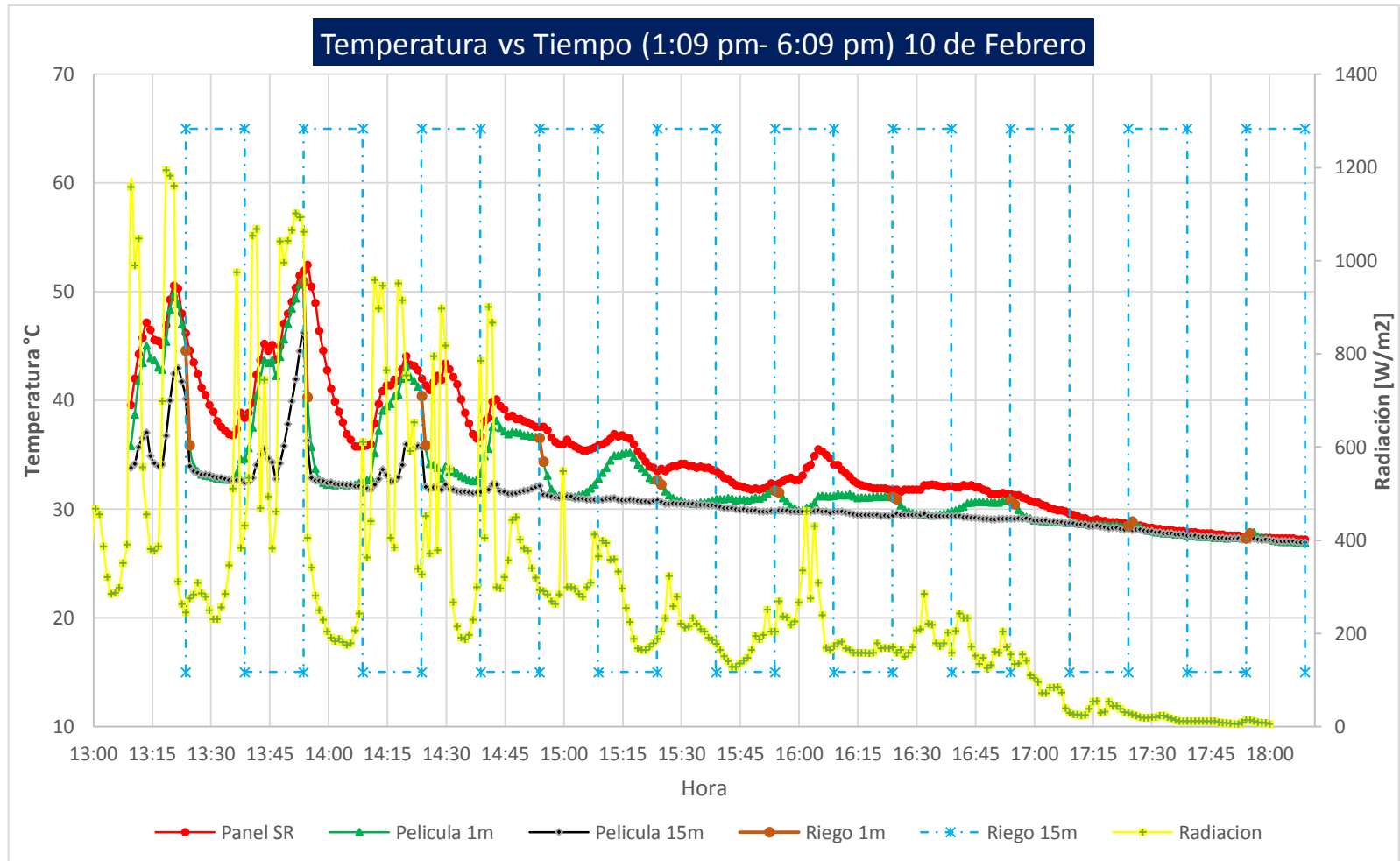
Experimento 1-Dia 1, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



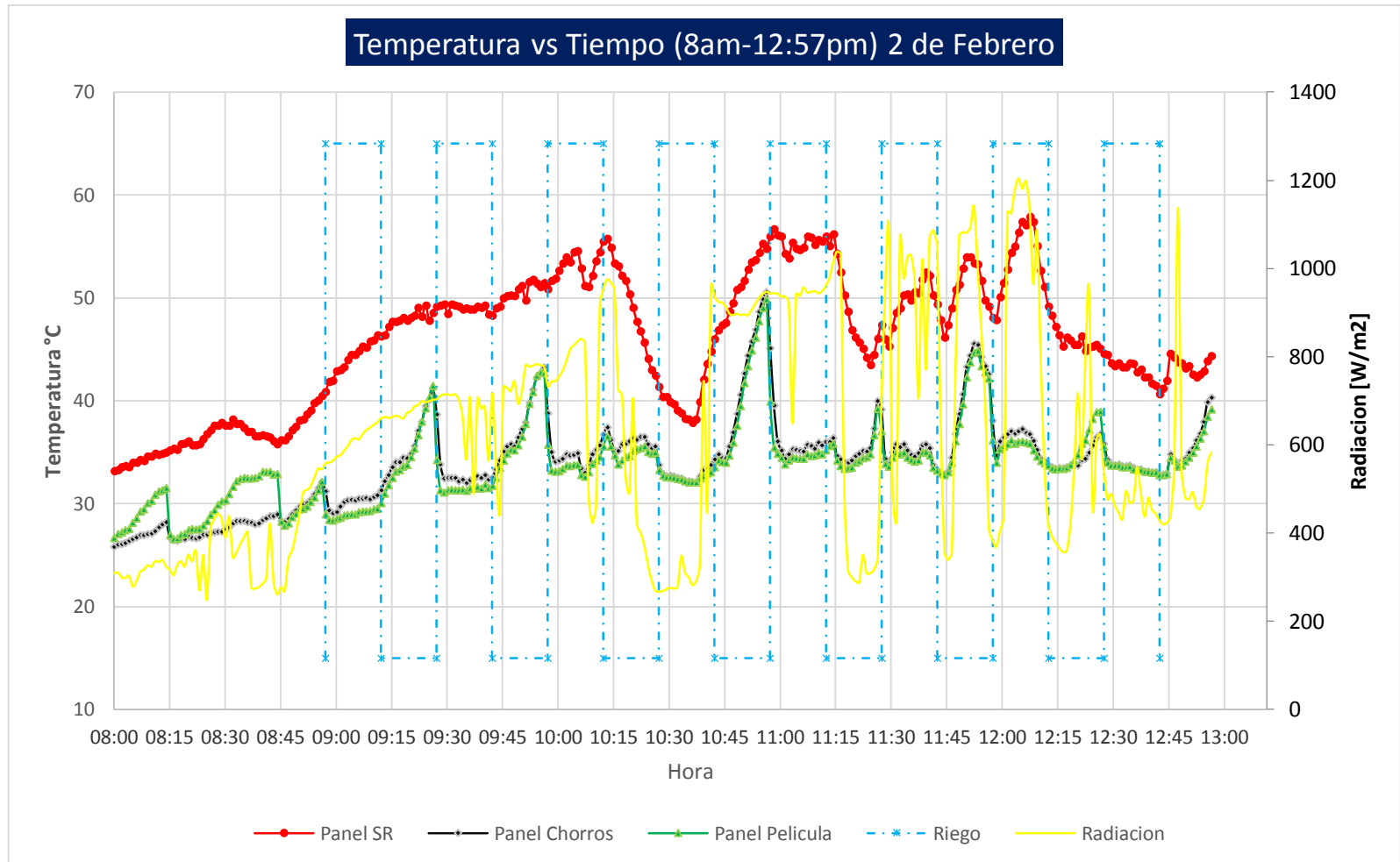
. Experimento 1-Dia 1, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



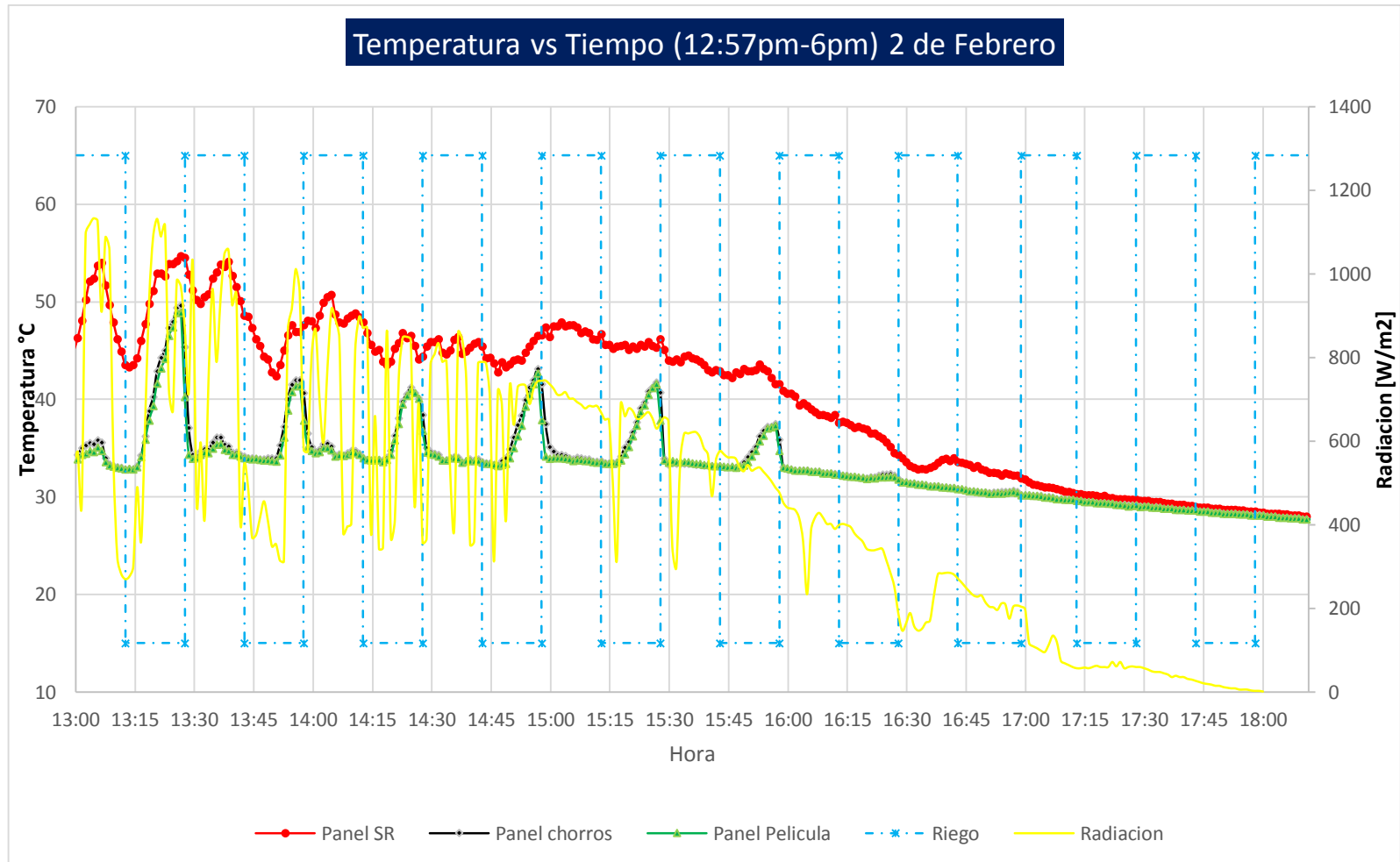
Experimento 1-Dia 2, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



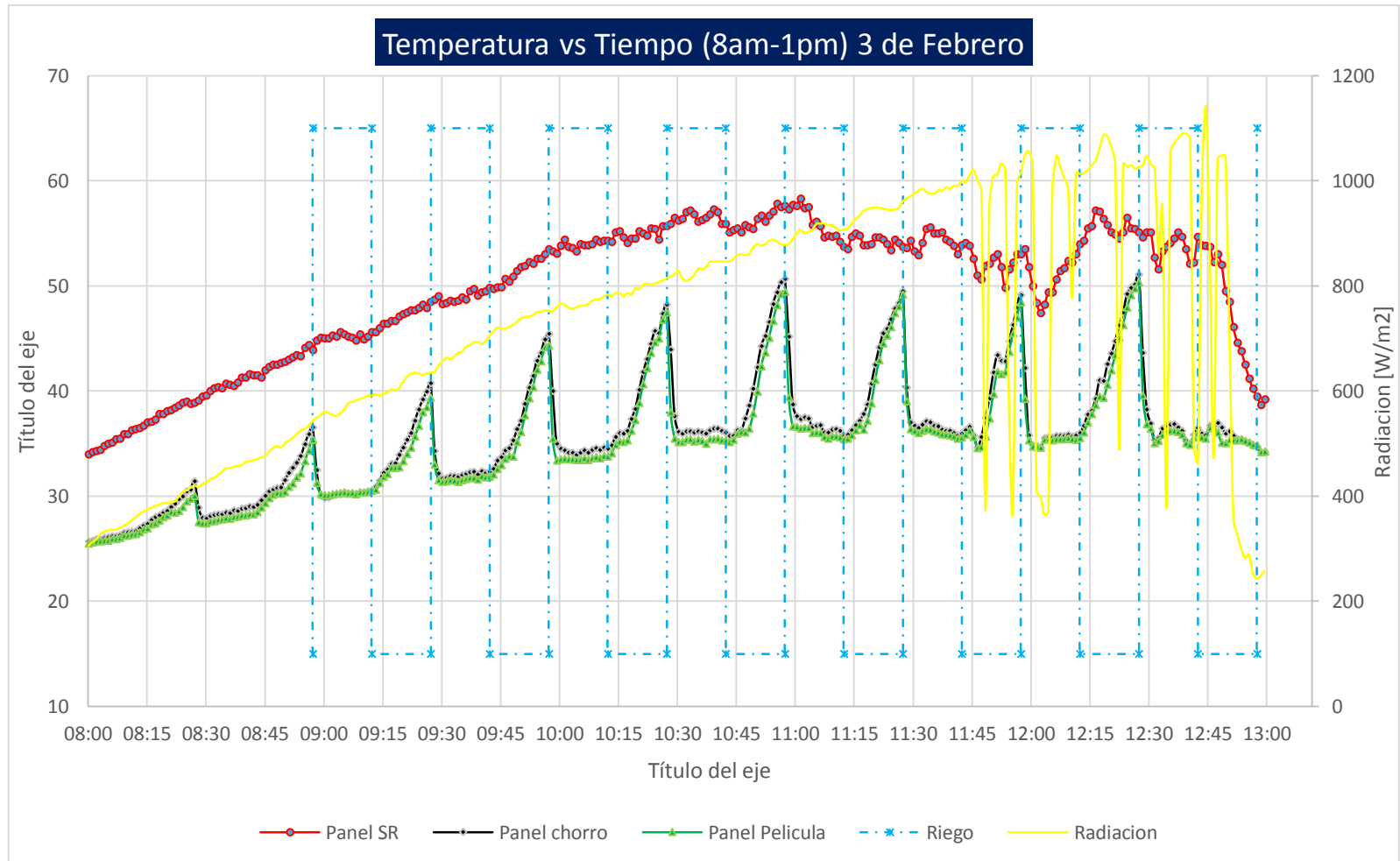
Experimento 1-Dia 2, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



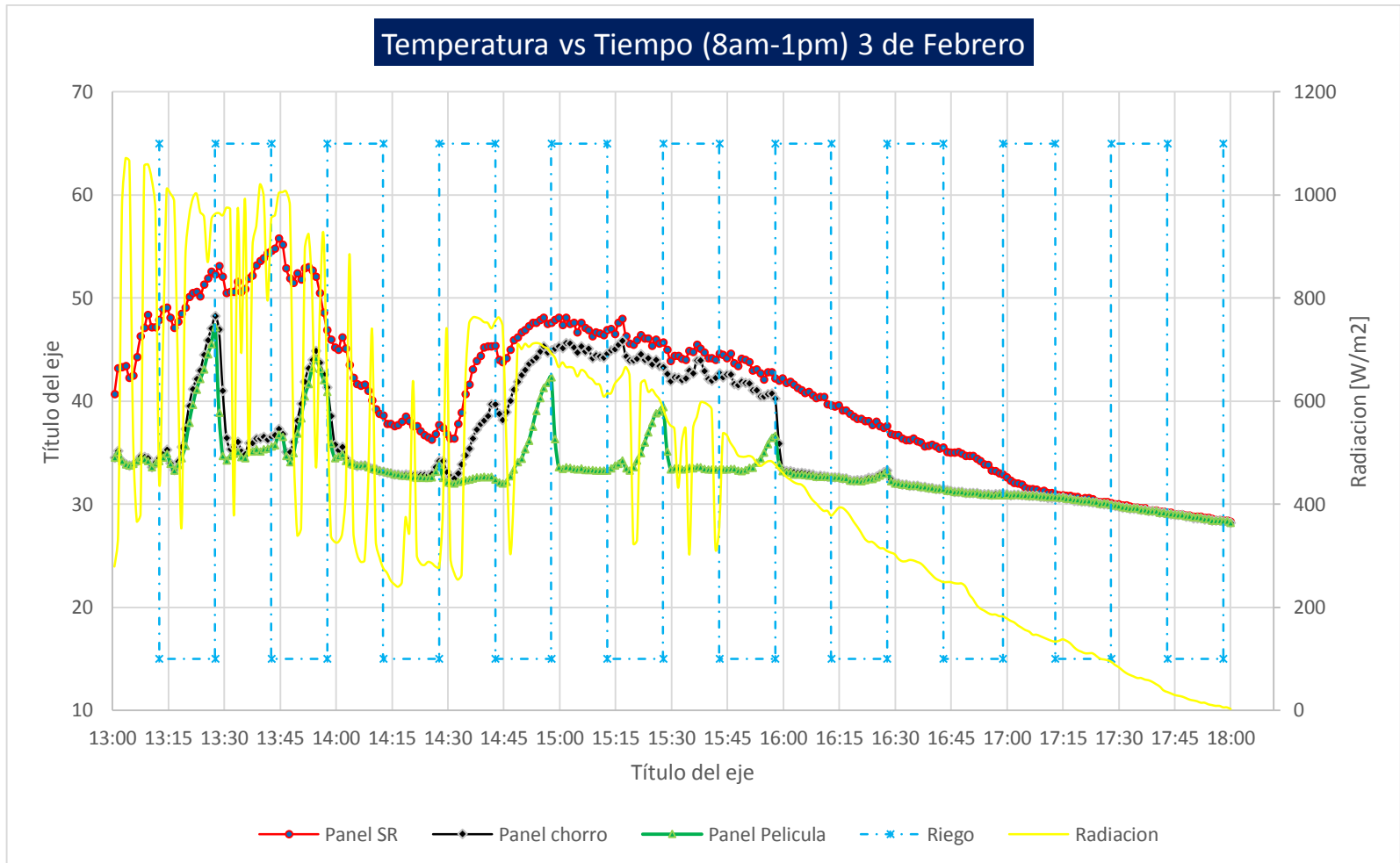
Experimento 2-Día 1, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



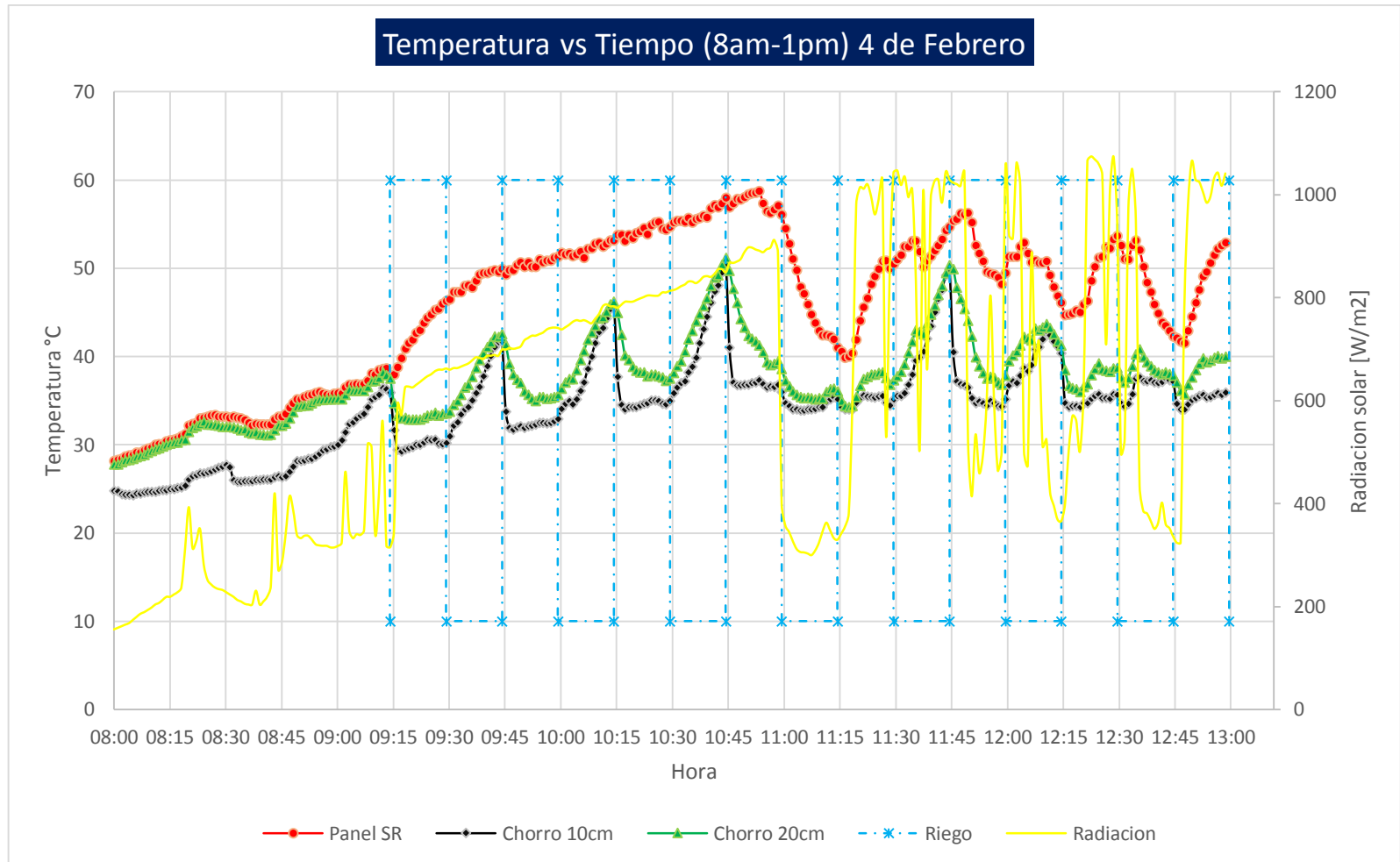
Experimento 2-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



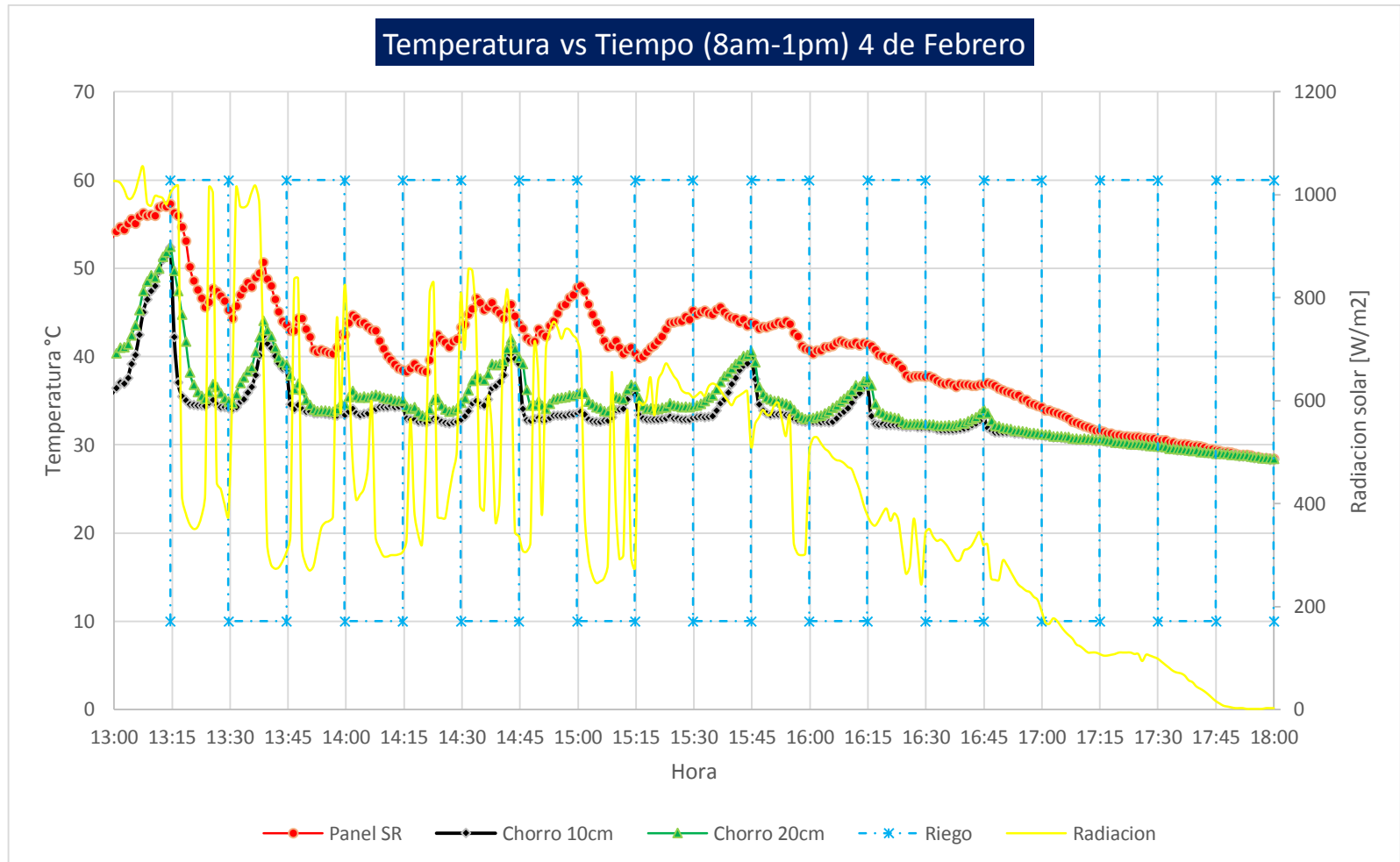
Experimento 2-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



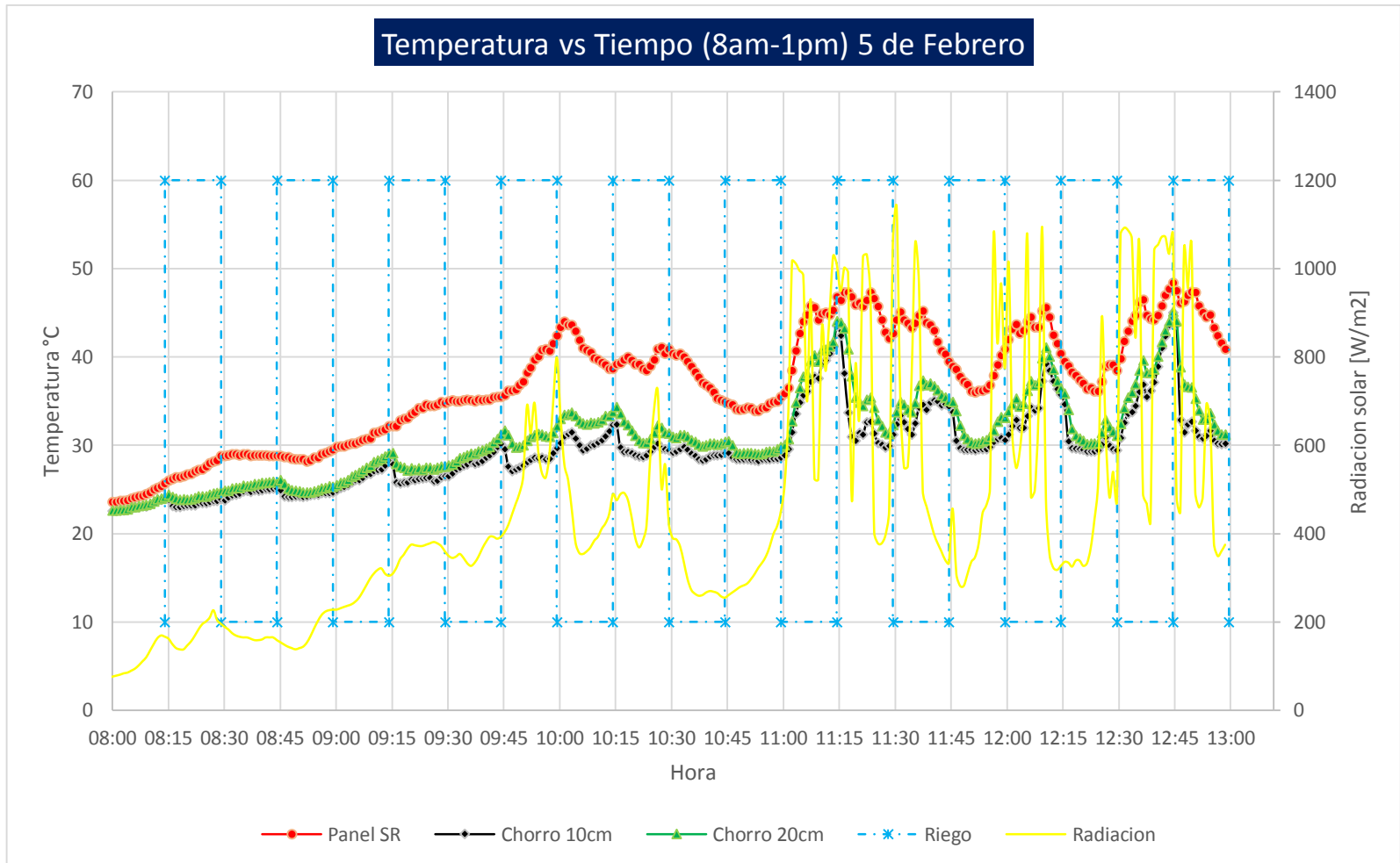
Experimento 2-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



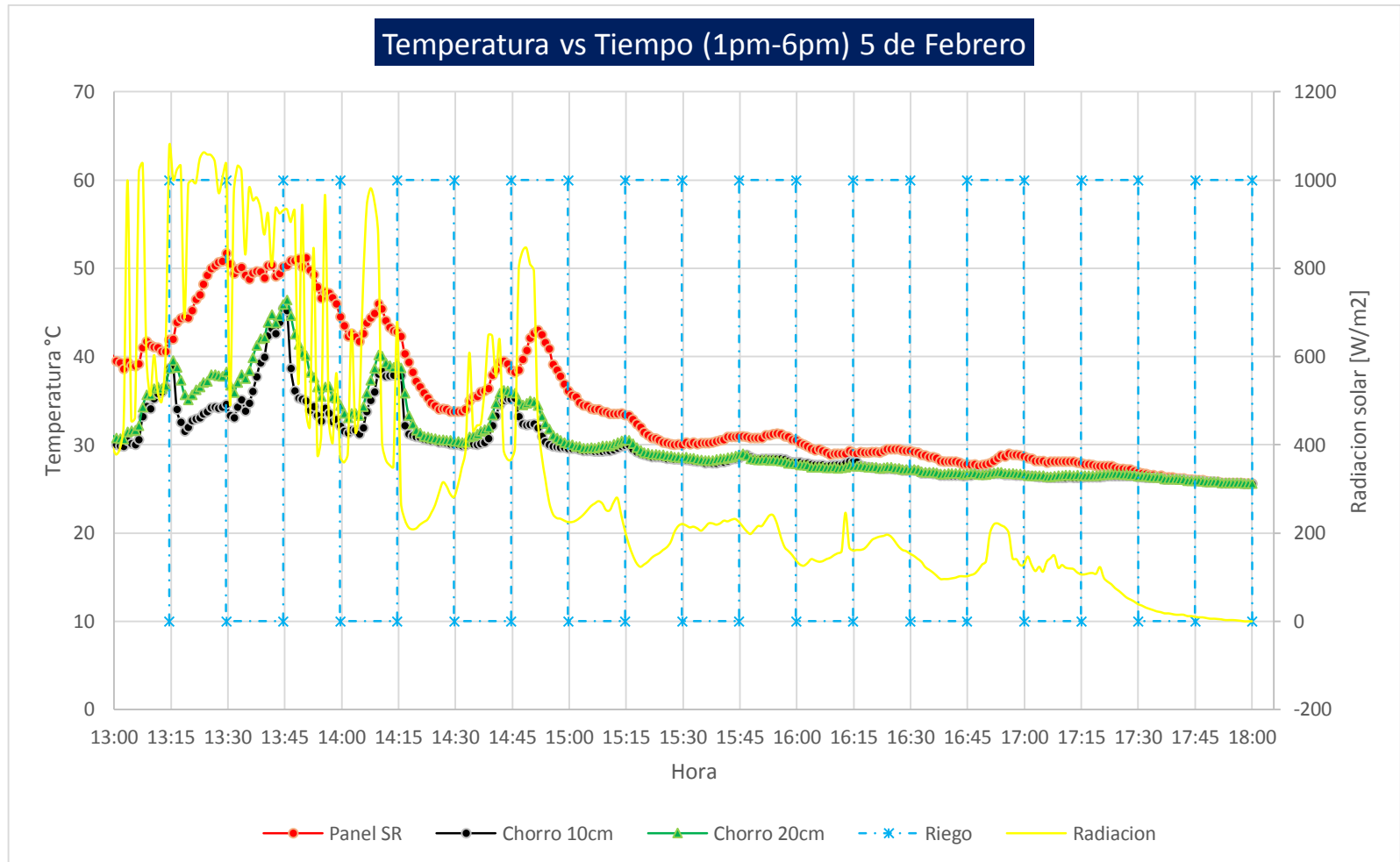
Experimento 3-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



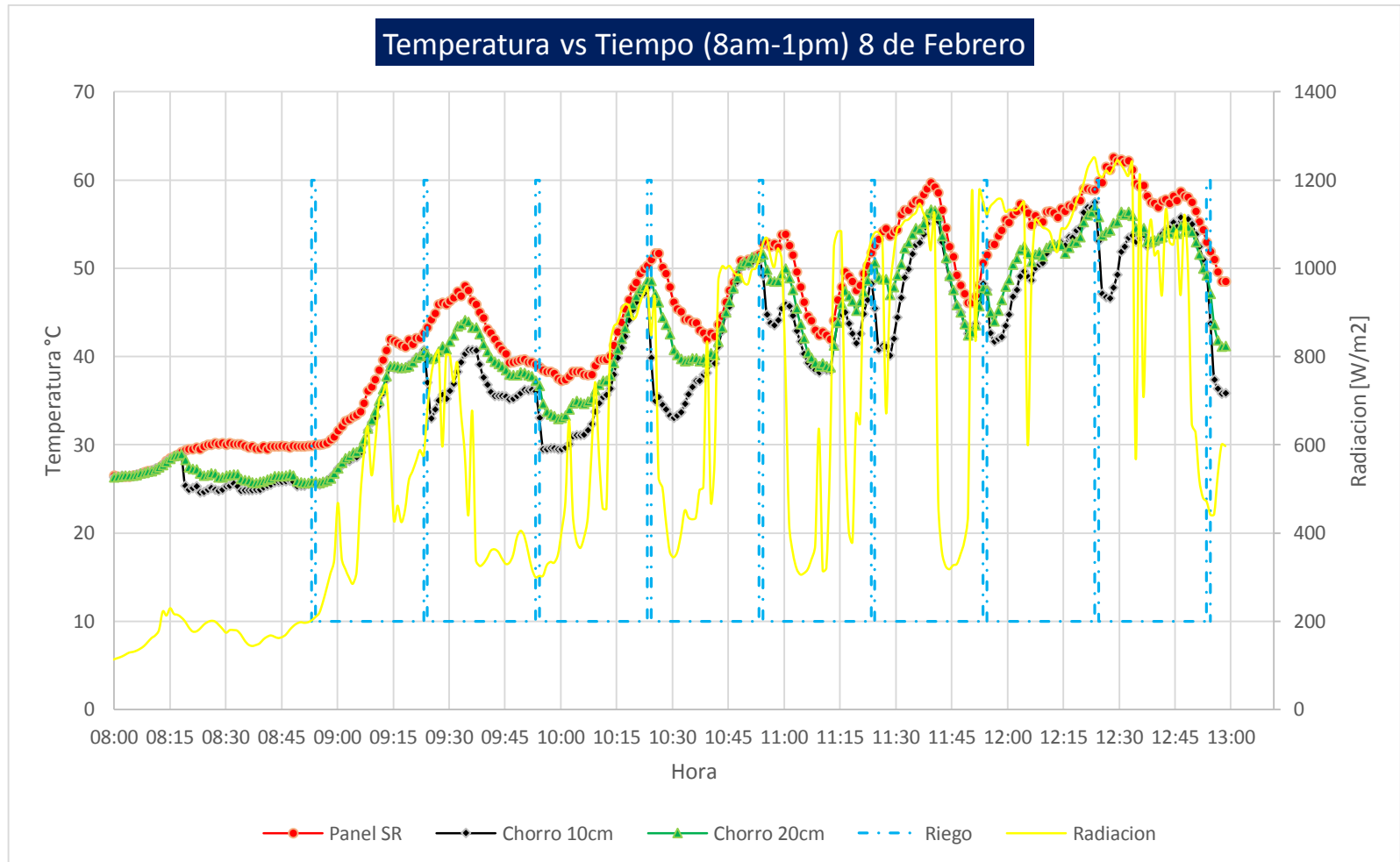
Experimento 3-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



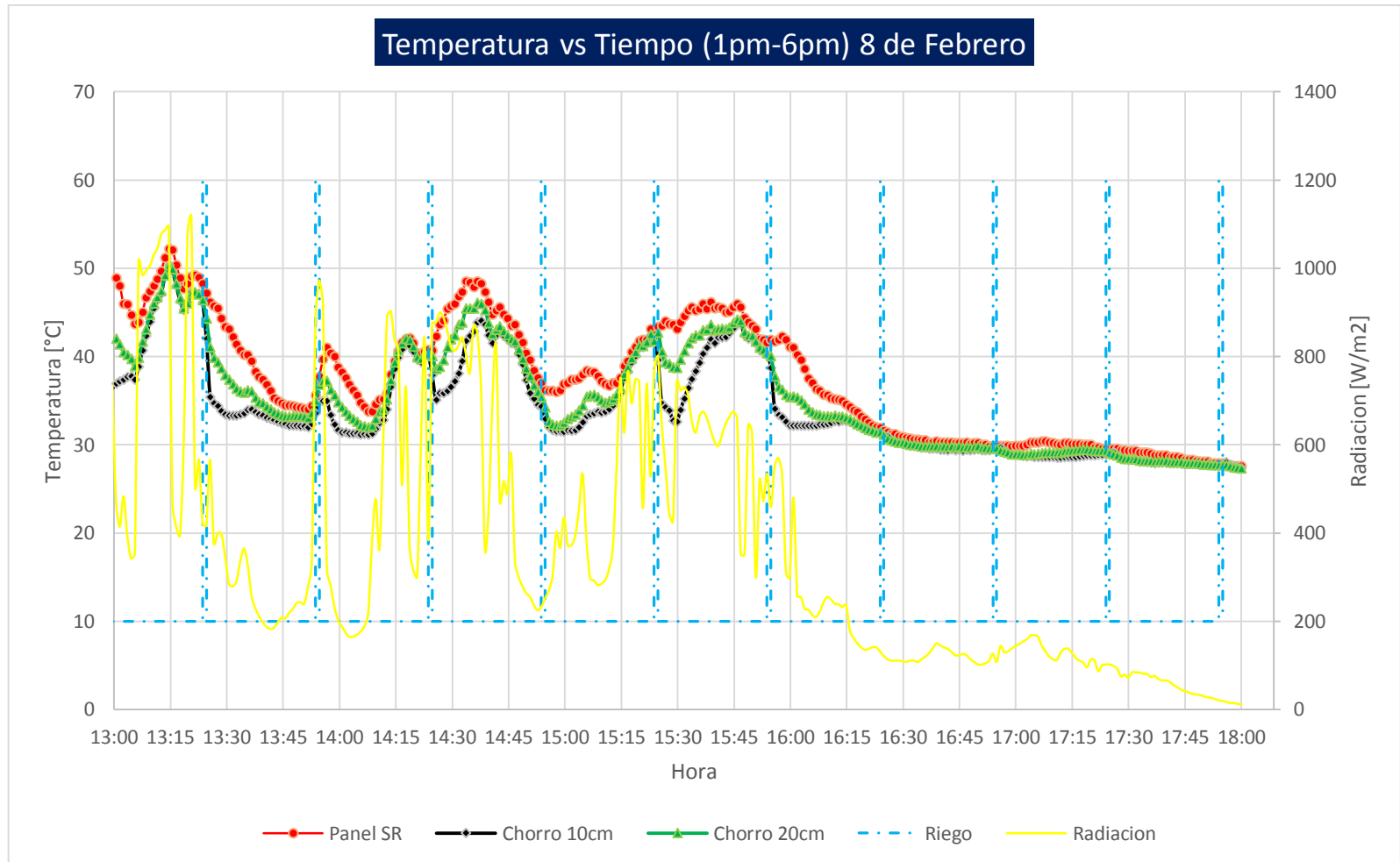
Experimento 3-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



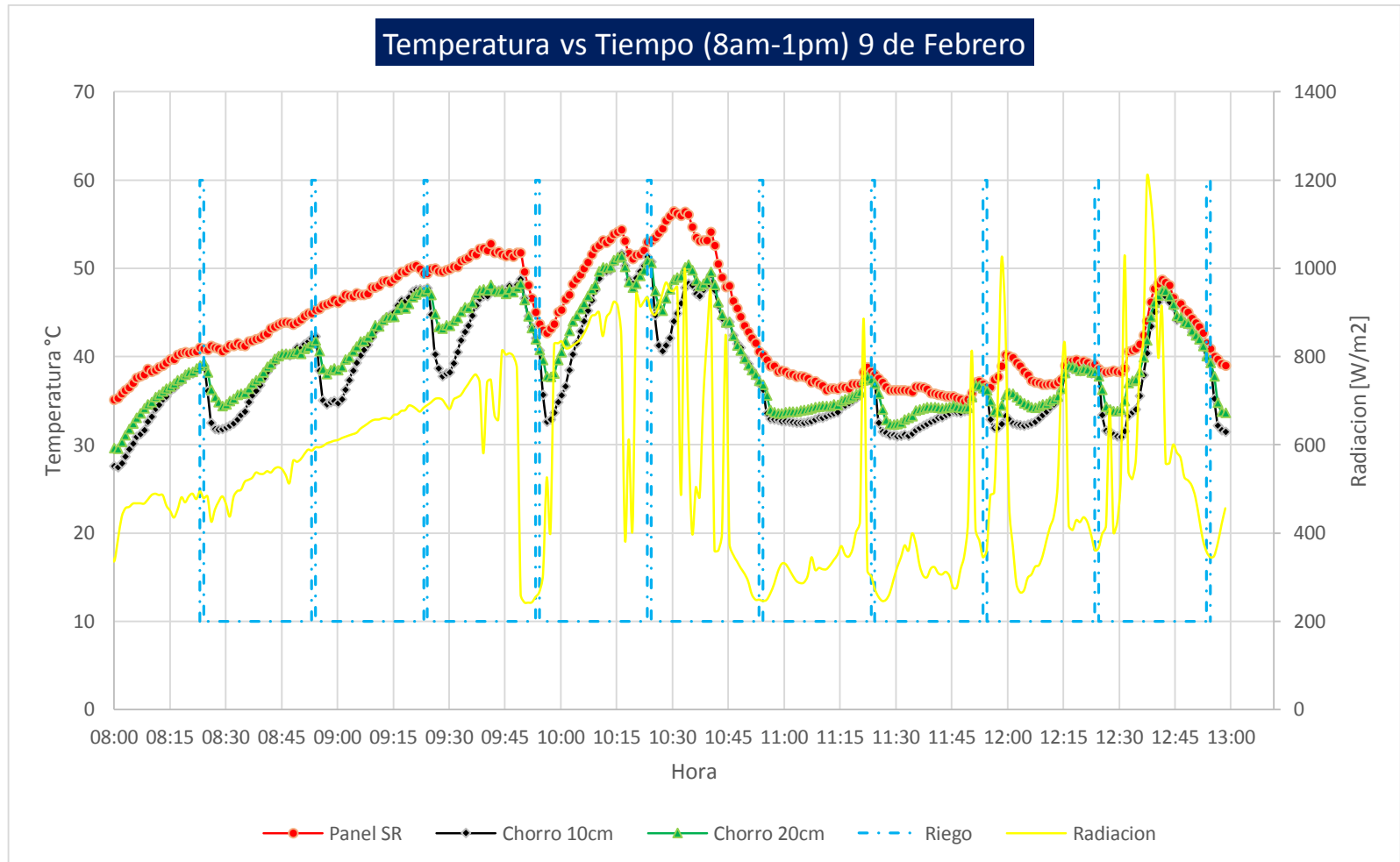
Experimento 3-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



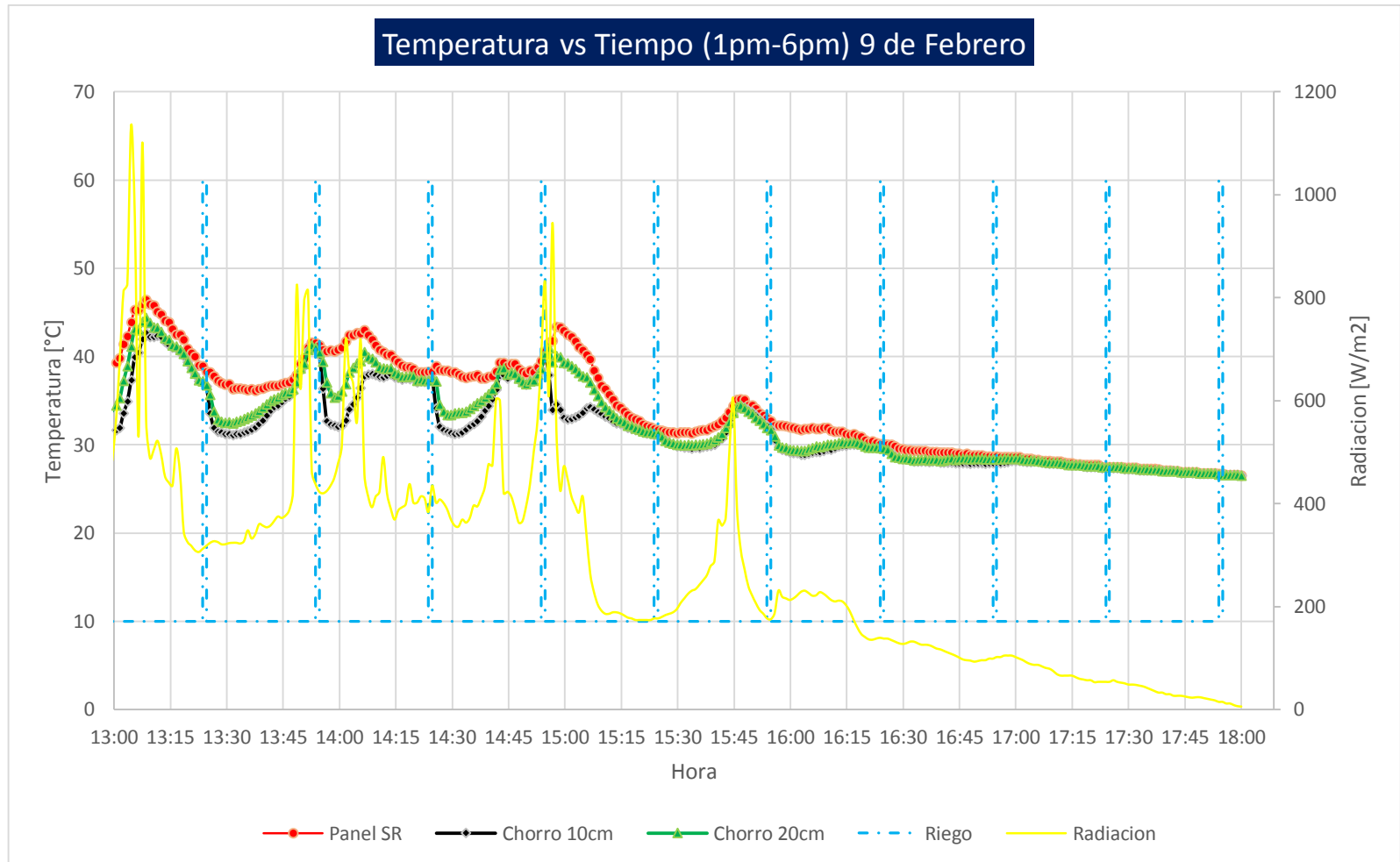
Experimento 4-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



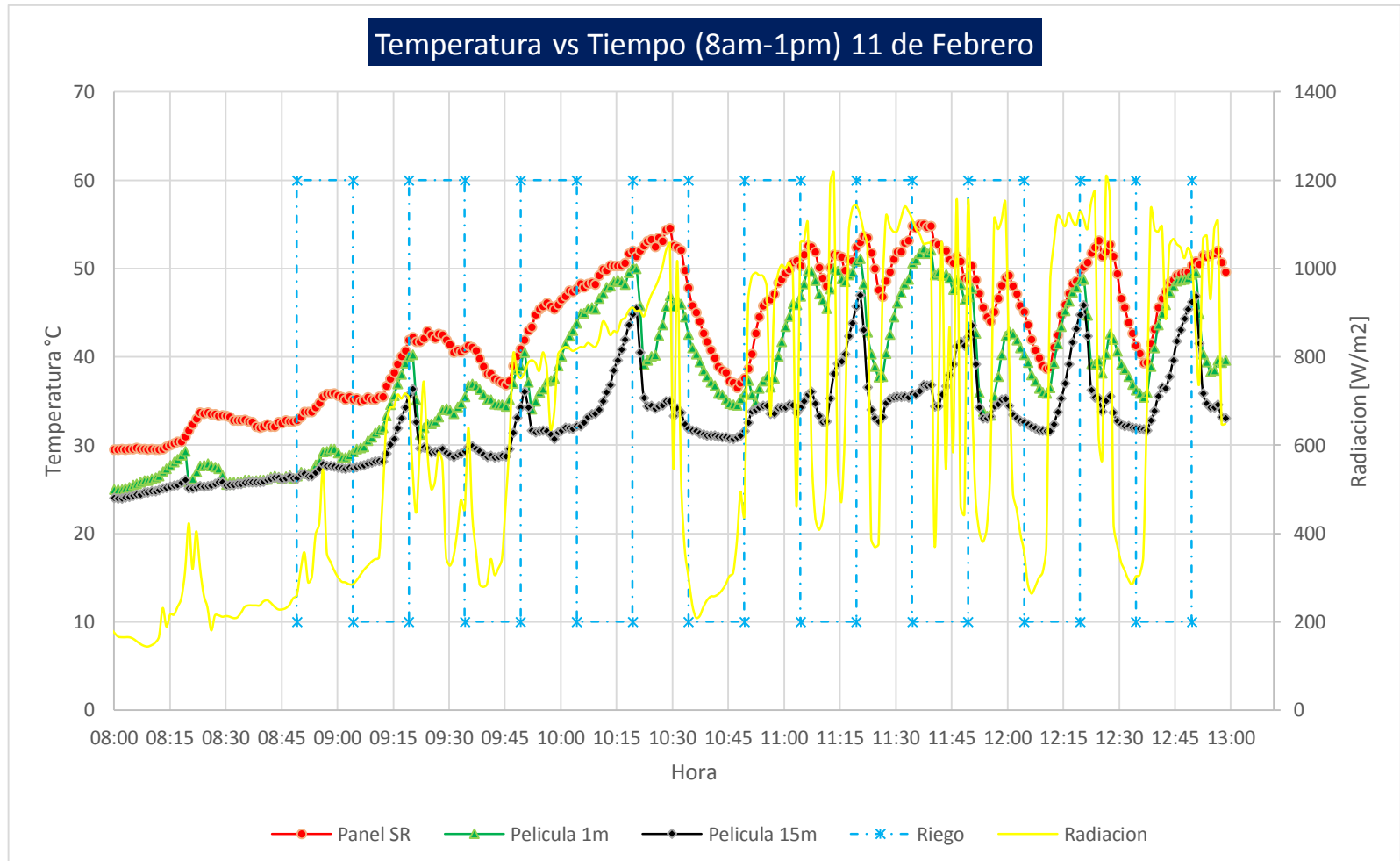
Experimento 4-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



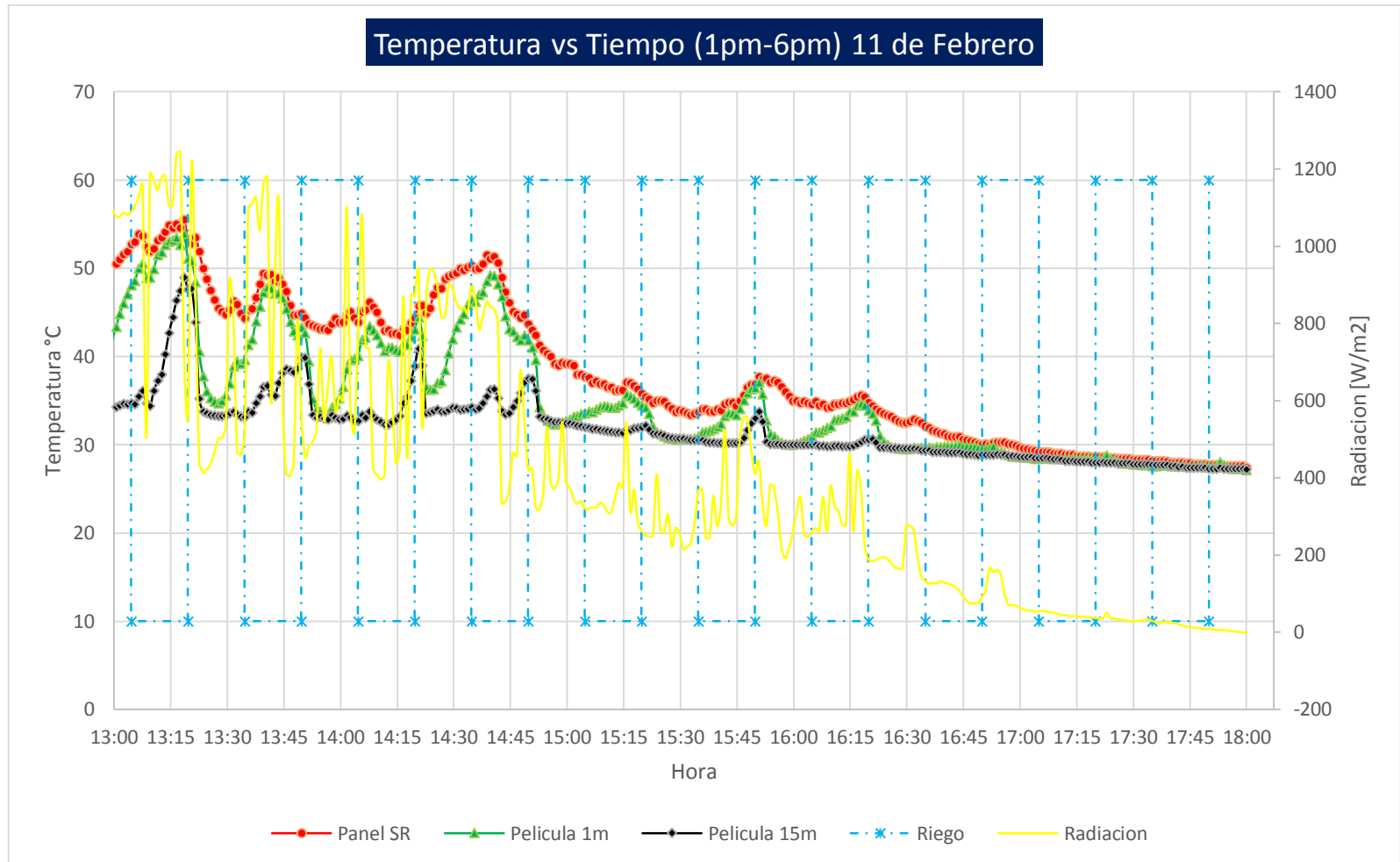
Experimento 4-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



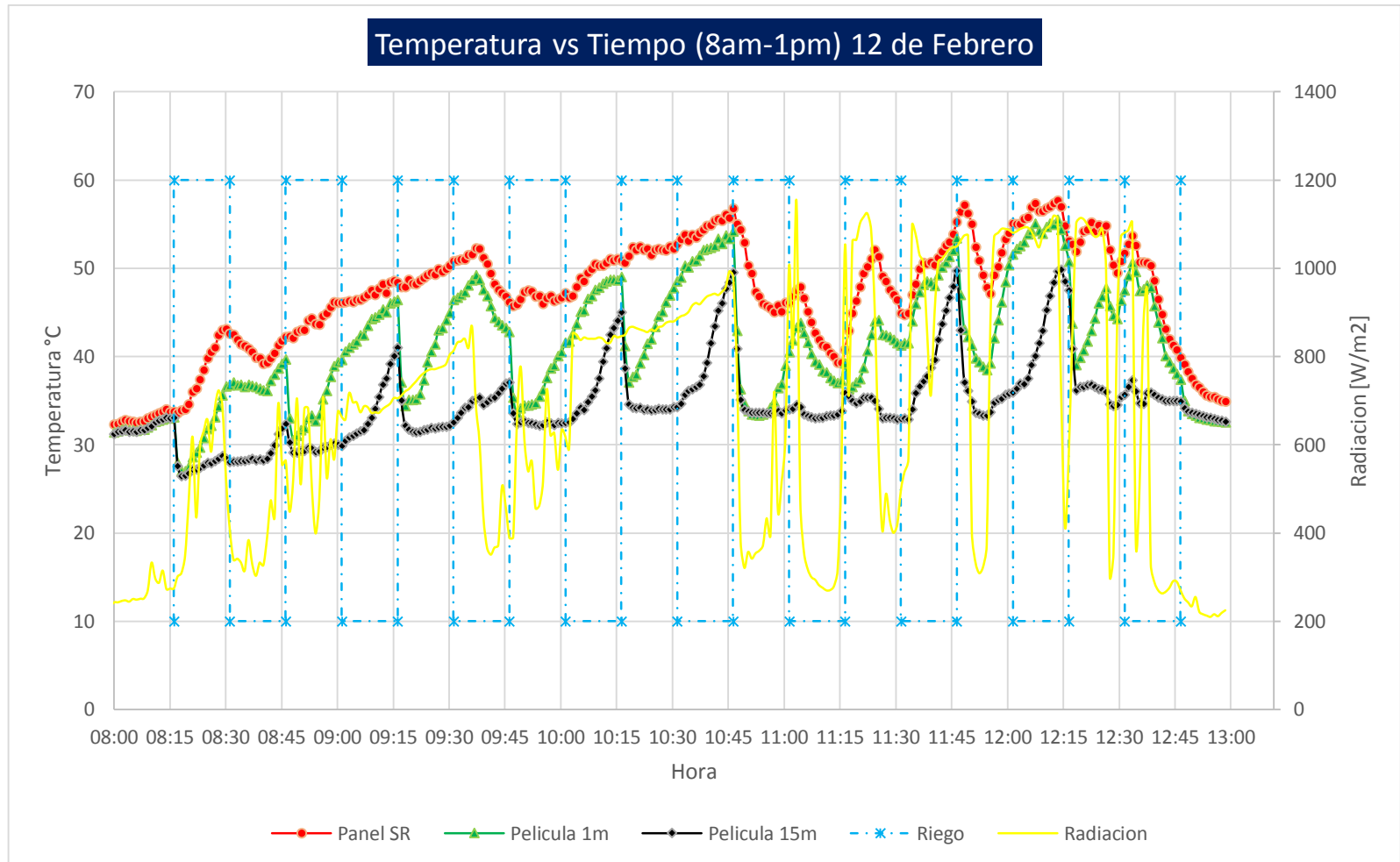
Experimento 4-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



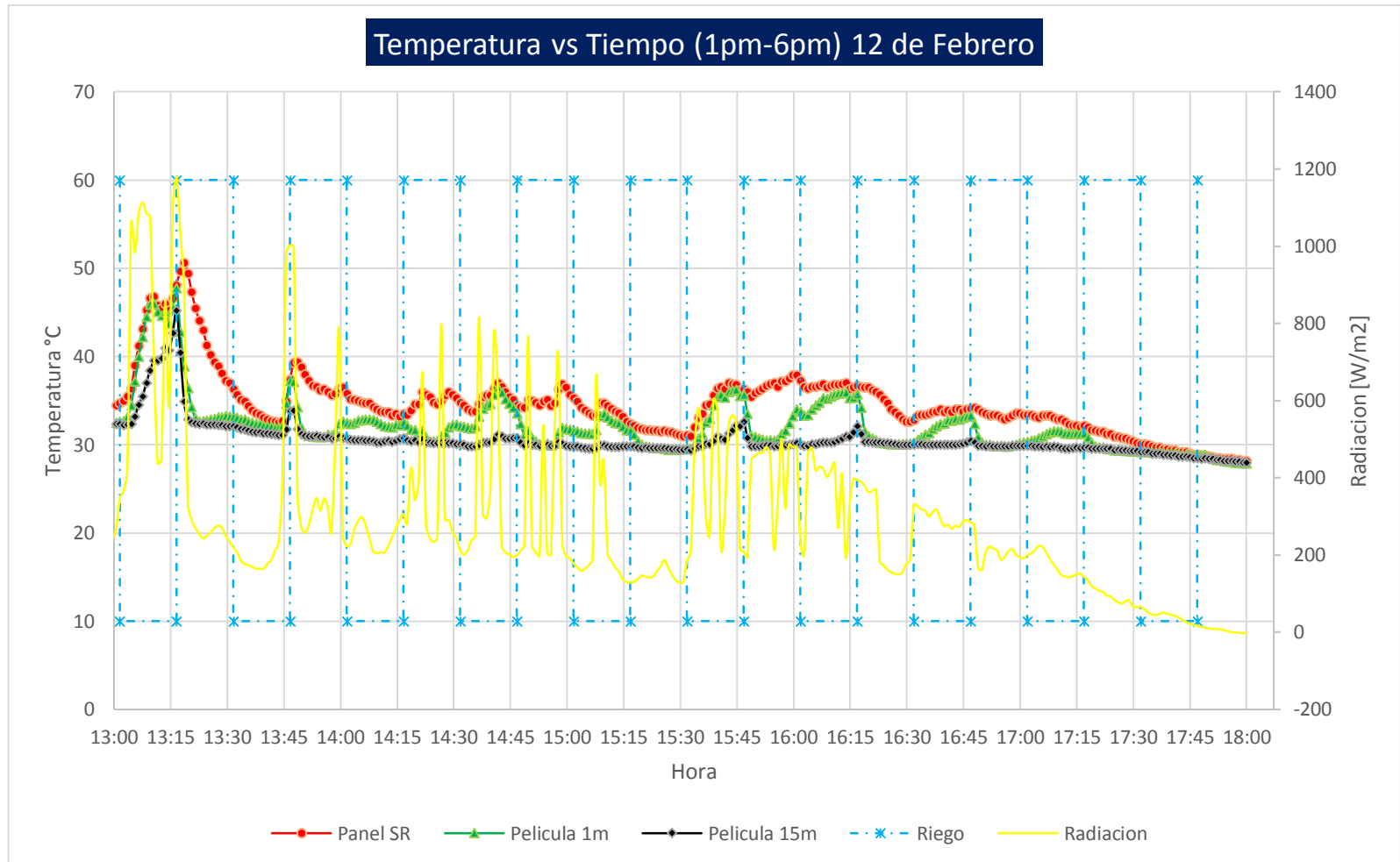
Experimento 5-Día 1, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



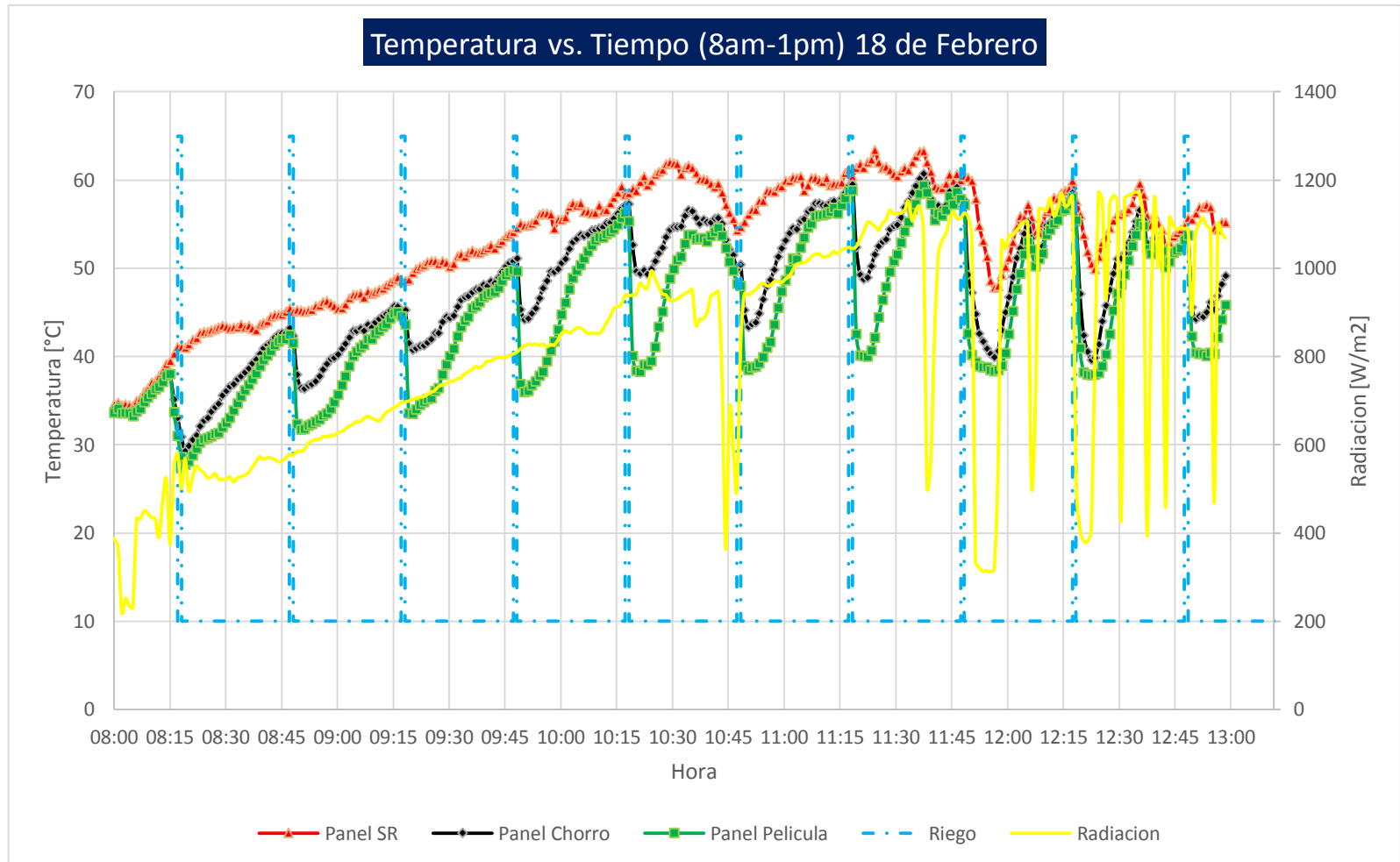
Experimento 5-Día 1, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



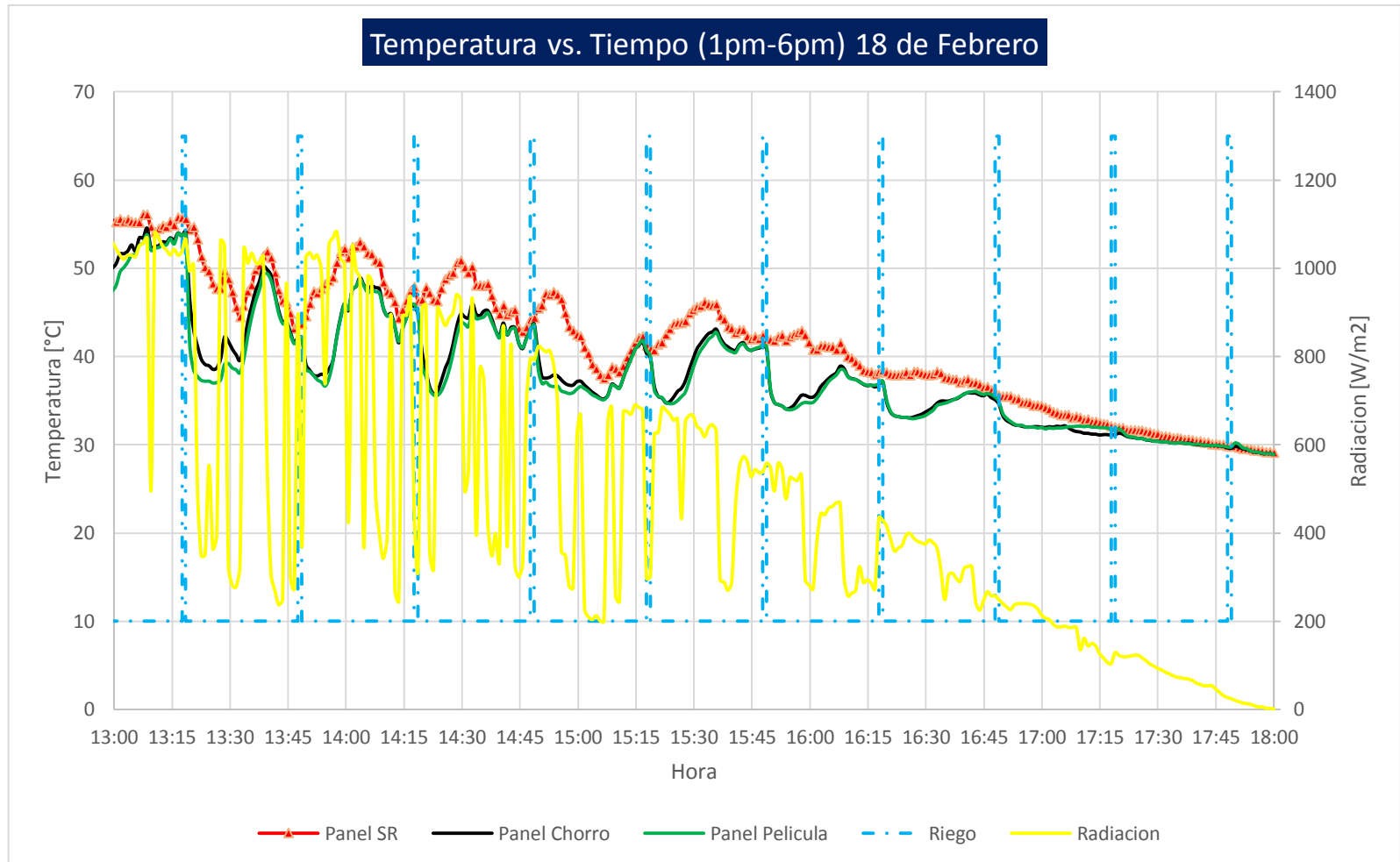
Experimento 5-Día 2, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



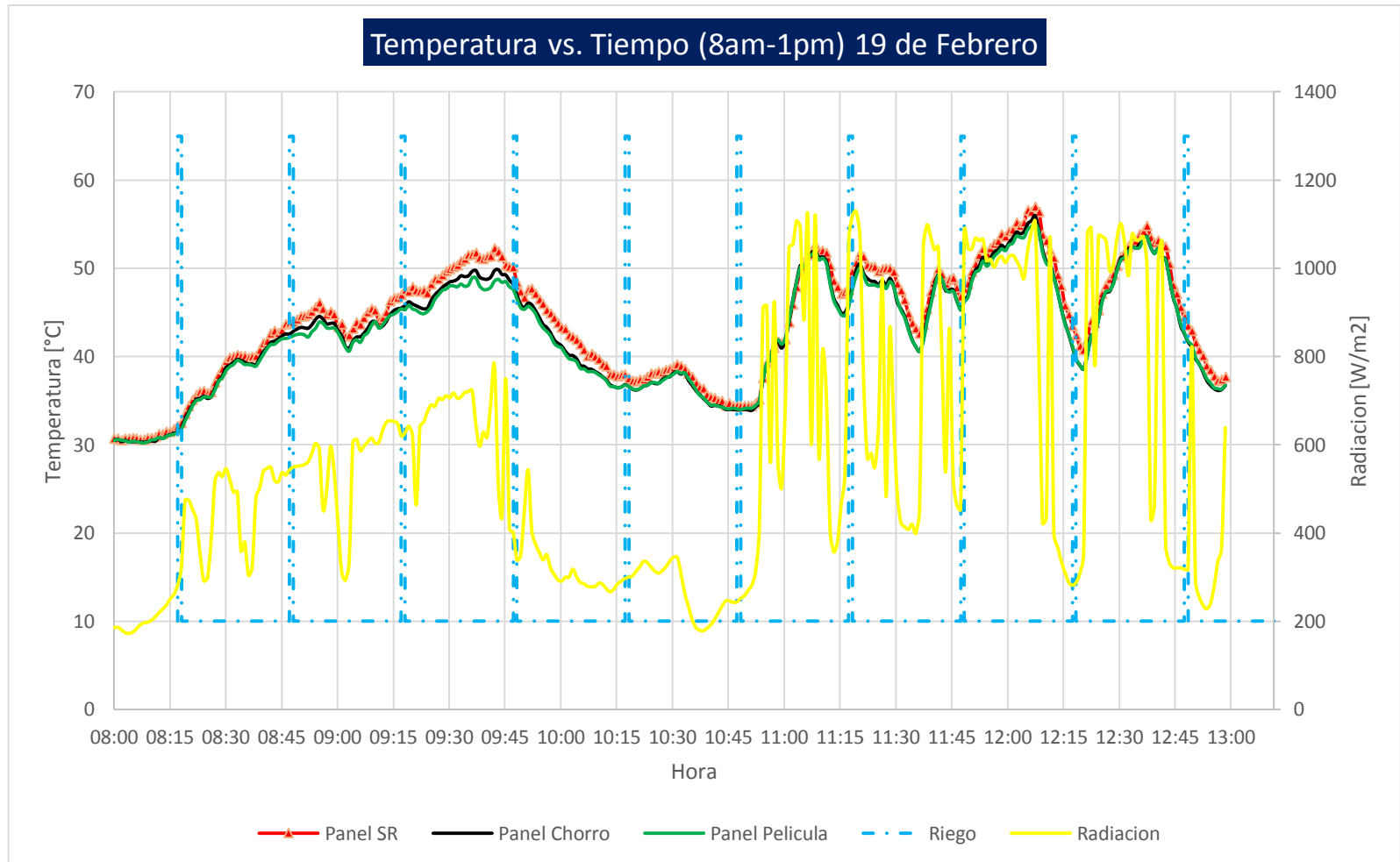
Experimento 5-Día 2, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



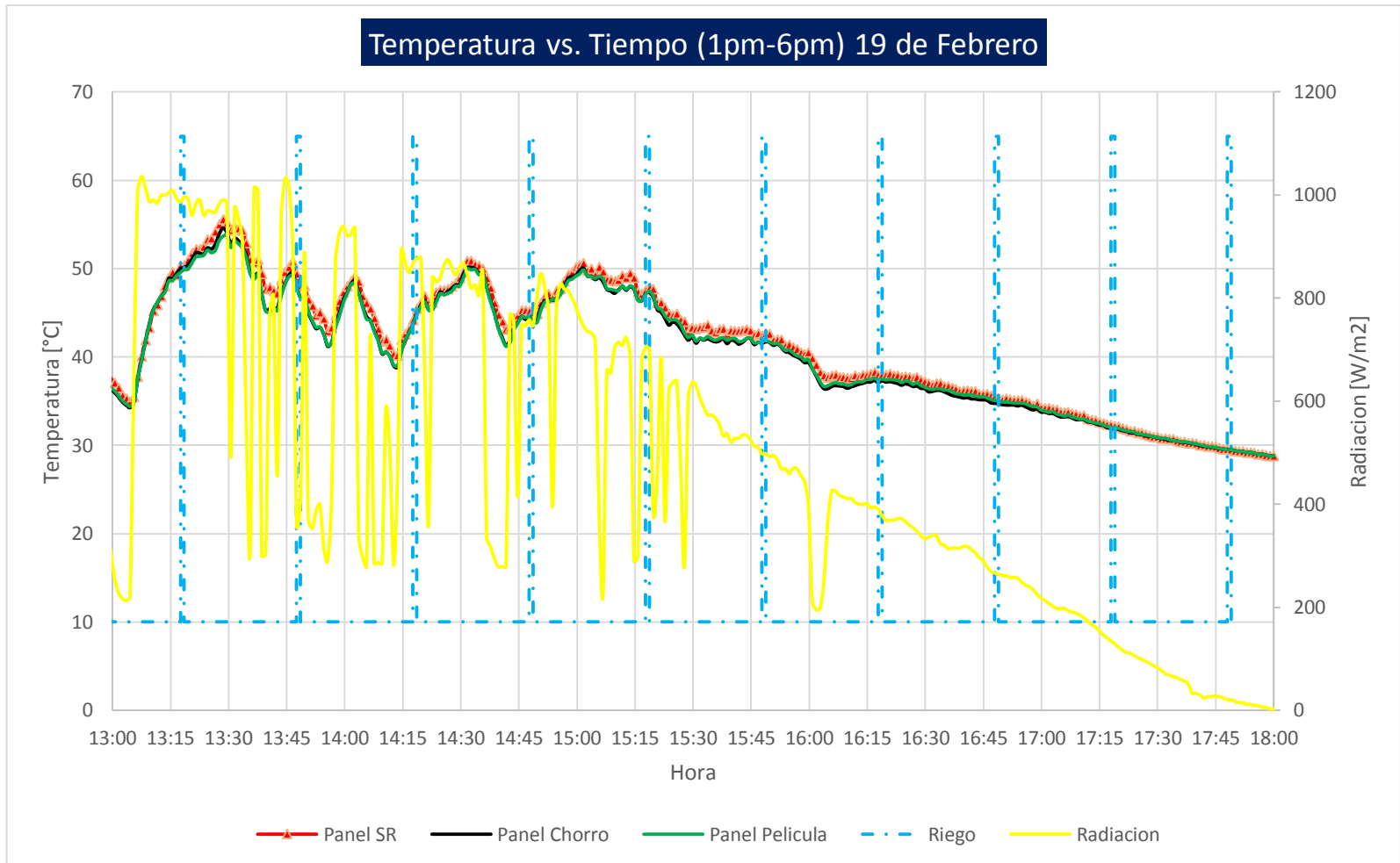
Experimento 6-Dia 1, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



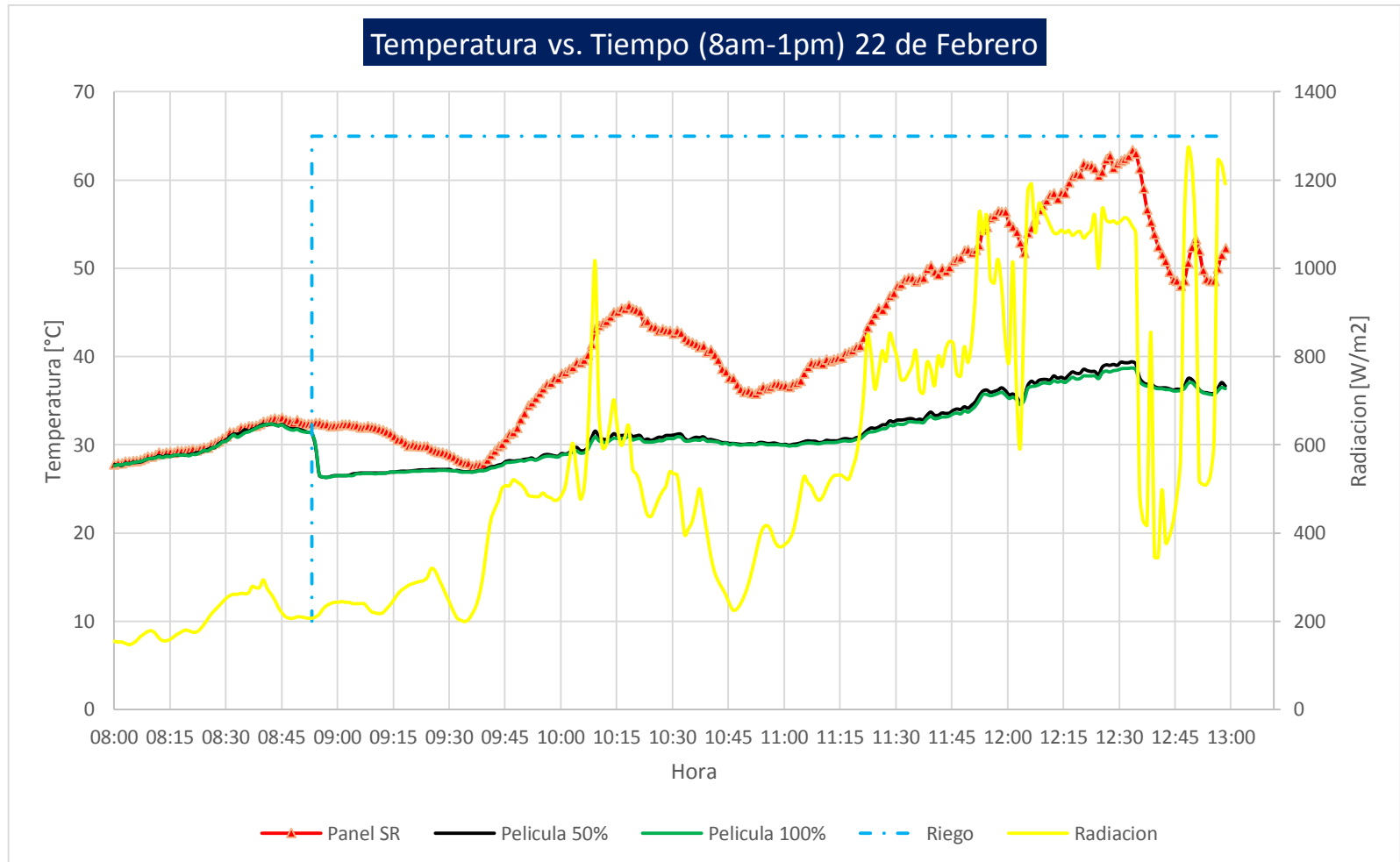
Experimento 6-Día 1, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



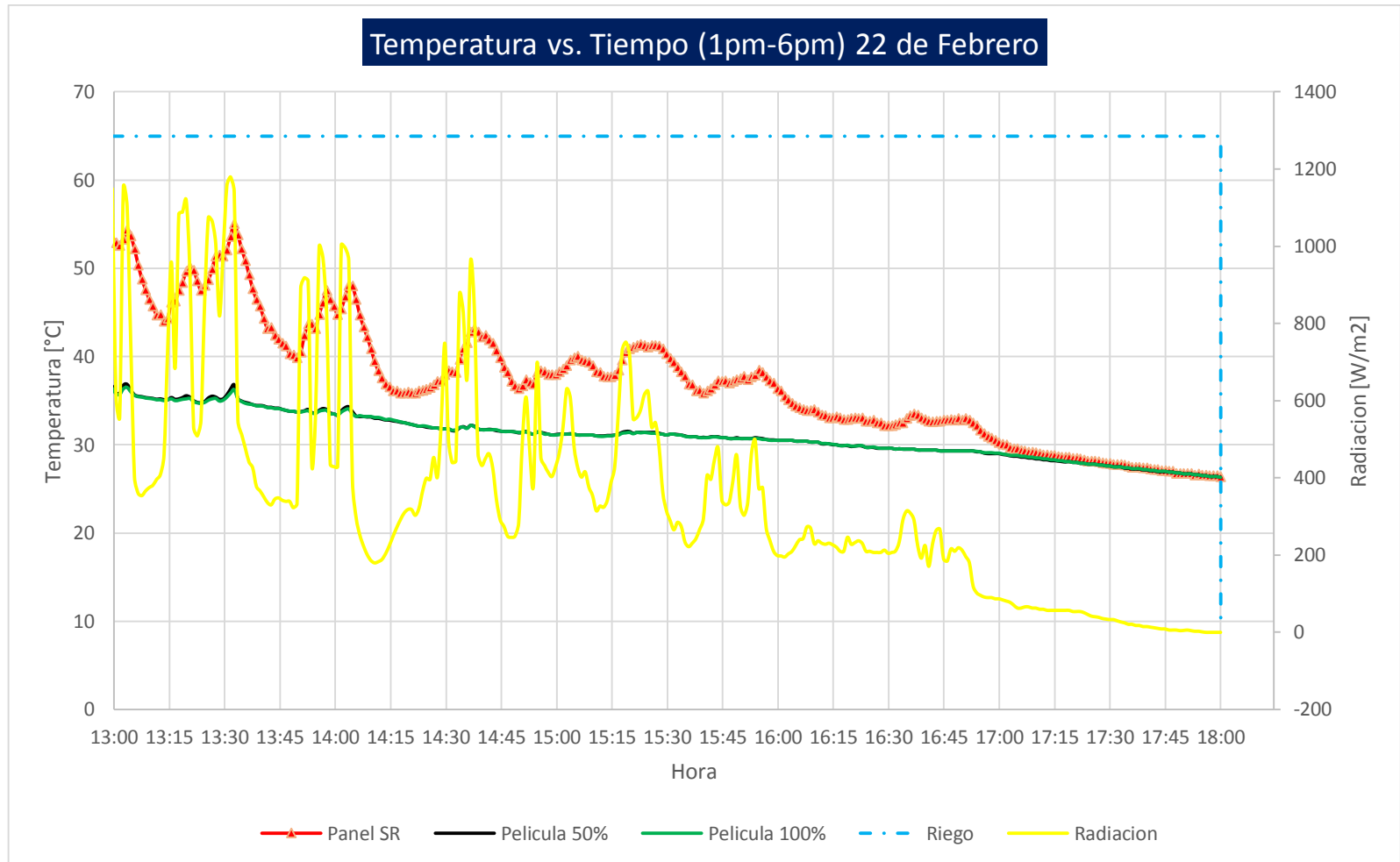
Experimento 6-Dia 2, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



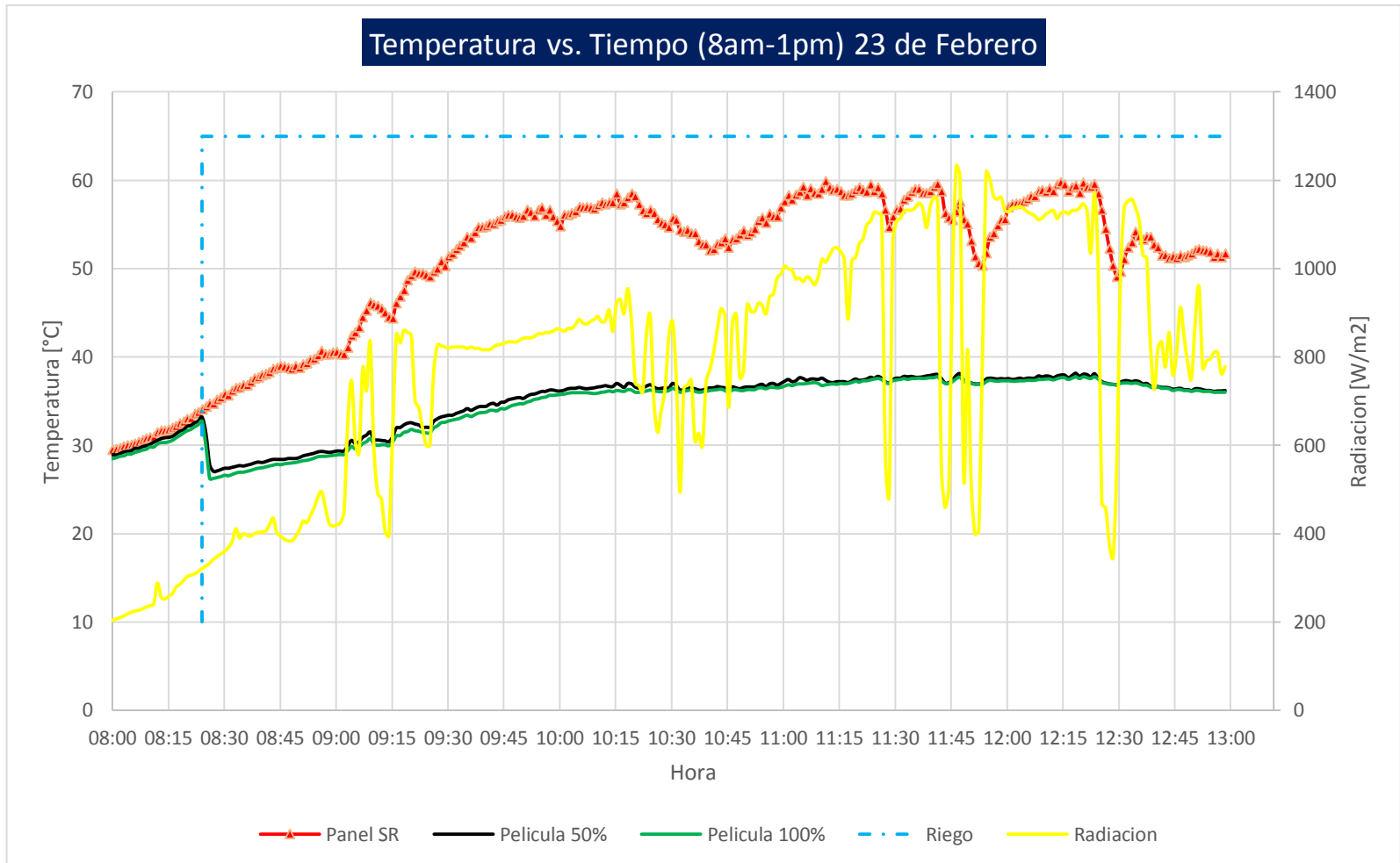
Experimento 6-Día 2, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



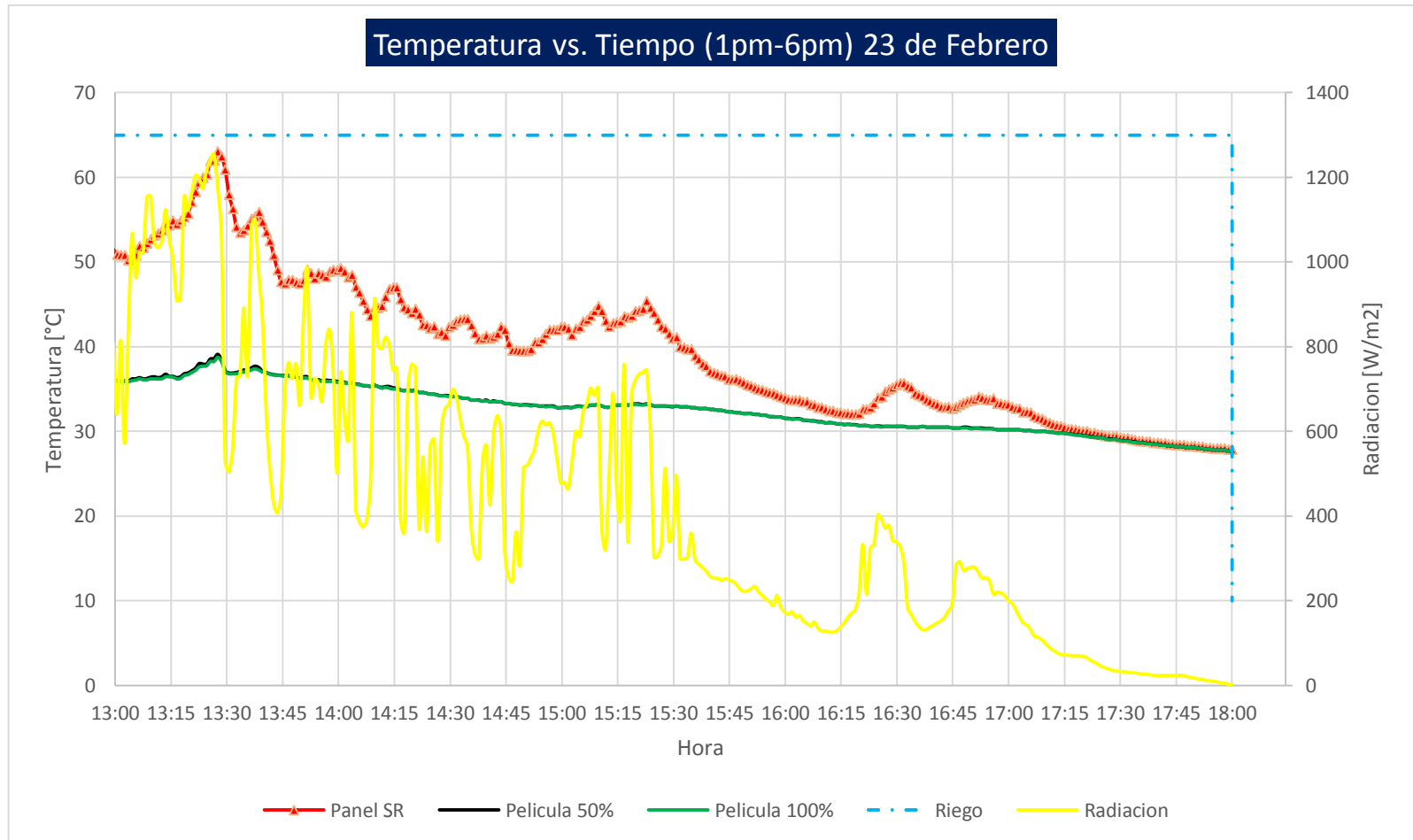
Experimento 7-Dia 1, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



Experimento 7-Dia 1, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



Experimento 7-Dia 2, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



Experimento 7-Dia 2, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente

ANEXO C. GRÁFICAS DEL ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE TEMPERATURA

Dentro de este análisis están incluidas tres gráficas por cada día de prueba. La primera de estas gráficas se realizó tomando intervalos de 30 minutos y promediando la diferencia de temperatura de operación del panel fotovoltaico respecto al panel de control (sin riego) y la radiación solar. Esto con el fin de agrupar todos los datos de la prueba por día en una sola gráfica que me permita ver cual método es más efectivo para la reducción de la temperatura.

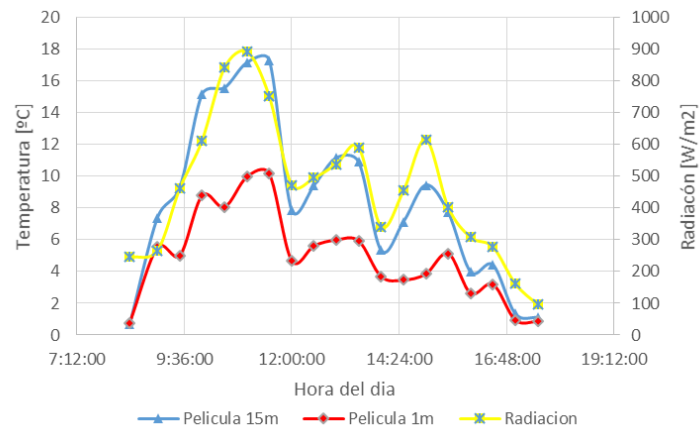
La segunda de estas gráficas nos presenta la correlación que hay entre la temperatura de operación del panel con la radiación solar. Esta gráfica también está hecha con los promedios de los intervalos mencionados anteriormente. De ella se puede estimar cuanto aumenta la temperatura por el incremento de la radiación, ya que se es posible obtener una ecuación aproximada de la tendencia de los datos.

La tercer gráfica presentada en este análisis se asemeja a la anterior mencionada, pero esta vez la correlación se hace es entre la diferencia promedio de temperatura entre el panel de control (sin riego) y los paneles fotovoltaicos con irrigación.

EXPERIMENTO 1-DIA1: Película de agua 15:15 vs Película de agua 1:29

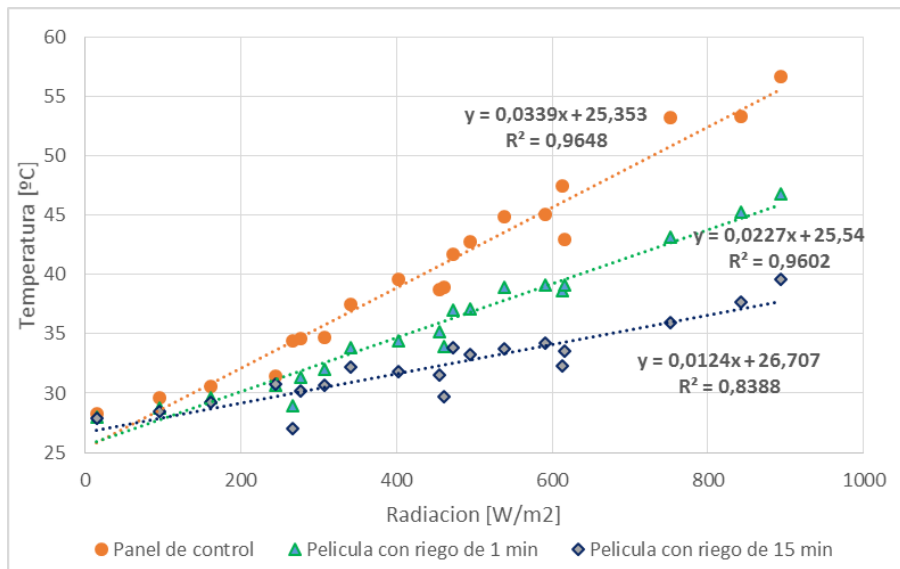


Desarrollo del experimento

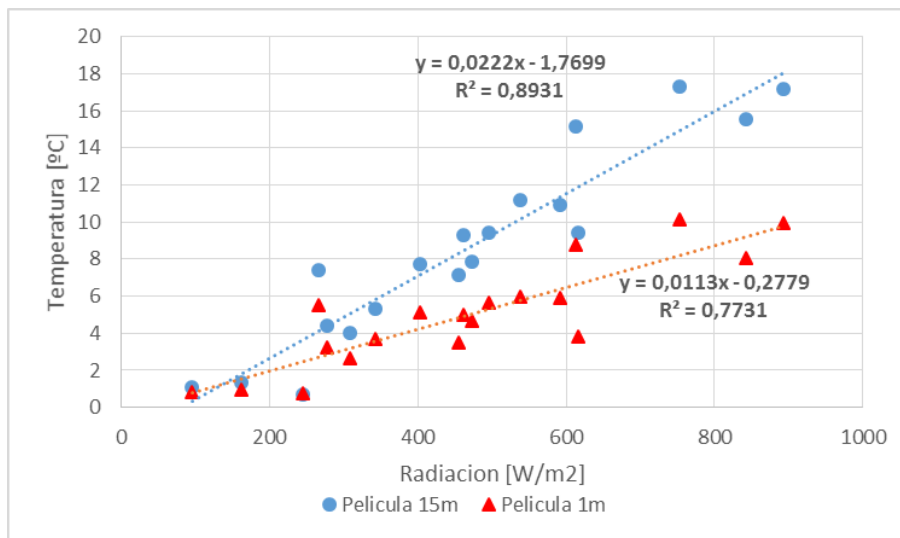


Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

Por cada incremento de 100 [W/m²] la temperatura del panel control (sin riego) aumenta 3,39 °C aproximadamente, el panel con película de agua con riego activo 1 minuto e inactivo 29 aumenta 1,97 °C y el panel con riego activo 15 minutos e inactivo 15 aumenta 1,24 °C.

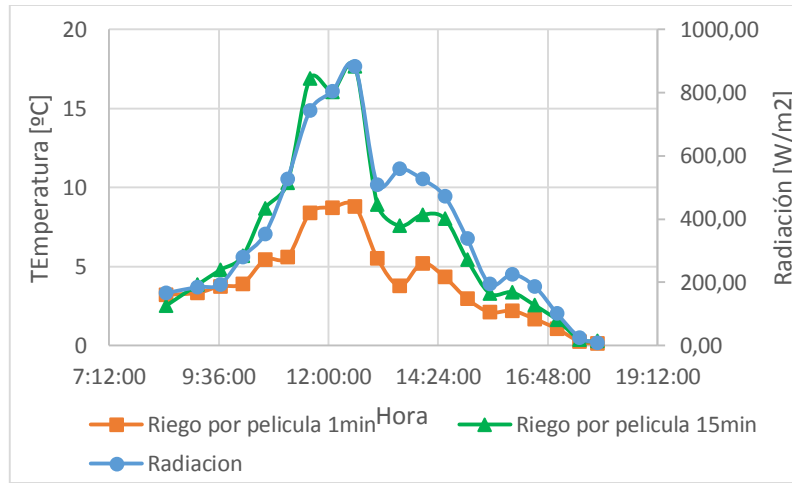


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio



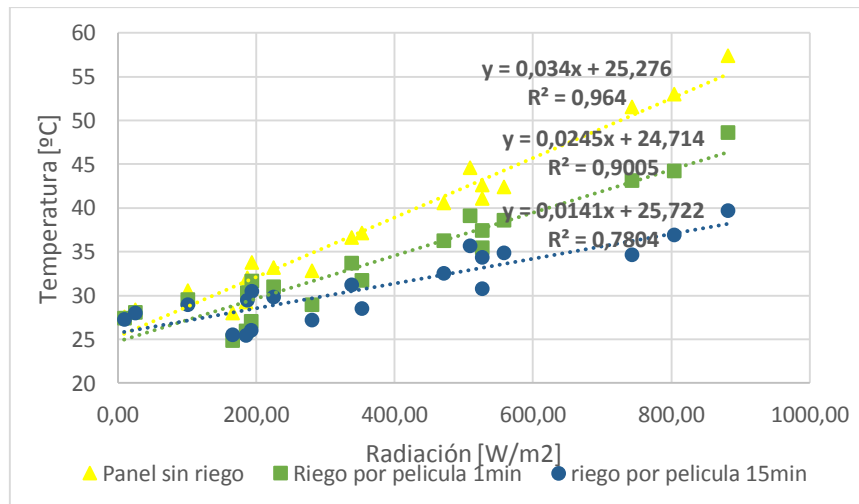
Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

EXPERIMENTO 1-DIA2: Película de agua 15:15 vs Película de agua 1:29

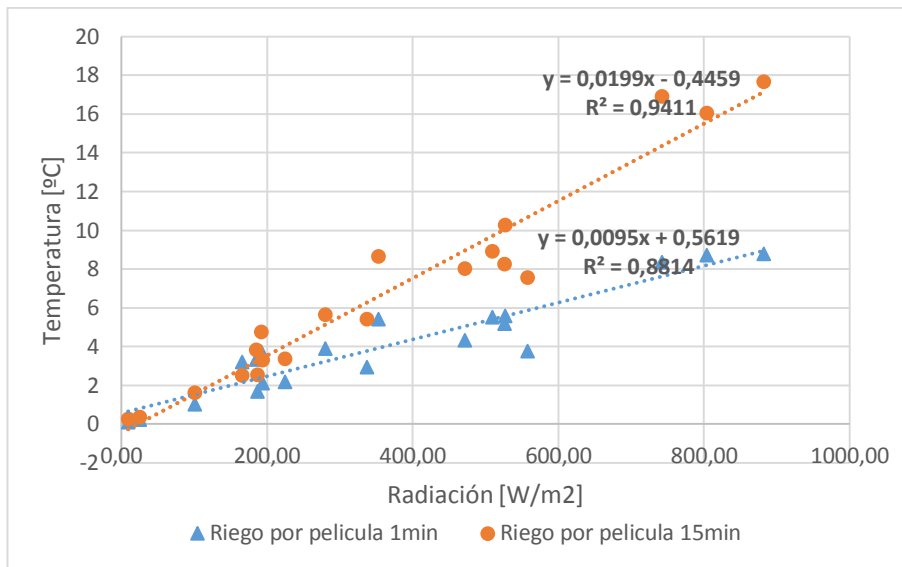


Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

Por cada incremento de 100 [W/m²] la temperatura del panel control (sin riego) aumenta 3,4 °C aproximadamente, el panel con película de agua con riego activo 1 minuto e inactivo 29 aumenta 2,45 °C y el panel con riego activo 15 minutos e inactivo 15 aumenta 1,41 °C



Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

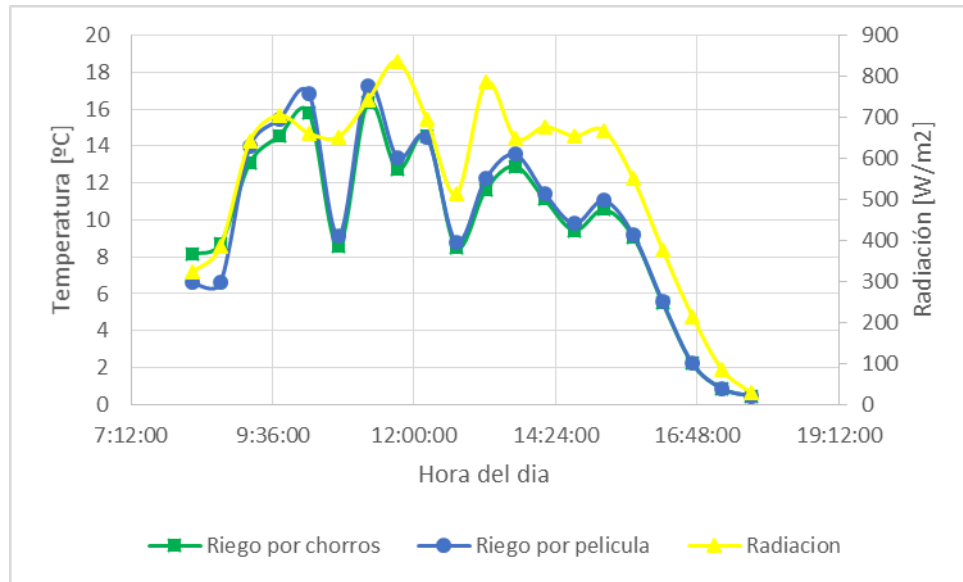


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

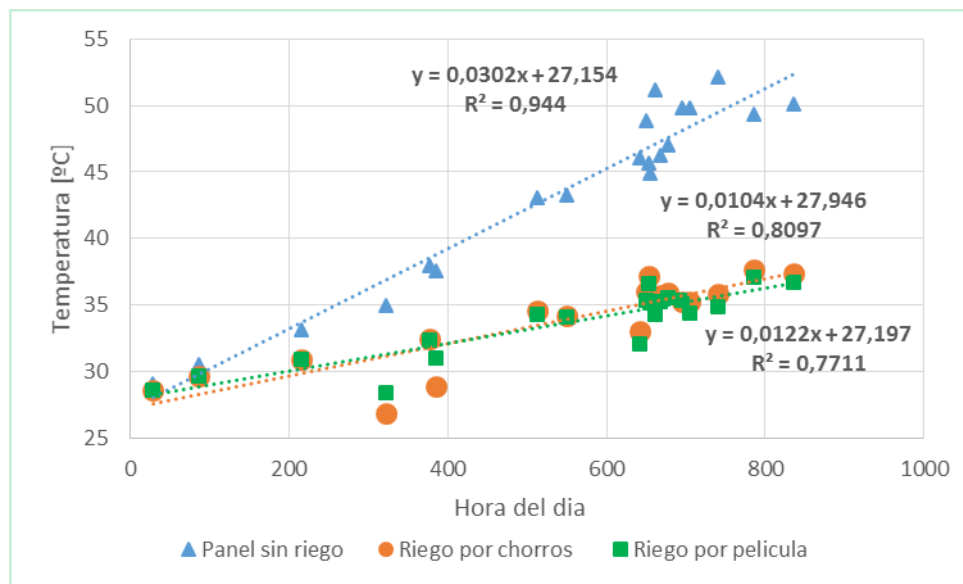
EXPERIMENTO 2-DIA1: Película de agua vs. Chorro 10[cm], 15:15.



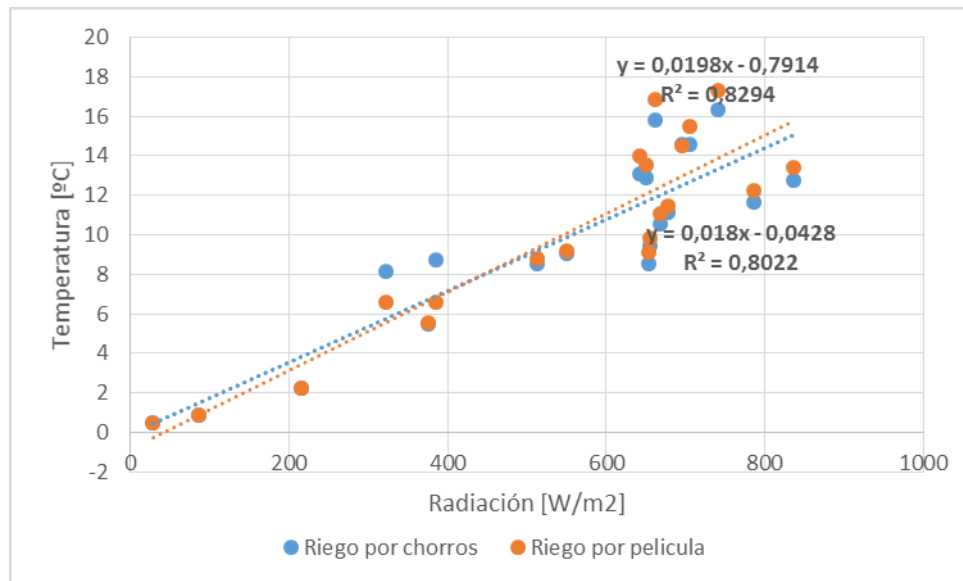
Desarrollo del experimento



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

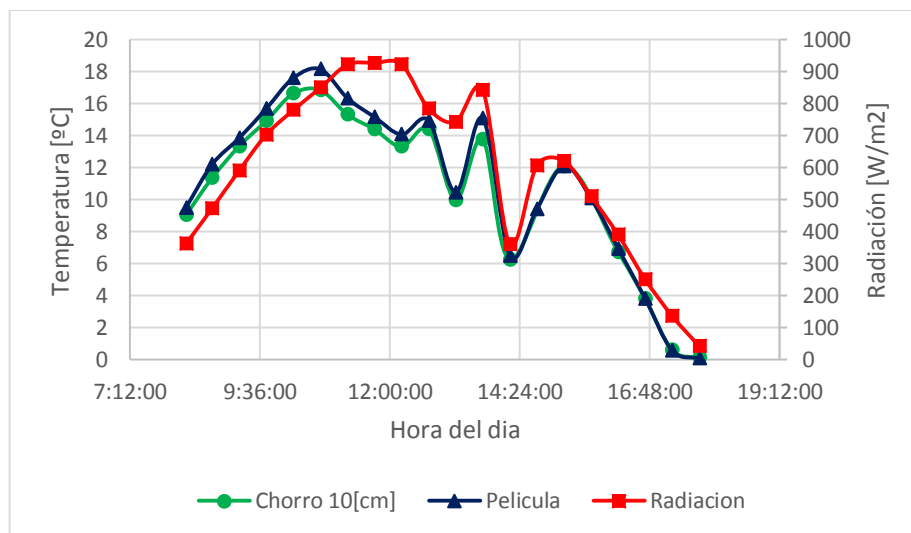


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

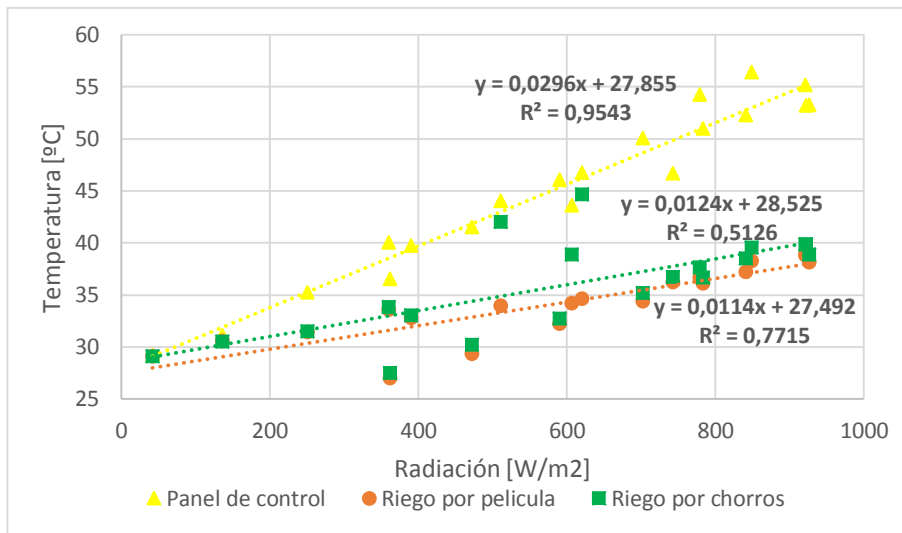


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

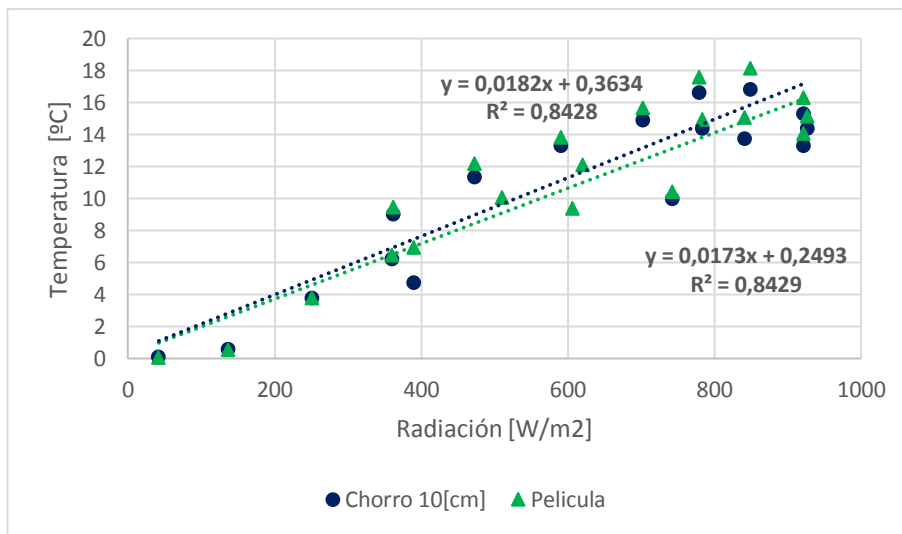
EXPERIMENTO 2-DIA 2: Película de agua vs. Chorro 10[cm], 15:15.



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control



Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

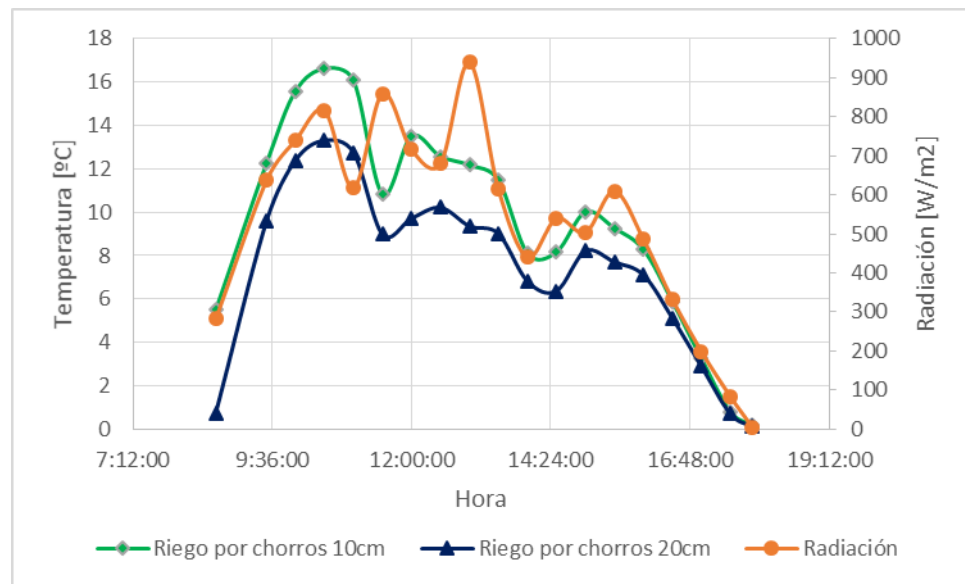


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

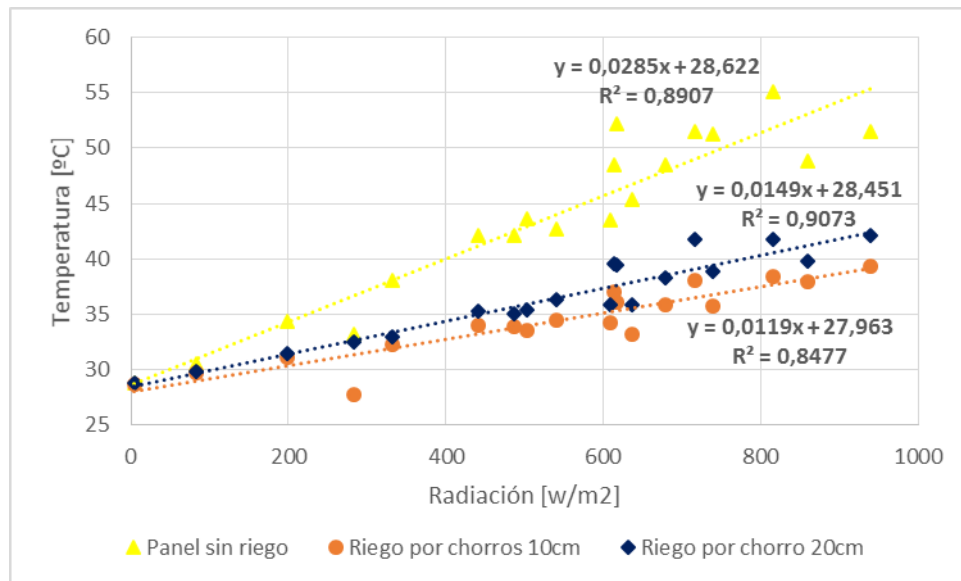
EXPERIMENTO 3-DIA 1: Chorro 10[cm] vs Chorro 20[cm], 15:15.



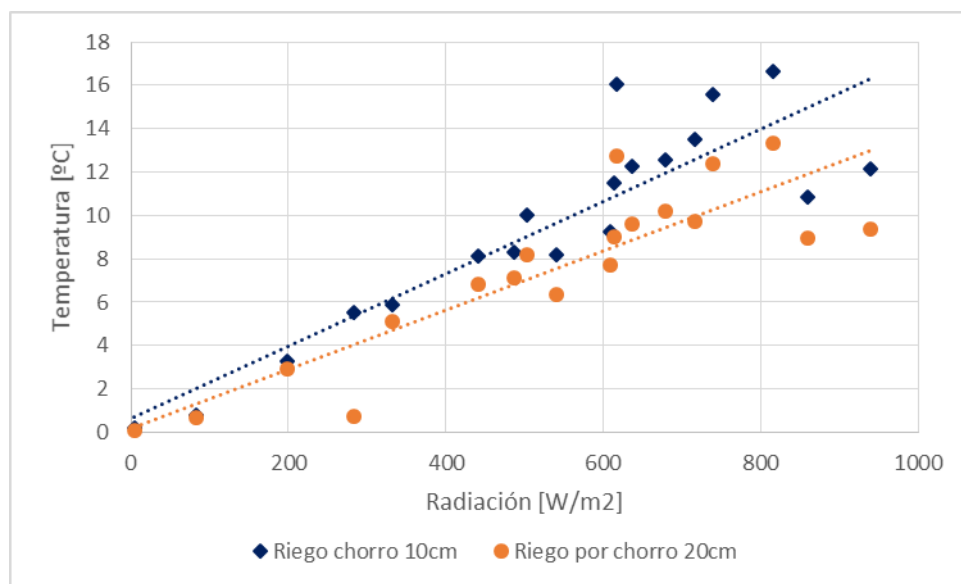
Desarrollo del experimento



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

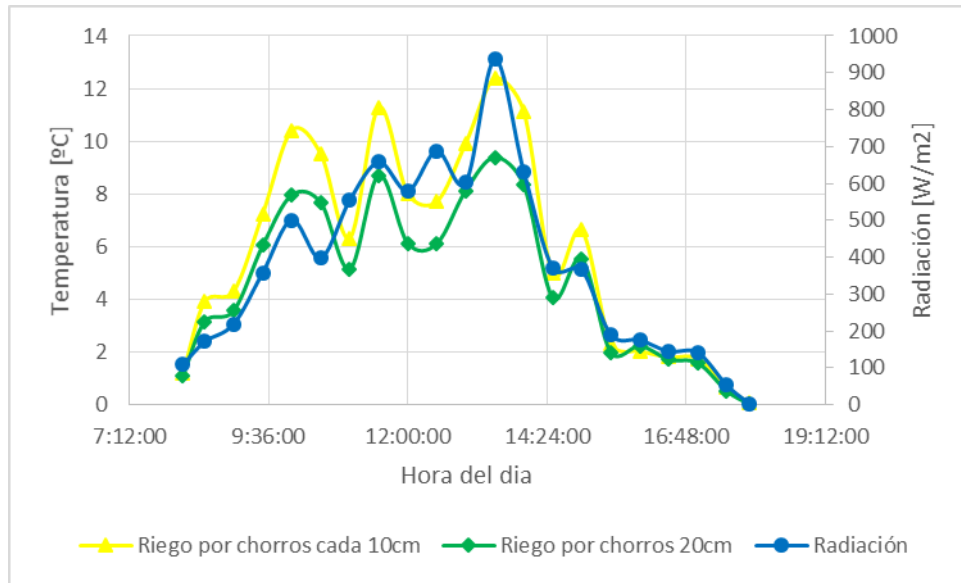


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

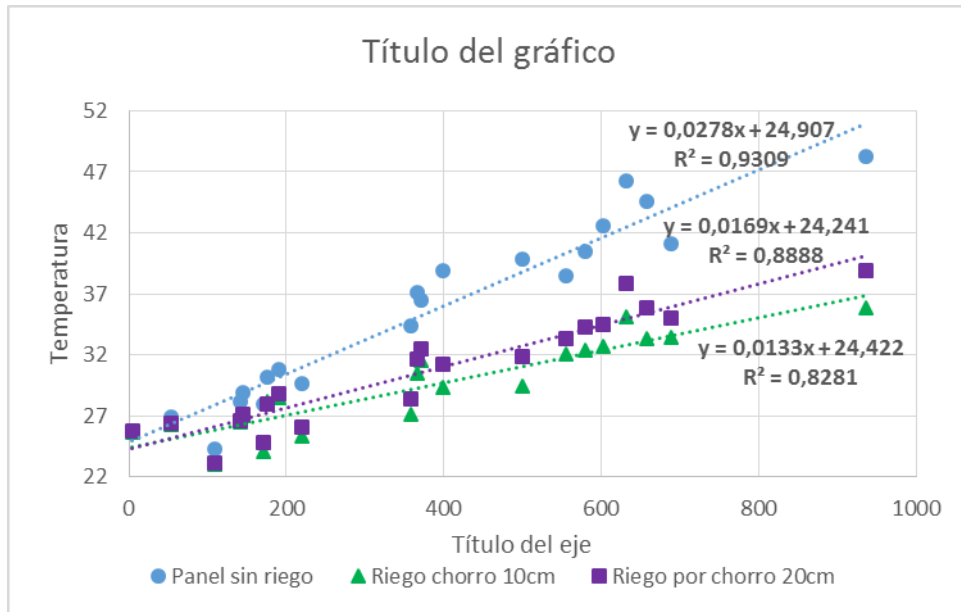


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

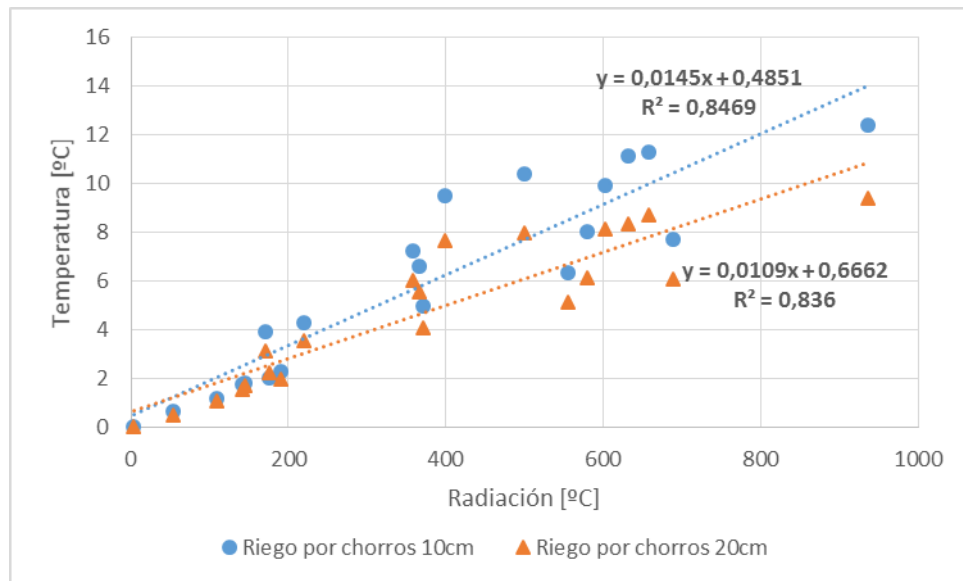
EXPERIMENTO 3-DIA 2: Chorro 10[cm] vs Chorro 20[cm], 15:15.



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

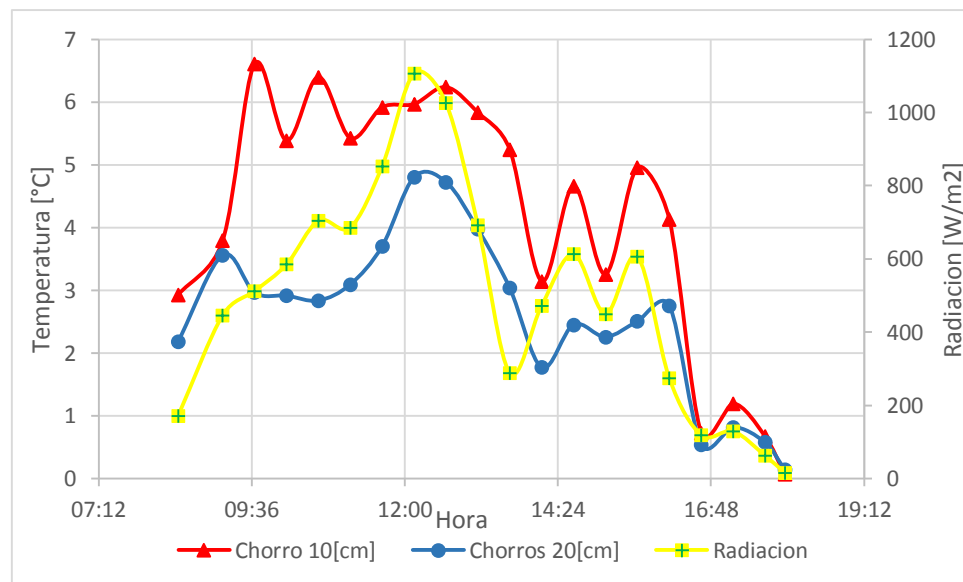


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

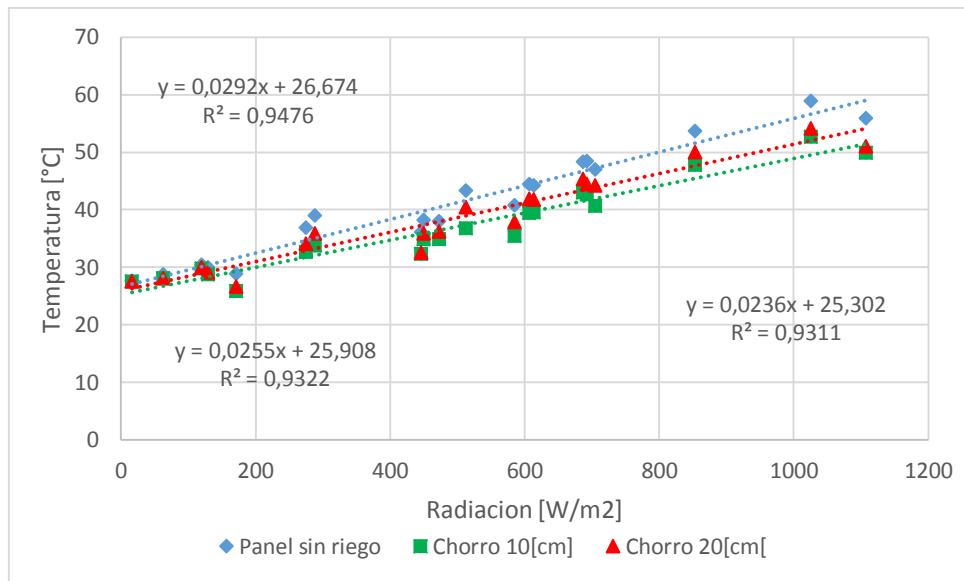


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

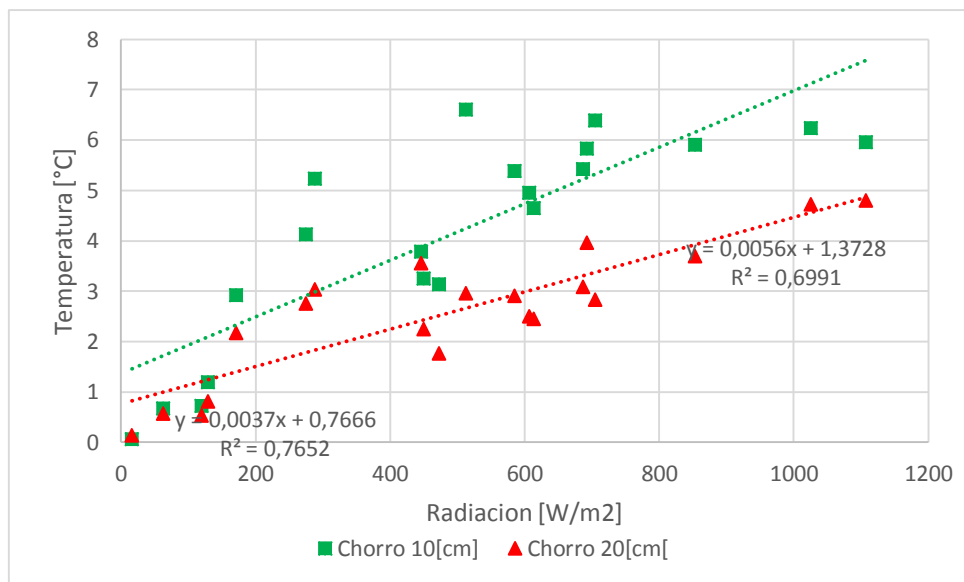
EXPERIMENTO 4-DIA 1: Chorro 10[cm] vs Chorro 20[cm], 1:29.



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

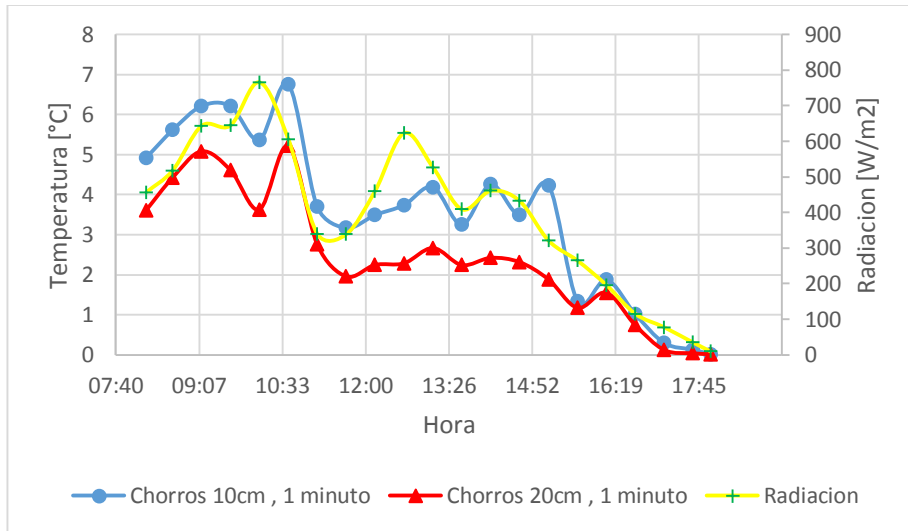


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

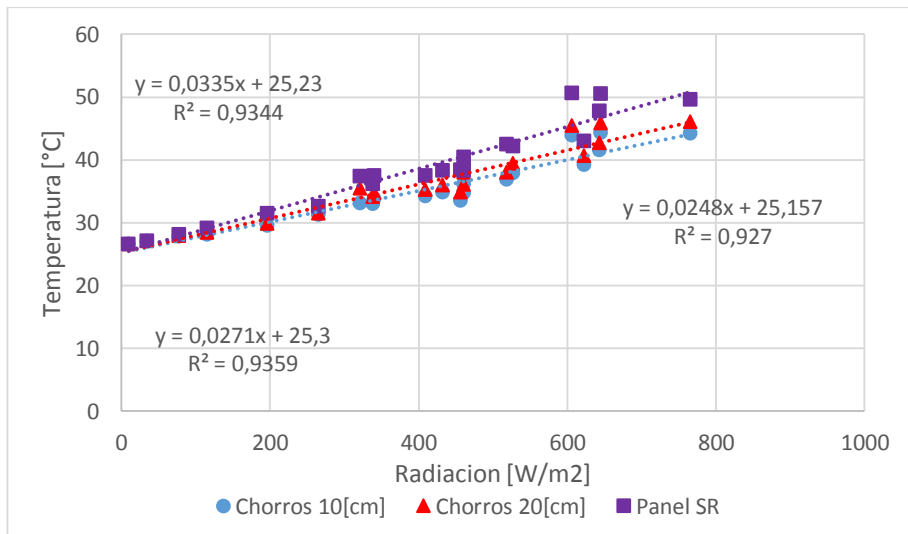


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

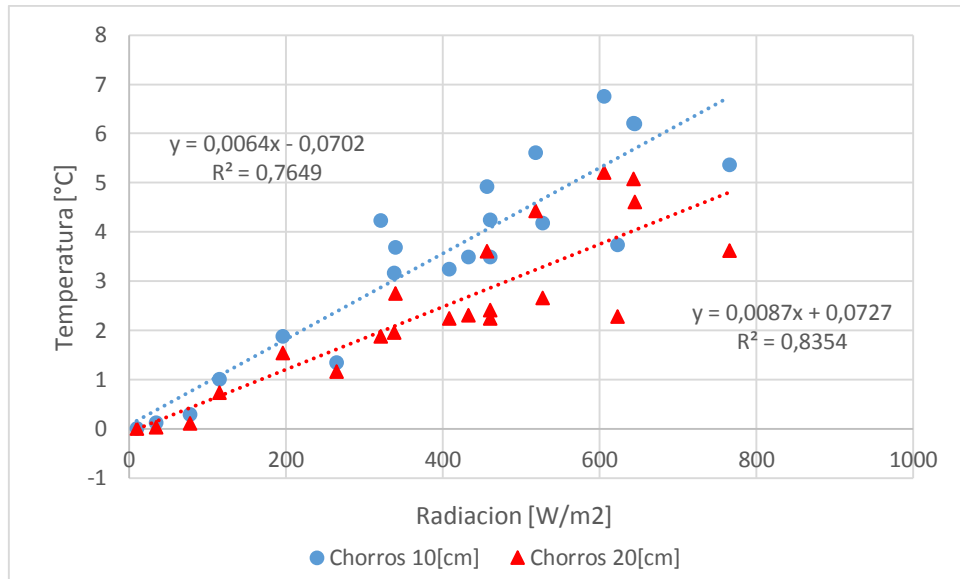
EXPERIMENTO 4-DIA 2: Chorro 10[cm] vs Chorro 20[cm], 1:29.



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

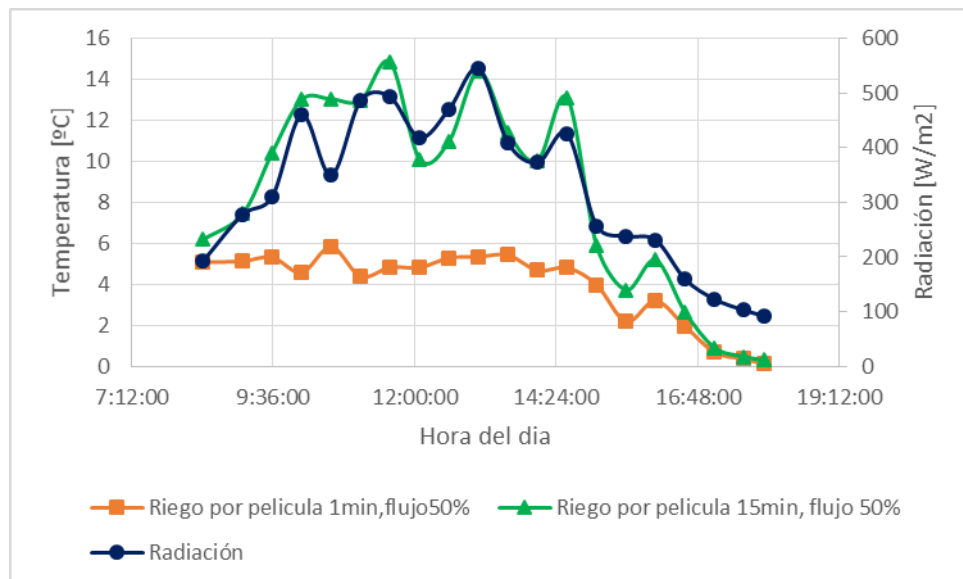


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

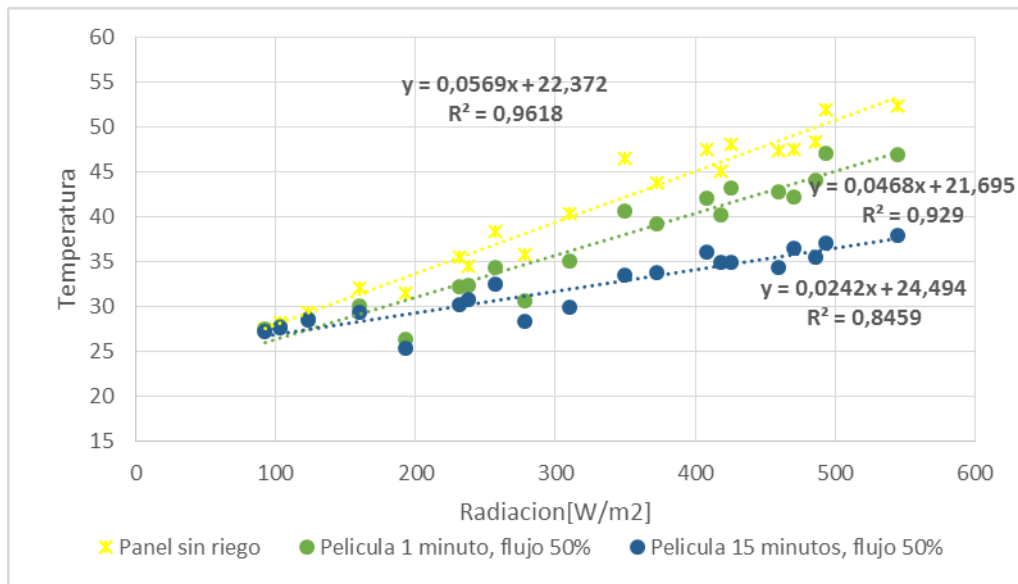


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

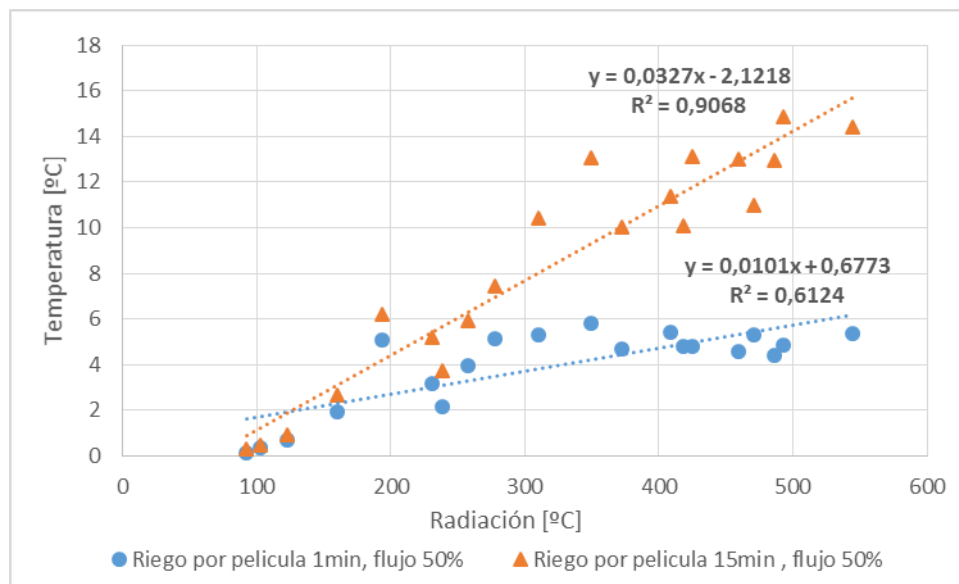
EXPERIMENTO 5-DIA 1: Película 50%. Panel con riego 1:29 y Panel con riego 15:15.



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

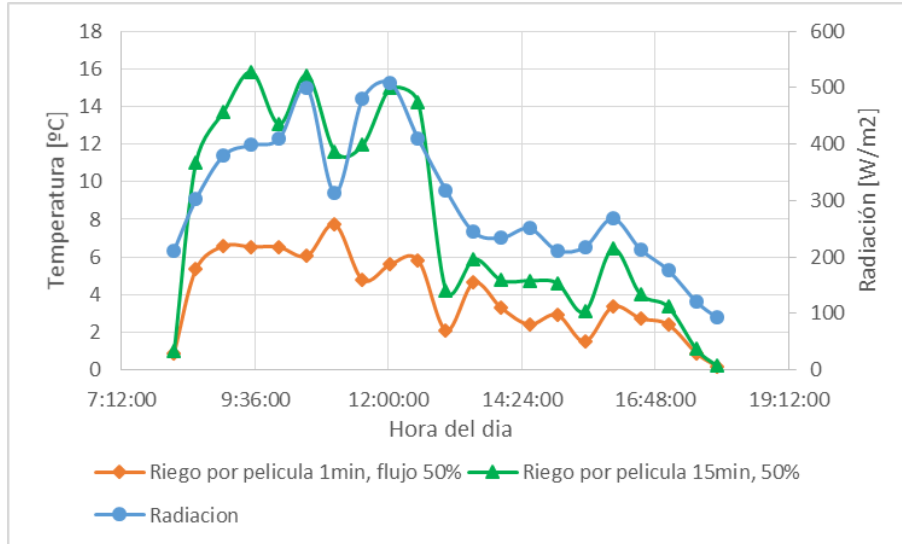


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

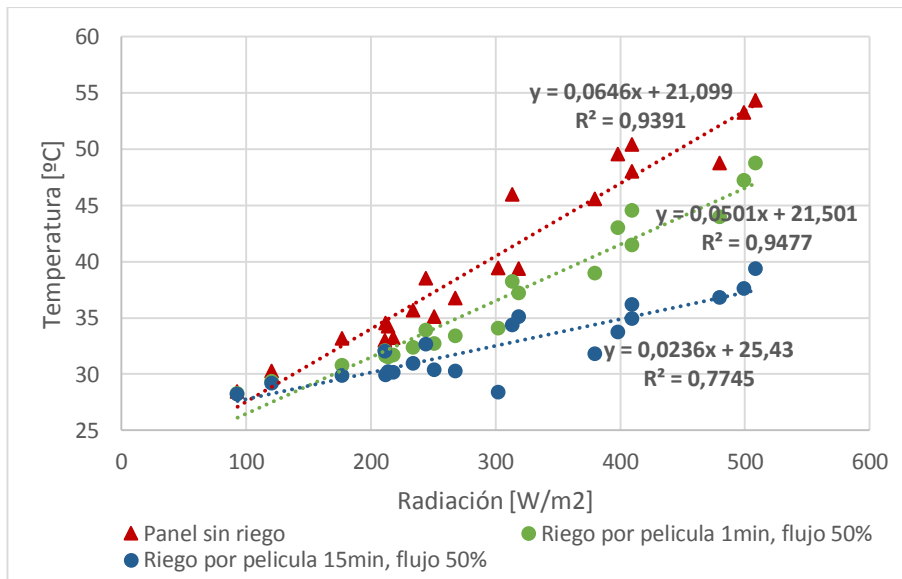


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

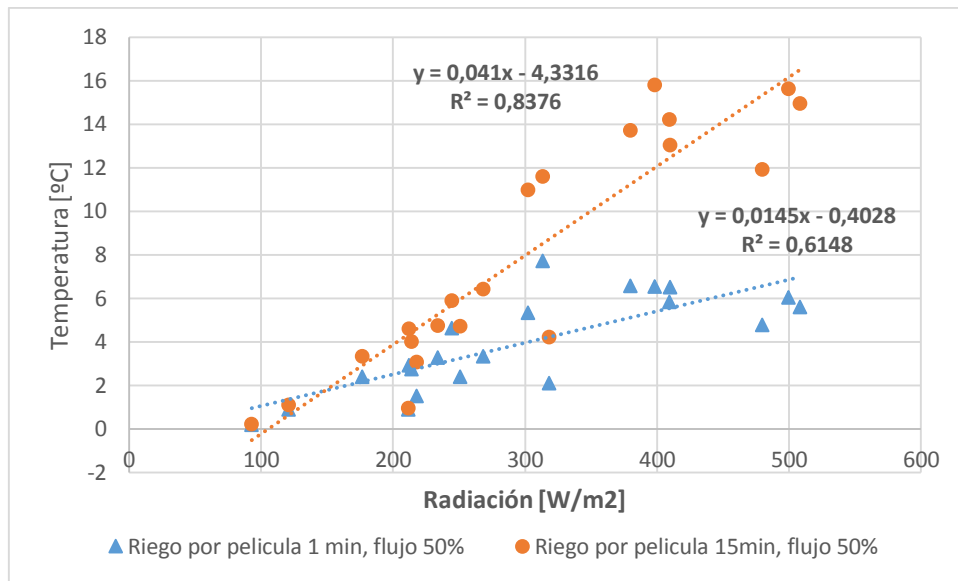
EXPERIMENTO 5-DIA 2: Película 50%. Panel con riego 1:29 y Panel con riego 15:15.



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

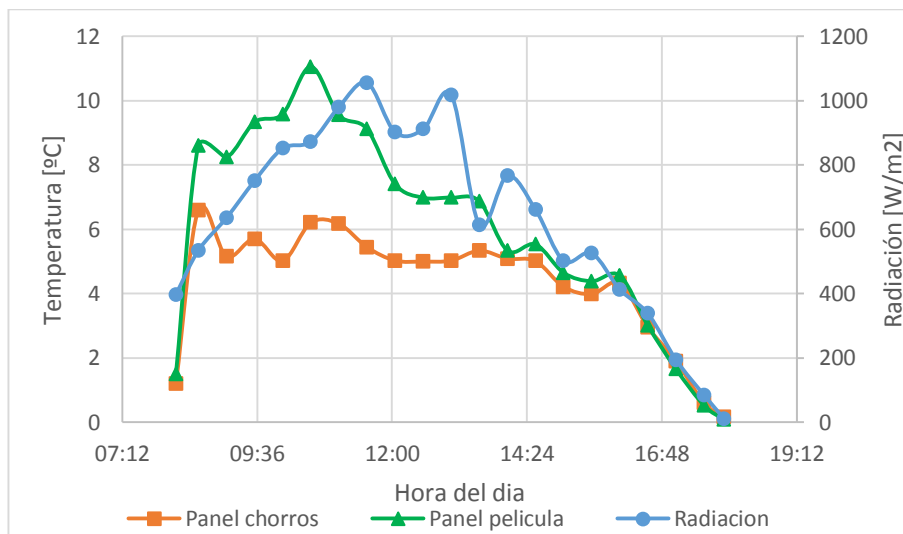


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

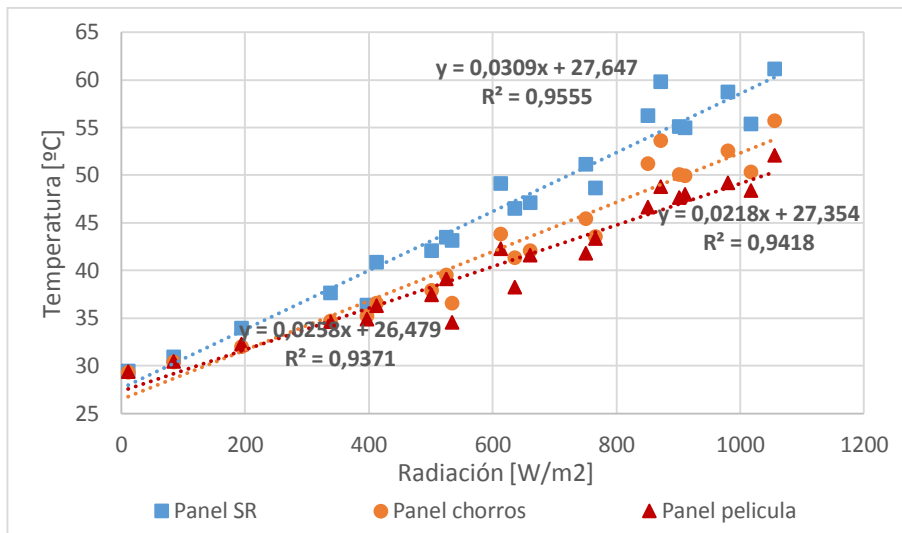


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

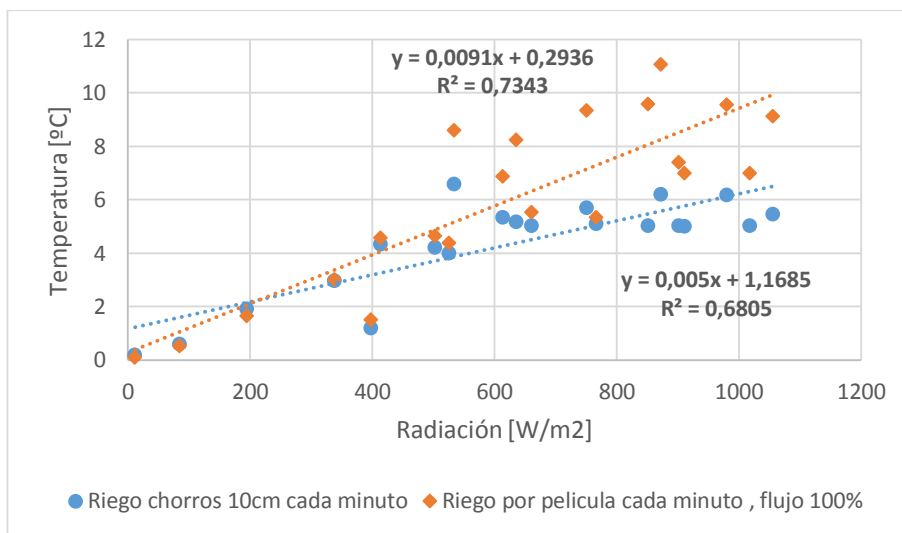
EXPERIMENTO 6-DIA 1: Película 100% vs. Chorro con separación de 10 [cm], riego 1:29



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

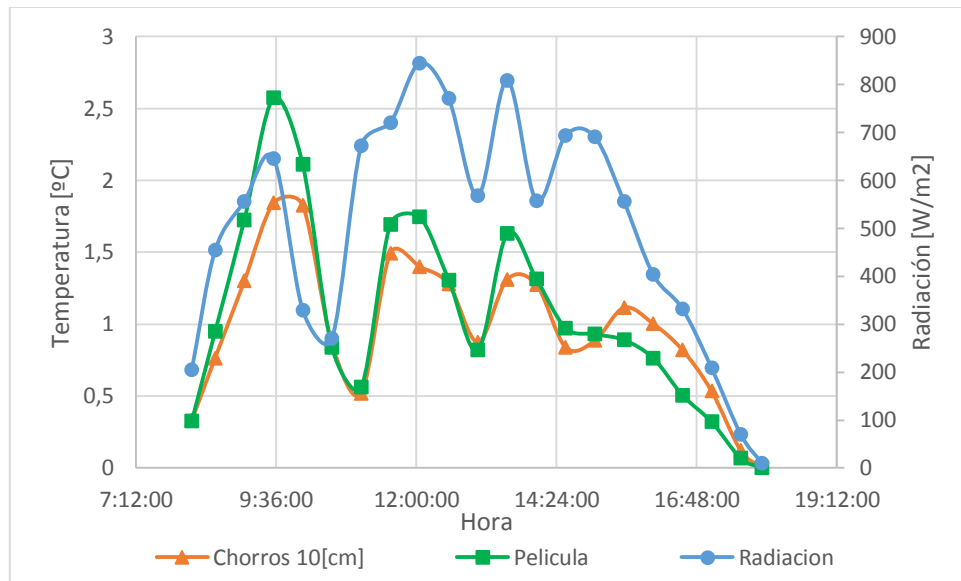


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

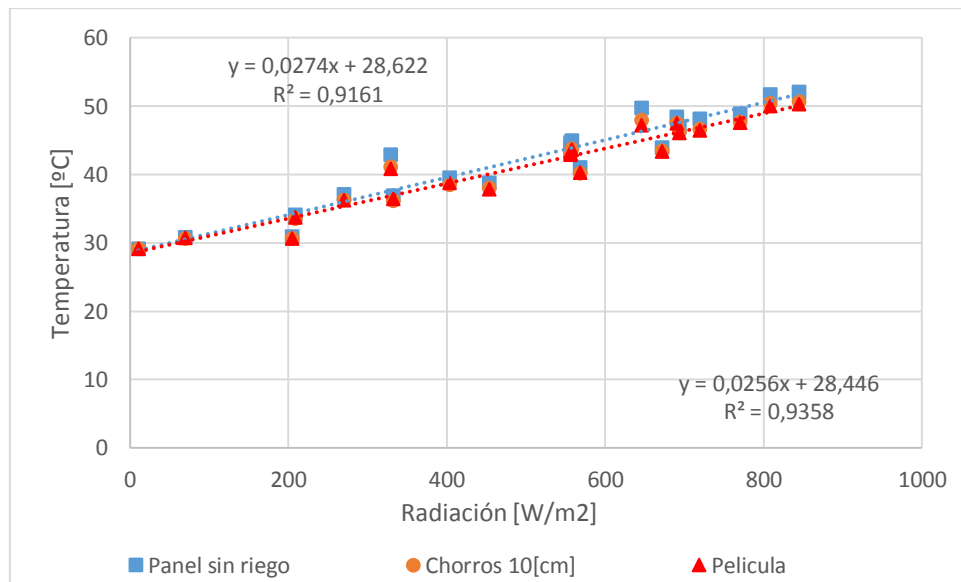


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

EXPERIMENTO 6-DIA 2: Película 100% vs. Chorro con separación de 10 [cm], riego 1:29

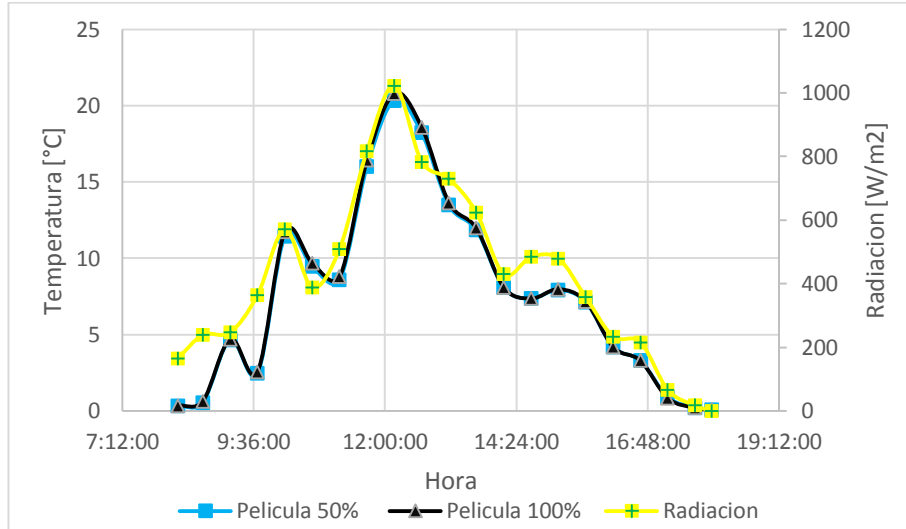


Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

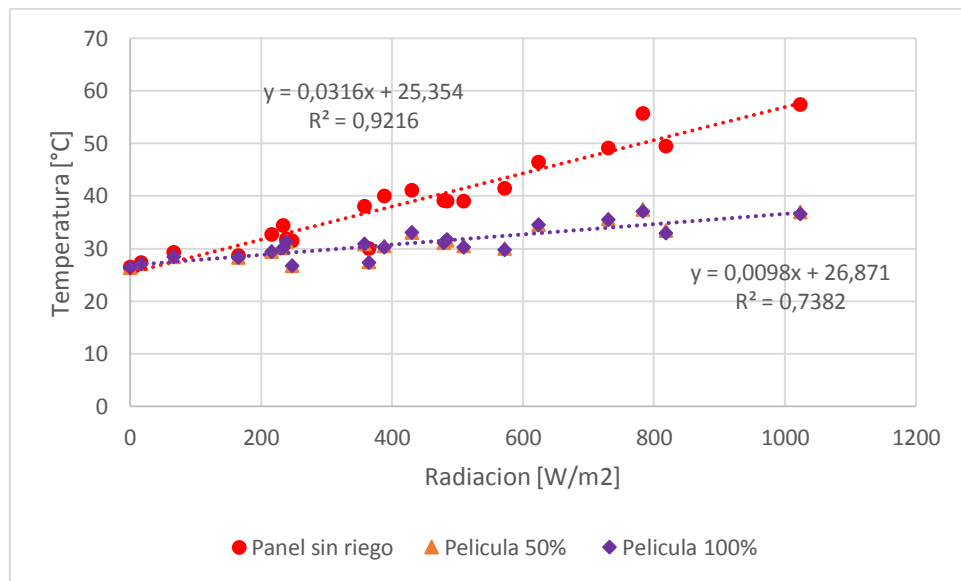


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

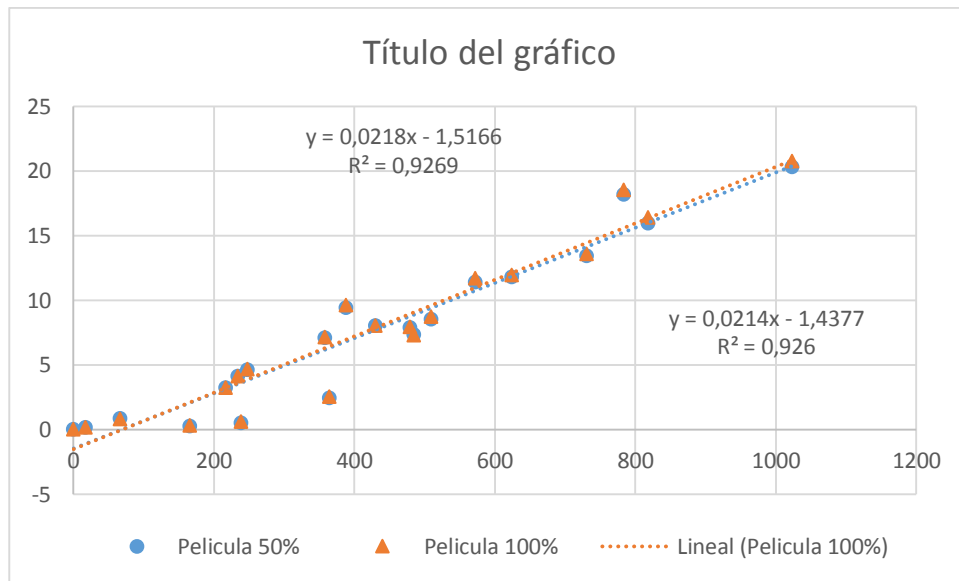
EXPERIMENTO 7-DIA 1: Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

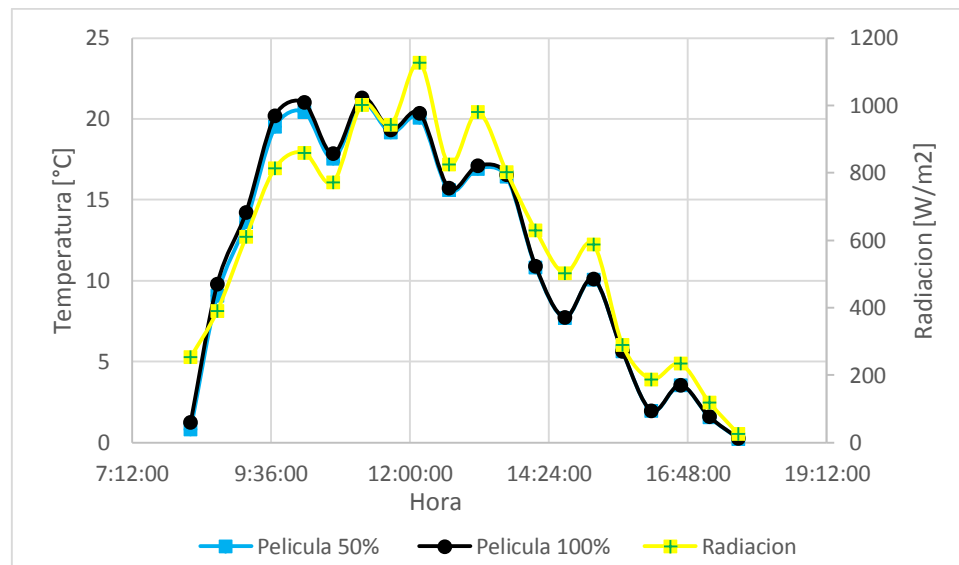


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

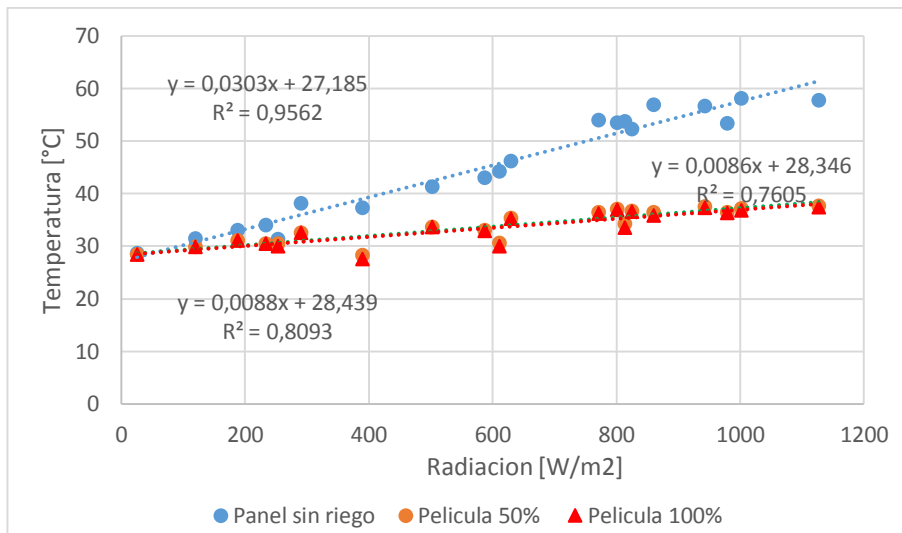


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

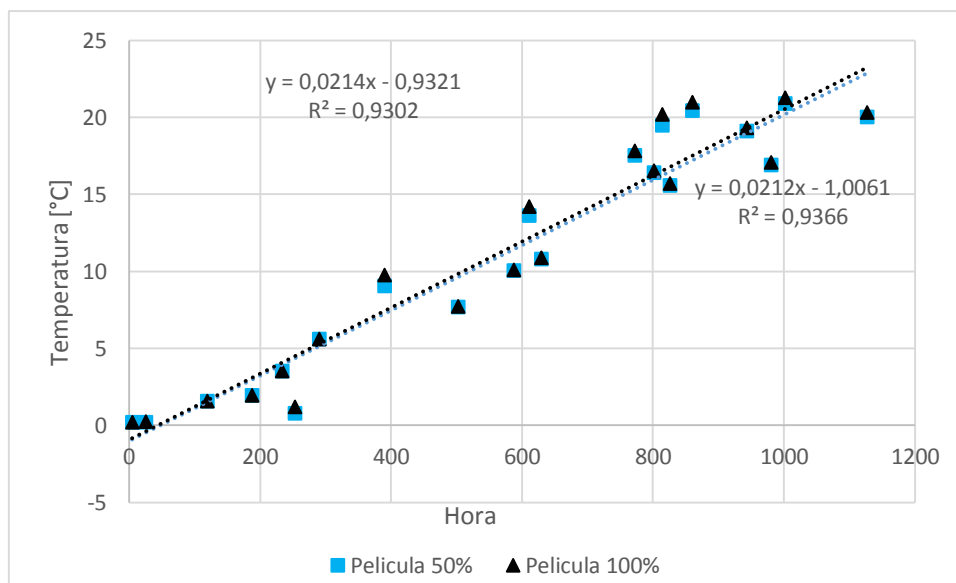
EXPERIMENTO 7-DIA 2: Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



Diferencias promedio de temperatura con respecto al panel de control

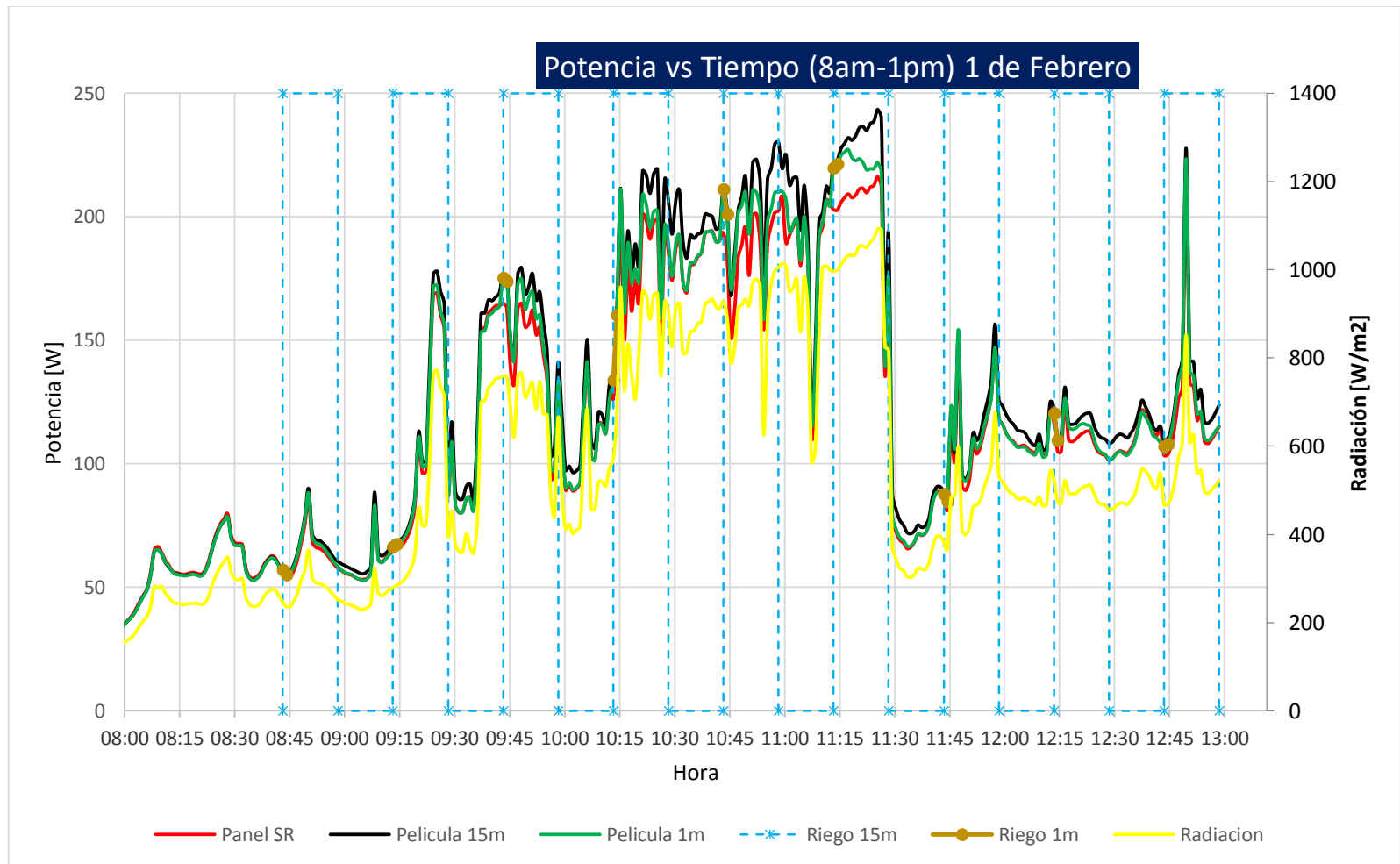


Correlación Temperatura promedio vs Radiación promedio

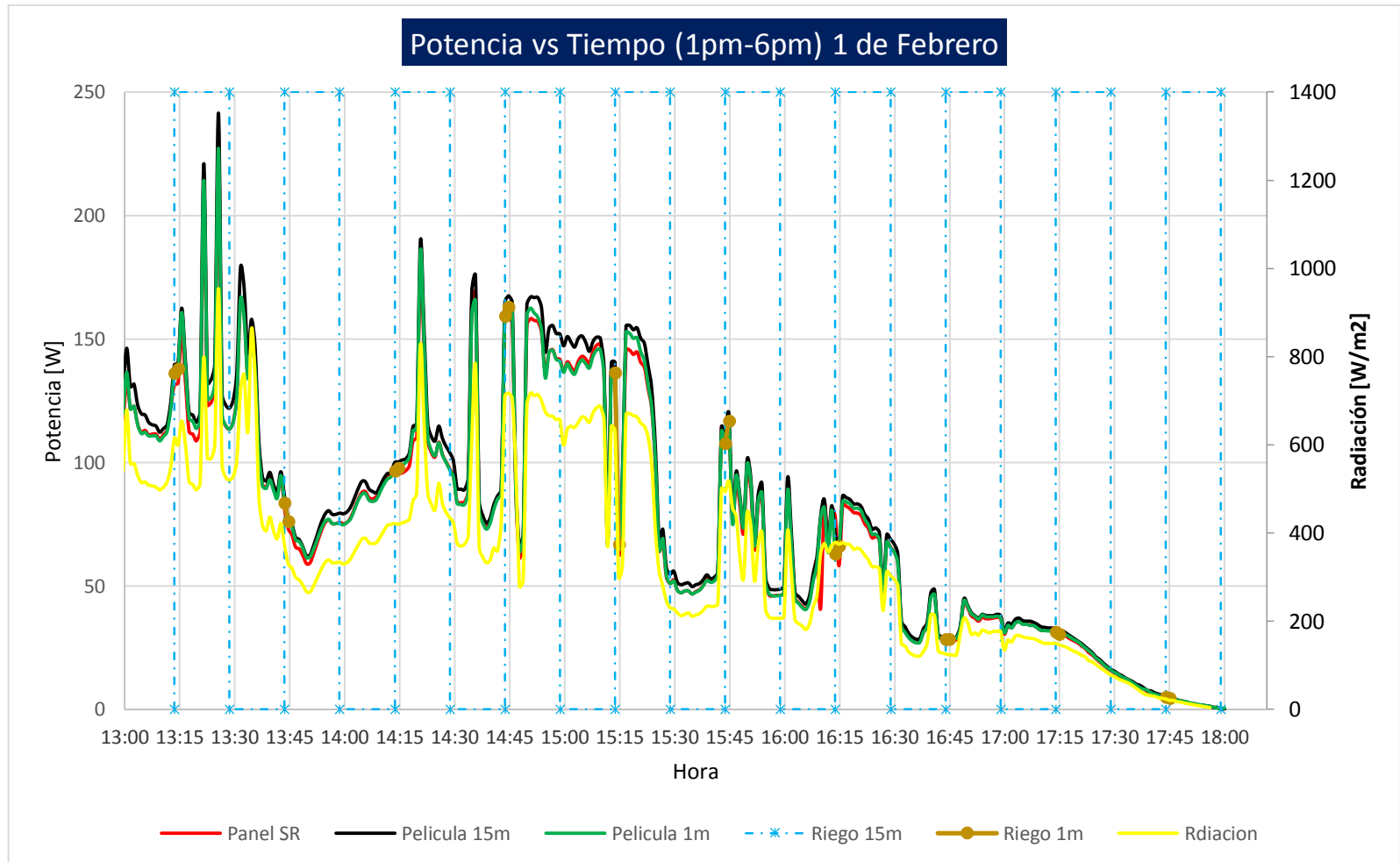


Correlación diferencia temperatura promedio vs Radiación promedio

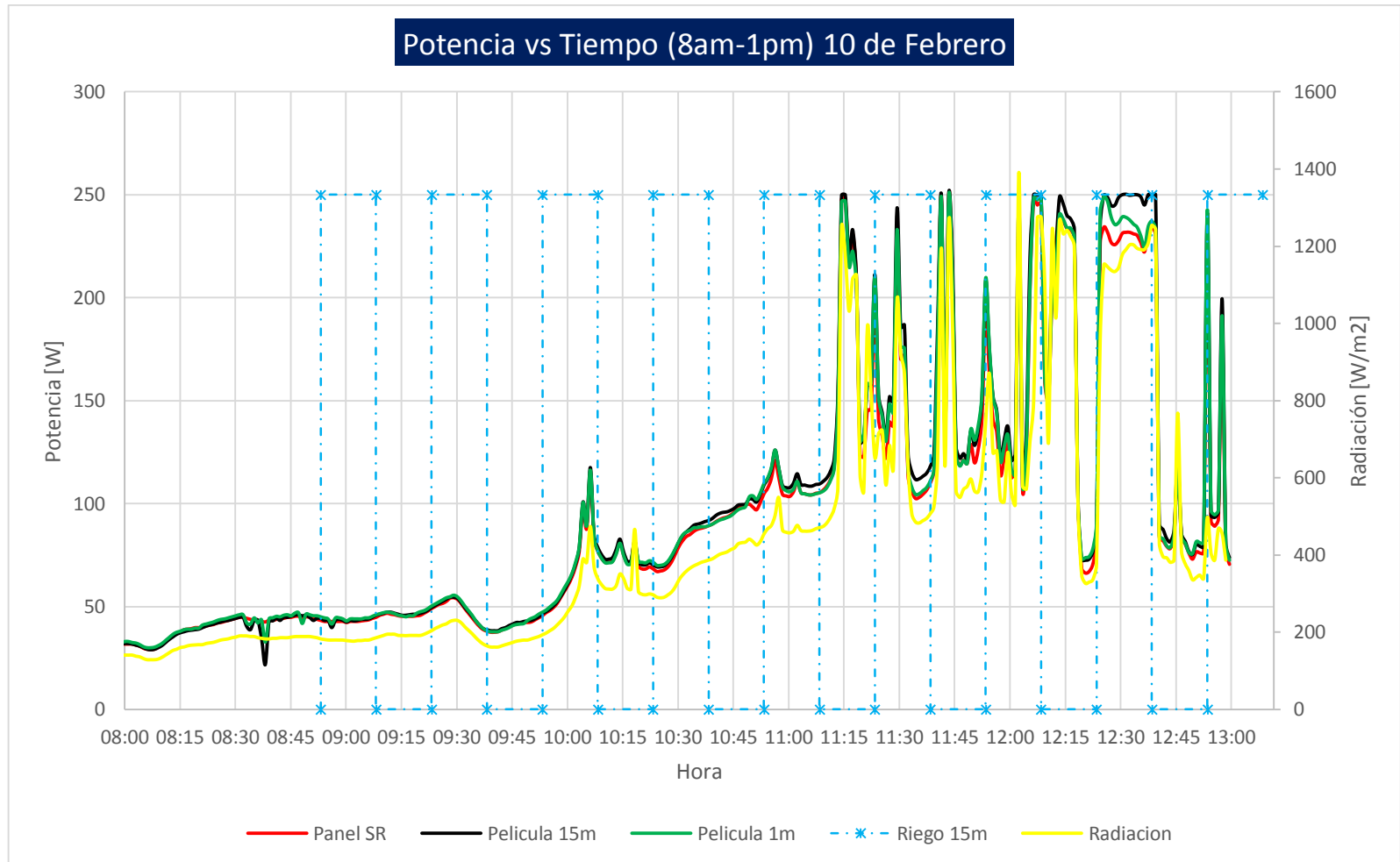
ANEXO D.GRÁFICAS DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES FOTOVOLTAICOS



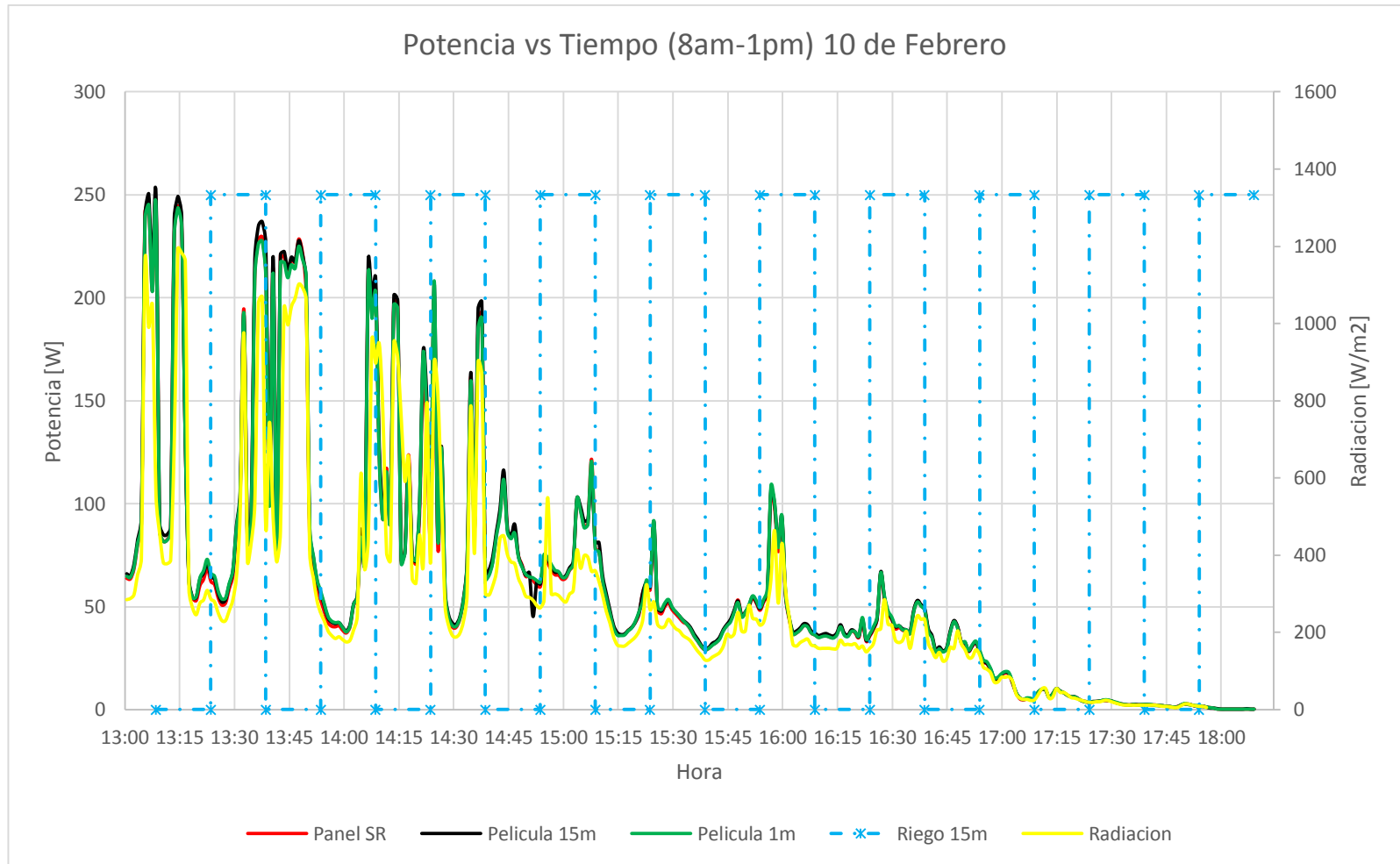
Experimento 1-Dia 1, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



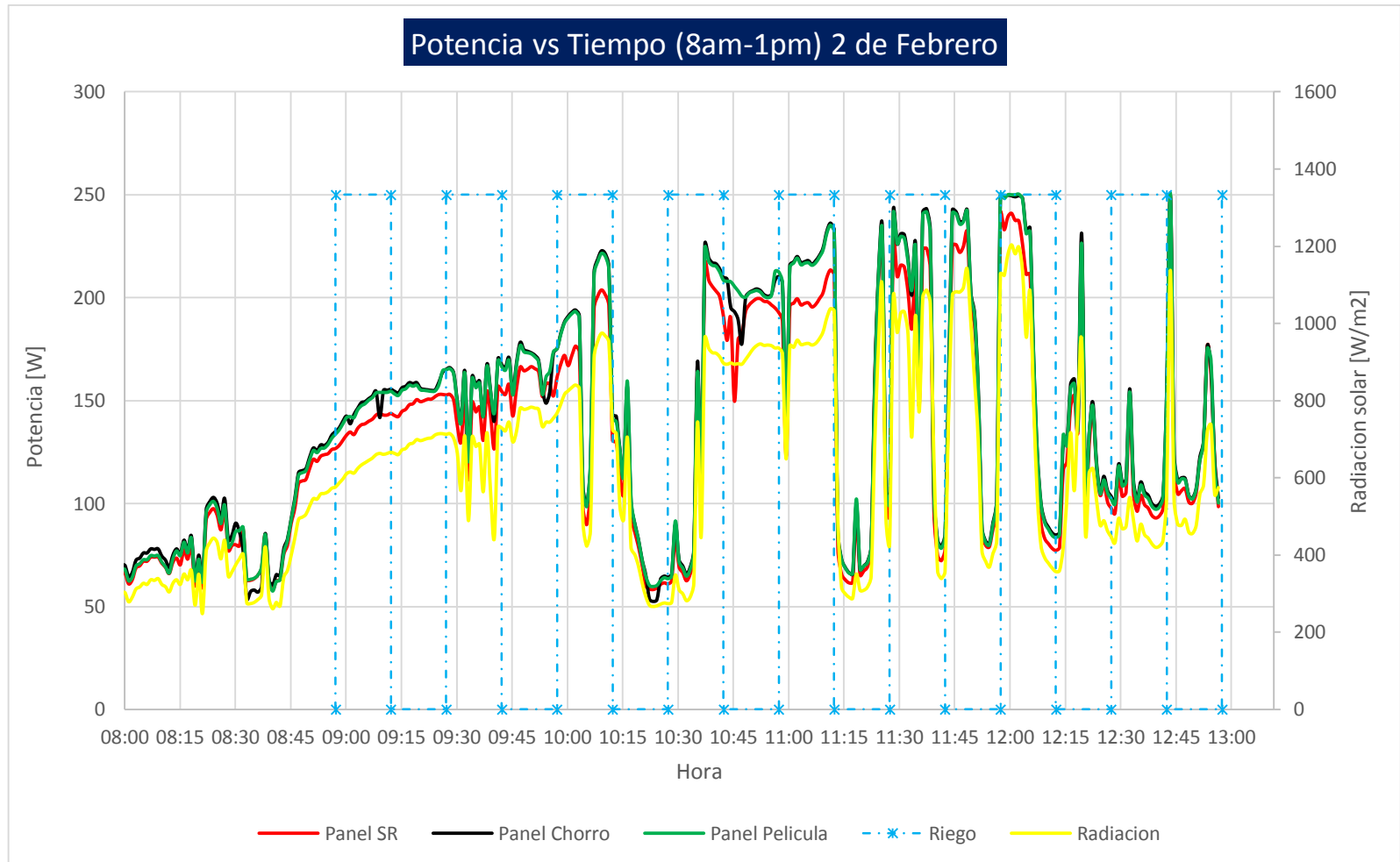
Experimento 1-Dia 1, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



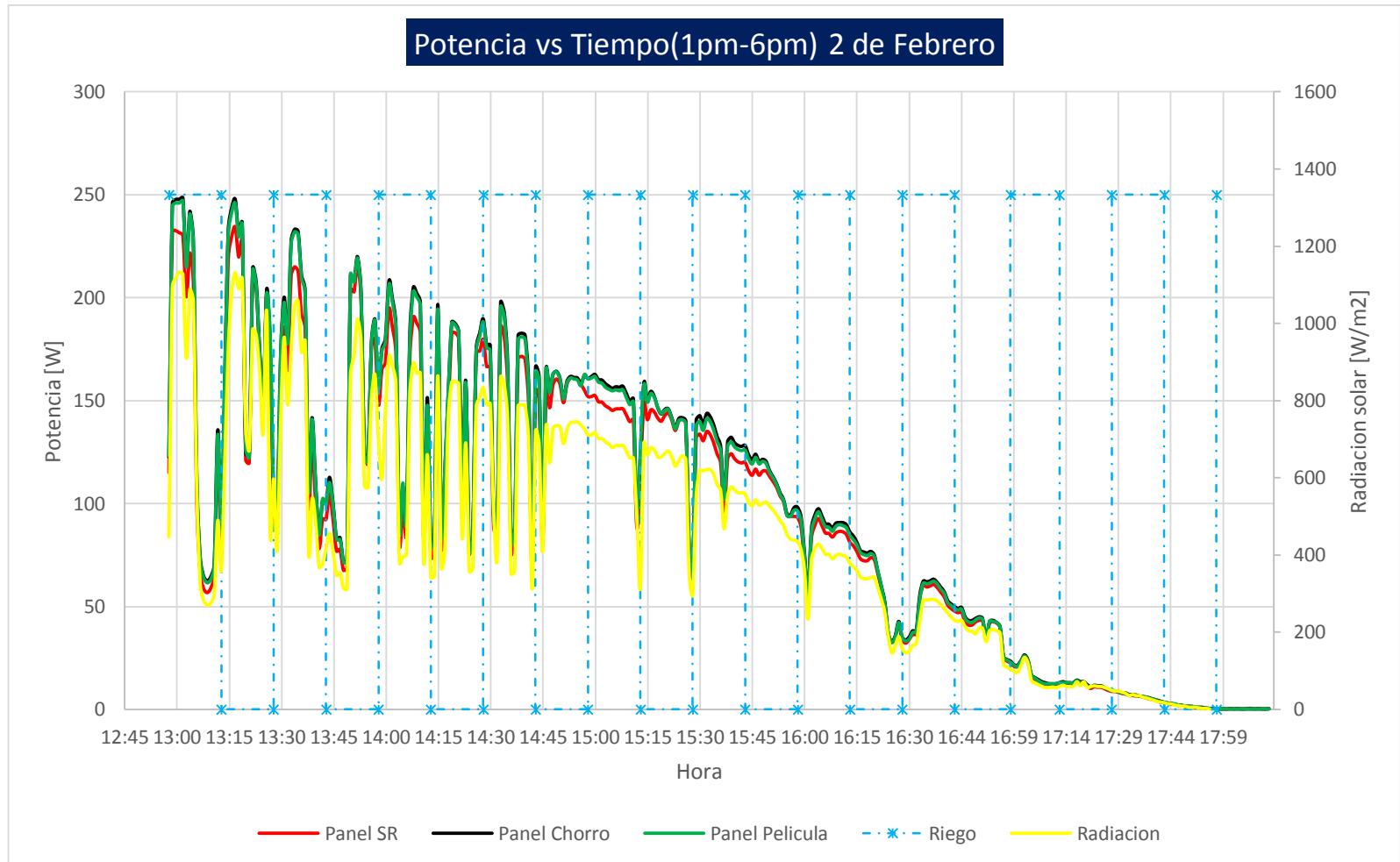
Experimento 1-Día 2, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



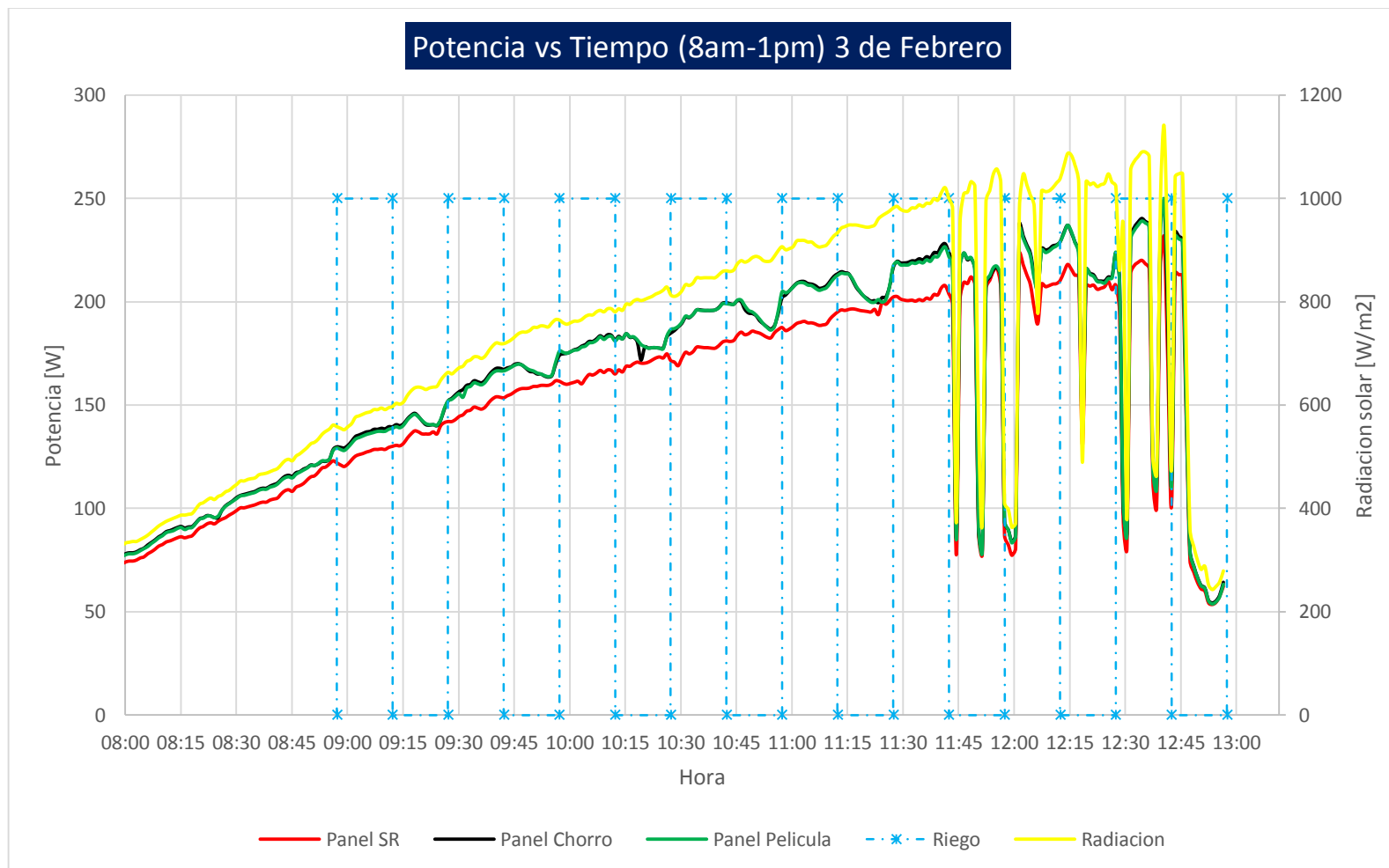
Experimento 1-Dia 2, Película de agua 100%, Panel con riego de 15:15 y Panel con riego 1:29



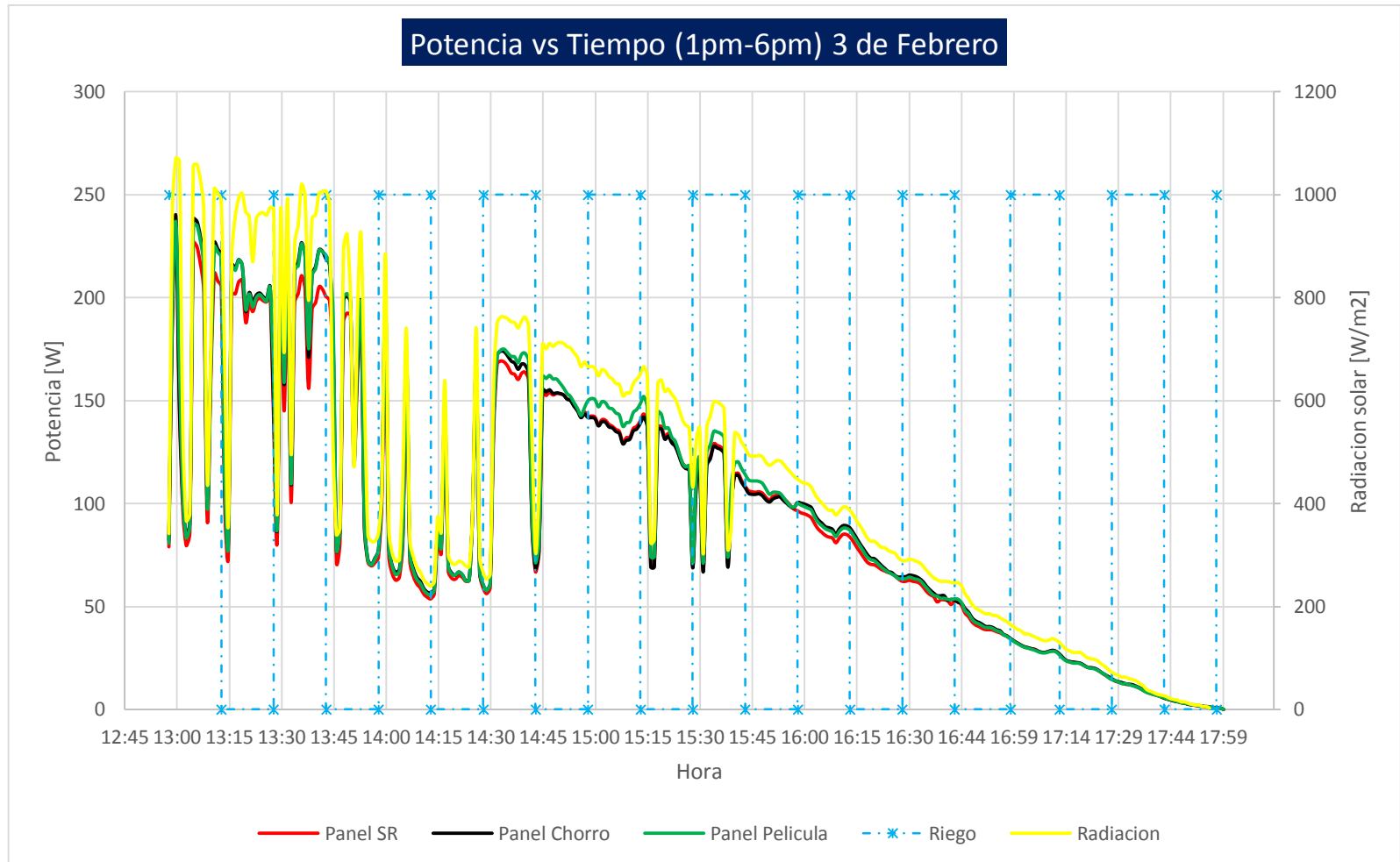
Experimento 2-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



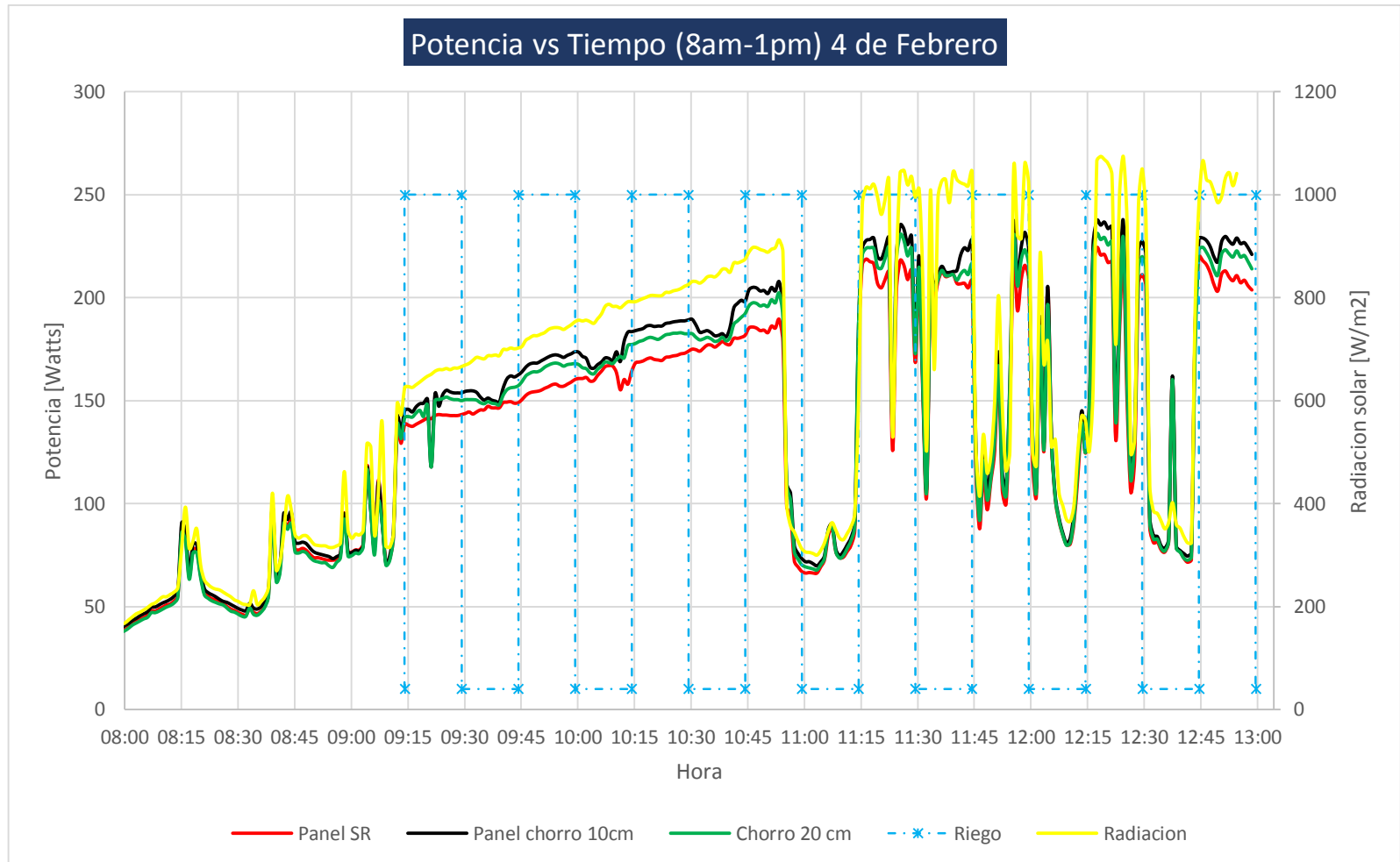
Experimento 2-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



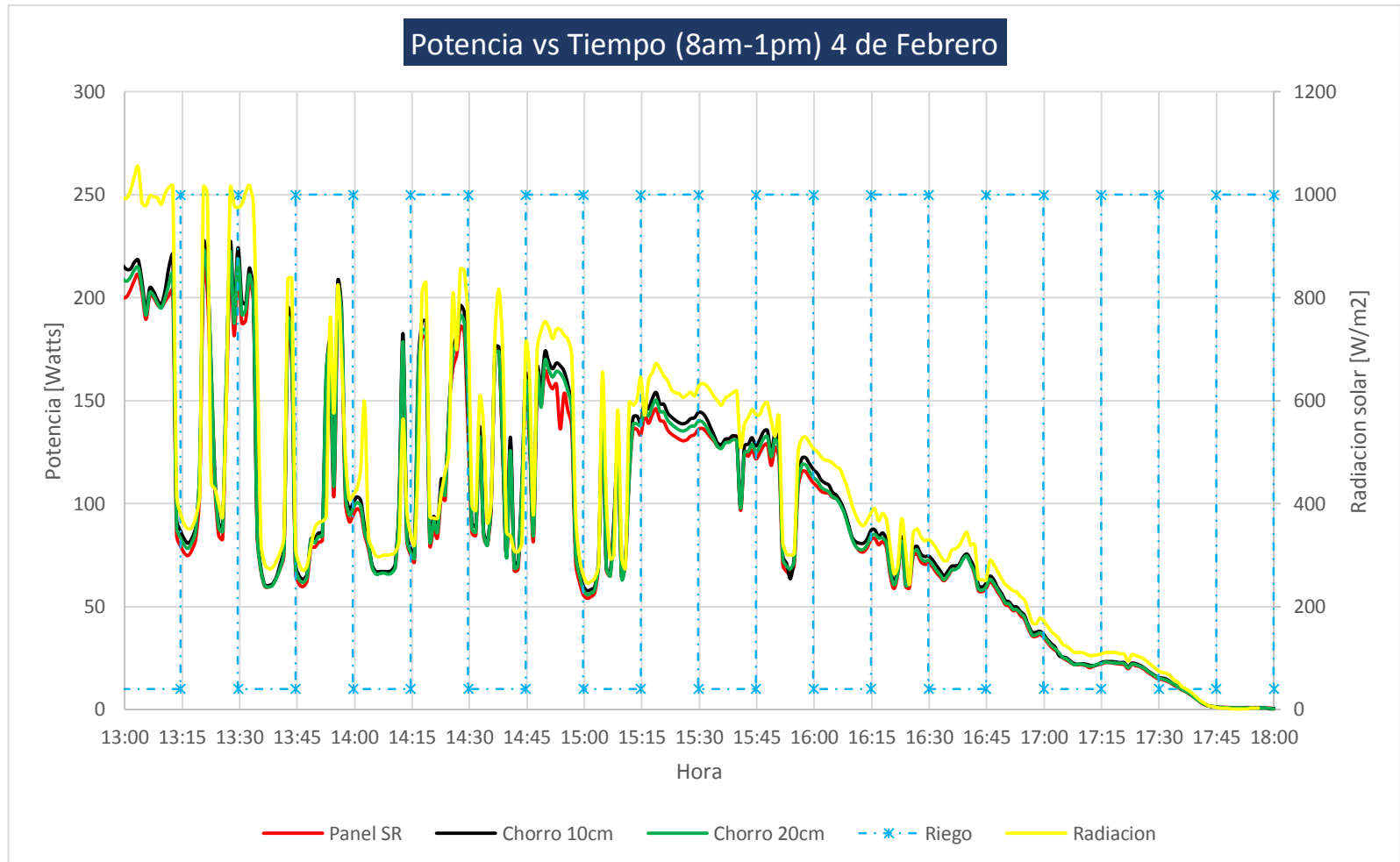
Experimento 2-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



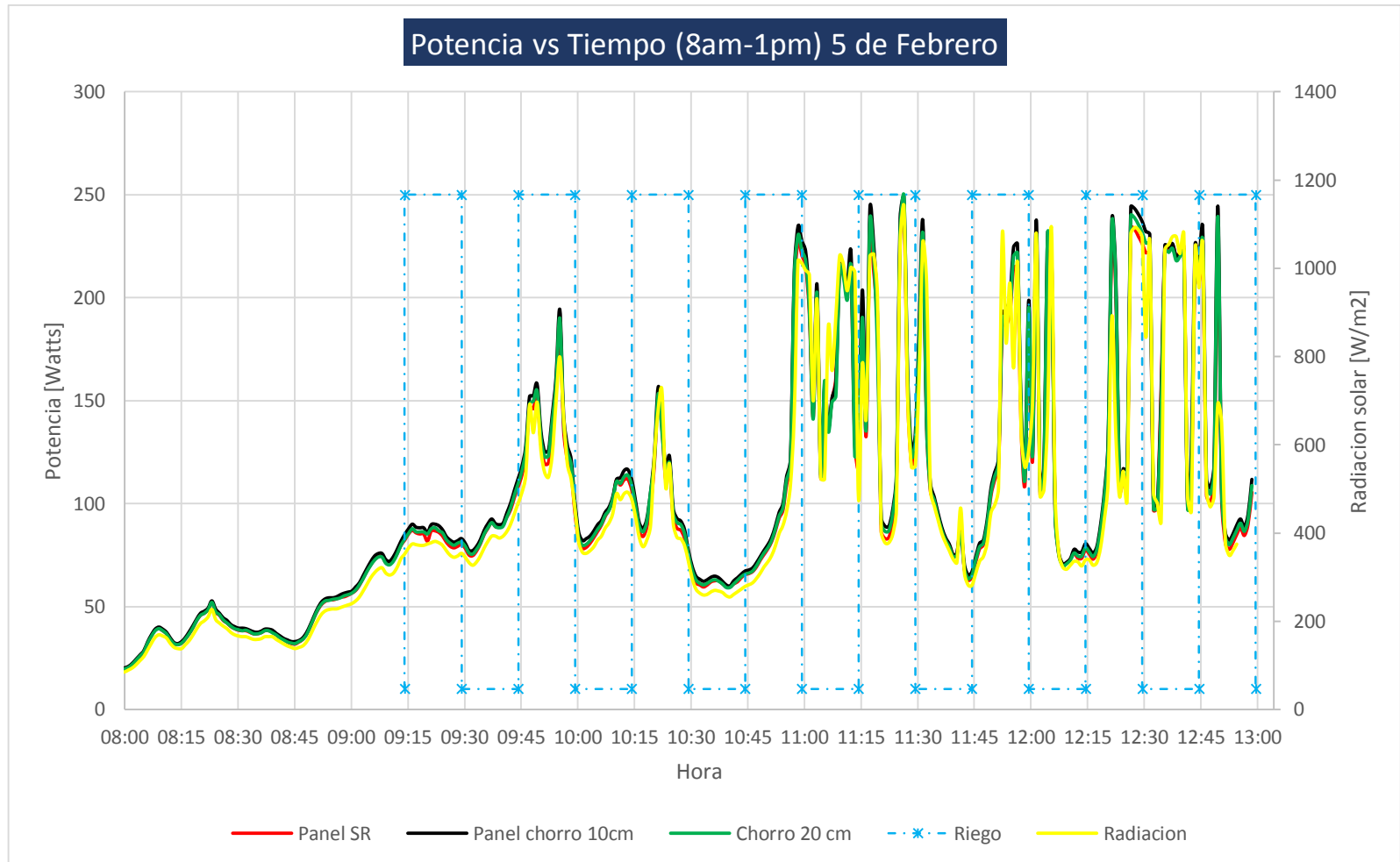
Experimento 2-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Película de agua 100%, riego 15:15



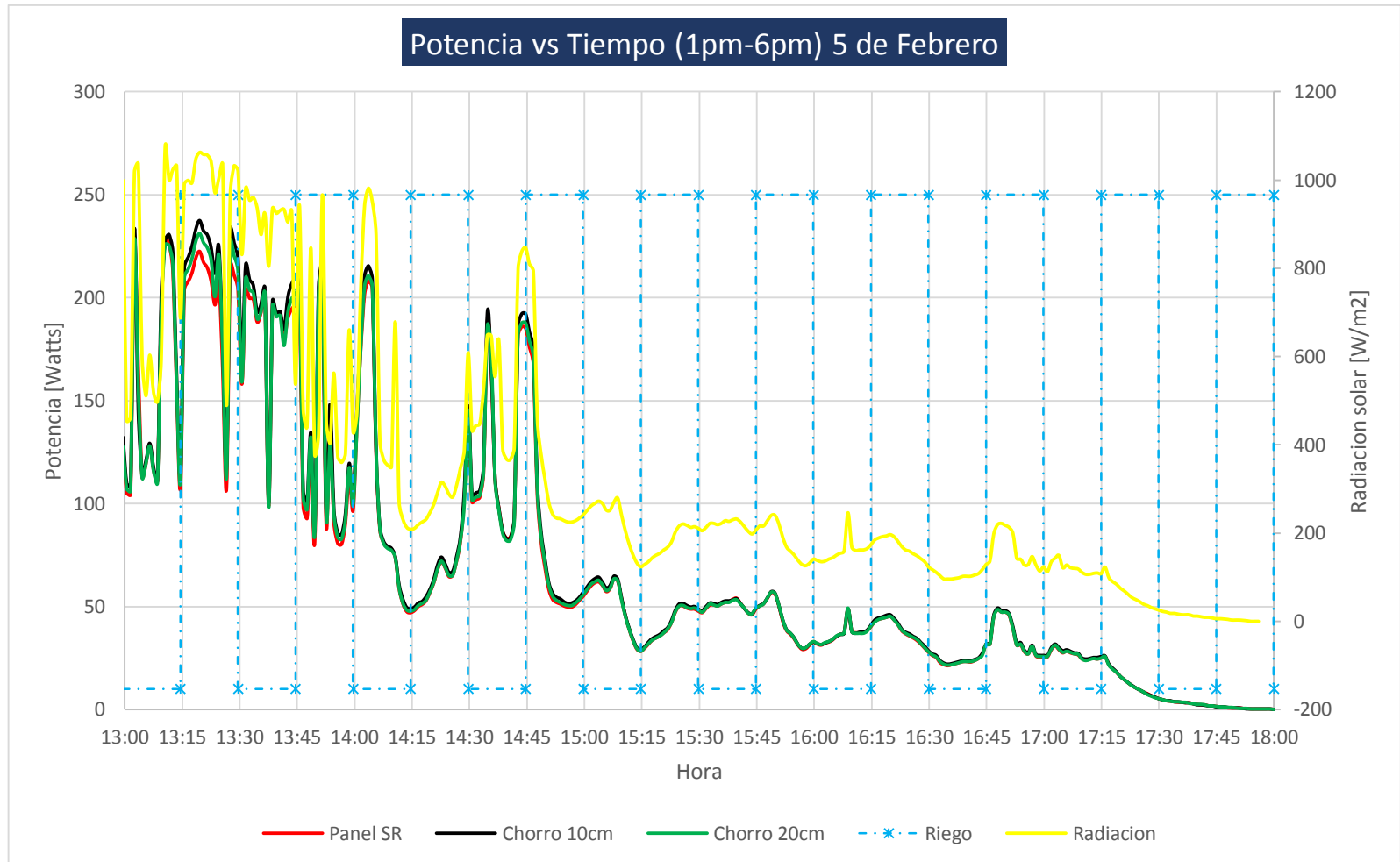
Experimento 3-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



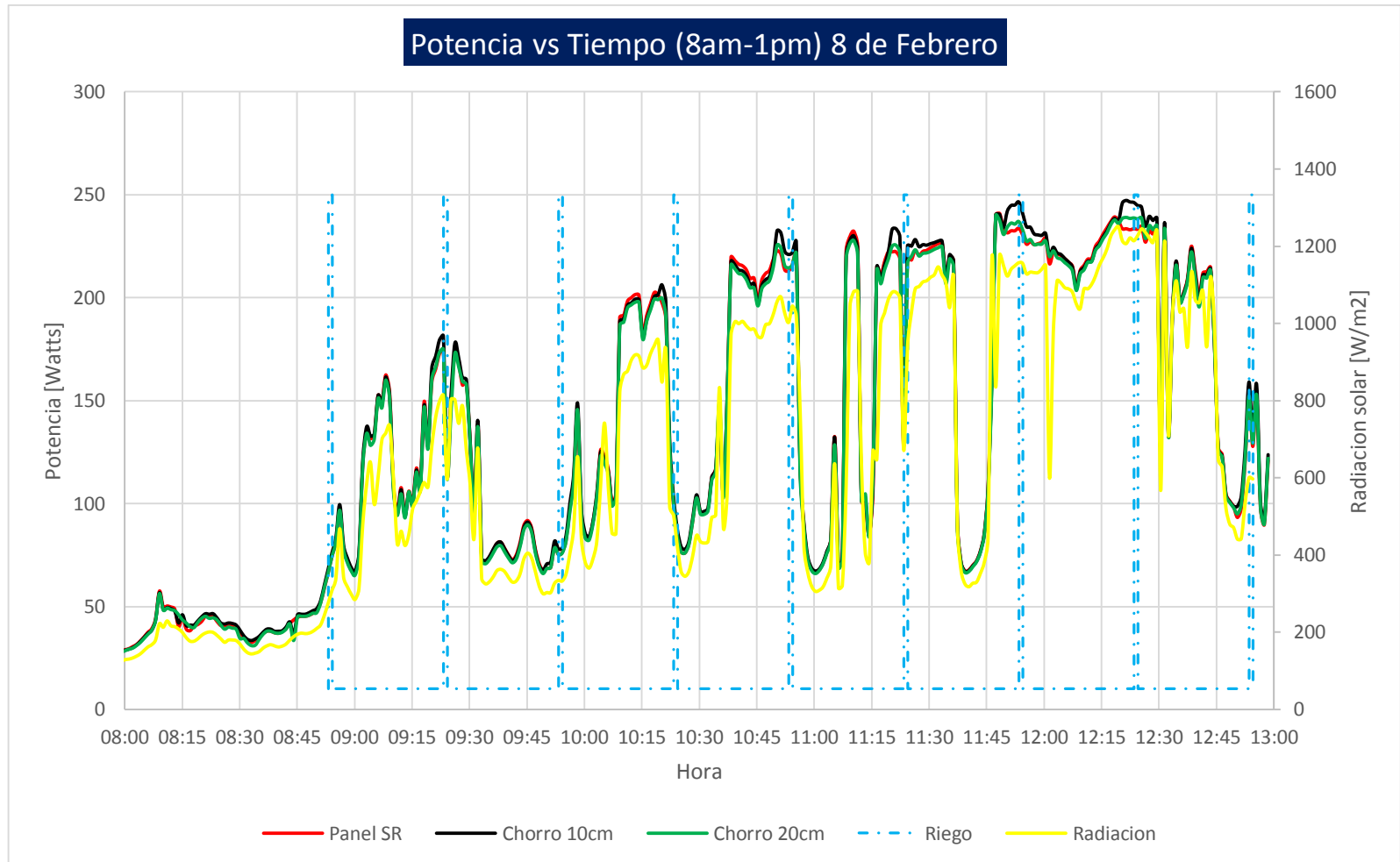
Experimento 3-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



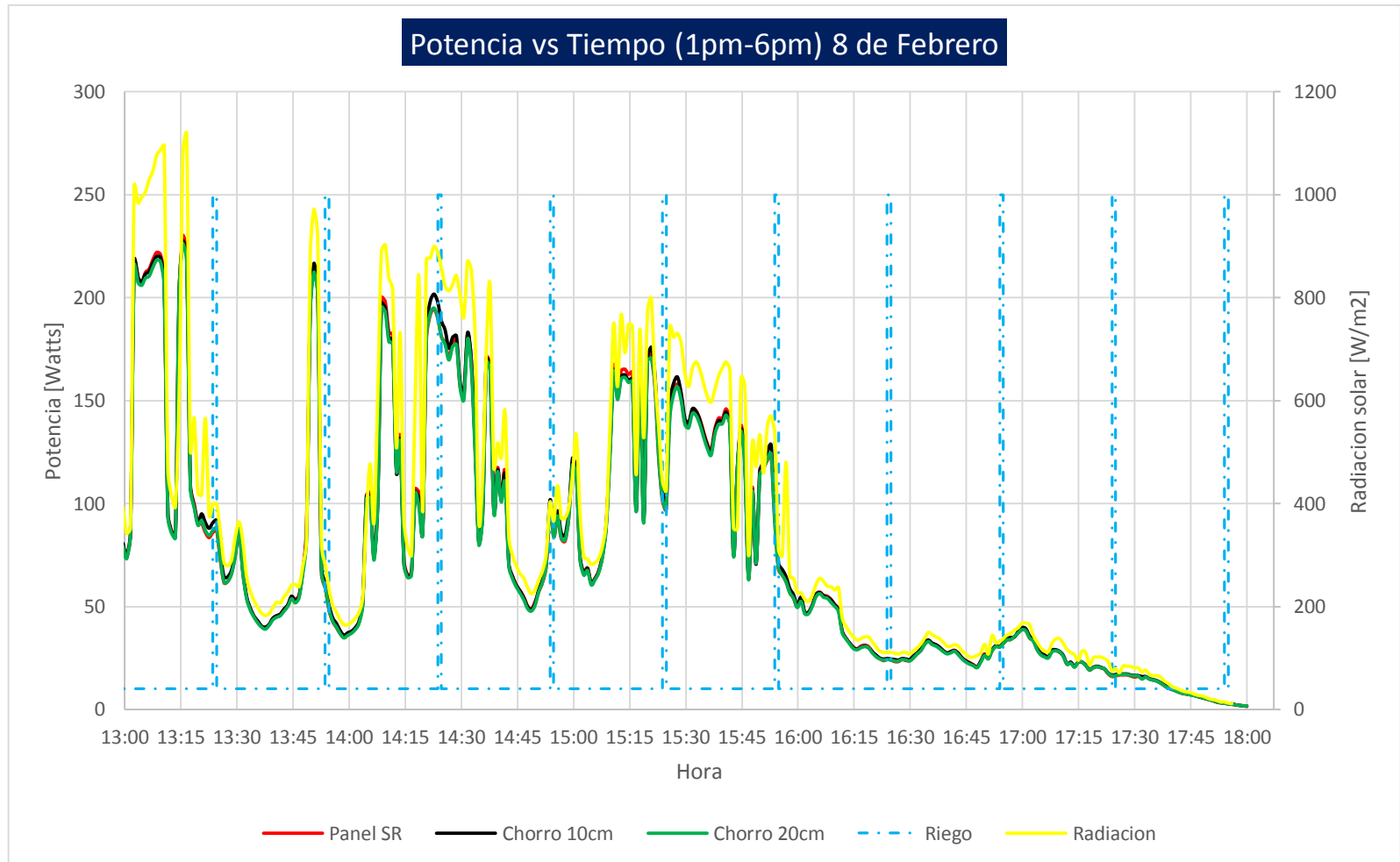
Experimento 3-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



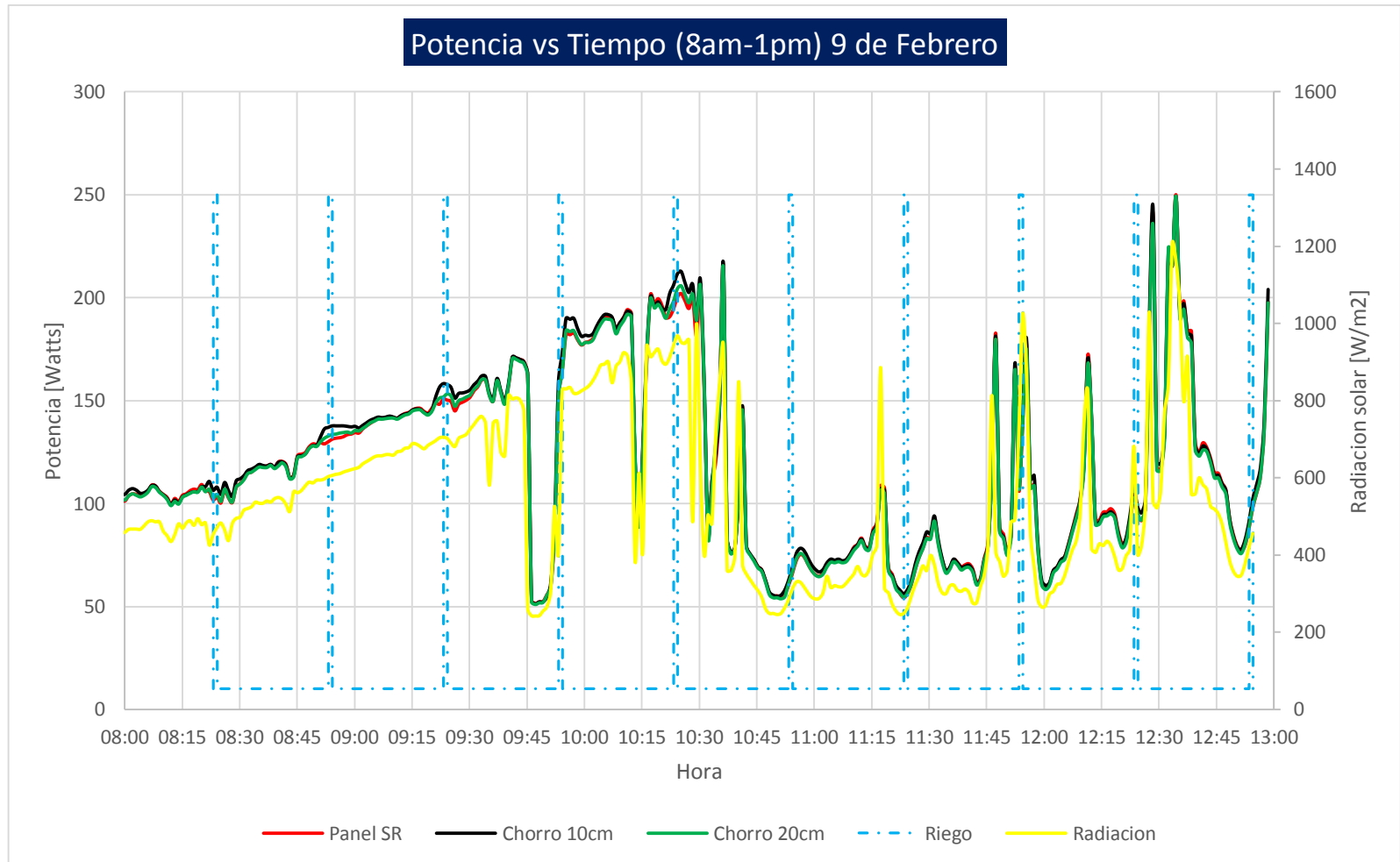
Experimento 3-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 15:15



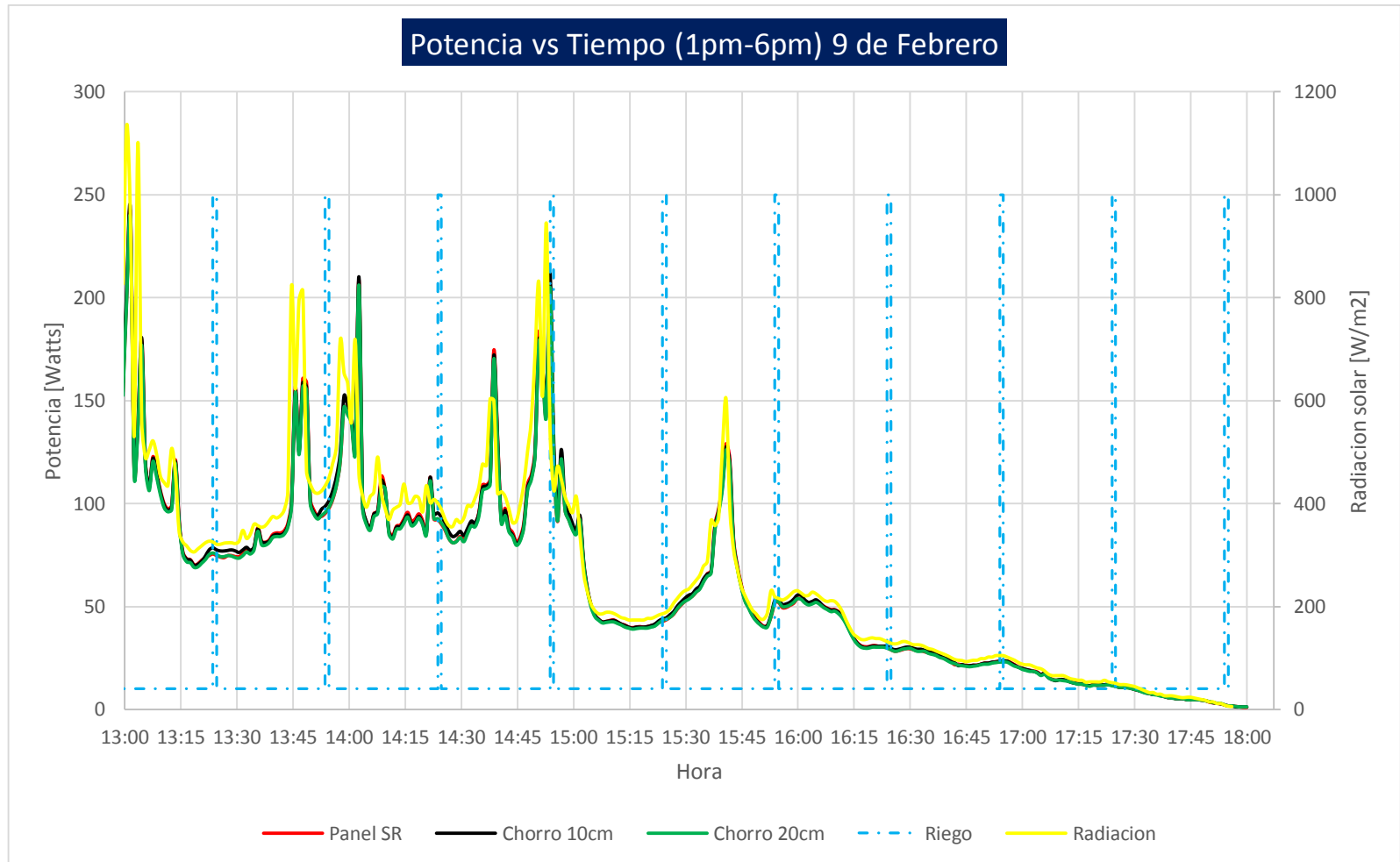
Experimento 4-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



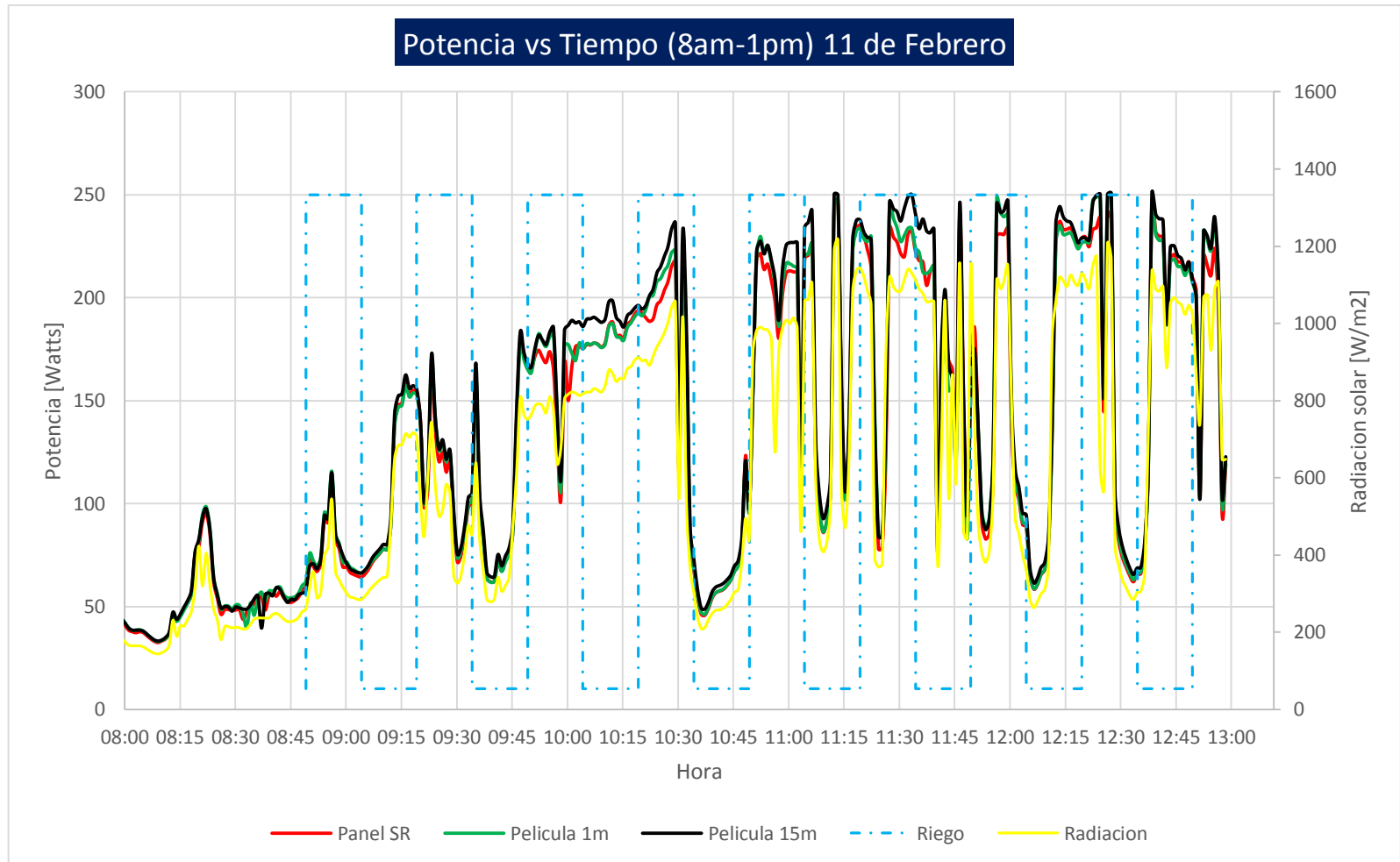
Experimento 4-Dia 1, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



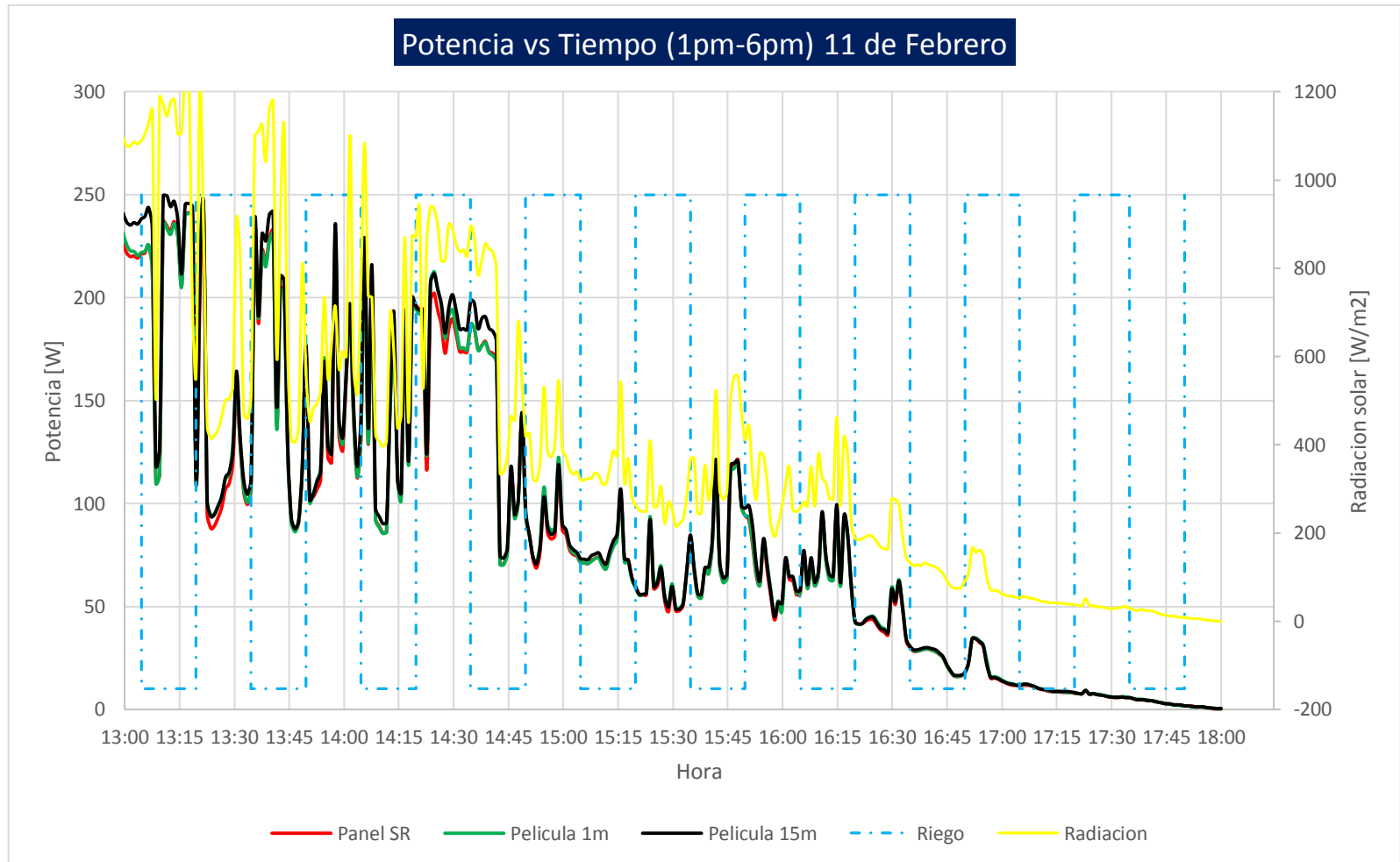
Experimento 4-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



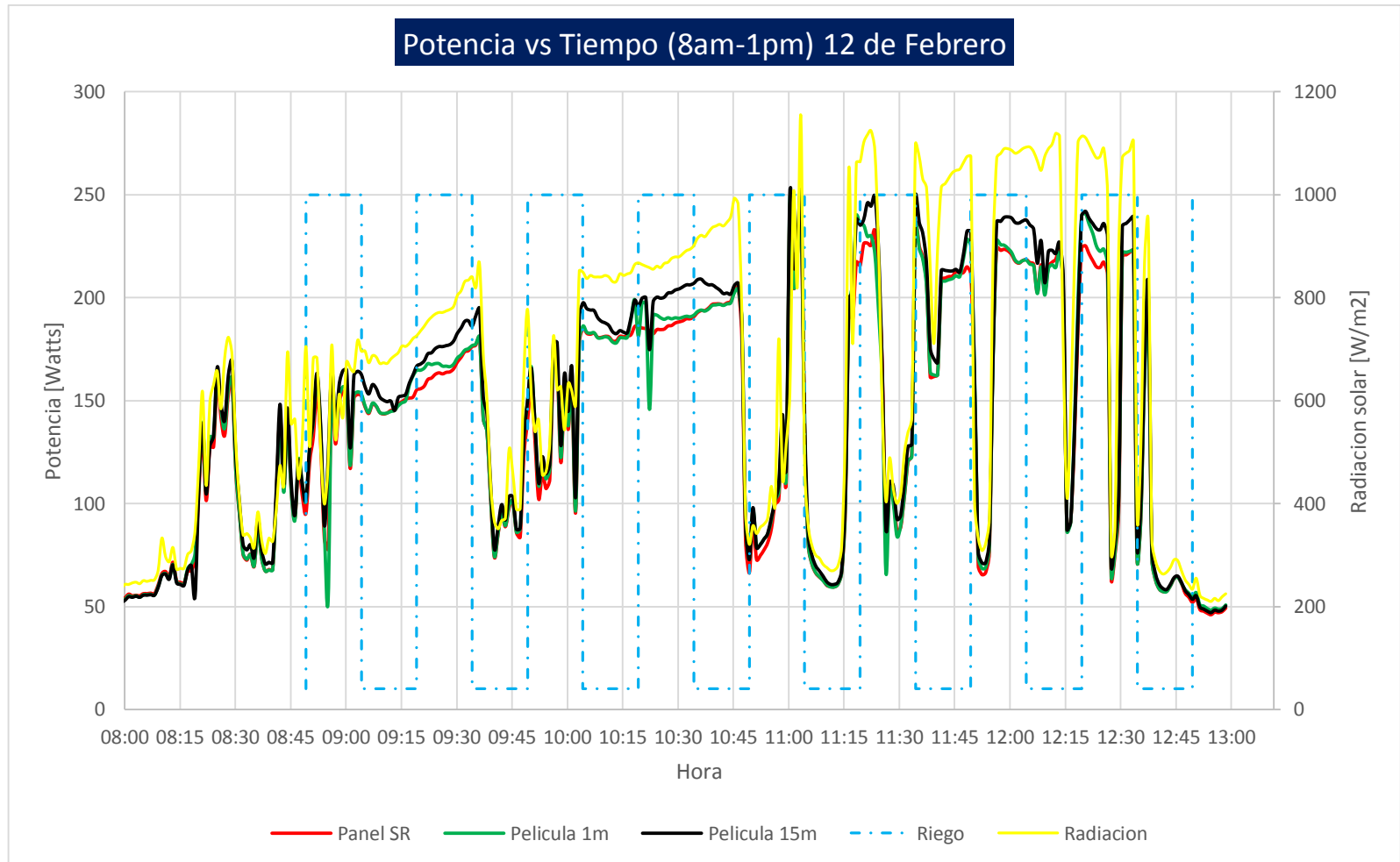
Experimento 4-Dia 2, Chorros 10 [cm] 100%-Chorros 20 [cm] 100%, riego 1:29



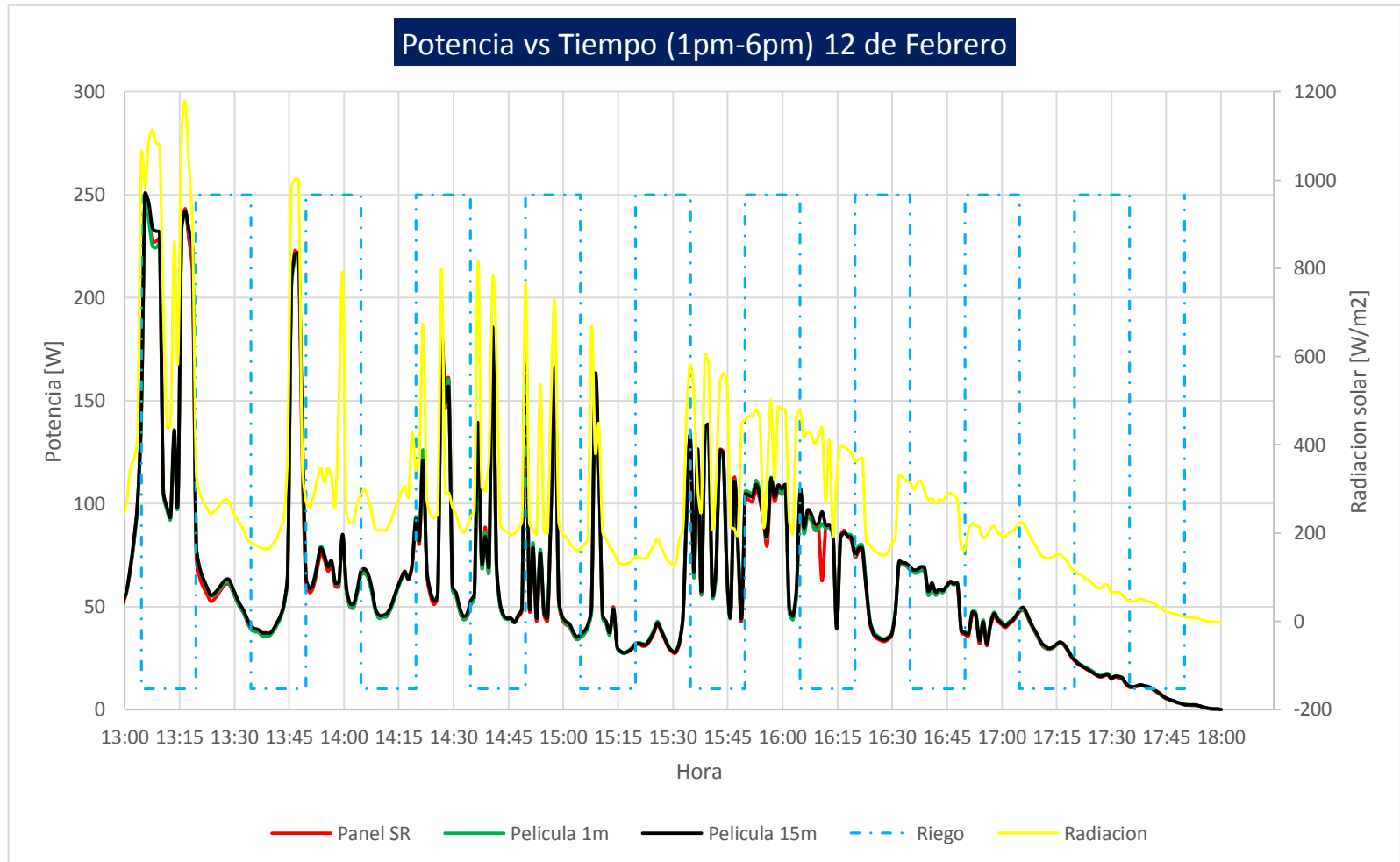
Experimento 5-Día 1, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



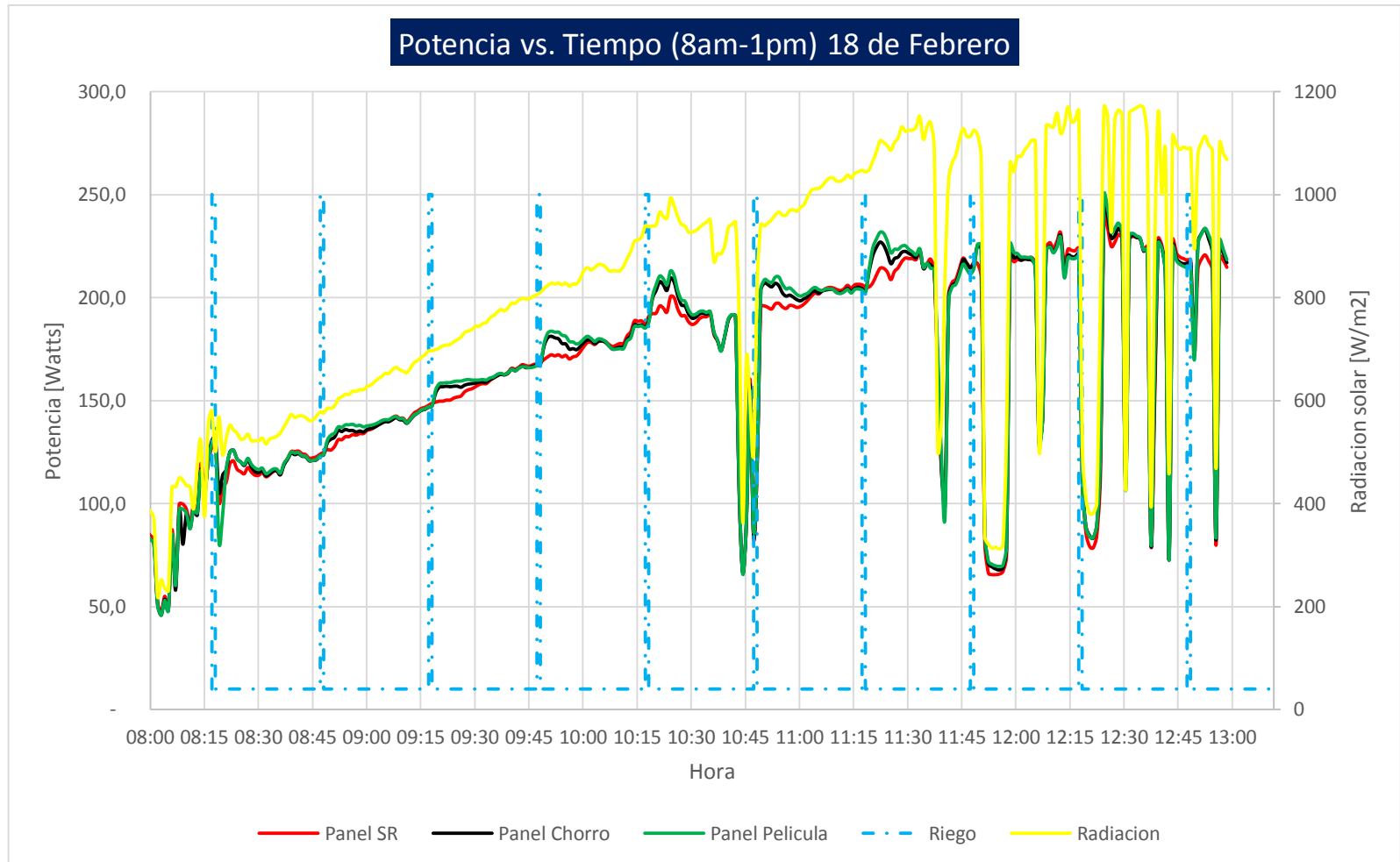
Experimento 5-Día 1, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



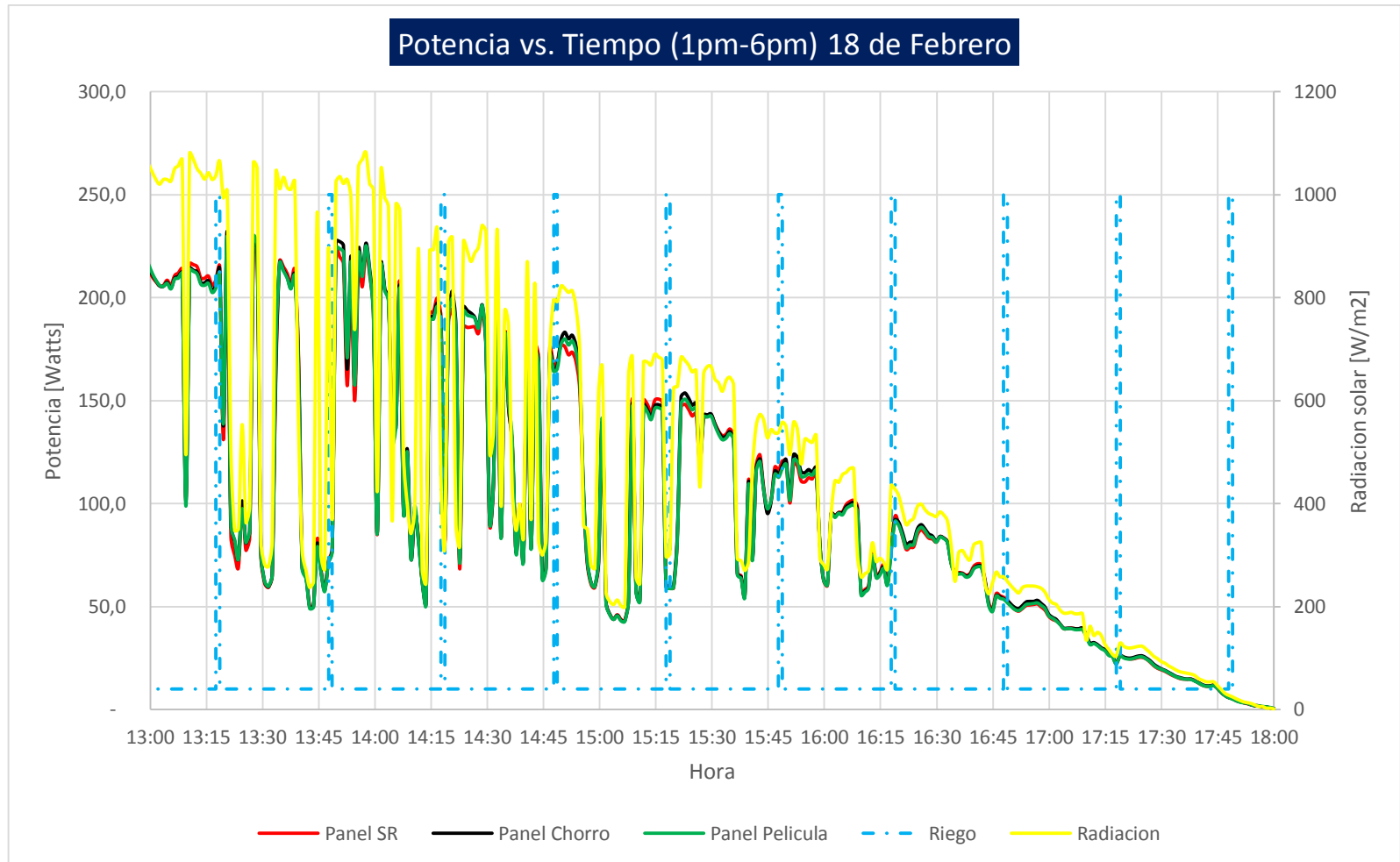
Experimento 5-Día 2, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



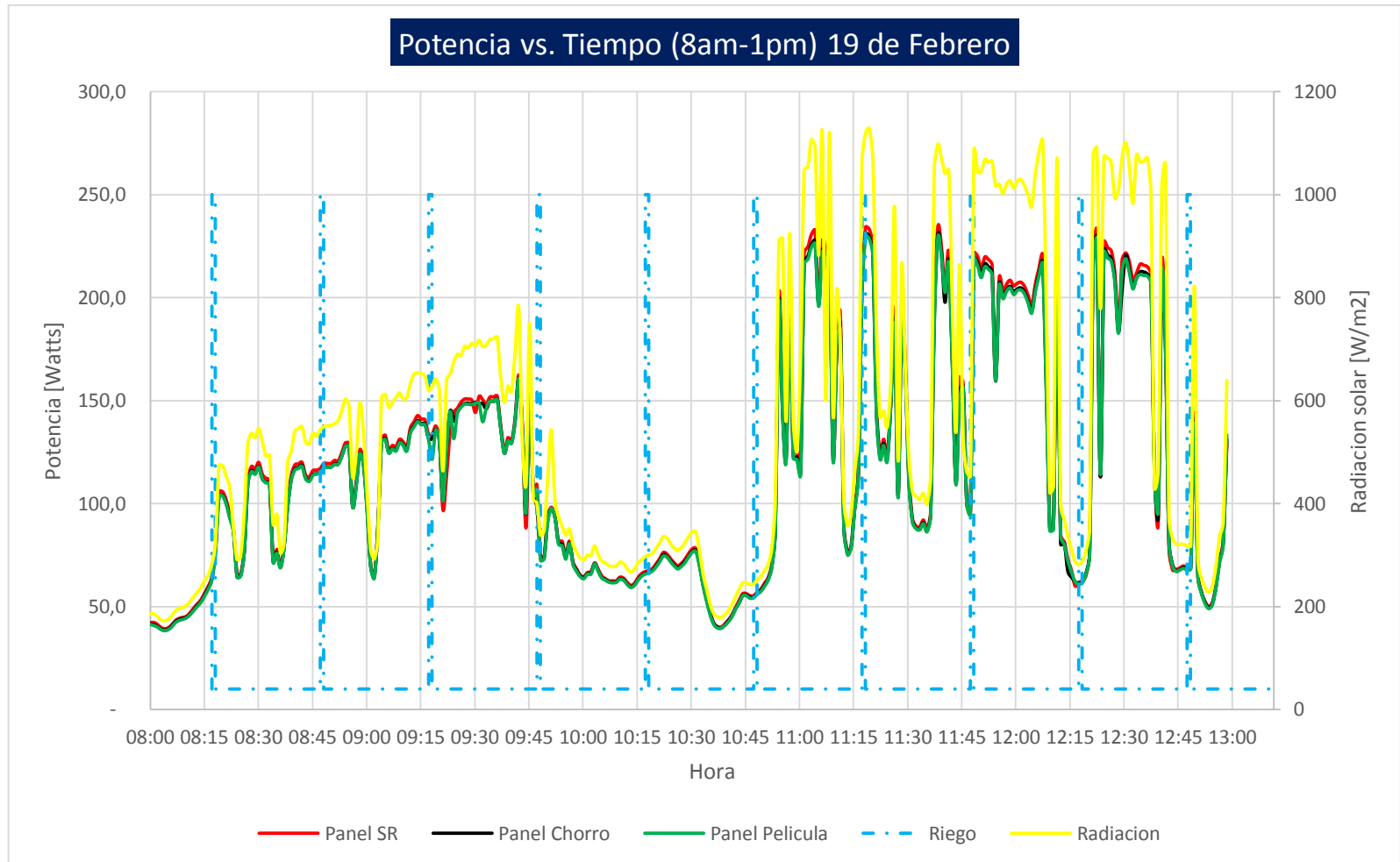
Experimento 5-Día 2, Película de agua 50%. Panel con riego 1:29 y panel con riego 15:15



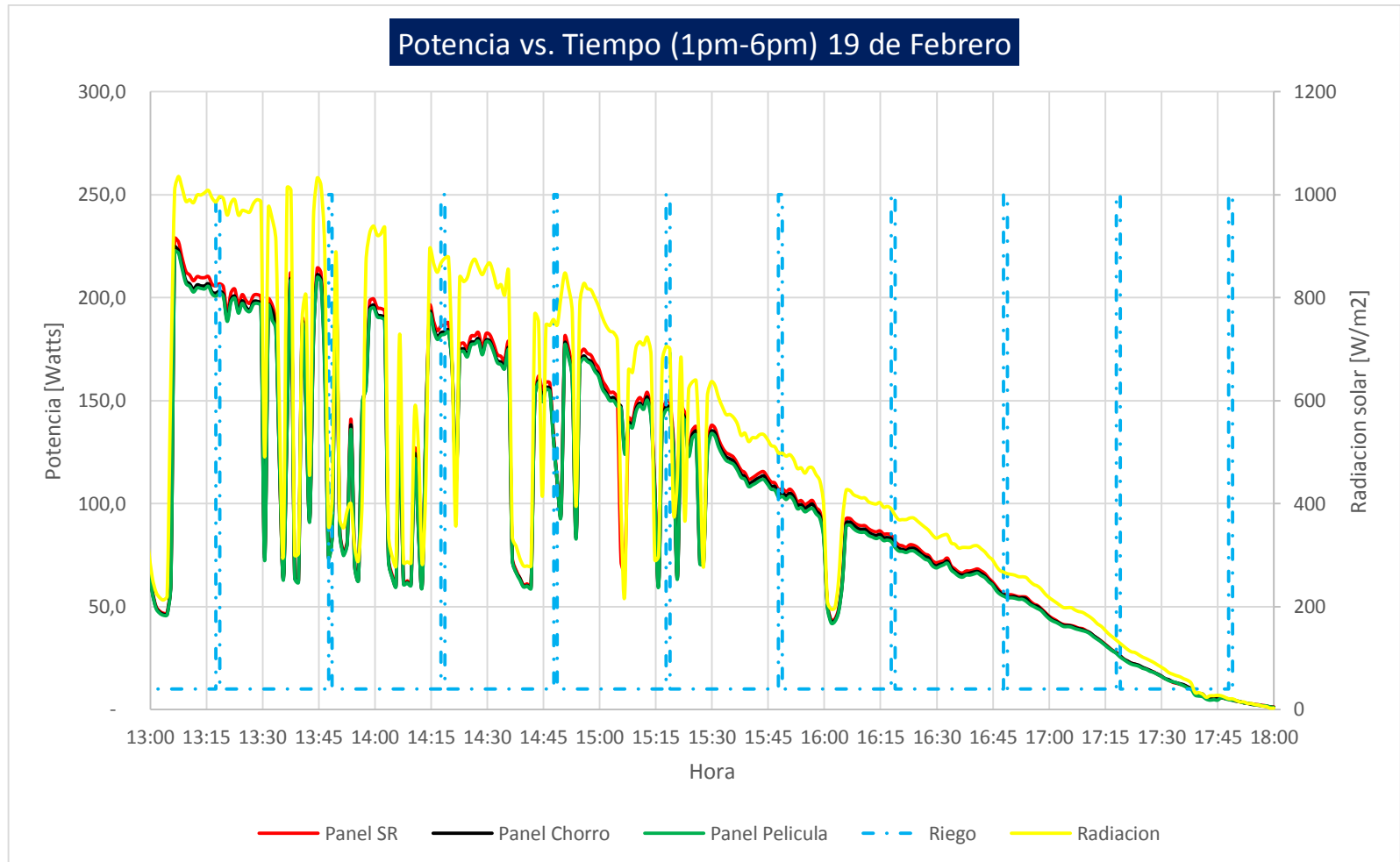
Experimento 6-Día 1, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



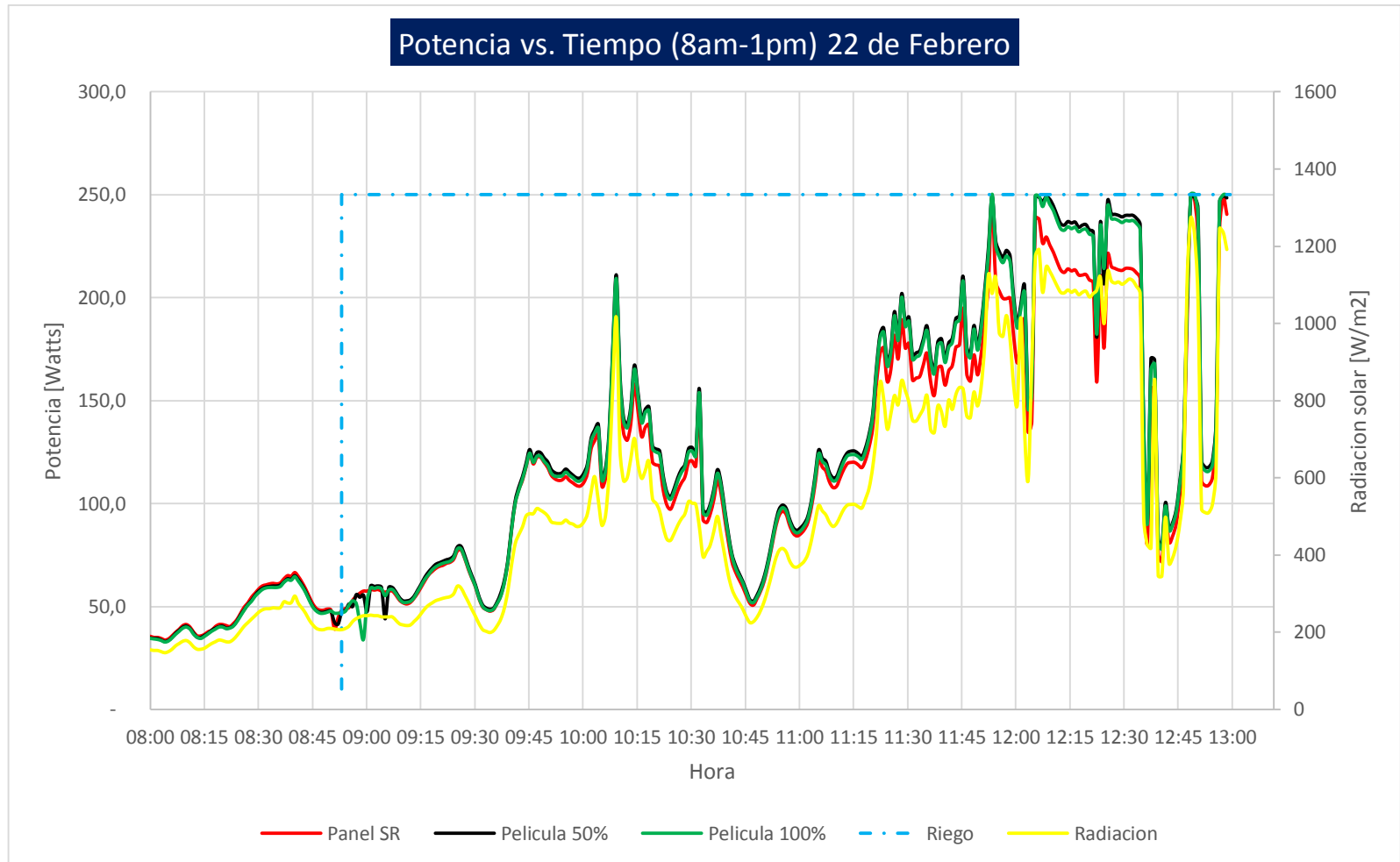
Experimento 6-Dia 1, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



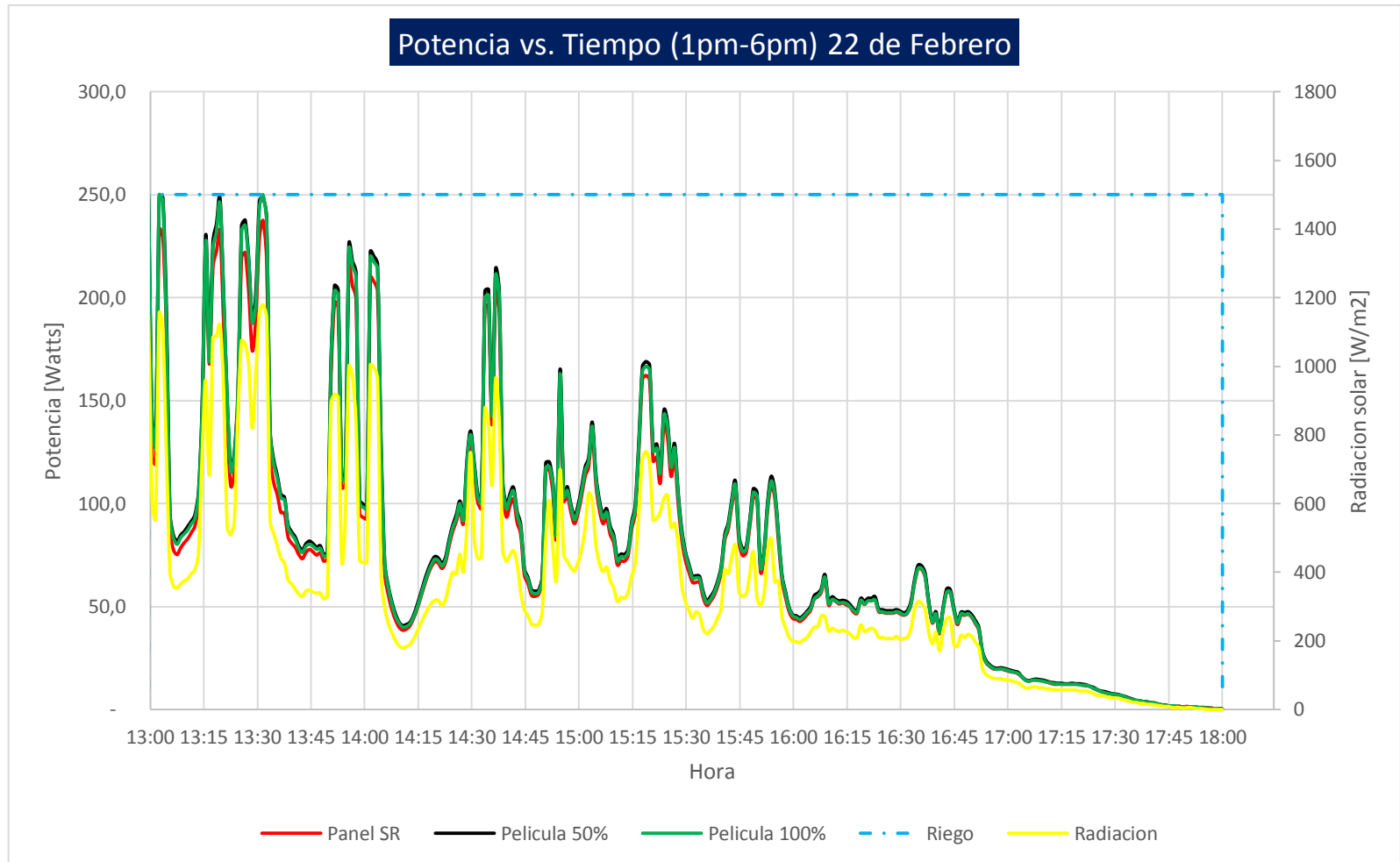
Experimento 6-Dia 2, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



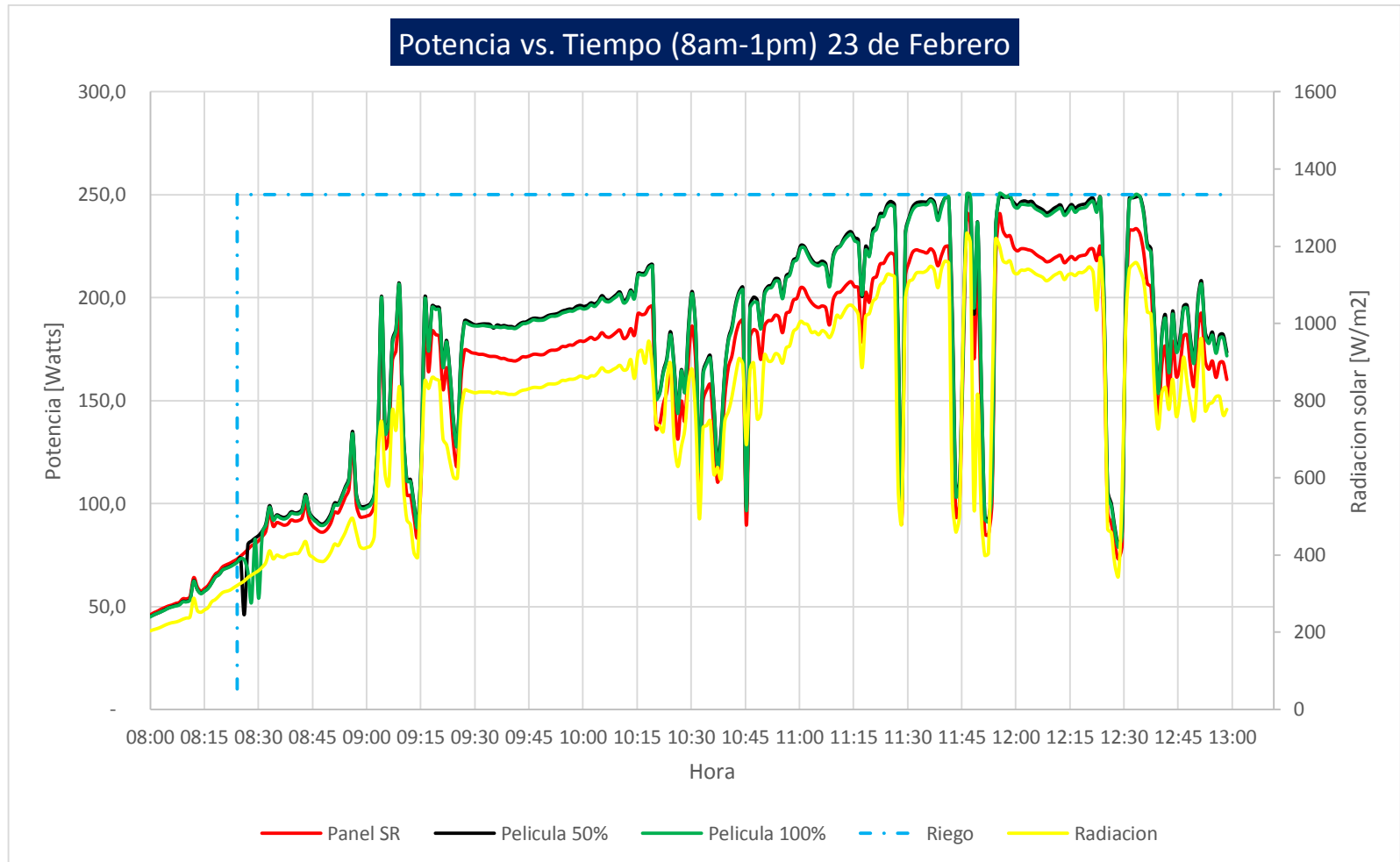
Experimento 6-Día 2, Película de agua 100%-Chorros 10[cm]. Paneles con riego 1:29



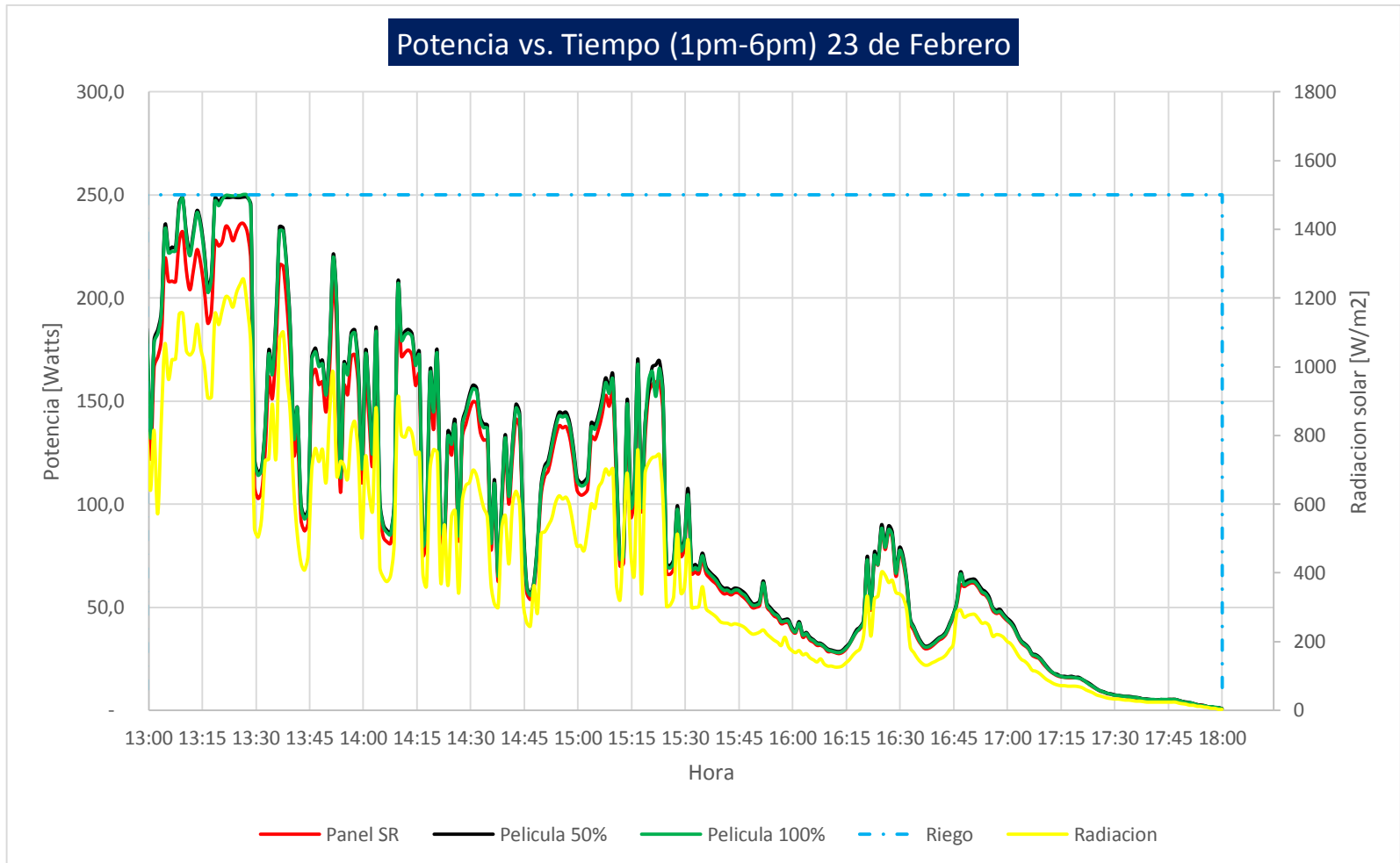
Experimento 7-Dia 1, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



Experimento 7-Dia 1, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



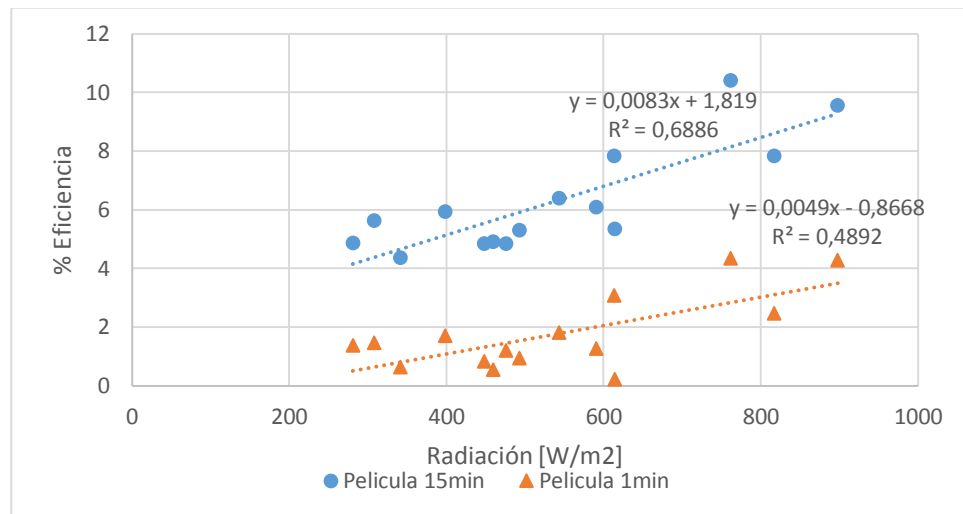
Experimento 7-Dia 2, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente



Experimento 7-Dia 2, Película de agua 100%-Película 50%. Riego permanente

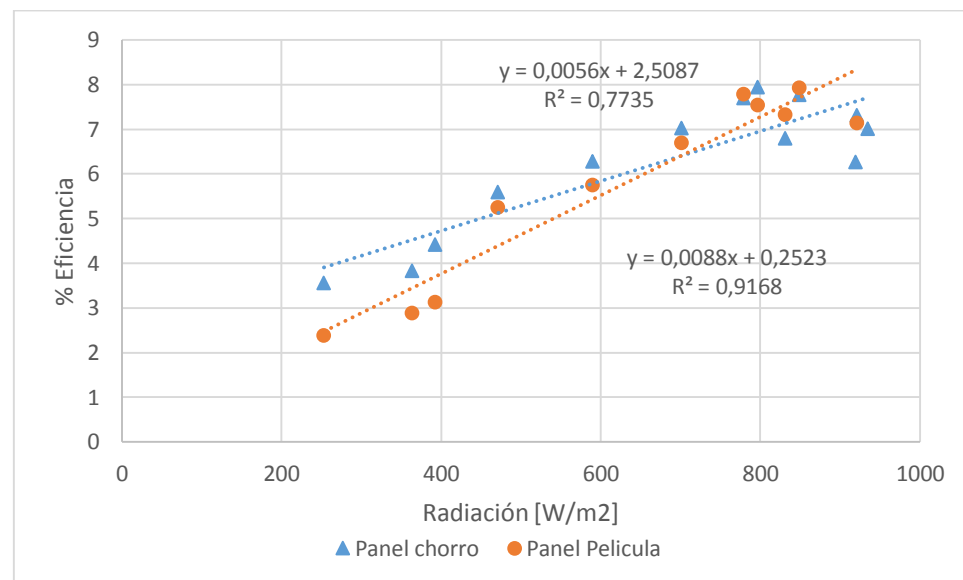
ANEXO E. GRÁFICAS DEL ANÁLISIS DE LA POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA POR LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Experimento 1



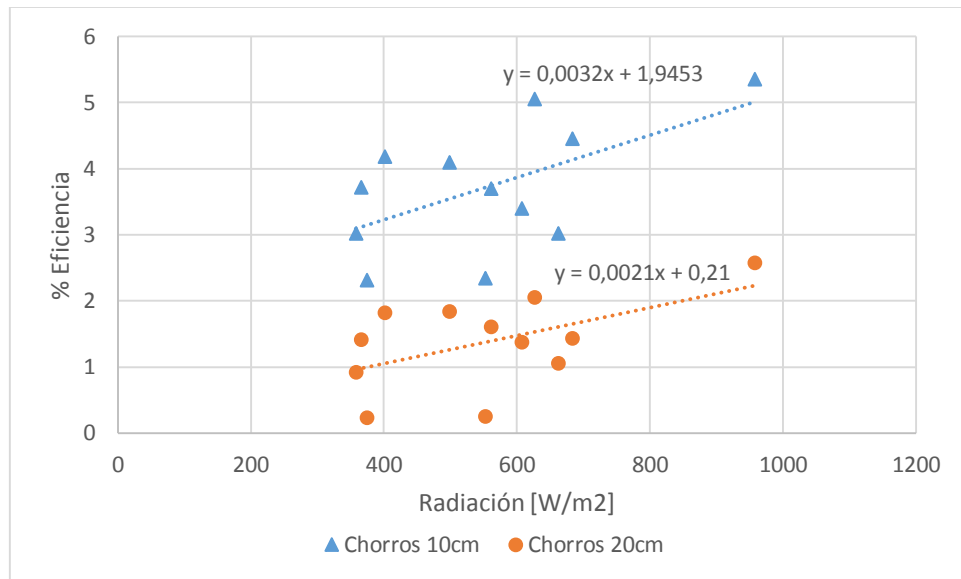
Correlación Eficiencia vs Radiación

Experimento 2



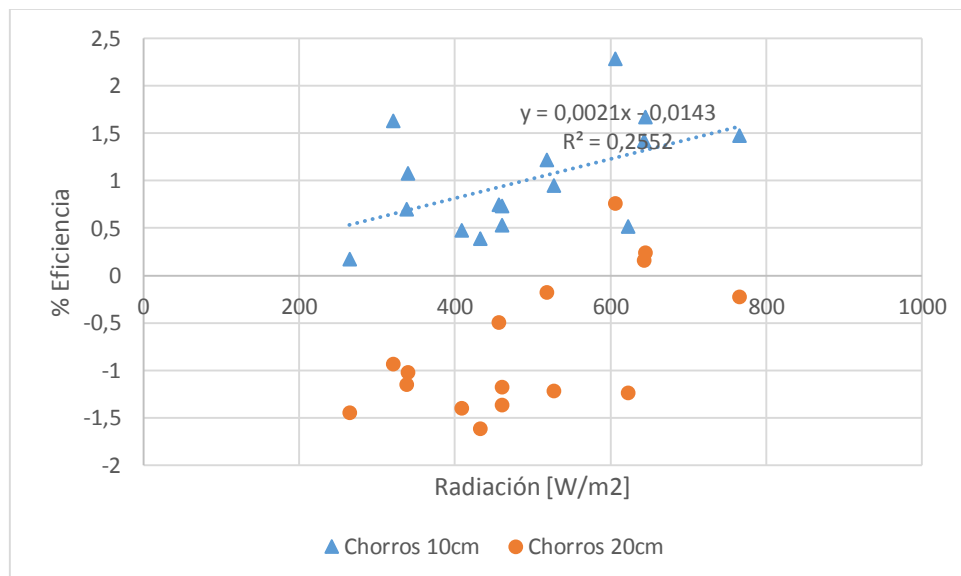
Correlación Eficiencia vs Radiación

Experimento 3



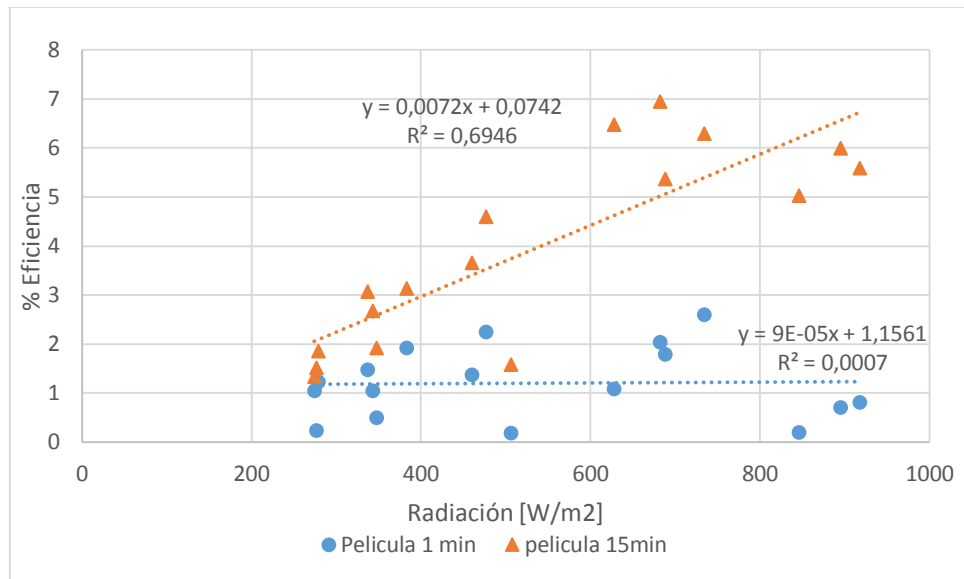
Correlación Eficiencia vs Radiación

Experimento 4



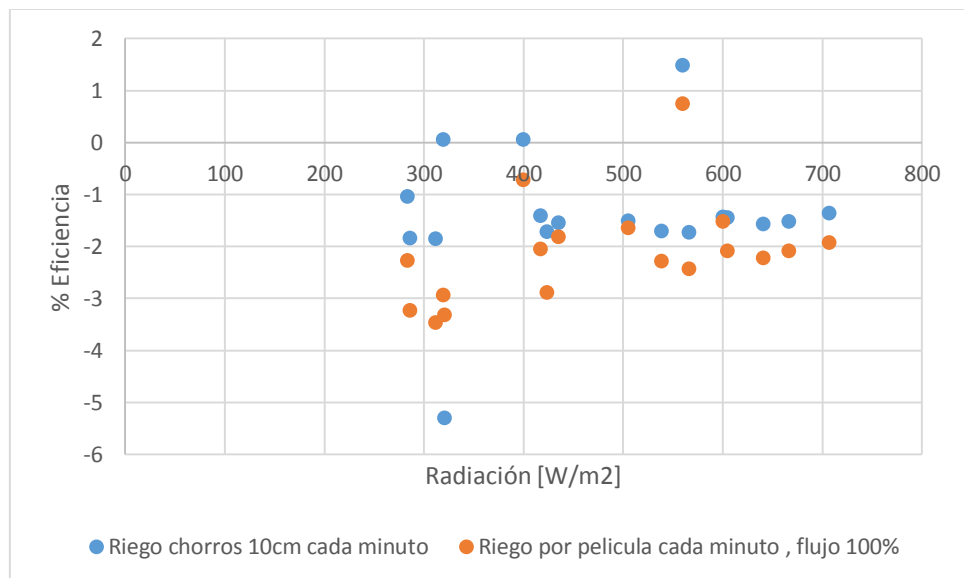
Correlación Eficiencia vs Radiación

Experimento 5



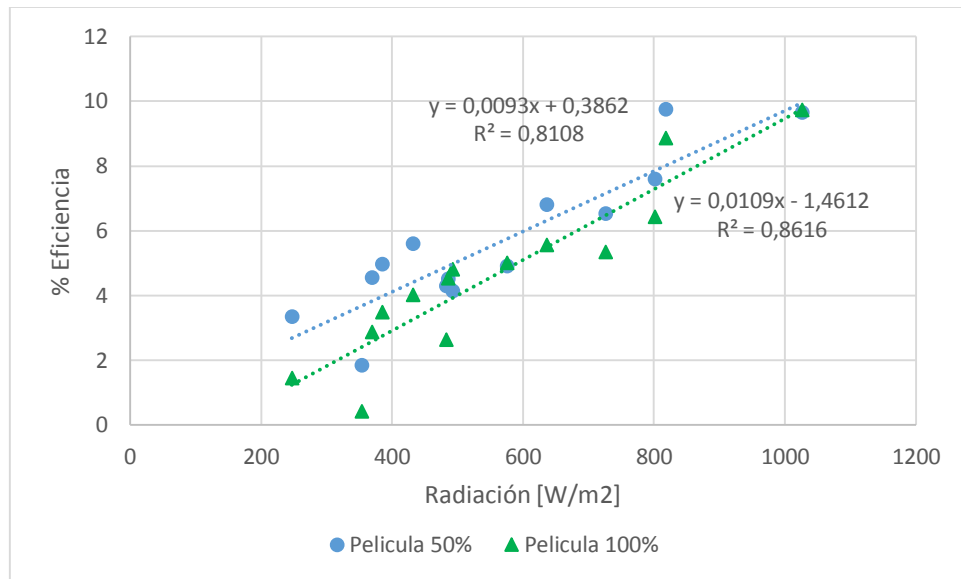
Correlación Eficiencia vs Radiación

Experimento 6



Correlación Eficiencia vs Radiación

Experimento 7



Correlación Eficiencia vs Radiación

ANEXO F. ANÁLISIS PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES

Debido a que las medidas realizadas en un experimento no son absolutamente precisas es necesario estimar la desviación del valor medido con respecto al valor real. Esta incertidumbre se calcula de forma diferente dependiendo de si el valor de la magnitud se obtiene directamente de un instrumento de medida o si se obtiene de forma indirecta a partir de la medición de una o varias variables.

En este trabajo de grado se evaluaron las incertidumbres Tipo B, que se obtiene a partir de la información dada por los fabricantes de los equipos de medición o por laboratorios de calibración. Las fuentes de incertidumbre Tipo B están relacionadas con los certificados de calibración, manuales del instrumento de medición, normas o literatura, etc.

Método de cálculo y fórmulas matemáticas

Como se mencionó anteriormente el cálculo de la incertidumbre es diferente para las mediciones donde el valor se toma directamente del instrumento de medida (medida directa) o cuando se obtiene con un modelo matemático (medida indirecta).

Medida directa

Para evaluar la incertidumbre Tipo B de una medida directa basta con conocer la exactitud del instrumento usado para llevar a cabo el proceso de medición. Con la ecuación (1) se calcula la incertidumbre de una medida directa y la ecuación (2) es la manera de presentar la medida con su incertidumbre.

$$\Delta X = \theta * X/100 \quad (1)$$

Donde:

θ : Exactitud del instrumento

X : Medida obtenida

$$Y = X \pm \Delta X \quad (2)$$

Donde:

X : Medida obtenida

ΔX : Incertidumbre

Medida indirecta

A continuación se presenta la expresión matemática para el cálculo de la incertidumbre Tipo B para dos variables en el caso donde no hay análisis estadístico.

$$\mu_B = \sqrt{(\text{Coef}_{\text{sen1}} * \% \text{prec1})^2 + (\text{Coef}_{\text{sen2}} * \% \text{prec2})^2}$$

Donde:

$\% \text{prec}$: Incertidumbre asociada a la precisión del instrumento

En caso de existir análisis estadístico hay que calcular incertidumbre tipo A e incertidumbre tipo B como se muestra a continuación.

$$\mu_A = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}}$$

Donde:

σ_1 : Desviación estándar de los datos de las mediciones

n : Numero de datos

$$\mu_B = \sqrt{(\text{Coef}_{\text{sen1}} * \frac{\% \text{prec1}}{\sqrt{12}})^2 + (\text{Coef}_{\text{sen1}} * \frac{\% \text{res1}}{\sqrt{3}})^2 + (\text{Coef}_{\text{sen2}} * \frac{\% \text{prec2}}{\sqrt{12}})^2 + (\text{Coef}_{\text{sen1}} * \frac{\% \text{res1}}{\sqrt{3}})^2}$$

Donde:

$\text{Coef}_{\text{sen}i}$: Coeficiente de sensibilidad de la variable i

Modelo matemático	Coeficientes de sensibilidad	Observaciones
-------------------	------------------------------	---------------

$\Delta T = T_{psr} - T_{pm}$ Este modelo se usa para demostrar que tanto mejora la temperatura del panel al aplicarle riego.	$\frac{\partial \Delta T}{\partial T_{psr}} = 1$ $\frac{\partial \Delta T}{\partial T_{pm}} = -1$	
$T_{prom} = \frac{1}{n} \sum T_i$ Temperatura promedio	$\frac{\partial T_{prom}}{\partial T_i} = \frac{1}{n}$	Donde: n: número de datos
$P_{prom} = \frac{1}{n} \sum P_i$ Potencia promedio	$\frac{\partial T_{prom}}{\partial T_i} = \frac{1}{n}$	Donde: n: número de datos
$n\% = \frac{P_{generada} * 100}{A * Irr_{prom}}$	$\frac{\partial n\%}{\partial P_{gen}} = \frac{100}{A * Irr}$ $\frac{\partial n\%}{\partial Irr} = -\frac{P_{gen} * 100}{A * Irr^2}$	Donde: Irr: es la radiación solar recibida por el panel- Á: Área del panel fotovoltaico

. Modelos matemáticos usados

INCERTIDUMBRE DE TEMPERATURAS

No. Experimento	No. Día	Técnica	T. Max [°C]	T. Min [°C]	T prom total [°C]	T. disminución prom [°C]
1	1	Panel SR	61,8 ± 0,3	27,2 ± 0,1	40,4±0,3	Referencia
1	1	Película 1m	51,5 ± 0,3	26,5 ± 0,1	35,6±0,2	4,7±0,5
1	1	Película 15m	49,5 ± 0,2	26,1 ± 0,1	32,2±0,2	8,1±0,5
1	2	Panel SR	63,2 ± 0,3	27,1 ± 0,1	37,5±0,3	Referencia
1	2	Película 1m	59,1 ± 0,3	24,1 ± 0,1	33,4±0,3	4,1±0,5
1	2	Película 15m	52,8 ± 0,3	24,8 ± 0,1	30,7±0,2	6,8±0,5
2	1	Panel SR	57,9 ± 0,3	28,4 ± 0,1	43,6±0,3	Referencia
2	1	Película	49,9 ± 0,2	26,5 ± 0,1	33,6±0,3	10,0±0,5
2	1	Chorro 10[cm]	50,6 ± 0,3	25,1 ± 0,1	33,8±0,2	9,7±0,5
2	2	Panel SR	58,3 ± 0,3	28,3 ± 0,1	45,4±0,3	Referencia
2	2	Película	50,4 ± 0,3	25,5 ± 0,1	34,2±0,3	11,1±0,5
2	2	Chorro 10[cm]	51,1 ± 0,3	25,7 ± 0,1	35,9±0,2	9,5±0,5
3	1	Panel SR	58,8 ± 0,3	28,0 ± 0,1	43,3±0,3	Referencia

No. Experimento	No. Día	Técnica	T. Max [°C]	T. Min [°C]	T prom total [°C]	T. disminución prom [°C]
3	1	Chorro 10[cm]	52,4 ± 0,3	24,3 ± 0,1	33,9±0,2	9,4±0,5
3	1	Chorro 20[cm]	52,5 ± 0,3	27,7 ± 0,1	36,2±0,2	7,1±0,5
3	2	Panel SR	51,7 ± 0,3	23,5 ± 0,1	35,8±0,3	Referencia
3	2	Chorro 10[cm]	45,5 ± 0,2	22,6 ± 0,1	29,6±0,2	6,1±0,5
3	2	Chorro 20[cm]	46,5 ± 0,2	22,6 ± 0,1	30,9±0,2	4,9±0,5
4	1	Panel SR	62,6 ± 0,3	26,4 ± 0,1	41,0±0,4	Referencia
4	1	Chorro 10[cm]	57,5 ± 0,3	24,6 ± 0,1	36,8±0,3	4,2±0,5
4	1	Chorro 20[cm]	57,0 ± 0,3	25,7 ± 0,1	38,4±0,4	2,7±0,5
4	2	Panel SR	56,5 ± 0,3	26,5 ± 0,1	38,8±0,3	Referencia
4	2	Chorro 10[cm]	51,7 ± 0,3	26,5 ± 0,1	35,2±0,3	3,6±0,5
4	2	Chorro 20[cm]	51,4 ± 0,3	26,5 ± 0,1	36,3±0,3	2,5±0,5
5	1	Panel SR	55,5 ± 0,3	27,4 ± 0,1	40,7±0,3	Referencia
5	1	Película 1m	54,0 ± 0,3	25,0 ± 0,1	36,7±0,3	4,1±0,5
5	1	Película 15m	49,0 ± 0,2	23,9 ± 0,1	32,2±0,2	8,5±0,5
5	2	Panel SR	54,3 ± 0,3	27,3 ± 0,1	40,8±0,3	Referencia
5	2	Película 1m	55,5 ± 0,3	27,1 ± 0,1	36,7±0,3	4,1±0,5
5	2	Película 15m	49,9 ± 0,2	26,5 ± 0,1	32,6±0,2	8,2±0,5
6	1	Panel SR	63,4 ± 0,3	29,1 ± 0,1	47,5±0,4	Referencia
6	1	Película	59,4 ± 0,3	27,7 ± 0,1	41,3±0,3	6,2±0,6
6	1	Chorro 10[cm]	60,8 ± 0,3	28,9 ± 0,1	43,0±0,3	4,5±0,6
6	2	Panel SR	57,0 ± 0,3	28,8 ± 0,1	42,7±0,3	Referencia
6	2	Película	55,1 ± 0,3	28,8 ± 0,1	41,6±0,3	1,1±0,6
6	2	Chorro 10[cm]	56,0 ± 0,3	28,8 ± 0,1	41,7±0,3	1,0±0,6
7	1	Panel SR	63,4 ± 0,3	26,4 ± 0,1	39,1±0,4	Referencia
7	1	Película 100%	38,7 ± 0,2	26,3 ± 0,1	31,1±0,1	7,9±0,5
7	1	Película 50%	39,4 ± 0,2	26,3 ± 0,1	31,3±0,1	7,8±0,5
7	2	Panel SR	63,1 ± 0,3	27,9 ± 0,1	45,2±0,4	Referencia
7	2	Película 100%	38,8 ± 0,2	26,3 ± 0,1	33,4±0,1	11,8±0,5
7	2	Película 50%	39,1 ± 0,2	27,1 ± 0,1	33,7±0,1	11,6±0,5

Medidas de temperatura con su incertidumbre

Experimento	Técnica	P. Generada prom. [W]	Eficiencia prom. [%]
1-1	Sin riego	97,0 ± 2,2	10,8 ± 0,1
1-1	Película 15m	103,0 ± 2,4	11,5 ± 0,1
1-1	Película 1m	98,7 ± 2,2	11,0 ± 0,1
1-2	Sin riego	78,8 ± 2,6	10,8 ± 0,1
1-2	Película 15m	81,4 ± 2,7	11,05 ± 0,1
1-2	Película 1m	80,2 ± 2,6	10,9 ± 0,1
2-1	Sin riego	114,7 ± 2,5	10,7 ± 0,1
2-1	Chorro 10cm	121,5 ± 2,7	11,3 ± 0,1
2-1	Película 15m	120,9 ± 2,7	11,2 ± 0,1
2-2	Sin riego	123,8 ± 2,5	10,7 ± 0,1
2-2	Chorro 10cm	130,4 ± 2,7	11,2 ± 0,1
2-2	Película 15m	130,9 ± 2,7	11,2 ± 0,1
3-1	Sin riego	112,1 ± 2,5	10,8 ± 0,1
3-1	Chorro 10cm	118,3 ± 2,7	11,3 ± 0,1
3-1	Chorro 20cm	115,3 ± 2,6	11,1 ± 0,1
3-2	Sin riego	85,4 ± 2,5	11,3 ± 0,1
3-2	Chorro 10cm	88,4 ± 2,6	11,6 ± 0,1
3-2	Chorro 20cm	86,5 ± 2,6	11,4 ± 0,1
4-1	Sin riego	105,1 ± 2,9	10,8 ± 0,1
4-1	Chorro 10cm	106,1 ± 3	10,9 ± 0,1
4-1	Chorro 20cm	104,2 ± 2,9	10,7 ± 0,1
4-2	Sin riego	89,7 ± 2,1	11,1 ± 0,1
4-2	Chorro 10cm	90,6 ± 2,2	11,2 ± 0,1
4-2	Chorro 20cm	89,1 ± 2,1	11,0 ± 0,1
5-1	Sin riego	109,2 ± 3	11,2 ± 0,1
5-1	Película 15m	113,7 ± 3,1	11,6 ± 0,1
5-1	Película 1m	110,6 ± 3	11,3 ± 0,1
5-2	Sin riego	101,1 ± 2,7	11,3 ± 0,1
5-2	Película 15m	105,5 ± 2,8	11,7 ± 0,1
5-2	Película 1m	102,3 ± 2,7	11,4 ± 0,1
7-1	Sin riego	94,4 ± 2,5	11,4 ± 0,1
7-1	Película 50%	99,7 ± 2,7	11,9 ± 0,1
7-1	Película 100%	98,4 ± 2,7	11,7 ± 0,1
7-2	Sin riego	123,8 ± 2,8	11,1 ± 0,1

Experimento	Técnica	P. Generada prom. [W]	Eficiencia prom. [%]
7-2	Película 50%	$133,5 \pm 3,1$	$11,7 \pm 0,1$
7-2	Película 100%	$132,4 \pm 3,1$	$11,6 \pm 0,1$

. Medidas de potencia con su incertidumbre