



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

INFLUENCIA DEL ALBEDO Y LAS SOMBRAS EN LA OPERACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIALES

Alumno: Sergio Castro Viúdez

Tutor: Prof. D. Emilo Muñoz Cerón
Dpto: Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Junio, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Don EMILIO MUÑOZ CERÓN , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:
INFLUENCIA DEL ALBEDO Y LAS SOMBRAS EN LA OPERACIÓN DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS BIFACIALES, que presenta SERGIO CASTRO VIÚDEZ,
autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica
Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2023

El alumno:

Los tutores:

SERGIO CASTRO VIÚDEZ

EMILIO MUÑOZ CERÓN

RESUMEN

A consecuencia de la escasez de recursos no renovables y la contaminación que generan estos, la sociedad se ha centrado en la búsqueda y desarrollo de métodos que permitan la obtención de energía sin un alto coste, que no genere contaminación y que sea renovable.

En este escenario cobra protagonismo la tecnología solar fotovoltaica gracias a su capacidad de integración, versatilidad y su baja influencia (negativa) en el medio ambiente.

Dentro del ámbito de la tecnología solar fotovoltaica, se encuentran los módulos basados en la tecnología monofacial convencional y la emergente tecnología bifacial.

Con el objetivo de ayudar en el desarrollo e investigación de la tecnología fotovoltaica bifacial, se ha llevado a cabo este trabajo en el que, además de comparar la tecnología monofacial con la tecnología bifacial, se ha estudiado cómo influyen las sombras generadas en la parte trasera de los módulos bifaciales en la generación de energía así como, la influencia en la captación de radiación solar de albedo que presenta la utilización de diferentes superficies reflectantes.

A través de los experimentos y análisis que componen este trabajo, se va a poder visualizar cómo la tecnología bifacial presenta grandes ventajas en comparación a la tecnología monofacial convencional, siendo aún más notables estas ventajas mediante la modificación de la reflexión del terreno en el que se encuentre la instalación.

Sin embargo, se observa que el sombreado en las caras posteriores de los módulos bifaciales ejercen un efecto negativo en la generación de energía, llegando a presentar una reducción significativa de la diferencia entre valores de energía de los módulos bifaciales y módulos monofaciales para un sombreado del 30% de la superficie de los módulos bifaciales y, presentando unos valores de generación de energía muy cercanos a los que ofrecen los módulos monofaciales para un sombreado del 60%. Esto puede tener una influencia de cara a la configuración de las estructuras soporte que se utilicen para este tipo de módulos.

ABSTRACT

As a result of the scarcity of non-renewable resources and the pollution they generate, society has focused on the search and development of methods that allow energy to be obtained without high cost, non-polluting and renewable.

In this scenario, photovoltaic solar technology takes center stage thanks to its integration capacity, versatility and its low negative influence on the environment.

Within the field of solar photovoltaic technology, there are modules based on conventional monofacial technology and emerging bifacial technology.

With the objective of helping in the development and research of bifacial photovoltaic technology, this work has been carried out in which, in addition to comparing monofacial technology with bifacial technology, it has been studied how the shadows generated in the back of the bifacial modules influence the generation of energy as well as, the influence on the solar albedo radiation uptake that presents the use of different reflectives surfaces.

Through the experiments and analysis that make up this work, it will be possible to visualize how bifacial technology has great advantages compared to conventional monofacial technology, these advantages are even more noticeable by modifying the reflection of the terrain on which the installation is located.

However, it will be observed how the shading on the back faces of the bifacial modules exerts a negative effect on energy generation, reaching a significant reduction in the difference between energy values of the bifacial modules and monofacial modules for a shading of 30% of the surface of the bifacial modules and, presenting power generation values very close to those offered by the monofacial modules for a shading of 60%. This may have an influence on the configuration of the support structures used for this type of module.

After carrying out this study, it has been shown that bifacial technology is clearly more efficient than monofacial technology, allowing greater energy generation in the same space, as long as the shading generated on the back faces is kept in the minimum possible and, the ground on which the installation is located allows an enhancement of its reflection characteristics for greater efficiency.

ÍNDICE

ÍNDICE	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURAS DEL TRABAJO	14
1.1 Introducción.....	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Estructura del Trabajo	16
2 ESTADO DEL ARTE	17
2.1 Fundamentos de la Tecnología Bifacial.....	17
2.2 Tecnología Bifacial en la Actualidad.....	19
2.3 La importancia del Albedo y las Sombras	21
3 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE ENSAYO	25
3.1 Presentación de la instalación objeto de estudio.....	25
3.2 Elementos y montaje de la instalación	27
3.2.1 Inversor	27
3.2.2 Protecciones	28
3.3 Sistema de Monitorización	29
3.3.1 Sensores de Irradiancia: Células Calibradas	31
3.3.2 Sensores Temperatura: Termopares tipo T	34
3.3.3 Registrador de Datos: Grahtec GL820.....	35
3.3.4 Optimizadores de Potencia: HUAWEI SUN2000 450W	36
3.3.5 Trazador de Curvas I-V: ENTEC SOLAR E-1000	42
4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL	43
4.1 Descripción del Experimento.....	43
4.1.1 Ensayo Con 10% de Sombreado y Suelo Natural	44
4.1.2 Ensayo Con 10% de Sombreado y Suelo Potenciado	45
4.1.3 Ensayo Con 30% de Sombreado y Suelo Natural	47
4.1.4 Ensayo Con 30% de Sombreado y Suelo Potenciado	48
4.1.5 Ensayo Con 60% de Sombreado y Suelo Natural	50
4.1.6 Ensayo Con 60% de Sombreado y Suelo Potenciado	52
4.2 Tratamiento y Adquisición de Datos.....	54
4.3 Metodología de Análisis	55

4.3.1	Generación de Energía y Ganancia Bifacial	55
4.3.2	Curvas de Potencia.....	56
4.3.3	Estimación de Potencia.....	57
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
5.1	Generación de Energía y Ganancia Bifacial.....	58
5.2	Curvas de Potencia.....	74
5.3	Estimación de Potencia.....	84
6	CONCLUSIONES	91
7	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	92
	ANEXOS.....	93
	ANEXO 1: Datasheet de Módulos YINGLI PANDA BIFACIAL 320	93
	ANEXO 2: Datasheet de Inversor HUAWEI SUN2000 2-KTL-L1.....	94
	ANEXO 3: Datasheet de Optimizador HUAWEI SUN2000 450W	97
	ANEXO 4: Trazador de Curvas I-V, ENTEC SOLAR E-1000.....	98
	ANEXO 5: Curvas de Irradiancia Frontal de Días Seleccionados con Condiciones de Irradiancia Adecuadas.....	100
	ANEXO 6: Gráficas Comparativas de Generación de Energía y Ganancia Bifacial	107
	ANEXO 7: Comparación de Potencia Máxima por Ensayo para “Días Buenos” y “ Días Malos”	127
	ANEXO 8: Comparación Gráfica de Potencias Teóricas Estimadas y Potencias Reales Medidas.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Potencia Eléctrica Instalada de Solar Fotovoltaica. (REE, 2022)	14
Figura 2. Incidencia de la Radiación Solar (Cambio Energético, 2019).....	17
Figura 3. Predicción de mercado bifacial y monofacial (Grupotec, 2021).....	19
Figura 4. Evolución del Coste de la Tecnología Fotovoltaica (Lusson, 2020)	20
Figura 5. Captación de Radiación en Módulos Bifaciales (Opengy, 2021)	21
Figura 6. Potenciación de Albedo con Suelo Brillante	23
Figura 7. Aumento de Sombreado en Módulo en 30%	24
Figura 8. Estructura 1 y 2 de la Instalación en la terraza del edificio A3	26
Figura 9. Inversor y Cuadro de Protecciones (Moreno Buesa, 2022)	26
Figura 10. Inversor HUAWEI SUN 2000 KTL-L1	27
Figura 11. Cuadro de Protecciones	28
Figura 12. Esquema de Sensores en Estructura 1 (Moreno Buesa, 2022)	29
Figura 13. Esquema de Sensores en Estructura 2 (Moreno Buesa, 2022)	30
Figura 14. Célula Calibrada de Silicio Cristalino	31
Figura 15. Medida de Irradiancia en una Célula mediante un Resistencia Shunt (Moreno Buesa, 2022)	32
Figura 16. Dispositivo Termopar de tipo T	34
Figura 17. Funcionamiento de un Termopar (Moreno Buesa, 2022)	34
Figura 18. Registrador de Datos GRAPHTEC GL820	35
Figura 19. Optimizador de Potencia HUAWEI SUN2000 450W	37
Figura 20. Potencia de Salida de los Optimizadores	38
Figura 21. Potencia de Entrada de los Optimizadores	39
Figura 22. Tensión de Entrada de los Optimizadores.....	39
Figura 23. Tensión de Salida de los Optimizadores	40
Figura 24. Intensidad de Entrada de los Optimizadores	40
Figura 25. Intensidad de Salida de los Optimizadores	41
Figura 26. Esquema de Interconexión entre Optimizadores y Módulos (Moreno Buesa, 2022)	41
Figura 27. Trazador de Curvas ENTEC SOLAR E- 1000	42
Figura 28. Estructura 1 Con 10% de Sombreado y Suelo Sin Potenciar (Parte Delantera).....	44
Figura 29. Estructura 1 Con 10% de Sombreado y Suelo Sin Potenciar (Parte Posterior)	45
Figura 30. Estructura 2 Con Sobreado de 10% y Suelo Potenciado (Parte Delantera)	46
Figura 31. Estructuras 1 (Derecha) y 2 (Izquierda) (Parte Posterior)	46
Figura 32. Bloqueadores de 30% de Sombreado.....	47
Figura 33. Módulos Bf1 (Izquierda) y Bf3 (Derecha) Con Sombreado de 30%	48
Figura 34. Módulos Bf4 (Izquierda) y Bf6 (Derecha) Con Sombreado de 30%	48

Figura 35. Estructura 1 Con Suelo Natural Y Estructura 2 Con Suelo Potenciado (Ambas con 30% de Sombreado).....	49
Figura 36. Estructura 1 Con Suelo Natural y Estructura 2 Con Suelo Potenciado Ambas con 30% de Sombreado (Parte Posterior).....	49
Figura 37. Bloqueador para 60% de Sombreado Colocado en Módulo Bf3	50
Figura 38. Estructura 1 Con 60% de Sombreado y Suelo Natural.....	51
Figura 39. Estructura 2 Con 60% de Sombreado con Suelo Natural.....	51
Figura 40. Estructura 1 Con Sombreado de 60% Con Suelo Natural	52
Figura 41. Estructura 2 Con Sombreado de 60% Con Suelo Potenciado	53
Figura 42. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf3 (Ensayos 10%, 30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Buenos).....	75
Figura 43. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Buenos)	76
Figura 44. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos)	76
Figura 45. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos).....	77
Figura 46. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos).....	77
Figura 47. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos).....	78
Figura 48. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf3 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Malos)	79
Figura 49. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Malos)	80
Figura 50. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)	80
Figura 51. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)	81
Figura 52. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)	81
Figura 53. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)	82
Figura 54. Curva de Irradiancia (09/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural.....	100
Figura 55. Curva de Irradiancia (10/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural.....	101

Figura 56. Curva de Irradiancia (08/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante.....	101
Figura 57. Curva de Irradiancia (17/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante.....	102
Figura 58. Curva de Irradiancia (05/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural.....	102
Figura 59. Curva de Irradiancia (13/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural.....	103
Figura 60. Curva de Irradiancia (14/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante.....	103
Figura 61. Curva de Irradiancia (05/11/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante.....	104
Figura 62. Curva de Irradiancia (12/01/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural.....	104
Figura 63. Curva de Irradiancia (23/01/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural.....	105
Figura 64. Curva de Irradiancia (10/11/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante.....	105
Figura 65. Curva de Irradiancia (13/11/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante.....	106
Figura 66. Energía Diaria (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)	107
Figura 67. Energía Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).....	108
Figura 68. Ganancia Bifacial (09/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural	108
Figura 69. Ganancia Bifacial (10/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural	109
Figura 70. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).	109
Figura 71. Energía Diaria (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	110
Figura 72. Energía Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	110
Figura 73. Ganancia Bifacial (08/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante	111
Figura 74. Ganancia Bifacial (17/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante	111
Figura 75. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	112
Figura 76. Energía Diaria (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)	112
Figura 77. Energía Total (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).....	113
Figura 78. Ganancia Bifacial (05/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural	113
Figura 79. Ganancia Bifacial (13/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural	114
Figura 80. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).	114
Figura 81. Energía Diaria (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	115
Figura 82. Energía Total (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	115

Figura 83. Ganancia Bifacial (14/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante.....	116
Figura 84. Ganancia Bifacial (05/11/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante.....	116
Figura 85. Ganancia Bifacial (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	117
Figura 86. Energía Diaria (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)	117
Figura 87. Energía Total (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural).....	118
Figura 88. Ganancia Bifacial (12/01/23) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural	118
Figura 89. Ganancia Bifacial (23/01/23) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural	119
Figura 90. Ganancia Bifacial (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)	119
Figura 91. Energía Diaria (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)	120
Figura 92. Energía Total (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)	120
Figura 93. Ganancia Bifacial (10/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante.....	121
Figura 94. Ganancia Bifacial (13/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante.....	121
Figura 95. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)	122
Figura 96. Energía Total Módulo Bf3.....	123
Figura 97. Energía Total Módulo Bf6.....	123
Figura 98. Ganancia Bifacial (Bf3 Vs Bf2)	124
Figura 99. Ganancia Bifacial (Bf6 Vs Bf2)	124
Figura 100. Ganancia Bifacial (Bf3 Vs Bf5)	125
Figura 101. Ganancia Bifacial (Bf6 Vs Bf5)	125
Figura 102. Ganancia Total Bf6 Vs Bf3	126
Figura 103. Potencia Máxima de Módulo Bf3 en cada ensayo (Días Buenos)	127
Figura 104. Potencia Máxima de Módulo Bf6 en cada ensayo (Días Buenos).....	127
Figura 105. Potencia Máxima de Módulo Bf3 en cada ensayo (Días Malos)	128
Figura 106. Potencia Máxima de Módulo Bf6 en cada ensayo (Días Malos)	128
Figura 107. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf3 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).....	129
Figura 108. Potencia Real Medida Módulo Bf3 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).....	130
Figura 109. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).....	130
Figura 110. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).....	131
Figura 111. Potencia Máxima Módulo Bf3 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).....	131
Figura 112. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural).....	132

Figura 113. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)	132
Figura 114. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	133
Figura 115. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	133
Figura 116. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	134
Figura 117. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	134
Figura 118. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf3 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).....	135
Figura 119. Potencia Real Medida Módulo Bf3 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).....	135
Figura 120. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).....	136
Figura 121. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).....	136
Figura 122. Potencia Máxima Módulo Bf3 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).....	137
Figura 123. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural).....	137
Figura 124. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)	138
Figura 125. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	139
Figura 126. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	139
Figura 127. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	140
Figura 128. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	140
Figura 129. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf3 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural).....	141
Figura 130. Potencia Real Medida Módulo Bf3 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural).....	141
Figura 131. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural).....	142
Figura 132. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural).....	142
Figura 133. Potencia Máxima Módulo Bf3 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural).....	143

Figura 134. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural).....	143
Figura 135. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)	144
Figura 136. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)	145
Figura 137. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)	145
Figura 138. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)	146
Figura 139. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante).....	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de Albedo (ingelibreblog.wordpress, 2015).....	22
Tabla 2. Parámetros del Fabricante Yingli Panda Bifacial 320	25
Tabla 3. Resumen de Calibración de Sensores de Irradiancia (Moreno Buesa, 2022)	33
Tabla 4. Configuración y Conexiones del Registrador de Datos (Moreno Buesa, 2022)	36
Tabla 5. Días Seleccionado Con Condiciones de Irradiancia Adecuadas	56
Tabla 6. Generación Diaria para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural	59
Tabla 7. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (09/09/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural.....	59
Tabla 8. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (10/09/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural.....	59
Tabla 9. Ganancia Bifacial Total y Diferencia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural.....	60
Tabla 10. Generación Diaria para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante	60
Tabla 11. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (17/07/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante	60
Tabla 12. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (08/07/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante	61
Tabla 13. Ganancia Bifacial Total y Diferencia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante	61
Tabla 14. Generación Diaria para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural	62
Tabla 15. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (05/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural.....	62
Tabla 16. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (13/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural.....	63
Tabla 17. Ganancia Bifacial Total y Diferencia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural.....	63
Tabla 18. Generación Diaria para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante	64
Tabla 19. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (14/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante	64
Tabla 20. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (05/11/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante	65
Tabla 21. Ganancia Bifacial Total y Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante	65
Tabla 22. Generación Diaria para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural	66
Tabla 23. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (12/01/2023) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural.....	66
Tabla 24. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (23/01/2023) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural.....	67

Tabla 25. Ganancia Bifacial Total y Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural.....	67
Tabla 26. Generación Diaria para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante	68
Tabla 27. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (10/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante	68
Tabla 28. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (13/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante	69
Tabla 29. Ganancia Bifacial Total y Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante	69
Tabla 30. Comparación de Energía Total de Ensayos (Vs Bf2)	70
Tabla 31. Comparación de Energía Total de Ensayos (Vs Bf5)	71
Tabla 32. Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 por Tipo de Ensayo	72
Tabla 33. Selección de días para Días Buenos y Días Malos	74
Tabla 34. Tabla Potencia Máxima Comparación de Curvas de Potencia.....	83
Tabla 35. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Sin Suelo Brillante).....	84
Tabla 36. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 10% Sombreado Sin Suelo Brillante)	85
Tabla 37. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)	85
Tabla 38. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante).....	85
Tabla 39. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Sin Suelo Brillante).....	86
Tabla 40. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 30% Sombreado Sin Suelo Brillante)	86
Tabla 41. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)	87
Tabla 42. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante).....	87
Tabla 43. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Sin Suelo Brillante).....	88
Tabla 44. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 60% Sombreado Sin Suelo Brillante)	88
Tabla 45. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)	89
Tabla 46. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante).....	89

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURAS DEL TRABAJO

1.1 Introducción

Debido al agotamiento de los recursos no renovables y a la contaminación de estos, los avances tecnológicos en sistemas de producción eléctrica se han centrado en la obtención de energía mediante la investigación y explotación de métodos que permitan conseguir energía de manera eficiente sin comprometer un coste alto.

Como resultado de lo expuesto la tecnología se ha ido centrando en la investigación y desarrollo de diferentes fuentes de energía tales como la energía solar fotovoltaica, la cual es, tanto desde el punto de vista energético como desde el punto de vista ecológico, una gran solución para abastecer las demandas de producción de energía. Como consecuencia de esto, se ha incrementado la investigación y la innovación en tecnologías con las cuales se pueda obtener el máximo aprovechamiento de la radiación solar incidente.

Como podemos observar en la Figura 1, para el caso particular de España, la potencia instalada en tecnología solar fotovoltaica se ha visto incrementada en un 30% en 2021 en comparación al año 2020 y de manera notoria si nos fijamos en el año 2018, año en el que se modificaron los reales decretos en favor del autoconsumo.

Potencia eléctrica instalada de solar fotovoltaica

Sistema eléctrico nacional 2015-2021 | En MW

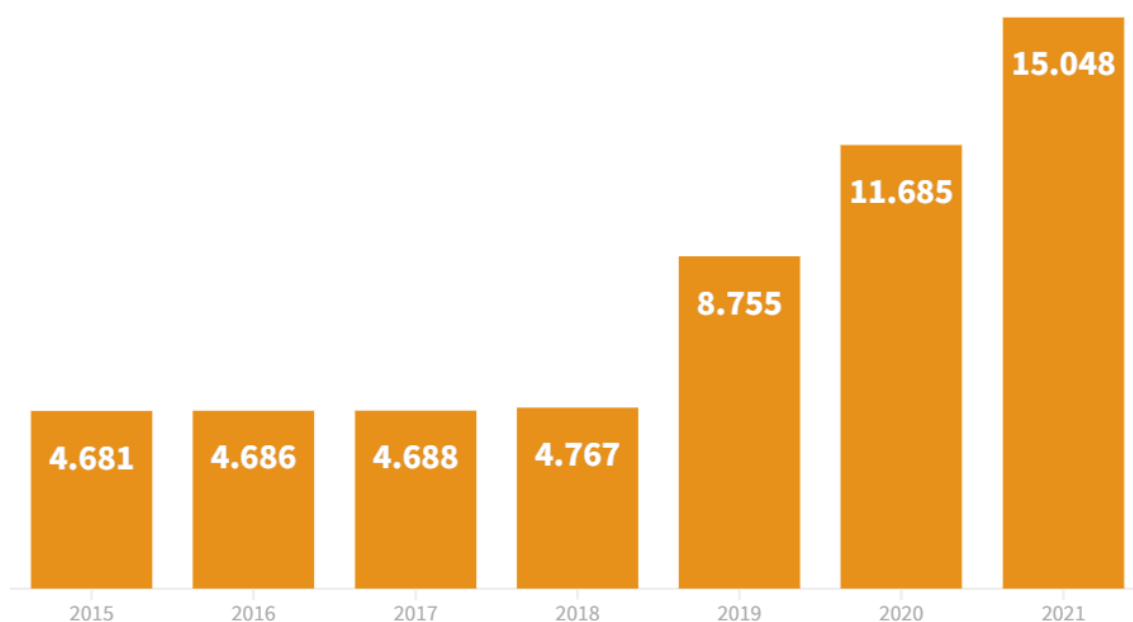


Figura 1. Potencia Eléctrica Instalada de Solar Fotovoltaica. (REE, 2022)

La tecnología fotovoltaica utilizada en este estudio es la de silicio cristalino con la cual, podremos observar el comportamiento de módulos bifaciales con diferentes porcentajes de sombras en su parte posterior y con diferentes tipos de albedos frente al comportamiento de módulos monofaciales.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es determinar la influencia que tienen el albedo y las sombras en el comportamiento de los módulos fotovoltaicos bifaciales a la vez que se realiza una comparativa de dicho comportamiento con el de módulos fotovoltaicos monofaciales convencionales.

Para la consecución de este objetivo principal, llevaremos a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización de la influencia del albedo en el comportamiento de la cara posterior del módulo bifacial.
- Caracterización de la influencia de las sombras en los módulos bifaciales

Para la satisfactoria consecución de estos objetivos, se plantean los siguientes pasos:

- Análisis de la producción para obtener el balance energético de la tecnología bifacial frente monofacial, en los distintos ensayos que detallaremos más adelante, con el fin de evaluar la ganancia bifacial.
- Comparación del comportamiento a lo largo de un día representativo de cada ensayo, observando las diferencias en las curvas de operación de cada módulo.
- Comparación de las curvas I-V de cada módulo en un día representativo de cada ensayo.
- Caracterización de potencia para ambas tecnologías, mediante el cambio de medidas a sus condiciones estándar.

1.3 Estructura del Trabajo

El trabajo objeto de estudio se estructura de la siguiente manera:

- Primero se ha realizado un análisis del estudio del arte en lo referente a la tecnología bifacial y la influencia que tienen tanto las sombras como el albedo en esta tecnología. En este análisis se muestra los fundamentos y la historia en la que se basan los estudios de investigación, la evolución de la tecnología bifacial hasta el día de hoy así como estudios donde se muestra la influencia del albedo y las sombras en los módulos bifaciales.
- A continuación, se realiza una exposición del entorno de ensayo, donde se muestra los componentes de la instalación objeto de experimentación con sus correspondientes características.
- Seguidamente, se describen cada uno de los ensayos que componen el trabajo así como, los pasos que se han llevado a cabo para realizar dichos ensayos, desarrollando la metodología a seguir para conseguir los resultados obtenidos.
- Posteriormente, se muestran los análisis y discusión de los resultados obtenidos en el trabajo.
- Por último, se detallan las conclusiones sobre el trabajo realizado y la bibliografía revisada para la elaboración de este trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Fundamentos de la Tecnología Bifacial

La tecnología solar fotovoltaica se basa en la producción de electricidad mediante la utilización de materiales semiconductores tales como el silicio, que producen dicha electricidad al incidir radiación solar sobre ellos, provocando el llamado efecto fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos, por tanto, están compuestos por células fabricadas con el material semiconductor citado anteriormente que es acondicionado para su exposición a la radiación solar con el fin de conseguir el máximo aprovechamiento de energía.

La tecnología fotovoltaica bifacial se basa en la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar que reciben los módulos fotovoltaicos en ambas caras mediante el acondicionamiento de la cara posterior para la recepción de radiación con el fin de obtener una mayor producción y eficiencia.

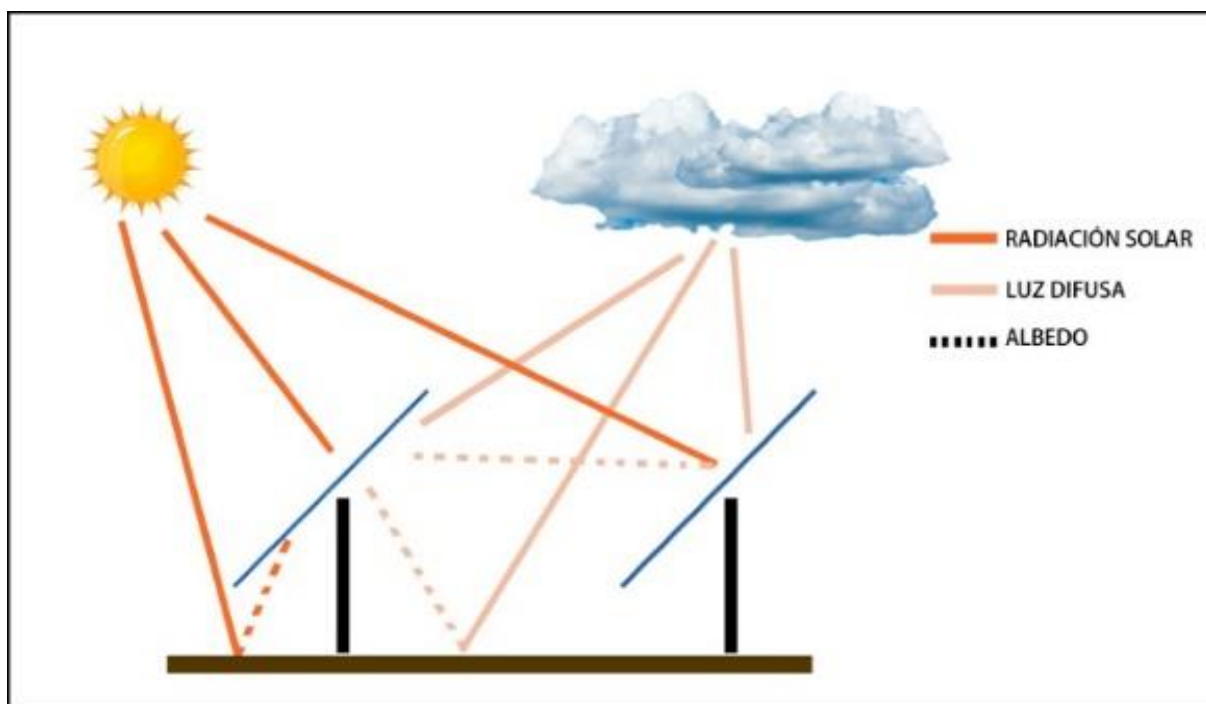


Figura 2. Incidencia de la Radiación Solar (Cambio Energético, 2019)

Gracias a esta tecnología, los módulos son capaces de obtener un incremento en la producción de energía fotovoltaica de hasta un 30% gracias a que ambas caras del módulo logran absorber la radiación solar (Grupo Novelec, 2021)

La tecnología bifacial no se puede considerar una tecnología nueva ya que la primeras células fotovoltaicas bifaciales ya se estaban desarrollando a nivel de laboratorio en los años 60 y, en el año 1981, la empresa española Isofotón se convirtió en la primera empresa en comercializar este tipo de tecnología fotovoltaica (Cambio Energético, 2019).

Existen varias tecnologías fotovoltaicas que pueden ser tratadas como sistemas bifaciales:

- PERC: Células de emisor y contacto posterior pasivados.
- PERL: Células de emisor pasivado y difusión local posterior.
- PERT: Células de emisor pasivado y difusión posterior.

Las células tipo PERC, que son las más utilizadas, son capaces aumentar la eficiencia reduciendo la recombinación superficial de la zona posterior de la célula a través de la inserción de capas dieléctricas entre la cara delantera y posterior. Debido a este proceso, se consigue que el aluminio conductor entre mínimamente en contacto con la célula, obteniendo así una mayor eficiencia.

La tecnología tipo PERL, por el contrario, se centra en la difusión del emisor posterior de forma que disminuye la recombinación posterior así como el uso de óxidos de alta calidad sobre la cara delantera, consiguiendo un buen contacto eléctrico y llegar unas eficiencias de células cercanas al 25%.

Por último, las células con tecnología tipo PERT, disponen de una superficie posterior difusa, mostrando una degradación inferior a las tecnologías anteriores ante la incidencia de la luz.

Existe otro tipo de tecnología llamada a tener mayor protagonismo en el futuro: las células de unión heterogénea (HJT), que presentan una mayor bifacialidad frente a todas las tecnologías avanzadas de células cristalinas, llegando a superar el 90% (TECHNO SUN, s.f.).

2.2 Tecnología Bifacial en la Actualidad

El estudio de la tecnología fotovoltaica bifacial ha ido aumentando y poco a poco se ha ido desarrollando la capacidad para llevar a cabo modelos predictivos y conseguir caracterizar tanto las instalaciones como sus alrededores, viéndose reflejado en el incremento de su comercialización e instalación.

En las siguientes figuras se muestra una predicción sobre la comercialización de los módulos fotovoltaicos bifaciales para los próximos años y la evolución de la diferencia de coste entre módulos monofaciales y bifaciales.

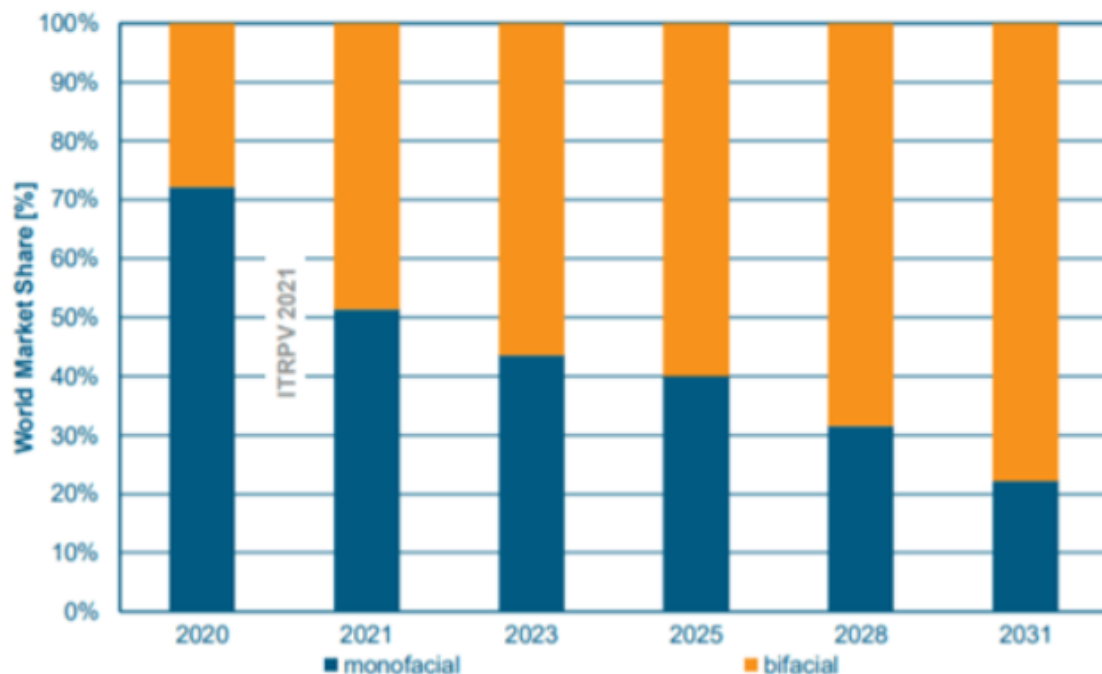


Figura 3. Predicción de mercado bifacial y monofacial (Grupotec, 2021)



Figura 4. Evolución del Coste de la Tecnología Fotovoltaica (Lusson, 2020)

Como podemos observar, el coste de la tecnología fotovoltaica bifacial se ha ido reduciendo respecto a la tecnología monofacial, hasta el punto en el que, una inversión en tecnología bifacial puede ser fácilmente amortizable debido a las mayores ganancias en producción esperadas.

Gracias a la reducción del coste de la tecnología bifacial y al aumento de la demanda de esta, se ha incrementado la investigación en este tipo de tecnología no solo para conseguir mejores rendimientos y soluciones, sino también para terminar de comprender su funcionamiento y realizar una correcta caracterización de la misma.

Como consecuencia de esto, el instituto de investigación de energía solar de Singapur, ha demostrado que los paneles solares bifaciales producen un 35% más de energía cuando se combinan con seguidores a un solo eje, y un 40% cuando se combinan con aquellos a doble eje, además de reducir el costo medio de la electricidad en un 16% (Interempresas, 2021); así como, investigadores de la universidad Western en Canadá han descubierto que gracias a la tecnología fotovoltaica bifacial, las pérdidas energéticas producidas por la nieve pueden reducirse de dos dígitos a solo un 2% anual (Fischer, 2022).

2.3 La importancia del Albedo y las Sombras

La radiación de albedo es el porcentaje de radiación solar que el módulo absorbe al reflejarse en las superficies que se encuentran alrededor del módulo, así como la que llega de forma difusa.

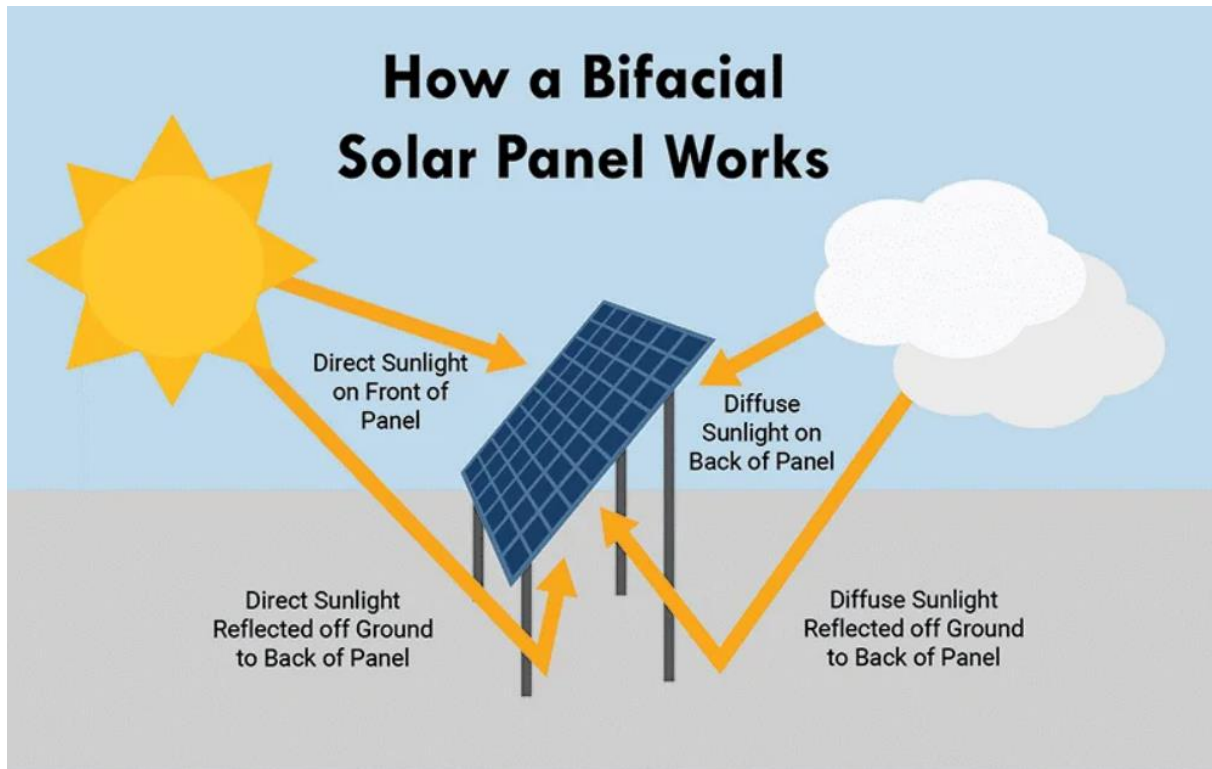


Figura 5. Captación de Radiación en Módulos Bifaciales (Opengy, 2021)

El albedo medio que se refleja en la tierra se encuentra en torno al 35% de la radiación solar dependiendo del tipo de superficie. Es por esto que, las superficies de colores claros, brillantes y de textura suave como por ejemplo, el suelo artificial brillante que se ha empleado en este estudio (Ver Figura 30), tienen albedos mucho más altos que las superficies de colores oscuros, mates y rugosas. Se entiende por tanto que, la elección de una superficie u otra, determinará la producción de la cara posterior del módulo, haciendo que obtenga mayor o menos rendimiento.

En la siguiente tabla, se muestran unos valores típicos de factores de albedo para diferentes materiales que se suelen encontrar en entornos en los que se llevan a cabo instalaciones fotovoltaicas.

Valores típicos del coeficiente de albedo	
Entorno urbano “Urban situation”	0,14 – 0,22
Hierba “Grass”	0,15 – 0,25
Hierba fresca “Fresh Grass”	0,26
Nieve pura “Fresh snow”	0,82
Nieve húmeda “Wet snow”	0,55 – 0,75
Asfalto seco “Dry asphalt”	0,09 – 0,15
Asfalto húmedo “Wet asphalt”	0,18
Hormigón “concrete”	0,25 – 0,35
Tejados rojos “red tiles”	0,33
Aluminio “aluminium”	0,85
Cobre “copper”	0,74
Acero galvanizado reciente “New galvanised steel”	0,35
Acero galvanizado oxidado o sucio “Very dirty galvanised”	0,08

Tabla 1. Coeficientes de Albedo (ingelibreblog.wordpress, 2015)

Una manera de aumentar la ganancia de los módulos fotovoltaicos bifaciales es la modificación del albedo con la utilización de materiales que consiguen reflejar la luz de manera muy eficiente.

Un ejemplo de esto, es una parte del estudio en el que se basa este trabajo en el que introducimos un material textil de carácter reflectante en el suelo de una de las estructuras de la instalación de nuestro trabajo con el fin de observar la diferencia en el comportamiento de los módulos bifaciales potenciados en su parte trasera con dicho material reflectante frente a los módulos que no se encuentran en esa situación.



Figura 6. Potenciación de Albedo con Suelo Brillante

Un aspecto importante a tener en cuenta en la operación de los módulos bifaciales es el sombreado existente en la cara posterior de estos. Estas sombras, que son generadas por la propia estructura de la instalación, el cableado y las conexiones, producen un impacto negativo en la captación de luz de los módulos bifaciales produciendo pérdidas que pueden llegar a un 20% de dicha captación. Es por este motivo que los diseñadores de sistemas fotovoltaicos se encuentran desarrollando soportes que permitan disminuir la presencia de elementos que puedan producir un sombreado indeseado (Cambio Energético, 2019).

Un factor que influye en la generación de sombras en los módulos bifaciales es la altura de en la que se encuentren ya que, a mayor altura del módulo, más difusa y clara es la sombra que se genera tras este, haciendo que la radiación que se consigue de la superficie que se encuentra debajo del módulo sea mayor. De igual manera, a medida que un módulo eleva su altura frente al suelo, recibe albedo de mayor superficie (Cambio Energético, 2019).

Volviendo al trabajo en el que nos encontramos, a la vez que modificamos el albedo con el material textil reflectante citado anteriormente, aumentaremos el porcentaje de sombreado generado en la parte trasera de los módulos bifaciales con el fin de observar la influencia de este sombreado en la captación de la radiación solar por la parte posterior, y por tanto, discernir sobre a partir de qué nivel de sombreado de la cara posterior, el hecho de aumentar el albedo puede contrarestar ese efecto negativo.



Figura 7. Aumento de Sombreado en Módulo en 30%

3 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE ENSAYO

3.1 Presentación de la instalación objeto de estudio

La instalación objeto de nuestro estudio, se encuentra situada en la terraza del edificio A3 del Campus de Las Lagunillas de la Universidad de Jaén. Esta instalación fue dimensionada y puesta en funcionamiento el día 25 de Mayo de 2022 tal como se explica en el TFG realizado por Sergio Moreno Buesa, “Estudio Comparativo de la Operación de Módulos Fotovoltaicos: Tecnología Convencional y Sistemas Bifaciales” (Moreno Buesa, 2022).

Dicha instalación consta de seis módulos Yingli Panda Bifacial conectados en serie, los cuales tienen una potencia individual de 320 W, haciendo una potencia total del sistema de 1,92 kW. En la siguiente tabla se muestran las características del fabricante en condiciones bifaciales y los parámetros fundamentales para la cara frontal en condiciones STC¹.

YINGLI PANDA BIFACIAL 320		
Parámetros	Valores BSTC ²	Valores STC
P (W)	320	290
V _m (V)	32,3	32,3
I _m (A)	9,97	8,98
V _{oc} (V)	39,2	39,2
I _{sc} (A)	10,36	9,34
TONC	39	
γ P _{max} (%/°C)	-0,38%	
B V _{oc} (%/°C)	-0,3%	
A I _{sc} (%/°C)	-0,04%	
Φ P _{max} (%)	82%	
Φ V _{oc} (%)	99,3%	
Φ I _{sc} (%)	81,5%	

Tabla 2. Parámetros del Fabricante Yingli Panda Bifacial 320

¹ **STC (Standard Test Conditions)**: Condiciones bajo las cuales se deben realizar los ensayos de módulos fotovoltaicos para establecer sus parámetros básicos. (Irradiancia: 1000 W/m², Temperatura: 25 °C, Masa de aire (AM): 1,5).

² **BSTC (Bifacial Standard Test Conditions)**: Protocolo de ensayo para módulos fotovoltaicos bifaciales para establecer sus parámetros básicos. (Irradiancia: 1000 W/m² + (ϕ * 135 W/m²), Temperatura: 25 °C, Ángulo: 37°, Distancia al Suelo: 1m, Radiación Solar: AM 1,5G (Espectro Solar), Albedo: 0,2 (Suelo Arenoso Claro)).

Los módulos de la instalación están divididos en dos estructuras siendo la estructura 1 la que se encuentra a la izquierda y la estructura 2 la de la derecha, dispuestas de tal manera que la estructura 1 se encuentra más adelantada que la estructura 2.

La inclinación de los módulos es de 30 grados respecto a la horizontal y un acimut de 10 grados hacia el Este. Dichos módulos se encuentran conectados a un inversor HUAWEI SUN2000 2-KTL1 de 2 kW de potencia nominal.



Figura 8. Estructura 1 y 2 de la Instalación en la terraza del edificio A3

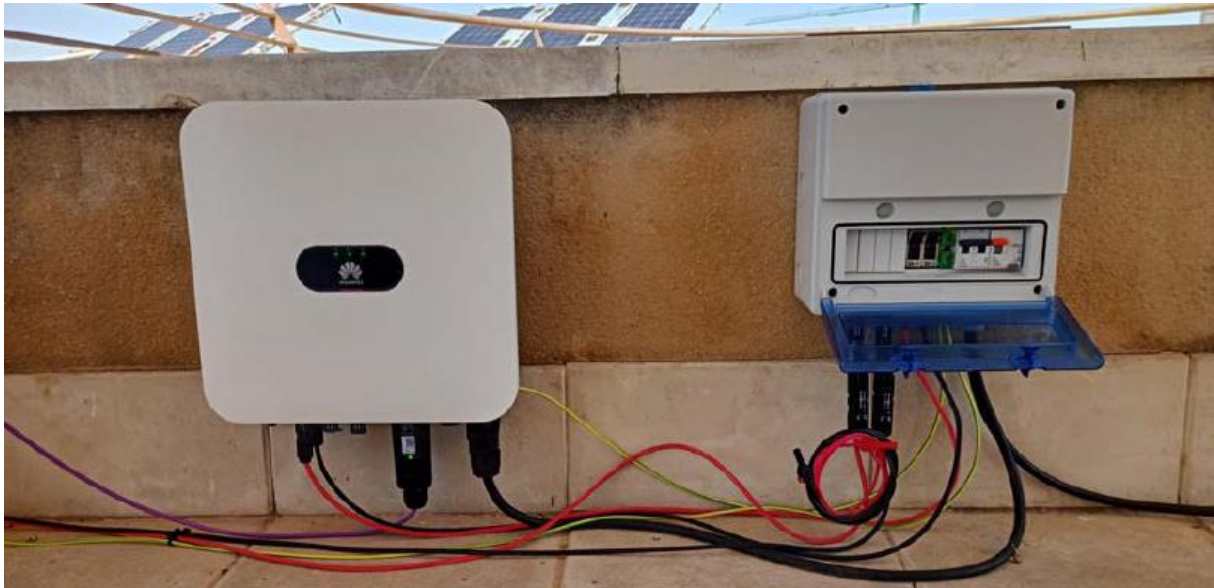


Figura 9. Inversor y Cuadro de Protecciones (Moreno Buesa, 2022)

La instalación también cuenta con 6 optimizadores de potencia HUAWEI SUN2000 450 W para poder obtener la máxima potencia de cada módulo de manera individual y permitir la monitorización independiente de los parámetros eléctricos de cada módulo.

Para conseguir comparar el comportamiento de módulos bifaciales con el comportamiento de módulos monofaciales, los módulos centrales de cada estructura actuarán como monofaciales mediante la recubrimiento de la parte posterior de estos con un vinilo opaco.

3.2 Elementos y montaje de la instalación

3.2.1 Inversor

El dispositivo escogido para la conversión de la corriente continua producida por los módulos fotovoltaicos a corriente alterna que será suministrada a la red es el modelo HUAWEI SUN2000 2KTL-L1 el cual presenta una potencia de 2 kW.



Figura 10. Inversor HUAWEI SUN 2000 KTL-L1

Este inversor tiene la capacidad de obtener datos diarios (con una temporalización de 5 minutos) de funcionamiento mediante el portal Fusion Solar de la empresa Huawei a través del dispositivo Smart Dongle WLAN-FE que permite la conexión a internet.

3.2.2 Protecciones

Para la protección de la parte de corriente continua, se han dispuesto dos fusibles de 1000V/16 A, con sus correspondientes portafusibles para la línea positiva y negativa con el propósito de proteger la instalación contra sobreintensidades que pudieran originarse por algún fallo, abriendo el circuito de forma que el inversor quede separado y protegido.

Para la protección de la parte alterna, se ha seleccionado el dispositivo interruptor automático magnetotérmico bipolar con intensidad límite de 16 A, junto con un interruptor automático diferencial bipolar de 40 A con sensibilidad de 30 mA de diferencia de corriente entre fase y neutro para que se produzca el corte del interruptor.

Además, se ha introducido un bornero de tierra para la puesta a tierra de todos los elementos de la instalación: carcasa del inversor, alimentación de corriente alterna y estructuras de los módulos.

Todos los componentes se han dispuesto en una caja para exteriores con protección IP65 colocada junto al inversor, dividiendo las protecciones de corriente continua de las protecciones de corriente alterna a través del bornero de tierra, como se puede observar en la imagen.

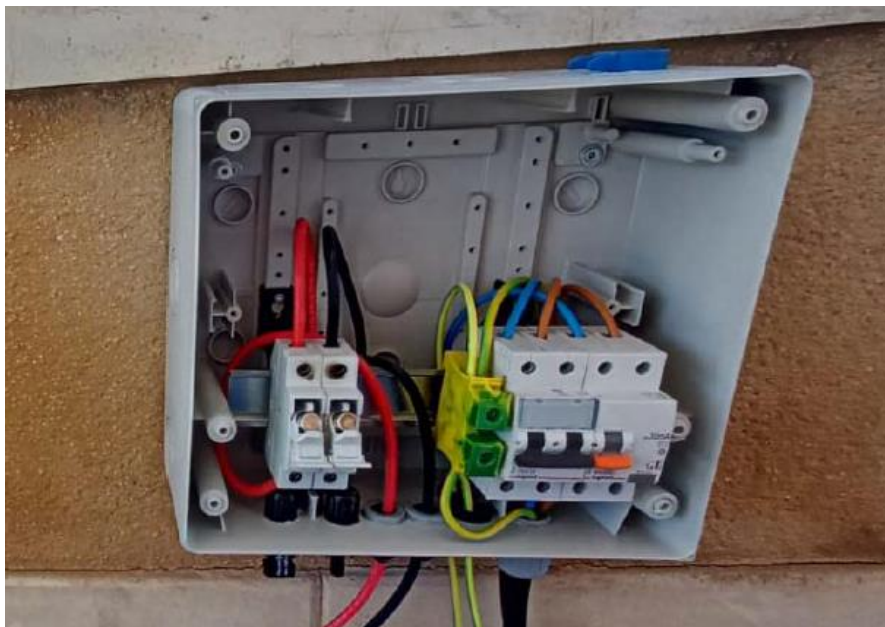


Figura 11. Cuadro de Protecciones

3.3 Sistema de Monitorización

En las siguientes figuras se muestra un esquema del posicionamiento de los sensores de la instalación a modo de referencia para la posterior explicación de cada elemento.

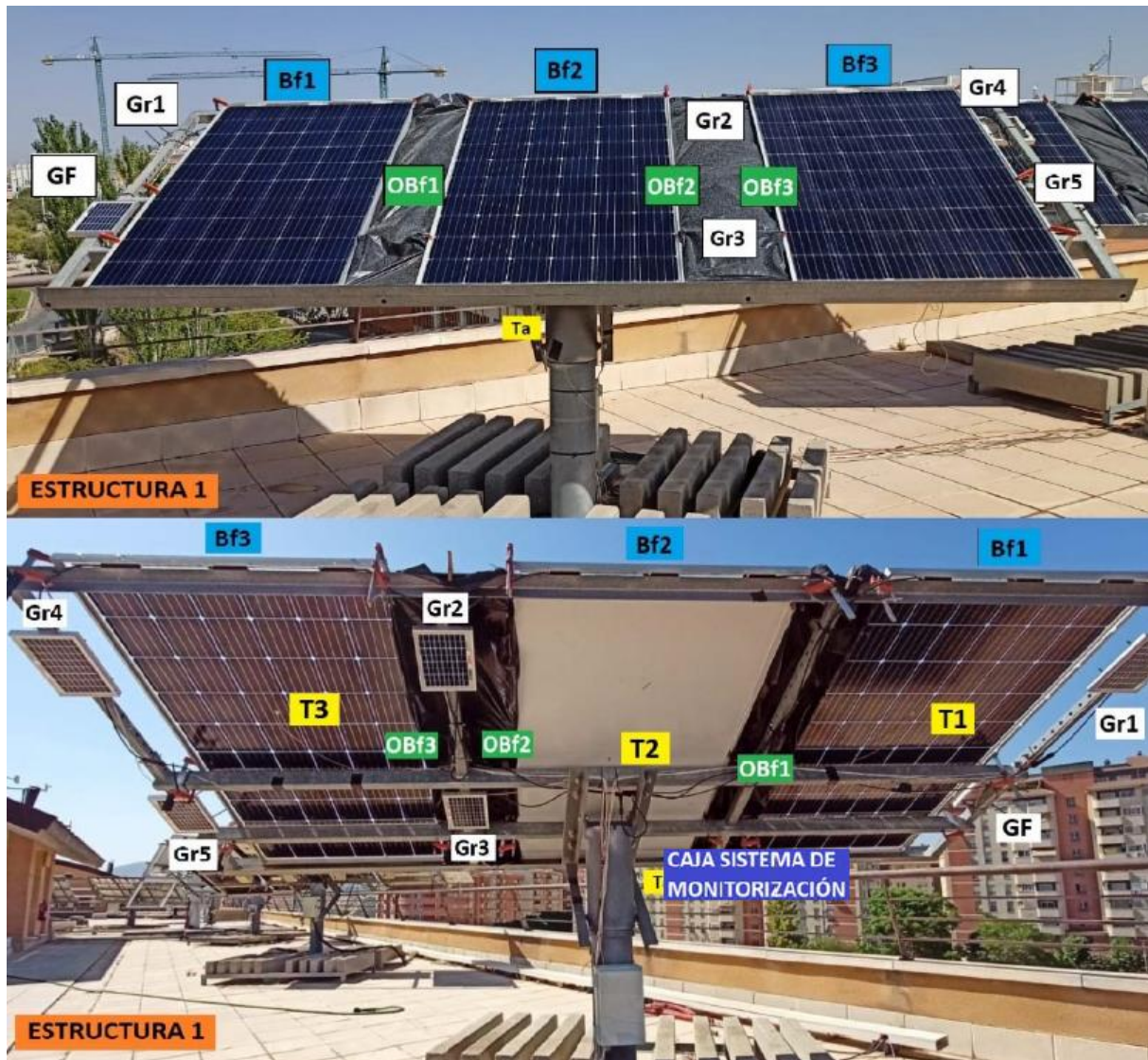


Figura 12. Esquema de Sensores en Estructura 1 (Moreno Buesa, 2022)

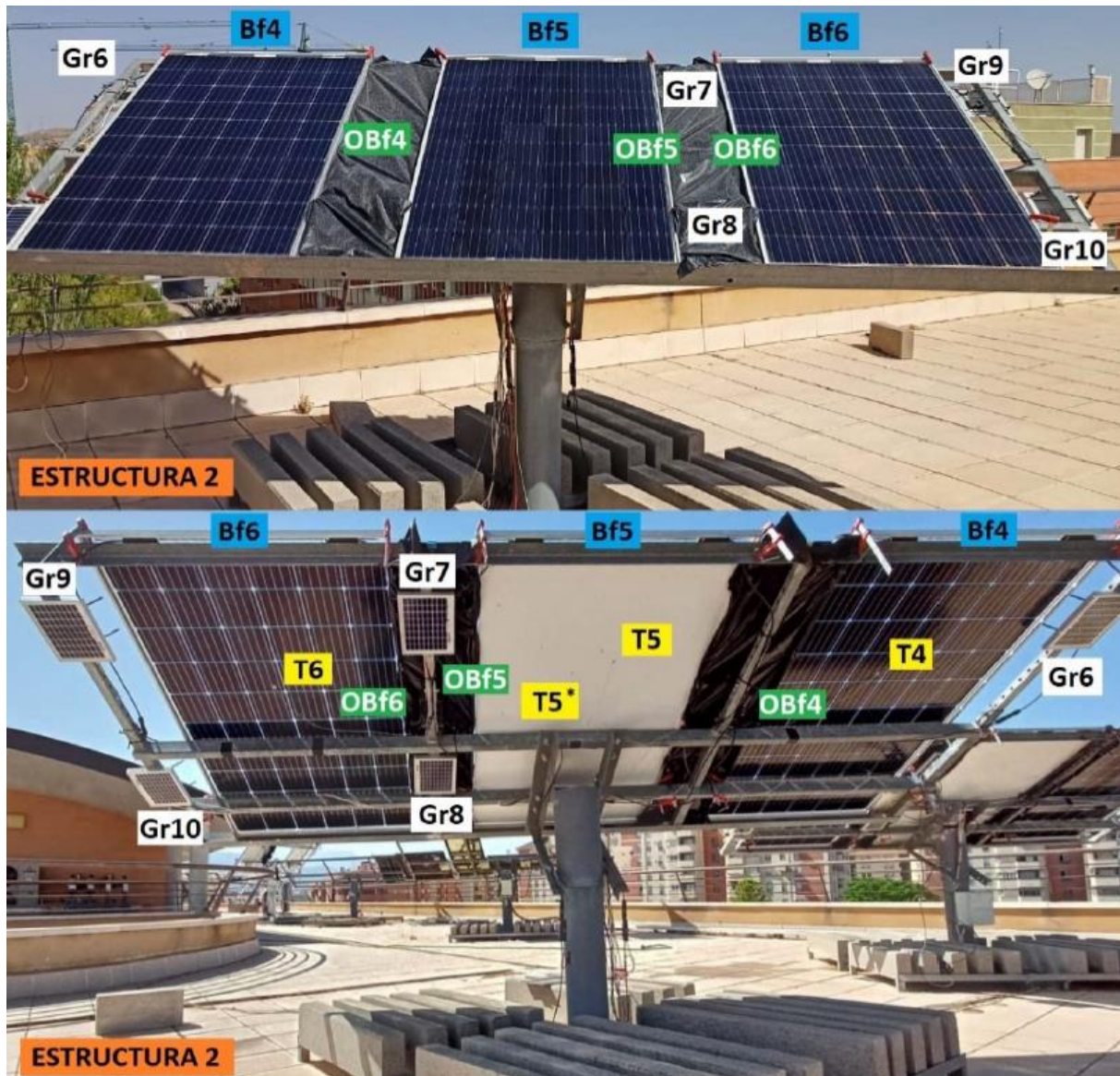


Figura 13. Esquema de Sensores en Estructura 2 (Moreno Buesa, 2022)

Gracias a este mapa de sensores realizado por Sergio Moreno Buesa en el TFG, “Estudio Comparativo de la Operación de Módulos Fotovoltaicos: Tecnología Convencional y Sistemas Bifaciales” (Moreno Buesa, 2022), podemos referenciar cada elemento de la instalación para poder nombrarlos de manera inequívoca. Por tanto, las designaciones empleadas han sido las siguientes:

- **Bf**: Referencia a los módulos fotovoltaicos seguidos de su número de orden
- **Gf**: Sensor encargado de monitorizar la irradiancia del plano frontal.
- **Gr**: Designación para sensores de irradiancia posterior acompañados de su número de orden.

- **T**: Sensores de temperatura de módulo, seguidos de su número de orden coincidente con el número de módulo al que monitorizan.
- **Ta**: Sensor de medida de la temperatura ambiente.
- **OBf**: Referencia a los optimizadores de potencia, acompañados de igual forma del número de orden coincidentes con el número de módulo que optimizan.

3.3.1 Sensores de Irradiancia: Células Calibradas

La medida de irradiancia ha sido realizada mediante el empleo de células calibradas de silicio cristalino.



Figura 14. Célula Calibrada de Silicio Cristalino

Esta manera de obtener irradiancia se fundamenta en la proporcionalidad existente entre la corriente de cortocircuito de una célula y la irradiancia incidente en ella.

Debido a la complejidad de monitorización de la medida directa de la corriente, el método utilizado trata sobre la conexión de una resistencia shunt entre el terminal positivo y negativo de la célula, quedando así cortocircuitada y permitiendo medir la caída de tensión sobre la resistencia.

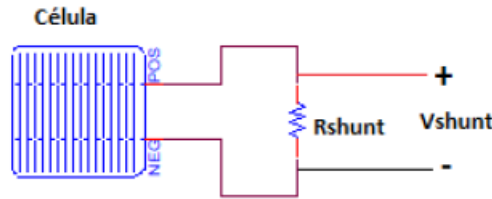


Figura 15. Medida de Irradiancia en una Célula mediante un Resistencia Shunt (Moreno Buesa, 2022)

Sabiendo la proporcionalidad del fondo de escala entre tensión y corriente de la resistencia shunt y una vez obtenida la medida de tensión, podemos determinar la intensidad que circula por la resistencia.

Conocida la intensidad de cortocircuito de la célula para la irradiancia en condiciones estándar de medida, la intensidad que obtenemos de la resistencia shunt se corresponde a una irradiancia proporcional.

Para calcular la irradiancia para las condiciones expuestas, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$G = \frac{V_{sh,medida}}{\frac{I_{SC,CEM} * R_{sh}}{G_{CEM}}} \quad (2)$$

Donde:

- **G:** Valor de Irradiancia que se pretende calcular.
- **V_{sh,medida}:** Valor de tensión medido en la resistencia shunt.
- **G_{CEM}:** Valor de irradiancia para condiciones estándar de medida.
- **I_{SC,CEM}:** Valor de intensidad de cortocircuito de la célula para condiciones estándar de medida.
- **R_{sh}:** Valor de la resistencia shunt.

Podemos obtener el valor de una constante de calibración de célula utilizando la ecuación anterior, si tenemos en cuenta el conocimiento del valor de todos los parámetros, excepto la irradiancia que se quiere medir y la tensión de la resistencia shunt.

$$Cte = \frac{I_{SC,CEM} * R_{sh}}{G_{CEM}} \quad (3)$$

Finalmente, para conseguir la irradiancia dividimos el valor medido de tensión en la resistencia shunt entre la constante de calibración de cada célula.

En la siguiente tabla realizada por Sergio Moreno Buesa en el TFG, “Estudio Comparativo de la Operación de Módulos Fotovoltaicos: Tecnología Convencional y Sistemas Bifaciales” (Moreno Buesa, 2022), se muestran las constantes de calibración de los dispositivos.

Nombre	Dispositivo	CH	Referencia	CTE Calibración ($\mu\text{V/W/m}^2$)	Fecha Calibración
GF	M1	11	928180946279	58,9	16/05/2022
Gr1	E1	1	928121070914	61,1	16/05/2022
Gr2	2	2	928180946593	60,2	16/05/2022
Gr3	3	3	928180946359	60,3	16/05/2022
Gr4	4	4	928180946625	61,1	16/05/2022
Gr5	5	5	928180946690	59,7	16/05/2022
Gr6	6	6	928121070021	61,4	16/05/2022
Gr7	7	7	928121070091	61,5	16/05/2022
Gr8	8	8	928121070894	61,4	16/05/2022
Gr9	9	9	928121070017	60	16/05/2022
Gr10	10	10	928180930639	57,9	16/05/2022

Tabla 3. Resumen de Calibración de Sensores de Irradiancia (Moreno Buesa, 2022)

La disposición de los sensores en la instalación de este estudio, como podemos ver en las figuras 12 y 13, se divide en un sensor de irradiancia frontal y varios sensores dispuestos para medir la radiación de albedo en puntos diferentes, ya que, la homogeneidad de la parte delantera es mucho mayor a la que encontramos en la parte trasera (Moreno Buesa, 2022).

3.3.2 Sensores Temperatura: Termopares tipo T

La medida de temperatura ha sido realizada mediante la utilización de dispositivos termopares de tipo T, como podemos ver en la imagen siguiente.



Figura 16. Dispositivo Termopar de tipo T

El funcionamiento del dispositivo termopar se fundamenta en la diferencia de potencial que se produce entre los extremos de dos alambres de distinto material que se encuentran unidos por un extremo (de cobre para hilo positivo y de una aleación de 45% de níquel y 55% de cobre para hilo negativo para tipo T), originada por la variación de temperatura entre la unión de los metales y los extremos de estos. Esta diferencia de potencial es proporcional a la diferencia de temperatura entre la unión de los metales y sus extremos.

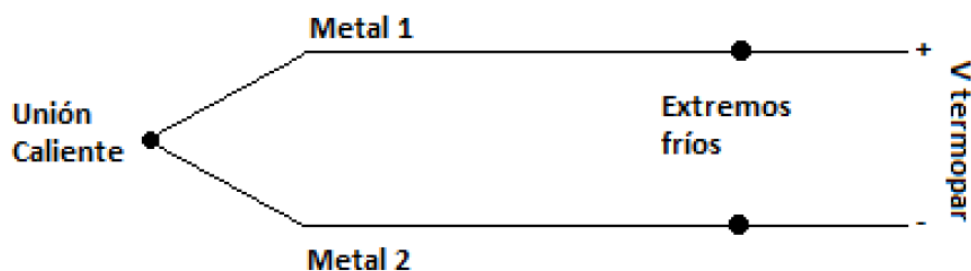


Figura 17. Funcionamiento de un Termopar (Moreno Buesa, 2022)

La razón de la elección del termopar de tipo T se debe a que, gracias a su composición, carece de sensibilidad a los campos magnéticos y ofrece un menor error de medida que los tipos J o K.

El sistema cuenta con un termopar para cada módulo con la excepción del módulo bf5 que posee dos termopares al encontrarse este vinilado en su parte trasera, y un termopar situado en la estructura 1 para la medida de la temperatura ambiente.

3.3.3 Registrador de Datos: Grahtec GL820

El dispositivo más importante del sistema de monitorización es el registrador de datos Graphtec GL820 que ha sido programado para el registro de medidas con un intervalo de registro de un minuto de los canales donde se conectan los sensores de irradiancia y temperatura.



Figura 18. Registrador de Datos GRAPHTEC GL820

El registrador de datos permite la visualización de los valores de los canales y el acceso a toda la configuración del mismo mediante una interfaz física propia. Para la realización del estudio, la programación del dispositivo se ha basado en el inicio de grabación de datos por la mañana cuando la célula de irradiancia frontal sobrepase los 0,5 mV, que corresponde con una irradiancia de 19 W/m² y la finalización a las 23:00 horas.

Se dispone de 20 canales con capacidad para establecer el tipo de medida que se va a llevar a cabo, permitiendo la selección de medidas de tensión y medidas de temperatura, así como la configuración del fondo de escala a fin de obtener un mejor ajuste en la medida.

Referente a la medida de temperatura, el registrador de datos posee configuraciones internas de modo que permite seleccionar el tipo de sensor, estableciendo automáticamente el fondo de escala y acondicionando la señal.

La siguiente tabla muestra las configuraciones y conexiones de los canales que han sido utilizados para el registro de datos de condiciones ambientales de la instalación.

Canal	Nombre	Tipo de Entrada	Fondo de Escala
1	Gr1	Voltaje	200 mV
2	Gr2	Voltaje	200 mV
3	Gr3	Voltaje	200 mV
4	Gr4	Voltaje	200 mV
5	Gr5	Voltaje	200 mV
6	Gr6	Voltaje	200 mV
7	Gr7	Voltaje	200 mV
8	Gr8	Voltaje	200 mV
9	Gr9	Voltaje	200 mV
10	Gr10	Voltaje	200 mV
11	GF	Voltaje	200 mV
12	T1	Temperatura	Predefinido tipo T
13	T2	Temperatura	Predefinido tipo T
14	T3	Temperatura	Predefinido tipo T
15	T4	Temperatura	Predefinido tipo T
16	T5	Temperatura	Predefinido tipo T
17	T6	Temperatura	Predefinido tipo T
18	Ta	Temperatura	Predefinido tipo T
19	T5*	Temperatura	Predefinido tipo T

Tabla 4. Configuración y Conexiones del Registrador de Datos (Moreno Buesa, 2022)

El registrador de datos se encuentra situado en el interior de una caja estanca para exteriores con protección IP65 ubicada en el pie de la estructura 1.

3.3.4 Optimizadores de Potencia: HUAWEI SUN2000 450W

Como es conocido, la intensidad que circula por un circuito de conexiones en serie es la misma para todos los dispositivos de este. Aplicando este hecho a la instalación objeto de estudio en la que se encuentran 6 módulos fotovoltaicos bifaciales conectados en serie, dos de ellos acondicionados para actuar como módulos monofaciales mediante el tapado de su cara posterior, la corriente que circula se verá limitada a la del módulo que menos intensidad esté generando que en este caso serían los monofaciales.

Con el fin de evitar este hecho, se han utilizado los dispositivos optimizadores de potencia HUAWEI SUN2000 450W cuya finalidad es la de conseguir que cada módulo alcance su máxima potencia, salvando de esta manera las pérdidas mismatch de generación en módulos que estén a pleno rendimiento generadas por la inferioridad de generación de otros módulos que se encuentran en la misma cadena.



Figura 19. Optimizador de Potencia HUAWEI SUN2000 450W

Para llevar a cabo esta misión, los dispositivos optimizadores se comunican con el inversor para que éste conozca las corrientes y tensiones a la entrada de cada uno de ellos. Cuando esto ocurre, el inversor selecciona el optimizador que mayor potencia ofrece y modifica el ciclo de trabajo de los convertidores DC/DC de cada uno de ellos para disminuir su tensión y de esta manera elevar la corriente al mismo valor que ofrece el optimizador que mayor potencia entrega.

De esta manera, se conserva la corriente máxima a lo largo de la cadena de módulos y al variar la tensión de cada módulo se mantendrá la potencia de entrada al optimizador correspondiente de cada módulo, siendo la potencia de salida de menor valor debido al rendimiento del convertidor DC/DC.

En las siguientes figuras se representan los datos de los optimizadores de los módulos con el fin de visualizar el funcionamiento mencionado anteriormente.

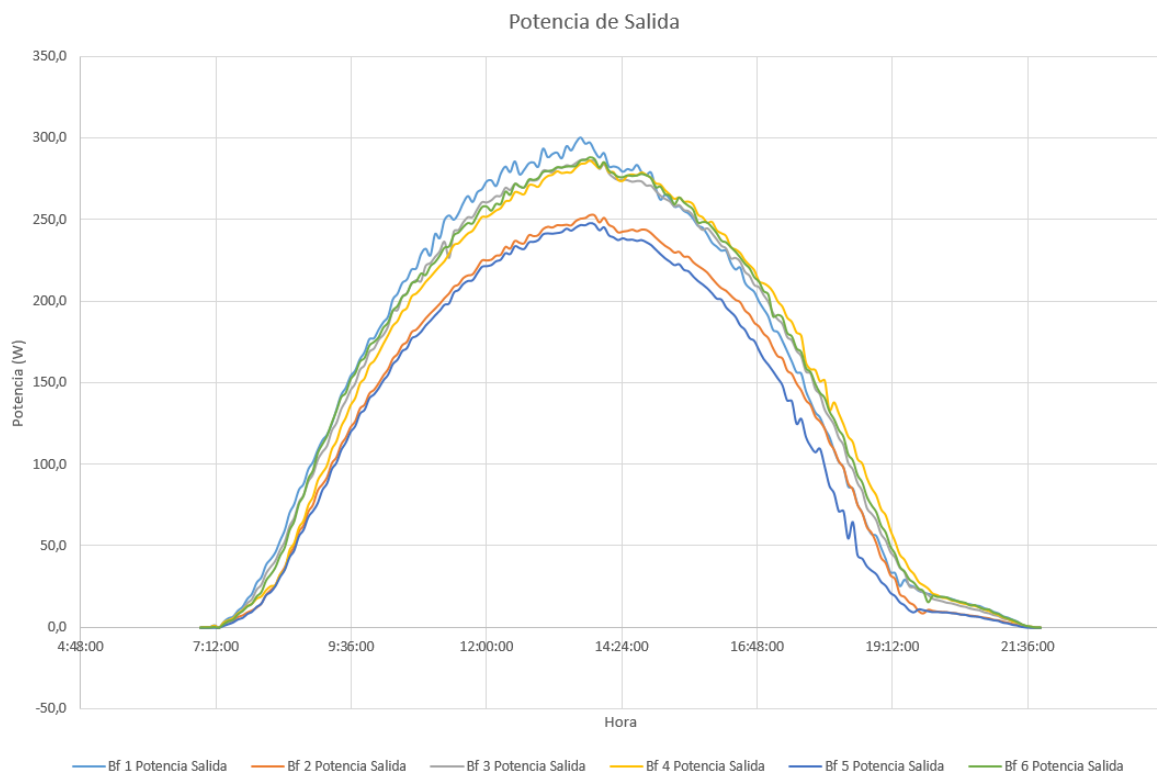


Figura 20. Potencia de Salida de los Optimizadores

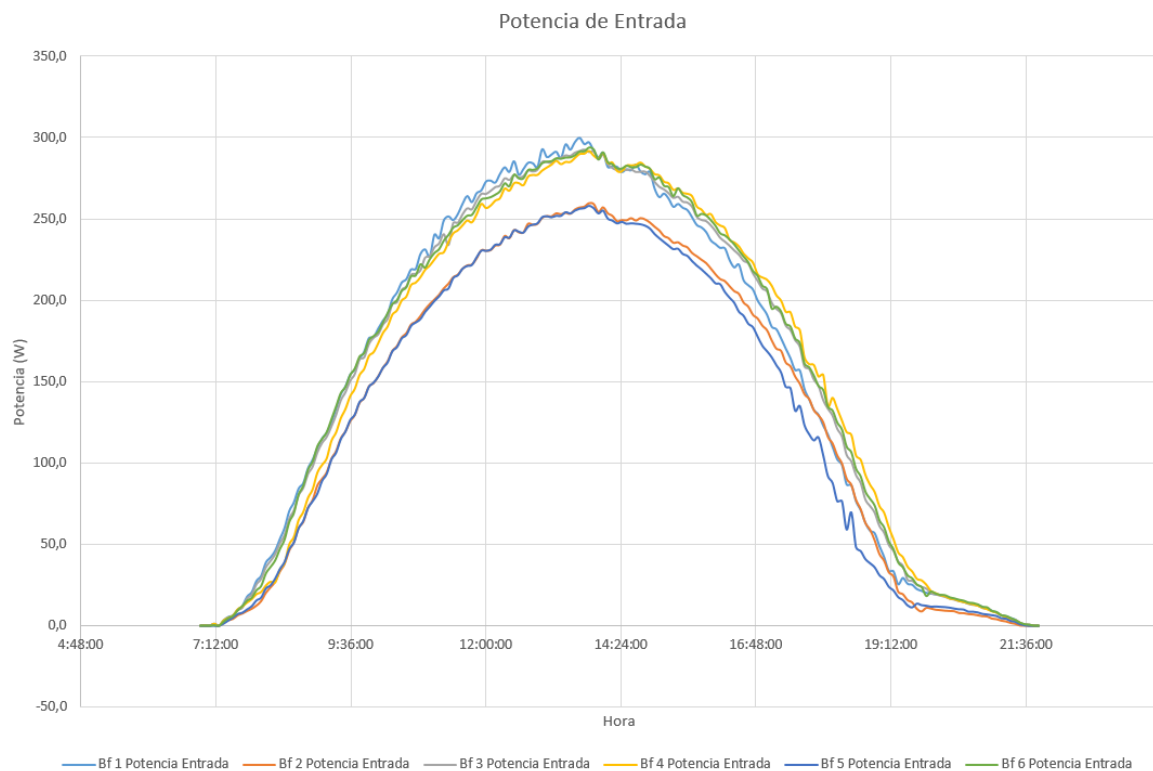


Figura 21. Potencia de Entrada de los Optimizadores

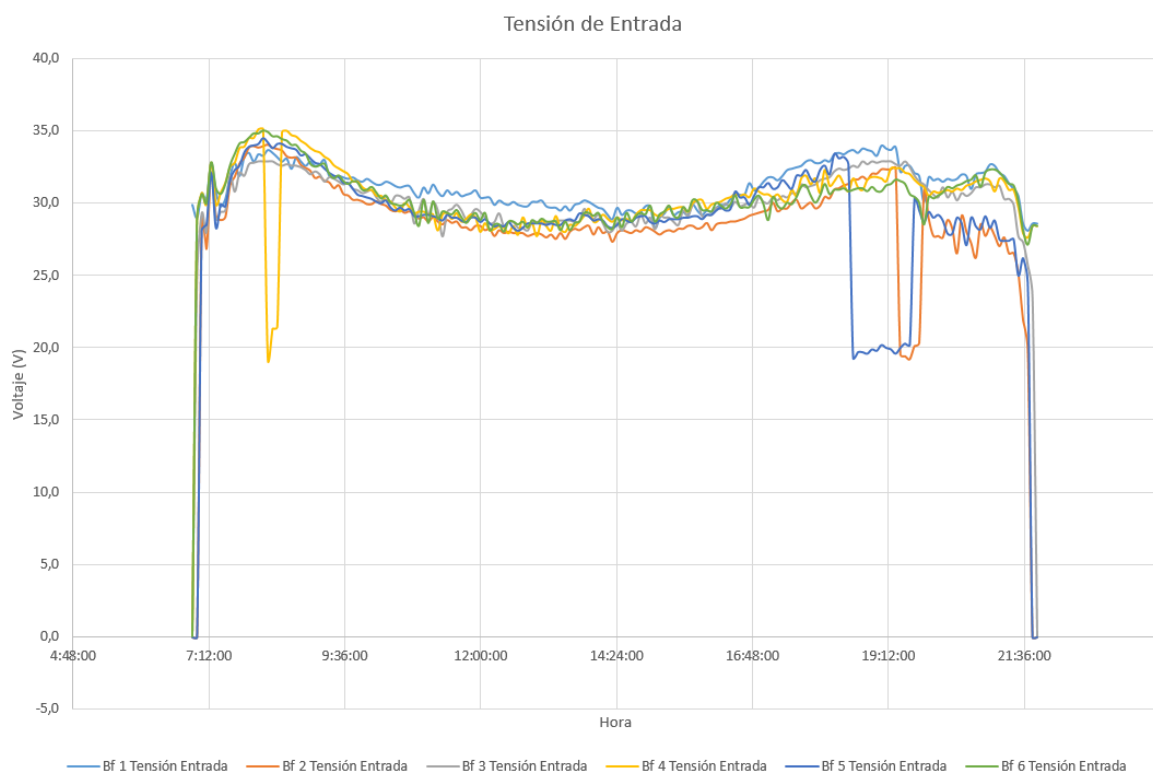


Figura 22. Tensión de Entrada de los Optimizadores

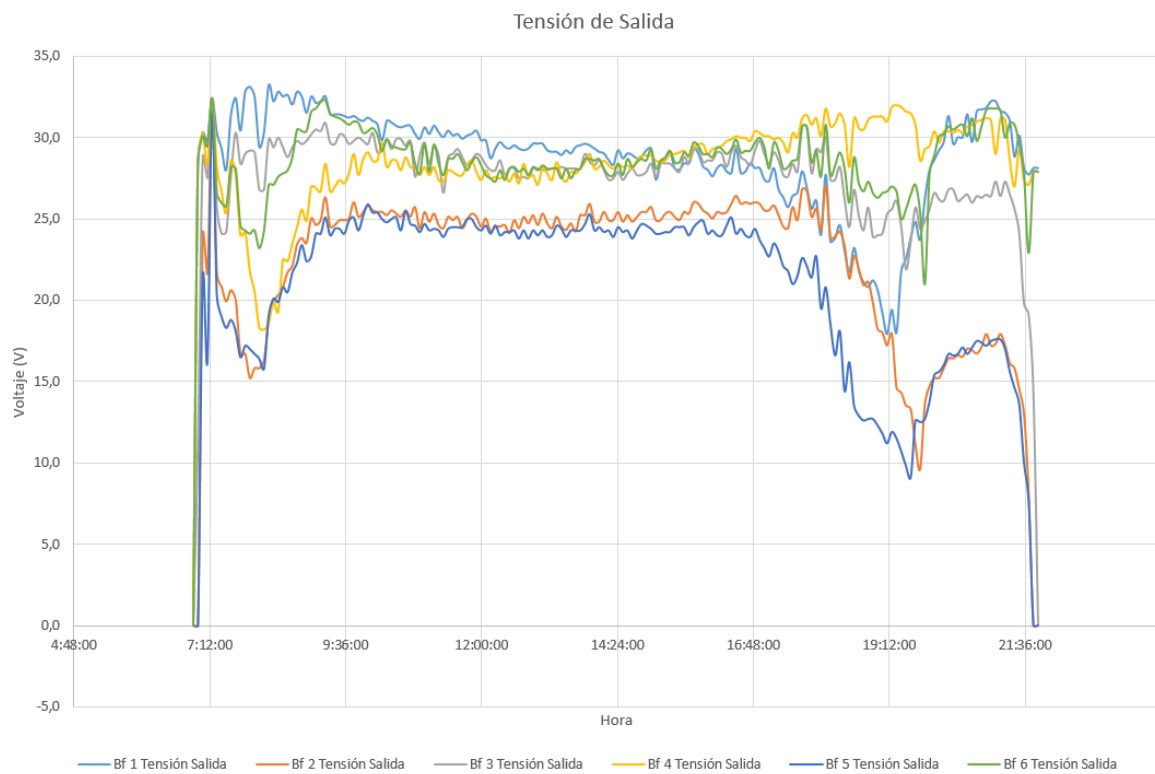


Figura 23. Tensión de Salida de los Optimizadores

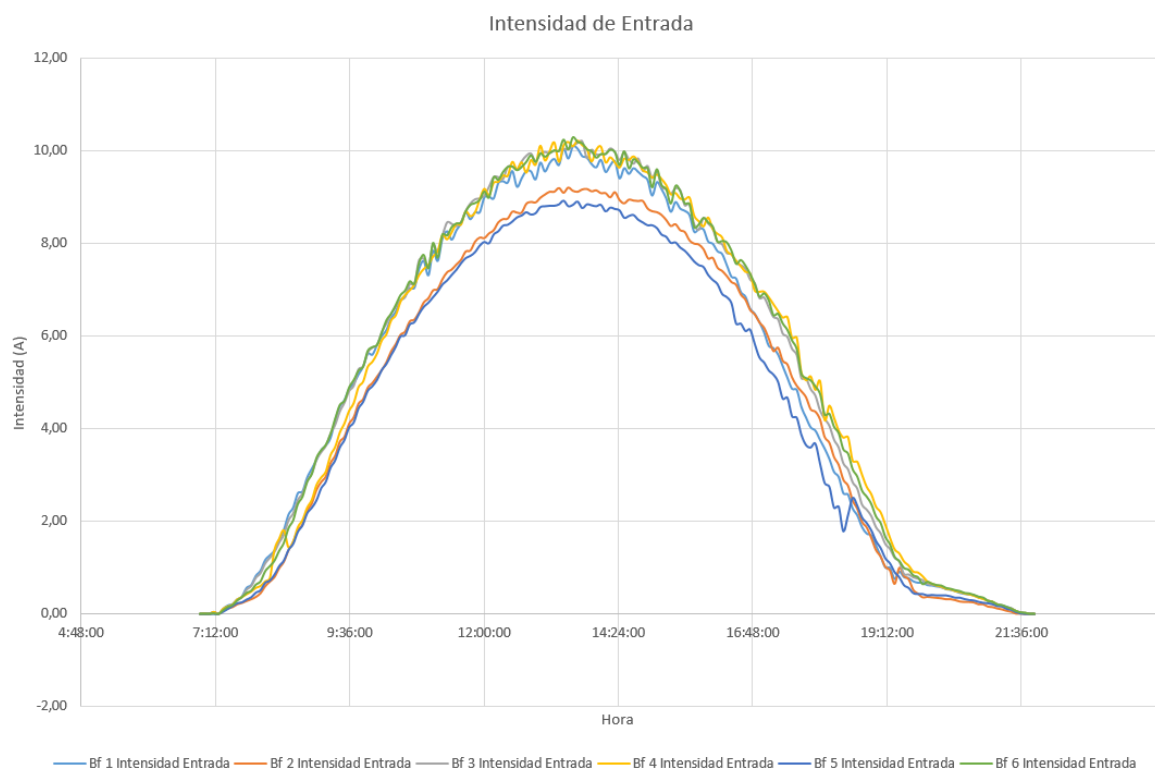


Figura 24. Intensidad de Entrada de los Optimizadores

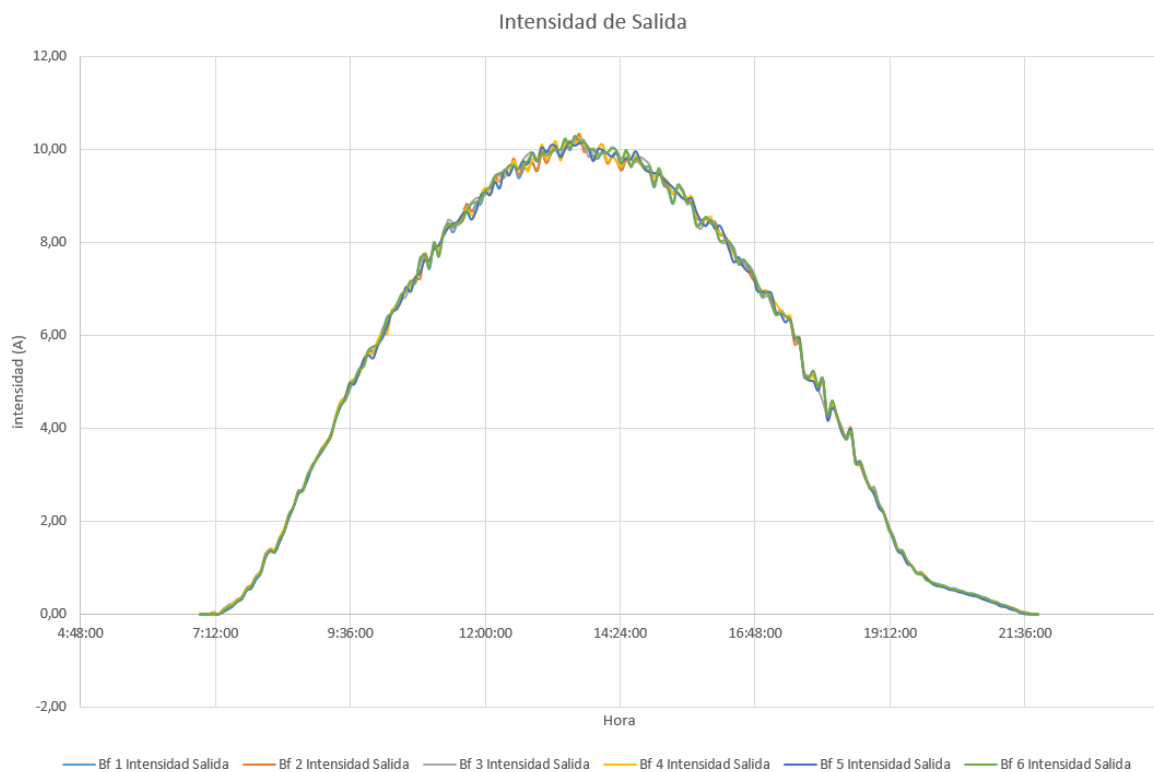


Figura 25. Intensidad de Salida de los Optimizadores

Como podemos observar, las intensidades y tensiones de entrada varían para conseguir a la salida la misma corriente para todos los optimizadores pero con distintas tensiones.

En cada módulo se encuentra conectado un optimizador y todos los optimizadores se conectan en serie para formar la cadena que se muestra en el siguiente esquema sobre el conexionado del sistema.

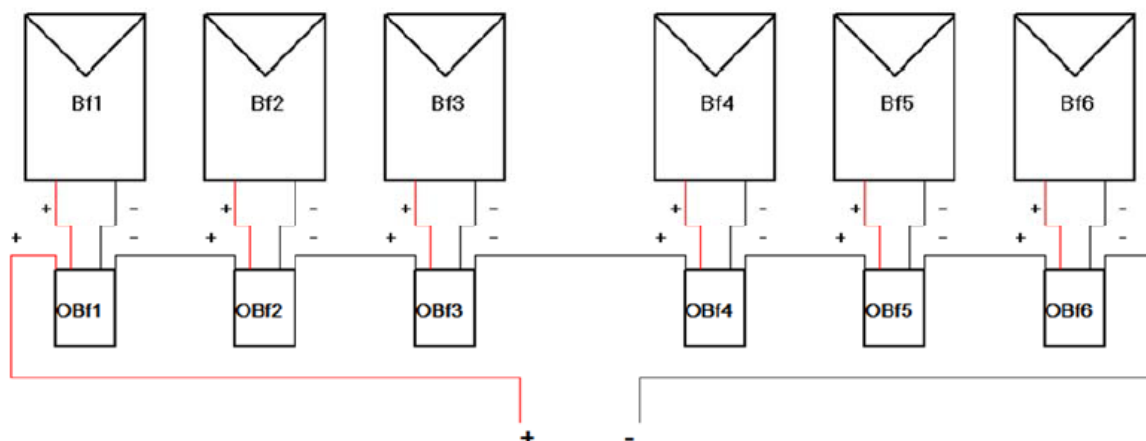


Figura 26. Esquema de Interconexión entre Optimizadores y Módulos (Moreno Buesa, 2022)

Para llevar a cabo la obtención de las curvas I-V que presentan los módulos fotovoltaicos para cada uno de los ensayos que componen este estudio, se ha utilizado el dispositivo de la empresa ENTEC SOLAR E-1000.

Este dispositivo es un trazador de curvas I-V de alta precisión capaz de medir hasta 200 curvas I-V por hora de trabajo tanto de módulos fotovoltaicos como de strings de hasta 1000V y 20A con una precisión del 0,5% en el punto de máxima potencia y menor al 3% en el resultado final en condiciones estándar de medida (CEM).

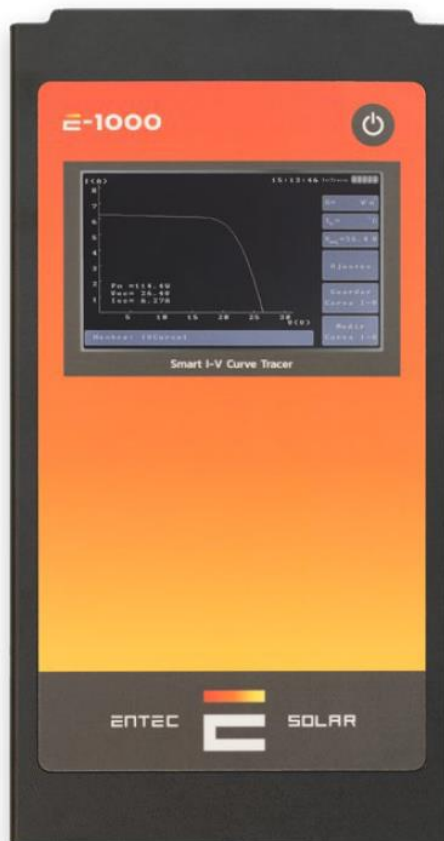


Figura 27. Trazador de Curvas ENTEC SOLAR E- 1000

4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.1 Descripción del Experimento

El experimento en el que se basa este estudio consiste en la medida de la potencia del sistema funcionando en condiciones reales de operación, a la vez que se realizan modificaciones del albedo y del porcentaje de sombras de los módulos bifaciales para la comparación con el comportamiento de los módulos monofaciales.

En base a estos datos conseguidos, determinaremos la ganancia que otorgan los módulos fotovoltaicos bifaciales frente a los módulos monofaciales, con el objetivo de poder cuantificar la influencia del albedo y el porcentaje de sombras en el funcionamiento de los módulos bifaciales.

Del mismo modo, permitirá identificar el punto de trabajo en el que la disminución de potencia provocada por el sombreado, puede ser contrarestada por el aumento de la radiación trasera incidente como consecuencia de la modificación del albedo.

Se han realizado los siguientes ensayos:

- **Ensayo 1:** 10% de Sombreado y Suelo Natural.
- **Ensayo 2:** 10% de Sombreado y Suelo Potenciado.
- **Ensayo 3:** 30% de Sombreado y Suelo Natural.
- **Ensayo 4:** 30% de Sombreado y Suelo Potenciado.
- **Ensayo 5:** 60% de Sombreado y Suelo Natural.
- **Ensayo 6:** 60% de Sombreado y Suelo Potenciado.

4.1.1 Ensayo Con 10% de Sombreado y Suelo Natural

Para este ensayo, el suelo se encuentra sin alterar, es decir, se encuentra sin ningún tipo de modificación ni potenciación, mientras que los módulos bifaciales (salvo los módulos Bf2 y Bf5 que tienen su parte trasera tapada para actuar como módulos monofaciales) presentan un sombreado que representa el 10% de su superficie posterior total ocasionado por el sistema de fijación a las estructuras de la instalación.

El objetivo de este ensayo es la visualización de la influencia que tiene el porcentaje de 10% de sombreado en la cantidad de radiación de albedo que absorben los módulos bifaciales para un suelo que se encuentra en forma natural en ambas estructuras.



Figura 28. Estructura 1 Con 10% de Sombreado y Suelo Sin Potenciar (Parte Delantera)



Figura 29. Estructura 1 Con 10% de Sombreado y Suelo Sin Potenciar (Parte Posterior)

4.1.2 Ensayo Con 10% de Sombreado y Suelo Potenciado

En este ensayo, en el que se ha mantenido un sombreado del 10% de superficie en la cara trasera de los módulos, se ha modificado el suelo de la estructura 2 mediante la colocación de una serie de elementos textiles de carácter reflectante, a la cual denominaremos “suelo brillante”.

El objetivo de este ensayo, es la comparación del comportamiento que presenta la estructura 2 con aumento en la captación de radiación solar de albedo gracias a la modificación del suelo mediante el suelo brillante, frente al comportamiento que presenta la estructura 1 con suelo natural mientras que se mantiene un sombreado del 10% de la superficie trasera de los módulos bifaciales.



Figura 30. Estructura 2 Con Sobreado de 10% y Suelo Potenciado (Parte Delantera)



Figura 31. Estructuras 1 (Derecha) y 2 (Izquierda) (Parte Posterior)

4.1.3 Ensayo Con 30% de Sombreado y Suelo Natural

En este caso, se ha aumentado el porcentaje de sombras en la parte posterior de los módulos fotovoltaicos bifaciales en un 30% de la superficie de estos mediante la utilización de cuatro elementos que bloquean el paso de luz, a los cuales denominaremos bloqueadores, cuya dimensión es: 1 metro de ancho por 20 centímetros de alto.



Figura 32. Bloqueadores de 30% de Sombreado.

La dimensión de estos bloqueadores supone el 20% de la superficie trasera de los módulos bifaciales que sumado al sombreado del 10% que genera la propia estructura de fijación de los módulos en la parte posterior, permite conseguir un 30% de sombreado de la superficie de las caras traseras de los módulos Bf1, Bf3, Bf4 y Bf6. En lo referente al suelo, se ha mantenido sin modificaciones, es decir, se encuentra sin ningún tipo de alteración ni potenciación.

El objetivo de este ensayo, es la determinación de la influencia que tiene un sombreado del 30% de la superficie posterior de los módulos bifaciales en la absorción de la radiación solar de albedo para un suelo que se encuentra sin alteraciones en ambas estructuras.



Figura 33. Módulos Bf1 (Izquierda) y Bf3 (Derecha) Con Sombreado de 30%



Figura 34. Módulos Bf4 (Izquierda) y Bf6 (Derecha) Con Sombreado de 30%

4.1.4 Ensayo Con 30% de Sombreado y Suelo Potenciado

En el siguiente ensayo, se mantiene el sombreado de 30% en la superficie posterior de los módulos bifaciales Bf1, Bf3, Bf4 y Bf6, tal como se ha explicado en el apartado anterior, y se modifica del suelo de la estructura 2 mediante la utilización del suelo brillante anteriormente explicado.

El objetivo de este ensayo, es la comparación de la actuación que presenta la estructura 2, la cual presenta una potenciación en la captación de radiación solar de albedo gracias a la utilización del suelo brillante, frente a la que presenta la estructura 1 con suelo natural. Todo ello para un sombreado del 30% de la superficie trasera de los módulos bifaciales.



Figura 35. Estructura 1 Con Suelo Natural Y Estructura 2 Con Suelo Potenciado (Ambas con 30% de Sombreado)



Figura 36. Estructura 1 Con Suelo Natural y Estructura 2 Con Suelo Potenciado Ambas con 30% de Sombreado (Parte Posterior)

4.1.5 Ensayo Con 60% de Sombreado y Suelo Natural

En este experimento, el suelo se mantiene sin modificaciones y se ha aumentado el porcentaje de sombreado en las caras posteriores de los módulos bifaciales Bf1, Bf3, Bf4 y Bf6 en un 60% de su superficie mediante la utilización de cuatro bloqueadores y cuya dimensión es: 1 metro de ancho por 1 metro de alto.

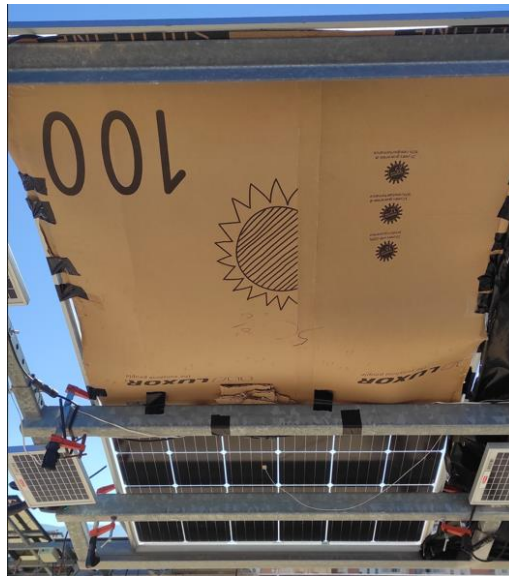


Figura 37. Bloqueador para 60% de Sombreado Colocado en Módulo Bf3

Estos cartones, cuya dimensión supone el 50% de la superficie de cada módulo, combinados con el sombreado que se origina por la propia estructura que sostiene los módulos, permite obtener un 60% de sombreado en las caras traseras de los módulos mencionados.

El objetivo de este ensayo, es la visualización de la influencia que tiene un sombreado del 60% de la superficie posterior de los módulos bifaciales en la captación de la radiación solar de albedo para un suelo que se encuentra sin modificaciones en ambas estructuras.



Figura 38. Estructura 1 Con 60% de Sombreado y Suelo Natural



Figura 39. Estructura 2 Con 60% de Sombreado con Suelo Natural

4.1.6 Ensayo Con 60% de Sombreado y Suelo Potenciado

Para el último ensayo, se ha modificado el suelo de la estructura 2 mediante la utilización de elementos textiles de carácter reflectante a los que llamamos suelo brillante, como se ha explicado anteriormente, para un sombreado del 60% en la superficie trasera de los módulos bifaciales Bf1, Bf3, Bf4 y Bf6.

El objetivo de este ensayo, es la comparación del comportamiento de la estructura 2 con suelo potenciado mediante el uso del suelo brillante para aumentar la absorción de radiación solar de albedo, frente al comportamiento de la estructura 1 con suelo natural. Todo ello para un sombreado del 60% de la superficie trasera de los módulos bifaciales.



Figura 40. Estructura 1 Con Sombreado de 60% Con Suelo Natural



Figura 41. Estructura 2 Con Sombreado de 60% Con Suelo Potenciado

4.2 Tratamiento y Adquisición de Datos

Se ha realizado la descarga de las medidas registradas por el datalogger, que se corresponde con los datos ofrecidos por los sensores. Esto significa que los valores de irradiancia se han registrado en milivoltios y los valores de temperatura necesarios no están corregidos, por lo tanto, para obtener el dato de interés, es necesario operarlos por sus constantes correspondientes.

Los datos de los optimizadores se han descargado a través del servidor web *Fusion Solar*, los cuales reflejan los parámetros eléctricos de estos para cada día con una frecuencia de registro de 5 minutos.

Como detalla Sergio Moreno Buesa en el TFG, “Estudio Comparativo de la Operación de Módulos Fotovoltaicos: Tecnología Convencional y Sistemas Bifaciales” (Moreno Buesa, 2022), existe un desfase horario entre la hora de los parámetros eléctricos y la hora de los parámetros ambientales. Para solucionar este problema, se ha optado por el planteamiento de un análisis de la generación de energía total en el cual no existe dependencia horaria.

4.3 Metodología de Análisis

4.3.1 Generación de Energía y Ganancia Bifacial

La comparación de la tecnología bifacial y monofacial se fundamenta en la teoría de que el módulo Bf2 que actúa como monofacial debido a que su cara trasera se encuentra tapada, genera la misma energía que los módulos Bf1 y Bf3 son capaces de generar considerando solamente sus caras delanteras, así como, el módulo Bf5, que presenta la misma situación que el módulo Bf2, genera la misma energía que los módulos Bf4 y Bf6 en sus caras frontales.

De esta manera, la ganancia bifacial se corresponde con la diferencia que existe entre la energía generada por los módulos bifaciales y la energía generada por los módulos monofaciales.

$$Ganancia = \frac{E_{Bifacial} - E_{Monofacial}}{E_{Monofacial}} (\%) \quad (4)$$

Este análisis se ha basado en la obtención de la ganancia bifacial a partir de la energía generada a diario. De este modo, para calcular la energía generada, se ha calculado la integral de la curva de potencia para cada módulo y cada día.

$$E_{DC} = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (5)$$

Con este estudio se ha observado si las condiciones de albedo que han sido supuestas son coherentes con los resultados en base a la generación energética así como, la influencia del albedo y las sombras de cada uno de los ensayos en dicha generación energética.

La campaña experimental realizada para este trabajo consta de 136 días, de los cuales, para cada tipo de ensayo han sido necesarios los siguientes días.

- Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural: 11 días.
- Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante: 20 días.
- Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural: 16 días.
- Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante: 27 días.
- Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural: 19 días.
- Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante: 43 días.

Con el objetivo de mostrar resultados fieles, se han seleccionado para cada tipo de ensayo, el mismo número de días con condiciones de irradiancia adecuadas, que presenta el ensayo con menor número de días con condiciones de irradiancia adecuadas.

Ensayos	10% Sombreado Con Suelo Natural	10% Sombreado Con Suelo Brillante	30% Sombreado Con Suelo Natural	30% Sombreado Con Suelo Brillante	60% Sombreado Con Suelo Natural	60% Sombreado Con Suelo Brillante
Días Seleccionados	09/09/22	08/07/22	05/10/22	14/10/22	12/01/23	10/11/22
	10/09/22	17/07/22	13/10/22	05/11/22	23/01/23	13/11/22

Tabla 5. Días Seleccionado Con Condiciones de Irradiancia Adecuadas

En *ANEXO 5: Curvas de Irradiancia Frontal de Días Seleccionados* con Condiciones de Irradiancia Adecuadas, se puede visualizar las condiciones de irradiancia citadas anteriormente para los días seleccionados.

4.3.2 Curvas de Potencia

En este análisis se ha comparado las curvas de potencia que presentan los módulos bifaciales Bf3 y Bf6 para cada uno de los ensayos que componen este estudio para días con condiciones de irradiancia favorables y para días en los que las condiciones climatológicas no eran las óptimas.

El objetivo de este comparativo es la visualización de la influencia de las sombras y el albedo de cada uno de los ensayos en las curvas de potencia que generan los módulos fotovoltaicos bifaciales.

4.3.3 Estimación de Potencia

En este análisis se ha comparado la potencia real medida de los módulos Bf6 y Bf3 con la potencia estimada que se debería obtener de dichos módulos bifaciales, que son los módulos con más sensores en su parte trasera, obtenida mediante la utilización del método de Osterwald aplicado a condiciones bifaciales.

$$P_m = \frac{P_{m,BSTC}}{G_{BSTC}} * (G_F + \varphi G_R) * \left(1 + \gamma * (T_m - T_{m,BSTC})\right) \quad (6)$$

Donde:

- **P_m**: Potencia máxima medida en el módulo.
- **P_{m,BSTC}**: Potencia máxima ofrecida por el fabricante en condiciones estándar de medida.
- **G_{BSTC}**: Irradiancia incidente en el módulo en condiciones estándar de medida bifaciales.
- **G_F**: Irradiancia incidente en el plano frontal del módulo.
- **G_R**: Irradiancia incidente en la cara posterior del módulo.
- **φ**: Cociente de bifacialidad que corresponde al mínimo entre el cociente de bifacialidad de la potencia y la intensidad.
- **γ**: Cociente de variación de la potencia máxima con la temperatura.
- **T_m**: Temperatura de operación medida del módulo.
- **T_{m,BSTC}**: Temperatura de operación del módulo en condiciones estándar de medida bifaciales.

Gracias a la utilización de esta fórmula, se ha determinado la potencia teórica estimada que los módulos Bf3 y Bf6 deberían ofrecer para condiciones ambientales reales medidas, dando como resultado su posterior comparación con la potencia real medida, como se ha explicado con anterioridad, contando con la variación de los siguientes parámetros.

- **G_R**: Puesto que nos encontramos con cuatro sensores de irradiancia trasera en los módulos Bf3 y Bf6, se ha optado por realizar el cálculo con los valores de cada uno de ellos debido a la diferencia notable entre estos valores.
- **φ**: El cálculo se realizará con el valor ofrecido por el fabricante.

El objetivo de esta comparación entre la potencia teórica estimada y la potencia real medida es la cuantificación de la diferencia que generan las sombras de cada ensayo en los valores de potencia obtenidos.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Generación de Energía y Ganancia Bifacial

Como ya se ha explicado en el apartado 4.3.1, en este análisis se muestran los datos de generación de energía de dos días en los que las condiciones de irradiancia eran favorables debido a la escasez de días con condiciones climatológicas compatibles con este estudio.

En primer lugar, se muestran los datos de energía generada en cada uno de los ensayos para cada módulo y cada día seleccionado, la energía total generada por módulo en el ensayo, la ganancia bifacial entre los módulos bifaciales y los módulos monofaciales diaria y total y la diferencia que se genera entre los módulos Bf3 y Bf6 para cada tipo de ensayo para cada día seleccionado y en total.

Por último, se muestra una visión general de los datos de energía generada en cada ensayo para los módulos bifaciales Bf3 y Bf6, y para los módulos monofaciales Bf2 y Bf5, la ganancia bifacial que se genera entre dichos módulos bifaciales y monofaciales y, la diferencia total que se genera entre los módulos Bf3 y Bf6 para cada tipo de ensayo .

Con el objetivo de evitar resultados no válidos, se han excluido los datos referentes a los módulos Bf1 y Bf4 debido al efecto negativo que puede provocar la barandilla posterior que se encuentra en ambos módulos.

Resultado Ensayo 1: Energía Generada para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

		Días Seleccionados		Energía Total (kWh)
		09/09/2022	10/09/2022	
Estructura 1	Módulo Bf2 (Monofacial)	1,83 kWh	1,79 kWh	3,62
	Módulo Bf3	2,07 kWh	2,03 kWh	4,10
Estructura 2	Módulo Bf5 (Monofacial)	1,85 kWh	1,82 kWh	3,67
	Módulo Bf6	2,14 kWh	2,10 kWh	4,24

Tabla 6. Generación Diaria para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganacia Bifacial (09/09/2022)		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	12,86%	11,52%	3,61%
Módulo Bf6	16,93%	15,54%	

Tabla 7. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (09/09/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganacia Bifacial (10/09/2022)		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	13,23%	11,59%	3,26%
Módulo Bf6	16,92%	15,23%	

Tabla 8. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (10/09/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganancia Bifacial Total		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	13,04 %	11,55 %	3,44%
Módulo Bf6	16,93 %	15,38 %	

Tabla 9. Ganancia Bifacial Total y Diferencia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

Resultado Ensayo 2: Energía Generada para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

		Días Seleccionados		Energía Total (kWh)
		17/07/2022	08/07/2022	
Estructura 1	Módulo Bf2 (Monofacial)	1,94 kWh	1,93 kWh	3,86
	Módulo Bf3	2,24 kWh	2,24 kWh	4,48
Estructura 2 (Suelo Brillante)	Módulo Bf5 (Monofacial)	1,89 kWh	1,90 kWh	3,79
	Módulo Bf6	2,26 kWh	2,25 kWh	4,51

Tabla 10. Generación Diaria para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial (17/07/2022)		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	15,69%	18,41%	0,65 %
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	16,45%	19,19%	

Tabla 11. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (17/07/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial (08/07/2022)		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	16,23%	18,01%	0,65%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	16,99%	18,78%	

Tabla 12. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (08/07/2022) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial Total		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	15,96 %	18,21 %	0,65%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	16,72 %	18,98 %	

Tabla 13. Ganancia Bifacial Total y Diferencia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

Resultado Ensayo 3: Energía Generada para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

		Días Seleccionados		Energía Total (kWh)
		05/10/2022	13/10/2022	
Estructura 1	Módulo Bf2 (Monofacial)	1,53 kWh	1,71 kWh	3,24
	Módulo Bf3	1,66 kWh	1,82 kWh	3,47
Estructura 2	Módulo Bf5 (Monofacial)	1,52 kWh	1,67 kWh	3,18
	Módulo Bf6	1,66 kWh	1,82 kWh	3,49

Tabla 14. Generación Diaria para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganancia Bifacial (05/10/2022)		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	8,34%	9,28%	0,37%
Módulo Bf6	8,73%	9,68%	

Tabla 15. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (05/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganancia Bifacial (13/10/2022)		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	6,47%	8,86%	0,32%
Módulo Bf6	6,81%	9,21%	

Tabla 16. Ganancia Bifacial y Diferencia Bf6 Vs Bf3 (13/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganancia Bifacial Total		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	7,35 %	9,06 %	0,34%
Módulo Bf6	7,72 %	9,43 %	

Tabla 17. Ganancia Bifacial Total y Diferencia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

Resultado Ensayo 4: Energía Generada para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

		Días Seleccionados		Energía Total (kWh)
		05/11/2022	14/10/2022	
Estructura 1	Módulo Bf2 (Monofacial)	1,60 kWh	1,53 kWh	3,13
	Módulo Bf3	1,68 kWh	1,62 kWh	3,30
Estructura 2 (Suelo Brillante)	Módulo Bf5 (Monofacial)	1,53 kWh	1,49 kWh	3,02
	Módulo Bf6	1,68 kWh	1,63 kWh	3,31

Tabla 18. Generación Diaria para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial (14/10/2022)		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	5,54%	8,83%	-0,26%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	6,34%	9,65%	

Tabla 19. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (14/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial (05/11/2022)		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	5,4%	9,76%	0,76%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	5,27%	9,48%	

Tabla 20. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (05/11/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial Total		Diferencia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	5,54 %	9,30 %	0,24%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	5,79 %	9,56 %	

Tabla 21. Ganancia Bifacial Total y Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

Resultado Ensayo 5: Energía Generada para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

		Días Seleccionados		Energía Total (kWh)
		12/01/2023	23/01/2023	
Estructura 1	Módulo Bf2 (Monofacial)	1,42 kWh	1,60 kWh	3,02
	Módulo Bf3	1,42 kWh	1,62 kWh	3,05
Estructura 2	Módulo Bf5 (Monofacial)	1,33 kWh	1,54 kWh	2,86
	Módulo Bf6	1,39 kWh	1,60 kWh	2,99

Tabla 22. Generación Diaria para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganancia Bifacial (12/01/2023)		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	1,08%	7,78%	-2,90
Módulo Bf6	-1,84%	4,66%	

Tabla 23. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (12/01/2023) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganancia Bifacial (23/01/2023)		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	0,72%	5,20%	-0,77%
Módulo Bf6	-0,05%	4,39%	

Tabla 24. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (23/01/2023) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

	Ganancia Bifacial Total		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	0,89 %	6,40 %	-1,77%
Módulo Bf6	-0,89 %	4,52 %	

Tabla 25. Ganancia Bifacial Total y Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

Resultado Ensayo 6: Energía Generada para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

		Días Seleccionados		Energía Total (kWh)
		10/11/2022	13/11/2022	
Estructura 1	Módulo Bf2 (Monofacial)	1,05 kWh	1,46 kWh	2,51
	Módulo Bf3	1,09 kWh	1,49 kWh	2,58
Estructura 2 (Suelo Brillante)	Módulo Bf5 (Monofacial)	1,00 kWh	1,41 kWh	2,41
	Módulo Bf6	1,08 kWh	1,49 kWh	2,56

Tabla 26. Generación Diaria para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial (10/11/2022)		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	3,40%	8,87%	-0,63%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	2,76%	8,19%	

Tabla 27. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (10/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial (13/11/2022)		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	2,03%	5,68%	-0,33%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	1,69%	5,33%	

Tabla 28. Ganancia Bifacial y Ganancia Bf6 Vs Bf3 (13/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

	Ganancia Bifacial Total		Ganancia
	Vs Módulo Bf2	Vs Módulo Bf5	Bf6 Vs Bf3
Módulo Bf3	2,60 %	7,00 %	-0,46%
Módulo Bf6 (Suelo Brillante)	2,13 %	6,51 %	

Tabla 29. Ganancia Bifacial Total y Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

Comparación de Energía Total de Ensayos

	Datos de Energía Total (kWh)			Ganancia Bifacial	
	Módulos Bifaciales		Módulo Monofacial		
Ensayo	Bf3	Bf6	Bf2	Bf3 Vs Bf2	Bf6 Vs Bf2
10% Sombreado Con Suelo Natural	4,10	4,24	3,62	13,04 %	16,93 %
10% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	4,48	4,51 (Suelo Brillante)	3,86	16,06 %	16,84 %
30% Sombreado Con Suelo Natural	3,47	3,49	3,24	7,10 %	7,72 %
30% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	3,30	3,31 (Suelo Brillante)	3,13	5,43 %	5,75 %
60% Sombreado Con Suelo Natural	2,97	2,70	2,93	1,37 %	-7,85 %
60% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	2,58	2,56 (Suelo Brillante)	2,51	2,79 %	1,99 %

Tabla 30. Comparación de Energía Total de Ensayos (Vs Bf2)

	Datos de Energía Total (kWh)			Ganancia Bifacial	
	Módulos Bifaciales		Módulo Monofacial		
Ensayo	Bf3	Bf6	Bf5	Bf3 Vs Bf5	Bf6 Vs Bf5
10% Sombreado Con Suelo Natural	4,10	4,24	3,67	11,55 %	15,38 %
10% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	4,48	4,51 (Suelo Brillante)	3,79	18,21 %	19,00 %
30% Sombreado Con Suelo Natural	3,47	3,49	3,19	9,21 %	9,75 %
30% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	3,30	3,31 (Suelo Brillante)	3,02	9,27 %	9,60 %
60% Sombreado Con Suelo Natural	2,97	2,70	2,74	8,39 %	-1,46 %
60% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	2,58	2,56 (Suelo Brillante)	2,41	7,05 %	6,22 %

Tabla 31. Comparación de Energía Total de Ensayos (Vs Bf5)

Ganancia Total Bf6 Vs Bf3						
Ensayos	10% Sombreado Con Suelo Natural	10% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	30% Sombreado Con Suelo Natural	30% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6	60% Sombreado Con Suelo Natural	60% Sombreado Con Suelo Brillante en Bf6
Ganancia(%)	3,44%	0,65%	0,34%	0,24%	-1,77%	-0,46%

Tabla 32. Ganancia Total Bf6 Vs Bf3 por Tipo de Ensayo

Como puede observarse en las tablas de generación de energía y ganancia bifacial de cada uno de los ensayos, la ganancia de los módulos fotovoltaicos bifaciales es notablemente mayor que la de los módulos fotovoltaicos monofaciales para un sombreado del 10%, pero va disminuyendo a medida que el nivel de sombreado en la parte trasera de los módulos bifaciales va aumentando. En parte esto podría explicarse por tener diferentes niveles de irradiancia para los días que se comparan, y por tanto, tener menor producción eléctrica. Este efecto se puede eliminar, o bien trasladado a condiciones CEM con la ecuación de Osterwarld, o bien, comparando las ganancias en energía con respecto a los módulos monofaciales.

En concreto, se puede observar que comparando los valores obtenidos del ensayo de 10% de sombreado sin suelo brillante y los valores obtenidos del ensayo 30% de sombreado sin suelo brillante en la parte trasera de los módulos Bf3 y Bf6, se produce una reducción en el valor de la ganancia bifacial del del 43,65% para Bf3 y del 54,4% para Bf6 respecto al módulo monofacial Bf2, y respecto al módulo monofacial Bf5, se presenta una reducción del 21,26% para Bf3 y del 38,68% para Bf6.

Esta diferencia que se visualiza en los ensayos del 10% y 30% de sombreado sin suelo brillante, se incrementa con la utilización de este material que, como ya se ha explicado con anterioridad, incrementa la captación de irradiancia en la parte trasera de los módulos fotovoltaicos bifaciales. Se obtiene por tanto, entre los mismos valores de sombreado y en referencia al módulo monofacial Bf2, una reducción en el valor de la ganancia bifacial del 65,3% para Bf3 y del 65,3% para Bf6. Por otro lado, en referencia al módulo monofacial Bf5 y entre el 10% y 30% de sombrado con suelo brillante, se presenta una reducción del del 48,93% para Bf3 y del 49,63% para Bf6.

Por otro lado, comparando los datos obtenidos en los ensayos con 30% de sombreado y 60% de sombreado sin la utilización del suelo brillante y con la utilización de este material, se puede visualizar que, aunque existe una diferencia en el valor de la ganancia bifacial entre los ensayos 30% y 60% de sombreado con y sin suelo brillante, no es tan notable que la diferencia que se ha mostrado anteriormente entre el 10% y 30% de sombreado.

Esta reducción en la diferencia de los valores de la ganancia bifacial que se presenta entre los ensayos de 30% y 60% de sombreado es debido al aumento de sombreado en las caras traseras de los módulos fotovoltaicos bifaciales que hace que, para un 30% de sombreado con y sin suelo brillante, los valores de generación de energía de los módulos bifaciales se asemenjen a los valores que presentan los módulos monofaciales.

Esta influencia del aumento de sombreado en las caras traseras de los módulos bifaciales en los datos de generación de energía es mucho más notable para un sombreado del 60% con y sin suelo brillante ya que, los valores de ganancia bifacial conseguidos en estos ensayos se encuentran en un rango del 2% al 9% para los cuatro módulos bifaciales en comparación a los dos módulos monofaciales, lo que visualiza la semejanza entre los valores de ambas tecnologías bifaciales.

Si estudiamos la diferencia en la generación de energía entre los módulos Bf3 y Bf6, podemos observar como los valores de energía generada del módulo Bf6 son mayores que los valores del módulo Bf3 para un sombreado del 10% tanto con la potenciación mediante suelo brillante, como sin ella. Además, podemos observar como la diferencia que existe entre los valores de ambos módulos, cuando el suelo brillante está instalado en la estructura 2 y el sombreado es del 10% , no es tan notable como era de esperar. Este hecho podría explicarse por la cercanía que existe entre las dos estructuras ya que, cuando el suelo brillante está instalado, el módulo Bf3 se encuentra próximo al suelo brillante pudiendo beneficiarse de alguna manera de cierta potenciación.

Esta diferencia en los valores de generación de energía entre los módulos Bf3 y Bf6, se va reduciendo a medida que el sombreado en las caras posteriores de dichos módulos va aumentando a pesar de la potenciación mediante suelo brillante.

En *ANEXO 6: Gráficas Comparativas de Generación de Energía y Ganancia Bifacial*, se han recogido las diferentes gráficas que representan de manera visual lo explicado en las diferentes tablas presentadas en este análisis.

5.2 Curvas de Potencia

En este análisis se ha realizado la comparación de las curvas de potencia que se generan de los datos obtenidos de los optimizadores de los módulos fotovoltaicos bifaciales Bf3 y Bf6 para cada uno de los ensayos que componen este trabajo.

Este comparativo de curvas de potencia se ha dividido en dos tipos de curvas de potencia, una clasificación en la que se han mostrado cuatro días con condiciones meteorológicas óptimas, uno por cada ensayo, la cual se ha denominado “Días Buenos” y otra clasificación en la que se han mostrado cuatro días con condiciones meteorológicas poco favorables, uno por cada ensayo, la cual se ha llamado “Días Malos”.

La potenciación mediante la utilización del suelo brillante solo se produce en la estructura 2, siendo beneficiarios de este hecho los módulos de esta estructura, en este caso Bf6. Es por esto que, solo se han realizado las gráficas correspondientes al módulo Bf6 en los ensayos en los que se utilice la potenciación mediante suelo brillante.

Además, con el objetivo de visualizar la influencia de esta potenciación mediante suelo brillante, se ha comparado en distintas gráficas, cada cada tipo de ensayo con el mismo nivel de sombreado con suelo brillante y sin suelo brillante para el módulo Bf6.

Ensayos	10% Som. Con Suelo Natutal	10% Som. Con Suelo Brillante	30% Som. Con Suelo Natutal	30% Som. Con Suelo Brillante	60% Som. Con Suelo Natutal	60% Som. Con Suelo Brillante
Días Buenos	10/09/2022	17/07/2022	05/10/2022	14/10/2022	12/01/2023	10/11/2022
Días Malos	12/09/2022	12/07/2022	02/10/2022	17/01/2022	17/01/2023	16/12/2022

Tabla 33. Selección de días para Días Buenos y Días Malos

Con el objetivo de minimizar los desfases que existen entre las horas de cada tipo de ensayo, debido a que, unos ensayos tienen horario de invierno y otros horario de verano, las horas de cada ensayo han sido convertidas a horas UTC³.

³ **UTC(Universal Coordinated Time)**: Estándar internacional para la medición del tiempo en el mundo (Calenworld, 2023).

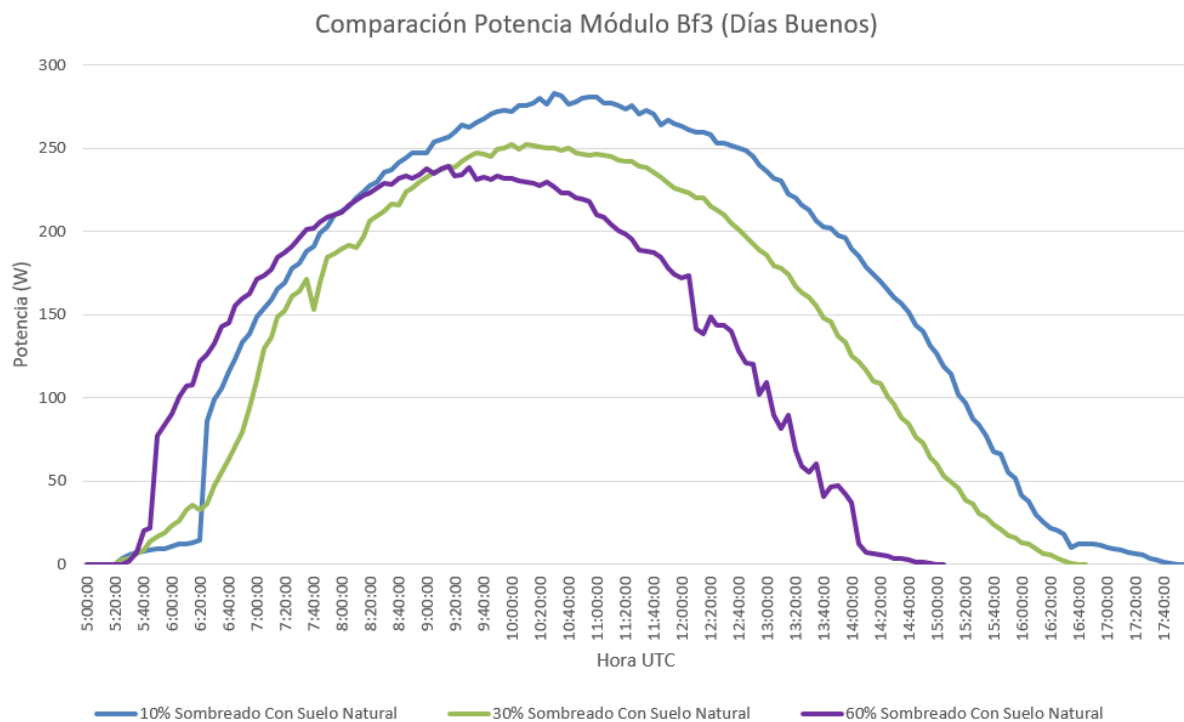
Comparación de Curvas de Potencia Módulo Bf3 (Días Buenos)

Figura 42. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf3 (Ensayos 10%, 30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Buenos)

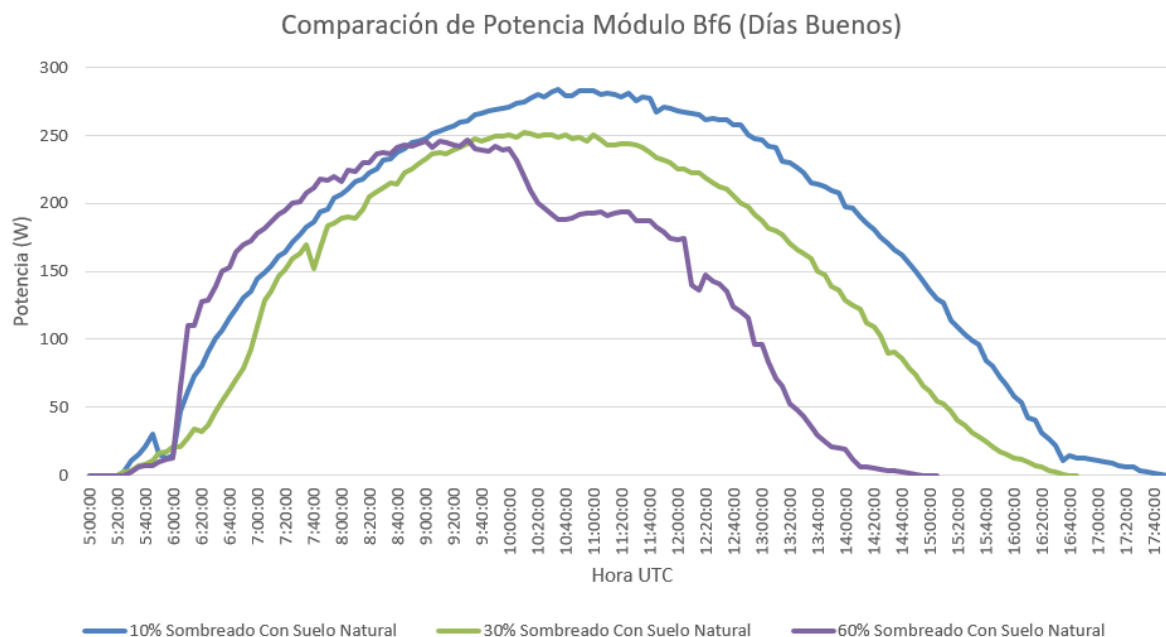
Comparación de Curvas de Potencia Módulo Bf6 (Días Buenos)

Figura 43. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Buenos)

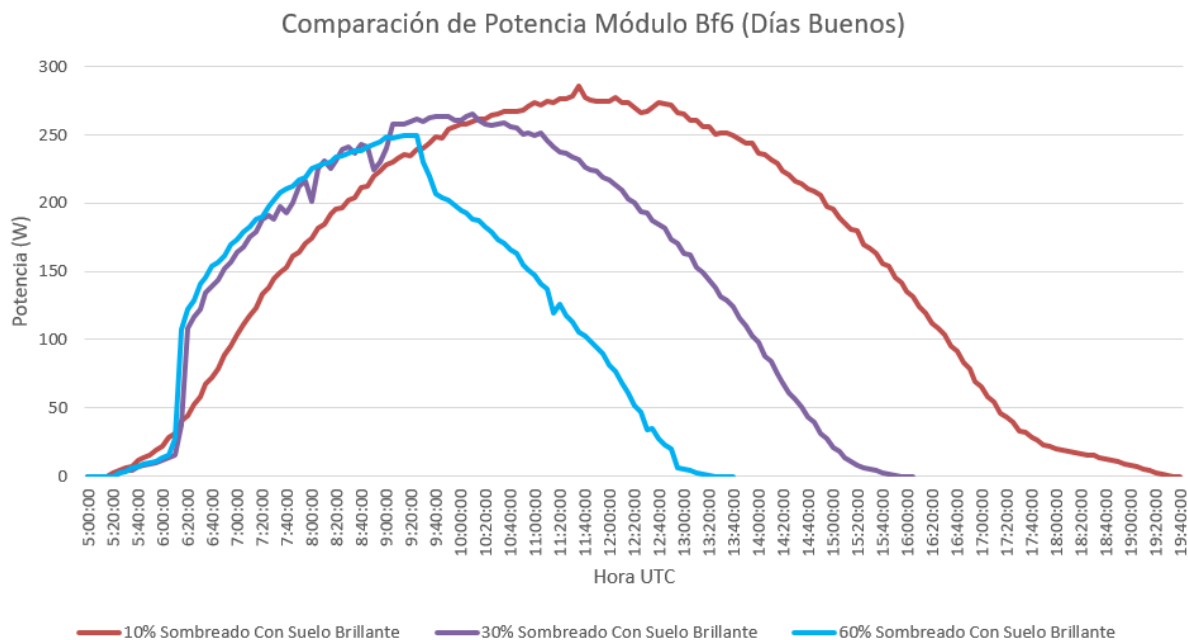


Figura 44. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos)

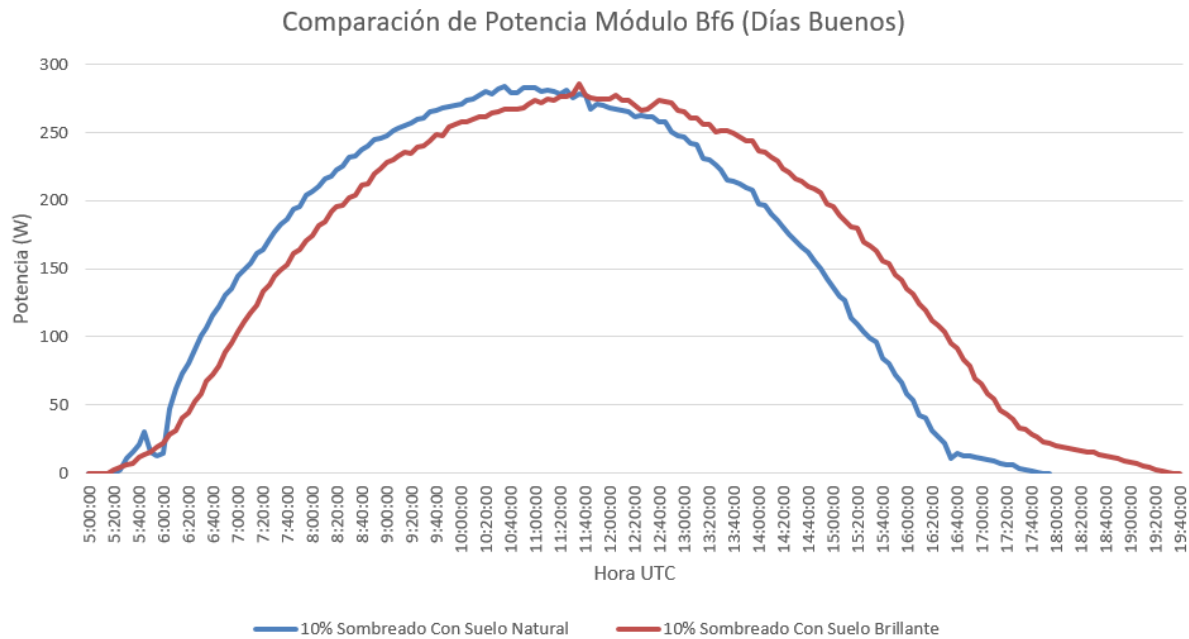


Figura 45. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos)

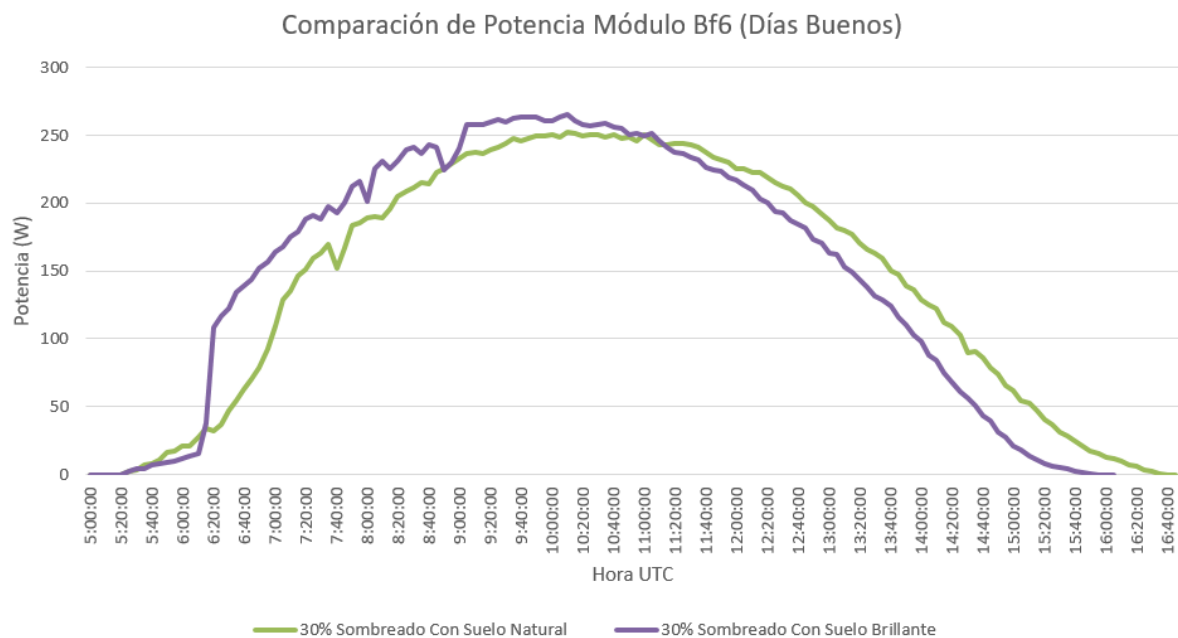


Figura 46. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos)

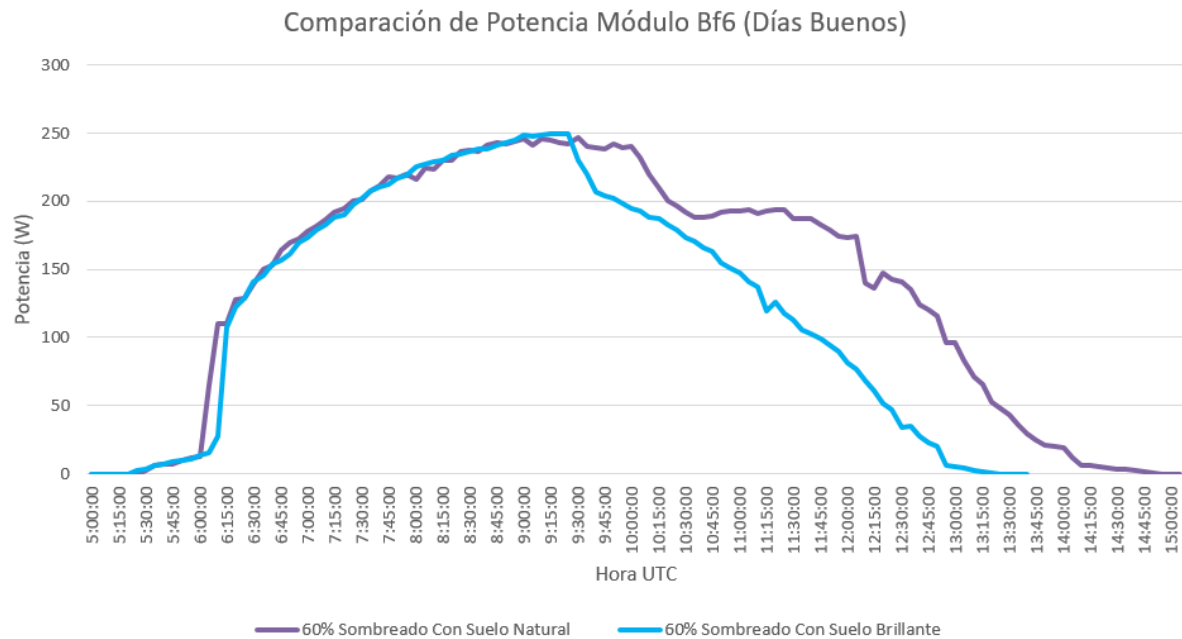


Figura 47. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Buenos)

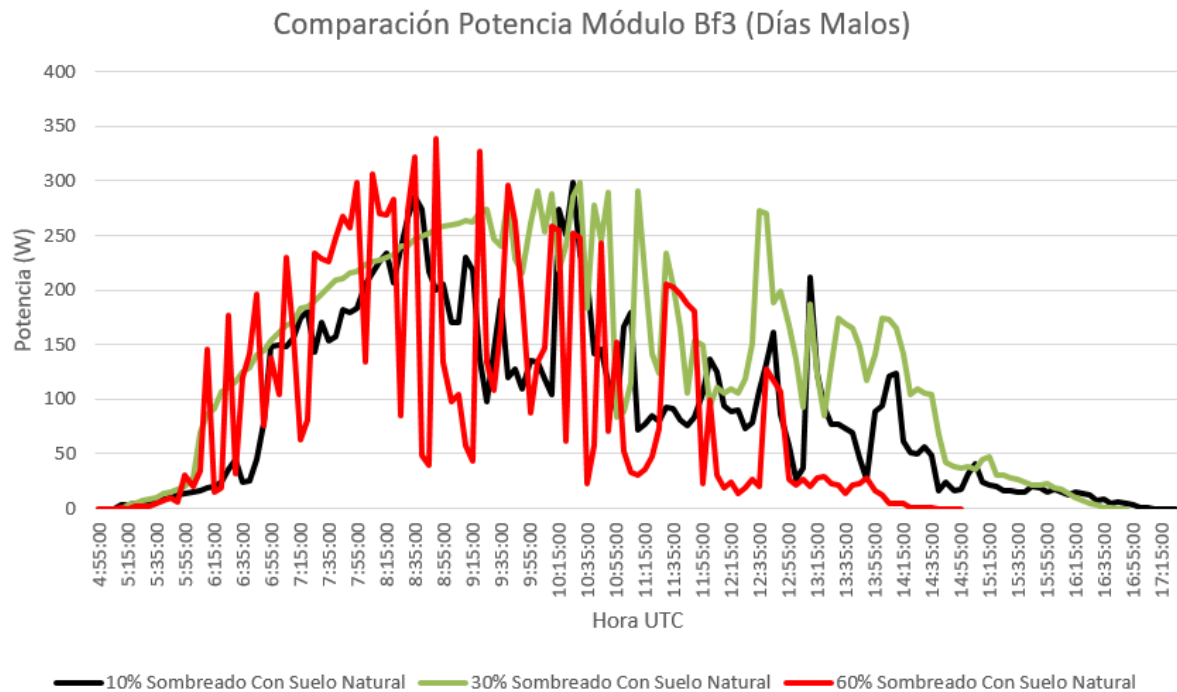
Comparación de Curvas de Potencia Módulo Bf3 (Días Malos)

Figura 48. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf3 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Malos)

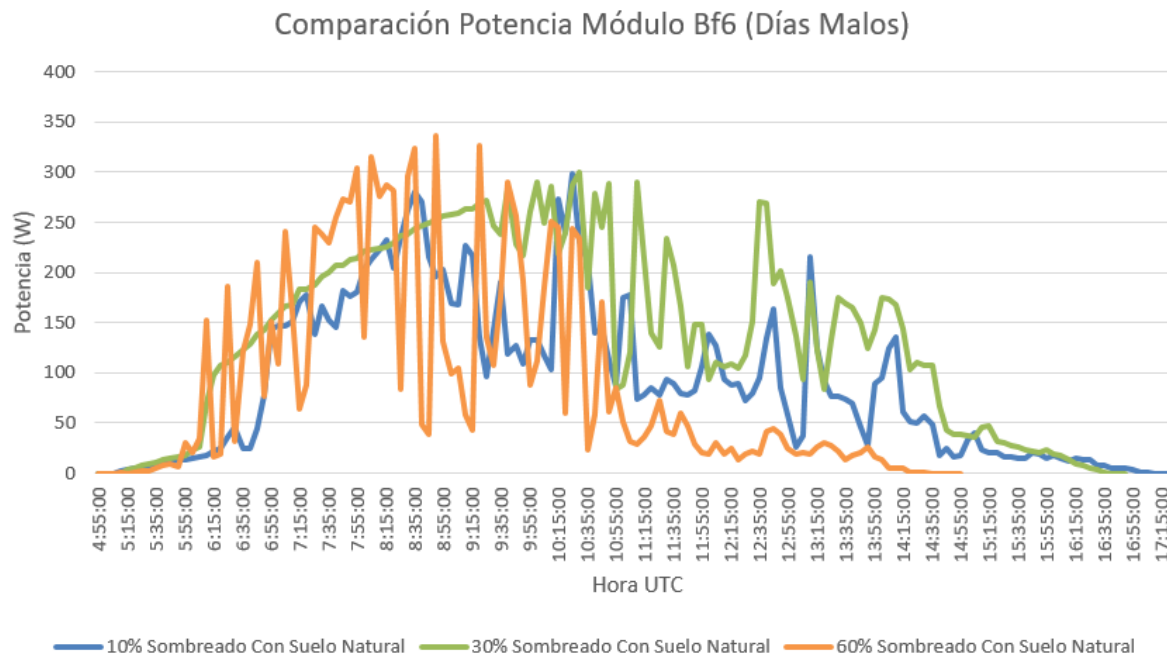
Comparación de Curvas de Potencia Módulo Bf6 (Días Malos)

Figura 49. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Natural) (Días Malos)

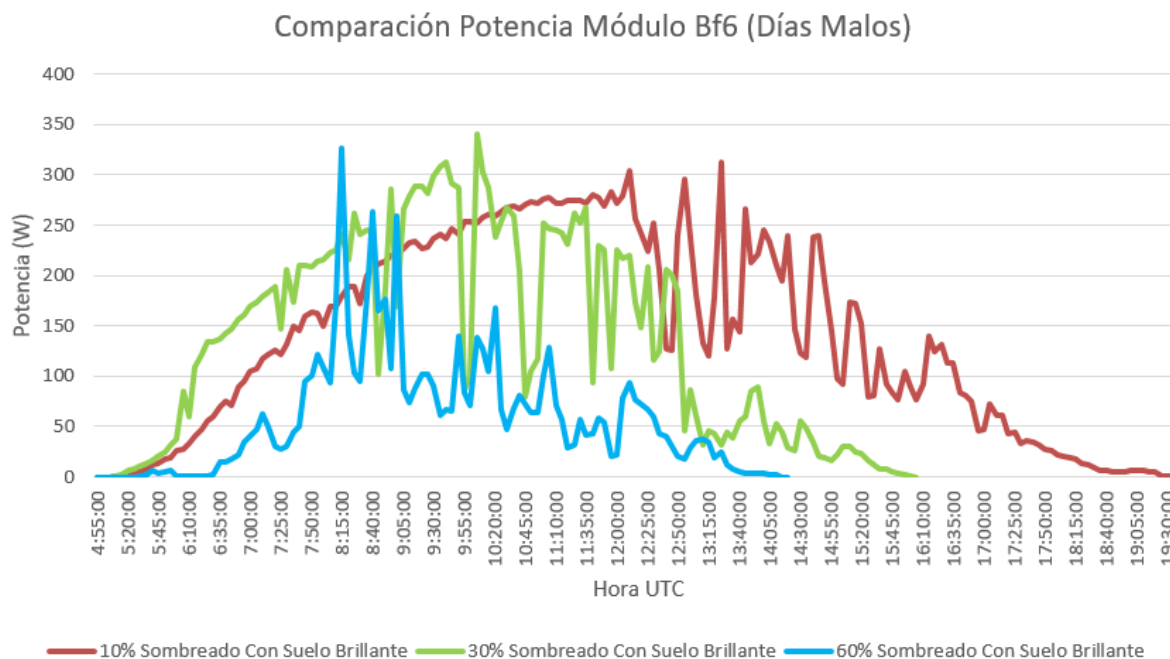


Figura 50. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayos 10%,30% y 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)

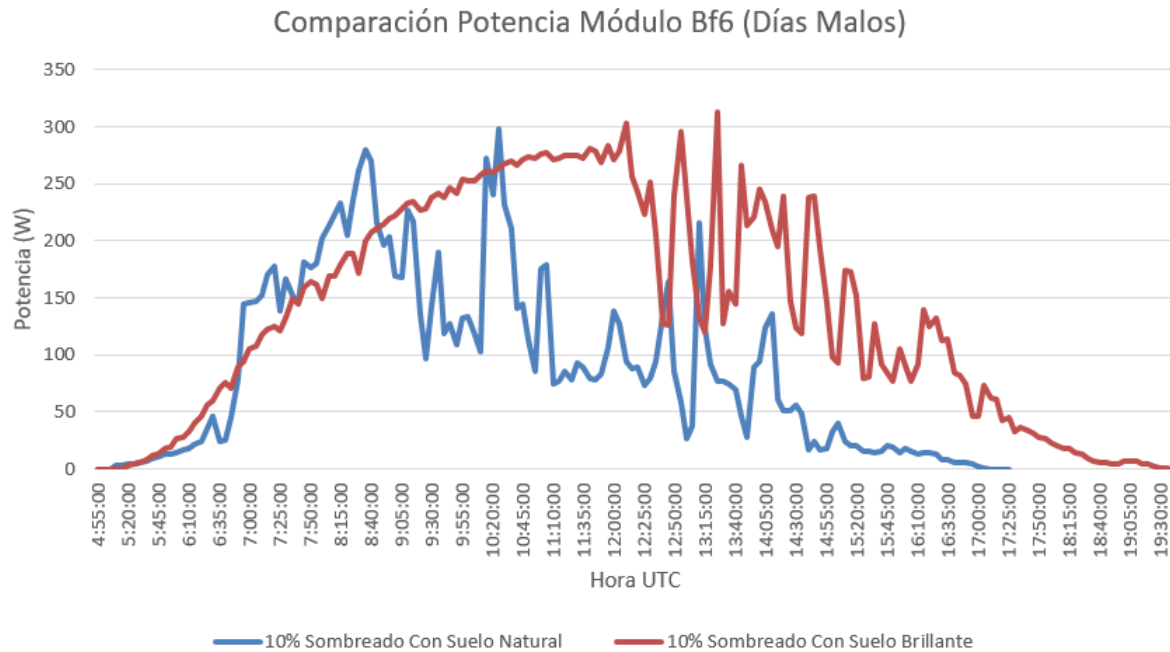


Figura 51. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)

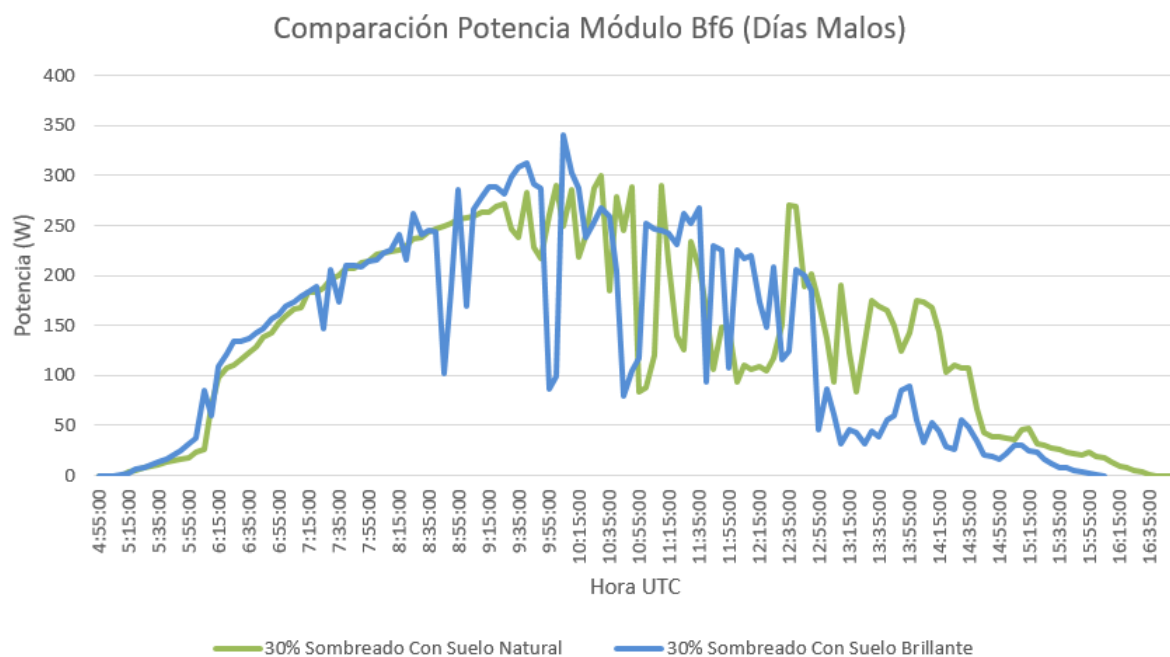


Figura 52. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)

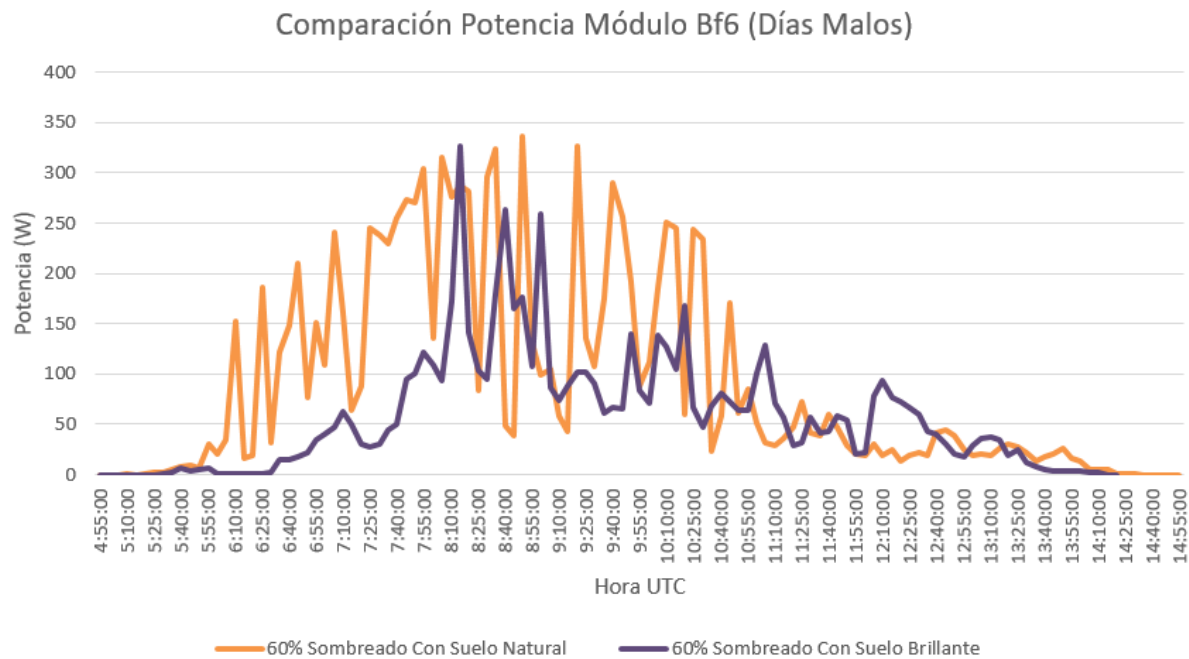


Figura 53. Comparación de Curvas de Potencia para Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural y Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante) (Días Malos)

Como se puede visualizar en las gráficas comparativas de curvas de potencia en la clasificación de Días Buenos, la diferencia que se crea, por parte de los módulos bifaciales Bf3 y Bf6, entre las curvas de los ensayos con 10% y 30% de sombreado con y sin la utilización del suelo brillante es mucho más notable que la diferencia entre las curvas de los ensayos con 30% y 60% de sombreado.

Esta diferencia en la curva de potencia se genera gracias al aumento en el sombreado de las caras posteriores de los módulos bifaciales, que como se puede ver en las gráficas comparativas de Días Buenos, a partir de un 30% de sombreado no se muestran cambios notables en la curva de potencia.

Por otro lado, en la comparativa de curvas de potencia en la clasificación de Días Malos, las curvas muestran unos valores irregulares propios de las condiciones meteorológicas de los días seleccionados para esta comparación, provocando que no exista una diferencia notable entre los valores de los ensayos.

En la siguiente tabla, se ha mostrado los valores de potencia máximos obtenidos en cada ensayo para cada clasificación.

Potencia Máxima (W)						
Ensayos	10% Somb. Con Suelo Natural.	10% Somb. Con Suelo Brillante.	30% Somb. Con Suelo Natural.	30% Somb. Con Suelo Brillante.	60% Somb. Con Suelo Natural.	60% Somb. Con Suelo Brillante.
Días Buenos						
Bf3	282,85	285,5	252,5	261,6	239,16	250,3
Bf6	283,74	285,6	252,2	265,2	246,8	249,9
Días Malos						
Bf3	298,424	305,7	299,15	336,3	339,36	327,9
Bf6	298,6	312,46	300,18	340,16	336,99	326,4

Tabla 34. Tabla Potencia Máxima Comparación de Curvas de Potencia

En *ANEXO 7: Comparación de Potencia Máxima por Ensayo para “Días Buenos” y “Días Malos”*, se han recogido las diferentes gráficas que representan de manera visual los diferentes valores de potencia máxima que se presentan en la Tabla 34.

5.3 Estimación de Potencia

Como se ha explicado en el apartado 4.3.3, en este análisis se ha comparado la potencia real obtenida en los sensores de los módulos bifaciales Bf3 y Bf6 y la potencia teórica estimada que se debería obtener de dichos módulos para condiciones ambientales reales medidas obtenidas gracias a la utilización del método de Osterwald.

Este comparativo se ha dividido en los diferentes ensayos que componen este trabajo, en los que se han mostrado la potencia máxima teórica estimada para los sensores CH2, CH3, CH4 y CH5 en el caso del módulo bifacial Bf3, la potencia máxima teórica estimada para los sensores CH7, CH8, CH9 y CH10 en el caso del módulo bifacial Bf6, y la potencia real máxima medida de cada módulo para un día con condiciones de irradiancia favorables para cada ensayo así como, la cuantificación de la influencia del sombreado en las cara traseras mediante la diferencia entre el menor valor de potencia teórica estimada de cada módulo y el valor de la potencia real medida de cada módulo.

Dedido a que la potenciación mediante la utilización del suelo brillante solo tiene efecto en la estructura 2, en concreto en el módulo Bf6, solo se han mostrado los datos del módulo Bf6 para los ensayos con suelo brillante.

Comparación de Potencias Ensayo1: Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

10/09/2022										
Módulo Bf3						Módulo Bf6				
Sensores Bf3					Exp Bf3	Sensores Bf6				Exp Bf6
CH2	CH3	CH4	CH5	CH7		CH8	CH9	CH10		
Potencia MAX (W)	304,99	305,36	317,31	323,6	282,85	309,8	307	325,9	327,45	283,7

Tabla 35. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Sin Suelo Brillante)

Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida		
Potencia Teórica Estimada Mínima Bf3 Vs Potencia Real Bf3	Potencia Teórica Estimada Mínima Bf6 Vs Potencia Real Bf6	Diferencia (%)
7,82%	8,22%	

Tabla 36. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 10% Sombreado Sin Suelo Brillante)

Comparación de Potencias Ensayo2: Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

17/07/2022					
Módulo Bf6					
Sensores Bf6					Exp Bf6
CH7	CH8	CH9	CH10		
Potencia MAX (W)	320,9	371,6	365,1	389,15	285,6

Tabla 37. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida	
Potencia Teórica Estimada Mínima Bf6 Vs Potencia Real Bf6	Diferencia (%)
12,38%	

Tabla 38. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

Comparación de Potencias Ensayo3: Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

05/10/2022										
Módulo Bf3					Módulo Bf6					
Sensores Bf3				Exp Bf3	Sensores Bf6				Exp Bf6	
CH2	CH3	CH4	CH5		CH7	CH8	CH9	CH10		
Potencia MAX (W)	280,63	282,15	290,7	296,53	252,5	283,22	283,02	295,5	299,5	252,23

Tabla 39. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Sin Suelo Brillante)

Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida		
Potencia Teórica Estimada Mínima Bf3 Vs Potencia Real Bf3	Potencia Teórica Estimada Mínima Bf6 Vs Potencia Real Bf6	Diferencia (%)
11,14%	12,21%	

Tabla 40. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 30% Sombreado Sin Suelo Brillante)

Comparación de Potencias Ensayo 4: Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

14/10/2022					
Módulo Bf6					
Sensores Bf6					Exp Bf6
CH7	CH8	CH9	CH10		
Potencia MAX (W)	311,7	307,4	318,3	321,53	265,2

Tabla 41. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida	
Potencia Teórica Estimada Mínima Bf6 Vs Potencia Real Bf6	Diferencia (%)
15,92%	

Tabla 42. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

Comparación de Potencias Ensayo 5: Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

	12/01/2023									
	Módulo Bf3					Módulo Bf6				
	Sensores Bf3				Exp Bf3	Sensores Bf6				Exp Bf6
	CH2	CH3	CH4	CH5		CH7	CH8	CH9	CH10	
Potencia MAX (W)	275,73	277,9	283,9	288,4	239,16	274,9	276,14	286,22	289,7	246,8

Tabla 43. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Sin Suelo Brillante)

Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida		
Potencia Teórica Estimada Mínima Bf3 Vs Potencia Real Bf3	Potencia Teórica Estimada Mínima Bf6 Vs Potencia Real Bf6	Diferencia (%)
15,3%	11,39%	

Tabla 44. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 60% Sombreado Sin Suelo Brillante)

Comparación de Potencias Ensayo6: Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

10/11/2022					
Módulo Bf6					
Sensores Bf6					Exp Bf6
CH7	CH8	CH9	CH10		
Potencia MAX (W)	288,43	291,34	296,13	296,25	249,9

Tabla 45. Potencia Máxima Teórica estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida	
Potencia Teórica Estimada Mínima Bf6 Vs Potencia Real Bf6	Diferencia (%)
15,41%	

Tabla 46. Influencia de Sombreado en Datos de Potencia (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

Visualizando las tablas anteriores, podemos observar como la diferencia entre los valores obtenidos mediante el método de Osterwald para la potencia teórica estimada de los cuatro sensores correspondientes de los módulos bifaciales Bf3 y Bf6 y, los valores de potencia real medida obtenidos de los optimizadores de dichos módulos, va en aumento a medida que el sombreado en las caras traseras de los módulos bifaciales aumenta.

Esta diferencia de potencias varía además, entre los ensayos de 10% de sombreado con suelo brillante y sin suelo brillante, sin embargo, a partir de un 30% de sombreado, dicha diferencia de potencias entre ensayos con suelo brillante y sin suelo brillante se hace menos notable.

En *ANEXO 8: Comparación Gráfica de Potencias Teóricas Estimadas y Potencias Reales Medidas*, podemos visualizar lo explicado en las tablas presentadas con anterioridad en este apartado.

6 CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo y el correspondiente análisis de los resultados que se han obtenido, se han extraído las siguientes conclusiones:

Con la realización de los diferentes experimentos o ensayos que componen este trabajo queda demostrado que, los módulos bifaciales consiguen ofrecer una producción de energía mayor que la que ofrecen los módulos monofaciales, obteniendo unas ganancias bifaciales de entre el 12% y 17% respecto a la tecnología monofacial para un sombreado del 10% en las caras traseras de los módulos bifaciales, sin la utilización del material reflectante llamado suelo brillante y, de entre 15% y 19% con la utilización de dicho material para la potenciación de la captación de irradiancia.

Sin embargo, al aumentar el sombreado en las caras traseras de los módulos bifaciales, esa diferencia en la producción de energía entre ambas tecnologías se ve disminuida como se puede comprobar al aumentar el sombreado de las caras posteriores en un 30% de la superficie trasera de los módulos bifaciales llegando a tener una ganancia bifacial máxima del 10% frente a la tecnología monofacial, sin la utilización del suelo brillante, y del 11% con la utilización del suelo brillante. Es por ello, que si comparamos el efecto del suelo brillante entre los módulos bifaciales, ante un mismo porcentaje de sombras del 10%, el módulo bifacial con suelo brillante tiene un 0,65% más de producción que el módulo bifacial con suelo normal.

Esta disminución en la diferencia de producción de energía entre tecnologías fotovoltaicas se hace muy notable al aumentar el sombreado de las caras posteriores de los módulos bifaciales en un 60%, ya que los valores de generación de energía que ofrecen ambas tecnologías fotovoltaicas, con y sin la utilización del suelo brillante, son muy próximos.

Estos hechos demuestran que, para conseguir una producción de energía máxima en módulos fotovoltaicos bifaciales se debe, realizar una correcta modificación del terreno donde se encuentre dicha instalación a fin de potenciar la captación de radiación solar de albedo así como, conseguir que el sombreado en las caras traseras de los módulos sea el mínimo posible ya que, como se ha comprobado, aunque la potenciación del suelo pueda mitigar el efecto negativo del sombreado en la generación de energía, los datos de generación resultantes son considerablemente inferiores.

7 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Cambio Energético. (1 de Agosto de 2019). Cambio Energético. <https://www.cambioenergetico.com/blog/placas-solares-bifaciales/>

Fischer, A. (23 de Mayo de 2022). PV-Magazine. <https://www.pv-magazine.com/2022/05/23/bifacial-solar-modules-shine-in-snowy-environments/>

Grupo Novelec. (14 de Enero de 2021). Grupo Novelec. [https://blog.gruponovelec.com/energias-renovables/modulos-fotovoltaicos-bifaciales-todo-lo-que-necesitas-saber/#%C2%BFQue ventajas aportan](https://blog.gruponovelec.com/energias-renovables/modulos-fotovoltaicos-bifaciales-todo-lo-que-necesitas-saber/#%C2%BFQue%20ventajas%20aportan)

Grupotec. (2 de Mayo de 2021). Grupotec. <https://grupotec.es/la-rapida-evolucion-de-los-modulos-fotovoltaicos/>

ingelibreblog.wordpress. (4 de Febrero de 2015). ingelibrewordpress. <https://ingelibreblog.wordpress.com/2015/02/04/pvsyst-diseno-del-proyecto-primeros-pasos/>

Interempresas. (28 de 10 de 2021). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/370305-Tecnologia-bifacial-el-futuro-de-la-industria-solar-fotovoltaica.html>

Lusson, N. (19 de Agosto de 2020). PV-Magazine. <https://www.pv-magazine.com/2020/08/19/bifacial-modules-the-challenges-and-advantages/>

Moreno Buesa, S. (2022). Estudio comparativo de la operación de módulos fotovoltaicos: Tecnología convencional y Sistemas bifaciales. Jaén: Universidad de Jaén.

Nuevo, D. (31 de Enero de 2022). esenergia. <https://esenergia.es/planta-fotovoltaica-innovadora/>

Opengy. (17 de Mayo de 2021). Opengy. <https://www.opengy.com/paneles-solares-fotovoltaicos-bifaciales-que-son-instalacion-sobre-cubierta/>

REE. (18 de Marzo de 2022). Red Eléctrica de España. <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2022/03/potencia-instalada-solar-fotovoltaica-en-espana-aumenta-casi-un-30-por-ciento-en-2021>

TECHNO SUN. (s.f.). TECHNO SUN. <https://b2b.technosun.com/blog/area-fotovoltaica-profesional-1/post/tecnologia-de-la-fotovoltaica-bifacial-i-celulas-75>

Calenworld. (2023). Calenworld. Obtenido de <https://es.calenworld.com/husos-horarios/que-significa-utc>

ANEXOS

ANEXO 1: Datasheet de Módulos YINGLI PANDA BIFACIAL 320

PANDA BIFACIAL 60CF

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Bifacial Standard Test Conditions (BSTC)						
Module type			YLM60G2530F-1 (60x+P _{max})			
Power output	P _{max}	W	330	325	320	315
Power output tolerance	ΔP _{max}	W	0/+5			
Module efficiency	η _m	%	19.9	19.6	19.3	19.0
Voltage at P _{max}	V _{mp}	V	32.9	32.6	32.3	32.0
Current at P _{max}	I _{mp}	A	10.34	10.05	9.97	9.88
Open-circuit voltage	V _{oc}	V	39.6	39.4	39.2	38.8
Short-circuit current	I _{sc}	A	10.46	10.41	10.36	10.32

BSTC: (1000±10) W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5 spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 19% at 200W/m² according to EN 60904-3.

Electrical parameters at Nominal Module Operating Temperature (NMOT)						
Power output	P _{max}	W	250.0	246.2	242.4	238.6
Voltage at P _{max}	V _{mp}	V	30.9	30.7	30.5	30.3
Current at P _{max}	I _{mp}	A	8.08	8.01	7.94	7.87
Open-circuit voltage	V _{oc}	V	37.6	37.4	37.2	37.0
Short-circuit current	I _{sc}	A	8.41	8.37	8.33	8.30

NMOT: temperature near maximum power point at 800W/m² irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal module operating temperature	NMOT	°C	39±2
Temperature coefficient (P _{max})	γ _{max}	%/°C	-0.38
Bifaciality (P _{max})	β _{max}	%	82.0
Temperature coefficient (V _{oc})	β _{oc}	%/°C	-0.30
Bifaciality (V _{oc})	β _{oc}	%	99.3
Temperature coefficient (I _{sc})	α _{sc}	%/°C	0.04
Bifaciality (I _{sc})	β _{sc}	%	81.5

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	1500V _{DC}
Max. series fuse rating	20A
Limiting reverse current	20A
Operating temperature range	-40°C to 85°C
Max. snow load, front	5400Pa
Max. wind load, back	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s
Fire class	A

CONSTRUCTION MATERIALS

Front and back cover (material / thickness)	low-iron semi-tempered glass / 2.5mm x 2
Cell (quantity / material / dimensions / number of busbar)	60 / monocrystalline silicon / 156.75mm x 156.75mm (±0.25mm) / 4 or 5
Frame	anodized aluminum alloy
Junction box (protection degree)	≥ IP67
Cable (length / cross-sectional area)	200mm / 4mm ²
Plug connector (type / protection degree)	RH 05-B / IP67 or LSC-R1 / IP68 or LSC-R4 / IP68

* Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
* The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

QUALIFICATIONS & CERTIFICATES

IEC 61215, IEC 61730, CE, ISO 9001:2008, ISO 14001:2004,
BS OHSAS 18001:2007, SA 8000



© Yingli Green Energy Holding Co., Ltd.

DS_PANDA BIFACIAL 60CF_EU_EN_20180615_V04

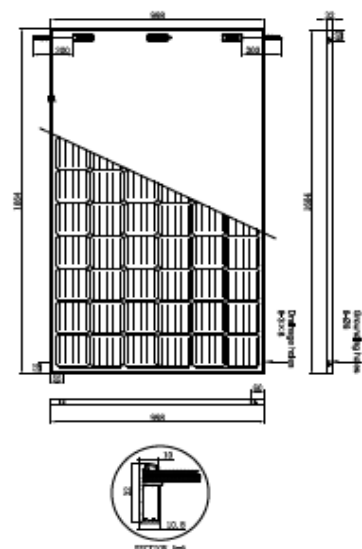
GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	1664mm / 998mm / 32mm
Weight	24.5kg

PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per pallet	32
Number of pallets per 40' container	26
Packaging pallets dimensions (L / W / H)	1730mm / 1160mm / 1165mm
Pallet weight	829kg

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User Manual in its entirety before handling, installing and operating Yingli Solar modules.

Yingli Partners:

Yingli Green Energy Holding Co., Ltd.

service@yingli.com

Tel: +86-312-2188055

YINGLISOLAR.COM



ANEXO 2: Datasheet de Inversor HUAWEI SUN2000 2-KTL-L1

Smart Energy Controller



Active Safety

AI Powered
Active Arcing Protection



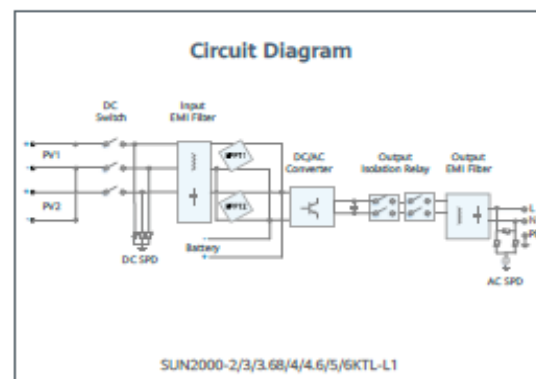
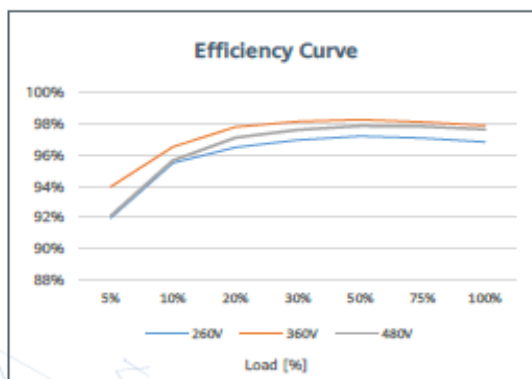
Higher Yields

Up to 30% More
Energy with Optimizer



2x POWER Battery Ready

5KW AC Output plus
5KW Battery Charge



SOLAR.HUAWEI.COM/EU/

SUN2000-2/3/3.68/4/4.6/5/6KTL-L1
Technical Specification

Technical Specification	SUN2000 -2KTL-L1	SUN2000 -3KTL-L1	SUN2000 -3.68KTL-L1	SUN2000 -4KTL-L1	SUN2000 -4.6KTL-L1	SUN2000 -5KTL-L1	SUN2000 -6KTL-L1
Efficiency							
Max. efficiency	98.2 %	98.3 %	98.4 %	98.4 %	98.4 %	98.4 %	98.4 %
European weighted efficiency	96.7 %	97.3 %	97.3 %	97.5 %	97.7 %	97.8 %	97.8 %
Input (PV)							
Recommended max. PV power ¹	3,000 Wp	4,500 Wp	5,520 Wp	6,000 Wp	6,900 Wp	7,500 Wp	9,000 Wp
Max. input voltage	600 V ²						
Start-up voltage	100 V						
MPPT operating voltage range	90 V – 560 V ³						
Rated input voltage	360 V						
Max. input current per MPPT	12.5 A						
Max. short-circuit current	18 A						
Number of MPP trackers	2						
Max. input number per MPP tracker	1						
Input (DC Battery)							
Compatible Battery	LG Chem RESU 7H_R / 10H_R						
Operating voltage range	350 – 450 Vdc						
Max operating current	10 A @7H_R / 15 A @10H_R						
Max charge power	3,500 W @7H_R / 5,000 W @10H_R						
Max discharge Power @7H_R	2,200 W	3,300 W	3,500 W	3,500 W	3,500 W	3,500 W	3,500 W
Max discharge Power @10H_R	2,200 W	3,300 W	3,680 W	4,400 W	4,600 W	5,000 W	5,000 W
Input (DC Battery)							
Compatible Battery	HUAWEI Smart LUNA2000 ESS Battery 5kWh – 30kWh						
Operating voltage range	350 – 560 Vdc						
Max operating current	15 A						
Max charge Power	5,000 W ⁴						
Max discharge Power	2,200 W	3,300 W	3,680 W	4,400 W	4,600 W	5,000 W	5,000 W
Output (On Grid)							
Grid connection	Single phase						
Rated output power	2,000 W	3,000 W	3,680 W	4,000 W	4,600 W	5,000 W ⁴	6,000 W
Max. apparent power	2,200 VA	3,300 VA	3,680 VA	4,400 VA	5,000 VA ⁴	5,500 VA ⁴	6,000 VA
Rated output voltage	220 Vac / 230 Vac / 240 Vac						
Rated AC grid frequency	50 Hz / 60 Hz						
Max. output current	10 A	15 A	16 A	20 A	23 A ⁷	25 A ⁷	27.3 A
Adjustable power factor	0.8 leading ... 0.8 lagging						
Max. total harmonic distortion	≤ 3 %						
Output (Off Grid)							
Backup Box (Optional)	Backup Box – B0						
Maximum apparent power	2,000 VA	3,000 VA	3,680 VA	4,000 VA	4,600 VA	5,000 VA	5,000 VA
Rated output voltage	220 V / 230 V						
Maximum output current	9.1 A	13.6 A	16.7 A	18.2 A	20.9 A	22.7 A	22.7 A
Power factor range	0.8 leading ... 0.8 lagging						

¹ Inverter max input PV power is 10,000 Wp when long strings are designed and fully connected with SUN2000-450W-P power optimizers.

² The maximum input voltage and operating voltage upper limit will be reduced to 495 V when inverter connects and works with LG battery.

³ 2,500 W @ 5kWh HUAWEI ESS battery

⁴ AS4777-2: 4,991W; *S: VDE-AR-N 4105: 4,500VA; / AS4777-2: 4,999VA; *S: AS4777-2: 4,999VA; / C10/11: 5,000VA; *7: AS4777-2: 21.7A.

Version No.04- (20201006)

SOLAR.HUAWEI.COM/EU/

SUN2000-2/3/3.68/4/4.6/5/6KTL-L1
Technical Specification

Technical Specification	SUN2000 -2KTL-L1	SUN2000 -3KTL-L1	SUN2000 -3.68KTL-L1	SUN2000 -4KTL-L1	SUN2000 -4.6KTL-L1	SUN2000 -5KTL-L1	SUN2000 -6KTL-L1 ¹
Protection & Feature							
Anti-islanding protection	Yes						
DC reverse polarity protection	Yes						
Insulation monitoring	Yes						
DC surge protection	Yes, compatible with TYPE II protection class according to EN/IEC 61643-11						
AC surge protection	Yes, compatible with TYPE II protection class according to EN/IEC 61643-11						
Residual current monitoring	Yes						
AC overcurrent protection	Yes						
AC short-circuit protection	Yes						
AC overvoltage protection	Yes						
Over-heat protection	Yes						
Arc fault protection	Yes						
Battery reverse charging from grid	Yes						
General Data							
Operating temperature range	-25 ~ +60 °C						
Relative operating humidity	0 %RH – 100 %RH						
Max. operating altitude	4,000 m (13,123 ft.) (Derating above 2000 m)						
Cooling	Natural convection						
Display	LED indicators; Integrated WLAN + FusionSolar APP						
Communication	RS485, WLAN via Inverter built-in WLAN module Ethernet via Smart Dongle-WLAN-FE (Optional); 4G / 3G / 2G via Smart Dongle-4G (Optional)						
Weight (incl. mounting bracket)	12.0 kg (26.5 lb)						
Dimension (incl. mounting bracket)	365mm * 365mm * 156 mm (14.4 x 14.4 x 6.1 inch)						
Degree of protection	IP65						
Nighttime power consumption	< 2.5 W						
Optimizer Compatibility							
DC MBUS compatible optimizer	SUN2000-450W-P						
Standard Compliance (more available upon request)							
Safety	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2						
Grid connection standards	G98, G99, EN 50549-1, CEI 0-21, VDE-AR-N-4105, AS 4777.2, C10/11, ABNT, UTE C15-712, RD 1699, TOR D4, IEC61727 IEC62116						

Version No.04-(20201006)

SOLAR.HUAWEI.COM/EU/

ANEXO 3: Datasheet de Optimizador HUAWEI SUN2000 450W**Smart PV Optimizer**

One-Fits-All Optimizer
Easier Business



<1.5 min Pairing with Inverter



<5s Module Auto-Mapping



Arc Fault Pinpoint
Positioning

Technical Specification	SUN2000-450W-P
Input	
Rated Input DC Power ¹	450 W
Absolute maximum input voltage	80 V
MPPT operating voltage range	8 ~ 80 V
Maximum Short Circuit Current (Isc)	13 A
Max. efficiency	99.5 %
Weighted efficiency	99.0 %
Overvoltage category	II
Output	
Max. output voltage	80 V
Max. output current	15 A
Output bypass ²	Yes
Shutdown output voltage per optimizer ³	0 V
Shutdown output impedance per optimizer	1k ohm ± 10 %
Standard Compliance	
Safety	IEC62109-1 (class II safety)
RoHS	Yes
General Data	
Dimension (W x H x D)	71 x 138 x 25 mm (2.8 x 5.4 x 1.0 inch)
Weight (including cables)	0.55 kg (1.2 lb.)
Installation part (optional)	Grounding Plate, Grounding Lug, PV Module Frame Plate
Input connector	MC4
Output connector	MC4
Output wire length	1.2 m (3.9 ft.) ⁴
Operating temperature / humidity range	-40 °C ~ 85 °C ⁵ / 0 %RH ~ 100 %RH
Degree of protection	IP68
Compatible product	SUN2000-2/3/3.68/4/4.6/5/6KTL-L1, SUN2000-3/4/5/6/8/10KTL-M1, SUN2000-12/15/17/20KTL-M2

Long String Design (Full Optimizer)	SUN2000-2-6KTL-L1	SUN2000-3-10KTL-M1	SUN2000-12-20KTL-M2
Minimum optimizer number per string	4	6	6
Maximum optimizer number per string	25	50	50
Maximum DC power per string	5,000 W	10,000 W	10,000 W

¹ Rated power of the module at STC shall not exceed "Rated Input DC Power" of power optimizer. Modules with power up to +5% power tolerance are acceptable.

² Power optimizer is bypassed in the string connected to an operating inverter when it fails to work.

³ Power optimizer output 0Vdc when disconnecting to the inverter or inverter is shutdown.

⁴ Fits PV module in landscape and portrait installation.

⁵ Full power capability refers to online smart design tool.

Version No.:03-(20200409)

SOLAR.HUAWEI.COM/EU/

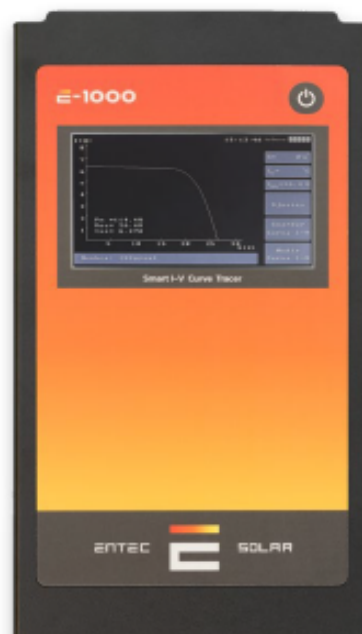
ANEXO 4: Trazador de Curvas I-V, ENTEC SOLAR E-1000

Trazador de curvas I-V, E-1000

Con el objetivo de Entec Solar de crear herramientas hardware para facilitar el trabajo de las personas, se ha desarrollado el trazador de curvas E-1000. El E-1000 ha sido desarrollado en colaboración con QPV (www.qpv.es), empresa especializada en auditorías y controles de calidad de grandes centrales fotovoltaicas, quien ha expuesto las necesidades actuales en la medida de curvas I-V en campo. La unión de la experiencia en desarrollo hardware de Entec y de la experiencia en medida de curvas I-V de QPV, ha resultado en el trazador de curvas I-V más rápido y novedoso del mercado y todo ello con una inigualable precisión en la medida.

Este instrumento de alta precisión permite la medida de hasta 200 curvas I-V por hora de trabajo, bien de módulos fotovoltaicos o strings de hasta 1000V y 20A. Además incorpora varios nuevos elementos como: un lector de código de barras para la identificación automática del módulo bajo ensayo y su posición en la instalación, una herramienta de generación automática de informes para reducir las horas de procesado, una opción de medida automática para liberar las manos del operario durante la conexión y desconexión de los paneles a medir, un sensor inalámbrico (E-Sens) con un rango de comunicación de cientos de metros para medir las condiciones de radiación y temperatura, una aplicación para teléfono móvil para controlar el aparato a distancia, y muchas más opciones que cambiarán su manera de llevar a cabo las campañas de medida de curvas I-V.

Además, mediante una conexión WiFi el E-1000 se sincroniza con los servidores de PVET® (www.pvet.es), facilitando el post-procesado de las campañas de medida, almacenando todas las medidas históricas, y permitiendo intercomparaciones y cruzado de datos para el diagnóstico de fallos en sus plantas.



Características principales

- El trazador de curvas más rápido del mercado. Permite medir hasta 200 curvas por hora.
- Inigualable precisión del 0,5% en el punto de máxima potencia y menor al 3% en el resultado final en condiciones estándar de medida (CEM).
- Medida a 4-puntas para una mejora de la precisión y evitar los errores en la caída de tensión en el cableado.
- Registra en un mismo fichero los datos de medida y el código de barras del módulo bajo ensayo con el accesorio de lector de código de barras.
- Genera automáticamente el informe de medidas al final del día, ahorrando así horas de procesado de datos.
- Equipo de reducidas dimensiones y peso para facilitar su manejo.
- Opción de mochila de transporte y medición automática para mantener las manos libres durante las medidas y aumentar el ritmo de trabajo.
- Mide curvas I-V de módulos o strings hasta 1000V y 20A según la norma IEC-61829.
- Extrapolación automática de las curvas a CEM mediante el uso del E-Sens, dotado de comunicación inalámbrica hasta 2 kilómetros, según la norma IEC-60891.
- Medida versátil y configurable de las condiciones de radiación y temperatura de célula mediante el E-Sens, i.e. célula de referencia estándar, módulos calibrados, PT-1000.
- Visualización y control mediante pantalla táctil a color o aplicación para teléfono móvil.



Especificaciones E-1000

Rango de voltaje de entrada	0-1000V
Rango de corriente de entrada	0.1-20A
Precisión	$\pm 0.3\%$ ± 2 dígitos (voltaje y corriente) $\pm 0.5\%$ $\pm 0.1W$ (potencia)
Resolución	15mV 0.3mA
Tiempo de medida	30-200ms (típico)
Tiempo del ciclo de medida	≤ 3 sg
Puntos de curva I-V	200
Temperatura de operación	-10 to +65°C
Duración de batería	10 horas en operación continua. (Más de 2000 curvas I-V)
Dimensiones	298x160x50mm
Peso	1.3kg
Protecciones	Sobre-tensión, sobre-corriente y polaridad inversa
Almacenamiento de datos y formato	Tarjeta SD 12KB por curva I-V en formato .csv
Seguridad eléctrica	CAT II- 1000V, EN-61010-1
Normas	Medida de curvas I-V según IEC-61829 Extrapolación a CEM según IEC-60891
Garantía	2 años sobre fallos de producto

Especificaciones E-Sens

Entradas	1 x medida de irradiancia 1 x PT1000 para célula de irradiancia 3 x PT1000 adicionales
Precisión en medida de tensión	$\pm 0.3\%$
Precisión de medida de temperatura	$\pm 0.3^\circ\text{C}$. Clase B
Resolución	0.45mV para el canal de 60V 0.015mV para el canal de 2 V
Intervalo de medida	1 segundo para el canal de irradiancia 2 segundos para todos los otros canales
Distancia de enlace inalámbrico	Varios cientos de metros y hasta 2 km
Frecuencia de enlace inalámbrico	433MHz, (915Mhz para E.E.U.U.)
Temperatura de operación	-10 to +65°C
Duración de la batería	10 horas de operación
Dimensiones	195x95x29mm
Peso	265 gramos
Protecciones	Sobre-tensión y polaridad inversa
Almacenamiento de datos y formato	Tarjeta micro-SD
Seguridad eléctrica	EN-61010-1
Garantía	2 años sobre fallos de producto

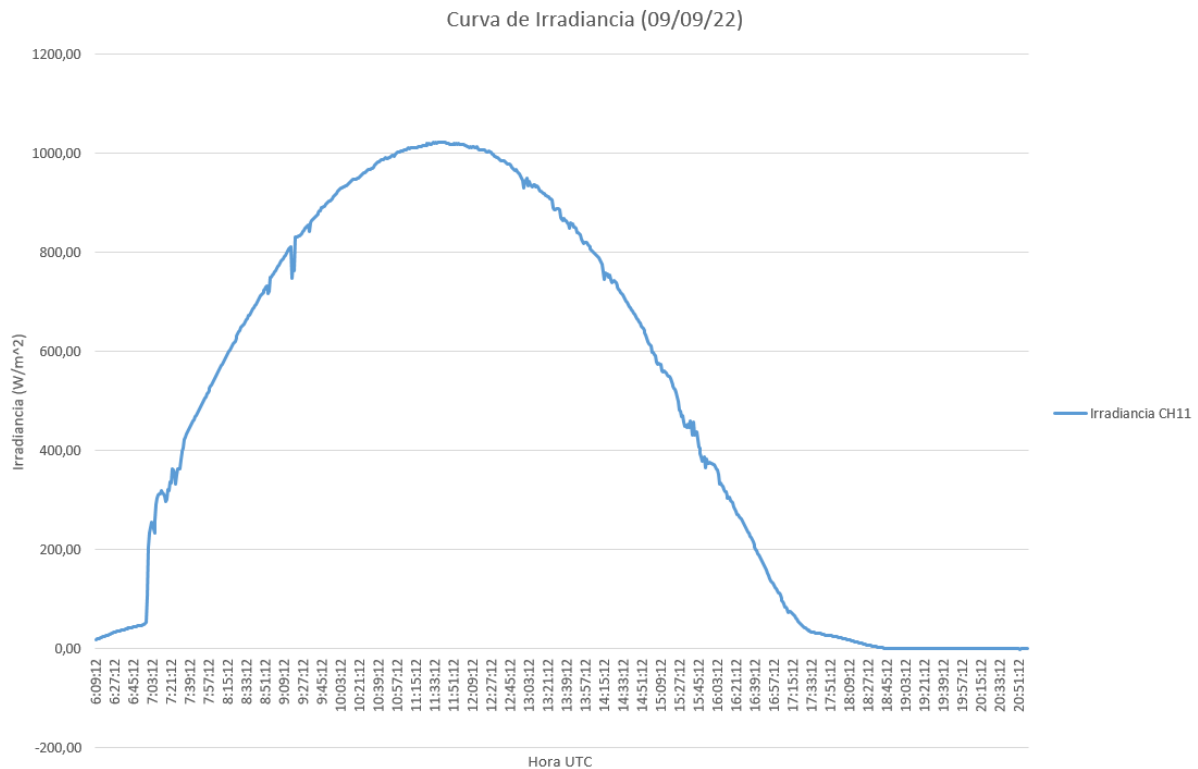
**ANEXO 5: Curvas de Irradiancia Frontal de Días Seleccionados con
Condiciones de Irradiancia Adecuadas**

Figura 54. Curva de Irradiancia (09/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

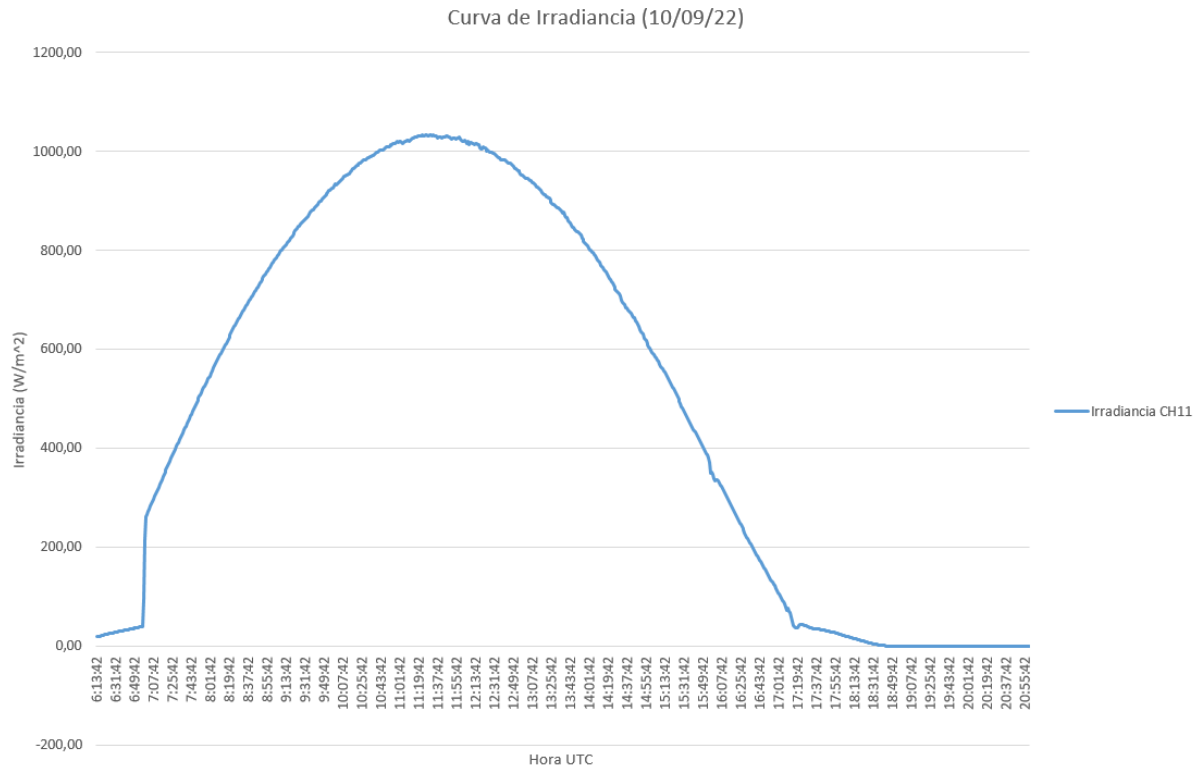


Figura 55. Curva de Irradiancia (10/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

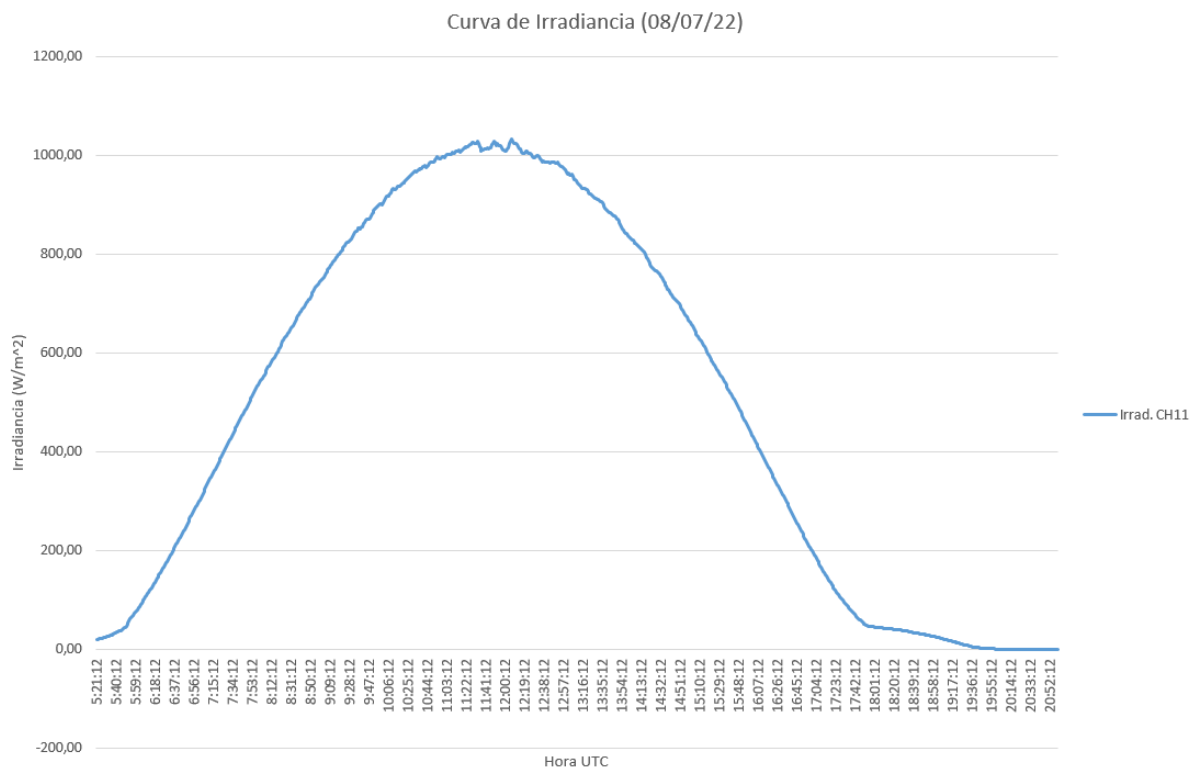


Figura 56. Curva de Irradiancia (08/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

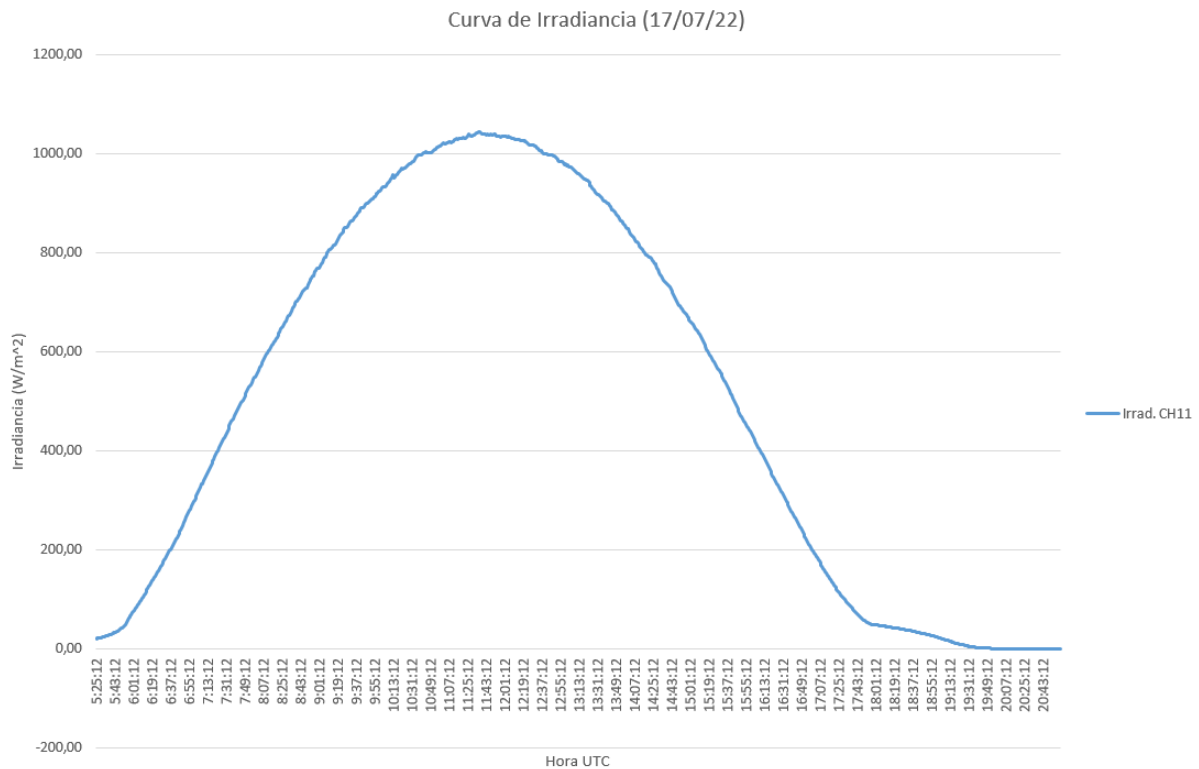


Figura 57. Curva de Irradiancia (17/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

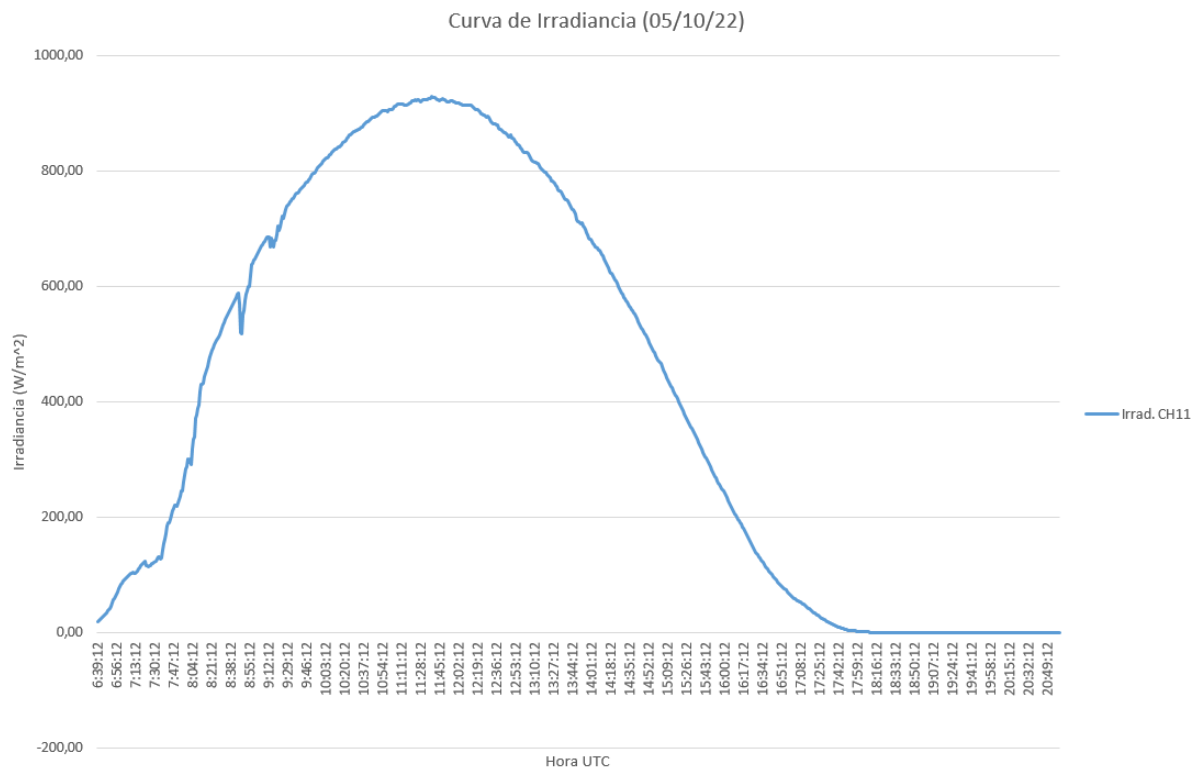


Figura 58. Curva de Irradiancia (05/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

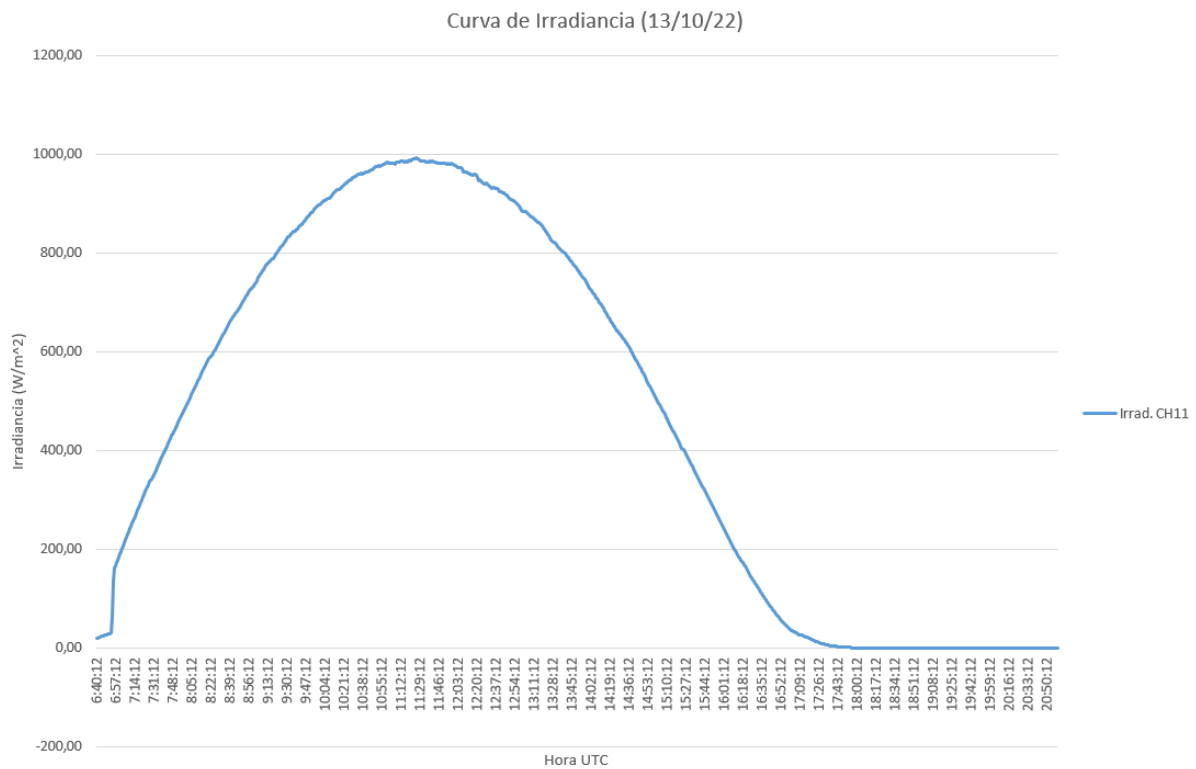


Figura 59. Curva de Irradiancia (13/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

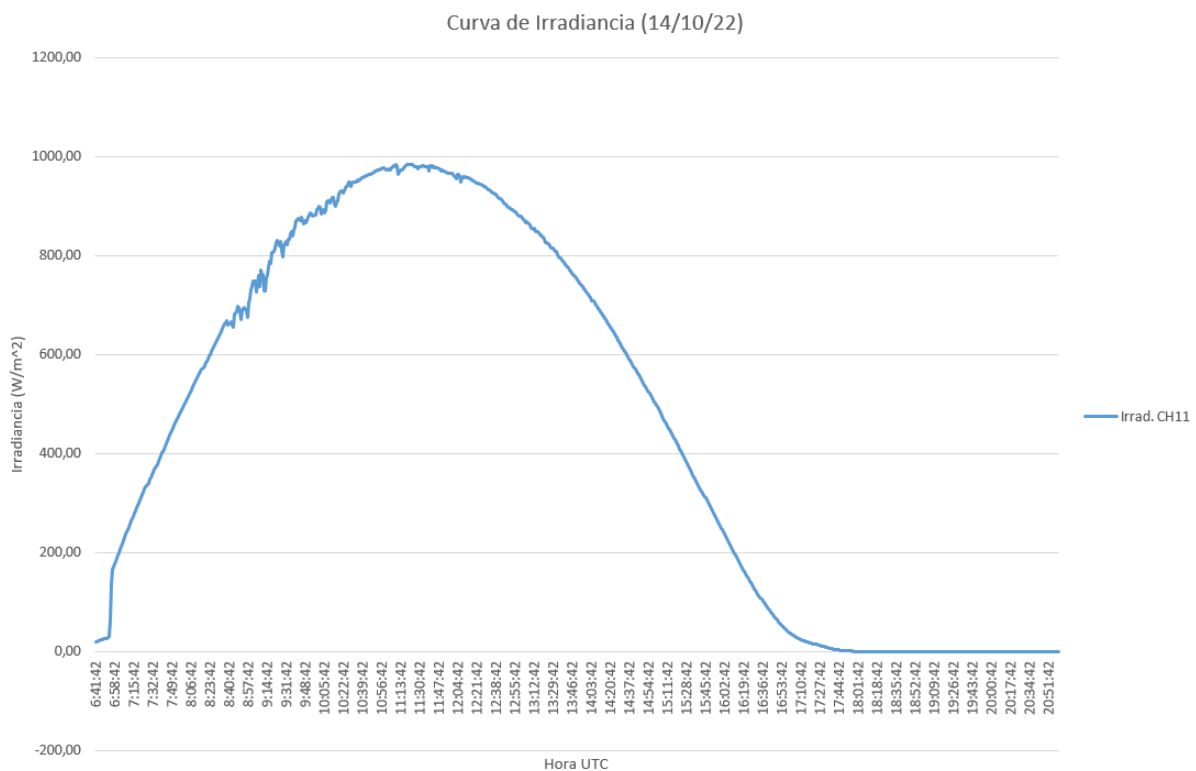


Figura 60. Curva de Irradiancia (14/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

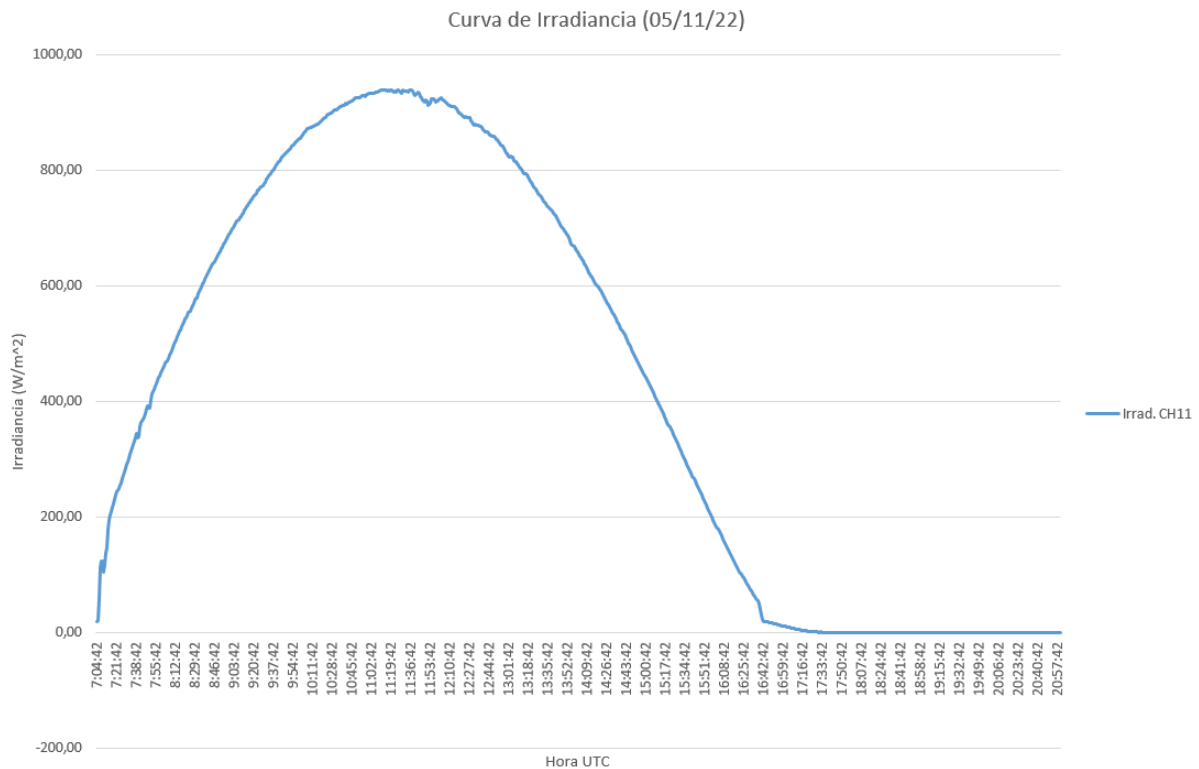


Figura 61. Curva de Irradiancia (05/11/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

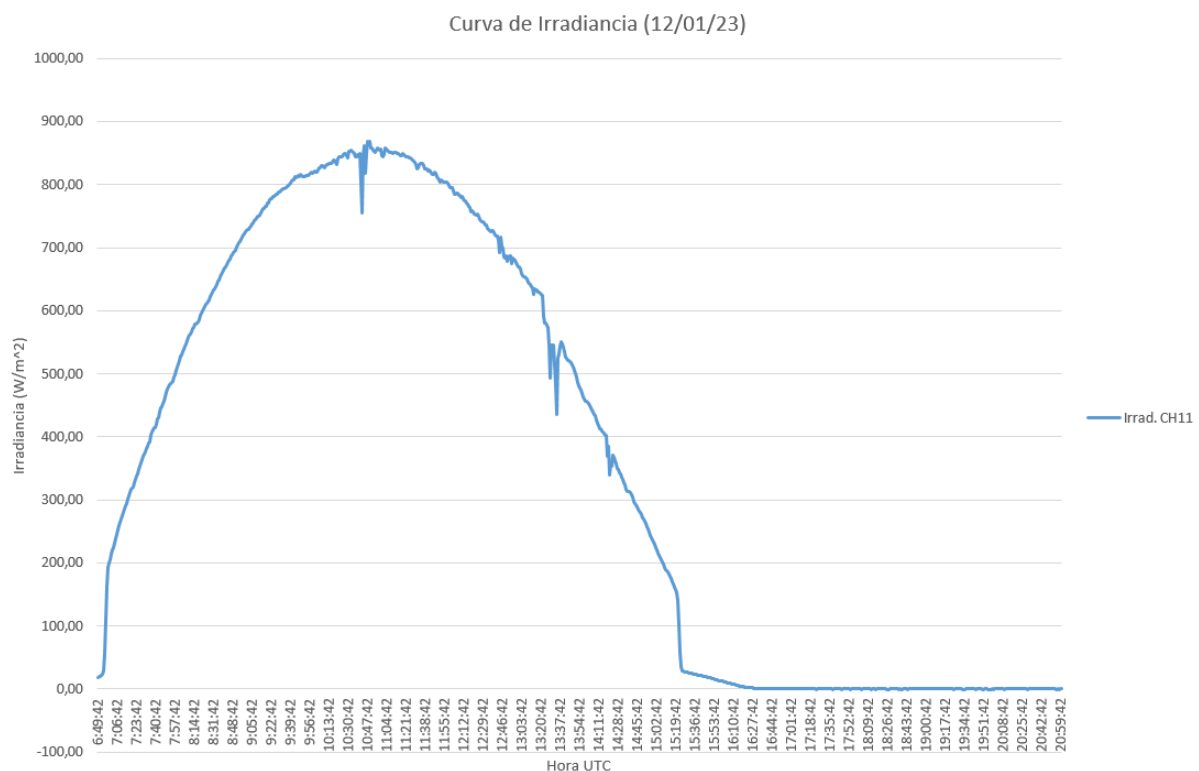


Figura 62. Curva de Irradiancia (12/01/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

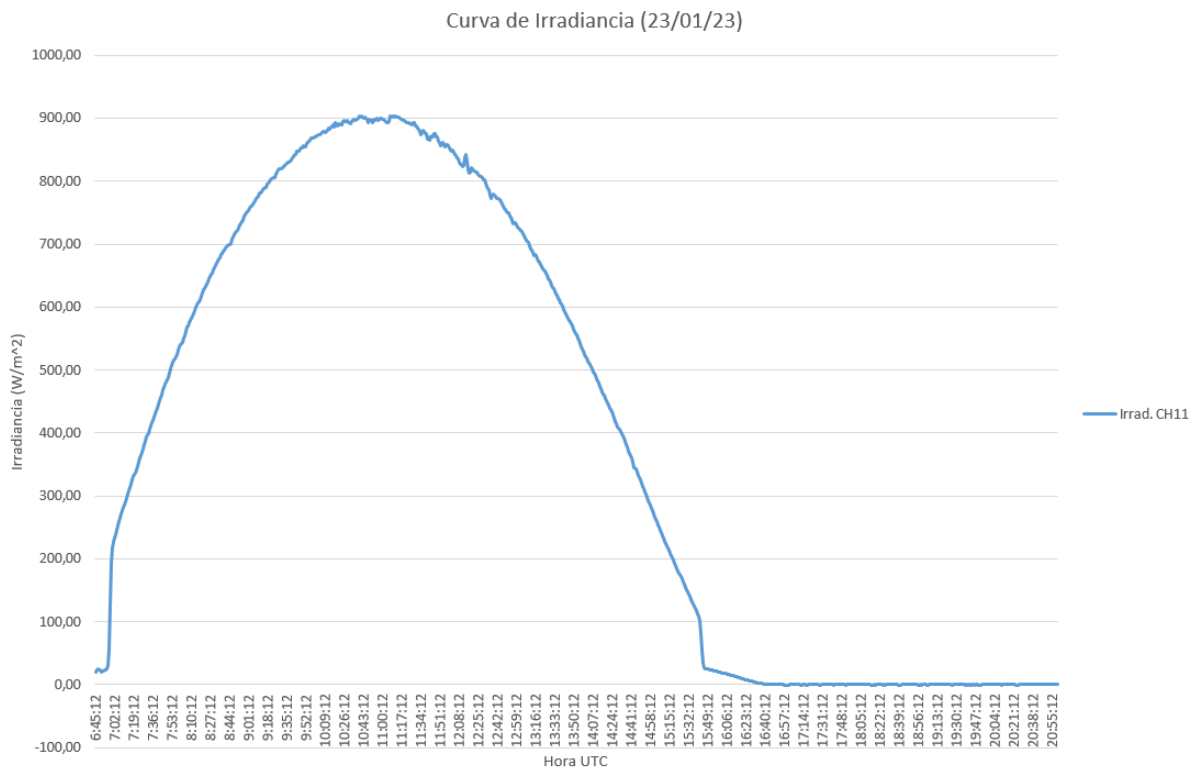


Figura 63. Curva de Irradiancia (23/01/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

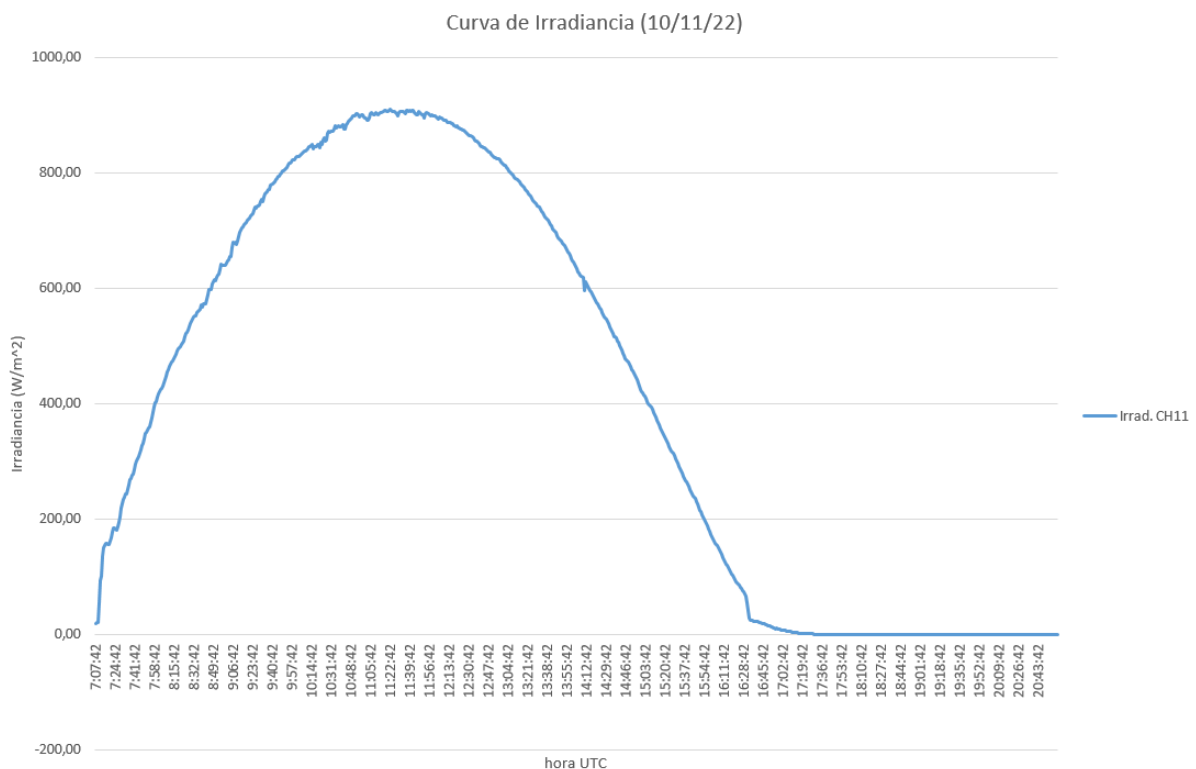


Figura 64. Curva de Irradiancia (10/11/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

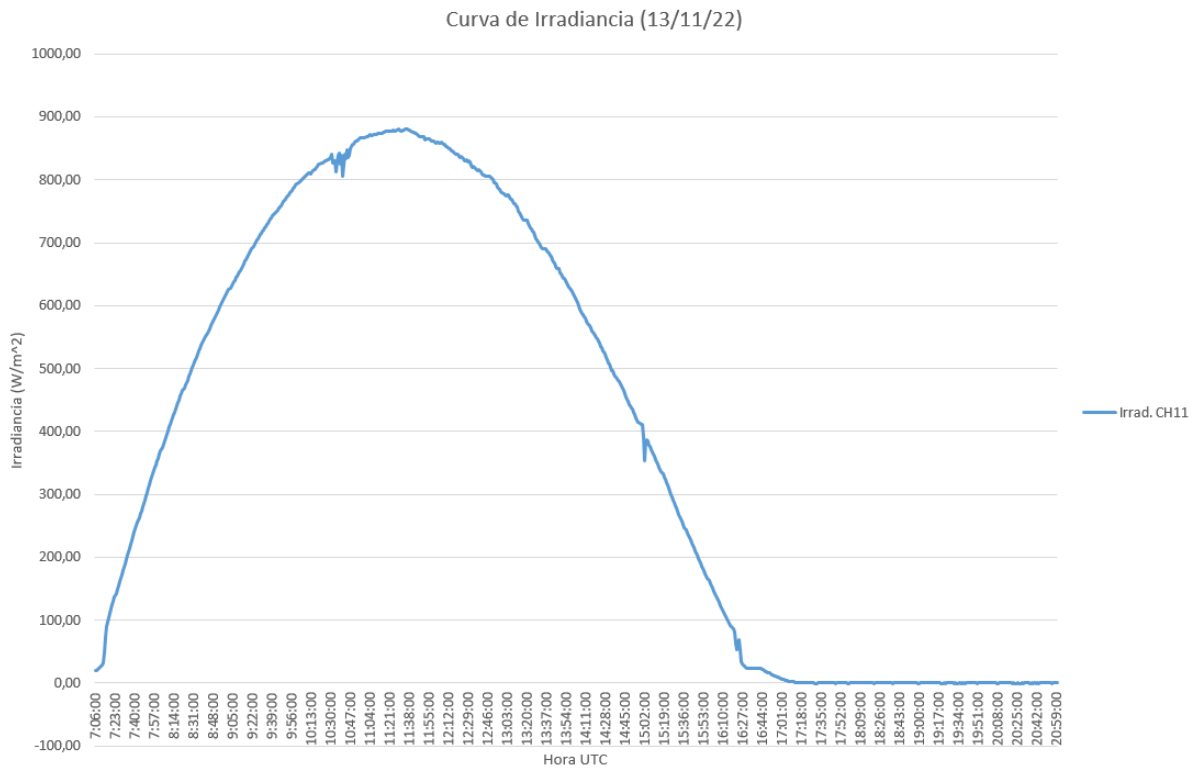


Figura 65. Curva de Irradiancia (13/11/22) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

ANEXO 6: Gráficas Comparativas de Generación de Energía y Ganancia Bifacial

Energía Generada para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

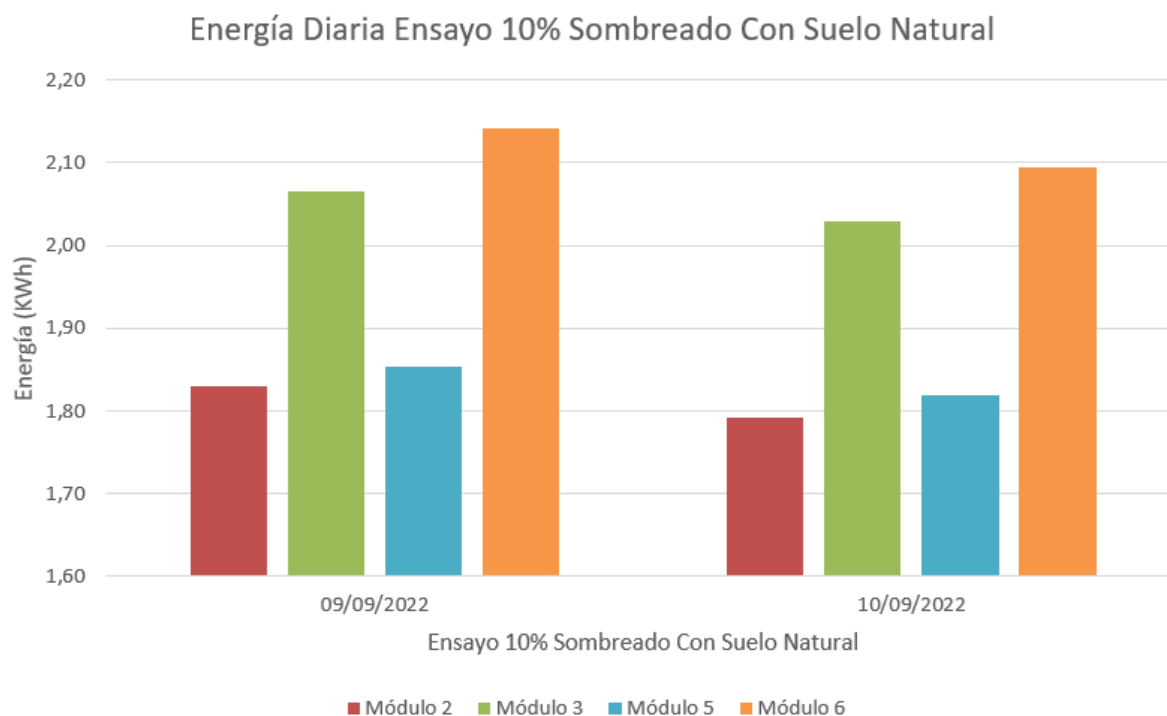


Figura 66. Energía Diaria (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

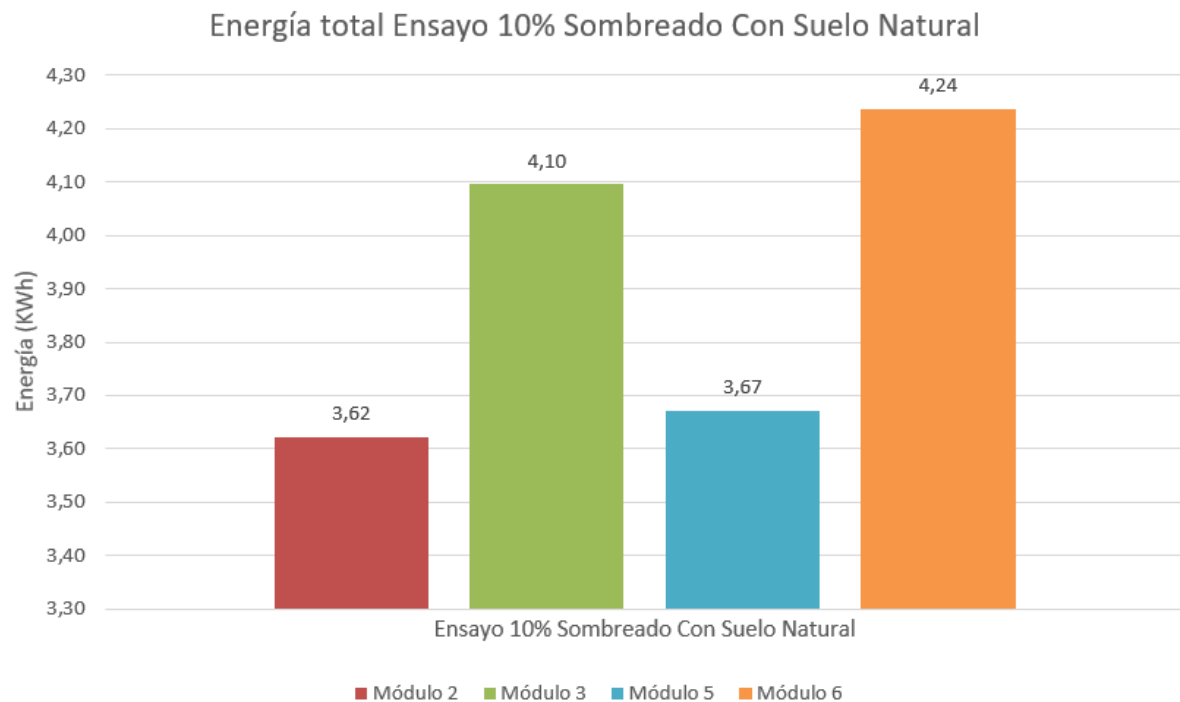


Figura 67. Energía Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

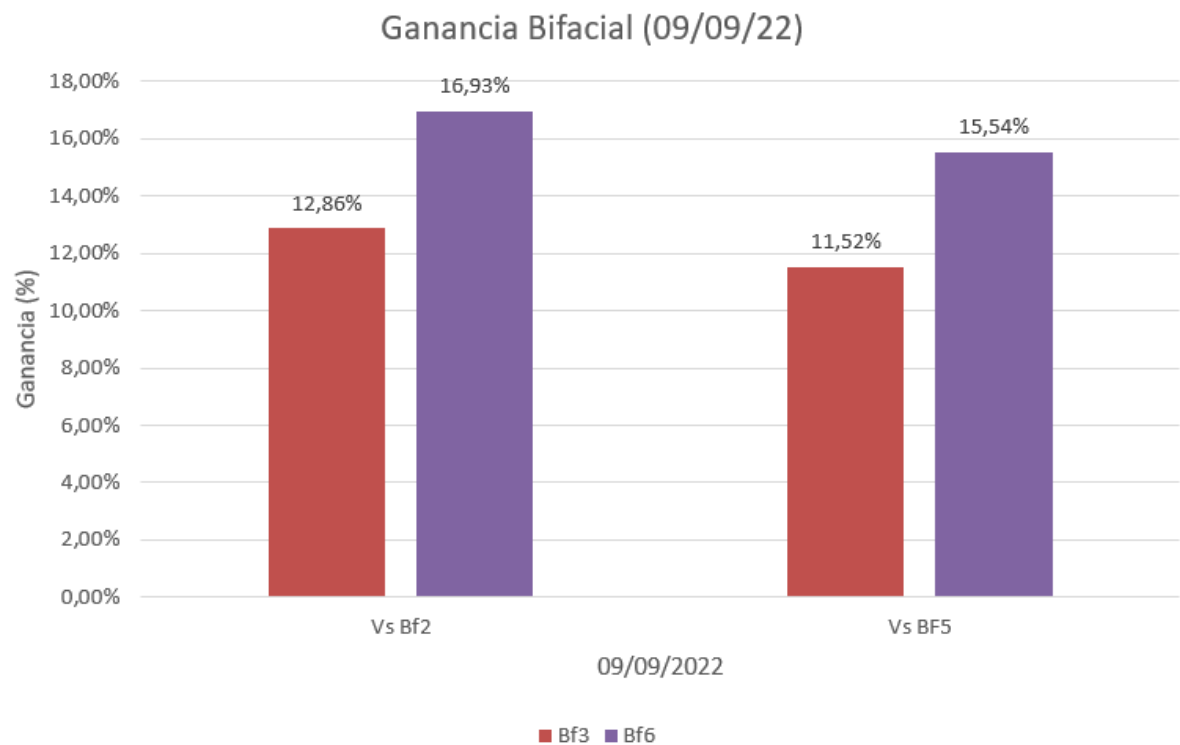


Figura 68. Ganancia Bifacial (09/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

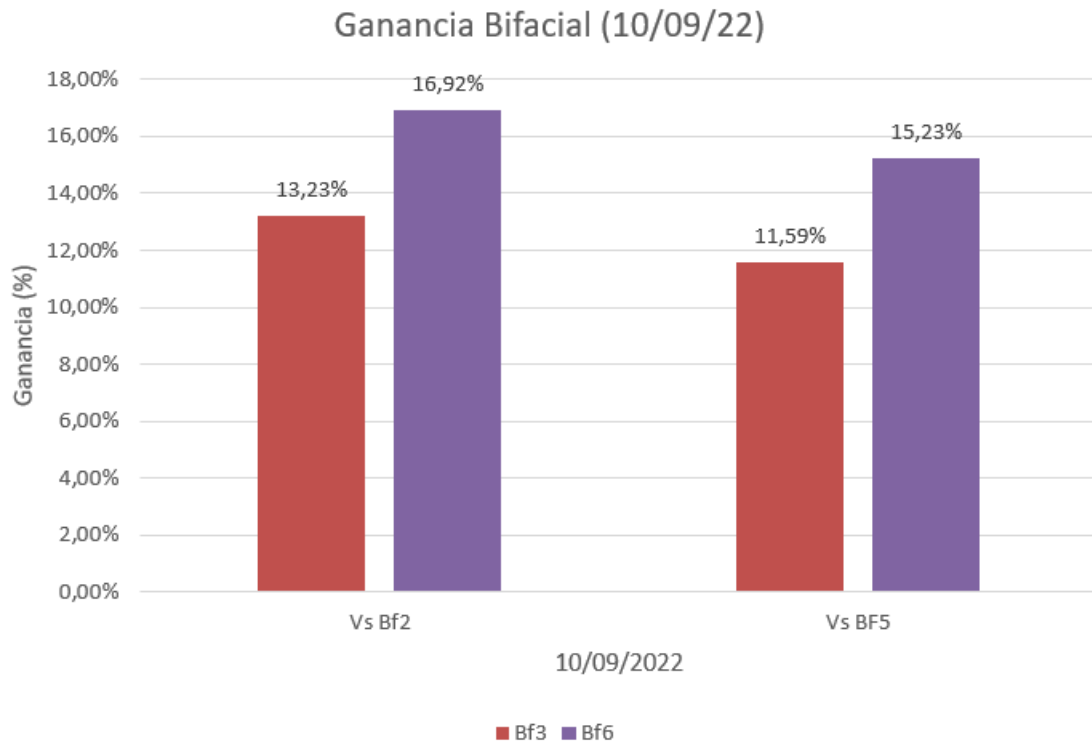


Figura 69. Ganancia Bifacial (10/09/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

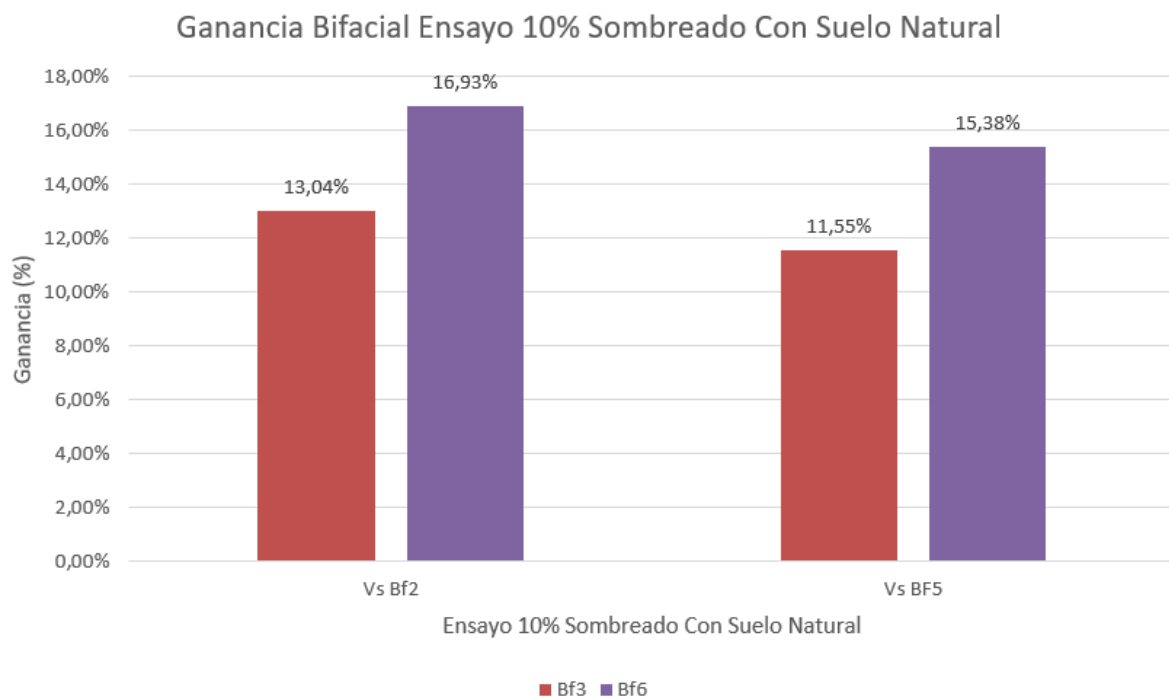


Figura 70. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

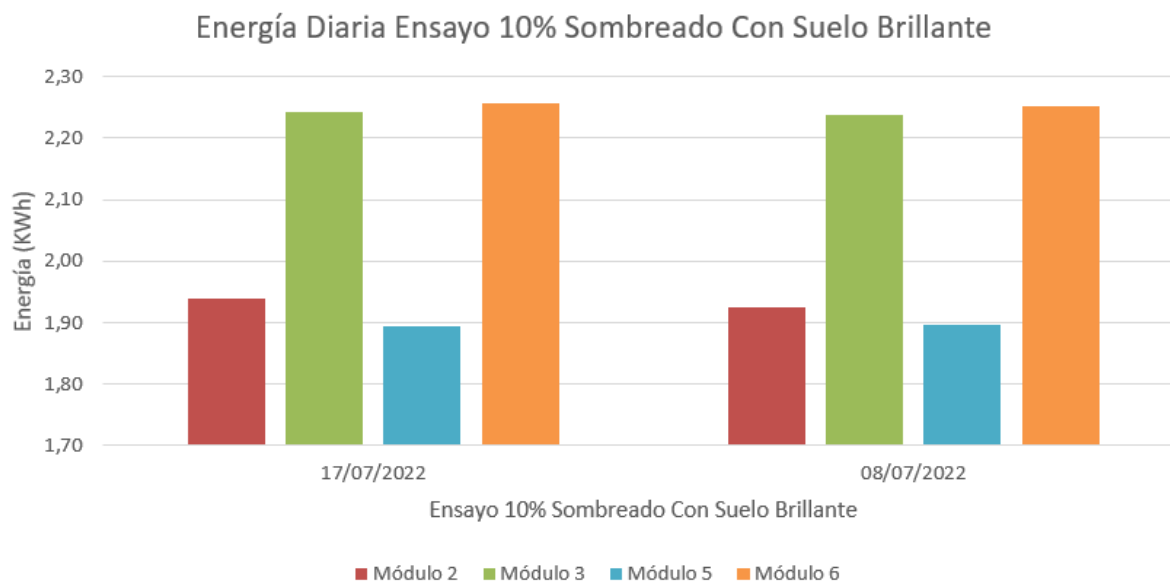
Energía Generada para Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

Figura 71. Energía Diaria (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

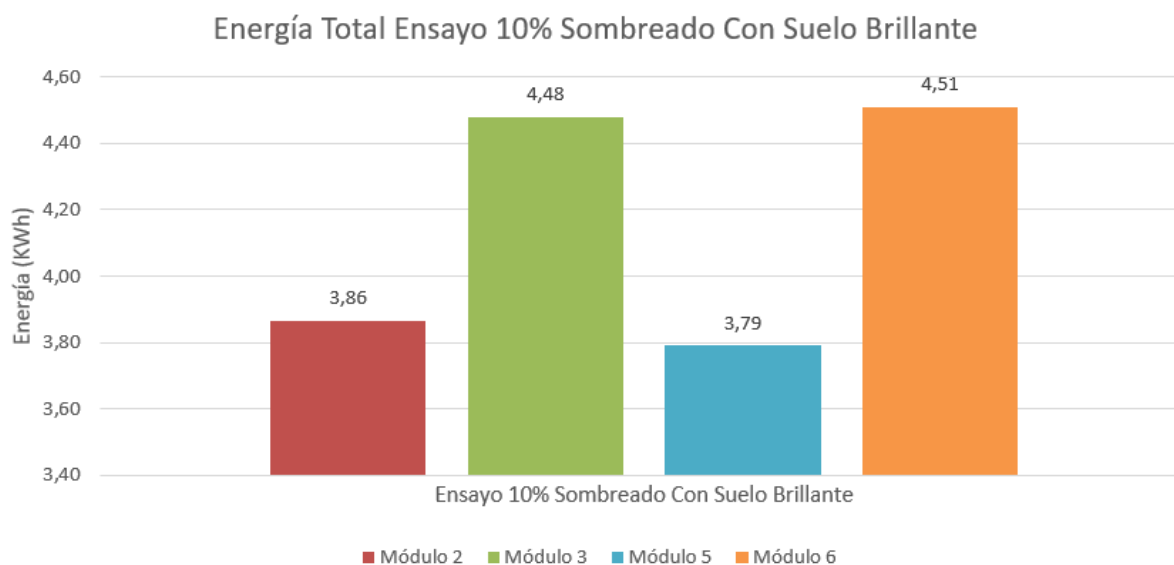


Figura 72. Energía Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

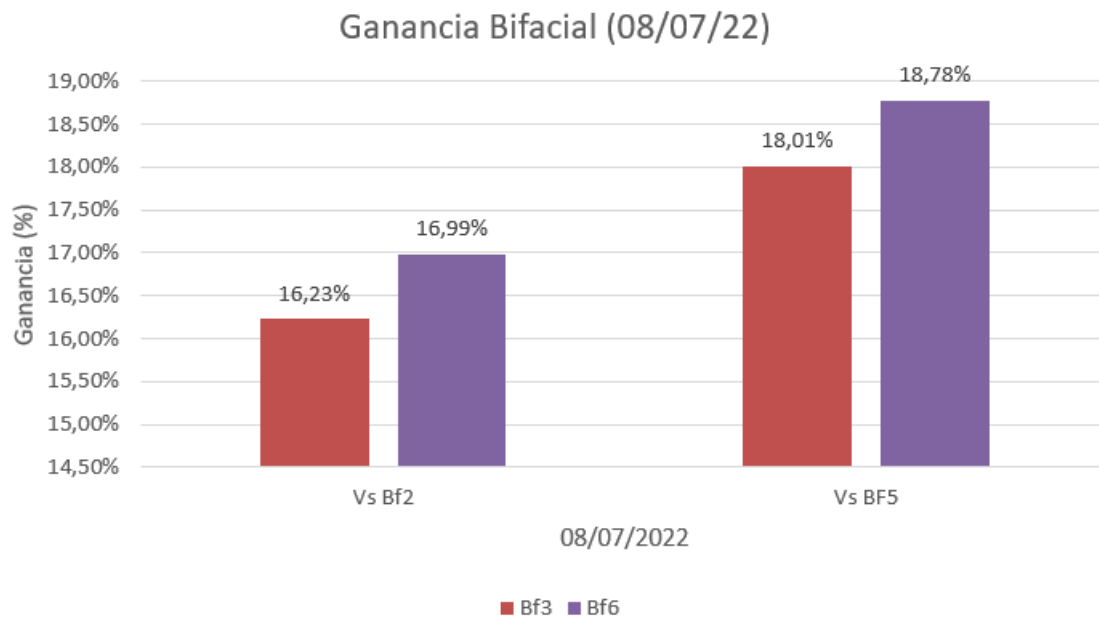


Figura 73. Ganancia Bifacial (08/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

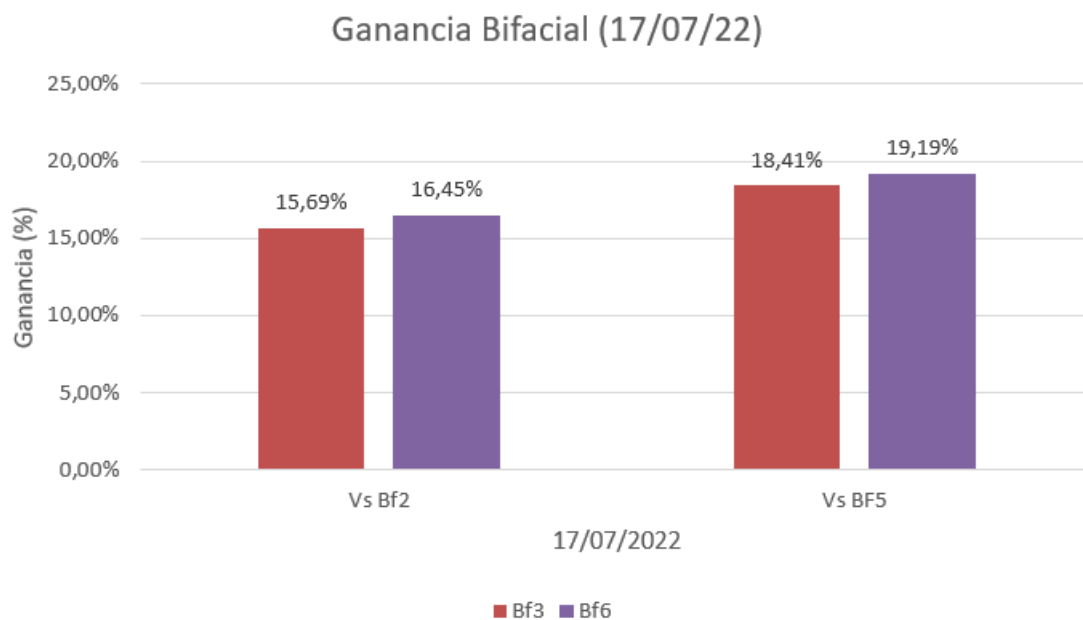


Figura 74. Ganancia Bifacial (17/07/22) Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

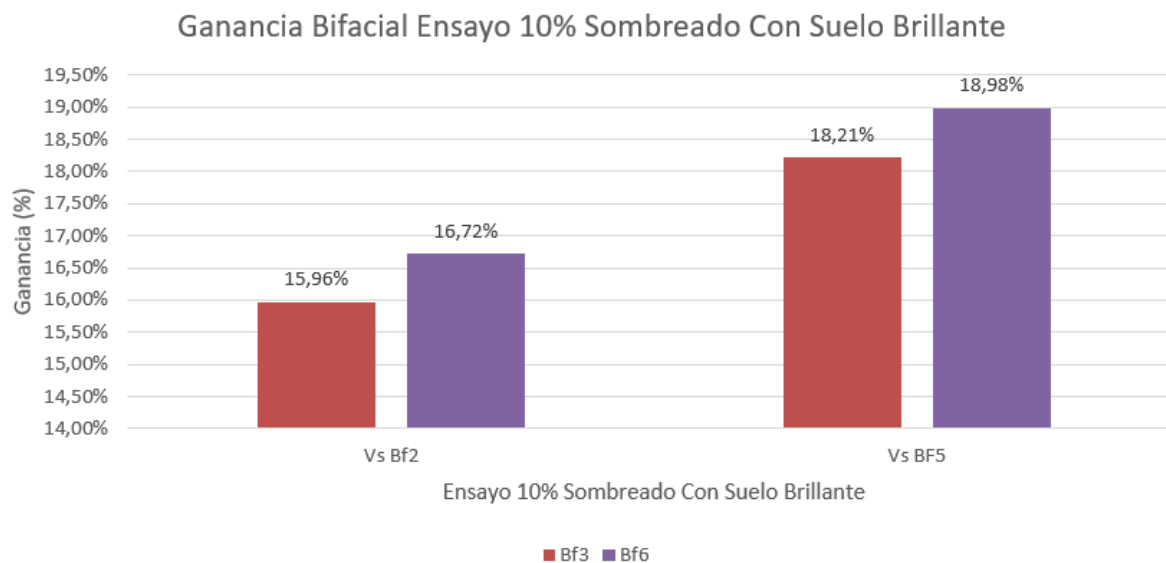


Figura 75. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

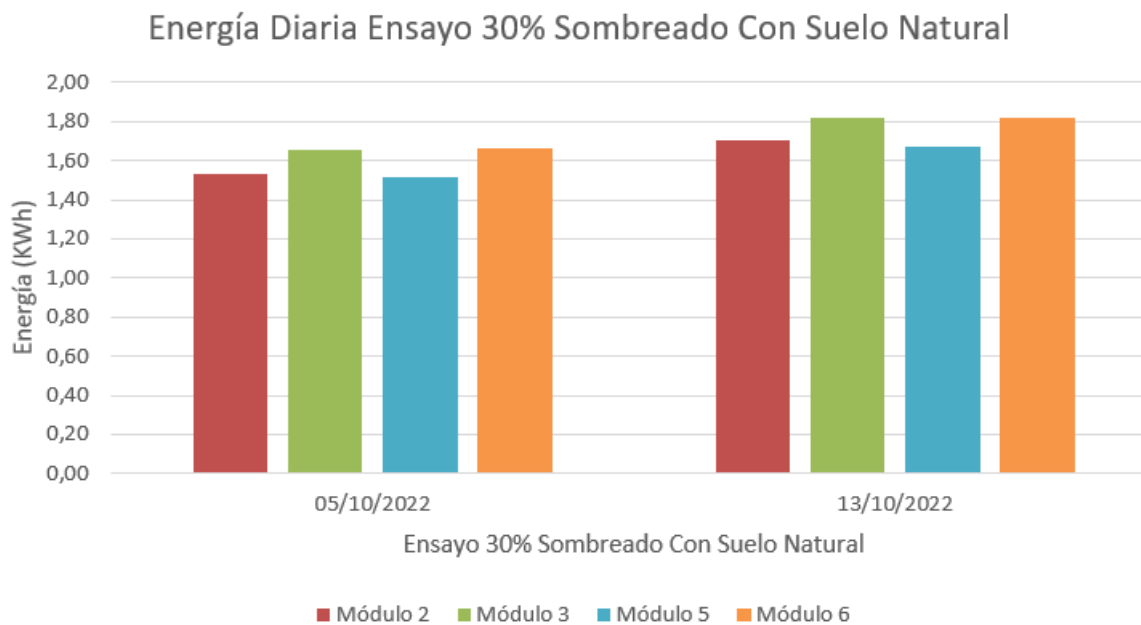
Energía Generada para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

Figura 76. Energía Diaria (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

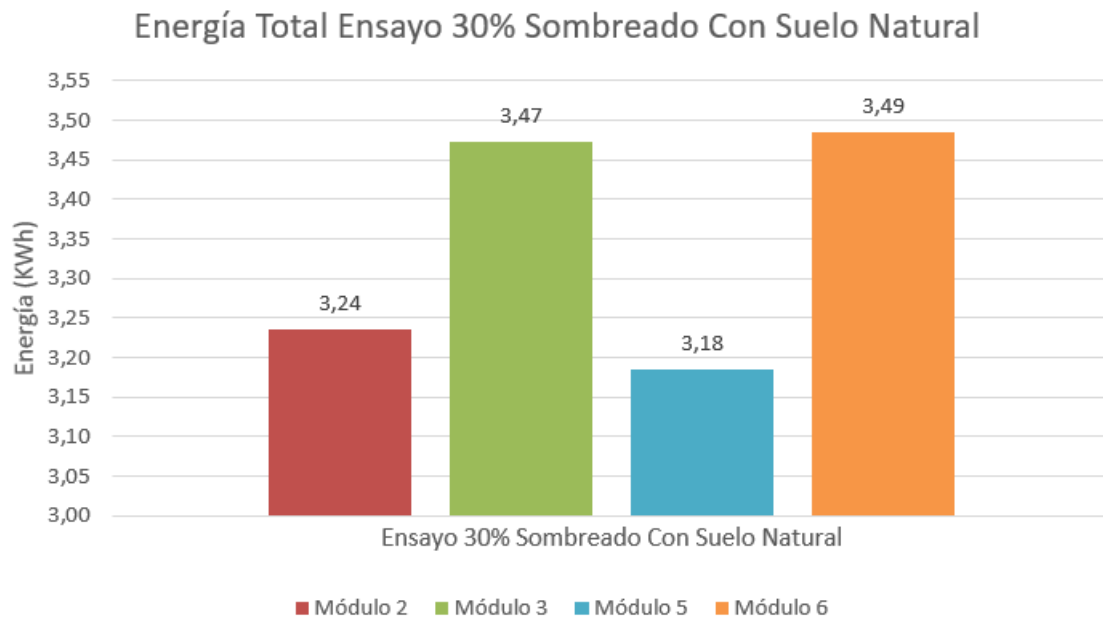


Figura 77. Energía Total (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

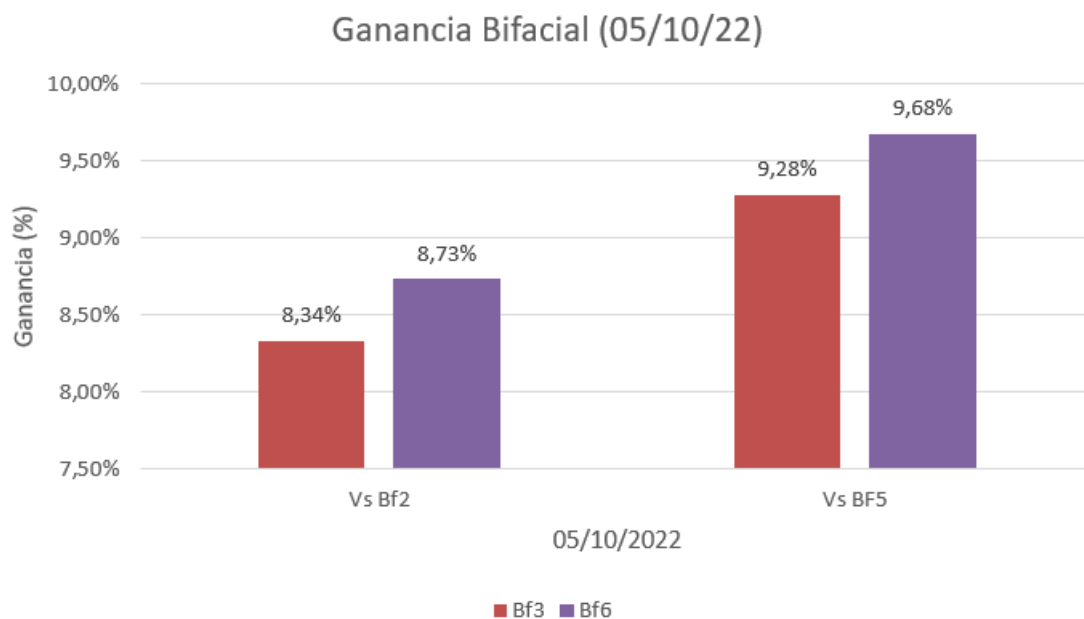


Figura 78. Ganancia Bifacial (05/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

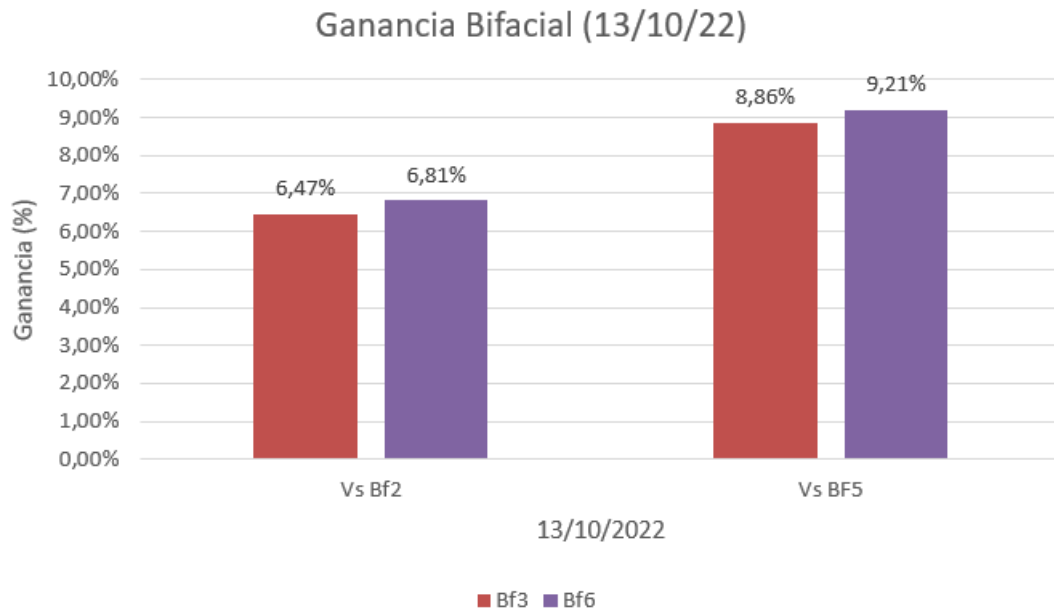


Figura 79. Ganancia Bifacial (13/10/22) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

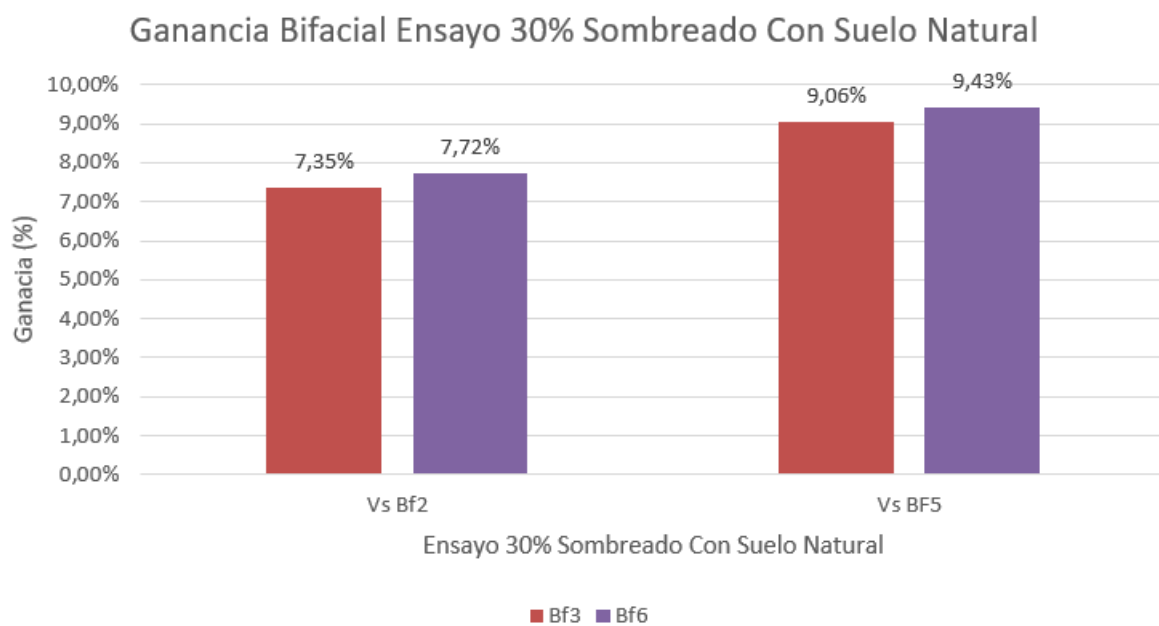


Figura 80. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

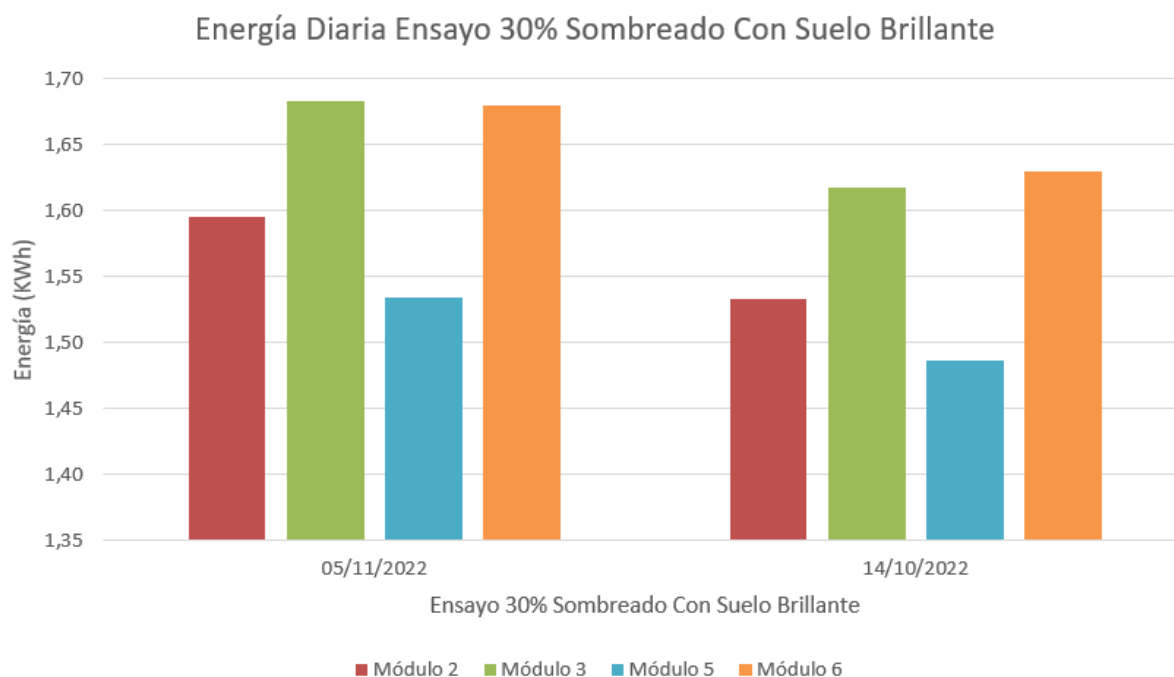
Energía Generada para Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

Figura 81. Energía Diaria (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

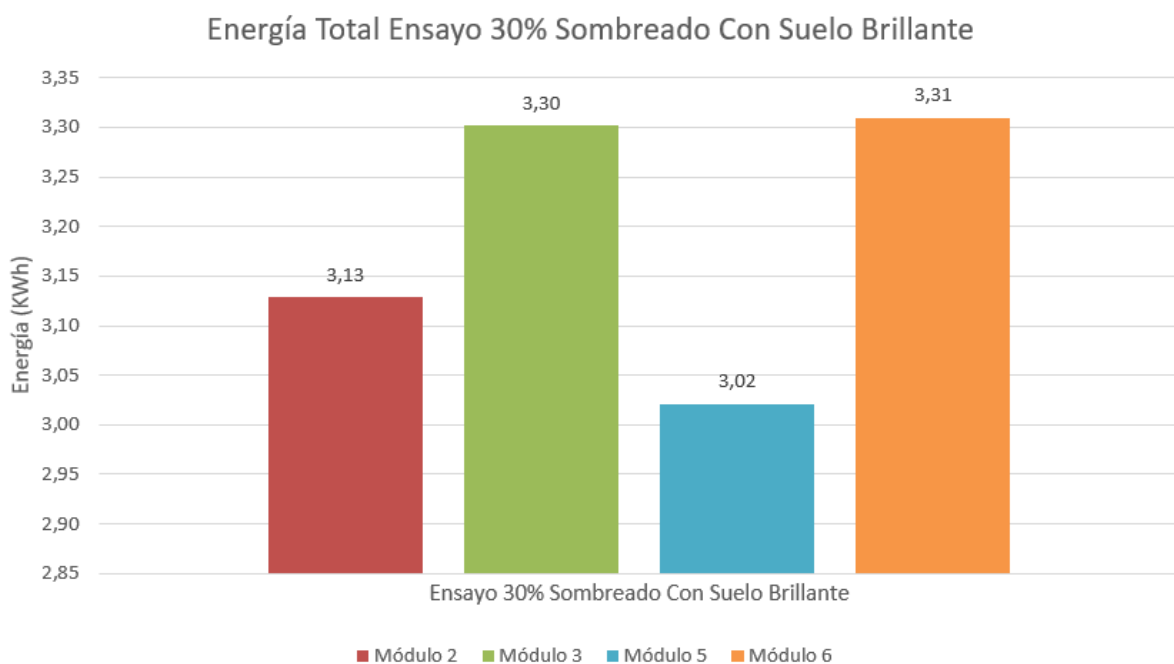


Figura 82. Energía Total (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

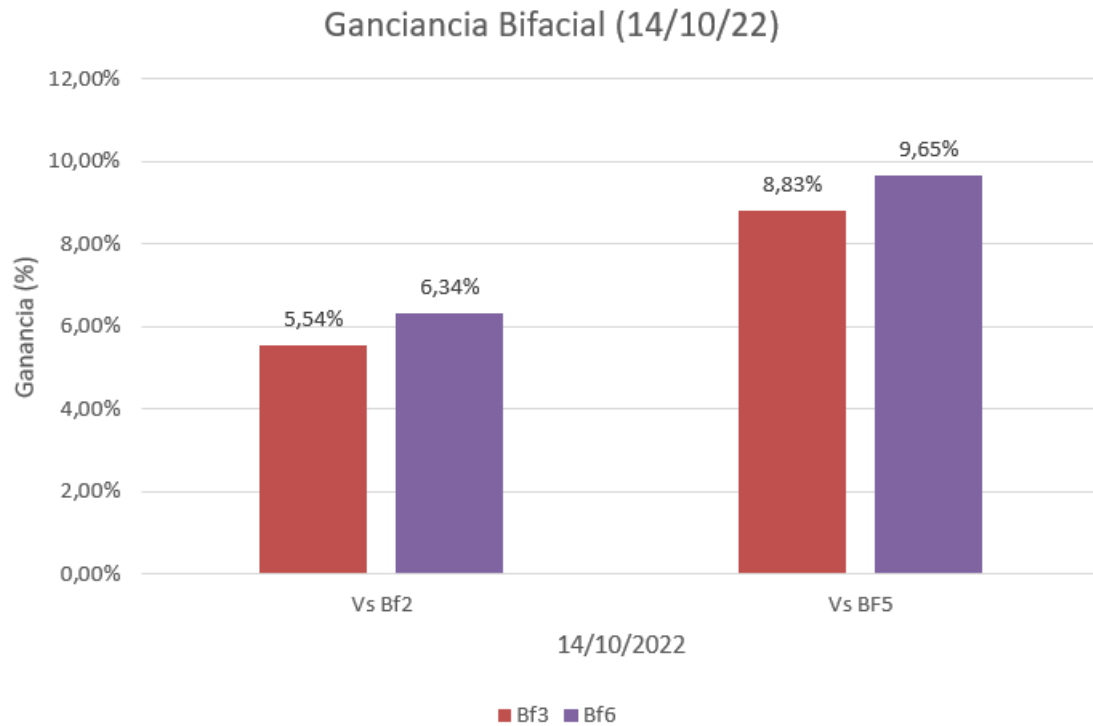


Figura 83. Ganancia Bifacial (14/10/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

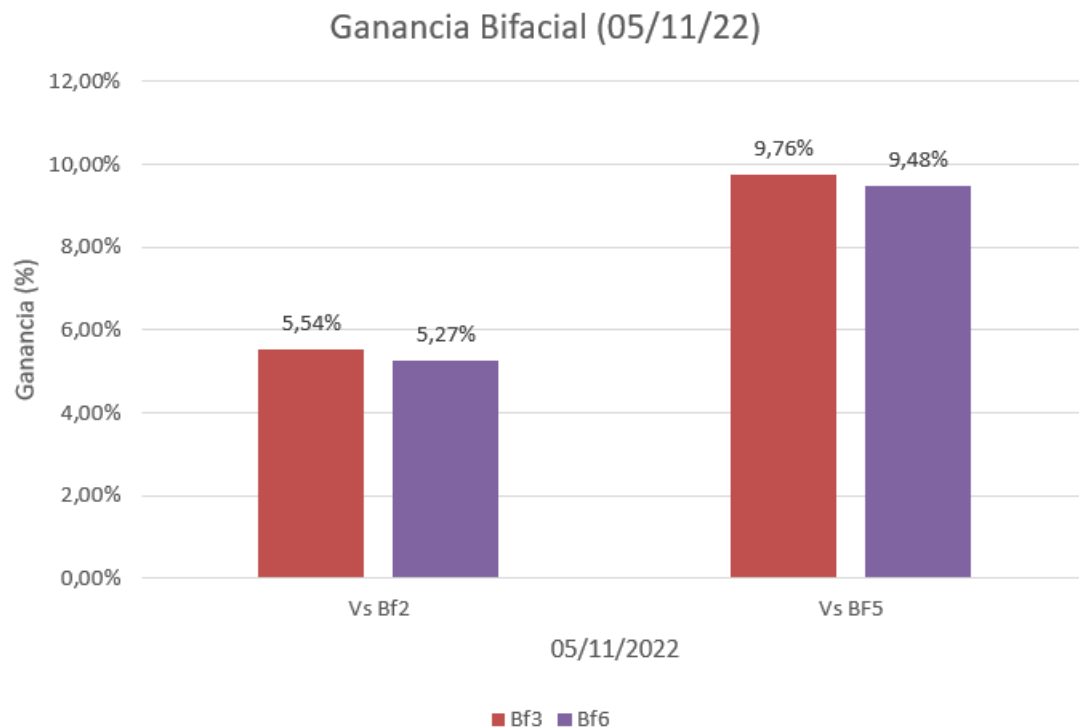


Figura 84. Ganancia Bifacial (05/11/2022) Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

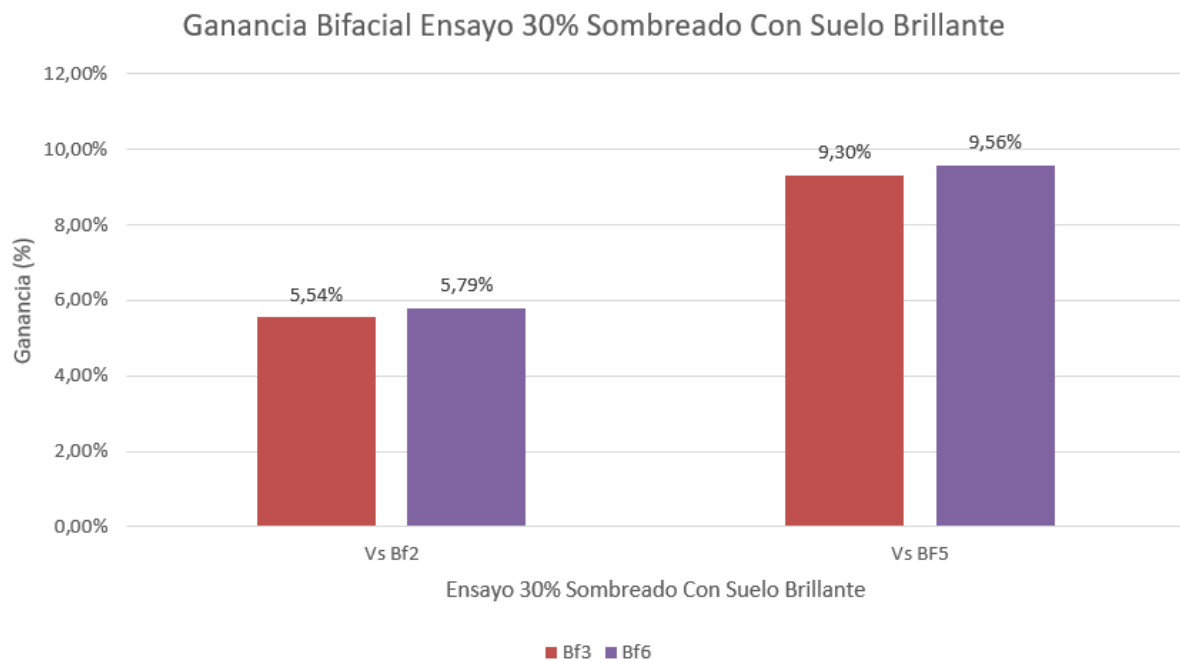


Figura 85. Ganancia Bifacial (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

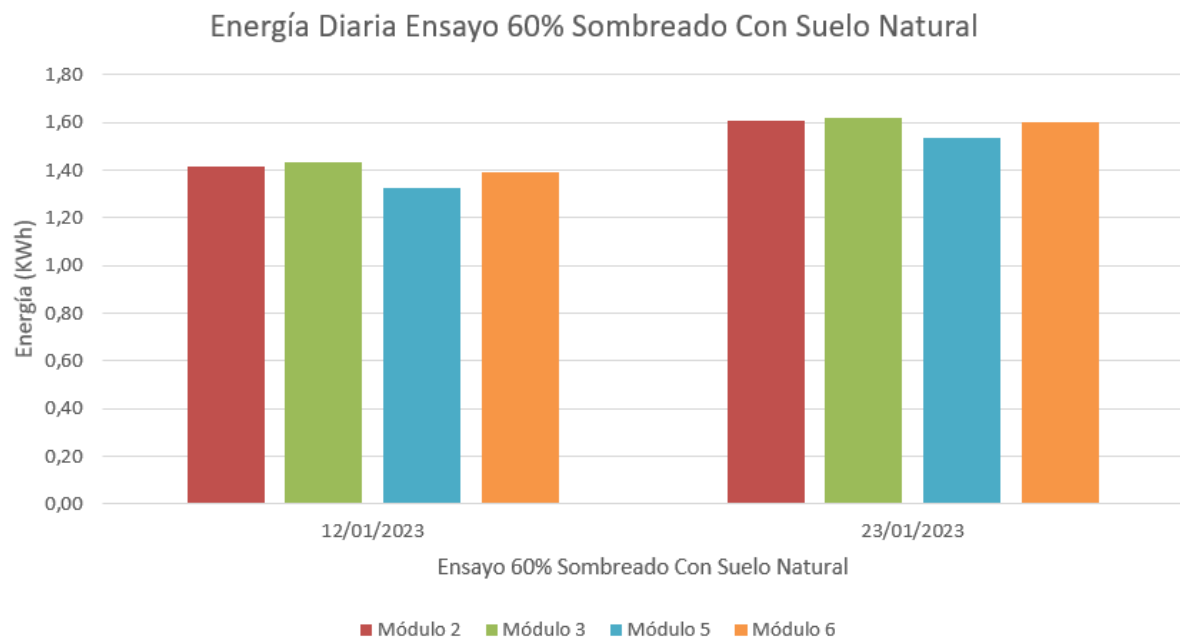
Energía Generada para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

Figura 86. Energía Diaria (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

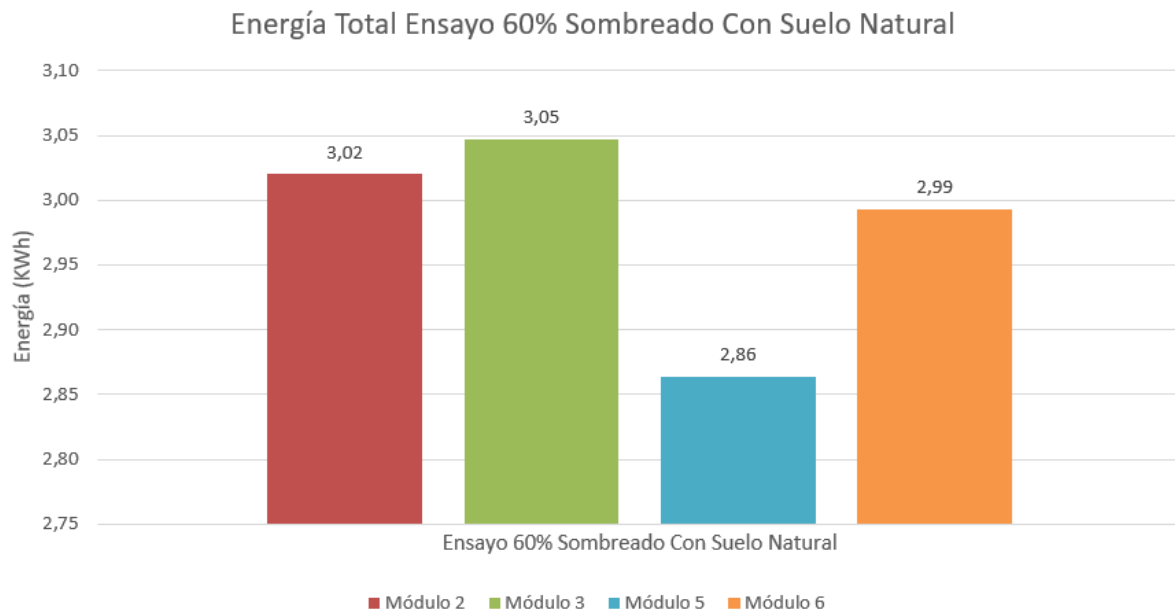


Figura 87. Energía Total (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

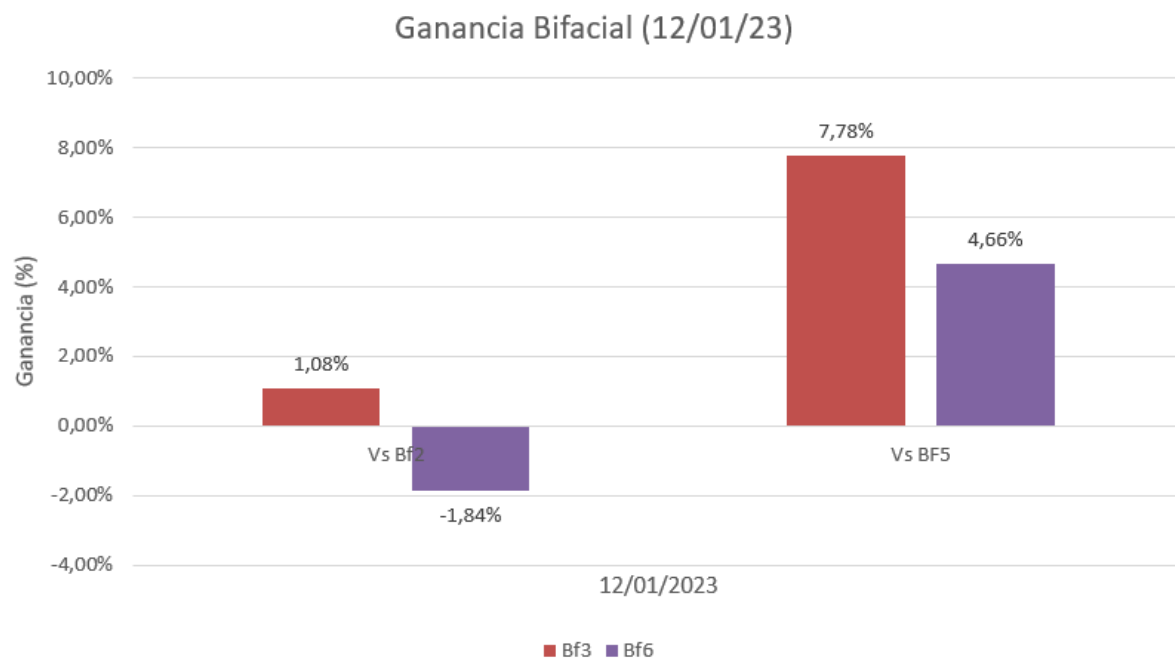


Figura 88. Ganancia Bifacial (12/01/23) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

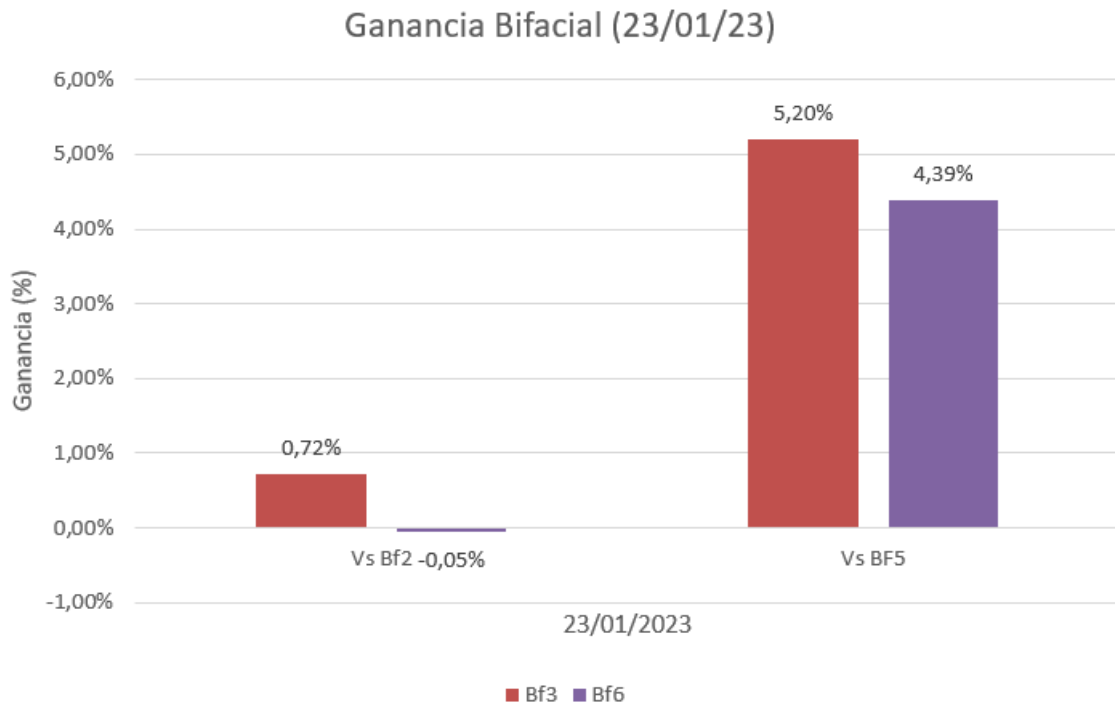


Figura 89. Ganancia Bifacial (23/01/23) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

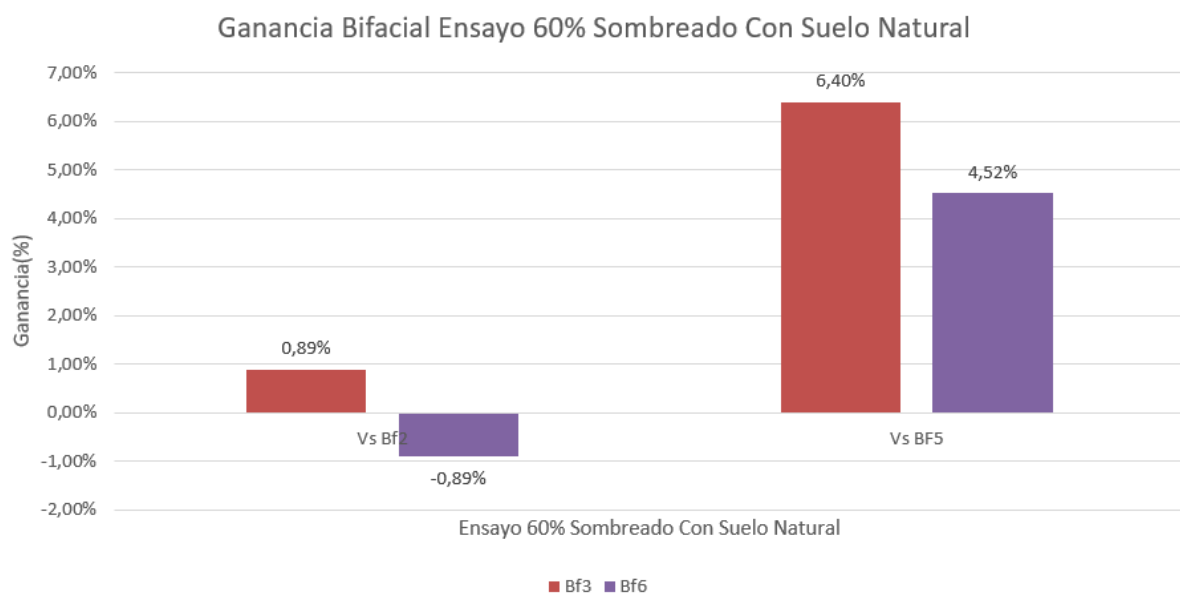


Figura 90. Ganancia Bifacial (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

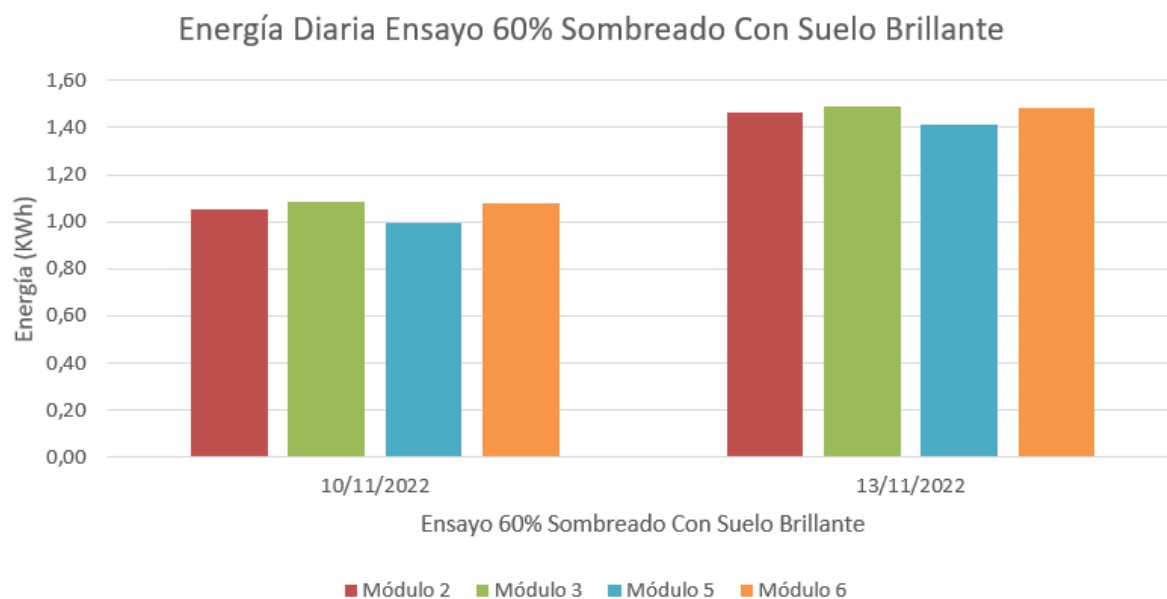
Energía Generada para Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

Figura 91. Energía Diaria (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

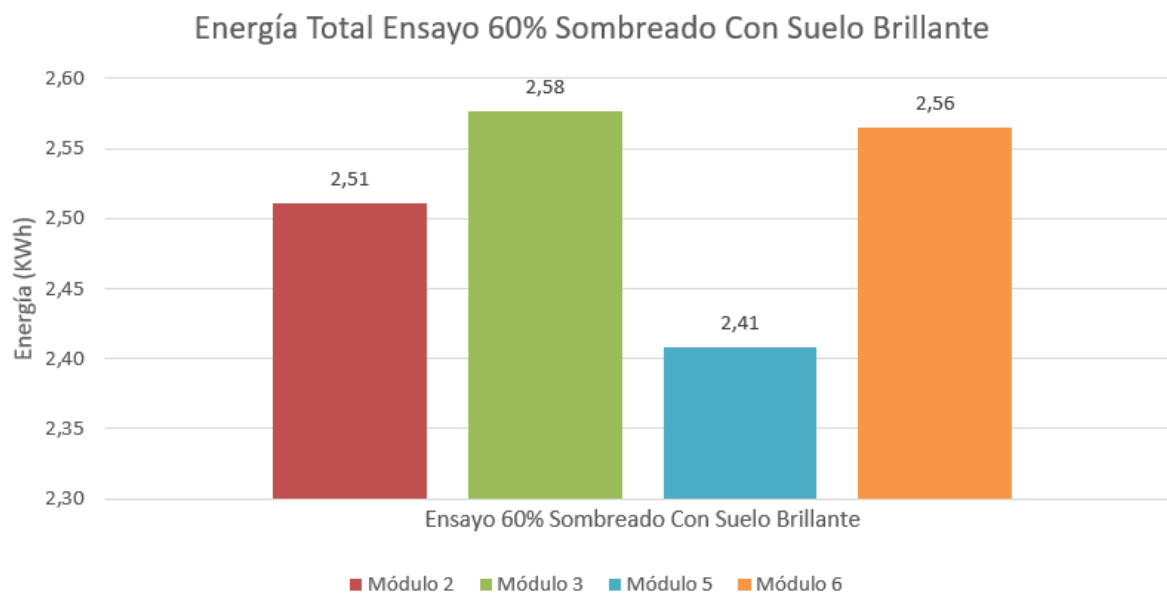


Figura 92. Energía Total (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

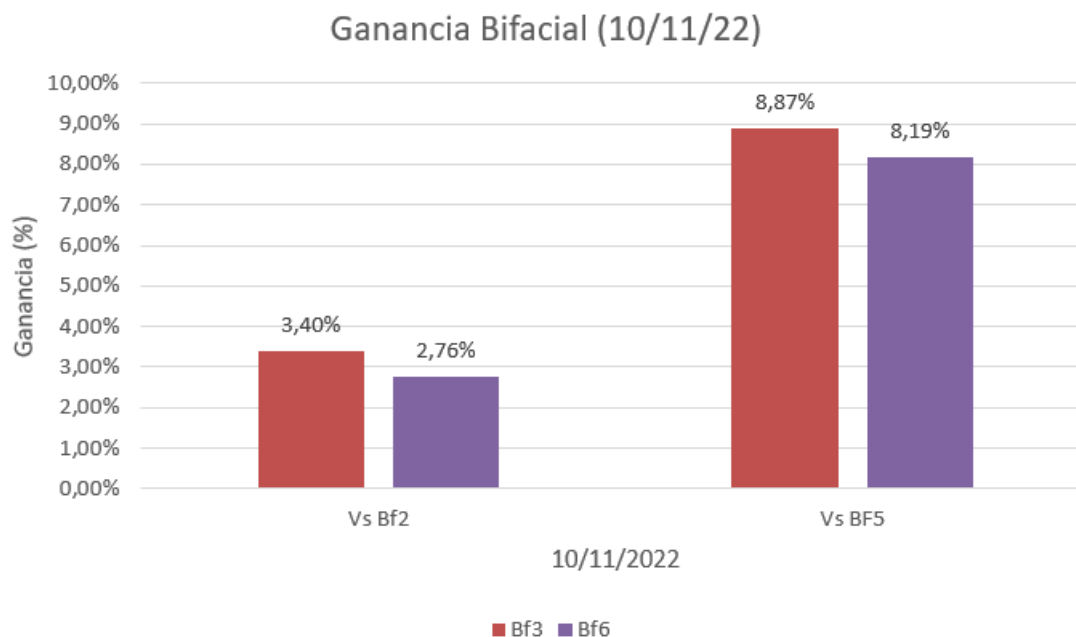


Figura 93. Ganancia Bifacial (10/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

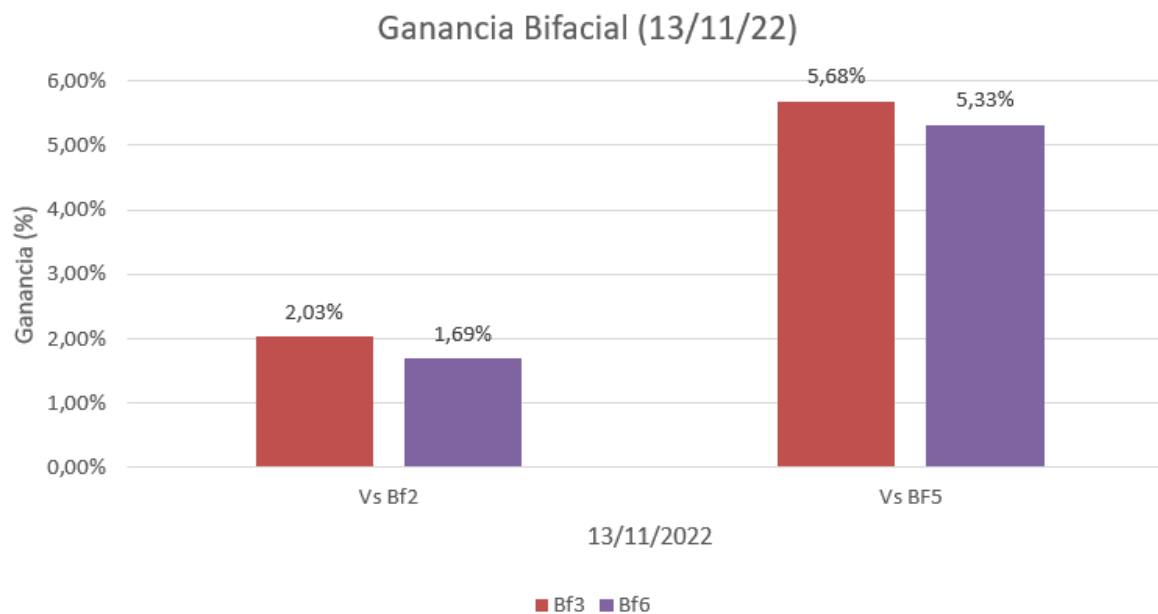


Figura 94. Ganancia Bifacial (13/11/2022) Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

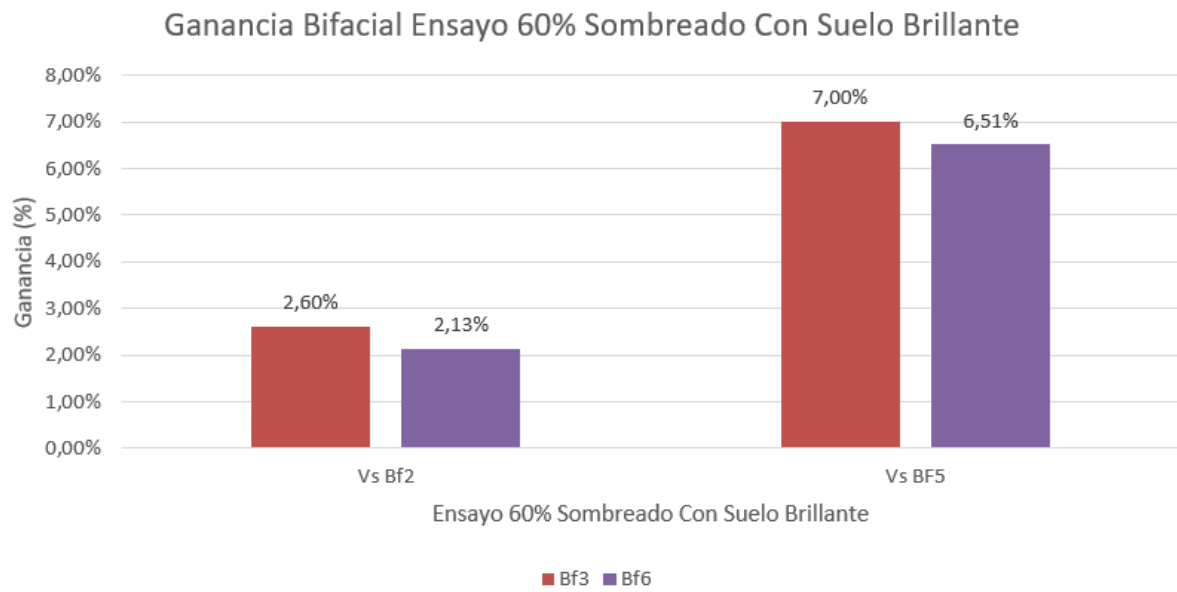


Figura 95. Ganancia Bifacial Total (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

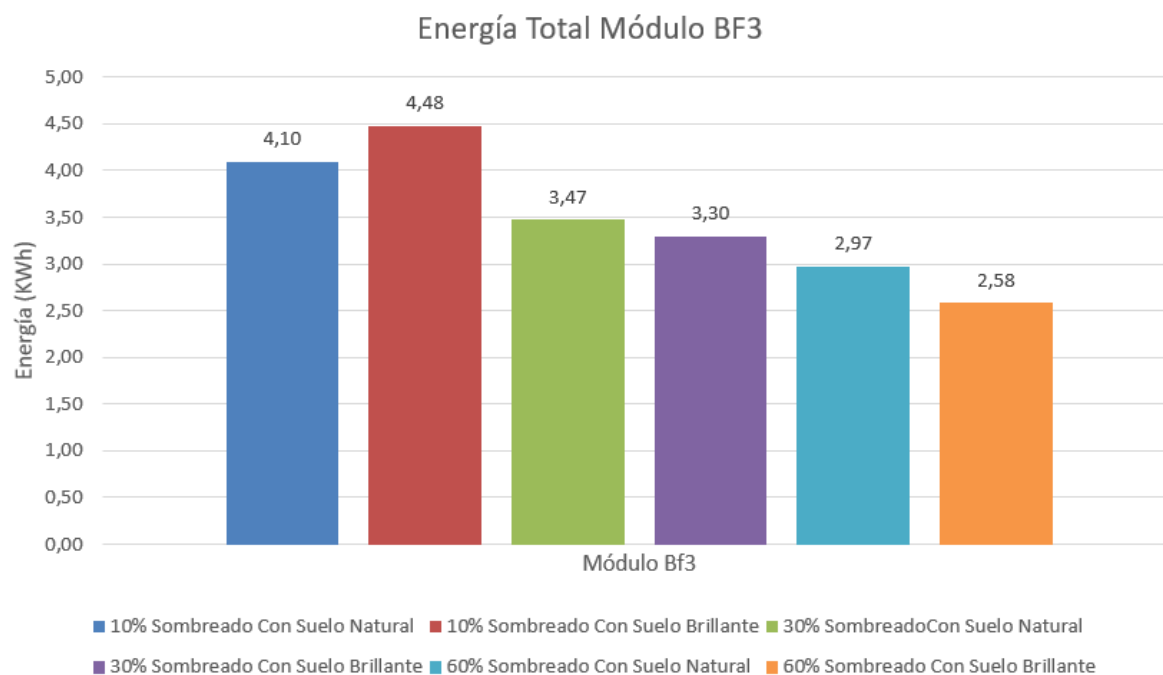
Comparación de Energía Total de Ensayos

Figura 96. Energía Total Módulo Bf3

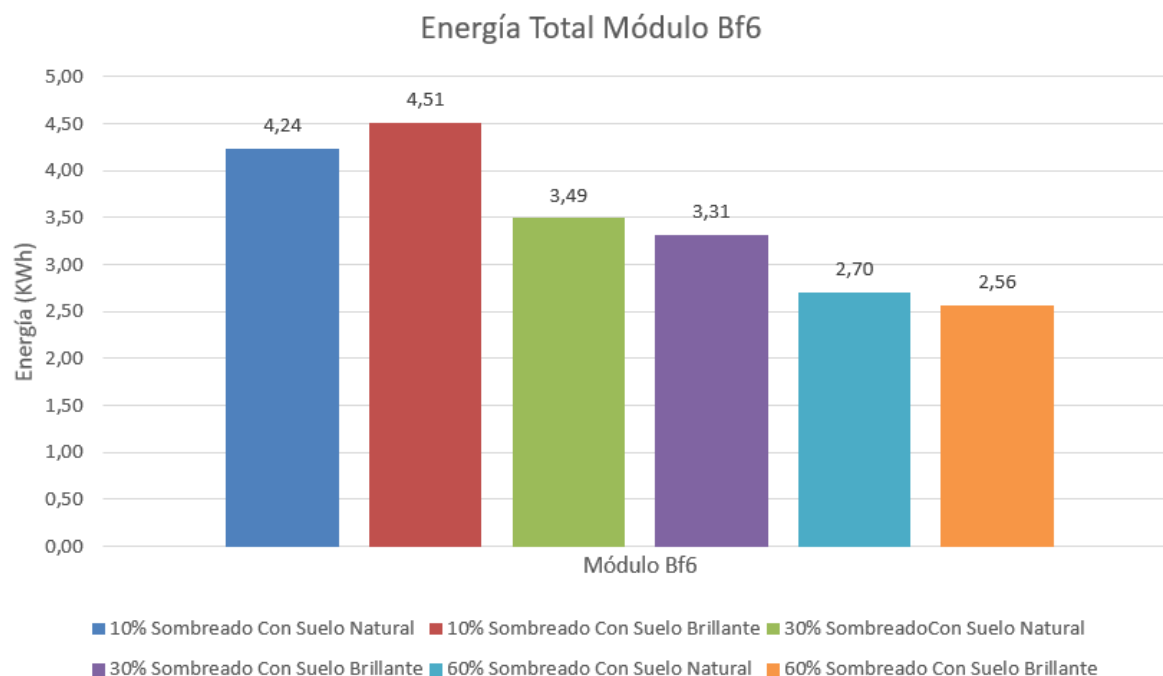


Figura 97. Energía Total Módulo Bf6

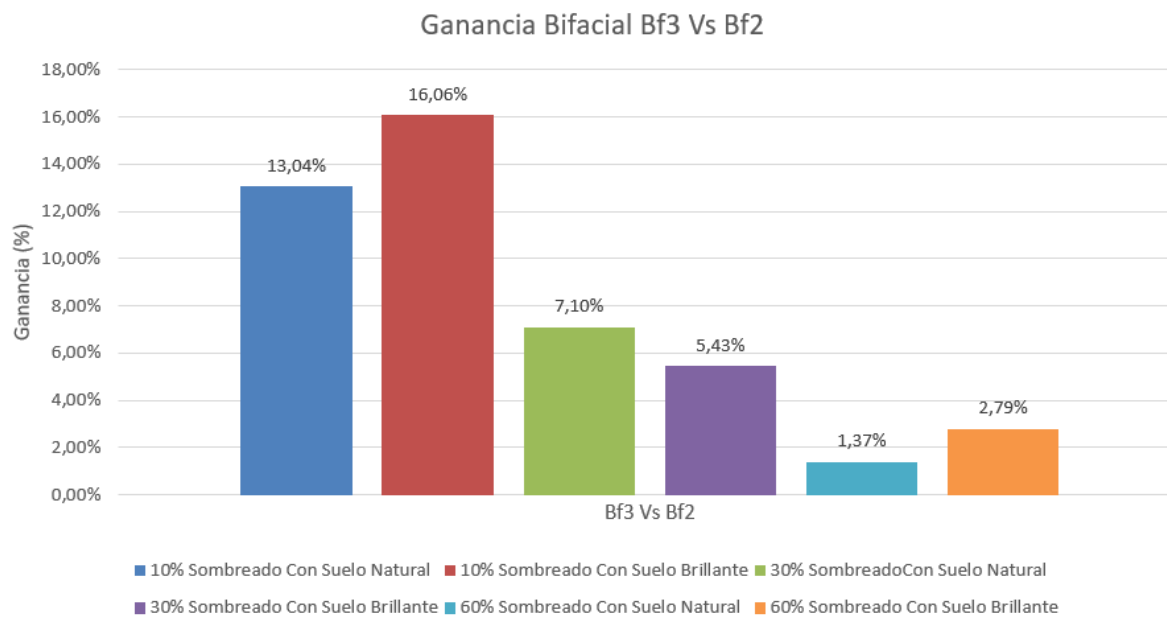


Figura 98. Ganancia Bifacial (Bf3 Vs Bf2)

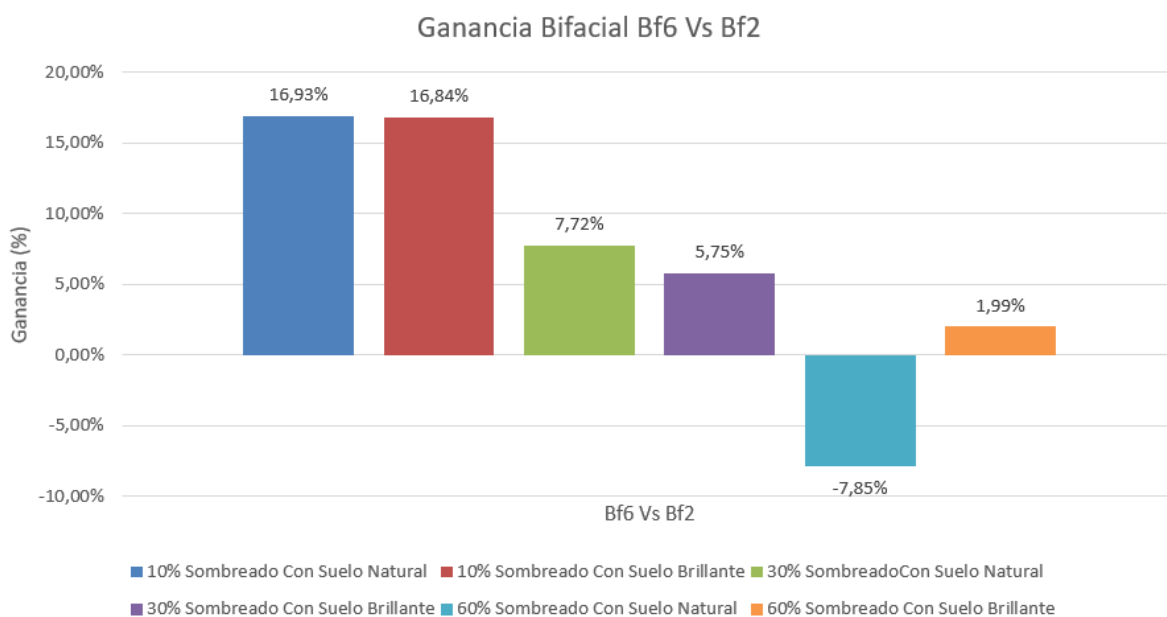


Figura 99. Ganancia Bifacial (Bf6 Vs Bf2)

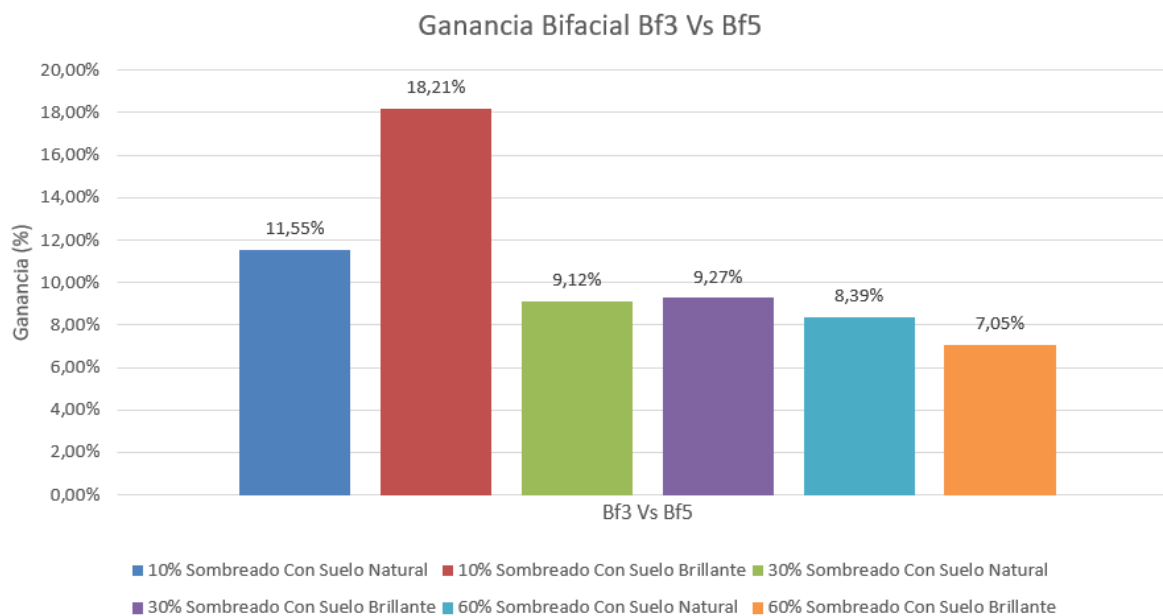


Figura 100. Ganancia Bifacial (Bf3 Vs Bf5)

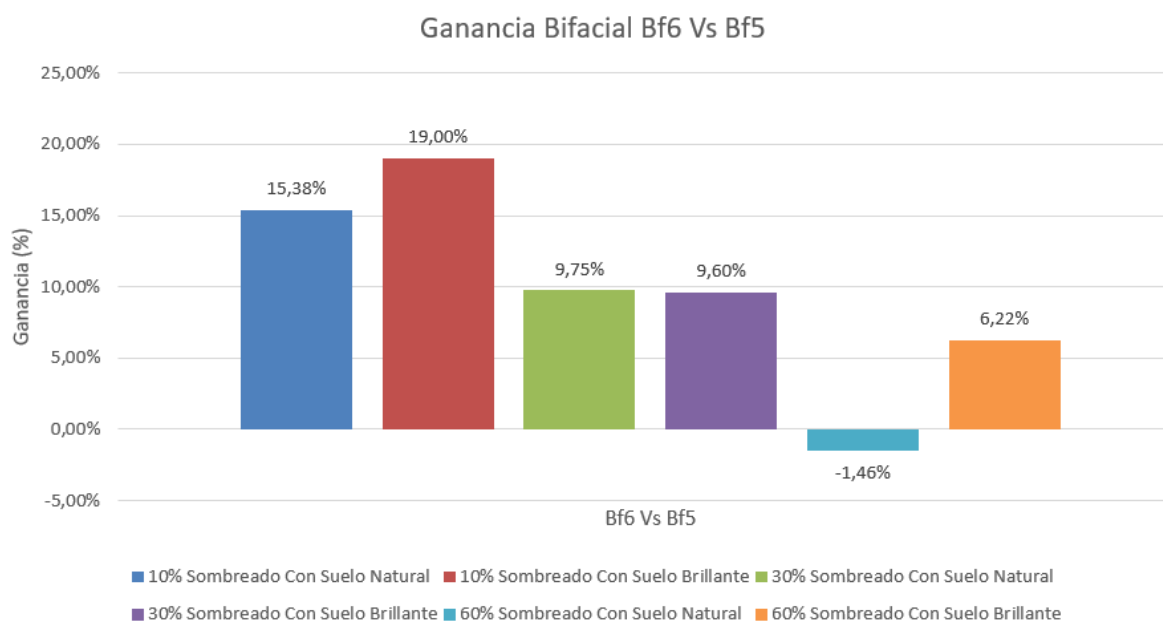


Figura 101. Ganancia Bifacial (Bf6 Vs Bf5)

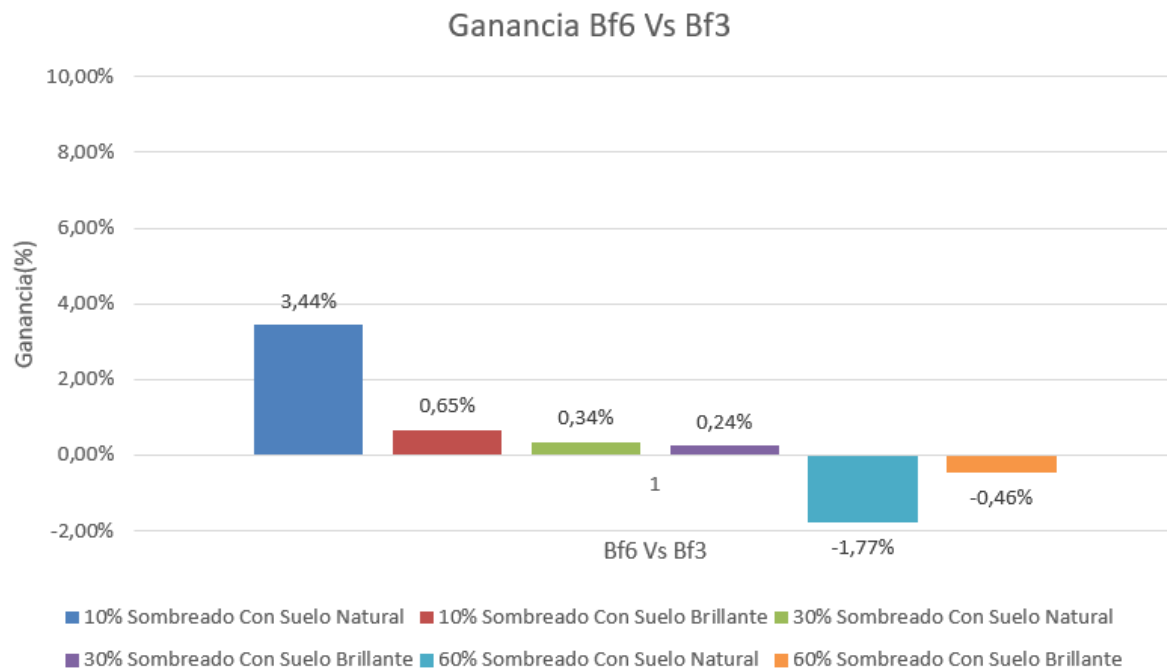


Figura 102. Ganancia Total Bf6 Vs Bf3

ANEXO 7: Comparación de Potencia Máxima por Ensayo para “Días Buenos” y “Días Malos”

Clasificación “Días Buenos”

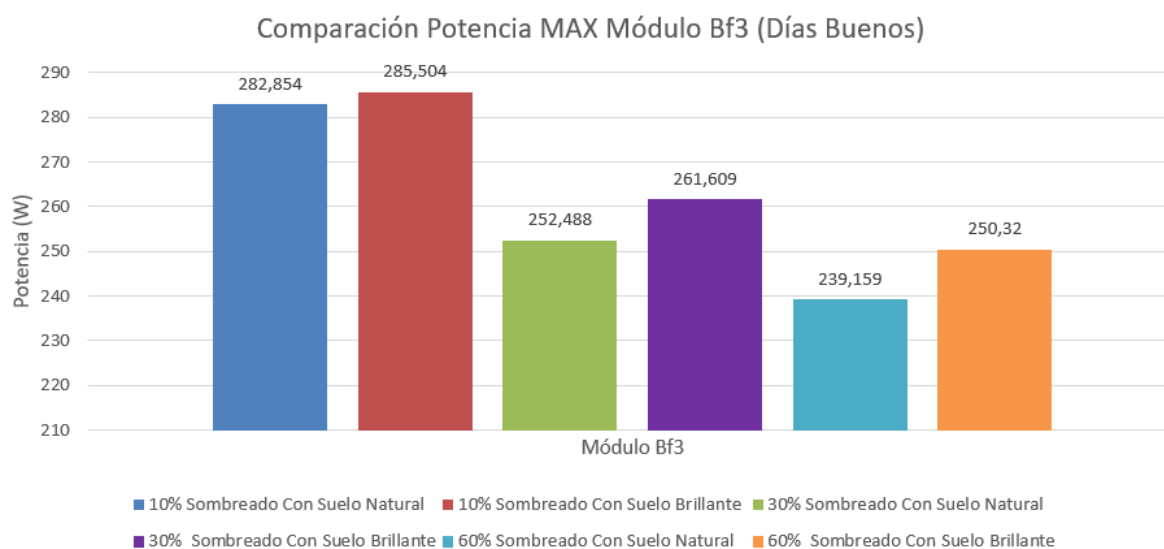


Figura 103. Potencia Máxima de Módulo Bf3 en cada ensayo (Días Buenos)

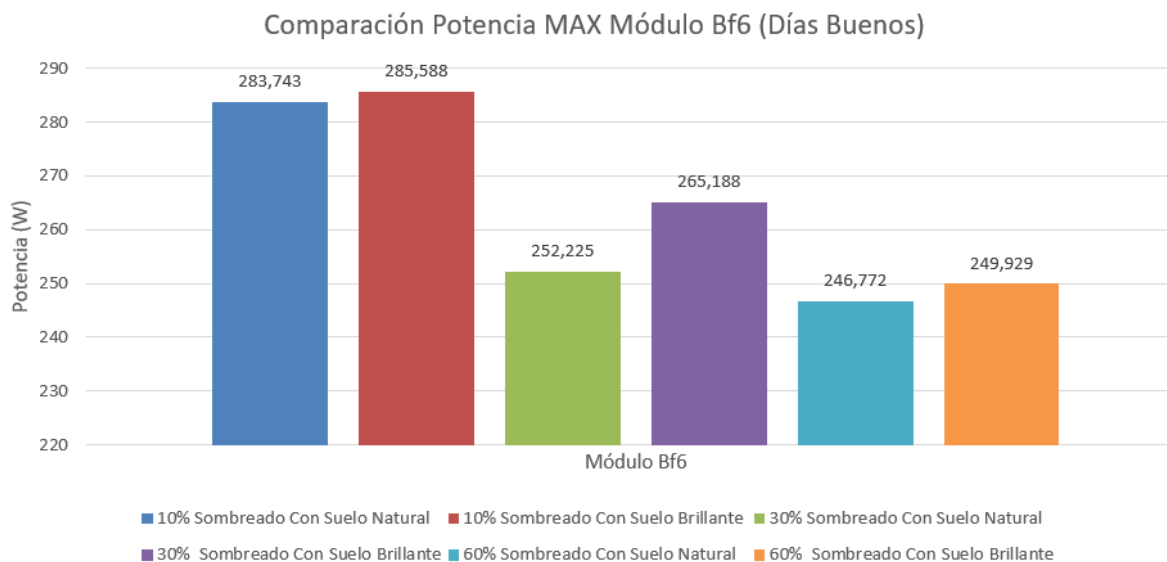


Figura 104. Potencia Máxima de Módulo Bf6 en cada ensayo (Días Buenos)

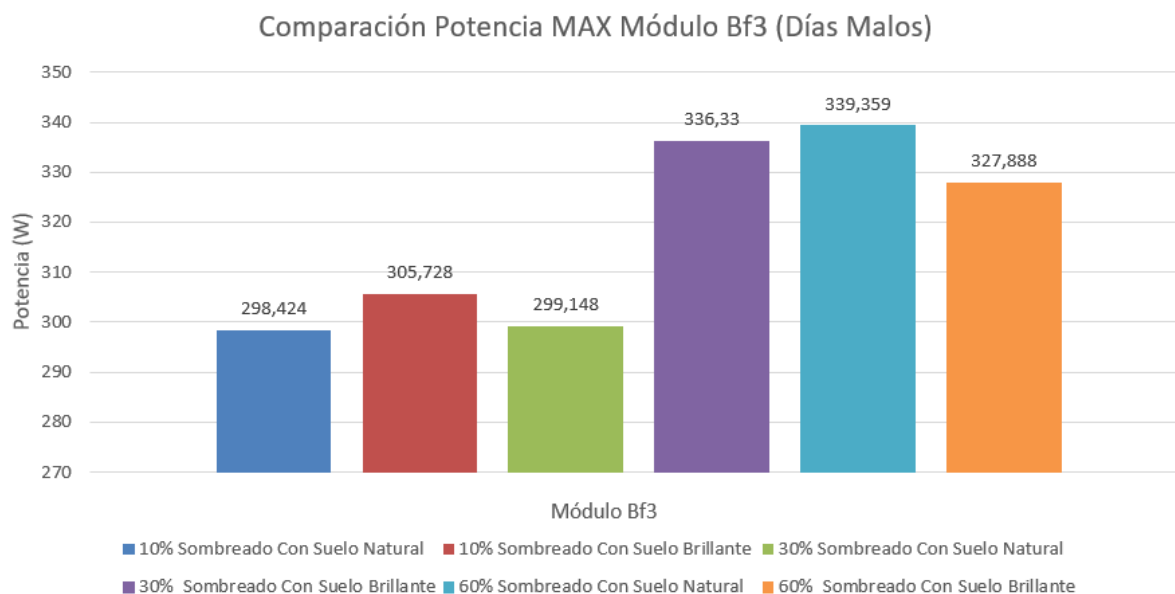
Clasificación “Días Malos”

Figura 105. Potencia Máxima de Módulo Bf3 en cada ensayo (Días Malos)

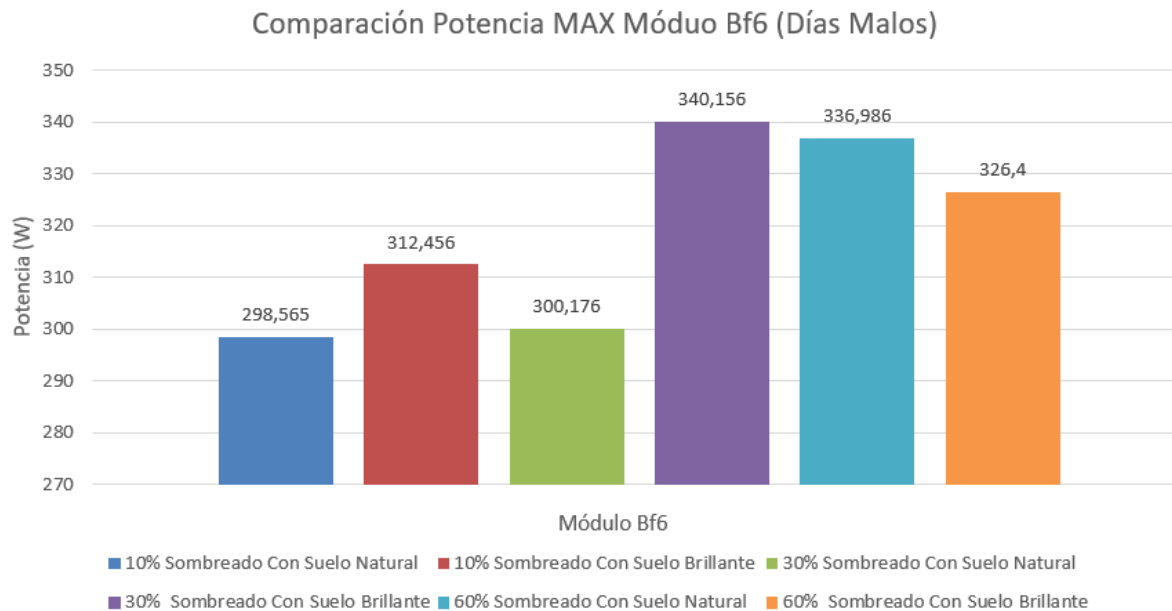


Figura 106. Potencia Máxima de Módulo Bf6 en cada ensayo (Días Malos)

ANEXO 8: Comparación Gráfica de Potencias Teóricas Estimadas y Potencias Reales Medidas

Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural

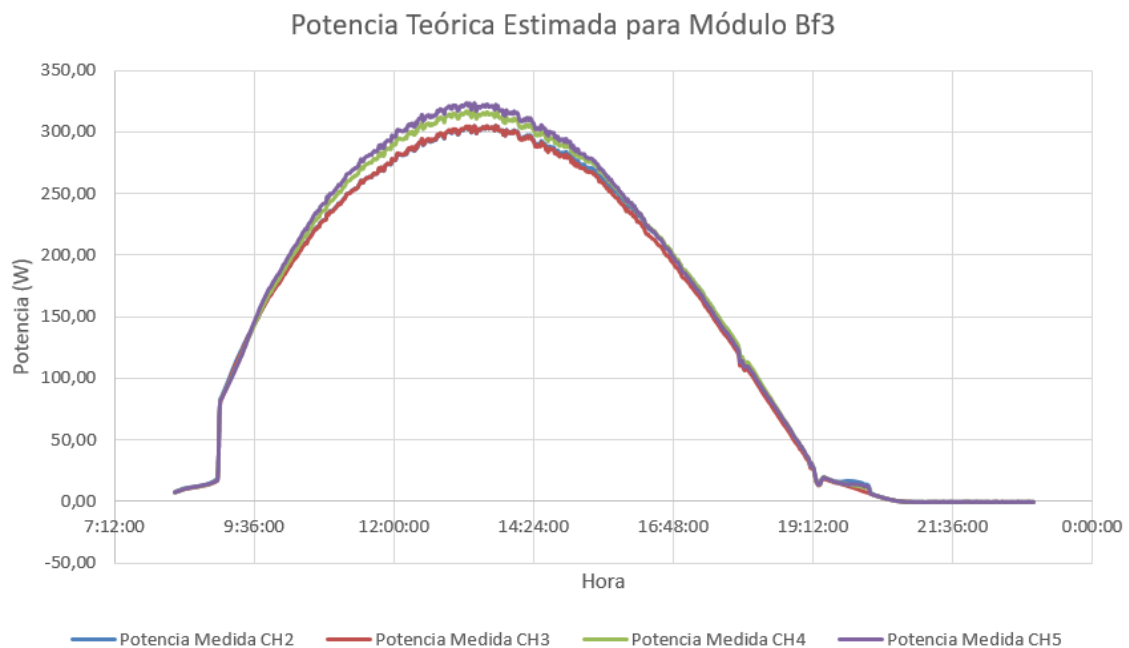


Figura 107. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf3 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

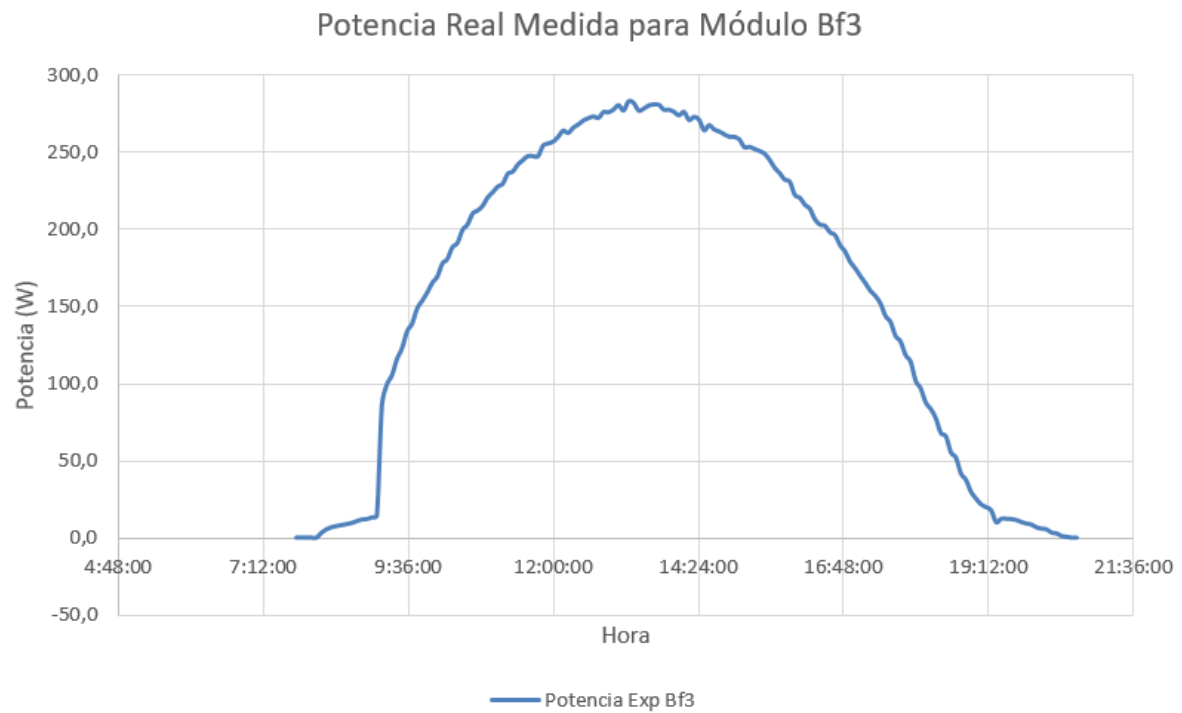


Figura 108. Potencia Real Medida Módulo Bf3 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

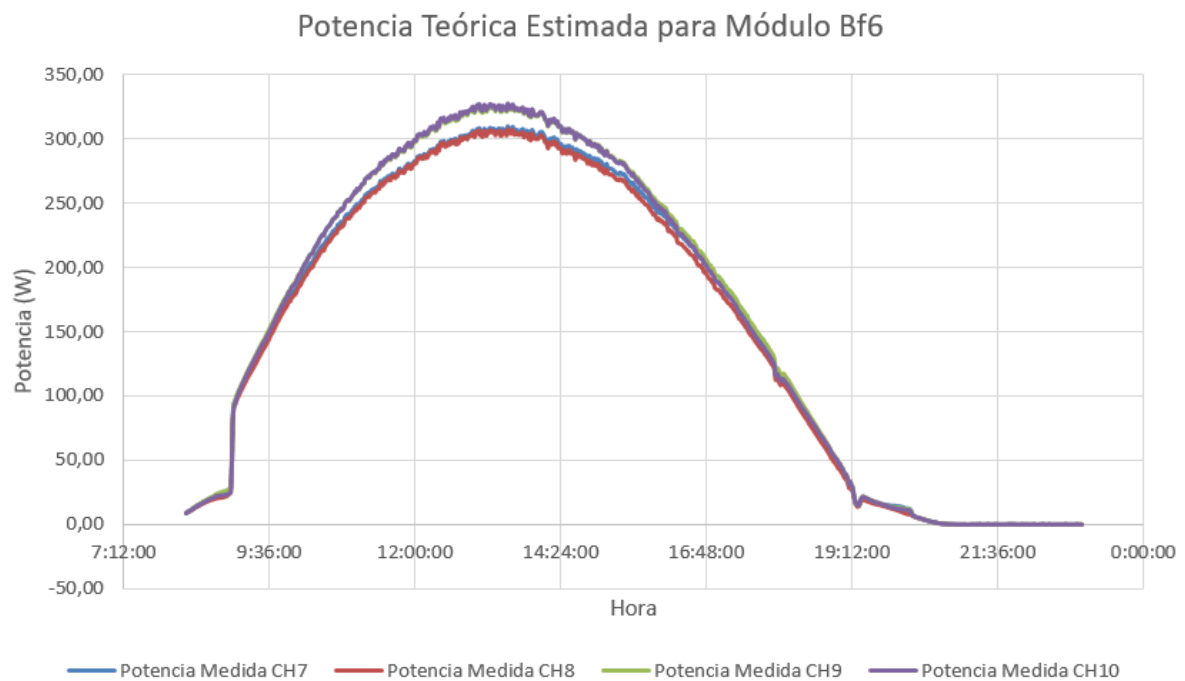


Figura 109. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

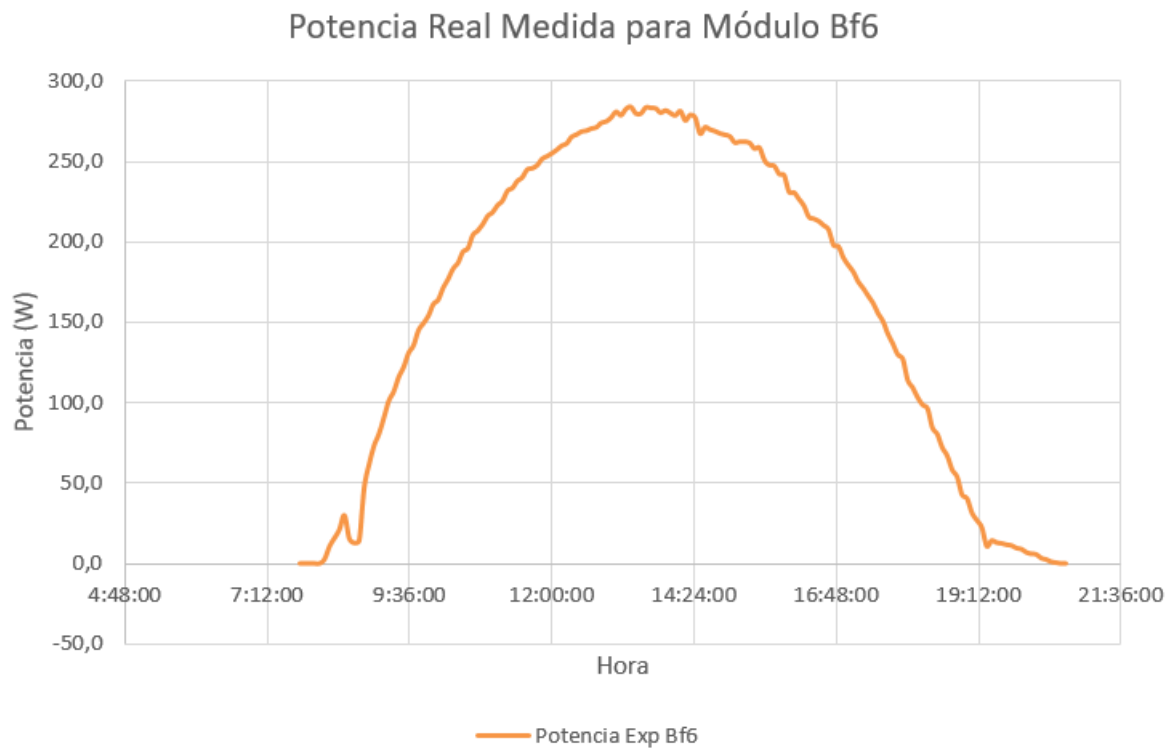


Figura 110. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

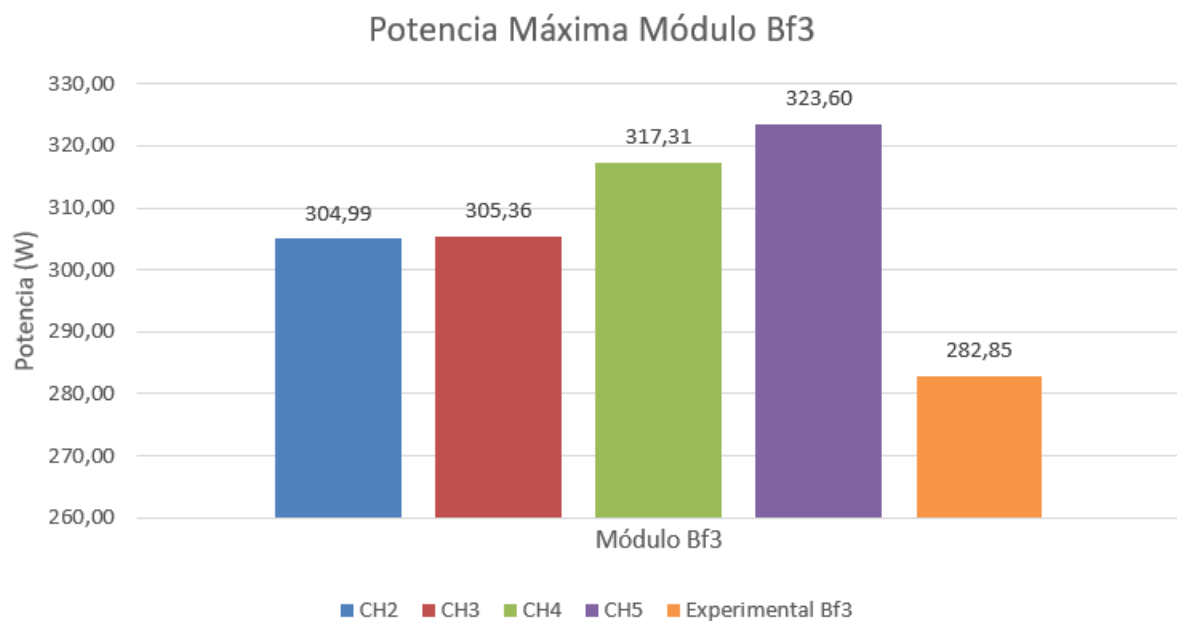


Figura 111. Potencia Máxima Módulo Bf3 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

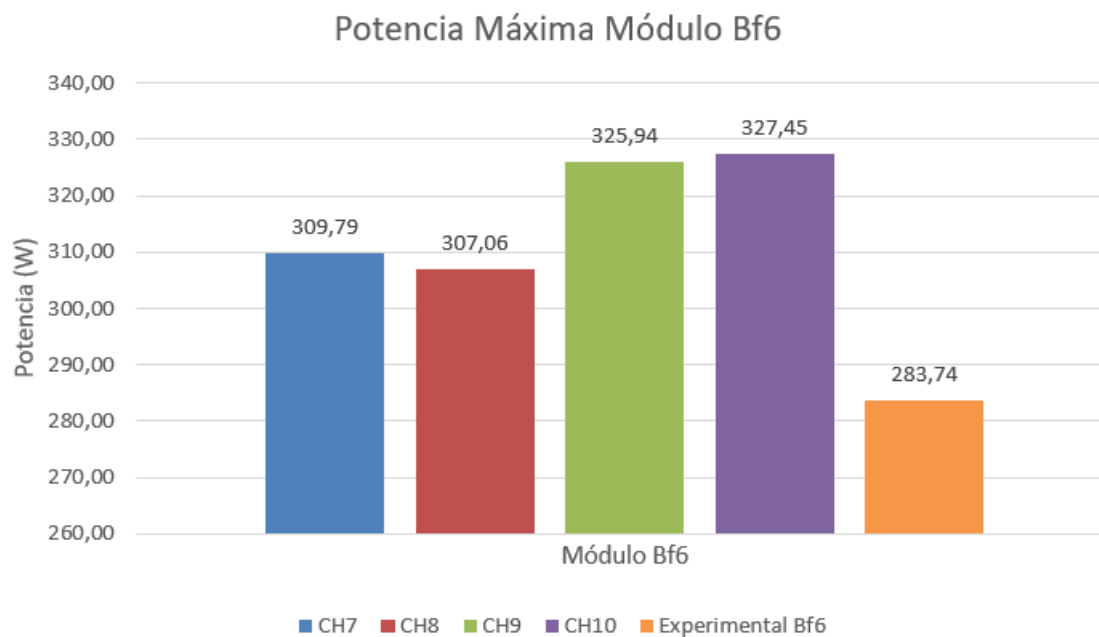


Figura 112. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

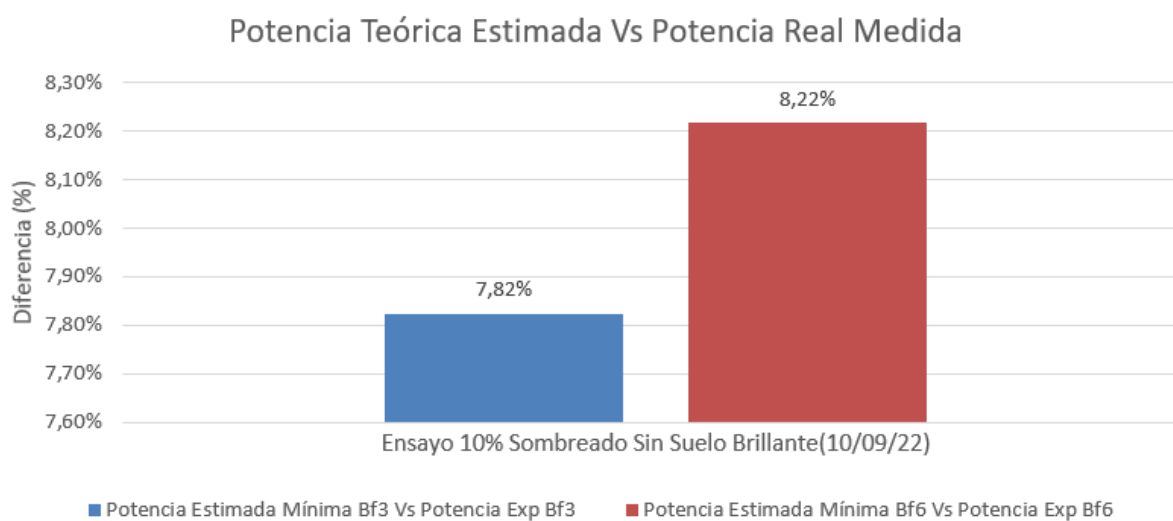


Figura 113. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Natural)

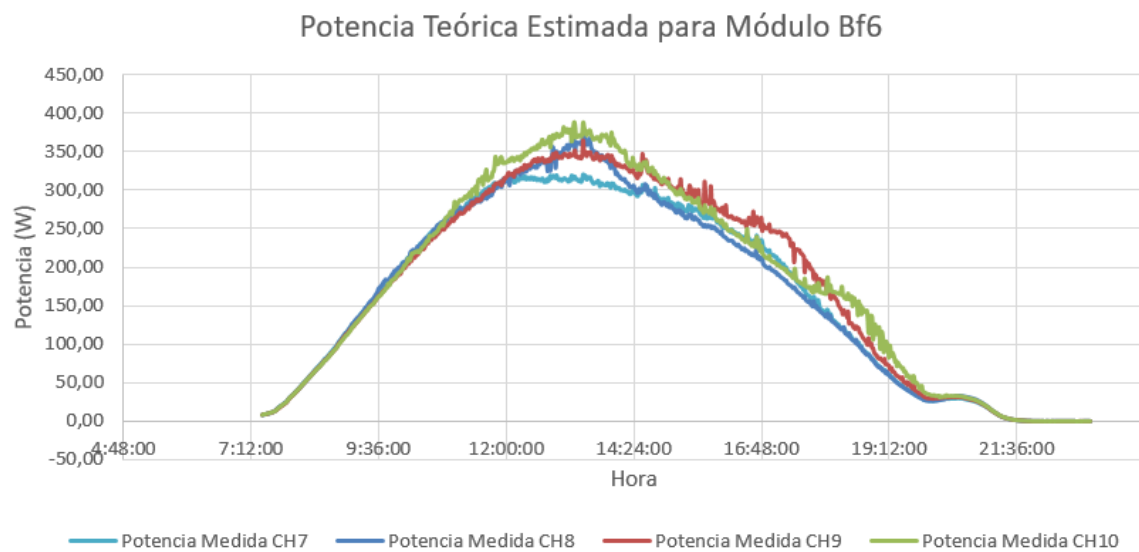
Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante

Figura 114. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

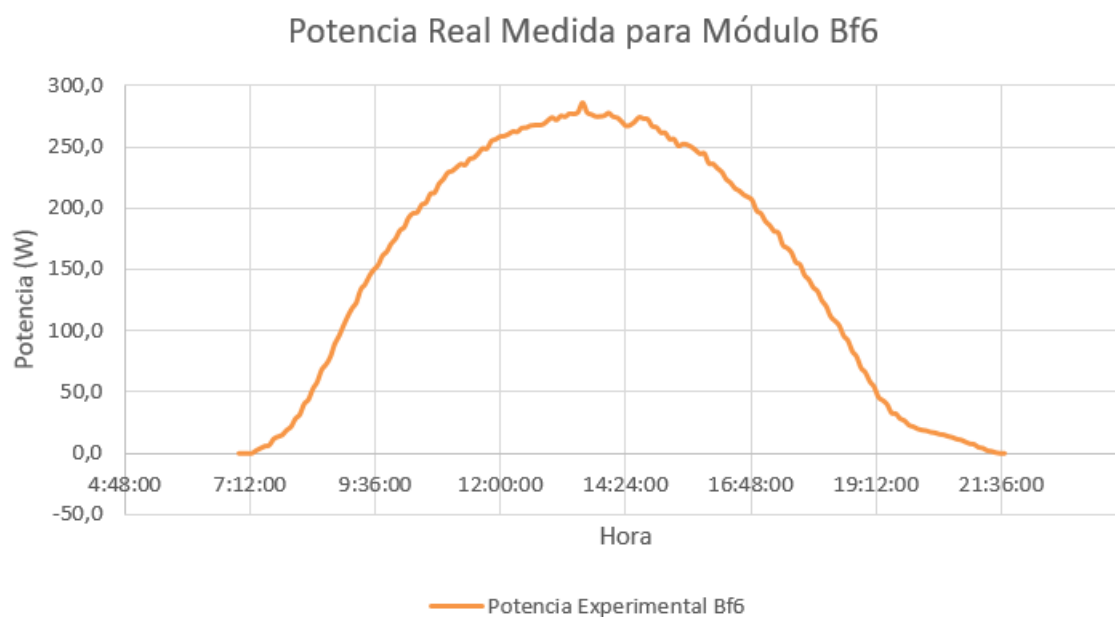


Figura 115. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

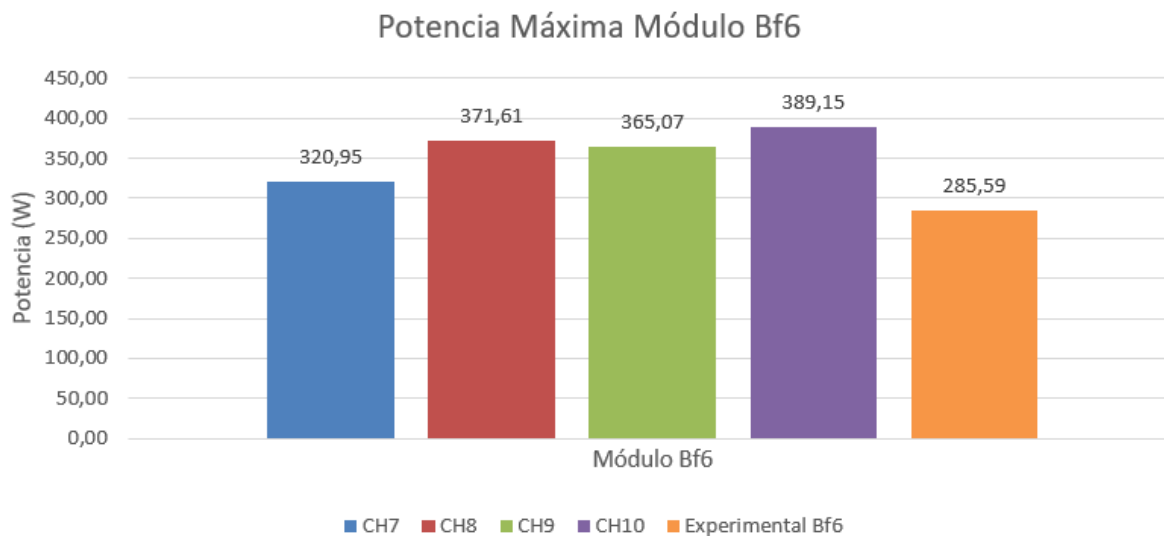


Figura 116. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

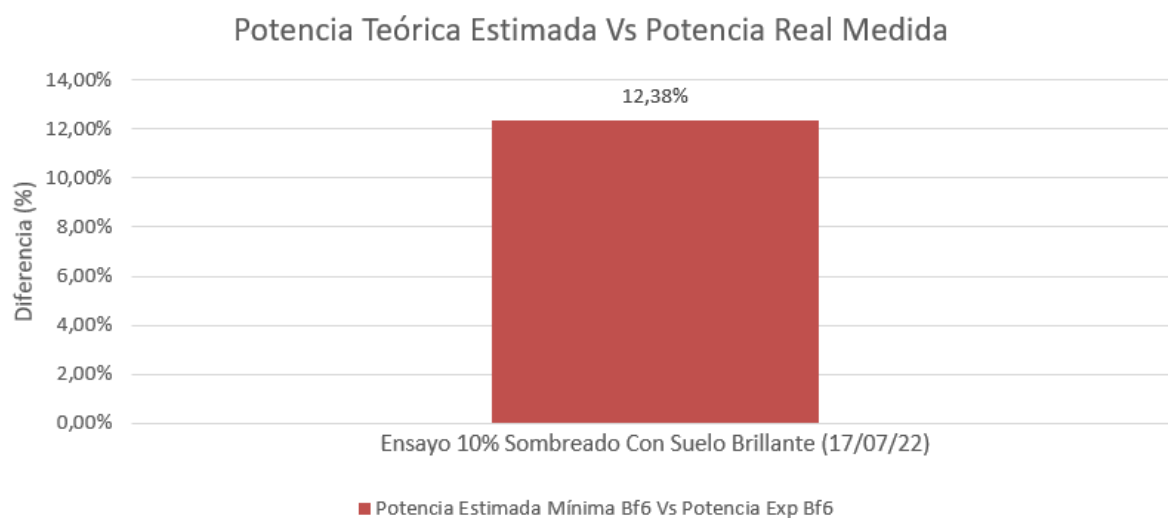


Figura 117. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 10% Sombreado Con Suelo Brillante)

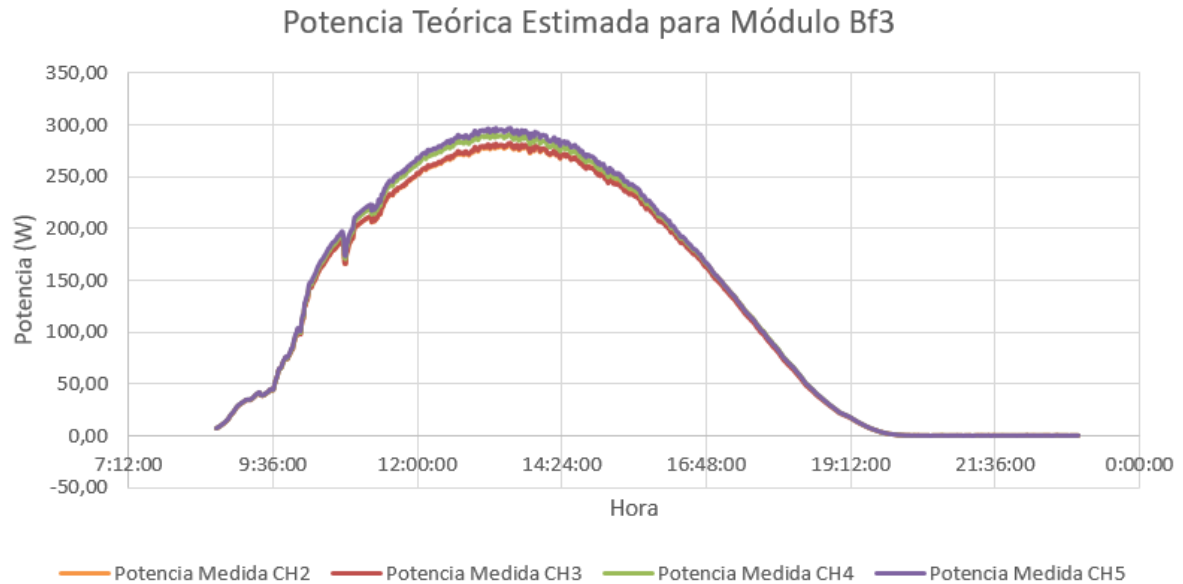
Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural

Figura 118. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf3 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

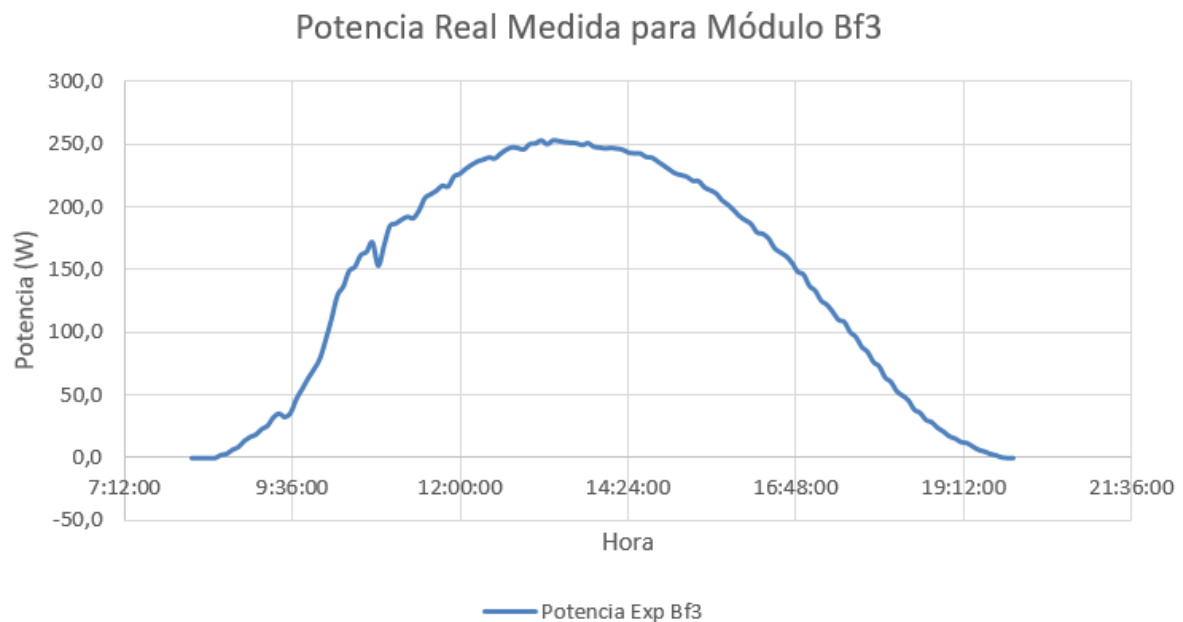


Figura 119. Potencia Real Medida Módulo Bf3 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

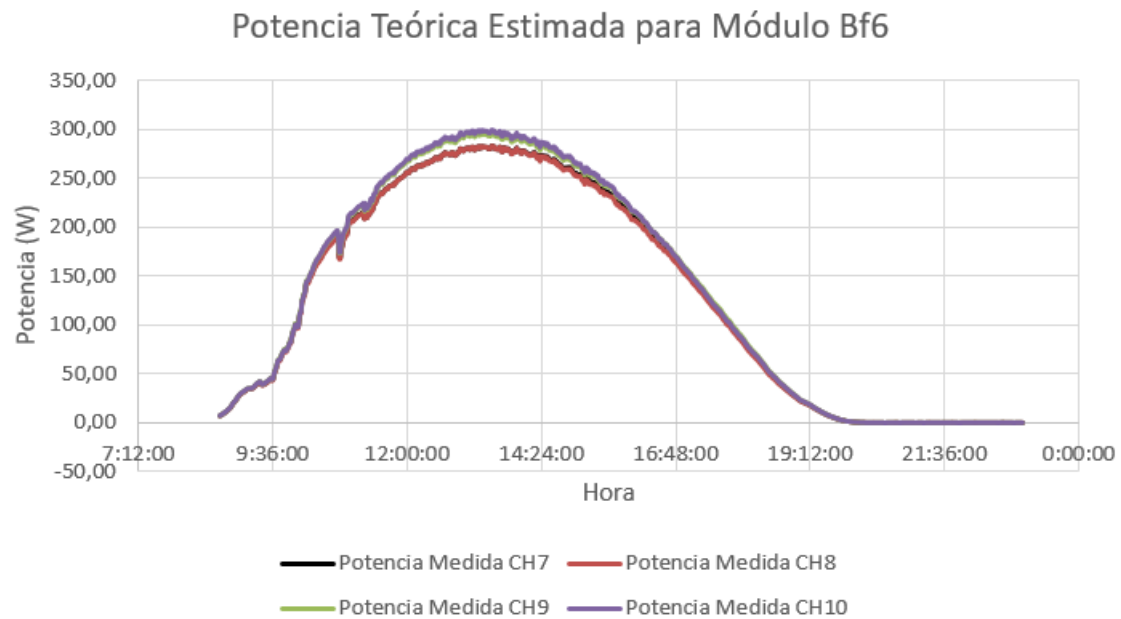


Figura 120. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

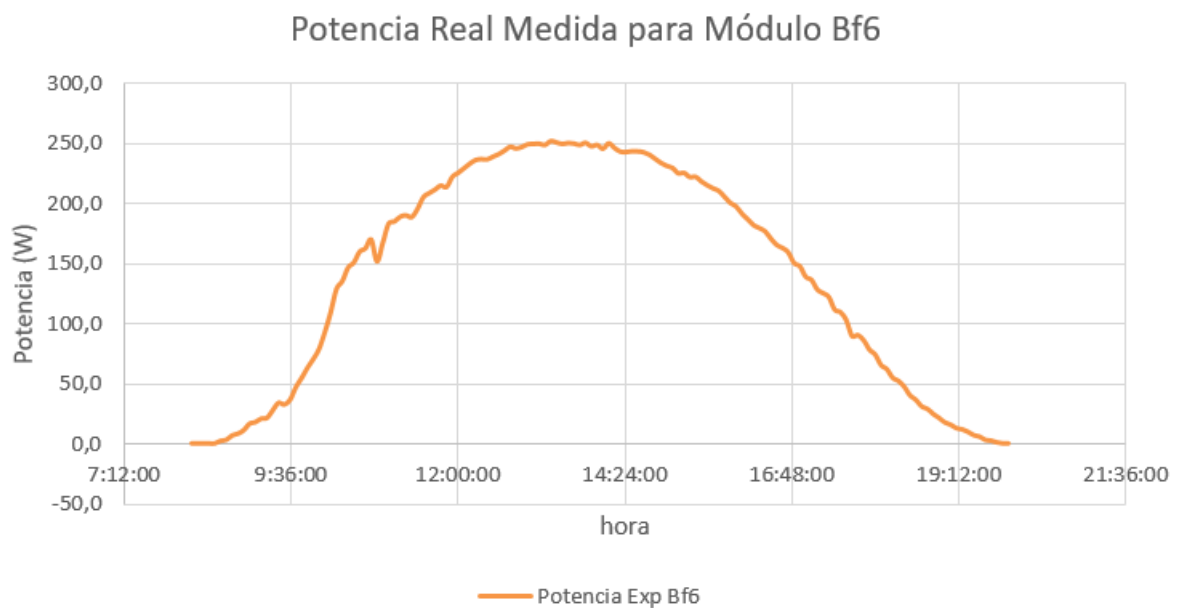


Figura 121. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

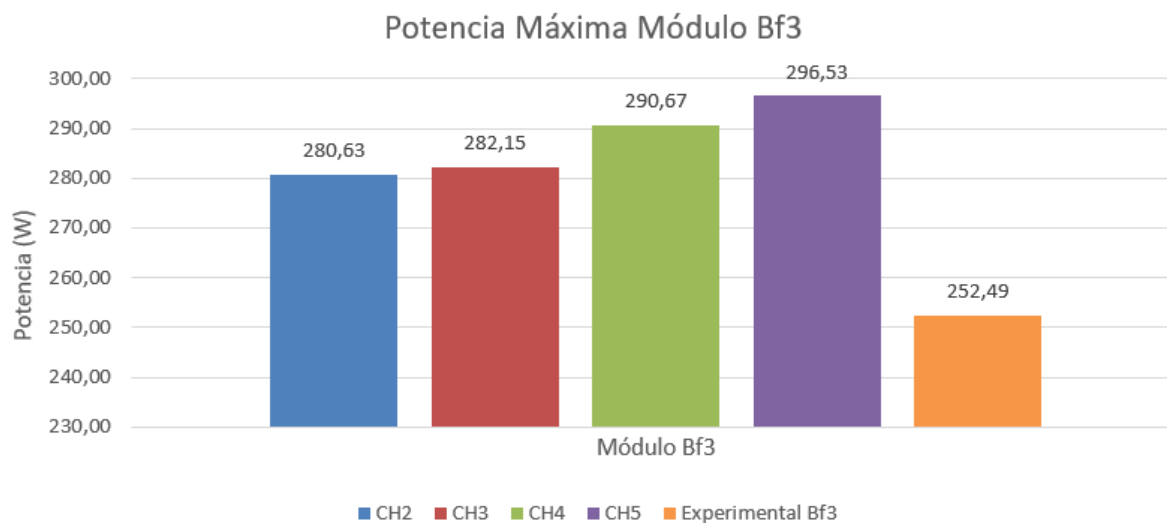


Figura 122. Potencia Máxima Módulo Bf3 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

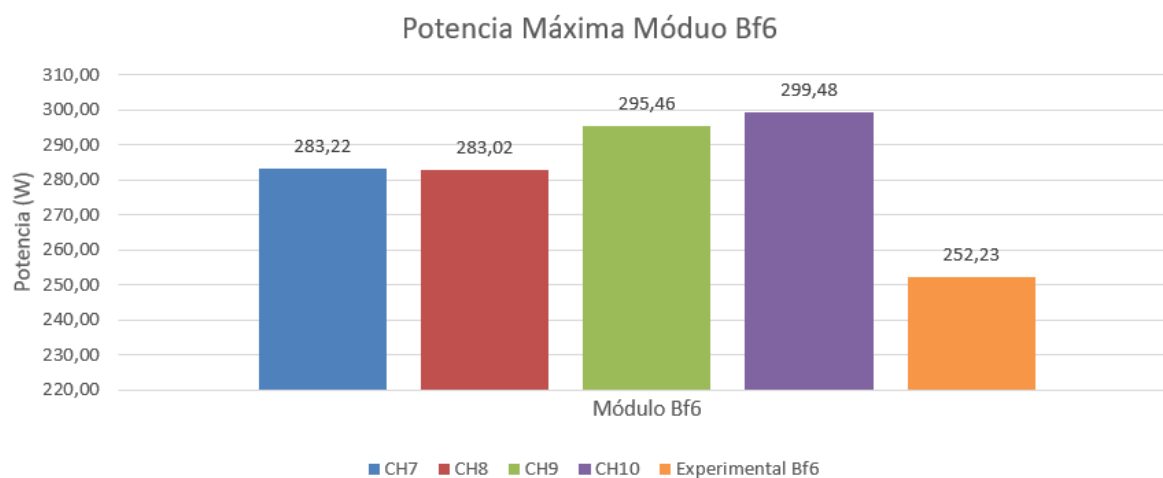


Figura 123. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

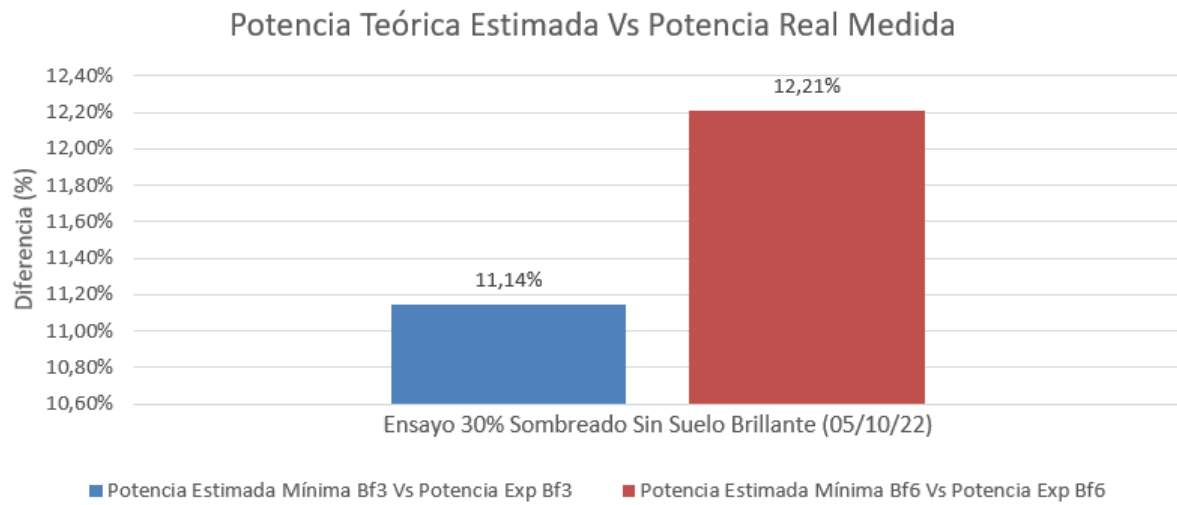


Figura 124. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Natural)

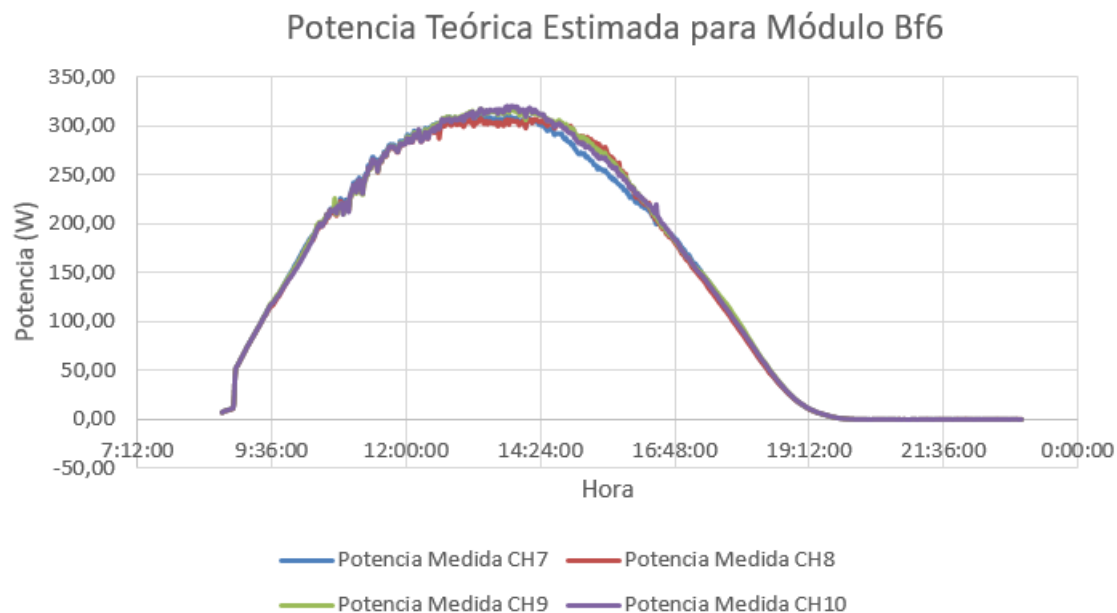
Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante

Figura 125. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

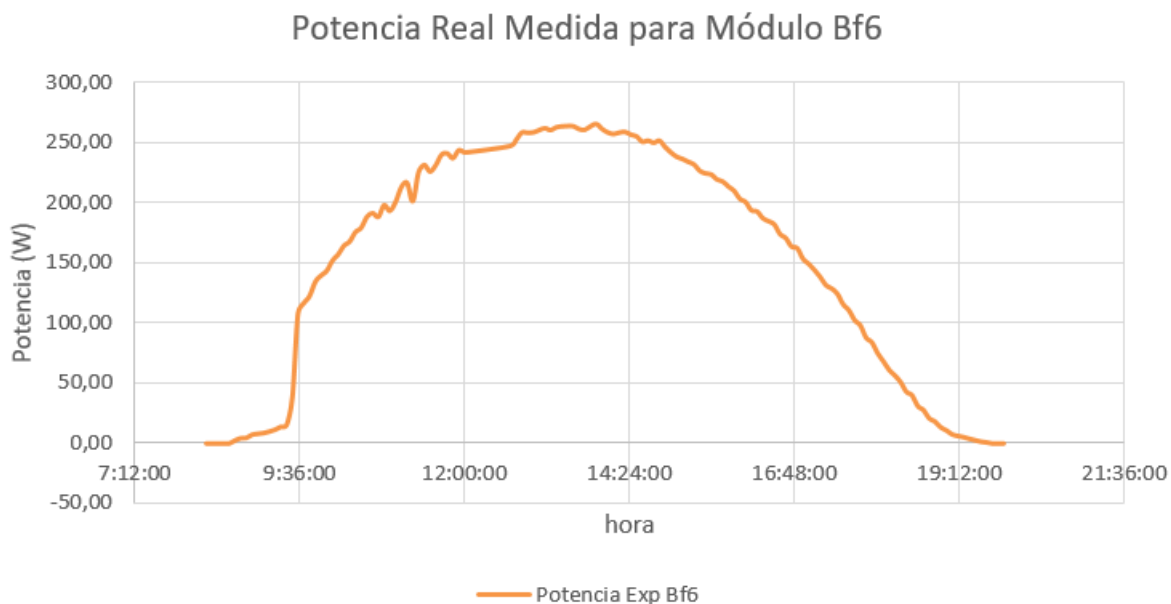


Figura 126. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

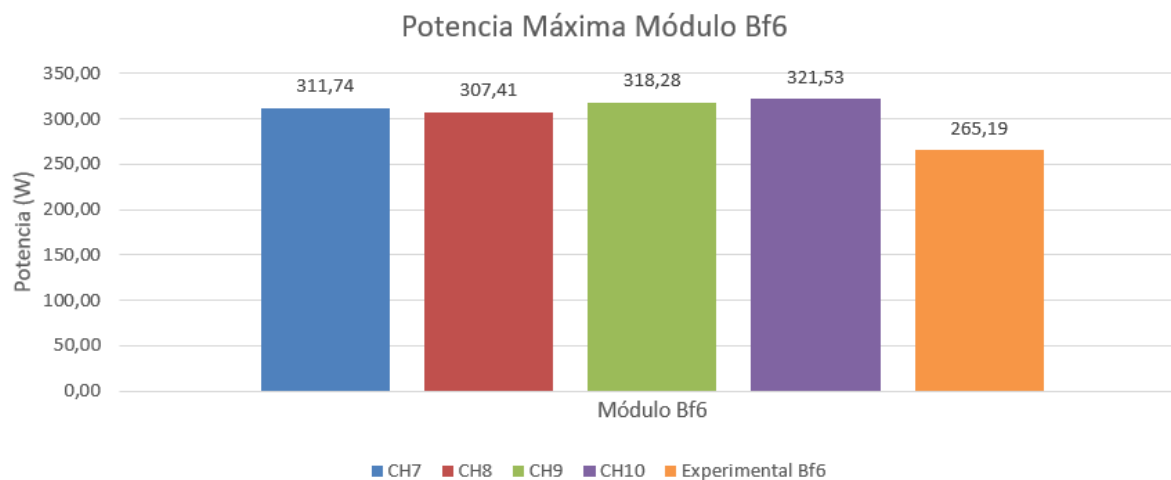


Figura 127. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

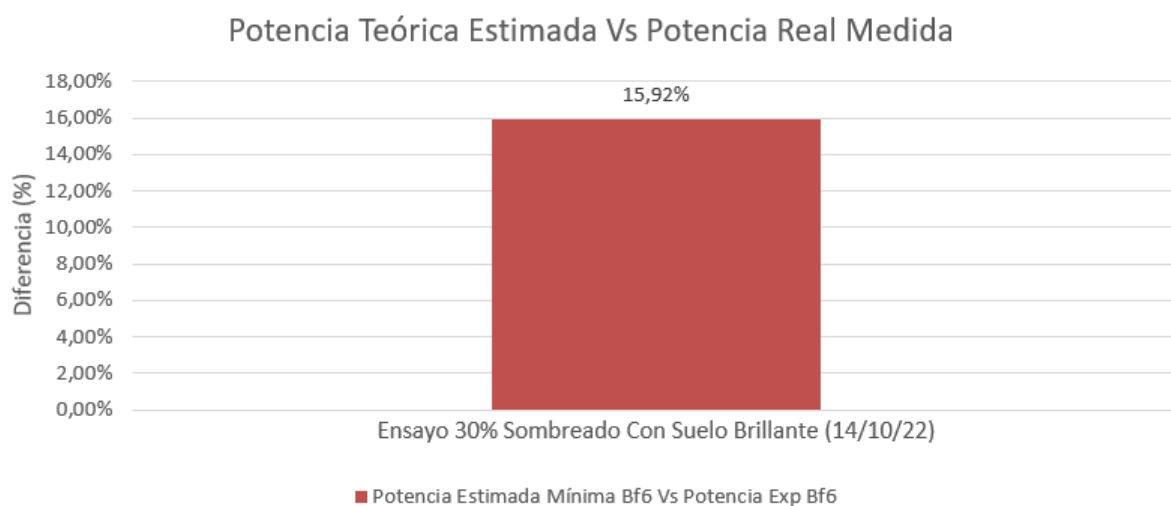


Figura 128. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 30% Sombreado Con Suelo Brillante)

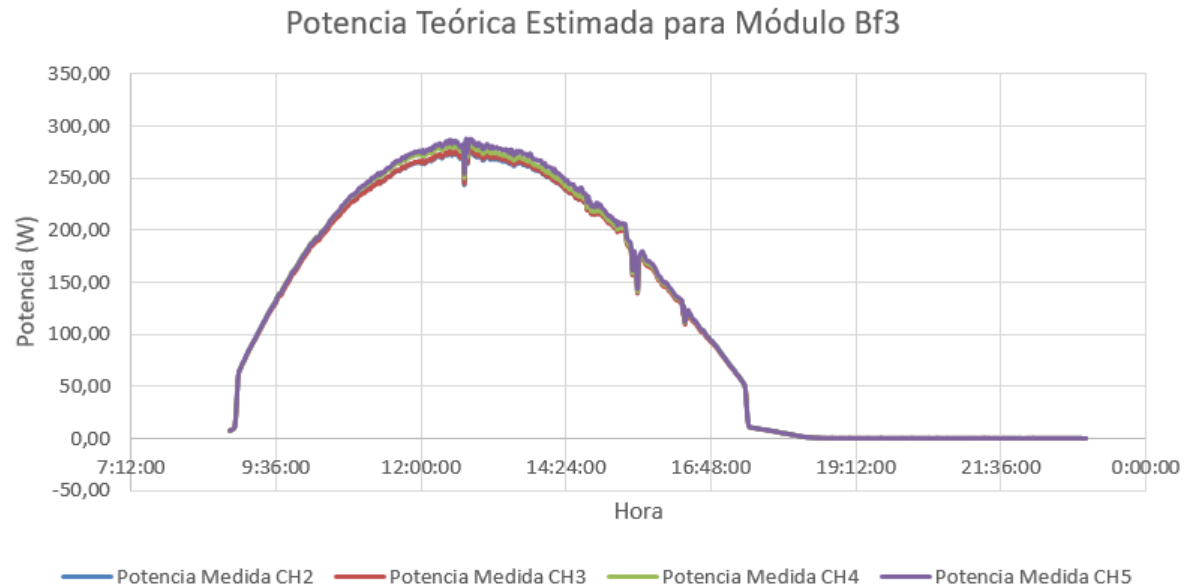
Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural

Figura 129. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf3 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

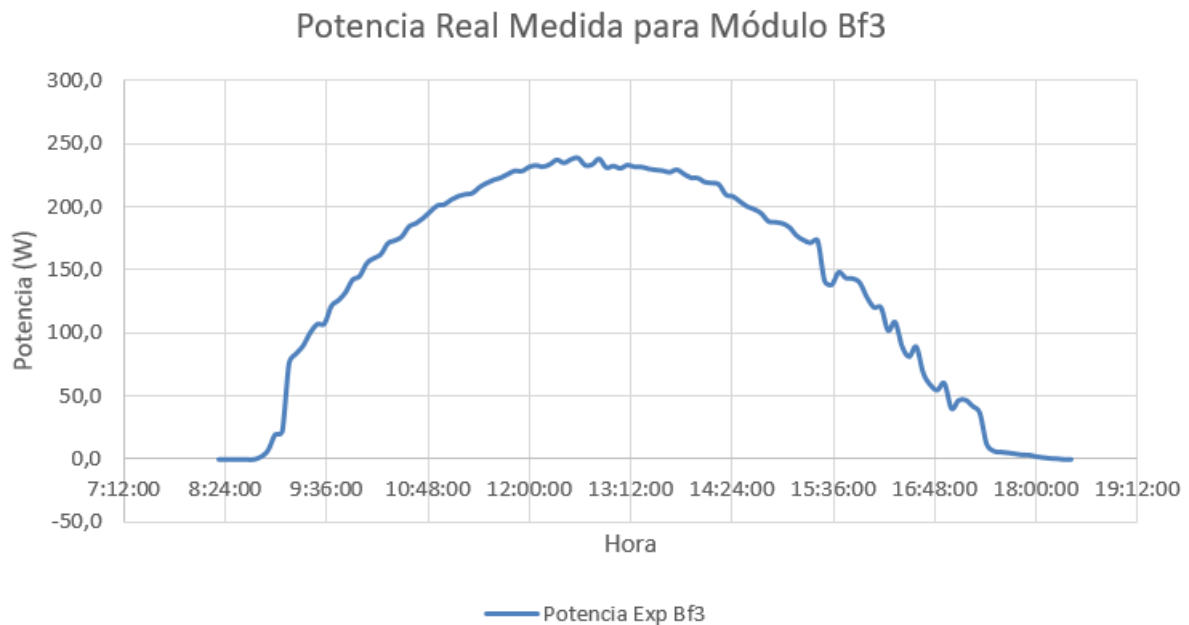


Figura 130. Potencia Real Medida Módulo Bf3 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

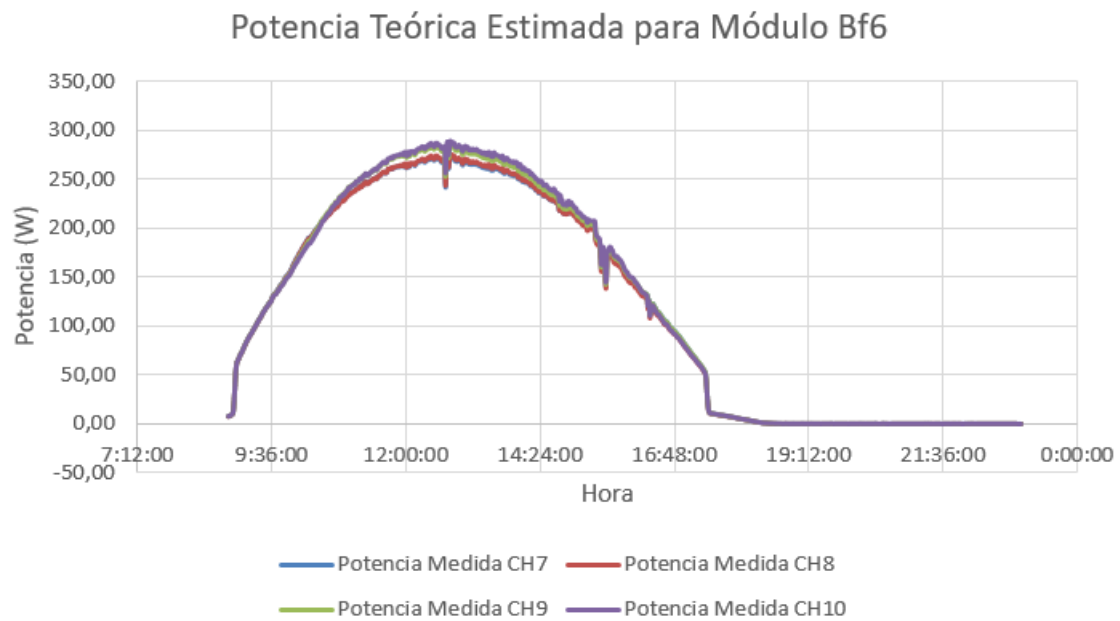


Figura 131. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

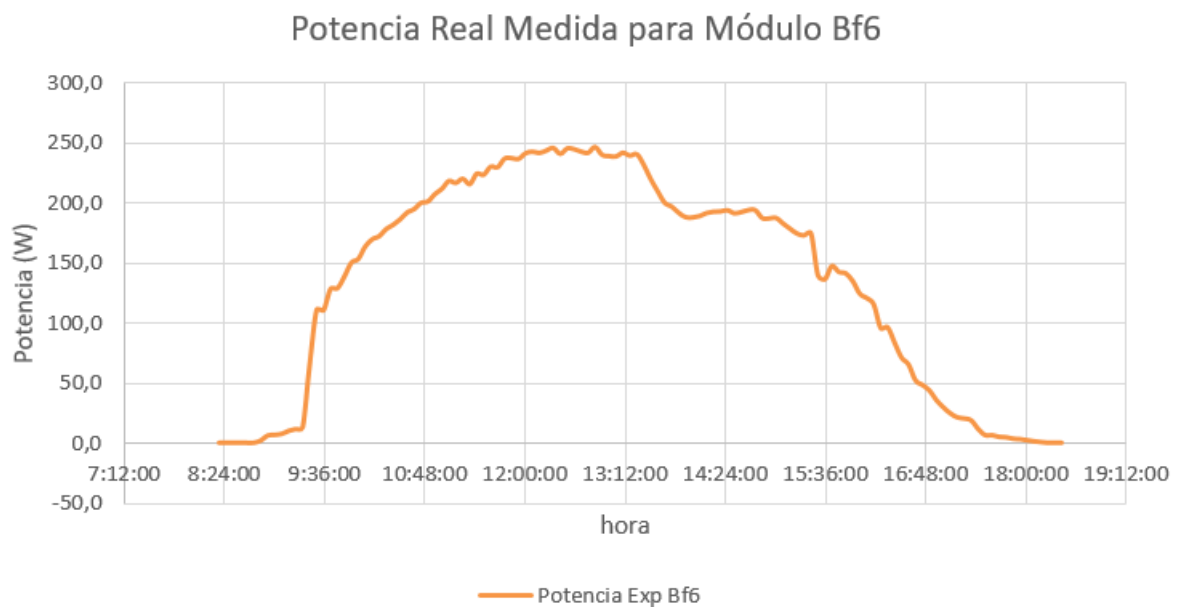


Figura 132. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

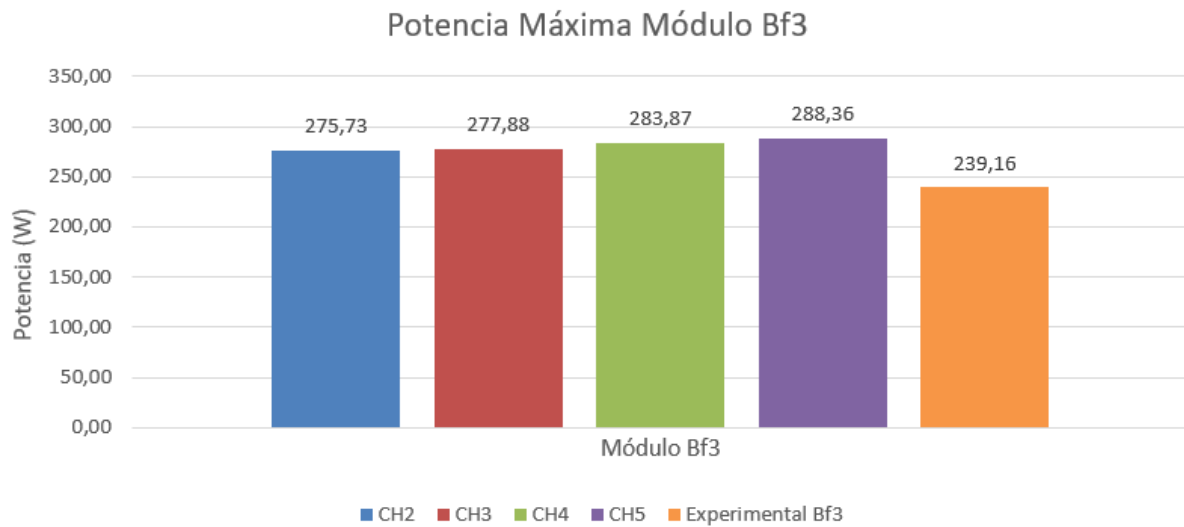


Figura 133. Potencia Máxima Módulo Bf3 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

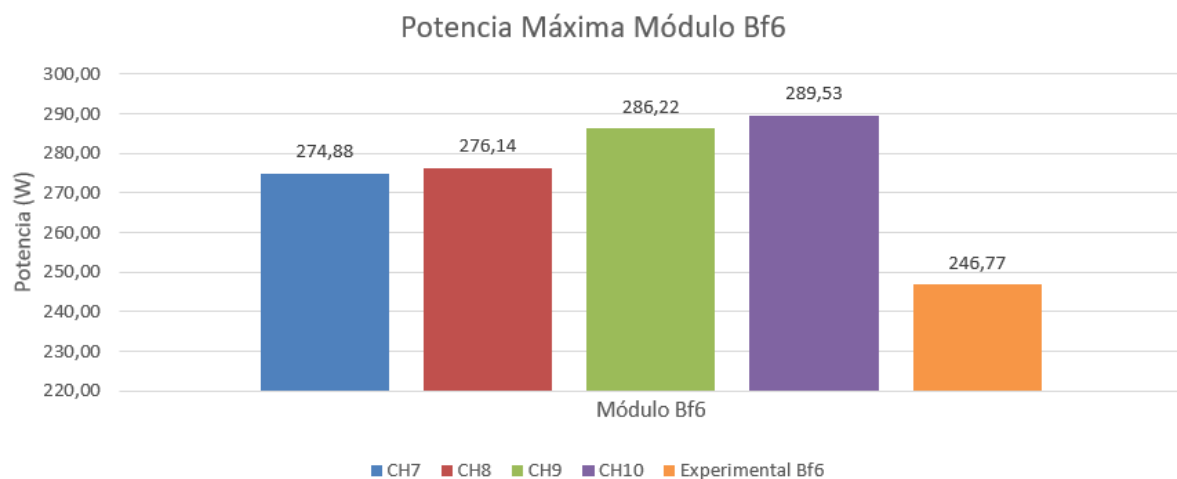


Figura 134. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

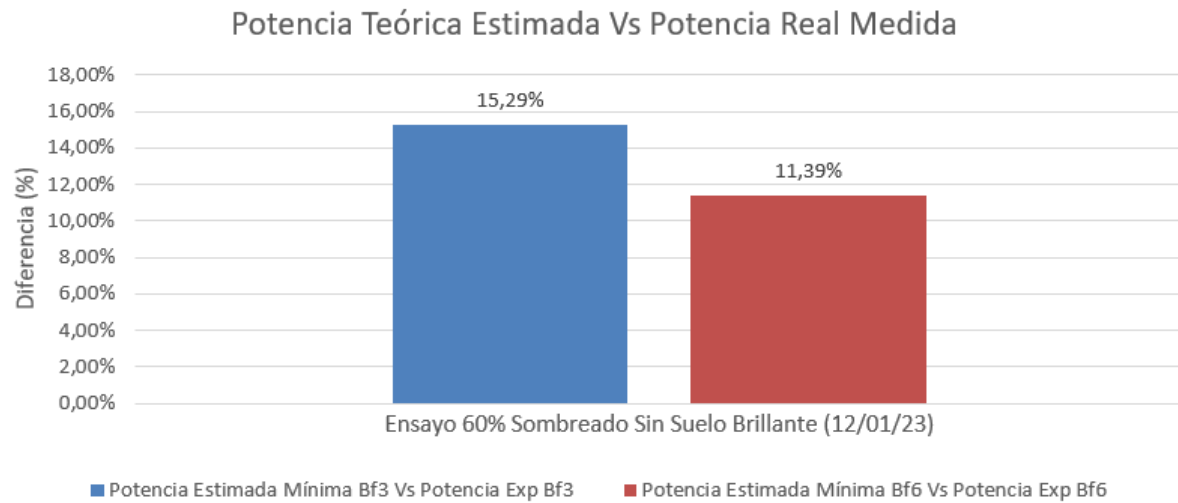


Figura 135. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Natural)

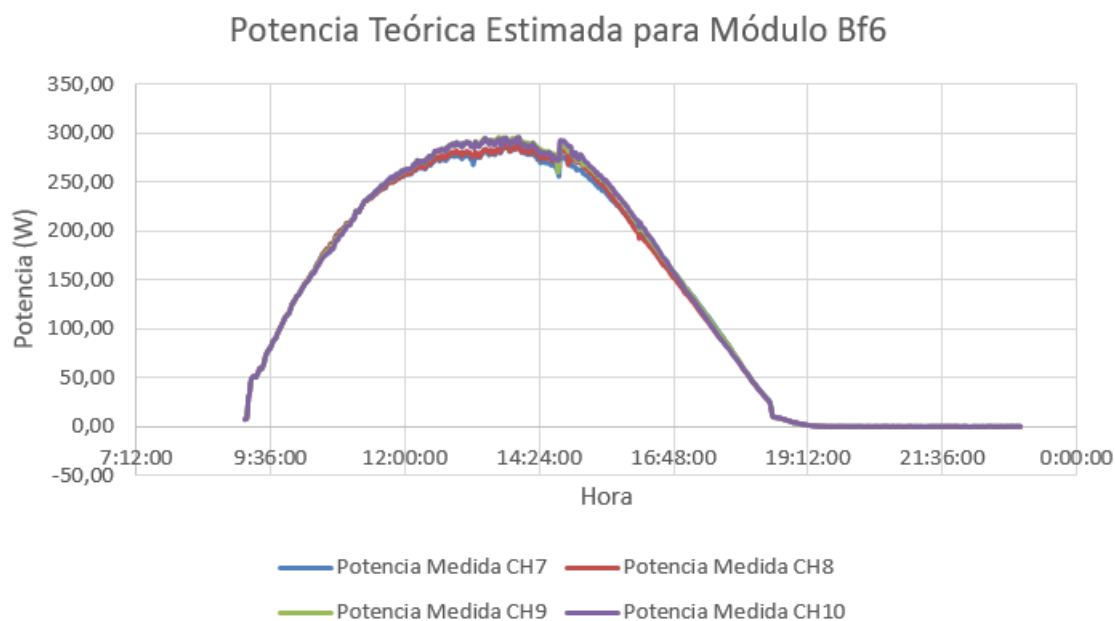
Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante

Figura 136. Potencia Teórica Estimada Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

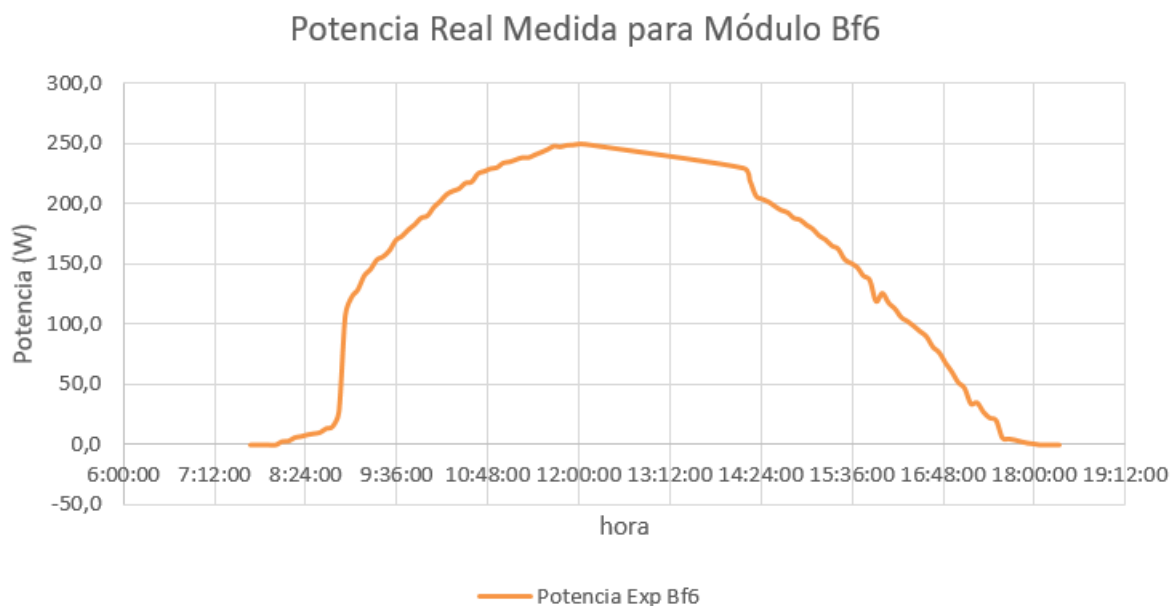


Figura 137. Potencia Real Medida Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

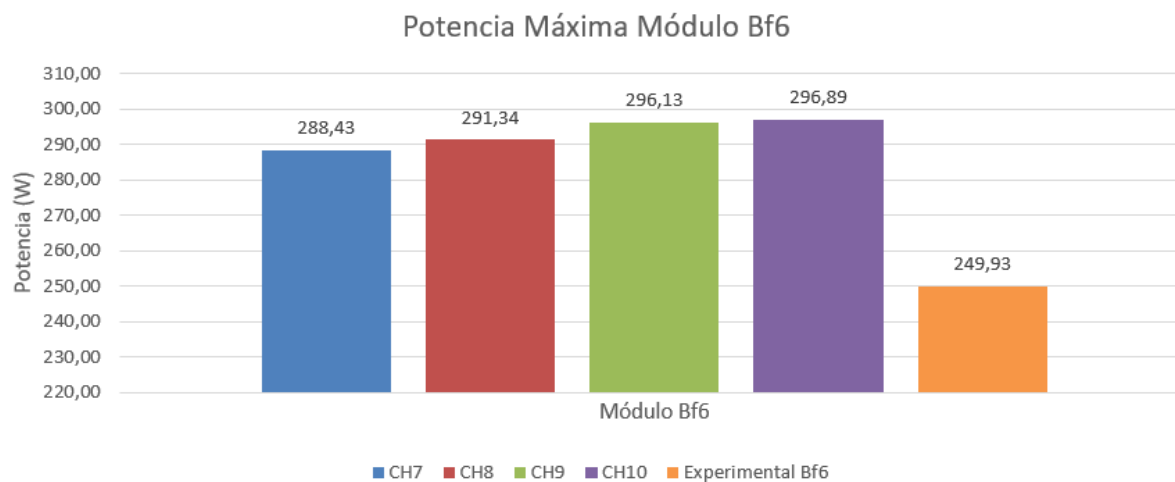


Figura 138. Potencia Máxima Módulo Bf6 (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)

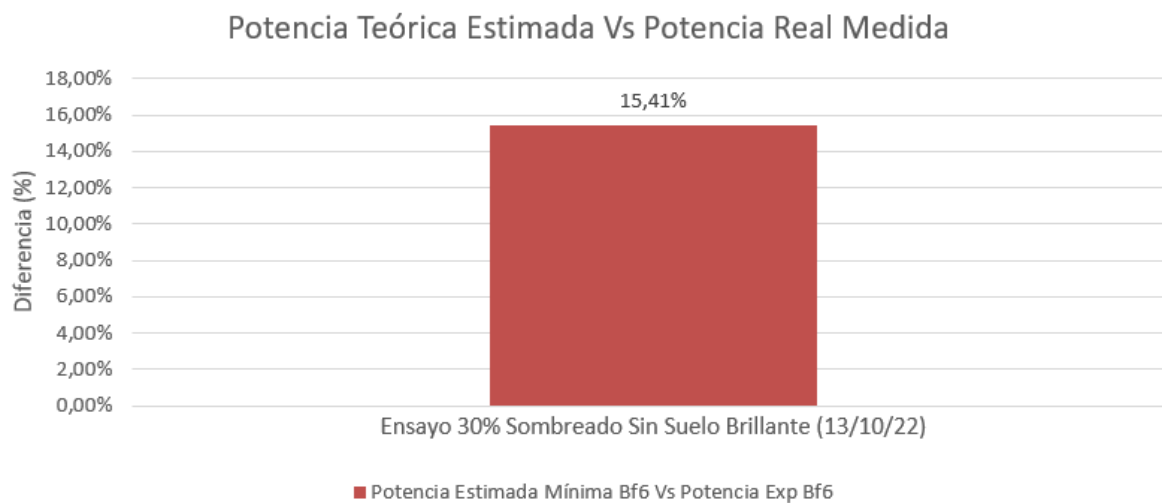


Figura 139. Diferencia entre Potencia Teórica Estimada y Potencia Real Medida (Ensayo 60% Sombreado Con Suelo Brillante)