

COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR COLECTADA ENTRE PLANOS FIJOS Y SEGUIMIENTO EN DOS EJES EN LUJÁN (PAMPA HÚMEDA ARGENTINA)

Raúl Righini, Pablo E. Ruiz, Sebastián Bazán, Valeria Stern

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad Nacional de Luján (UNLu)
Tel. 02323-440241 – e-mail: raulrighini@yahoo.com.ar

RESUMEN: Se realizaron mediciones de radiación solar incidente en Luján en un plano orientado de tres maneras diferentes: horizontal, inclinado al norte el ángulo óptimo anual respecto a la horizontal, y siguiendo la posición del Sol mediante trackeo en dos ejes. El objetivo es determinar, con una serie de mediciones prolongadas en el tiempo, la mejora en la colección de energía de un plano (respecto al plano horizontal) que implican las otras dos orientaciones. Se construyó un dispositivo de seguimiento solar en dos ejes (acimutal y cenital) controlado por un Arduino Mega que calcula la posición del Sol obteniendo de un GPS los parámetros requeridos. Se usaron motores paso a paso para orientar un radiómetro que mide la irradiancia en las tres posiciones descritas. Se evaluaron las diferencias porcentuales entre la energía colectada en el plano horizontal y las otras dos posiciones, encontrándose ganancias en el trackeo en dos ejes que, en días despejados pueden alcanzar un 102% y una ganancia promedio mensual que se encuentra entre el 40,8% y el 68,8%, con clara dependencia estacional. El trackeo en un eje determina ganancias medias que se encuentran entre el 13,9 % y el 40,5 %.

Palabras clave: irradiación solar, plano de adquisición, ángulo óptimo, trackeo en dos ejes.

INTRODUCCIÓN

Las estrategias de maximización de la energía colectada por un plano han sido muy analizadas en diversos ámbitos, tanto del país como del extranjero. El universo de aplicación de estas estrategias alcanza a aquellos sistemas tecnológicos que utilizan la radiación solar como fuente primaria de energía, tales como los sistemas de calentamiento de agua o de concentración de energía y, particularmente, a los sistemas fotovoltaicos de generación eléctrica.

En Argentina, entre otros casos, puede citarse a Grossi Gallegos y Righini (2013); Righini y Grossi Gallegos (1999), quienes evaluaron los ángulos anuales óptimos de inclinación de planos orientados al norte, considerando la variabilidad en los valores medios mensuales de radiación en cada una de las regiones de Argentina. Otros autores, como Alexandru y Pozna (2010), han estudiado sistemas de trackeo en dos ejes, asociando el análisis a la generación fotovoltaica y evaluando, mediante simulaciones, la ganancia energética.

Las experiencias de medición de radiación global incidente en un plano que trackea en un eje y en dos ejes resultan aún más limitadas, tanto por la cantidad de trabajos realizados como por la extensión del tiempo en el que se efectuaron las medidas correspondientes. En general, se realizaron teniendo como motivación la construcción de equipamientos diversos que puedan seguir al Sol en uno o dos ejes, generalmente en dos, pero la discusión de la ganancia energética que implica el trackeo ha sido poco desarrollada (Alexandru, C. y Pozna, C. (2010)). y sus valores resultan fuertemente dependientes de la ubicación del sitio en cuestión y de sus características climáticas.

El presente trabajo pretende aportar información en ese sentido, efectuando mediciones de la radiación solar global incidente en un plano. Mediante un seguidor solar de dos ejes, (cuyas características se describirán en el apartado siguiente), se realizaron comparaciones entre la energía colectada en un plano inclinado el ángulo óptimo anual para la colección de energía, un plano que siga la posición del Sol, y la energía solar que llega a un plano horizontal. Las mediciones se llevaron adelante durante varios meses del año 2025, con el objetivo de extenderlas, al menos, durante todo 2026.

La información recolectada posibilitará evaluar adecuadamente la ventaja del seguimiento en dos ejes en zonas con condiciones climáticas y latitudes similares a las de Luján (provincia de Buenos Aires, Argentina).

Por otro lado, la aplicación de la estrategia de medición seguida en el presente artículo, hará posible estudiar diferentes estrategias de trackeo en dos ejes, con vistas a maximizar la ganancia energética total de los sistemas cuando se considere el propio consumo de los mecanismos de seguimiento y la energía que producen.

METODOLOGÍA

Se confeccionó un sistema de seguimiento en dos ejes (uno acimutal y otro cenital), basado en el uso de dos motores paso a paso destinados al movimiento de cada uno de los ejes. Un Arduino Mega calcula la posición solar en coordenadas locales y se comunica con los drivers de los motores paso a paso (que a su vez controlan los motores). Un GPS brinda la latitud, longitud y hora local del sitio de instalación. El algoritmo de cálculo de la posición solar posibilita determinar el ángulo acimutal y cenital solar de manera minutar. Como instrumento de medición se usó un radiómetro fotovoltaico fabricado por CNEA (Bolzi et al, (2002); Bolzi et al, (2008)). El adquisidor de datos empleado para guardar la información obtenida fue un datalogger Campbell CR1000X, donde se almacenan los promedios minutales de los datos entregados por el radiómetro. El esquema del dispositivo elaborado se presenta en la Figura 1, mientras que una fotografía del trackeador ya instalado se muestra en la Figura 2.

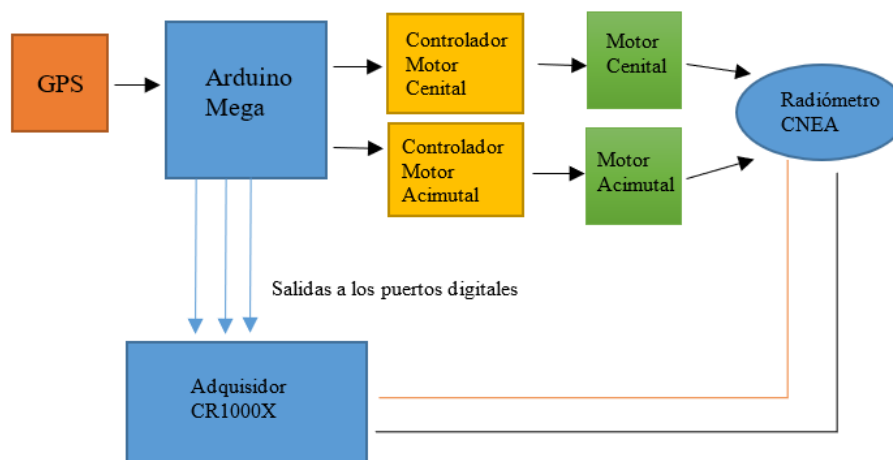


Figura 1: Esquema de funcionamiento del trackeador y el almacenamiento de datos.



Figura 2: fotografía del trackeador, ya instalado.

Una vez realizados los cálculos posicionales, se realizaron tres mediciones: primero, durante 13 segundos, se realizó una medición en el plano horizontal. Luego se movió el motor cenital hasta que el plano que soporta al radiómetro quedara orientado al norte e inclinado el ángulo óptimo anual respecto a la horizontal. Dicho ángulo es de 28° para Luján (Grossi Gallegos, H. y Righini, R., 2013). En esa posición se midió durante otros 13 segundos. Finalmente, el plano que contiene al radiómetro se orientó hacia la posición que ocupa el Sol, moviendo los motores paso a paso cenital y acimutal, y se efectuó una medición durante otros 13 segundos. Se esperó hasta que comience un nuevo minuto, y se reinició todo el ciclo de movimientos y mediciones. Cada una de las mediciones realizadas fue una medición puntual de un segundo de los valores de voltaje que entrega el radiómetro fotovoltaico. Las mediciones fueron realizadas y almacenadas en un adquisidor CR1000X, de la firma Campbell. En el adquisidor se almacenaron los promedios de cada una de las 13 mediciones realizadas en cada posición.

Las mediciones se realizan durante 13 segundos debido a varias limitaciones que impone el diseño experimental:

- Las medidas efectuadas en las tres posiciones diferentes debían estar lo más cerca posible en el tiempo, para poder compararlas entre sí.
- Los promedios de las tres medidas se asignaron a un mismo minuto.
- Cuando el plano en el que se situó el radiómetro alcanzó su posición, se esperó un segundo para que se estabilizara su voltaje antes de medir.
- El tiempo de viaje del trackeador que lo llevó de una posición a otra fue variable, alcanzando un máximo al amanecer y al atardecer.
- Todos esos tiempos debieron sumarse a los 39 segundos totales en los que se efectuaron las mediciones.

Estas limitaciones determinaron la elección de los 13 segundos para medir en cada una de las posiciones. Procediendo así, en el peor de los casos, quedaron unos cinco segundos antes de que comenzara un nuevo minuto dentro del cual debía realizarse el nuevo ciclo de medición.

El proceso adoptado para medir implica que el error asociado a las mediciones estuviese correlacionado con los errores de los parámetros angulares de posicionamiento del plano sobre el que se apoya el radiómetro, además del error asociado al registro del voltaje del mismo.

Es de notar que solamente se almacenaron los promedios de los valores de voltaje que provinieron del radiómetro fotovoltaico. En efecto, dado que la pretensión del trabajo es realizar una comparación relativa entre la energía que llega al plano horizontal y los planos que son orientados de formas diferentes, la constante propia de calibración del equipo pudo obviarse y, de esa manera, compararse los promedios de los voltajes en cada una de las posiciones. Al proceder así, cualquier cambio en la

constante de calibración del equipo a lo largo del experimento no tuvo relevancia alguna, dado que la frecuencia minatural de las comparaciones permitió asegurar que el radiómetro no puede haber variado su comportamiento dentro de minuto en el que las mediciones son realizadas.

Para codificar cada posición, se usaron dos salidas del Arduino Mega que se conectaron a dos puertos digitales del adquirente CR1000X.

Las mediciones se efectuaron únicamente cuando la altura solar supera los 7°, con el objetivo de evitar datos espurios debido a que el horizonte no está completamente despejado.

Los errores angulares fueron estimados en 1°, dada la incerteza mecánica que implica la orientación del plano de apoyo del radiómetro fotovoltaico y el movimiento de los motores paso a paso. Ello se determinó colocando un medidor angular en el trackeador y evaluando su posición horizontal y su orientación al norte en distintos momentos del día. La diferencia entre esos valores fue de ese orden. El error en la medición de los voltajes por parte de la CR1000X es menor que el 0,1%.

Las mediciones realizadas se extendieron entre el 7 de marzo y el 14 de julio de 2025. En total se analizaron 46982 datos cada un minuto, registrados en las tres posiciones mencionadas.

Las ganancias en cada minuto, respecto a las mediciones efectuadas en el plano horizontal, se definen como:

$$Ganancia\ minatural\ \%_i = \frac{voltage_i - voltage_{horizontal}}{voltage_{horizontal}} * 100 \quad (1)$$

Donde los voltajes son promediados durante los 13 segundos medidos en cada posición y el sub índice *i* varía entre dos referencias: ángulo óptimo anual y trackeo en dos ejes.

Para las ganancias diarias se usó:

$$Ganancia\ diaria\ \%_i = \frac{\sum voltage_i - \sum voltage_{horizontal}}{\sum voltage_{horizontal}} * 100 \quad (2)$$

donde *i* toma los valores anteriormente mencionados y las sumatorias son efectuadas a lo largo del día para posiciones del Sol que superen los 7° de altura solar.

RESULTADOS

Los valores máximos de diferencia entre la energía diaria acumulada en el plano horizontal y las acumuladas en un plano inclinado el ángulo óptimo anual y otro que trackea en dos ejes correspondieron a días de cielos absolutamente despejados, como era de esperar. A título de ejemplo, se muestra en la Figura 3 el correspondiente al día 11 de mayo:

Definiendo las ganancias porcentuales para cada una de las posiciones (ángulo óptimo anual y trackeo en dos ejes) como:

$$Ganancia\ trackeo\ dos\ ejes\ (\%) = 100 * \frac{mv\ trackeo - mv\ horizontal}{mv\ horizontal} \quad (3)$$

$$Ganancia\ óptimo\ anual\ (\%) = 100 * \frac{mv\ óptimo\ anual - mv\ horizontal}{mv\ horizontal} \quad (4)$$

Para este día la ganancia porcentual diaria de la energía colectada por el plano inclinado orientado al norte cuya inclinación respecto al horizontal es la del ángulo óptimo anual (28°), fue de 51,2%. La ganancia del plano que trackea en dos ejes fue del 102% respecto a la energía del plano horizontal.

Si graficamos las ganancias minuto a minuto, para el 11 de mayo (kt diario de 0,72), obtenemos el gráfico que se muestra en la figura 3.

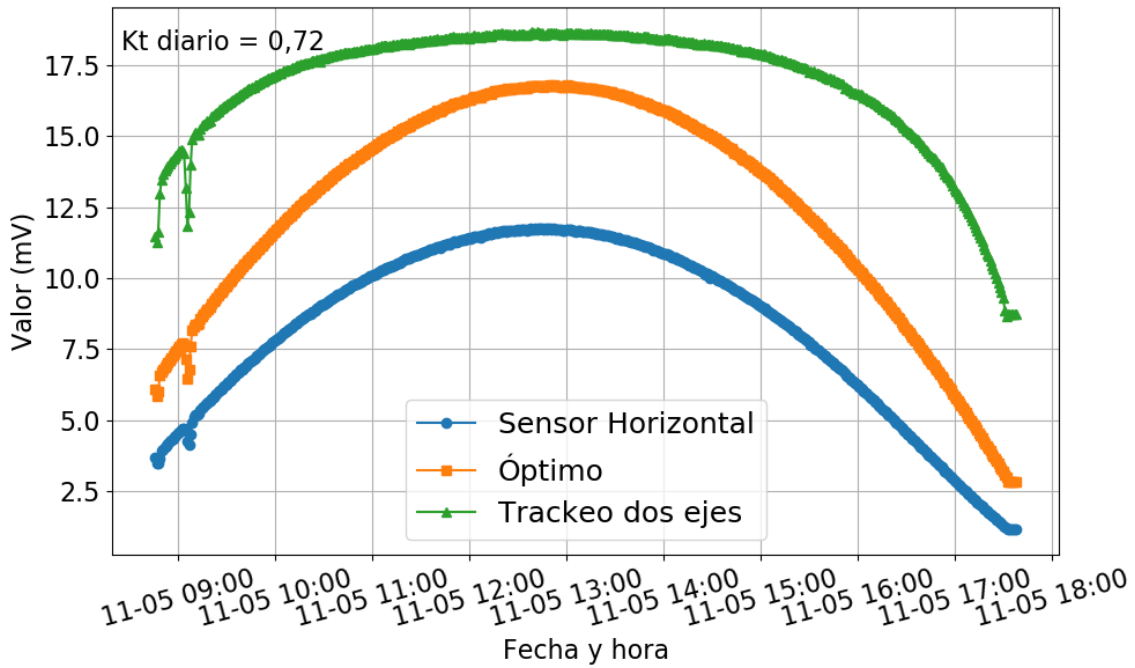


Figura 3. Valores de voltaje medidos en las tres posiciones diferentes durante el día 11 de mayo.

La figura 4 muestra las ganancias porcentuales calculadas para cada minuto para el plano que soportaba al radiómetro ubicado en las posiciones correspondientes al óptimo anual y al trackeo en dos ejes.

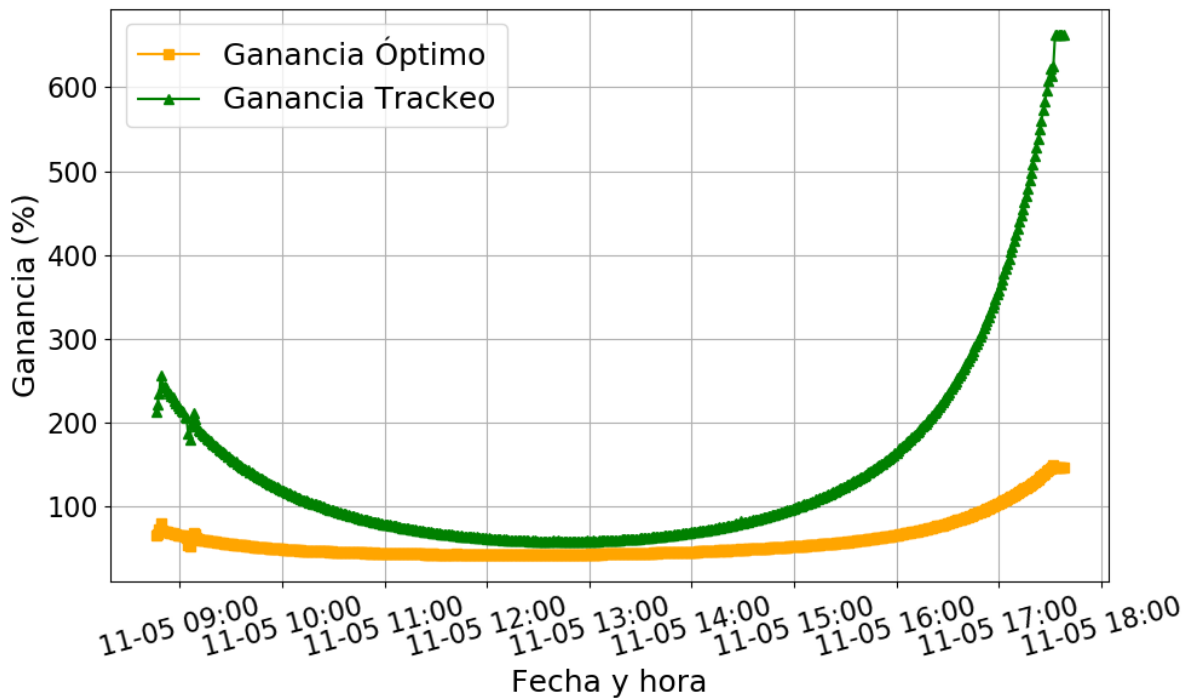


Figura 4: ganancias porcentuales respecto a la medición en plano horizontal para las posiciones de medición: en el ángulo óptimo anual y con trackeo en dos ejes.

Un día con cobertura parcial de nubes puede ejemplificarse con el día 8 de mayo, donde el kt diario fue 0,58, que presenta un gráfico como el que se muestra, a continuación, en la Figura 5.

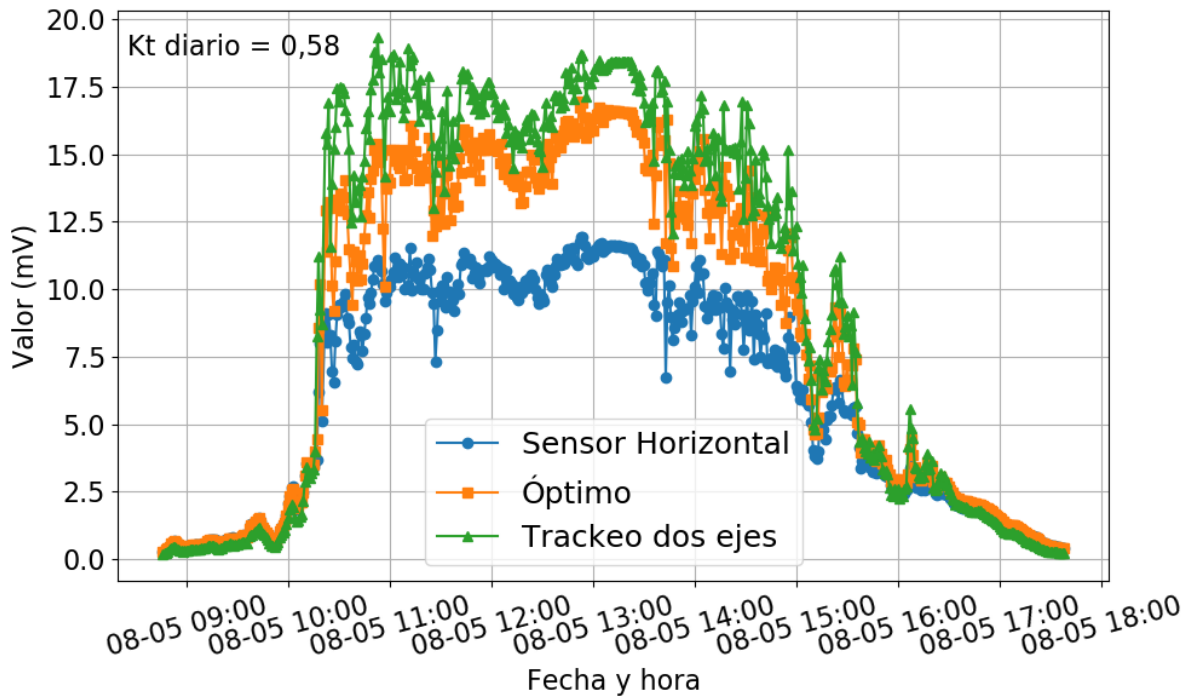


Figura 5: milivoltios promediados cada minuto para cada una de las posiciones de medición el día 8 de mayo.

Para este día particular la ganancia porcentual diaria de la energía colectada por el plano inclinado orientado al norte el ángulo óptimo anual respecto al horizontal, fue de 36,6%. La ganancia del plano que trackea en dos ejes fue del 55,2% respecto al horizontal. Las ganancias porcentuales minutales del 8 de mayo se muestran en la Figura 6.

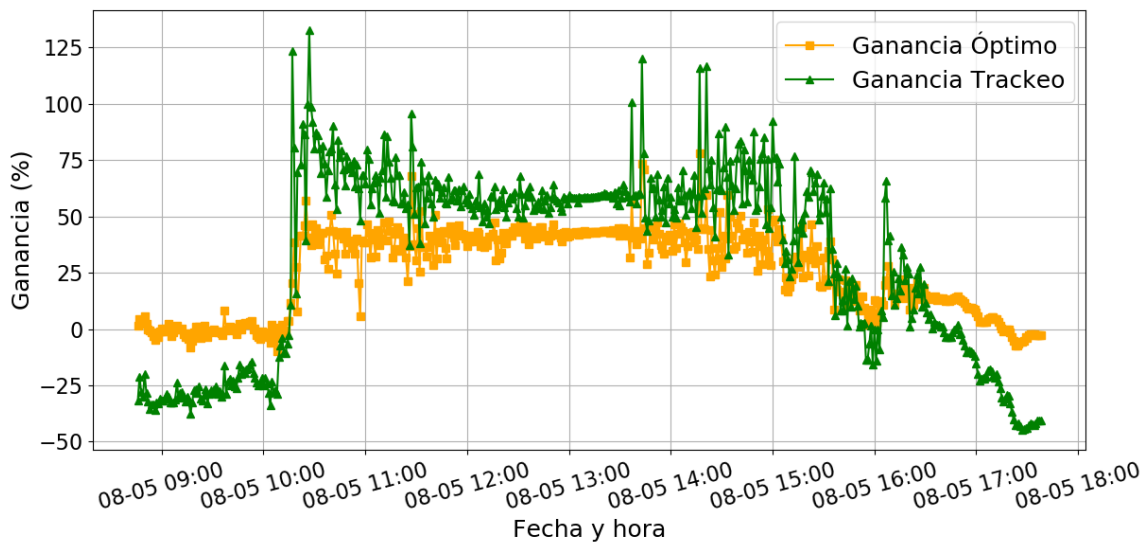


Figura 6: Ganancias porcentuales respecto a la medición en plano horizontal para las posiciones de medición: en el ángulo óptimo anual y con seguimiento en dos ejes, el día 8 de mayo. La ganancia de trackeo es negativa en algunos momentos.

Un día de cobertura prácticamente total, determina que la ganancia del trackeo en dos ejes puede llegar a ser negativa. Es decir: el trackeo no supone ninguna ventaja respecto al plano horizontal sino, más bien, una desventaja, tal como se muestra en la Figura 7.

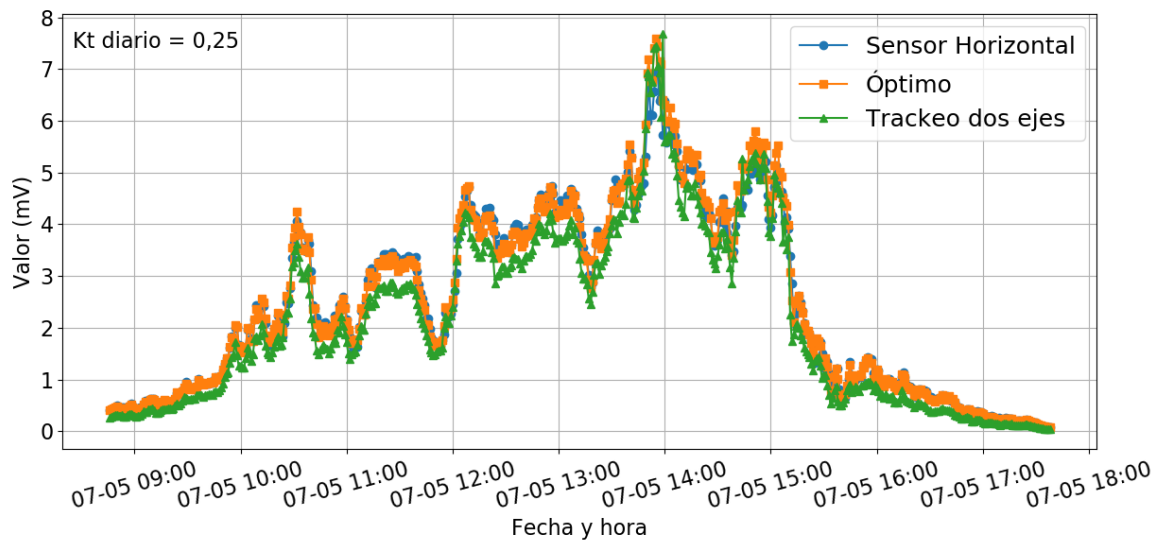


Figura 7: milivoltios promediados cada minuto para cada una de las posiciones de medición el día 7 de mayo.

Durante ese día, la ganancia porcentual diaria de la energía colectada por el plano inclinado orientado al norte el ángulo óptimo anual respecto al horizontal, fue de 1,2%; mientras que la ganancia del plano que trackea en dos ejes fue del -12,2% respecto al horizontal. En la Figura 8 se muestran las ganancias porcentuales minutales a lo largo del día 7 de mayo.

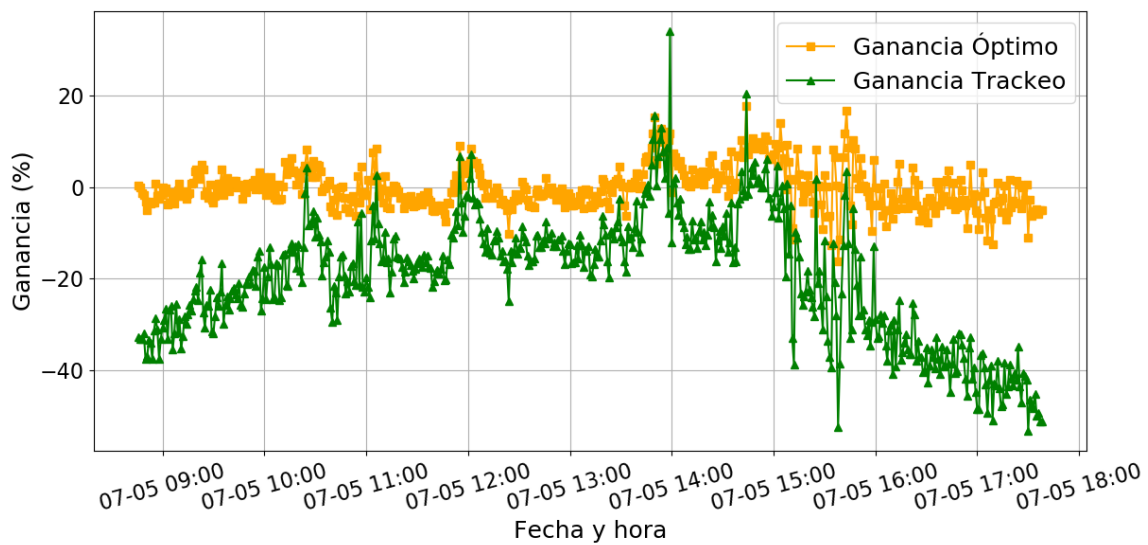


Figura 8: ganancias porcentuales respecto a la medición en plano horizontal para las posiciones de medición: en el ángulo óptimo anual y con trackeo en dos ejes el día 7 de mayo.

Análisis de las ganancias

Las ganancias de ambas situaciones (trackeo en dos ejes y plano fijo en el ángulo óptimo anual) en función del ángulo cenital, son mostradas en la Figura 9.

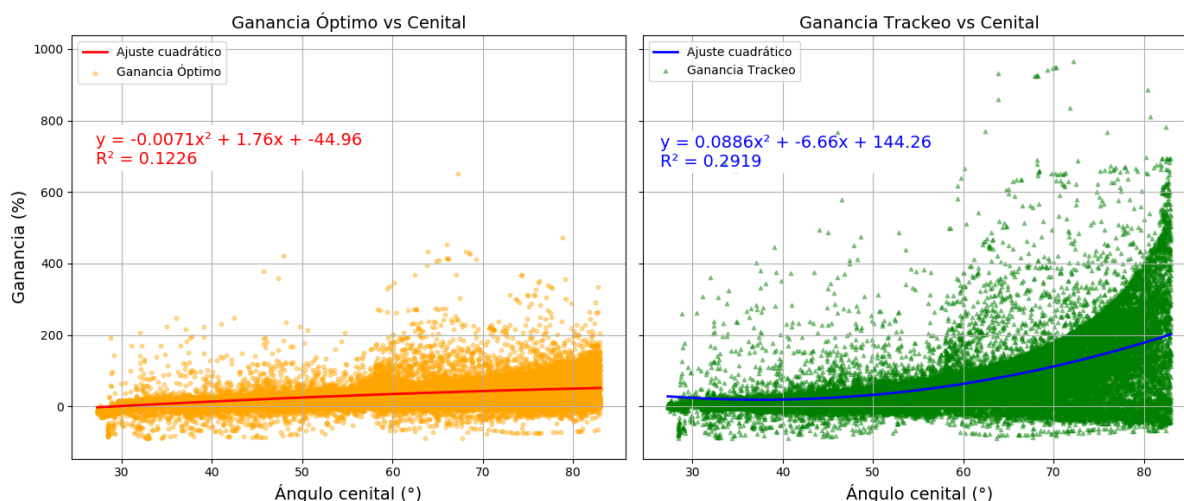


Figura 9: ganancias del plano inclinado el ángulo óptimo anual y del plano que trackea en dos ejes, en función del ángulo cenital.

Tal como se visualiza, la tendencia fue, en el caso del seguimiento en dos ejes, que la ganancia aumentara a medida que aumentaba el ángulo cenital. Ese hecho se veía bien reflejado en un día de cielo despejado, tal como el que mostró en la Figura 4. Si bien la presencia de nubes alteraba esa ganancia, la tendencia se mantiene. En cambio, en el caso del plano orientado al norte un ángulo igual al óptimo anual (28°) respecto a la horizontal, la tendencia se revela como muy débil. En ese caso, no puede determinarse a priori ninguna dependencia de la ganancia con el ángulo cenital.

En la Tabla 1 se muestra la ganancia, con respecto a la medición en plano horizontal, que se obtuvo midiendo en el ángulo óptimo y trackeando, a nivel mensual. Se presenta también el índice de claridad kt medio mensual, recordando que el índice de claridad, kt , se define como el cociente entre la irradiancia global horizontal y la irradiancia extraterrestre proyectada en el plano horizontal:

$$kt = \frac{\text{Irradiancia Global Horizontal}}{\text{Irradiancia TOA Horizontal}} \quad (5)$$

El kt diario fue calculado a partir de mediciones tomadas con frecuencia de un minuto realizadas con un piranómetro modelo CMP21 de la firma Kipp & Zonen, que forma parte del instrumental de medición instalado en el predio del GERSolar. El kt medio mensual, se calculó promediando los kt diarios en el mes. Las ganancias en las dos posiciones, ángulo inclinado igual al óptimo anual y el trackeo en dos ejes en función del kt se muestran en la Tabla 1, mientras que el gráfico de las ganancias en función del kt se ilustra en la Figura 10.

Tabla 1: Promedios mensuales de ganancias para cada una de las orientaciones.

Mes	Ganancia óptimo anual (%)	Ganancia track (%)	Kt medio mensual
Marzo	13,9	40,8	0,54
Abril	27,7	55,3	0,59
Mayo	28,6	59,1	0,51
Julio	40,5	68,8	0,43

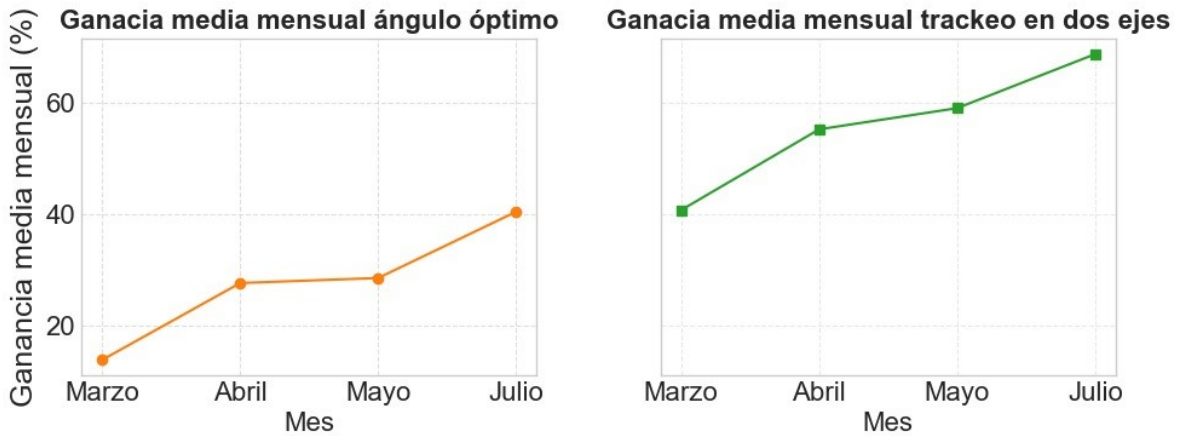


Figura 10: ganancias medias mensuales para las diferentes situaciones de orientación del plano.

Ambas ganancias medias evidenciaron un comportamiento dentro de lo esperable: la relacionada con el óptimo anual crece hacia el invierno ya que el Sol, en esa época, presenta menor altura, por lo que el plano inclinado capturó mayor energía que en los meses de verano, cuando el Sol se encuentra más alto. En el caso del trackeo en dos ejes, el aumento se debió a que, en los meses de verano, el plano horizontal recibió más energía que durante los meses de otoño e invierno, por lo que la ganancia del trackeo en dos ejes (que se calculó respecto al plano horizontal) fue menor. Por lo tanto, las medias mensuales resultaron consistentes con las diferentes geometrías solares para cada una de las estaciones del año.

Resulta interesante evaluar la conveniencia de realizar el trackeo en dos ejes. Dicha evaluación se relaciona con la energía que el propio sistema de trackeo requiere para moverse. Hay en la bibliografía varios trabajos que la abordan empleando aprendizaje de máquina (Krismanto et al (2024)). También hay trabajos evalúan la factibilidad del trackeo en dos ejes usando simulaciones basadas en modelos físicos: Ahmad et al. (2013), y de Rambhowan y Oree (2014). No obstante, la bibliografía no da cuenta de una serie extensa de mediciones que soporten las conclusiones alcanzadas.

Una primera aproximación que puede emplearse es definir cuál sería la ganancia del trackeo en dos ejes. Dada las mediciones efectuadas, es posible determinar cuánta energía colecta un plano que trackea al Sol en dos ejes cuando el seguimiento se hace a partir de un ángulo cenital específico durante un día despejado. Las ganancias fueron calculadas para un día despejado, trackeando para ángulos cenitales menores que un ángulo cenital específico. El resto del tiempo el plano permanecía orientado al norte el ángulo óptimo anual para Luján. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Ganancias (%) trackeando en dos ejes para valores mayores del ángulo cenital indicado y

Ángulo cenital	Ganancia (%)	Ángulo cenital	Ganancia (%)	Ángulo cenital	Ganancia (%)
82	49,1	71	66,5	60	85,3
81	51,5	70	68,6	59	87,0
80	51,8	69	70,3	58	88,3
79	52,4	68	72,0	57	89,8
78	54,1	67	73,8	56	91,4
77	55,6	66	75,5	55	92,8
76	57,5	65	77,2	54	94,3
75	59,4	64	79,0	53	95,9
74	61,3	63	80,6	52	97,6
73	62,8	62	82,2	51	100,3
72	64,7	61	83,9		

dejando fijo el plano de colección en el óptimo anual para el resto de los ángulos cenitales para el día 11 de mayo.

Los valores porcentuales de ganancias (respecto a la energía colectada en el plano horizontal) mostrados en la Tabla 2 se seleccionaron bajo la siguiente condición de seguimiento del Sol: se trackeó en dos ejes, mientras que el ángulo cenital fuese mayor que el indicado en la Tabla 2. Para ángulos inferiores, el plano de colección se ubicó mirando al norte inclinado respecto de la horizontal el ángulo óptimo anual. Este cálculo está justificado dado que, en condiciones de cielo despejado, las mayores ganancias de trackeo en dos ejes se dieron cuando los ángulos cenitales fueron relativamente altos. Debido al hecho que esas ganancias disminuyeron a medida que el ángulo cenital se acercaba al correspondiente al mediodía solar, parece razonable analizar la ventaja de trackear en dos ejes durante un cierto tiempo y, luego, dejar el plano de colección fijo en una posición favorable para recepción de energía solar. Este ángulo fijo sería el óptimo anual, en una primera aproximación. Proceder así se justificaría en función del consumo energético del propio equipo de seguimiento, considerando que mantener inmóvil el plano de colección no consume energía y trackear sí. El ángulo cenital óptimo que determina la mejor performance energética del sistema de seguimiento depende del consumo energético del sistema de trackeo y de la energía generada por el sistema de aprovechamiento. También depende de la época del año, ya que, hacia el verano, período en que las alturas solares son mayores, debería variarse el ángulo fijo y, en vez de usar el óptimo anual. Quizá convenga, en esa época, por ejemplo, dejar el sistema en el plano horizontal en los momentos en que no se realice seguimiento en dos ejes, dado que el ángulo de inclinación óptimo del plano, respecto a la horizontal, durante los meses de verano, para Luján, es 0° (Righini, R. y Grossi Gallegos, 1999).

En el caso particular del día despejado estudiado, dejar de trackear para ángulos cenitales menores que 60° (lo que ocurre entre las 11 y las 13 durante el mes de mayo), dejando luego fijo el plano, en la dirección norte, un ángulo inclinado respecto a la horizontal un valor igual al óptimo anual, representaría una ganancia del 85% diaria en la colección de energía. Este valor resulta un 15% inferior al máximo posible al trackear en dos ejes todo el día, lo que no es una disminución muy importante pero que puede resultar significativa en el balance energético total que considere el consumo del sistema de trackeo.

Se trata de una primera aproximación que requiere medir durante todo un año, sin embargo, resulta útil para analizar estrategias que optimicen el balance energético global de un sistema de colección de energía solar que utilice esta tecnología de seguimiento en dos ejes.

Por otro lado, lo que se desprende del análisis de datos correspondientes a días nublados, queda claro que en situaciones de cobertura de cielo que, en todo caso, determinen un kt diario menor o igual a 0,4, no conviene trackear en absoluto. Esto está relacionado con la anisotropía de la radiación difusa, que resulta relativamente mayor en el horizonte (sobre todo el horizonte sur)) (Klucher, 1979; Hay y McKay, 1985; Pérez et al., 1990). Al inclinarse sensiblemente el plano de colección de la radiación como ocurre durante el trackeo en dos ejes, la energía captada es menor que la que captura un plano horizontal. Por otro lado el albedo del suelo pampeano, cercano a 0,2, implica que es mayor la energía perdida, cuando el kt es bajo, que la ganancia que presupone trackear en dos ejes.

CONCLUSIONES

Se ha construido un dispositivo muy económico, con un nivel de precisión suficiente para evaluar las ventajas energéticas de mecanismos de trackeo para incrementar la energía colectada por un plano.

La ventaja de usar un mismo radiómetro para evaluar la energía recibida en las diferentes orientaciones del plano, consiste en evitar las incertezas asociadas a las constantes de calibración de los radiómetros y asegura la homogeneidad del comportamiento de los mismos durante el pequeño período de tiempo en el que son comparadas sus mediciones. En tal sentido, podemos afirmar que los datos colectados representan adecuadamente la energía colectada por el plano.

La información recolectada (una serie de mediciones inusualmente larga para la mayoría de los análisis que se han hecho sobre sistemas de seguimiento solar) se revela, por un lado, incompleta: es necesario realizar una serie de mediciones que al menos sea anual para tomar en cuenta cómo las diferentes trayectorias del Sol en el cielo y las condiciones de cobertura de nubes, influyen, efectivamente, en la

determinación del ángulo óptimo fijo de colección y en la ganancia que representa el trackeo en dos ejes. Ese análisis debe, necesariamente, complementarse con el trackeo en un eje, para considerar todas las posibilidades usuales de seguimiento que emplean, por ejemplo, los sistemas fotovoltaicos de generación eléctrica.

Las ganancias que representan el ángulo óptimo frente al plano horizontal en los meses estudiados van del 14% (el mes de menor ganancia) al 41% (mes de mayor ganancia), mientras que, en los mismos meses, las ganancias del trackeo frente al plano horizontal abarcan un rango comprendido entre el 41% y el 69%. Estos últimos valores están dentro del orden de valores descriptos en Ahmed Rhif et al., 2013 y Rambhowan y Oree, 2014.

De lo que surge de los datos considerados, pueden deducirse estrategias de trackeo que mejoren la generación energética total, ya que tales estrategias deben considerar la propia energía consumida por el sistema de seguimiento. En tal sentido puede aconsejarse, en base a lo medido, que en días con alta cobertura de nubes (kt menor a 0,4) no conviene trackear en absoluto, dado que las ganancias que supone el seguimiento en dos ejes pueden llegar a ser negativas (comparadas con la energía recibida por un plano horizontal).

También se presentó una herramienta de evaluación que, bajo condiciones de cielo despejado, permitirá, una vez conocido el consumo del sistema de seguimiento, seleccionar a partir de qué ángulo cenital conviene dejar de trackear en dos ejes, con el objetivo de optimizar la generación de energía.

REFERENCIAS

- Ahmad, F., Dahli, N. F., & Wahab, A. F. (2013). Power feasibility of a low power consumption solar tracker. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 682–691. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.086>
- Alexandru, C. y Pozna, C. (2010). Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224(6), 797–811. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE871>
- Bolzi C. G., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J. C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 11.01-11.02
- Bolzi C. G., Martínez Bogado M. G., Tamasi M. J. L., Grossi Gallegos H., Righini R. (2008). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA. *Actas del IX Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica 2008*, organizado por la Asociación Argentina de Luminotecnia, Rosario, Santa Fe, Argentina, Tomo I pp. III-38 a III-45.
- Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2013). Ángulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184), Vol. 16, pp. 04.01-04.07. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/1490>
- Hay, J. E., & McKay, D. C. (1985). Estimating solar irradiance on inclined surfaces: A review and assessment of methodologies. *International Journal of Solar Energy*, 3(4-5), 203-240.
- lucher, T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23(2), 111-114.
- Krismanto, A. U., Ariski, M., Lomi, A., & Setiadi, H. (2024). Hardware implementation and design of artificial neural network based dual axis solar tracker. En *Proceedings of the International Conference on Advanced Technology and Multidiscipline (ICATAM2022)* (Vol. 3047, Art. 030001). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0194339>
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289.
- Rambhowan, Y. y Oree, V. (2014). Improving the dual-axis solar tracking system efficiency via drive power consumption optimization. *Applied Solar Energy*, 50(2), 83–91. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1402011X>

Rhif, A., Kardous, Z., y BenHadj Brahiek, N. (2013, enero). A sliding mode multimodel control for a sensorless photovoltaic system.

Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (1999). Ángulos sugeridos para optimizar la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos orientados al norte. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 3.

COMPARISON OF COLLECTED SOLAR ENERGY BETWEEN FIXED PLANES AND TWO-AXIS TRACKING IN LUJÁN (ARGENTINE HUMID PAMPA)

ABSTRACT: Incident solar radiation measurements were taken in Luján on a plane oriented in three different directions: horizontal, tilted north at the optimal annual angle relative to the horizontal, and tracking the position of the Sun using two-axis tracking. The objective is to determine, through a series of measurements over time, the improvement in energy collection of a plane (relative to the horizontal plane) implied by the other two orientations. A two-axis solar tracking device (azimuthal and zenithal) was built, controlled by an Arduino Mega, which calculates the position of the Sun by obtaining the required parameters from a GPS. Stepper motors were used to orient a radiometer that measures irradiance in the three positions described. The percentage differences between the energy collected in the horizontal plane and the other two positions were evaluated. Two-axis tracking showed gains of up to 102% on clear days, and average monthly gains ranged between 40.8% and 68.8%, with clear seasonal dependence. Single-axis tracking yielded gains of between 13.9% and 40.5%.

Keywords: solar irradiation, acquisition plane, optimal angle, two-axis tracking.