



Identificación del Trabajo	
Área:	Energía
Categoría:	Alumno
Regional:	Reconquista

ESTUDIO DE CAPTACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS.

Mario Alberto ROS¹, Ezequiel Adrián ROSATTI², Walter Ariel SOTO³

GRUDIM-UTN-FRRq (Grupo de Diseño Mecánico)

GIERE-UTN-FRRq (Grupo de Investigación de Energías Renovables)

UTN-FRRQ (Facultad Regional Reconquista)

Calle 44 N° 1000 - Acceso Parque Industrial - (3560) Reconquista - Santa Fe

E-mail de autores: marioros317@gmail.com, ezerosatti@gmail.com, waltersoto2007@gmail.com

Resumen

Se aborda un estudio de la incidencia de la radiación solar en paneles solares, montados en tres tipos de estructuras, de manera de poder comprobar los porcentajes de captación obtenidos y determinar cuál es la óptima. Una de las estas será una estructura fija con una inclinación del panel fotovoltaico con un ángulo igual a la latitud de la localidad, y dos instalaciones móviles; la primera con un movimiento sobre el eje vertical, teniendo así un seguimiento solar de este-oeste y con un ángulo de inclinación del panel fijo a 29° y la segunda, una estructura con movimientos en sus dos ejes para describir así el ángulo acimutal y el ángulo de altitud solar; con la particularidad de que en esta última estructura se empleará solo un motor para lograr los dos movimientos gracias a un sistema de engranaje-brazo pivote.

Palabras Claves: Geometría Solar, Incidencia de Radiación Solar, Estudio de Rendimientos.

1. Introducción

Según la Ley Provincial N°12.503, las energías renovables son aquellas que se encuentran disponibles en la naturaleza en forma inagotable y cuyo aprovechamiento implica impactos ambientales positivos o neutros, es decir, que la explotación del recurso es irrelevante con respecto a la fuente de origen, por ejemplo, la energía proveniente del sol y la energía del viento entre otras. La Ley N°12.692 establece un "Régimen Promocional Provincial" para la investigación, desarrollo, generación, producción y uso de productos y/o bienes relacionados con las energías renovables.

De lo anterior las políticas públicas son un instrumento clave a la hora de fortalecer el círculo virtuoso entre Sociedad-Academia-Industria, interactuando y formulando entre los mencionados actores el uso de ER y medidas de eficiencia energética. Dado que se trata de un tema transversal a las diferentes áreas de gestión, la difusión de información tanto a nivel público como privado, es imprescindible.

La energía Solar se obtiene a partir de la captación de la energía liberada por el sol por medio de equipos e instalaciones diseñados para su aprovechamiento térmico o

eléctrico. En este trabajo se considerará solamente la energía solar fotovoltaica para su aprovechamiento eléctrico.

La Provincia tiene una muy buena radiación media mensual diaria a lo largo de todo el año, con casi 220 días de sol pleno al año. Esta oportunidad de aprovechamiento solar térmico y fotovoltaico es totalmente factible desde el punto de vista técnico.

En lo que respecta a la localidad donde se encuentra emplazado este trabajo, localidad de Reconquista (Latitud 29°) posee uno de los niveles más alto de insolación media anual de la provincia, con un valor de 4,75 kWh/m²/día (dato de la NASA, año 2018).

De todo lo dicho es un fuerte incentivo para desarrollar el siguiente trabajo sobre comparación de rendimientos entre una instalación fija con una inclinación angular respecto al suelo igual a la latitud de la localidad y otras instalaciones estructurales con movimiento, de la cual se destaca una estructura que posee dos movimientos (descripción del ángulo acimutal Este-Oeste, y del ángulo de altitud solar, ascenso y descenso del sol) con un solo motor gracias a un conjunto engranaje-pivote.

2. Metodología

En lo que respecta al funcionamiento de la estructura que se menciona en la introducción, se considera que es necesario comenzar por describir su configuración estructural, la cual consiste de una estructura mecánica compuesta por un eje vertical y uno horizontal, el eje vertical conforma a la estructura de columna (soporte del cabezal y de los paneles fotovoltaicos) y de un movimiento rotacional sobre su propio eje, describiendo así el ángulo acimutal (Este - Oeste) en un plano paralelo a la superficie terrestre. El eje horizontal constituiría el cabezal de la estructura, donde sobre ésta se apoyaran los paneles en dos puntos de apoyos, donde este eje dotaría a la estructura de un giro en un plano perpendicular al primero, desarrollando así el ángulo definido como altura solar (ascenso y descenso del sol).

Los dos movimientos descritos anteriormente se logran por medio de un solo motor (mecanismo de tornillo sin fin y engranaje), el cual mediante un piñón en el mismo eje de salida de motor, transmite su movimiento a la corona central o principal que se encuentra en el eje vertical o columna, y que a la vez mediante ésta se transmite el movimiento a otro engranaje (corona secundaria) ubicado diametralmente opuesto al piñón motriz y que por medio de un brazo pivote y tensor se solidariza a la estructura (apoyo de los paneles) para obtener el segundo movimiento de la instalación. Este segundo movimiento es contrario al giro de la corona central, otorgando un giro opuesto del mecanismo pivote, para adoptar así los distintos ángulos de la superficie de los paneles en función al movimiento del sol.

3. Resultados

GEOMETRÍA SOLAR

1. De acuerdo a la figura 1, definimos las variables de la geometría solar como:

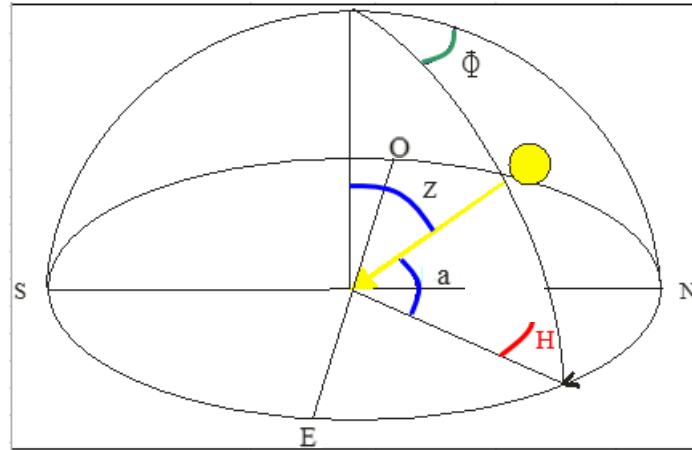


Figura 1. Variables de geometría solar sobre un punto de referencia.

Descripción de Variables:

- a: ángulo de altitud solar
- z: ángulo cenital
- H: ángulo horario
- Φ : ángulo acimutal

2. Descripción del ángulo de declinación (δ):

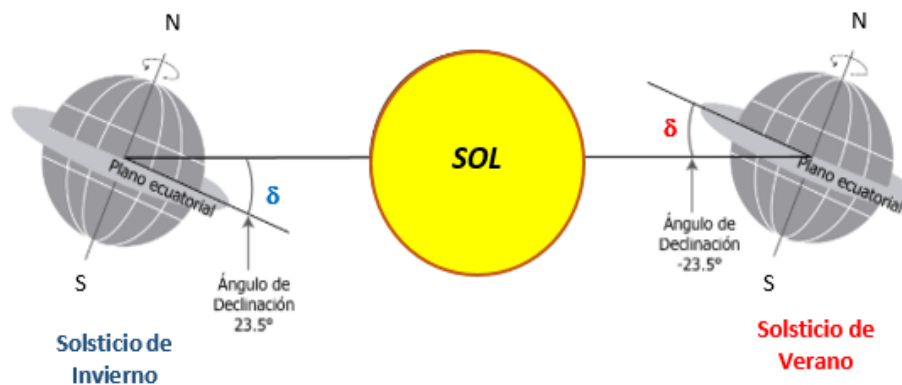


Figura 2. Declinación Solar para el Hemisferio Sur.

Este ángulo varía con la estación del año donde se caracteriza por la posición del planeta en su órbita (figura 2), se forma entre la línea tierra-sol y el plano ecuatorial, siendo positivo al norte y negativo al sur (hemisferios), adoptando para el hemisferio Sur los siguientes valores según los días de equinoccios de otoño y primavera, y los días de solsticios de verano y de invierno:

- 21 de Marzo, otoño (día 80 en el año) = 0°
- 21 de Junio, invierno (día 172 en el año) = $23,45^\circ$
- 21 de Septiembre, primavera (día 264 en el año) = 0°
- 21 de Diciembre, verano (día 355 en el año) = $-23,45^\circ$

Estos valores de declinación como así también el valor para cualquier día del año surgen de la ecuación 1:

$$\delta = 0,398 \cdot \cos [0,986 \cdot (N - 173)] \quad (1)$$

Donde:

N: número del día en el año

3. Cálculo de la altitud solar (a):

Corresponde al ángulo formado por el plano del observador y la radiación solar o "altura" del sol, definido por la ecuación 2:

$$\sin a = \cos \delta \cdot \cos H \cdot \cos L + \sin \delta \cdot \sin L \quad (2)$$

Donde:

L: Latitud del lugar de estudio, para Reconquista = 29°

De esta manera para los días mencionados en el punto 2, (días de referencia o inicio de cada estación); de donde se obtienen los distintos valores de la declinación mediante la ecuación (1) y aplicando la ecuación (2) para los horarios de las 6hs hasta las 18hs, se obtienen los distintos valores de la altitud solar, tal como se muestran en el gráfico 1.

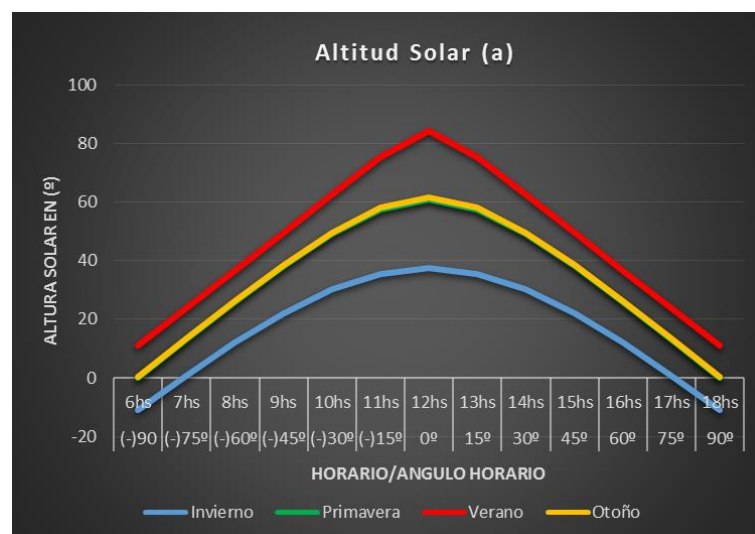


Gráfico 1. Valores de altitud solar para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

4. Cálculo del ángulo acimutal (Φ):

El ángulo acimutal (Φ), bajo la premisa de suponer fija la tierra, es la distancia angular entre el norte y la proyección horizontal, sobre el plano del observador, de la radiación solar (ver gráfico 1). Se calcula de acuerdo a la ecuación 3.

$$\sin \Phi = \frac{\cos \delta \cdot \sin H}{\cos a} \quad (3)$$

De esta manera para los días de referencia, de donde se obtienen los distintos valores de la declinación mediante la ecuación (1), junto a los valores de la altitud solar (a) resultantes de aplicar la ecuación (2) y aplicando la ecuación (3) para los horarios de las 6hs hasta las 18hs, se obtienen los distintos valores del ángulo acimutal; mostrados en el gráfico 2.

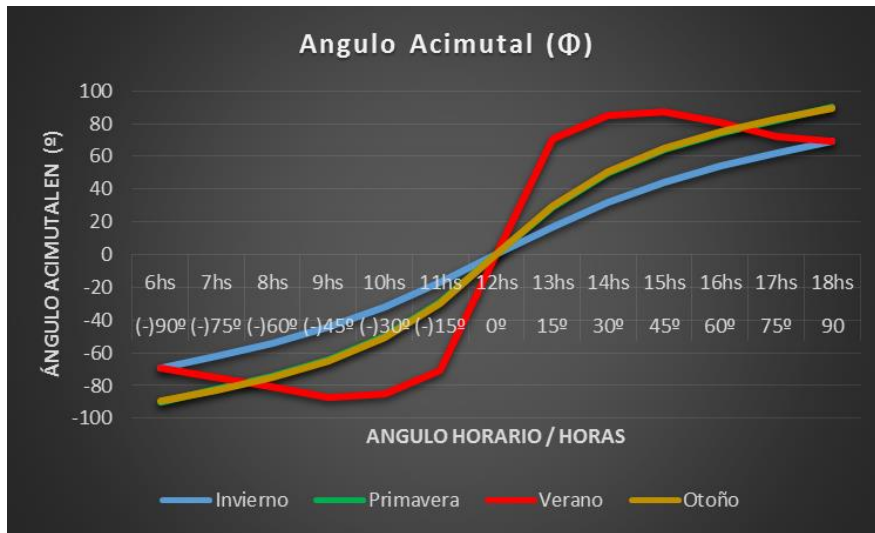


Gráfico 2. Valores de Ángulo Acimutal para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

CÁLCULO DE INCIDENCIA DE RADIACIÓN SOLAR SOBRE LA SUPERFICIE PARA LOS TRES TIPOS DE INSTALACIONES.

1. Instalación de superficie (panel fotovoltaico) fija al norte con un ángulo de inclinación del panel de 29°, igual al valor de la latitud de la ciudad en estudio;

Para este punto, (figura 3) se debe aclarar los ángulos o variables que entran en juego;

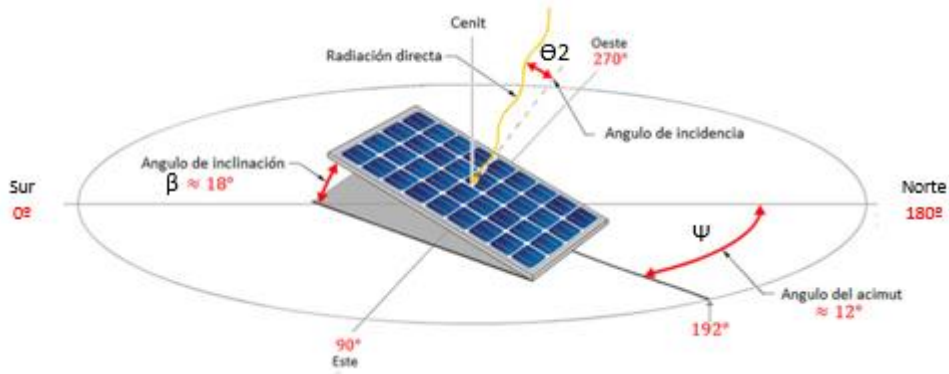


Figura 3. Variables en la incidencia de radiación solar sobre un panel.

Donde:

θ_2 : Ángulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel.

ψ : Ángulo acimutal de la superficie respecto a la orientación del panel respecto al Norte.

β : Ángulo de inclinación del panel respecto al plano del suelo de referencia.

$$\cos \theta_2 = \cos \beta \cdot \cos z + \sin \beta \cdot \sin z \cdot \cos (\Phi - \psi) \quad (4)$$

Además z (ángulo Cenital) resulta de aplicar la ecuación 5:

$$\cos z = \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos H + \sin \delta \cdot \sin L \quad (5)$$

De esta manera se obtienen los valores del ángulo cenital (z) para una latitud de un valor de $L = 29^\circ$, la declinación δ para cada día de referencia de cada estación y para cada hora (de 6hs a 18hs) de dichos días

Luego para un valor de β fijo igual a 29° del panel y orientado al norte con un valor para ello de $\psi = 0$ e ingresando valores de Φ para cada hora obtenidos según la ecuación (3) se obtienen los distintos valores del ángulo de incidencia solar θ_2 sobre la superficie del panel, ver gráfico 3.

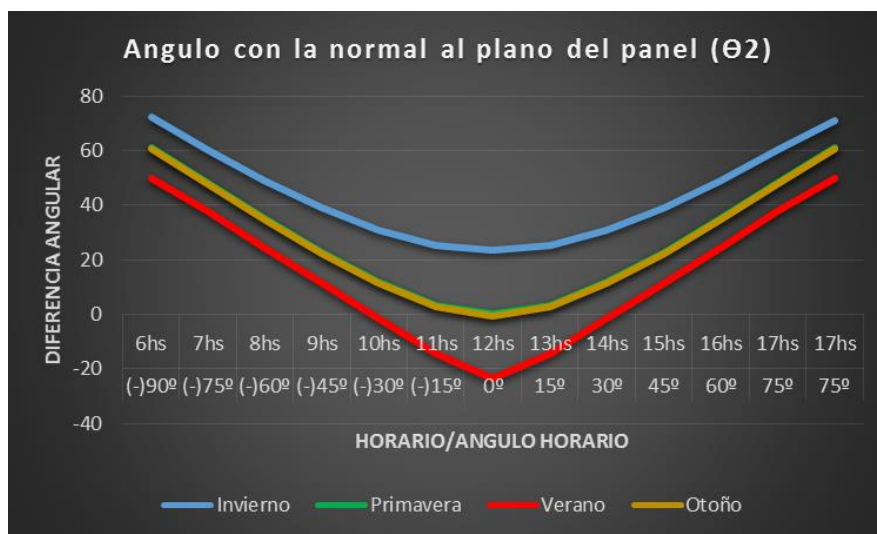


Gráfico 3. Valores de Ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

El método empleado para calcular el porcentaje de incidencia de radiación solar sobre una superficie se determinó mediante coeficientes, tanto para el ángulo acimutal (posición del sol) como para el ángulo de incidencia solar, que resultan de un porcentaje según las ecuaciones 6 y 7:

a) Coeficiente acimutal

Estos coeficientes resultan de aplicar la ecuación (6) a cada día de referencia de estación y para cada ángulo horario, resultando los valores mostrados en la tabla 1.

$$\text{Coeficiente acimutal} = 1 - (\text{ángulo acimutal} / 90) \quad (6)$$

Tabla 1. Valores de Coeficientes de ángulos acimutales sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

Coef. de captación con el ángulo Azimutal para Superficie Fija a 29°														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	0,23	0,31	0,40	0,51	0,64	0,81	1,00	0,81	0,64	0,51	0,40	0,31	0,23
264	Primavera	0,00	0,08	0,17	0,29	0,45	0,68	1,00	0,68	0,45	0,29	0,17	0,08	0,00
355	Verano	0,23	0,16	0,10	0,03	0,05	0,21	1,00	0,21	0,05	0,03	0,10	0,20	0,23
80	Otoño	0,01	0,08	0,17	0,28	0,44	0,67	1,00	0,67	0,44	0,28	0,17	0,08	0,01

b) Coeficiente de incidencia solar;

Estos coeficientes resultan de aplicar la ecuación (7) a cada día de referencia de estación y para cada ángulo horario, resultando los valores mostrados en la tabla 2.

$$\text{Coeficiente de incidencia} = 1 - (\text{ángulo de incidencia} / 90) \quad (7)$$

Tabla 2. Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

Coef. de captación respecto a la Normal para una superficie Fija a 29°														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	0,20	0,33	0,46	0,57	0,66	0,72	0,74	0,72	0,66	0,57	0,46	0,33	0,21
264	Primavera	0,32	0,47	0,61	0,75	0,87	0,96	1,00	0,96	0,87	0,75	0,61	0,47	0,32
355	Verano	0,45	0,58	0,73	0,87	0,98	0,84	0,74	0,84	0,98	0,87	0,73	0,58	0,45
80	Otoño	0,33	0,47	0,61	0,75	0,87	0,97	0,99	0,97	0,87	0,75	0,61	0,47	0,33

2. Instalación de superficie (panel fotovoltaico) con un ángulo de inclinación del panel fijo de 29° y con un eje móvil vertical.

Para este caso se tiene en cuenta que esta instalación tiene un movimiento automático de seguimiento al sol de Este-Oeste; de manera tal que no se tiene valores del ángulo acimutal (Φ) respecto a una superficie fija como en el caso anterior, por lo tanto, el coeficiente a adoptar es "1".

Solo se determina el ángulo de incidencia solar sobre el panel que se encuentra con una inclinación (β) de 29° fijo, pero adoptando distintos valores de ángulos acimutales de superficie (ψ), que para el mismo se adoptó, para cada ángulo horario, el mismo valor del ángulo acimutal (Φ) del movimiento del sol. Con esta premisa al aplicar la ecuación (4) resultan los valores de la tabla 3.

Tabla 3. Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel a 29° para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista para una instalación de un eje móvil vertical.

Angulo con la normal a una superficie Fija a 29° (Θ_2) para distintos ang. Ψ de la sup.														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	72,12	60,15	48,97	39,01	30,87	25,4	23,45	25,4	30,87	39,01	48,97	60,15	71,12
264	Primavera	61,05	47,97	35,13	22,86	11,84	3,446	0,109	3,446	11,84	22,86	35,13	47,97	61,05
355	Verano	49,87	37,83	24,55	11,51	-1,6	-14,46	-23,45	-14,46	-1,6	11,51	24,55	37,83	49,87
80	Otoño	60,67	47,58	34,71	22,38	11,26	2,736	-0,676	2,736	11,26	22,38	34,71	47,58	60,67

De estos valores (tabla 3) y aplicando la ecuación (7), se tienen los coeficientes de captación de incidencia solar sobre la superficie mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar para la instalación móvil a un eje vertical.

Coef. de captación respecto a la Normal para una superficie Fija a 29° (Φ_2), para distintos ang. Ψ de la sup.														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	0,20	0,33	0,46	0,57	0,66	0,72	0,74	0,72	0,66	0,57	0,46	0,33	0,21
264	Primavera	0,32	0,47	0,61	0,75	0,87	0,96	1,00	0,96	0,87	0,75	0,61	0,47	0,32
355	Verano	0,45	0,58	0,73	0,87	0,98	0,84	0,74	0,84	0,98	0,87	0,73	0,58	0,45
80	Otoño	0,33	0,47	0,61	0,75	0,87	0,97	0,99	0,97	0,87	0,75	0,61	0,47	0,33

3. Instalación de superficie (panel fotovoltaico) a dos ejes con una fuerza motriz.

Para este caso, primero se halló para cada ángulo horario y posición que adoptaría el panel de acuerdo a la posición que le otorgara el mecanismo engranaje-brazo pivote al panel, el ángulo de inclinación (β). Estos ángulos son mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de ángulo de inclinación del panel (β) para cada ángulo horario.

Angulo de inclinación del Panel vs ángulo horario													
	(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
	6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
β	75,20	73,40	67,40	55,40	41,80	32,30	29,00	32,30	41,80	55,40	67,40	73,40	75,20

Al igual que en el caso de instalación a un eje vertical móvil, se adoptó como ángulo acimutal de la superficie (ψ) el mismo valor que el ángulo acimutal (Φ) de la posición del sol para cada hora, por lo tanto el coeficiente para este ángulo de captación

será también igual a 1. De esta manera al aplicar la ecuación (4) para los distintos valores de ángulo de inclinación de la superficie (β) y para cada hora de los cuatros días de referencia se tienen los resultados de θ_2 tal como pueden verse en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de ángulos de incidencia solar para la instalación móvil a dos ejes con una fuerza motriz.

		Angulo con la normal a la superficie													
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario													
		(-)90° 6hs	(-)75° 7hs	(-)60° 8hs	(-)45° 9hs	(-)30° 10hs	(-)15° 11hs	0° 12hs	15° 13hs	30° 14hs	45° 15hs	60° 16hs	75° 17hs	90° 18hs	
172	Invierno	25,92	15,75	10,57	12,61	18,07	22,1	23,45	22,1	18,07	12,61	10,57	15,75	25,92	
264	Primavera	14,85	3,57	-3,274	-3,53	-0,958	0,146	0,109	0,146	-0,958	-3,53	-3,27	3,57	14,85	
355	Verano	3,67	-7,017	-13,85	-14,89	-14,4	-17,76	-23,45	-17,76	-14,4	-14,89	-13,85	-7,017	3,67	
80	Otoño	14,47	3,18	-3,69	-4,018	-1,539	-0,564	-0,676	-0,564	-1,539	-4,018	-3,69	3,18	14,47	

De estos valores, (tabla 6) y aplicando la ecuación (7), se tienen los coeficientes de captación de incidencia solar sobre la superficie, ver tabla 7.

Tabla 7. Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar para la instalación móvil a dos ejes con una fuerza motriz.

		Coeficiente de captación respecto a la Normal													
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario													
		(-)90° 6hs	(-)75° 7hs	(-)60° 8hs	(-)45° 9hs	(-)30° 10hs	(-)15° 11hs	0° 12hs	15° 13hs	30° 14hs	45° 15hs	60° 16hs	75° 17hs	90° 18hs	
172	Invierno	0,71	0,83	0,88	0,86	0,80	0,75	0,74	0,75	0,80	0,86	0,88	0,83	0,71	
264	Primavera	0,84	0,96	0,96	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,96	0,96	0,84	
355	Verano	0,96	0,92	0,85	0,83	0,84	0,80	0,74	0,80	0,84	0,83	0,85	0,92	0,96	
80	Otoño	0,84	0,96	0,96	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96	0,96	0,96	0,84	

ESTUDIO DE RENDIMIENTOS ENTRE LOS TRES TIPOS DE INSTALACIONES.

Los valores de rendimiento para las tres instalaciones resultan de multiplicar;

- Instalación fija con panel inclinado a 29° Norte;
% = Coef. Acimutal · Coef. de incidencia · 100% (para cada día y hora)
- Instalación móvil a un eje vertical y con panel inclinado a 29°;
% = 1 · Coef. de incidencia · 100% (para cada día y hora)
- Instalación a dos ejes móviles con una fuerza motriz:
% = 1 · Coef. de incidencia · 100% (para cada día y hora)

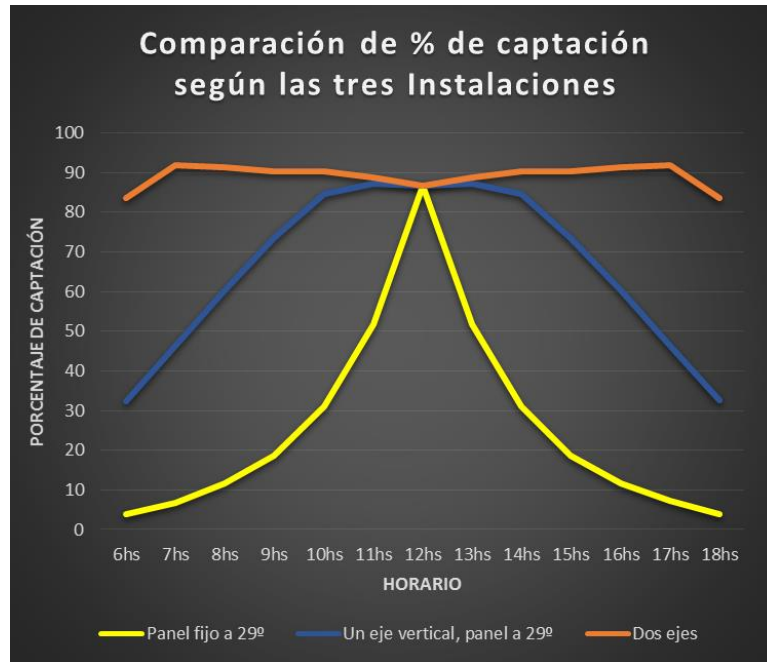


Gráfico 4. Porcentajes de rendimiento de captación según las 3 instalaciones.

4. Conclusiones

Con respecto al gráfico 4 se observa que para una instalación fija y una inclinación de los paneles de 29° al norte se obtiene un 25% de captación de incidencia solar, mientras que para la instalación que consta de una estructura a un eje vertical móvil y seguimiento solar, se obtiene un porcentaje de captación de incidencia del 66%, y para la instalación a dos ejes con una fuerza motriz de 89%.

De esta manera se concluye en la importancia de realizar un seguimiento, de una instalación, a los rayos solares ya que el rendimiento de la instalación está en función a la energía generada por el panel y esta depende del nivel de irradiancia captada.

Reconocimientos

Se reconoce el importante aporte que brindó la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Reconquista mediante los grupos de investigación GRUDIM-UTN-FRRq. y GIÉRE-UTN-FRRq.

Bibliografía

- A.B. Meinel, M.P. Meinel. (1982). *“Aplicaciones de la Energía Solar”*, Editorial Reverté s.a.
- Petros Axaopoulos TEI de Atenas Grecia, *Unidad 3: “Principios de la geometría solar” y Unidad 4: “Radiación Solar sobre superficies inclinadas”*.
- R. Righini, H. Grossi Gallegos. (2007). *“Ángulos sugeridos para optimizar la colección anual de Irradiación solar diaria en Argentina sobre planos orientados al Norte”*.