

SISTEMA MECÁNICO PARA SEGUIMIENTO SOLAR A DOS EJES CON UNA FUERZA MOTRIZ

Ros, Mario¹. Crudeli, Rossana². Suligoy, Juan Pablo³. Capeletti, Walter⁴

¹ Grupo de Diseño Mecánico GRUDIM, FRRQ-UTN

²Grupo de Investigación en Energías Renovables y Eficiencia GIERE, FRRq-UTN
mros@comunidad.frrq.utn.edu.ar

RESUMEN

El sistema mecánico para seguimiento solar a dos ejes con una fuerza motriz se conforma de un eje vertical y uno horizontal, el primero sigue el movimiento aparente del sol desde su salida en el Este hasta su ocaso en el Oeste, describiendo por lo tanto un ángulo en el plano horizontal del observador llamado acimutal, el segundo eje (cabezal) que sirve a la vez de soporte de los paneles fotovoltaicos posee un movimiento que describe, en su seguimiento, el ángulo de altitud solar en un plano perpendicular al anterior. El giro del eje vertical se logra por medio de su corona central que recibe el movimiento de una fuerza motriz mediante un sin-fin y piñón, mientras que el movimiento del cabezal, eje horizontal, se debe a otro engranaje de igual característica a la corona central más un brazo pivote, el cual se vincula a la parte baja de la estructura del panel por medio de una rótula y tensor. La segunda corona engrana a la corona central diametralmente opuesta y en sentido Norte-Sur al piñón motriz. De esta forma el sistema con el mecanismo propuesto logra en su funcionamiento, en su giro de Este a Oeste, un aumento en la distancia entre la parte baja del cabezal y la columna central (alejamiento), logrando una menor inclinación del panel respecto al suelo para las horas del mediodía en las que se tiene una mayor altitud solar y, una disminución en la distancia entre la parte baja del cabezal y la columna central (acercamiento) para lograr una mayor inclinación del panel respecto al suelo, tanto a las primeras como a las últimas horas del día, donde la posición del Sol presenta una menor altitud solar. Con el mecanismo propuesto se logra un 89% en el año de perpendicularidad de los rayos solares a la superficie del panel.

Palabras Claves: Fotovoltaica, Seguidor solar a dos ejes, Engranaje pivote.

Área Temática: Energías alternativas y sustentabilidad

Categoría del Trabajo: Trabajo de docentes e investigadores

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad son bien conocidos los sistemas de seguimiento solar a un eje como ser a eje vertical o azimutal con seguimiento al Sol de Este a Oeste e inclinación del panel igual a la Latitud del lugar y a un eje horizontal en sus dos variantes como ser; de dirección Sur-Norte con seguimiento al Sol de Este a Oeste, y de eje horizontal en la dirección Este a Oeste con seguimiento al Sol en su Altitud. Además, también se tiene la instalación mecánica a un solo eje denominada de eje polar, en el cual dicho eje se ubica en la dirección Sur-Norte con una inclinación igual a la Latitud del lugar, en el que su giro otorga un movimiento de seguimiento al Sol de Este a Oeste. En el caso de los sistemas mecánicos de seguimiento puntual estos poseen la conjunción de ambos movimientos de manera independiente, uno por eje, siendo a la vez dichos sistemas de seguimiento los que logran la máxima captación de la radiación directa sobre la superficie del panel respecto a los de seguimiento a un solo eje.

El seguidor solar fotovoltaico a dos ejes con una fuerza motriz consta de un eje vertical y uno horizontal. El primero sigue el movimiento aparente del sol desde su salida en el Este hasta su ocaso en el Oeste, describiendo por lo tanto un ángulo en el plano del observador llamado acimutal. El segundo eje (cabezal) que sirve a la vez de soporte para los paneles fotovoltaicos posee un movimiento que describe el ángulo de altitud solar en un plano perpendicular al primero. El movimiento del eje vertical se logra por medio de su corona central que recibe el movimiento de una fuerza motriz, mientras que el movimiento del cabezal (eje horizontal) se debe al engrane entre la corona central y un engranaje de igual característica a la primera más un brazo pivote entre este último engranaje y la parte baja de la estructura del panel por medio de una rótula y tensor. El tren de engrane posee una orientación en el sentido Sur-Norte donde la segunda corona se encuentra diametralmente opuesta al piñón motriz. De esta forma se logra un distanciamiento de la parte baja del cabezal, menor inclinación del panel, a las horas del mediodía donde se tiene mayor altitud solar, y un acercamiento de la parte baja del cabezal, mayor inclinación del panel, para las primeras y últimas horas del día donde se tiene menor altitud solar. De esta manera se logra dos movimientos con un solo motor y un 89% de perpendicularidad en el año de radiación solar directa sobre la superficie del panel.

Para obtener analíticamente la eficiencia del mecanismo propuesto en lo que respecta a porcentaje de captación de energía solar (radiación directa) se empleó un nuevo enfoque sobre geometría solar, a través del estudio del porcentaje de perpendicularidad en el año que ofrece la superficie de un panel fotovoltaico a los rayos solares, en un día y hora dados, y comparando los resultados para este dispositivo innovador respecto a otros dos sistemas de seguimiento solar convencionales con un solo motor como ser; a un eje vertical de seguimiento al Sol de Este a Oeste y a un eje horizontal de Este-Oeste con seguimiento al Sol en su Altitud Solar. Para de esta manera obtener a priori el rendimiento del nuevo sistema descrito respecto a los dos sistemas de seguimiento solar de un eje y un solo motor descritos anteriormente.

El enfoque propuesto consiste en aplicar ecuaciones trigonométricas de geometría solar donde intervienen como variables las relacionadas al movimiento aparente del Sol como ser; el ángulo de Altitud Solar, el ángulo Cenital (su complemento), el ángulo Acimutal, descrito en el plano del observador en su movimiento de Este a Oeste, el ángulo Horario (dado por el giro constante del planeta tierra) y el ángulo de declinación que se forma por los rayos solares incidentes y el plano del Ecuador. Además de las variables relacionadas a la ubicación o disposición de los paneles fotovoltaicos como ser; la latitud del lugar de emplazamiento de la instalación, el ángulo de inclinación del panel según tipo de seguimiento y el ángulo acimutal de orientación del panel fotovoltaico referido al Norte (para el hemisferio sur) también según el tipo de seguimiento.

El objetivo del trabajo, es conseguir dos movimientos (uno por eje) con un solo motor mediante un mecanismo innovador de engranaje-pivote, donde el eje vertical realiza el seguimiento Este-Oeste y el eje horizontal (cabezal) el seguimiento en Altitud Solar y que, mediante el empleo de un nuevo enfoque de la geometría solar demostrar analíticamente que con el sistema innovador propuesto se logra: un mayor porcentaje anual de perpendicularidad a los rayos solares respecto a dos instalaciones mecánicas de seguimiento solar que emplean un solo motor con un seguimiento a un solo eje (de eje vertical y de eje horizontal), y una mínima pérdida de captación de radiación solar respecto a los sistemas de seguimiento solar a dos ejes autónomos.

2. METODOLOGÍA:

La motivación de este trabajo consiste en encontrar, para un sistema fotovoltaico con seguimiento solar, un mecanismo que aporte movimiento a otro eje (eje horizontal) a través del movimiento que se tiene en el eje principal o columna central de la instalación, sin tener una pérdida considerable de captación de radiación solar respecto de los sistemas de seguimiento puntual a dos ejes autónomos, pero con un mayor porcentaje de captación solar que los sistemas de seguimiento solar que emplean un solo motor en un eje determinado. Para lograr de esta manera una economía y

simplicidad técnica en lo que respecta al empleo de otro motor y su mecanismo como así también del hardware y su software necesario para el movimiento del segundo eje en su seguimiento al Sol. Además, se busca simplicidad analítica para la determinación de porcentajes de captación de radiación solar, mediante el **concepto de porcentaje de perpendicularidad de los rayos solares al panel**, que se tiene en el año entre instalaciones fotovoltaicas de seguimiento solar a un solo motor, como ser a eje vertical y a eje horizontal, respecto al sistema innovador descrito.

3. DESARROLLO DEL TRABAJO:

Geometría Solar

1.1 Definición de variables del movimiento aparente del Sol, figura 1.

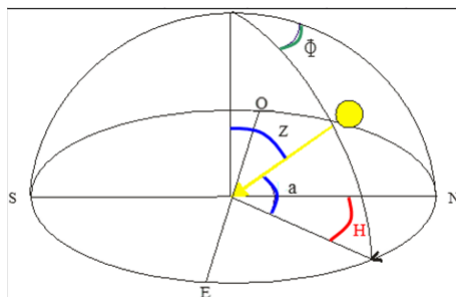


Figura 1, variables de geometría solar sobre un punto de referencia (hemisferio sur).

Donde:

- a: Angulo de Altitud Solar
- Φ : Angulo Acimutal
- z: Angulo Cenital
- H: Angulo Horario

Angulo de Altitud Solar (a):

Este ángulo se describe, desde el plano del observador (suelo), como la altura que posee el Sol con respecto a dicho plano, figura 2.

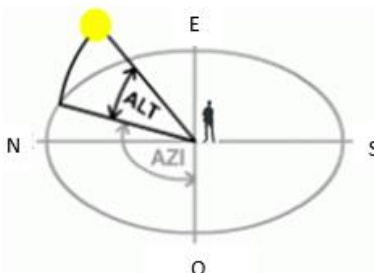


Figura 2, ángulo de Altitud o Altura Solar.

Fuente:

wiki.ead.pucv.cl/images/c/ca/Clase_Helioid%C3%B3n_Magister_N%C3%A1utico_y_Mar%C3%ADtimo.pdf

Angulo Azimutal (Φ):

Este ángulo llamado también como Azimut es el que describe el Sol sobre el plano del observador, es decir, la proyección del movimiento del Sol respecto al punto de referencia del observador sobre su plano, desde su salida (orto) hasta su ocaso (puesta del Sol), figura 3.

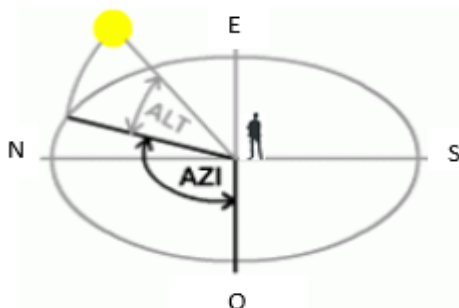


Figura 3, ángulo Acimutal.

Fuente: wiki.ead.pucv.cl/images/c/ca/Clase_Helioid%C3%B3n_Magister_N%C3%A1utico_y_Mar%C3%ADtimo.pdf

Angulo Cenital (z):

Este ángulo se describe como el complemento entre el ángulo de Altitud Solar y la perpendicular al plano del observador, donde dicha perpendicular recibe por nombre Zenit (ver figura 4), es decir, es el ángulo “z” que se forma entre los rayos solares y el Zenit.

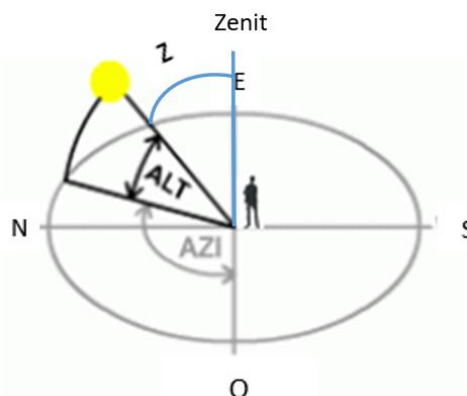


Figura 4, ángulo Cenital.

Fuente:

wiki.ead.pucv.cl/images/c/ca/Clase_Helioid%C3%B3n_Magister_N%C3%A1utico_y_Mar%C3%ADtimo.pdf

Angulo Horario (H):

El ángulo Horario es el ángulo que describe la rotación de la Tierra sobre su propio eje (eje polar) y se lo cuantifica en 15° por cada hora sobre el plano del observador, lo que resulta en 360° (giro completo) en 24hs. En la figura 5 siguiente se observa esta variable vista desde arriba del plano donde se encuentra el observador mirando hacia el Norte desde el hemisferio sur.

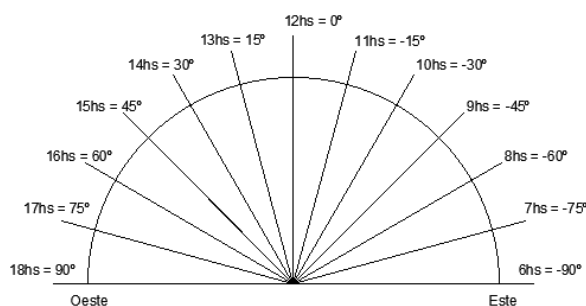


Figura 5, ángulo horario para el hemisferio sur.

Se debe aclarar que este ángulo no coincide con el ángulo acimutal, ya que el ángulo acimutal resulta de la proyección, sobre el plano horizontal del observador, del movimiento aparente del Sol sobre la Tierra (considerando esta fija), donde dicha proyección depende de un movimiento compuesto de traslación Este-Oeste (movimiento horizontal) y de un movimiento de ascenso y descenso (movimiento vertical), desde su salida hasta su puesta, por lo que el tiempo invertido por el Sol en realizar este movimiento no se relaciona con el tiempo constante de 15° por hora de giro de rotación de la Tierra.

1.2 Determinación de variables

1.2.1 Angulo de Declinación

Este ángulo varía con la estación del año, donde se caracteriza por la posición de la Tierra en su órbita o plano de la eclíptica. Se desarrolla entre la línea Tierra-Sol y el plano ecuatorial, siendo positivo al Norte y negativo al Sur (hemisferios), donde adopta los siguientes valores según los días de equinoccios de otoño y primavera y los días de solsticios de verano e invierno;

- 21 de marzo, día 80 en el año: 0°
- 21 de junio, día 171 en el año: $23, 45^\circ$
- 21 de septiembre, día 263 en el año: 0°
- 21 de diciembre, día 355 en el año: $-23, 45^\circ$

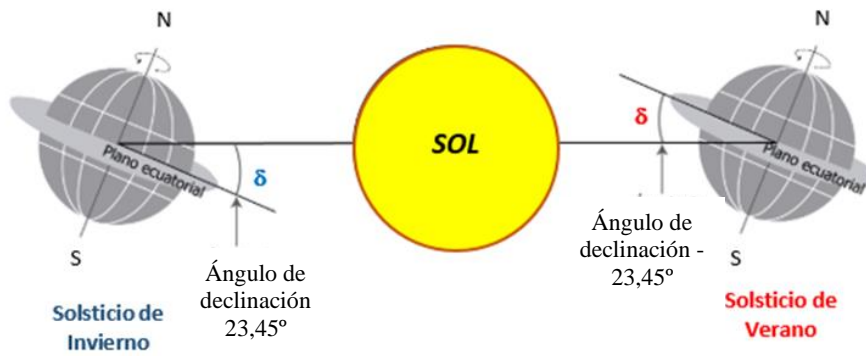


Figura 6, ángulo de declinación en los Solsticios.

Fuente: launion.com.mx/blogs/ciencia/noticias/134851-de-este-a-oeste-de-norte-a-sur-en-donde-aparece-el-sol.html

Estos valores de declinación representados en la figura 6 anterior y para otros días del año (tabla 1) se pueden obtener mediante la siguiente expresión³ (1):

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

Donde:

δ : Ángulo de declinación

N: número del día en el año (día 21 de cada mes en la tabla)

	Meses												
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Nº del día en el año	355	21	52	80	111	141	171	202	233	263	293	324	355
Áng. de Declinación (δ)	-23,45	-20,13	-11,23	-0,675	11,08	19,823	23,43	20,45	11,77	0,501	-10,88	-19,92	-23,45

Tabla 1, ángulos de declinación para los días 21 de cada mes.

1.2.2 Altitud Solar² en función de la hora

$$\sin a = \sin \lambda \times \sin \delta + \cos \lambda \times \cos \delta \times \cos t \quad (2)$$

Donde:

a : ángulo de Altitud Solar

λ : ángulo de la Latitud de la localidad a considerar,

δ : ángulo de declinación, valores de la tabla 1,

t : ángulo horario (H), igual al número de horas representados cada 15°

A partir de la expresión (2) se tiene los siguientes valores de ángulo de altitud solar desde las 6hs hasta las 18hs (que abarca 180° con 15° por hora) y para cada día representativo de cada estación (inicios de ellas), representados en la tabla 2 y gráficamente en la figura 7.

		Altitud Solar para una Latitud de 30°												
		Angulo horario/Horario												
Día en el año	Estación	(-)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
171	Invierno	-11,47	0,39	11,44	21,28	29,29	34,65	36,56	34,65	29,29	21,28	11,44	0,39	-11,47
263	Primavera	-0,25	12,70	25,38	37,44	48,21	56,31	59,50	56,31	48,21	37,44	25,38	12,70	-0,25
355	Verano	11,48	23,87	36,60	49,53	62,50	75,11	83,45	75,11	62,50	49,53	36,60	23,87	11,48
80	Otoño	0,34	13,30	26,03	38,19	49,01	57,39	60,68	57,39	49,01	38,19	26,03	13,30	0,34

Tabla 2, valores de Altitud Solar para la franja horaria de 6hs a 18hs y para los días de inicio de cada estación para una Latitud de 30°.

1.2.3 Angulo Cenital en función de la hora

Este valor es una de las variables a considerar a la hora de saber la disponibilidad que se puede tener de energía solar (directa) sobre una Latitud (λ) determinada y dado un valor de tiempo considerado.

Dicho valor o variable viene determinado por la siguiente expresión² (3);

$$\cos z = \sin \lambda \times \sin \delta + \cos \lambda \times \cos \delta \times \cos t \quad (3)$$

Donde:

z : ángulo cenital

λ : ángulo de la Latitud, de la localidad a considerar,

δ : ángulo de declinación,

t : ángulo horario (H), 15° por hora.

2. Definición de variables referidas a la posición del panel fotovoltaico.

En la figura 7 siguiente se tiene como $\theta 2$ el ángulo que forman los rayos solares respecto a la normal del plano del panel, Ψ ángulo acimutal de la superficie según la orientación del panel respecto al Norte y β el ángulo de inclinación del panel respecto al plano del suelo de referencia.



Figura 7, ángulos o variables en consideración para el estudio de captación solar.
Fuente: http://somim.org.mx/memorias/memorias2017/articulos/A5_148.pdf

Mediante la siguiente expresión² (4) se puede averiguar la variación angular que toma los rayos solares respecto a la normal de la superficie del panel;

$$\cos \theta 2 = \cos \beta \times \cos z + \sin \beta \times \sin z \times \cos(\Phi - \Psi) \quad (4)$$

Donde;

- $\theta 2$: Ángulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel,
- Ψ : Ángulo acimutal de la superficie,
- β : Ángulo de inclinación del panel,
- z : Ángulo cenital, y
- Φ : Ángulo acimutal del Sol

Para averiguar el ángulo acimutal se empleará la expresión² (5) que se observa a continuación;

$$\sin \Phi = (\cos \delta \times \sin t) \div \cos a \quad (5)$$

Donde;

- Φ : Ángulo acimutal del Sol
- δ : Ángulo de declinación,
- t : Ángulo horario (H), ver figura 5.
- a : Ángulo de Altitud Solar.

En la tabla 3 siguiente se puede observar los valores del ángulo acimutal para una Latitud de 30°, para una franja horaria de 6hs hasta las 18hs y para cada día de inicio de cada estación.

		Ángulo Acimutal													
		Ángulo horario/Horario													
Día en el año	Estación	(-)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	
171	Invierno	-69,41	-62,41	-54,16	-44,12	-31,73	-16,78	0,00	16,78	31,73	44,12	54,16	62,41	69,41	
263	Primavera	-89,56	-81,92	-73,43	-62,94	-48,61	-27,81	0,00	27,81	48,61	62,94	73,43	81,92	89,56	
355	Verano	-110,59	-104,31	-98,26	-91,79	-83,46	-67,48	0,00	67,48	83,46	91,79	98,26	104,30	110,60	
80	Otoño	-89,41	-82,96	-74,52	-64,10	-49,78	-28,70	0,00	28,70	49,78	64,10	74,52	82,96	89,41	

Tabla 3, valores del ángulo acimutal (Φ) para la franja horaria de 6hs a 18hs y en los inicios de cada estación a 30° de Latitud.

3. Determinación de porcentaje de perpendicularidad de los rayos solares a la superficie del panel

3.1 Panel de eje horizontal en la dirección Este-Oeste y seguimiento de Altitud Solar. La expresión¹ (6) por emplear para este caso es la siguiente;

$$\cos \theta 2 = (\sin^2 \delta + \cos^2 \delta \times \cos^2 t)^{1/2} \quad (6)$$

Donde:

θ_2 : ángulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel,

δ : ángulo de declinación,

t : ángulo Horario (H).

		Angulo con la normal del panel móvil de eje horizontal Este-Oeste													
		Angulo horario/Horario													
Día en el año	Estación	(-)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	17hs	
171	Invierno	66,55	62,39	52,60	40,44	27,33	13,79	0,00	13,79	27,33	40,44	52,60	62,39	66,50	
263	Primavera	90,00	75,00	60,00	45,00	30,00	15,00	0,00	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00	
355	Verano	66,55	62,39	52,60	40,44	27,33	13,79	0,00	13,79	27,33	40,44	52,60	62,39	66,50	
80	Otoño	90,00	75,00	60,00	45,00	30,00	15,00	0,00	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00	

Tabla 4, valores de ángulos con la normal al panel (θ_2) para un sistema móvil de eje horizontal Este-Oeste.

Otra manera también de obtener los valores de la tabla anterior, en lo que respecta al ángulo θ_2 , es mediante la expresión² (4);

$$\cos \theta_2 = \cos \beta \times \cos z + \sin \beta \times \sin z \times \cos(\Phi - \Psi) \quad (4)$$

Donde;

θ_2 : Angulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel,

Ψ : Angulo acimutal de la superficie, 0° para este caso, panel orientado al Norte.

β : Angulo de inclinación del panel,

z : Angulo cenital,

Φ : Angulo acimutal del Sol (salvo para el día 355 entre las 6hs y las 9hs, al igual que entre las 15hs y las 18hs, donde los valores superan los 90°), donde a la vez los valores de β adoptan en esos intervalos signos negativos.

Pero para el empleo de la expresión (4) hay que realizar un paso más, que consiste en variar el ángulo (β) de inclinación del panel, respecto al plano del observador, en función de la estación en estudio y de sus respectivas horas.

Si se aplica el cálculo de coeficientes respecto a la tabla 4 anterior, se tiene los siguientes valores en la tabla 5;

- Coeficiente de captación³ para el ángulo (θ_2);

$$\text{Coeficiente de incidencia} = 1 - (\theta_2/90^\circ) \quad (7)$$

		Coef. de captación respecto a la normal para una superficie móvil de eje horizontal Este-Oeste													
		Angulo horario/Horario													
Día en el año	Estación	(-)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	
171	Invierno	0,26	0,31	0,42	0,55	0,70	0,85	1,00	0,85	0,70	0,55	0,42	0,31	0,26	
264	Primavera	0,00	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	0,83	0,67	0,50	0,33	0,17	0,00	
355	Verano	0,26	0,31	0,42	0,55	0,70	0,85	1,00	0,85	0,70	0,55	0,42	0,31	0,26	
80	Otoño	0,00	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	0,83	0,67	0,50	0,33	0,17	0,00	

Tabla 5, valores de coeficientes para un sistema móvil de eje horizontal Este-Oeste.

Si se pasa a multiplicar los coeficientes de cada estación por 100%, para los 4 días de referencia (inicios de cada estación) y para cada hora de la franja horaria de 6hs a 18hs, se tendrá la siguiente tabla 6 de valores de porcentajes.

		Porcentaje de captación para una superficie móvil de eje horizontal Este-Oeste													
		Angulo horario/Horario													
Día en el año	Estación	(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	Promedios
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs	
171	Invierno	26,06	30,68	41,56	55,07	69,63	84,68	100,00	84,68	69,63	55,07	41,56	30,68	26,11	55,03
264	Primavera	0,00	16,67	33,33	50,00	66,67	83,33	100,00	83,33	66,67	50,00	33,33	16,67	0,00	46,15
355	Verano	26,06	30,68	41,56	55,07	69,63	84,68	100,00	84,68	69,63	55,07	41,56	30,68	26,11	55,03
80	Otoño	0,00	16,67	33,33	50,00	66,67	83,33	100,00	83,33	66,67	50,00	33,33	16,67	0,00	46,15
Promedio Anual		13,03	23,67	37,44	52,53	68,15	84,01	100,00	84,01	68,15	52,53	37,44	23,67	13,06	50,59

Tabla 6, valores de porcentajes para un sistema móvil de eje horizontal Este-Oeste.

3.2 Panel móvil de eje vertical o azimutal e inclinado un ángulo igual a la Latitud del lugar. Para este caso se empleará la expresión² (4);

$$\cos \theta_2 = \cos \beta \times \cos z + \sin \beta \times \sin z \times \cos(\Phi - \Psi) \quad (4)$$

Donde;

θ_2 : ángulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel,

Ψ : ángulo acimutal de la superficie,

β : ángulo de inclinación del panel, igual a 30° en este caso.

z : ángulo cenital,

Φ : ángulo acimutal del Sol.

Ahora bien, se tendrá las siguientes consideraciones;

- El ángulo de inclinación del panel (β) será de 30° para todos los horarios, o sea, como en el caso del panel fijo inclinado un ángulo igual al de la Latitud del lugar.
- El ángulo acimutal de la superficie (Ψ) adoptará el mismo valor que adopta el ángulo acimutal del Sol (Φ) por cada hora. Esto es debido a que el seguimiento se realiza sobre el eje vertical del seguidor, ya que el ángulo que describe este se realiza en el mismo plano en el que se encuentra el ángulo azimutal descrito por el Sol.

De la última consideración, al ser iguales los ángulos acimutales del Sol y acimutal de la superficie, $\Phi = \Psi$ respectivamente, la expresión² (4) se reduce a;

$$\cos \theta_2 = \cos \beta \times \cos z + \sin \beta \times \sin z \quad (4)$$

De esta manera se tienen los siguientes valores en la tabla 7;

		Angulo con la normal del panel móvil de eje vertical													
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	17hs	
171	Invierno	71,47	59,61	48,56	38,72	30,71	25,35	23,43	25,35	30,71	38,72	48,56	59,61	71,47	
263	Primavera	60,25	47,31	34,62	22,56	11,79	3,68	0,00	3,68	11,79	22,56	34,62	47,31	60,25	
355	Verano	48,52	36,13	23,40	10,47	2,50	15,11	23,45	15,11	2,50	10,47	23,40	36,13	48,52	
80	Otoño	59,66	46,70	33,97	21,81	10,90	2,61	0,00	2,61	10,90	21,81	33,97	46,70	59,66	

Tabla 7, valores de ángulos con la normal al panel (θ_2) para un panel móvil de eje vertical.

Nuevamente si aplicamos el cálculo de coeficientes respecto a la tabla 7 anterior, se tiene los siguientes valores mostrados en la tabla 8;

- Coeficiente de captación³ para el ángulo (θ_2);
Coeficiente de incidencia = $1 - (\theta_2/90^\circ)$ (7)

		Coef. de captación respecto a la normal para una superficie móvil de eje vertical													
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	
171	Invierno	0,21	0,34	0,46	0,57	0,66	0,72	0,74	0,72	0,66	0,57	0,46	0,34	0,21	
264	Primavera	0,33	0,47	0,62	0,75	0,87	0,96	1,00	0,96	0,87	0,75	0,62	0,47	0,33	
355	Verano	0,46	0,60	0,74	0,88	0,97	0,83	0,74	0,83	0,97	0,88	0,74	0,60	0,46	
80	Otoño	0,34	0,48	0,62	0,76	0,88	0,97	1,00	0,97	0,88	0,76	0,62	0,48	0,34	

Tabla 8, valores de coeficientes de captación para un sistema móvil de eje vertical.

Nuevamente si se pasa a multiplicar los coeficientes de cada estación por 100%, para los 4 días de referencia (inicios de cada estación) y para cada hora de la franja horaria de 6hs a 18hs, se tendrá la siguiente tabla 9 de valores de porcentajes.

		Porcentaje de captación para una superficie móvil de eje vertical													
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	Promedios
171	Invierno	20,59	33,77	46,04	56,98	65,88	71,83	73,97	71,83	65,88	56,98	46,04	33,77	20,59	51,09
264	Primavera	33,06	47,43	61,53	74,93	86,90	95,91	100,00	95,91	86,90	74,93	61,53	47,43	33,06	69,20
355	Verano	46,09	59,86	74,00	88,37	97,22	83,21	73,94	83,21	97,22	88,37	74,00	59,86	46,09	74,73
80	Otoño	33,71	48,11	62,26	75,77	87,89	97,10	100,00	97,10	87,89	75,77	62,26	48,11	33,71	69,97
Promedio Anual		33,36	47,29	60,96	74,01	84,47	87,01	86,98	87,01	84,47	74,01	60,96	47,29	33,36	66,25

Tabla 9, valores de porcentaje de captación para un sistema móvil de eje vertical.

3.3 Sistema móvil a dos ejes con una fuerza motriz
Para este caso también se empleará la expresión² (4);

$$\cos \theta_2 = \cos \beta \times \cos z + \sin \beta \times \sin z \times \cos(\Phi - \Psi) \quad (4)$$

Donde;

θ_2 : ángulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel,

Ψ : ángulo acimutal de la superficie,

β : ángulo de inclinación del panel, igual a 30° en este caso.

z : ángulo cenital,

Φ : ángulo acimutal del Sol.

Ahora bien, se tendrá las siguientes consideraciones;

- El ángulo de inclinación del panel (β) será el que adopte el panel fotovoltaico dados por el mecanismo para cada ángulo horario H. Estos valores se pueden apreciar en la tabla 10 siguiente:

Ángulo 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

Tabla 10, valores de ángulos de inclinación dados por el mecanismo.

- El ángulo acimutal de la superficie (Ψ) adoptará el mismo valor que adopta el ángulo acimutal del Sol (Φ) por cada hora. Esto es debido a que el seguimiento se realiza sobre el eje vertical del seguidor, ya que el ángulo que describe este se realiza en el mismo plano en el que se encuentra el ángulo azimutal descrito por el Sol.

De la última consideración, al ser iguales los ángulos acimutales del Sol y acimutal de la superficie, $\Phi = \Psi$ respectivamente, la expresión² (4) se reduce a;

$$\cos \theta_2 = \cos \beta \times \cos z + \sin \beta \times \sin z$$

De esta manera se tienen los siguientes valores en la tabla 11;

Ángulo con la normal del panel móvil a dos ejes con un motor														
Día en el año	Estación	Ángulo 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
171	Invierno	25,92	15,75	10,57	12,60	18,06	22,10	23,44	22,10	18,06	12,60	10,57	15,75	25,92
264	Primavera	14,85	3,57	3,27	3,53	0,96	0,14	0,11	0,14	0,96	3,53	3,27	3,57	14,85
355	Verano	3,67	7,02	13,85	14,89	14,40	17,76	23,45	17,76	14,40	14,89	13,85	7,02	3,67
80	Otoño	14,47	3,18	3,69	4,02	1,54	0,59	0,68	0,59	1,54	4,02	3,69	3,18	14,47

Tabla 11, valores de ángulos con la normal al panel (θ_2) para un sistema móvil a dos ejes con una fuerza motriz.

Nuevamente si aplicamos el cálculo de coeficientes respecto a la tabla anterior, se tiene los siguientes valores mostrados en la tabla 12;

- Coeficiente de captación³ para el ángulo (θ_2);

$$\text{Coeficiente de incidencia} = 1 - (\theta_2/90^\circ) \quad (7)$$

Coef. de captación respecto a la normal para una superficie móvil a dos ejes con un motor														
Día en el año	Estación	Ángulo 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
171	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

Tabla 12, valores de coeficientes de captación para un sistema móvil a dos ejes con una fuerza motriz.

Nuevamente si se pasa a multiplicar los coeficientes de cada estación por 100%, para los 4 días de referencia (inicios de cada estación) y para cada hora de la franja horaria de 6hs a 18hs, se tendrá la siguiente tabla 13 de valores de porcentajes.

Rendimiento de captación para una superficie móvil a dos ejes con un motor															
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario													Promedios
		(-)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	
171	Invierno	71,20	82,50	88,26	86,00	79,93	75,44	73,96	75,44	79,93	86,00	88,26	82,50	71,20	80,05
264	Primavera	83,50	96,03	96,37	96,08	98,93	99,84	99,88	99,84	98,93	96,08	96,37	96,03	33,06	91,61
355	Verano	95,92	92,20	84,61	83,46	84,00	80,27	73,94	80,27	84,00	83,46	84,61	92,20	95,92	85,76
80	Otoño	83,92	96,47	95,90	95,53	98,29	99,34	99,24	99,34	98,29	95,53	95,90	96,47	83,92	95,24
Promedio Anual		83,64	91,80	91,28	90,27	90,29	88,73	86,76	88,73	90,29	90,27	91,28	91,80	71,03	88,17

Tabla 13, valores de porcentaje de captación para un sistema móvil a dos ejes con una fuerza motriz.

4. RESULTADOS

- 1- Con el mecanismo propuesto se obtiene, un distanciamiento de la parte baja del cabezal a la columna central, menor inclinación del panel, a las horas del mediodía donde se tiene una mayor altitud solar y un acercamiento de la parte baja del cabezal a dicha columna central, mayor inclinación del panel, para las primeras y últimas horas del día donde se cuenta con menor altitud solar. De esta manera se logra posicionar la superficie del panel lo más perpendicularmente posible a los rayos solares durante el día obteniéndose un mayor porcentaje de perpendicularidad que los sistemas de seguimiento solar a un solo eje.
- 2- Mediante la aplicación del nuevo enfoque de la geometría solar se logra obtener de manera sencilla el porcentaje de captación de energía solar en un sistema de paneles fotovoltaicos y así emplearlo para la obtención del porcentaje de perpendicularidad de los rayos solares en el año.
- 3- Además, se logra tener otra observación basada en este porcentaje de perpendicularidad anual que ofrece cada tipo de instalación, en lo que respecta a captación de radiación solar directa, para valorar la posible generación de energía eléctrica a partir de la energía solar.

5. CONCLUSIONES:

Mediante un nuevo enfoque de la geometría solar a través del estudio del porcentaje de perpendicularidad que ofrece la superficie de un panel fotovoltaico a los rayos solares, en un día y hora dados, se ha realizado una comparativa sencilla y cuantitativa de porcentajes de captación de radiación solar directa que pueden tener distintos tipos de instalaciones fotovoltaicas con seguimiento solar.

Se puede extraer de las tablas 6, 9 y 13, que representan el porcentaje de perpendicularidad de los rayos solares de los sistemas; a un eje horizontal Este-Oeste, a un eje vertical y a dos ejes con una fuerza motriz respectivamente, los valores son de 50,59%, 66,25% y 88,17% respectivamente. De esta manera se observa en comparación que; si al sistema de seguimiento a un eje vertical, el cual consta de un motor y sistema de engrane para el movimiento de la columna, se le agrega el conjunto de engranaje-pivote con tensor y rótula en su extremo opuesto (parte baja del cabezal) se puede tener un 22% más de perpendicularidad de los rayos solares en el año.

Además, se concluye que, al retirar un motor y su mecanismo del eje horizontal, para su seguimiento autónomo al Sol en lo que respecta a su Altitud, solo se pierde aproximadamente un 11% de perpendicularidad de los rayos solares en el año respecto al sistema de seguimiento solar puntual a dos ejes con un motor por cada eje.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Facultad Regional Reconquista – UTN por su apoyo y financiamiento al proyecto propuesto, donde el mismo fue el proyecto final de carrera de uno de los autores. También se agradece a la comunidad de Reconquista y Avellaneda, particularmente a talleres de mecanizado, por su aporte en manufactura de las piezas mecánicas como sus sugerencias técnicas.

7. OBSERVACIONES:

No se adjunta imagen del mecanismo descrito o mencionado por encontrarse este en proceso de solicitud de patente.

8. REFERENCIAS:

- [1] A.B. Meinel, M.P. Meinel. (1982). "Aplicaciones de la Energía Solar", Editorial Reverté s.a.
- [2] Petros I. Axaopoulos. (2011). Solar Thermal Conversion. TEI de Atenas Grecia.
- [3] M. Ros, E. Rosatti, W. Soto. (2020). "Captación directa de la energía solar, Principios de geometría solar aplicados a instalaciones fotovoltaicas". Editorial Académica Española.