



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

Campus Ciudad de México

División de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Mecatrónica

Proyectos de Ingeniería Mecatrónica II

Trabajo Final

SEGUIDOR SOLAR AUTOMÁTICO



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY**

Biblioteca
Campus Ciudad de México

Integrantes

Asesor: Ing. Jorge Landa

Coasesores: Dr. Ricardo Ganem

Dr. Ricardo Fernández del Busto

Profesor: Dr. Jorge Brieva

Mauricio Choza

José Miguel Cruzado

Héctor Olea

Andrés Zollinger

5 de Mayo 2008



INDICE

CAPITULO 1

• Introducción	5
• Estado del arte	6
• Objetivos	8

CAPITULO 2 **ENERGÍA SOLAR Y APLICACIONES**

2.1 El sol y la energía solar	9
2.2 Seguidor Solar Natural: Girasoles	10
2.3 Tecnología Fotovoltaica	11
2.3.1 Paneles Fijos	12
2.3.2 Paneles Seguidores	14
2.3.3 Aplicaciones de la Energía Solar	18
2.4 Sistemas Solares Térmicos	19
2.5 Resumen de capítulo	19

CAPITULO 3 **TRAYECTORIAS SOLARES**

3.1 Coordenadas Geográficas	21
3.2 Movimiento de la Tierra	23
3.3 Posición Solar	24
3.4 Resumen de capítulo	25

CAPITULO 4 **PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

4.1 Introducción a la Propuesta de Solución	26
4.2 Fase de Sensado	26
4.2.1 Sensores	27
4.3 Sistema de Control y Potencia	30



4.3.1	Enfoque 1: Comparador de Voltaje	30
4.3.2	Enfoque 2 : Propuesta de Control	31
4.3.2.1	<i>Sistema basado en un Microcontrolador</i>	32
4.3.2.2	<i>Algoritmo</i>	34
4.3.3	Convertidor AD	
4.3.3.1	<i>Requerimientos</i>	35
4.3.3.2	<i>Aplicación en el sistema</i>	35
4.3.4	Etapa de Potencia	
4.3.4.1	<i>Requerimientos</i>	36
4.3.4.2	<i>Diseño</i>	37
4.3.5	Pruebas y resultados	
4.3.5.1	<i>Experimentación y simulación</i>	39
▪	<i>Comparador de voltaje</i>	39
▪	<i>Microcontrolador</i>	43
4.3.6	Diseño e Impresión de los Circuitos	47
4.4	Estructura Mecánica	
4.4.1	Diseño	
4.4.1.1	<i>Concepto</i>	49
4.4.1.2	<i>Construcción a Escala</i>	49
4.4.1.3	<i>Observaciones</i>	49
4.4.2	Mecanismo	
4.4.2.1	<i>Funcionamiento</i>	50
4.4.2.2	<i>Ventajas y desventajas</i>	50
4.4.3	Prototipo	
4.4.3.1	<i>Diseño</i>	50
4.4.3.2	<i>Elección de materiales</i>	51
4.4.3.3	<i>Construcción</i>	51
4.4.3.4	<i>Pruebas Mecanismo</i>	52
▪	<i>Función de Transferencia</i>	53
4.5	Sistema de Almacenamiento de Energía	
4.5.1	Objetivo	55
4.5.2	Modos de acoplamiento	55
4.5.3	Diseño del circuito	55
4.5.4	Consumo de Energía	56



4.6 Resumen de capítulo	56
-------------------------------	----

CAPITULO 5
PRUEBAS Y CÁLCULOS

5.1 Eficiencia	59
5.2 Precisión	65
5.3 Factibilidad	68
5.3.1 Análisis Económico	68
CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS	71



CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La situación actual nos obliga a buscar nuevas fuentes de energía, de preferencia renovables, como consecuencia de que los recursos no renovables, como el petróleo, se están terminando. Científicos encabezados por el Centro de Análisis de la Extinción Petrolera, con sede en Londres, afirman que la producción global de petróleo llegará a su punto más alto en los cuatro próximos años antes de entrar en una decadencia cada vez más pronunciada, la cual acarreará enormes consecuencias para la economía mundial y la vida de los seres humanos. El clímax del petróleo convencional llegó y pasó en 2005. Según el análisis, aún si se toman en consideración el petróleo pesado, las reservas de mar profundo y de las regiones polares, así como el líquido tomado del gas, todos ellos más difíciles y costosos de extraer, de igual manera el clímax llegará en el 2011 [1].

Una celda solar o fotovoltaica es un dispositivo semiconductor capaz de generar un voltaje cuando recibe energía solar sobre su superficie. Este descubrimiento fue realizado en 1954 en los Laboratorios Bell y desde ese momento se han buscado diversas formas de adaptar esta fuente de energía a diversos dispositivos. Dentro de las aplicaciones que se han presentado en el área de la energía solar está el almacenamiento de energía o utilización de la misma para residencias particulares y como fuente de potencia para el impulso de automóviles ecológicos.

Una celda solar común consiste en una placa de tamaño variable, dependiendo de la aplicación que se le piense dar. Así como el tamaño varía, también lo hace la cantidad de voltaje que genera; los parámetros que rigen ésta característica son los siguientes:

- 1) El tipo y calidad del semiconductor usado para dicho fin.
- 2) La superficie sobre la que inciden los rayos solares.
- 3) La posición con la que inciden los rayos solares.

La primera característica depende de la capacidad monetaria del cliente así como de factores de calidad en el material. La segunda característica depende del tamaño de la celda, lo que implica espacio y dinero. La tercera característica se refiere a que una celda que recibe los rayos luminosos con un ángulo de 45 grados con respecto a la horizontal produce menos voltaje que una que recibe la energía solar a 90 grados de la superficie de la celda. Esto no implica que necesariamente deba existir un gran espacio ni una inversión fuerte para que una celda sea eficiente. Para poder lograr el objetivo, se requiere un mecanismo capaz de tener la celda en una posición perpendicular a los rayos del sol cada momento del día [2].



El proyecto que proponemos es un seguidor solar automático. Su principal función será que en cualquier parte del mundo, a cualquier hora del día y durante todo el año, sea capaz de mantener la celda receptora perpendicular a los rayos solares. El mecanismo propuesto contará con 2 ejes que permitan el movimiento libre de la celda central (almacenadora) en dos grados de libertad; cuatro sensores luminosos que determinarán la posición perpendicular del sol; dos para controlar un eje y dos para el otro; por último, un sistema de control dedicado al procesamiento de las señales de entrada y posicionamiento del mecanismo.

El funcionamiento del seguidor es muy básico, consiste en colocar los sensores de forma estratégica, de modo que la única forma en la que generen el mismo voltaje sea cuando los rayos incidan con el mismo ángulo sobre ellos. Esta situación indicaría que la celda central recibe la energía perpendicularmente. En el caso de que un sensor reciba más energía que el otro, esta diferencia hará girar el eje sobre el que está montado el mecanismo, e irá sensando voltajes hasta que sean iguales; en ese momento el motor se habrá detenido y los rayos del sol incidirán con un ángulo de 90° sobre la celda central.

El trabajo aborda dos enfoques diferentes del seguidor, el primero tiene como objetivo generar un sistema de control básico, sencillo y primordialmente económico; los resultados de dicho enfoque se exponen como punto de partida a la segunda propuesta de solución. El segundo enfoque, consiste en replantear el problema y rediseñar completamente la primera idea. Las ideas generadas en perspectiva resultaron definitivas para ser implementadas en el prototipo.

- Estado del Arte

La tecnología fotovoltaica para la conversión de luz solar en energía eléctrica es un método aplicable a cualquier área en la vida; se presentan aplicaciones en sistemas eléctricos rurales, bombeo de agua, comunicación satelital, protección contra corrosión, etc.

La eficiencia entregada por un sistema fotovoltaico depende de factores como el clima, la forma de acoplar el sistema a la carga, y en mayor medida, del correcto posicionamiento del módulo. Dicho posicionamiento varía dependiendo del lugar en el planeta en el que se coloque; en el Hemisferio Norte se orientan hacia el Sur y en el Hemisferio Sur hacia el Norte, considerando cierto ángulo con el plano horizontal. Debido a que la posición del sol en el cielo varía durante el año (más alto en el verano y más bajo en el invierno), es recomendable darle un ajuste al ángulo, tomando en cuenta la estación del año en que se encuentre.

La mayoría de los sistemas fotovoltaicos utilizan celdas estáticas o fijas, sin embargo, los módulos seguidores de sol pueden ser utilizados en aplicaciones de baja potencia [12,13,14]. La energía entregada por un sistema de este tipo puede ser incrementada si se utiliza un seguidor solar, obligando a los rayos del sol a



incidir perpendicularmente sobre la celda, la mayor parte del tiempo. Con este tipo de módulos, la radiación solar absorbida por el panel, es superior a la absorbida por un módulo fijo en determinado periodo de tiempo [15]. Se han realizado pruebas en las que se demuestran que es posible aumentar hasta en un 40% la energía producida por tecnología fotovoltaica, utilizando un seguidor solar [16,17,18,19,20].

Particularmente, Vilela, Fraidenraich y Tiba presentan en su obra "Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors: experiments and simulation", los efectos de un eje seguidor (este – oeste) en la radiación solar recibida por un sistema fotovoltaico, realizando la comparación con una celda estática. En sus resultados muestran que la radiación absorbida por el seguidor es de 19 a 24% mayor que la absorbida por el sistema fijo [15].

Aumentar la eficiencia de energía eléctrica generada por un panel fotovoltaico no es la única ventaja que brinda un seguidor solar. Existen sistemas dependientes de la radiación recibida por las celdas solares para funcionar, es decir, dichos sistemas no se basan en la cantidad de energía entregada, sino en un umbral crítico. Equipos de bombeo de agua, por ejemplo, requieren de una radiación mínima en la celda para bombear agua; en celdas estáticas, ese punto crítico se presenta a cierta hora del día y por determinado periodo de tiempo, únicamente cuando el sol está en la posición ideal. Con un sistema seguidor es posible mantener la radiación crítica en la celda por más tiempo, produciendo un mayor volumen de agua bombeada. Con base en los resultados presentados por Vilela et al. [15], la ganancia de agua bombeada cuando se implementó el sistema seguidor fue de 39% contra una celda solar estática. El incremento se debió a que la celda estuvo por arriba de la radiación crítica mucho más tiempo que con el módulo estático.

Un seguidor ideal tiene como objetivo orientar con exactitud cierto punto hacia el sol, compensando cambios en altitud y longitud. El movimiento del módulo debe ser lento, preciso y sin oscilaciones. Para cumplir con dicho objetivo es necesario contar con un sistema de control, el cual puede ser diseñado de diferentes maneras. En la Universidad de Picardie [3], en asociación con la Universidad de Corse, se diseñó un seguidor solar de 2 ejes controlado por un control PID y un control difuso. En su trabajo presentan los dos enfoques y el diseño de ambos controladores, el resultado que exhiben en su obra es solamente del control PID el cual tiene un retardo de 17 segundos para alcanzar el punto de radiación máxima. Respecto al control difuso que proponen, no existen pruebas ni resultados hasta el momento. Ambos controles fueron diseñados e implementados en LabView.

El control se puede realizar mediante otras herramientas o dispositivos, como por ejemplo un PLC. Otra forma de orientación es la utilizada por el autor [8], que propone un sistema de ecuaciones que tiene como variables las coordenadas



del lugar donde se va a colocar el panel; consiste en introducir dichos datos y con base en las ecuaciones es capaz de determinar la posición del sol en el cielo.

En el mercado mundial se presenta de la siguiente manera, existen mecanismos y sistemas que realizan la función de seguimiento solar, sin embargo, éstos son grandes, caros y de capacidades más acordes a una central termoeléctrica solar, donde se montan en arreglos de cientos de unidades.



Fig. 1 → Seguidor solar a gran escala

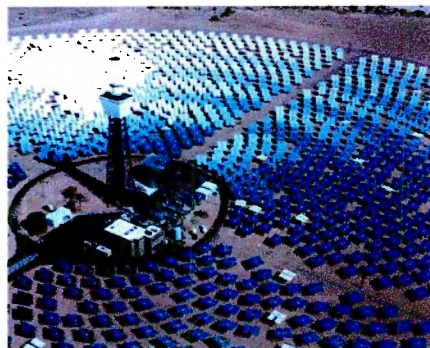


Fig. 2 → Central Termoeléctrica Solar

Respecto a la problemática, se tiene que la radiación solar es muy poco aprovechada en la actualidad. Se sabe que el sol arroja 4,000 veces más energía de la que consume la Tierra. Esto representa un excelente y poco explotado mercado con una gran expectativa de crecimiento y posibilidades de innovación. Asimismo, el desarrollo sostenible del planeta es un tema importante en el que hace falta mayor investigación.

Por otro lado, el costo es un factor a considerar cuando se habla de fuentes de energía renovable. Con base en proveedores europeos, los precios de celdas fotovoltaicas varía entre \$600 y \$1,300 USD, convirtiéndolas en artículos que no están al alcance de mucha gente.

- **Objetivos**

Se diseñará y construirá un dispositivo que mantenga siempre una orientación óptima con respecto al sol para la generación de energía eléctrica por medio de un control novedoso y económico, no importando la parte en el planeta en que se encuentre, el día del año o la hora. Asimismo, deberá funcionar en días nublados, buscando el punto más luminoso en el cielo. El dispositivo mantendrá también el error de precisión cerca o por debajo de los 6°.



CAPITULO 2

ENERGÍA SOLAR Y APLICACIONES

2.1 El sol y la energía solar

El sol es una estrella que está conformada por gases y no presenta una superficie sólida como algunos planetas y satélites. Sin embargo, presenta una composición que puede ser dividida en tres partes principales: núcleo, zona luminosa y zona convectiva (parte superior de la Fig. 3). Asimismo, el sol también tiene una atmósfera que lo rodea y que se divide a su vez en varias partes, como se muestra en la parte inferior de la Fig. 3. Por último, existen varios fenómenos asociados a este cuerpo, como son las manchas solares, las prominencias y destellos.

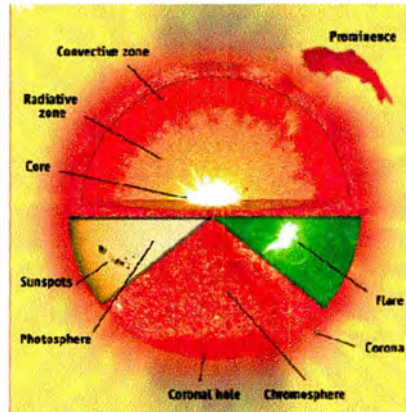


Fig. 3 → Partes básicas del sol; imagen proporcionada en el artículo en línea "How the Sun Works", cortesía del Consorcio SOHO, un proyecto conjunto entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la NASA. [27]

La energía solar que recibe nuestro planeta es resultado de un proceso de fusión nuclear, que tiene lugar en el interior del sol. La energía solar se manifiesta en un espectro compuesto por la radiación ultravioleta, la visible y la infrarroja. Al llegar a la Tierra, se pierde la parte ultravioleta ya que es reflejada por la capa de ozono, que conforma el límite superior de la atmósfera. Una vez en la atmósfera la parte infrarroja se pierde, ya sea por dispersión al reflejarse en las partículas que en ella se encuentran o al llegar a las nubes, que son capaces de reflejar hasta un 80% de la radiación solar. La parte sobrante llega a la superficie del planeta, ya sea de manera directa o indirectamente como reflejo de las nubes y partículas en la atmósfera.

Con base en trabajos previos [2], es posible manejar números referentes a la radiación emitida por el sol. Este tipo de energía se expresa en unidades de energía por tiempo por unidad de área, por ejemplo, Watts por metro cuadrado (W/m^2) ó Watts hora por metro cuadrado (Wh/m^2). De toda la energía que este astro produce, nuestro planeta recibe menos de una millonésima parte. La cantidad de energía que llega a la atmósfera de la tierra es de $1367 (W/m^2)$; sin embargo, la que logra llegar a la superficie de la tierra es mucho menos que eso.



La pérdida de energía se debe a que cuando penetra en la atmósfera, es dispersada y absorbida, disminuyendo la cantidad original a 1000 W/m^2 . Finalmente, la radiación útil que llega a la superficie de la tierra es un menor a la última cifra mencionada, esta pérdida se da gracias a la rotación del planeta y a las condiciones climáticas [2].

Es posible transformar la radiación solar que llega a la superficie terrestre en electricidad o para calentar fluidos. Un claro y simple ejemplo son las calculadoras solares, que nunca necesitan de pilas y mientras tengan suficiente luz funcionan perfectamente. Como se verá más adelante, la investigación en este campo ha logrado concebir estos sistemas a mayor escala.

2.2 Seguidor Solar Natural: Girasoles

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un módulo capaz de ubicar la posición del Sol en el cielo a cualquier hora del día, sin embargo, es un sistema con el que la naturaleza se adelantó. Los girasoles son flores que tiene como principal característica seguir la posición del Sol a través del día. A continuación, se describe brevemente como es que este tipo de flores logran cumplir con el propósito planteado en este trabajo.

Cuando los girasoles aún no han florecido, presentan un fenómeno llamado heliotropismo. Al amanecer, las caras de la mayoría de los girasoles apuntan al Este. En el transcurso del día, se mueven de Este a Oeste, "rastreado el sol". Durante la noche, giran de regreso para apuntar al Este. El movimiento es realizado por células motoras localizadas en un segmento flexible del tallo, cerca del botón de la flor, conocido como pluvino [24].

Al florecer el girasol, el tallo se endurece. Debido a esto, los girasoles florecidos ya no presentan heliotropismo y típicamente la flor se queda orientada al Este. Asimismo, los pétalos y el tallo pierden el color verde y adquieren los colores con los que comúnmente los conocemos.

Las hormonas vegetales controlan las funciones de una planta, como el crecimiento, la maduración de frutos, la floración, el fototropismo, entre otros. Las hormonas más conocidas son de la familia de las auxinas, que ayudan al crecimiento de la planta. Gracias a estas hormonas, algunas plantas como los girasoles presentan fototropismo positivo, en las que existe un mayor crecimiento de los tejidos en un sentido, lo que facilita el giro de la planta. El control de las hormonas vegetales es debido a la interacción de diferentes factores como el sol, la luz directa, la gravedad, el calor, las cantidades de rayos UV, etc.

La analogía que encontramos con nuestro seguidor solar es justamente esa característica de heliotropismo que presentan estas plantas. Al emular el seguimiento del sol por el cielo durante el día, en su recorrido de Este a Oeste, el



principio que rige nuestro proyecto es el mismo que el de un girasol: el máximo aprovechamiento de la radiación solar. Esta planta únicamente sigue al sol en su etapa de crecimiento, cuando más energía necesita. Asimismo, el sistema que proponemos captará la mayor energía solar posible, siguiendo al sol durante el día.

2.3 Tecnología Fotovoltaica

Los sistemas fotovoltaicos, como su nombre lo dice, se encargan de convertir la luz a electricidad. Una celda construida para este fin es fabricada con semiconductores, principalmente silicio, ya que estos materiales tienen la habilidad de absorber una cierta cantidad de luz. El fotón es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. El fotón tiene masa invariable igual a cero, y se mueve en el vacío a la velocidad constante c . En presencia de materia la partícula puede ser absorbida, transfiriendo energía y momento proporcional a su frecuencia. En este caso la energía absorbida por los fotones, proveniente de la radiación solar, excita a los electrones del semiconductor y éstos se mueven a través del material en una cierta dirección. Dicho movimiento produce una corriente eléctrica, definida como un flujo de electrones en un sentido determinado. Este fenómeno se conoce como el efecto fotovoltaico.

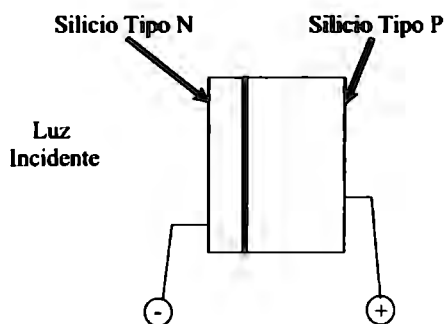


Fig. 4 → Sistema fotovoltaico

El módulo fotovoltaico está compuesto por celdas individuales conectadas en serie. Este tipo de conexión permite adicionar tensiones. La tensión nominal del módulo será igual al producto del número de celdas que lo componen por la tensión de cada celda (aproximadamente 0,5 V).

Se han hecho publicaciones de estudios acerca de los diferentes de paneles solares que existen, así como también de los diversos materiales fotovoltaicos con los que se pueden construir. Fan Jiang y Andy Wong [2], autores de un artículo de esta índole, construyeron en la ciudad de Singapur un panel solar compuesto de tres diferentes tipos de celdas fotovoltaicas: Silicón Monocristalino, Silicón Policristalino y Thin Film PV [8]. El hecho de ser cristalino significa que el material fotovoltaico tiene una estructura interna ordenada. Según



la teoría de los autores, el Silicón monocristalino es el más eficiente por no tener límites en los granos, no obstante, es el más caro de manufacturar. El policristalino no brinda una eficiencia tan alta, sin embargo, su costo es bajo. De igual forma, el Thin Film PV reduce el costo del panel, así como también la energía absorbida por el mismo. En la Fig. 5 se observa la estructura de un panel [8].

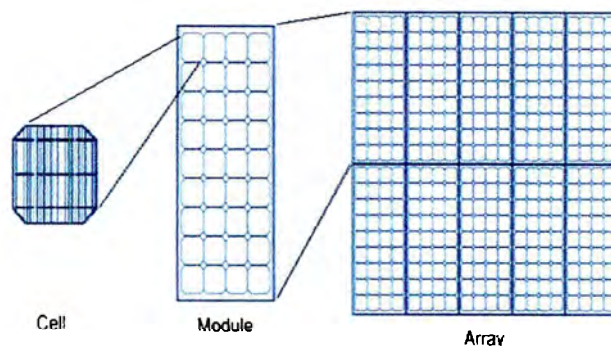


Fig. 5 → Estructura del panel solar

El principal objetivo de su investigación fue determinar la radiación solar en la ciudad de Singapur, así como, la eficiencia en producción de energía solar entre los tres tipos de paneles. Los resultados corroboraron lo que la teoría estipulaba, el panel monocristalino alcanzó una eficiencia de 8.12%, el policristalino de 7.45% y el Thin Film PV 6.75%.

Cabe señalar que el panel construido fue estático, por lo que se concluye, que la eficiencia de un panel policristalino o Thin Film PV puede incrementarse si se acopla a un sistema seguidor, en otras palabras, es posible compensar la calidad de la celda monocristalina fija utilizando un módulo seguidor con celdas de menor eficiencia.

2.3.1 Paneles Fijos

Una celda fotovoltaica para cualquier aplicación está formada por la unión de varias celdas de menor área, con el fin de obtener una superficie de incidencia mayor. Gran parte de las compañías manufactureras se dedican a la producción de celdas solares estáticas; dicho tipo de celdas son las que abundan en el mercado.



Fig. 6 → Panel solar estático, mostrado en la página de la Universidad de Burgos [20].



Fig. 7 → Panel solar fijo utilizado para el estudio de la radiación en Singapur [8]

La instalación y funcionamiento de una celda solar estática consiste en colocarla en un lugar despejado, que permita incidir los rayos sobre la superficie semiconductor. El posicionamiento debe ser referenciado al sur y con una inclinación de 30° para una mayor captación de energía, dicha inclinación se observa claramente en la Fig. 7 [8]. Una vez instalada se deja permanentemente en esa posición y absorbe cuanta energía sea posible durante el día.

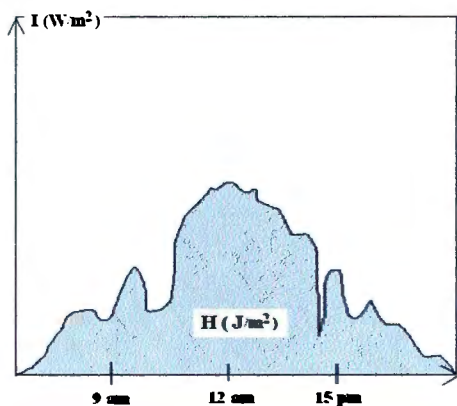


Fig. 8 → Gráfica de la Irradiación solar vs. Tiempo en un día común

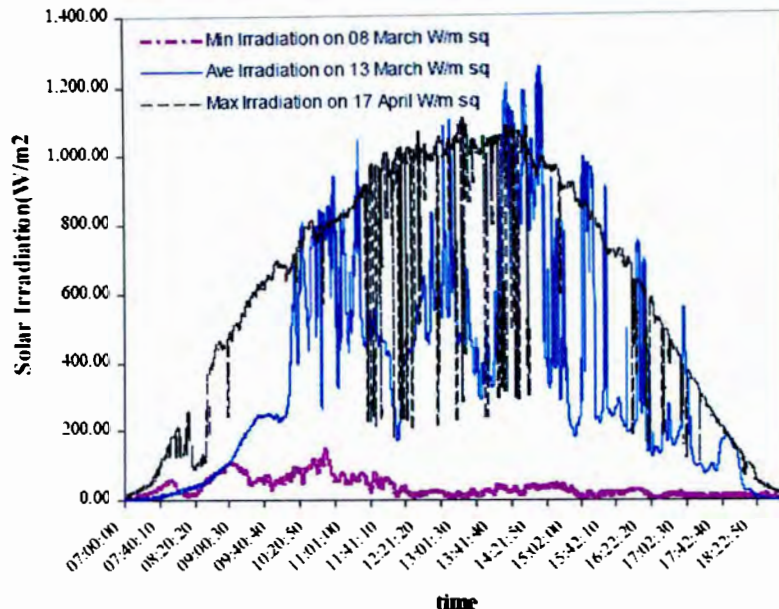


Fig. 9 → Resultado de la irradiación recibida por la celda probada en Singapur [8]

La gráfica mostrada en la Fig. 8 representa, en teoría, la variación de la irradiación solar recibida por una celda estática a través un día común. Se observa que al comienzo del día, la captación de energía es muy poca y va aumentando conforme las horas pasan. Existe un incremento constante en la absorción de rayos solares hasta el punto de máxima eficiencia, que se presenta aproximadamente en el cenit de la trayectoria solar (punto más alto). Después de que el sol ha pasado su punto máximo, comienza un decremento constante de energía absorbida por la celda, hasta llegar a cero.

La Fig. 9 presenta una respuesta similar a la teoría antes mencionada; con la diferencia de que dicho comportamiento fue reportado con base en pruebas realizadas a una celda estática en la ciudad de Singapur. La gráfica está compuesta por 3 líneas, la línea roja representa un día con mínima irradiación, la línea negra fue el comportamiento en un día de máxima irradiación y la línea azul fue con cierto promedio de irradiación [8].

Con base en el comportamiento de las curvas anteriores, se obtiene la conclusión de que una celda solar absorbe más energía cuando inciden los rayos solares perpendicularmente al material semiconductor, que cuando lo hacen con diferentes ángulos. La eficiencia de energía absorbida se puede ver mejorada si se implementa un seguidor solar.

2.3.2 Paneles Seguidores

Para lograr el objetivo de obtener producción de energía constante durante el día, es indispensable cambiar la orientación del panel durante el día, siguiendo la trayectoria del sol en el cielo. Esto se logra mediante un seguidor solar. Un



seguidor solar aumenta la eficiencia en conversión de energía solar a eléctrica [22].

Beltrán, González y García [8] clasifican a los seguidores solares con base en el mecanismo actuador que posiciona el módulo: Seguidores Pasivos y Seguidores Activos. Los pasivos se caracterizan por trabajar con fluido gaseoso comprimido de bajo punto de ebullición; el sol calienta dicho fluido y por diferencia de presiones el mecanismo se estabiliza automáticamente. Los seguidores Activos utilizan actuadores eléctricos (motores, engranes y cadenas) comandados por un sistema de control que responde a la orientación solar [11].

Los seguidores pueden seguir al sol en uno o dos ejes (Fig. 10). Normalmente, un módulo de un eje realiza su movimiento de este a oeste conforme pasa el día. Es posible que este tipo de seguidores no apunte exactamente a la posición del sol. Los seguidores de dos ejes cambian tanto la dirección del eje este – oeste, como el ángulo con respecto a la tierra. Este tipo de módulos se orientan directo al sol en todo el año; es por eso que son más complicados que de los de un solo eje.[11].

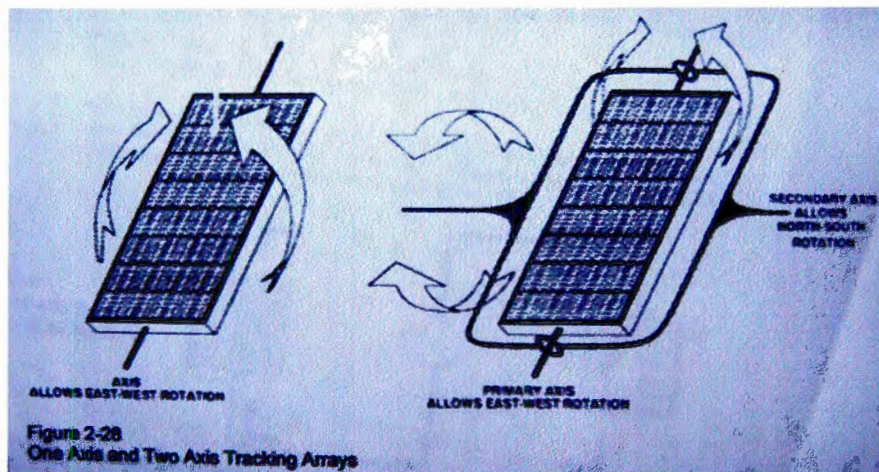


Fig. 10 → Seguidores de 1 y 2 ejes [19]

En el mercado podemos encontrar de cualquiera de los dos tipos de seguidores antes descritos. Existen empresas que se encargan de desarrollar seguidores solares automáticos, sin embargo, ninguno de los mecanismos es igual a otro. A continuación se presentan tres ejemplos de seguidores automáticos, diseñados por la empresa Leiger [23].



El modelo más sencillo es el seguidor de 1 eje, presentado en la Fig.11.



Fig. 11 → Seguidor Leiger de 1 eje [23]

El seguidor Leiger de 1 eje tiene la característica de tener sólo un grado de libertad. Posee la habilidad de ubicar al sol sobre las celdas con la rotación de un solo eje. Con tal grado de libertad únicamente se logra cubrir cierta parte de la trayectoria solar. Este tipo de mecanismos brinda un rendimiento adicional de 20% a 30%. Su instalación es bastante sencilla.

El siguiente seguidor es el Leiger de 2 ejes, mostrado en la Fig. 12.



Fig. 12 → Leiger de 2 ejes [23]

El Leiger de 2 ejes tiene posicionado uno de ellos verticalmente y el otro horizontalmente. Con dichos ejes es capaz de cubrir una trayectoria solar completa a través del día y del año. Este tipo de mecanismos brinda un rendimiento adicional de 35% a 45%. Su instalación resulta más compleja debido al montaje del panel sobre el eje principal.



Fig. 13 → Seguidor de 2 ejes [23]

El seguidor que se presenta en la Fig. 13 también presenta 2 grados de libertad. El inconveniente es que su estructura ocupa gran área dentro del terreno donde se quiera implementar, lo que representa un problema a considerar en caso de no contar con esa extensión de tierra.

Cabe señalar, que los seguidores antes presentados son comerciales, no obstante, diversas investigaciones de estos mecanismos, se han realizado. A continuación, se muestran dos imágenes en las que aparecen seguidores como de uno y dos ejes, con un fin único de investigación [3,8].



Fig. 14 → Seguidor de 1 eje [8]



Fig. 15 → Seguidor de 2 ejes [3]

Se observa que los tamaños, a comparación con los comerciales, son más pequeños. En los resultados arrojados por el mecanismo de la Fig. 15, se observa que la cantidad de potencia generada por dicho sistema es mayor en comparación con la energía generada por una celda fija. En la Fig. 16 se observa la comparación hecha entre dichas curvas características. La línea rosa representa la potencia generada por una celda estática, mientras que la azul muestra la potencia producida por el módulo seguidor. Se observa claramente que el seguidor provee de mayor energía al sistema por hacer incidir directamente los rayos sobre el panel principal [5,8].

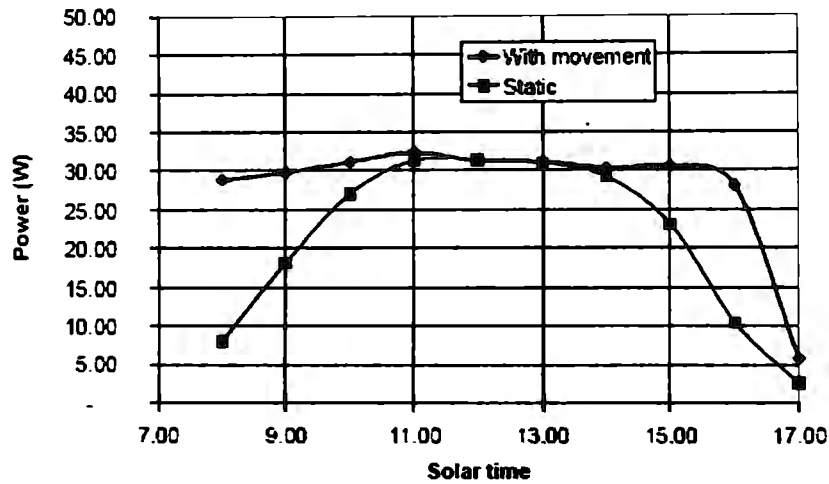


Fig. 16 → Panel estático vs. Panel seguidor [8].

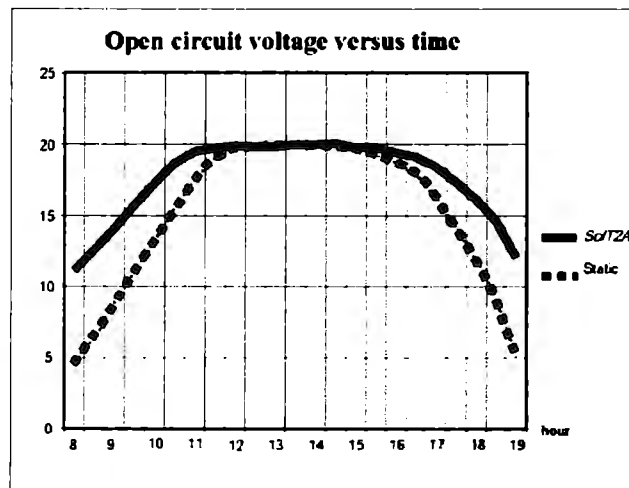


Fig. 17 → Panel estático vs. Panel seguidor de un estudio realizado en África [5].

Otro estudio (Fig. 17) realizado mostró que a condiciones similares de clima y periodos de tiempo, el módulo seguidor de 2 ejes obtuvo 3% más energía que un seguidor de un eje. Es una cantidad razonable a considerar si se toma en cuenta que será 3% cada día del año [3].

2.3.3 Aplicaciones de la Energía Solar

La radiación solar puede ser recolectada de dos formas básicamente, la primera como calor y la segunda como electricidad. El calor se logra mediante los captadores o colectores térmicos y la electricidad a través de los llamados módulos fotovoltaicos.

En cuanto a los sistemas de aprovechamiento térmico, el calor recogido puede destinarse a obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial, o bien para dar calefacción a nuestros hogares, hoteles, colegios, fábricas, etc. Las aplicaciones agrícolas son muy amplias. Con invernaderos solares pueden



obtenerse mayores y más tempranas cosechas; los secaderos agrícolas consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar y, por citar otro ejemplo, pueden funcionar en plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible.

Respecto a los sistemas fotovoltaicos, las celdas solares dispuestas en forma de paneles solares producían electricidad en los primeros satélites espaciales, SolT2A es un seguidor implementado en dicho tipo de tecnología [5]. Actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas, pues no contaminan ni producen ningún ruido en absoluto, no consumen combustible y no necesitan mantenimiento [3]. Además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes.

La electricidad que así se obtiene puede usarse de manera directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico), o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. También es posible inyectar la electricidad generada en la red general, obteniendo un importante beneficio.

2.4 Sistemas Solares Térmicos

Los sistemas solares térmicos pueden clasificarse en colectores planos y en sistemas de concentración o enfoque. Los colectores solares planos son dispositivos que se calientan al ser expuestos a la radiación solar y que transmiten el calor a un fluido. Con el colector solar plano se pueden alcanzar temperaturas hasta 75°C.

Los sistemas solares de concentración son aquellos que funcionan concentrando la radiación solar directa en un punto focal, pudiéndose ubicar ésta alrededor de un área o a lo largo de una línea. Este conjunto de dispositivos requiere de procedimientos o mecanismos de seguimiento, ya que la línea de incidencia varía durante el día y durante el año. Estos sistemas pueden lograr temperaturas de varios de cientos de grados centígrados.

2.5 Resumen de Capítulo

A pesar de que la distancia existente entre el sol y la tierra es aproximadamente de 144 millones de km., este astro es una fuente indispensable de energía. Es tanta la que el sol produce, que la tierra recibe menos de una millonésima parte; en otras palabras, es capaz de entregar hasta 1000 Watts por metro cuadrado de la superficie terrestre, la misma que es posible transformar a energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas.



Las celdas fotovoltaicas son placas de diversos materiales semiconductores, generalmente germanio o silicio, que producen un efecto eléctrico al hacer incidir rayos luminosos sobre su superficie. Al golpear los fotones en el panel semiconductor, liberan electrones que producen una diferencia de potencial utilizable en aparatos o actuadores eléctricos.

La eficiencia de energía en una celda estática varía durante el día debido al ángulo con el que golpean los rayos solares al material. El punto máximo en la curva se presenta cuando los rayos tocan el panel a 90° con respecto de la superficie. Es posible optimizar la eficiencia de un panel, implementado un seguidor solar. De esta forma, el tiempo durante el que incidirían los rayos luminosos perpendicularmente al semiconductor, será mayor a través del día.

Dentro de las aplicaciones que se le ha dado a esta fuente de energía renovable se pueden encontrar residencias, oficinas, hoteles y fábricas con plantas de alimentación a partir de la energía solar. Asimismo, existen autos impulsados por celdas solares y calentadores de agua para uso doméstico o industrial. También se han desarrollado aplicaciones agrícolas, como son los invernaderos solares y los secadores, por mencionar algunas.



CAPITULO 3 TRAYECTORIAS SOLARES

3.1 Coordenadas Geográficas

Son una forma de designar posición de un punto sobre la superficie terrestre. Este sistema fue propuesto por Gerardus Mercator en 1569 y es comúnmente utilizada hasta hoy en la navegación. Consiste en una red formada los paralelos (Latitud) y meridianos (Longitud) como se muestra en la Fig. 18. Existe sin embargo una cierta controversia sobre este sistema, debido a que en realidad es una proyección cilíndrica de la Tierra, cuando ésta se asemeja más a una esfera. De esta forma, los puntos más alejados del Ecuador no presentan las dimensiones adecuadas. A través de los años han surgido variantes y aproximaciones más exactas de este sistema, pero la base de paralelos y meridianos sigue siendo la misma.

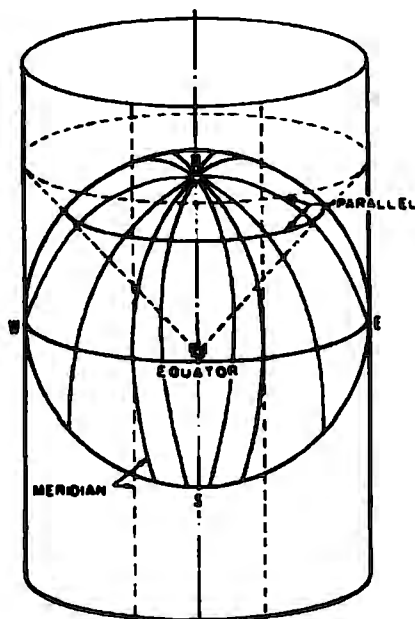


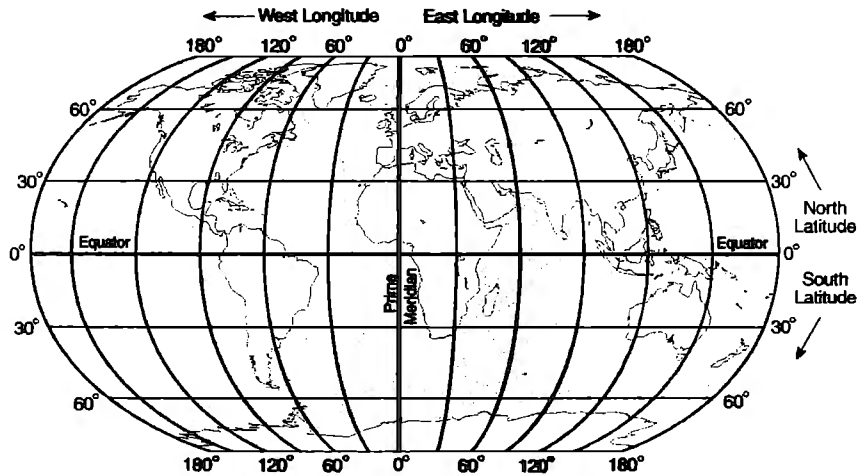
Fig. 18 → Proyección de Mercator, imagen proporcionada en el artículo en línea "MERCATOR PROJECTION", en *Integrated Publishing*. [26]

La latitud es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto. Puede ser Norte o Sur, dependiendo del hemisferio en que se encuentre y se mide con los paralelos, que están graduados de 0° a 90° hacia el Norte e igualmente hacia el Sur, como se muestra en la Fig. 19.

La longitud es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich, medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto. Puede ser Este u Oeste, dependiendo del lado del meridiano central en que se



encuentre y se mide con los meridianos, que están graduados de 0° a 180° hacia el Este e igualmente hacia el Oeste, como se muestra en la Fig. 19.



Produced by the Cartographic Research Lab
at the University of Alabama for Robert J.
Hansen's *The Alabama Journey*. It is used here
with his permission.

Fig. 19 → Latitud y Longitud, imagen proporcionada en la página Web "Maps of the World", de la Universidad de Alabama. [25]

Retomando el porqué diseñar un seguidor solar automático, se debe a que países que se localizan en una latitud menor a $\pm 45^\circ$ tienen una radiación solar máxima la mayor parte del año. Dentro de esos países se encuentra México [8].

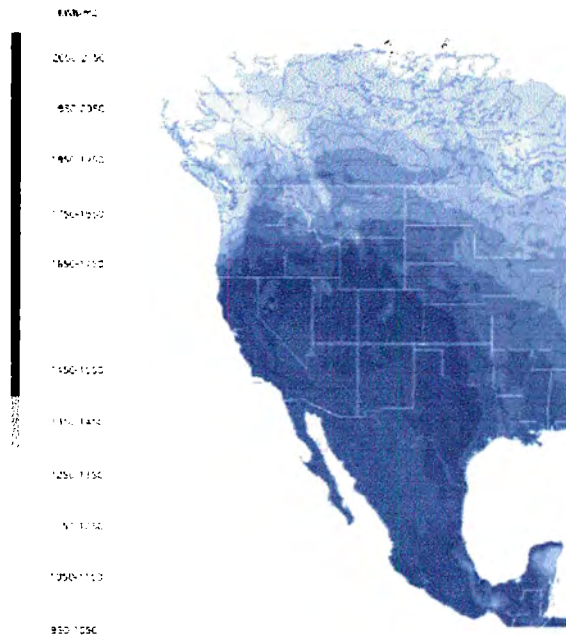


Fig. 20 → Relación de Potencia Solar Irradiada con respecto a la latitud. [8]



En la Fig. 20, se observa como los KWh/m^2 van aumentando conforme nos acercamos al ecuador. México recibe gran cantidad de energía solar, solo es cuestión de saberla aprovechar.

3.2 Movimiento de la Tierra

El termino rotación se refiere al giro de la Tierra en su propio eje y es como contamos los días. Existen dos tipos de "día", siendo el día solar promedio el que dura exactamente 24 horas y el día sideral el que dura aproximadamente 23 horas, 56 minutos y 4 segundos. La diferencia entre ambos es la referencia contra la que se miden. En el caso del día solar, se cuenta cuando el sol pasa por segunda vez sobre el mismo meridiano. Y para el día sideral, se cuenta cuando una estrella distinta al sol pasa por segunda vez por el mismo meridiano.

La Tierra se mueve alrededor del sol describiendo una órbita elíptica y se le denomina movimiento de traslación. La elipticidad de la órbita causa que la distancia de la Tierra con respecto al sol varíe anualmente. Este movimiento toma 365.25 días solares promedio para completar un ciclo y se le conoce como año tropical ó trópico.

Durante el periodo de 365 días, el sol va cambiando su posición con respecto a la latitud, de ahí el motivo de diseñar el seguidor capaz de ubicarlo con precisión. En la Fig. 21 se observa cómo es dicha variación con respecto a un punto cerca del ecuador [5].

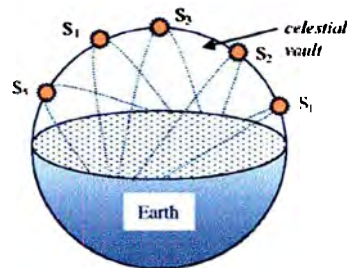


Fig. 21 → Típica variación del sol con respecto a la latitud del planeta. [5]

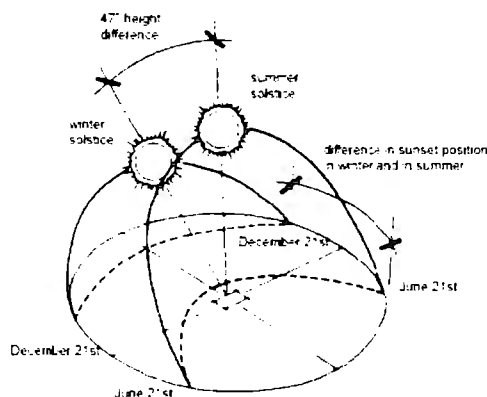


Fig. 22 → Variación de la altitud del sol en un año [8].



En la Fig. 22, se observa que el ángulo de cambio del sol en el solsticio de invierno y en el de verano es de 47° . Por más pequeña que sea esa variación, es posible aumentar la eficiencia de un panel fotovoltaico si se mantiene la orientación óptima [8].

3.3 Posición Solar

El cambio anual de la posición relativa del eje de la Tierra en relación al sol causa la variación de la altura del sol con respecto a nuestro cielo. La variación en el máximo de la altitud solar de cualquier lugar en la Tierra sobre un periodo de un año es 47° (2×23.5). El lugar en la Tierra donde el sol cae perpendicularmente en el medio día es llamado punto subsolar. El punto subsolar se encuentra en el Ecuador durante los equinoccios.

Aparte de este movimiento diario, el sol tiene un segundo movimiento aparente, que sólo podría observarse si se llevara un registro diario y se manifestaría como trayectorias paralelas cada día. La posición del sol para cualquier día y hora del año se define por los ángulos: azimut solar y altitud solar.

El azimut es el ángulo medido sobre el horizonte, formado por el punto cardinal sur y la proyección vertical del astro sobre el horizonte. Se mide en sentido horario desde el sur. Por proyección vertical entendemos el corte con el horizonte que tiene el círculo máximo que pasa por el cenit y el astro.

En astronomía se llama altura de un astro al arco de vertical contado desde el horizonte hasta el astro. Su valor absoluto es siempre menor o igual que 90° y, por convenio, es un valor positivo si el astro es visible (es decir si está sobre el horizonte) y negativo si no es visible (es decir si está bajo el horizonte). La altura y el azimut son coordenadas que dependen de la posición del observador. Es decir un mismo astro en un mismo momento son vistos bajo diferentes coordenadas horizontales por diferentes observadores situados en puntos diferentes de la Tierra. Esto significa que dichas coordenadas son locales [5,8].

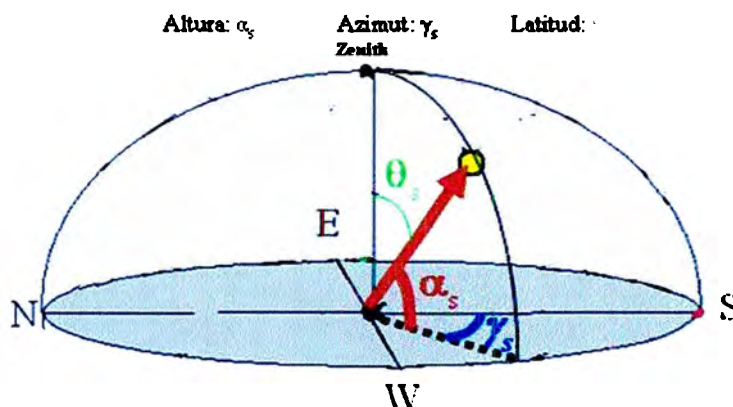


Fig. 23 → Altura y Azimut de la trayectoria solar.



La fórmula desarrollada para calcular el ángulo de altitud es la siguiente:

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } \delta \text{sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \dots\dots\dots (1)$$

Asimismo, la ecuación que rige el cálculo del azimut es:

$$\cos \psi = \frac{\text{sen } \alpha \text{sen } \phi + \text{sen } \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- α es el ángulo de altitud
- δ es la declinación solar
- ϕ es la latitud del lugar
- ω es el ángulo horario
- ψ es el ángulo de azimut

3.4 Resumen de Capítulo

Para la elaboración del seguidor de posición solar, es muy importante la comprensión de los movimientos terrestres y las coordenadas geográficas que nos permiten conocer la posición solar y trasladarla a dos ángulos (azimut y altitud solar), respecto a nuestra posición terrestre. Existen sistemas seguidores de sol que funcionan con base en las coordenadas del lugar donde se va a colocar; se introducen la longitud y latitud en un sistema basado en algoritmos de posicionamiento del sol, de esta forma el sistema lo ubica con la hora y el día específico (sistema off-line). Nuestro seguidor prescinde de las coordenadas para ubicar al sol (on-line).

Con la investigación realizada en este capítulo se consigue ver la necesidad de dos grados de libertad en el mecanismo seguidor para obtener siempre la orientación óptima de la celda fotovoltaica.



CAPITULO 4

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

4.1 Introducción a la Propuesta de Solución

Este capítulo aborda la propuesta de solución desde dos enfoques completamente diferentes. En el primer enfoque se pretende desarrollar un dispositivo capaz de seguir la posición del sol durante el día. Este tendrá las siguientes características:

- Está compuesto de *elementos sencillos y básicos* para tener un *bajo costo y poco mantenimiento*.
- Uso doméstico (posible adaptación para uso industrial).
- Fácil instalación
- Balance de energía.

En el segundo enfoque, que fue consecuencia de los resultados obtenidos en la primera propuesta de solución, se continúa con el objetivo de desarrollar un sistema que localice la posición del sol para aumentar la eficiencia del panel solar. A diferencia de la propuesta anterior, esta busca las siguientes características:

- Un sistema de control más robusto y complejo, no necesariamente económico.
- Garantizar la localización del sol.
- Uso doméstico (posible adaptación para uso industrial).
- Fácil instalación
- Balance de energía.

Los dos enfoques están compuestos por cuatro módulos: Fase de Sensado, Sistema de Control y Potencia, Estructura Mecánica y Sistema de Almacenamiento de Energía. A través del capítulo se abordará cada uno de los módulos mediante de los dos enfoques, es decir, se realizará una comparación simultanea entre propuestas y de esta forma se justificará el porqué se seleccionó determinada solución.

4.2 Fase de Sensado

La opto electrónica se encarga de aquellos dispositivos que combinan la óptica y la electrónica para funcionar. En general, los componentes opto electrónicos son aquellos capaces de convertir energía luminosa en eléctrica o viceversa.



4.2.1 Sensores

Se consideraron tres tipos de sensores que por sus características podían ser de utilidad para implementarlos en el seguidor solar automático.

Sensores Térmicos

También llamados resistencias detectoras de temperatura (RTD), son sensores de temperatura que trabajan con el cambio predecible de la resistencia eléctrica en algunos materiales al variar la temperatura. Generalmente están hechos de platino y hay de dos tipos:

- De película fina, que consisten en una muy delgada capa de platino ($1\ \mu\text{m}$) sobre un sustrato, que son baratos y de respuesta rápida, aunque los diferentes cocientes de expansión de los materiales le brindan problemas de estabilidad.
- De alambre enrollado, que tienen una mayor exactitud a temperaturas elevadas ya que por su forma permiten menores deformaciones pero comprometen la estabilidad mecánica.

Semiconductores: Foceldas como Sensores

Fotodiodo o celda fotovoltaica, cuyo funcionamiento fue explicado en el capítulo 1.

Las foceldas presentan la ventaja de reacción casi inmediata a los cambios de luminosidad y, aunque es necesario ajustar esa velocidad a nuestras necesidades, las consideramos como la primera en opción en el enfoque 1. Las celdas usadas para dicho enfoque presentan especificaciones técnicas (voltaje y corriente) convenientes (1V, 400mA), lo que motivó a estas características fueron los mínimos requerimientos del sistema de control en la propuesta 1.

El modo de operación de las celdas como sensores es la siguiente: se colocarán 2 celdas solares de tal forma que los rayos del sol incidan en mayor cantidad en una de éstas. Así, si se comparan los voltajes de ambas celdas, podremos saber de qué lado se encuentra el sol. Si el sol se encuentra centrado entre las 2 celdas, los voltajes son iguales. Esta lógica se muestra a continuación en los gráficos de la Fig. 24.

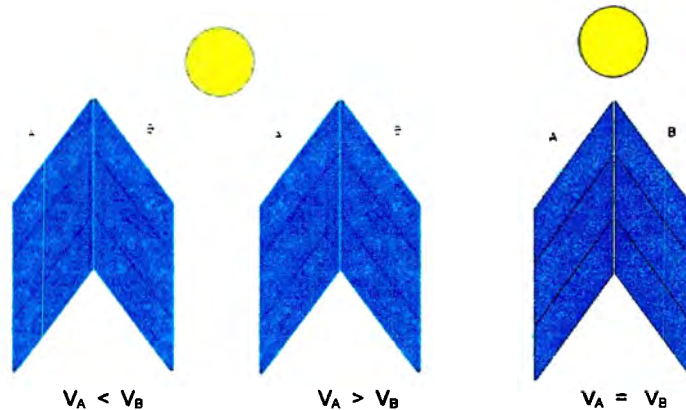


Fig. 24 → Lógica de ubicación solar

A pesar de que la implementación de las celdas solares como sensores presenta la ventaja de sensibilidad a la radiación, existió el inconveniente de adquirir celdas con el mismo voltaje, lo que provocó que la comparación que se quería realizar no fuera exacta. La manipulación de las señales que este tipo de sensores envía resultaron ser difíciles de manipular con el primer sistema de control propuesto, que se explica más adelante. Lo anterior llevó a buscar otro tipo de sensor que fuera manipulable con mayor facilidad y precisión, el LDR.

LDR

El "Light Dependent Resistor", como su nombre lo dice, posee la capacidad de variar el valor de su resistencia en función de la luz que incide sobre su superficie. El LDR consta de una placa de material semiconductor voluminoso como el sulfuro de cadmio o seleniuro de cadmio con un par de contactos eléctricos entre sus extremos. A medida que incide luz sobre el semiconductor dentro de él se producen pares electrón-hueco. Suponiendo que la energía del fotón incidente sea mayor que la banda prohibida del material, entonces el fotoelectrón ganará suficiente energía para ser excitado hacia la banda de conducción. En la Fig. 25 se observa el comportamiento resistivo del LDR conforme varía la intensidad luminosa sobre él. A mayor intensidad menor es la resistencia, a menor intensidad mayor es la resistencia.

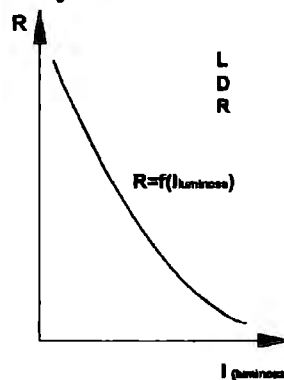


Fig. 25 → Curva característica de un LDR



Los LDR fueron implementados como solución definitiva al problema de sensado en el segundo enfoque. Las especificaciones de las celdas fotoresistivas son de $10\text{ M}\Omega$ en la oscuridad a $130\ \Omega$ en la sombra, soportando 250 V de corriente alterna. La ventaja que brinda este tipo de sensores es que presentan especificaciones en serie, lo que da una estandarización en los 4 LDR que usaremos en el seguidor.

Por otro lado, se resolvió la problemática de las diferentes voltajes generados presentada con las celdas fotovoltaicas, con LDR's es posible limitar el voltaje que se generará con la siguiente configuración.

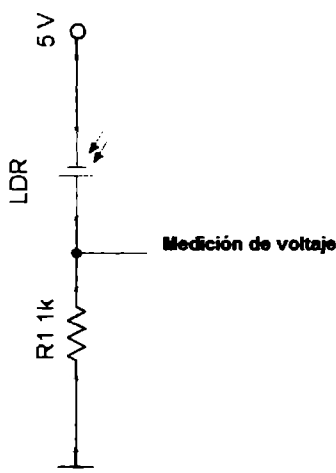


Fig. 26 → Configuración del LDR para limitar el voltaje entregado

En la configuración mostrada en la Fig. 26, el voltaje que se genera dependiendo de la cantidad de la intensidad de luz recibida por el LDR varía de 0 a 5 V. Esta limitación brinda una mayor precisión y mejor manipulación de la señal que con cualquier sensor antes descrito. El motivo de limitar a 5 V es que el sistema de control que se propuso como segundo enfoque fue el control es de tipo digital.

La forma en que están colocados, como se muestra en la Fig. 27 permite que se genere sombra sobre un LDR mientras el otro recibe la radiación solar. Así, se hicieron dos arreglos con un par de LDR's cada uno, con el fin de sensar cada eje por separado.

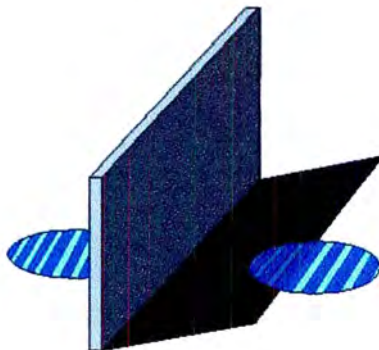


Fig. 27 → Orientación de los sensores.

4.3 Sistemas de Control y Potencia

En esta sección se profundiza sobre los dos enfoques que se le dio a los sistemas de control y de potencia. Es en el sistema de control y de potencia donde de radica la diferencia entre la primera y la segunda propuesta de solución.

4.3.1 Enfoque 1: Comparador de Voltaje

Planteando como objetivos del primer enfoque la sencillez y economía, se decidió hacer la comparación entre dos voltajes provenientes de las celdas solares, y con base en ello generar el movimiento del motor; para eso se desarrolló un circuito de control basado en comparación de voltajes. Asimismo, se propuso que la misma señal que entrega el sistema comparador, sea la que active al actuador que se utilizó, pasando primero por una etapa de potencia.

Sin lugar a dudas, hacer uso de circuitos integrados que tengan la función de comparación puede resultar muy útil y a la vez sencillo, ya que no es necesaria una configuración muy elaborada. Por lo tanto, se investigó sobre la mejor opción que a la vez resultase económica y simple.

Como ya se mencionó, se diseñó y construyó un sistema comparador basado en un LM311, el cual es un comparador de voltaje, muchas veces confundido erróneamente con un amplificador operacional.

La lógica del sistema comparador es el siguiente: la comparación se hace entre los voltajes generados por las celdas solares. Esto es, si el voltaje de la celda 1 está por encima de la celda 2, el voltaje de salida será el voltaje de saturación positivo; por el contrario, si la señal de la celda 1 es inferior que el de la celda 2, el voltaje de salida será el voltaje de saturación negativo. Dependido de la salida, el motor de moverá en un sentido o en otro, posicionando el sistema donde haya un equilibrio entre las celdas.

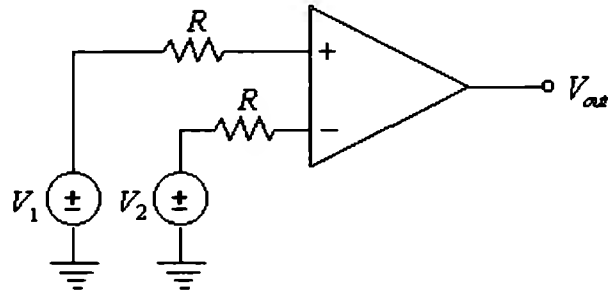


Fig. 28 → Concepto del comparador de voltaje [28]

Las ventajas de usar este circuito residen principalmente en su sencillez, rapidez y bajo costo. Sin embargo, se requiere de mucho cuidado en las conexiones ya que es muy sensible y por lo tanto se puede sobrecalentar fácilmente de no estar correctamente configurado y resulta inservible después.

A pesar de que parece ser una solución viable, respecto a sencillez y economía que brinda, es un sistema sin gran robustez en el sistema de control, y en los resultados (que más adelante se presentan) se observa eso. Es por eso que se propuso la solución número dos.

4.3.2 Enfoque 2: Propuesta de Control

Durante la investigación previa encontramos diversos sistemas seguidores del movimiento solar [3,9]. Todos proponen sistemas de control de lazo cerrado pero con la característica de usar la posición solar que proviene de un algoritmo o de un sistema de posicionamiento global, nosotros proponemos un sistema de control también en lazo cerrado pero con la ventaja de no necesitar ninguna referencia para su funcionamiento, nuestro lazo de control se puede observar en la Fig. 29.

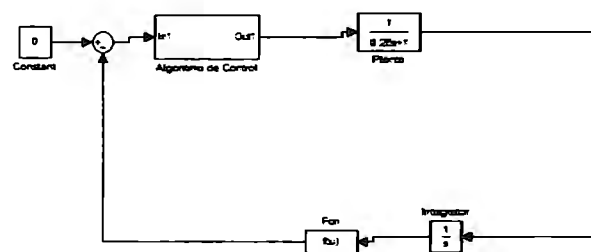


Fig. 29 → Lazo de control propuesto

En la figura anterior se muestra como la referencia a seguir es cero, y la retroalimentación no se produce con la posición del motor directamente, es decir, no necesitamos un tacogenerador o algún instrumento para saber la posición angular del eje, sino que, la función de retroalimentación se realiza por medio de la caja "f_n" de la figura.



Para que el ángulo del sol respecto al seguidor sea perpendicular la diferencia de voltaje entre los sensores debe ser cercana a cero, esta diferencia cambia con la posición del seguidor, es decir, existe una relación entre la posición del motor y la diferencia de voltaje detectada por los sensores. Para caracterizar esta relación se consideró la posición solar fija y se movió en intervalos de cinco grados el eje del seguidor. La grafica obtenida se muestra en la Fig.30.

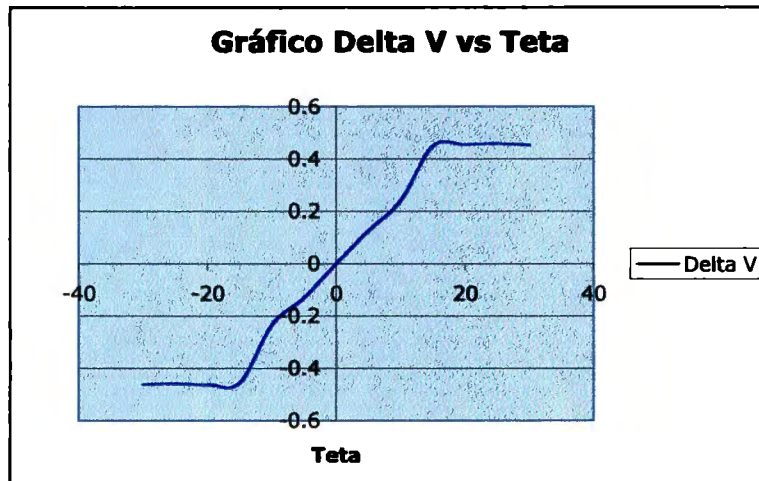


Fig. 30 → Relación entre el ángulo del seguidor respecto al sol y la diferencia de voltajes detectada en el microcontrolador.

Dentro de la zona de operación del seguidor (10 a -10 grados), podemos observar un comportamiento lineal de la relación Teta vs. Delta de V.

4.3.2.1 Sistema basado en un Microcontrolador

Fue necesario rediseñar el sistema de control debido a que los resultados obtenidos con la solución 1 no eran satisfactorios. Se optó por eliminar la idea de comparación de voltajes y buscar una solución que fuera robusta, manipulable y de mayor complejidad. El medio propuesto fue un Microcontrolador.

Un Microcontrolador es un circuito integrado programable que cuenta con puertos de entrada/salida, memoria ROM y RAM interna, timers y funciones especiales como interrupciones y comunicación serial; capaces de realizar cualquier tarea o proceso que se les programe, sabiendo administrar cada uno de los recursos.

El objetivo planteado en este enfoque fue realizar el control del mecanismo utilizando el Microcontrolador ATMEL 89C51. Sin embargo, la solución no solo requería la utilización del 89c51. Debido la solución propuesta requiere de tiempos discretos, es decir, de forma digital; fue necesario llevar la señal analógica de los sensores a digital y luego realizar el procesamiento necesario. Se requirió un convertidor analógico digital para dicha tarea, en este caso se usó se implementó el ADC 0808, cual tiene como característica principal que cuenta con un



multiplexor de hasta 8 entradas analógicas. Dicha característica nos permitió introducir las 4 señales de los sensores en un mismo ADC, la selección de señal la sincroniza el Microcontrolador.

Una vez realizado el procesamiento con base en el algoritmo seguidor (se muestra a continuación), la salida es una combinación de 2 bits adecuada para un puente H (se especifica posteriormente); maneja el sentido de giro de los motores.

En la Fig. 31 se observa la cadena de adquisición de datos para el sistema de seguimiento solar:

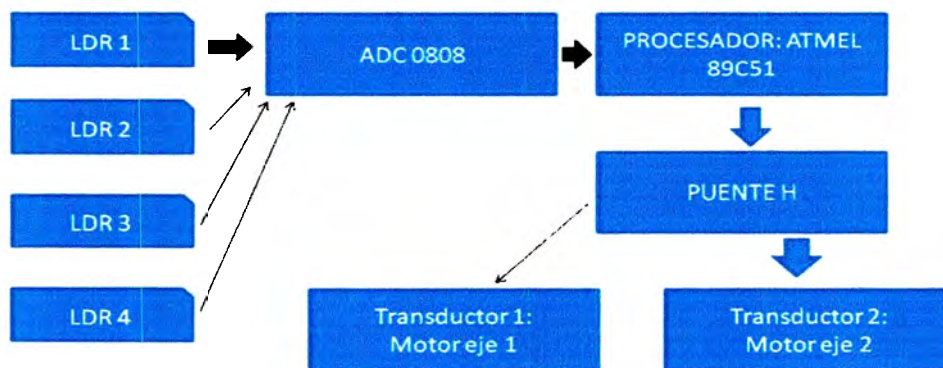


Fig. 31 → Cadena de adquisición de datos



4.3.2.1 Algoritmo

La base de utilizar un Microcontrolador es el algoritmo que se programa a él, es en el algoritmo donde radica la verdadera funcionalidad de la tarea o proceso que se desea realizar. La Fig. 32 representa el diagrama de flujo del algoritmo seguidor:

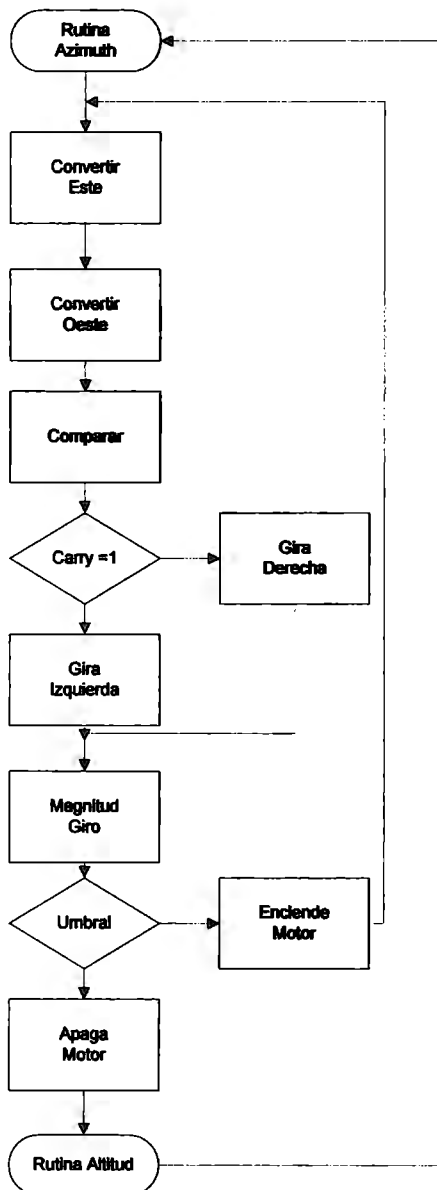


Fig. 32 → Algoritmo del Seguidor Solar Automático

El lenguaje que se utilizó para programar el algoritmo es ensamblador, pero antes de cargarlo en el Microcontrolador, fue simulado en el PROVIEW 32 con el fin de observar que los tiempos de respuesta fueran los congruentes con los requeridos por el convertidor. En la Fig. 33 se muestra la simulación.



Simulación en PROVIEW 32:

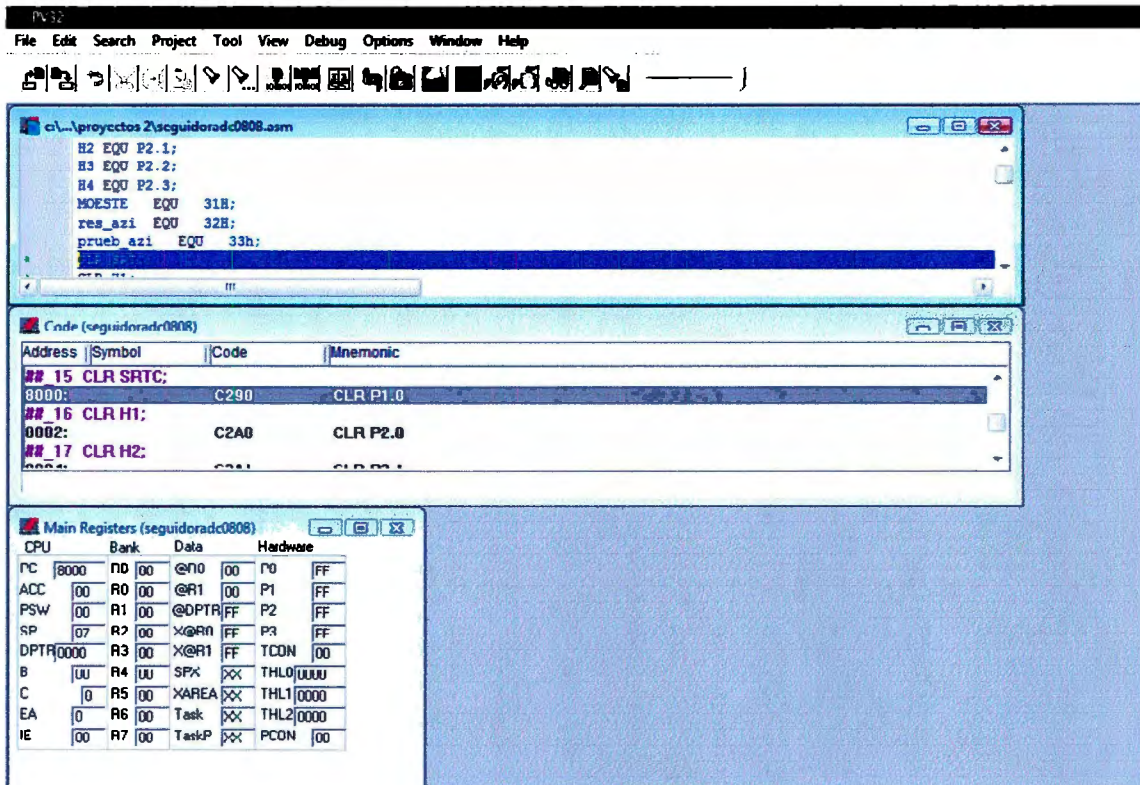


Fig. 33 → Simulación en ProView32

4.3.3 Convertidor AD

4.3.3.1 Requerimientos

Para cumplir los requerimientos de nuestro sistema seleccionamos el convertidor analógico digital ADC0808 que nos permite captar un voltaje y traducirlo a 8 bits en paralelo, además de que este modelo tiene incluido un multiplexor de ocho entradas analógicas. Esto es ideal porque nuestro sistema utiliza 4 entradas.

4.3.3.2 Aplicación en el sistema

El primer paso para incluir el ADC en el sistema es encontrar su resolución. Como el rango que entregan los sensores es de 0 a 5 V y el convertidor tiene una resolución de 8 bits, es decir, 256 escalones, cada paso resultante es de 0.019 V. Esta resolución es suficiente para lograr la sensibilidad necesitada.

El segundo paso es sincronizar las señales de control del ADC con el microcontrolador, las señales de control requeridas se muestran en la Fig. 34.

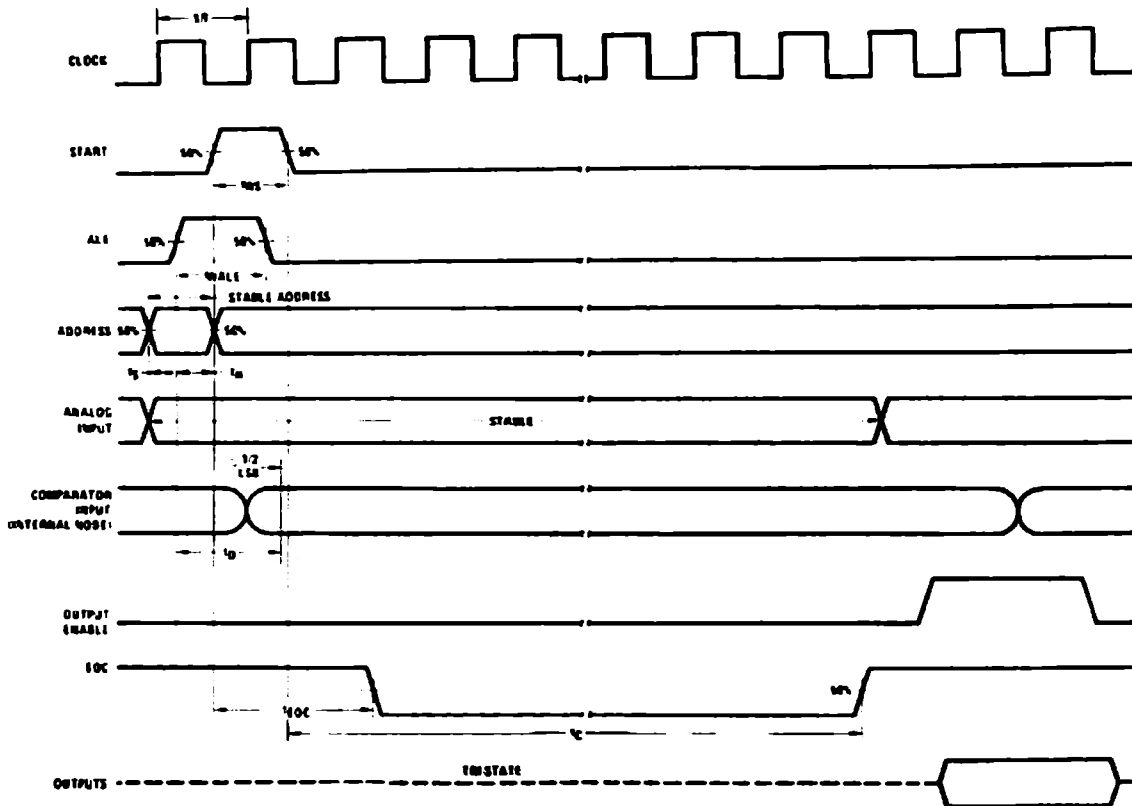


Fig. 34 → Señales de control del ADC.

Se utilizaron bits específicos del microcontrolador para enviar y recibir las señales en los tiempos adecuados y el puerto cero del microcontrolador para la conversión y el almacenamiento de datos.

4.3.4 Etapa de Potencia

4.3.4.1 Requerimientos

En todos los sistemas es muy importante desacoplar la etapa de control de la etapa de potencia, así un fallo en la última no afectaría los circuitos de control que son más delicados.

La etapa de potencia debe estar adecuada al motor seleccionado, cuyas características se muestran a continuación:

Voltaje	Corriente	Velocidad	torque	Potencia salida
24 V	<1.1 A	340 rpm	$294 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	3.4 W

Tabla 1 → Características del motor utilizado.

La etapa de potencia debe ser capaz de entregar la potencia necesaria al motor y mantenerse sincronizada con la fase de control, sin que se tenga que operar en valores límites, pudiendo así considerar un factor de seguridad.



Los parámetros que necesitamos cumplir son:

- Voltaje máximo de 24 V.
- Corriente máxima 1.1 A.
- Corriente máxima de salida del comparador 50mA.

4.3.4.2 Diseño

Transistores

Se eligieron dos pares de transistores tipo Darlington, uno de tipo PNP (TIP125) y el otro tipo NPN (TIP121), colocados en paralelo para lograr la conmutación entre las direcciones de giro del motor. Estos transistores son complementarios y tienen las mismas características que son:

- 60 V Colector-emisor máximo.
- 5 A máximos de corriente del colector.
- 120 mA máximos de corriente en la base.

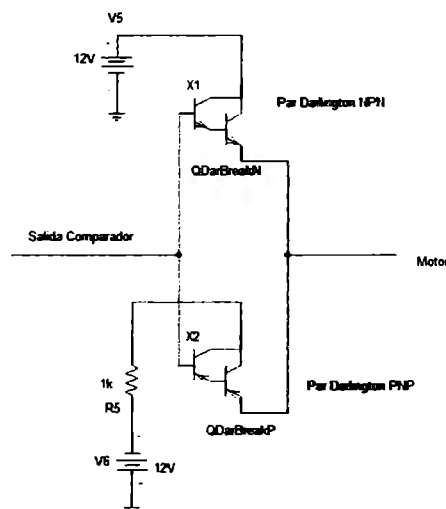


Fig. 35 → Diseño del circuito de potencia

Según el circuito mostrado en la Fig. 35, Cuando la salida del comparador es positiva se satura un transistor, y se alimenta al motor con +12V (giro hacia la derecha). Cuando la salida del comparador es negativa, se satura el transistor contrario y se alimenta al motor con -15V (giro hacia la izquierda).

Puente H

Los puentes H se utilizan en muchos sistemas de potencia (motores de DC, convertidores DC-AC, fuentes de poder, etc.). El puente H consiste en cuatro switches conectados en red [2].

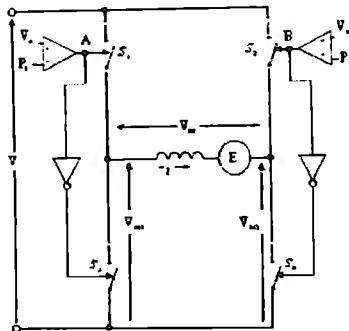


Fig. 36 → Diagrama de Control de un puente H [2]

En la Fig. 36 se muestra el puente H alimentando a un motor de DC que es representado por la inductancia y resistencia de armadura y una fuente de voltaje ideal, representando la Fuerza Electromotriz (FEM). Existen dos modos de controlar un puente H:

- 1) Modo bipolar, en el que los switches de cada diagonal se controlan simultáneamente.
- 2) Modo unipolar, en que cada switch se controla independientemente

Elegimos controlar el puente H en el modo bipolar porque así únicamente necesitamos dos bits de control para cada puente H, en lugar de cuatro por cada uno.

El puente H que utilizamos es el L293 que es capaz de entregar 1 A de corriente en modo unipolar, pero conectado en pares alcanza los 2A en operación normal, para corroborar que el motor a utilizar no exige una corriente mayor a 2A, medimos cual era la máxima corriente exigida por el motor cuando se presenta deslizamiento máximo, esto sucede al arranque o cuando detenemos mecánicamente el eje, al realizar estas pruebas encontramos que el máximo fue de 0.7 A y representa un valor pico, por lo que el componente elegido es adecuado.

En la Fig. 37 Se muestra la conexión entre el CI y un motor en configuración bidireccional.

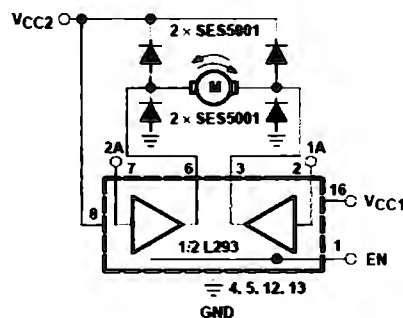


Fig. 37 → Control bidireccional de un motor de CD [30]



4.3.5 Pruebas y resultados

4.3.5.1 Simulación y Experimentación

Comparador de voltaje

Como primer paso, decidimos probar el concepto de comparador de voltaje utilizando un dispositivo genérico, a través del software de diseño de circuitos Schematics, de la empresa Orcad. Asimismo, se hizo el análisis SPICE con respecto al tiempo, para conocer la respuesta de dicho dispositivo a las entradas (en nuestro caso serían los sensores).

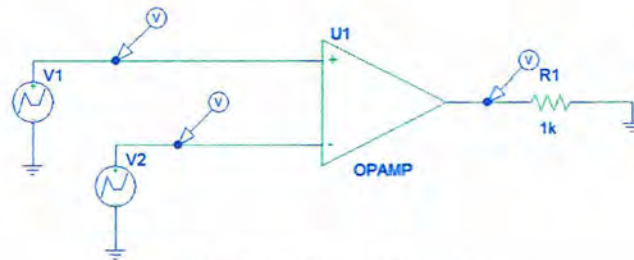


Fig. 38 → Circuito comparador genérico

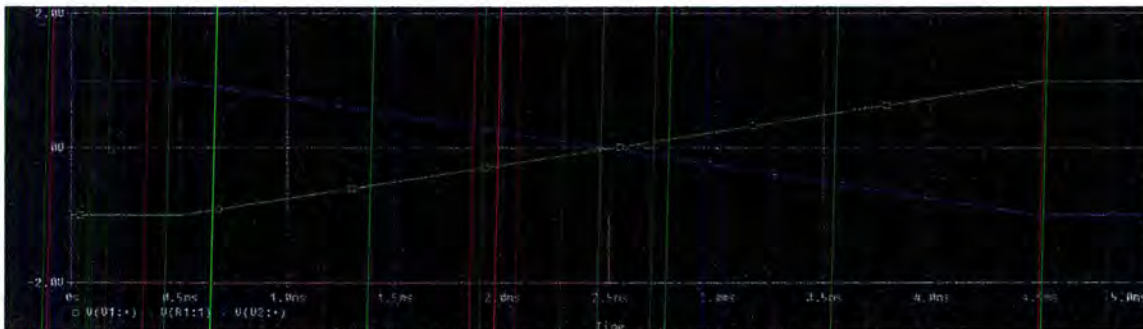


Fig. 39 → Simulación SPICE del circuito genérico

En el resultado de la simulación en el tiempo (Fig. 39) podemos observar que existe una conmutación en la salida del circuito, denominada como R1:1 (línea roja) en la figura anterior. Asimismo, se comprueba la teoría de comparadores de voltaje al obtener el voltaje de saturación negativo cuando el valor en la entrada (+) del comparador, que en la figura se muestra con la línea verde, es menor que el valor en la entrada (-), mostrada con la línea azul. Y viceversa aparece el voltaje de saturación positivo a la salida.

Una vez corroborado el punto anterior, se procedió a diseñar un circuito con el LM311, alimentado con un voltaje de saturación de ± 2 V, con el fin de tener una gráfica más compacta al momento de simular y tomando en cuenta el voltaje de 1 V entregado por los sensores reales. Asimismo, se utilizó el comparador de voltaje LM111 debido a que el LM311 no se encuentra en la biblioteca del programa



Schematics, pero la única diferencia entre estos dos dispositivos es que el primero es de uso militar y el segundo de uso comercial.

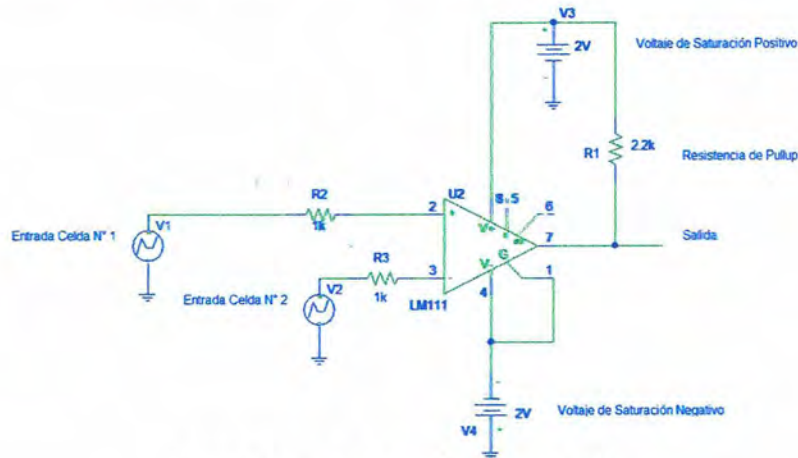


Fig. 40 → Circuito de comparación con LM311

Como se muestra en la Fig. 40, diseñamos el circuito de la manera más sencilla posible, tratando de mantener el enfoque de la economía del sistema. Sin embargo, fue necesario incluir la resistencia de "pull-up", ya que sin ésta sólo obteníamos el voltaje de saturación negativo a la salida y en vez de la parte positiva, nos entregaba 0 V. A continuación se muestran ambos casos (Fig. 41 y Fig. 42), para enfatizar este punto de una manera más gráfica.

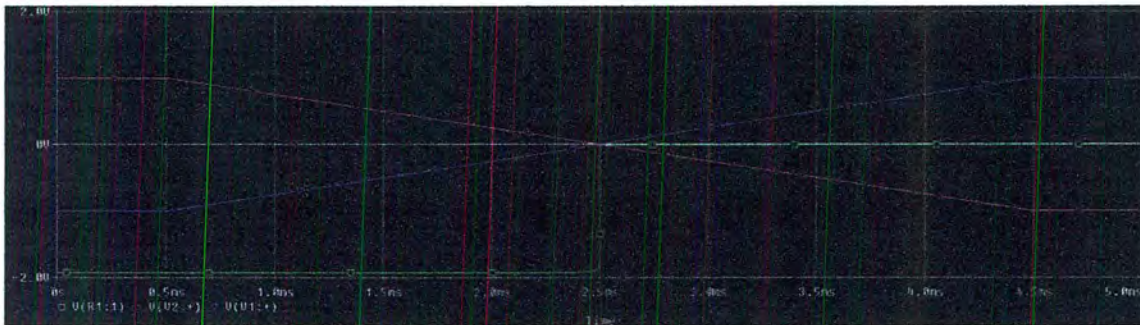


Fig. 41 → Simulación SPICE del circuito sin resistencia de "pull-up"

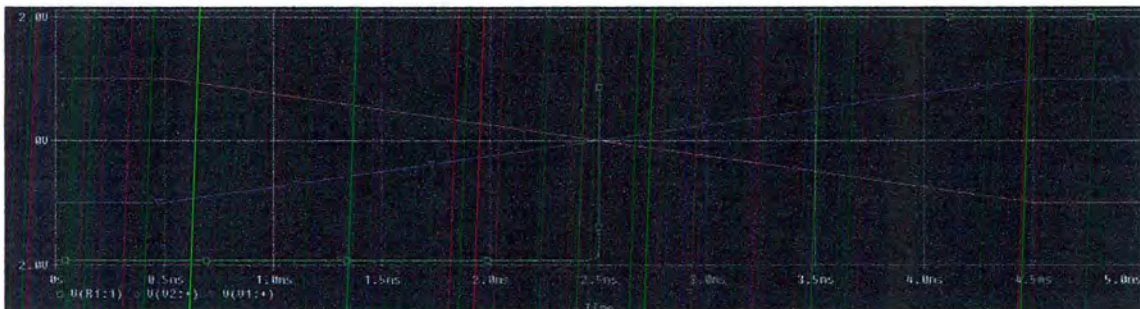


Fig. 42 → Simulación SPICE del circuito con la resistencia de "pull-up"



Una vez superado este detalle, surgió la idea de hacer más estable la salida. Esto significa que necesitábamos una reacción más lenta en la conmutación entre el valor de voltaje negativo y el positivo, con el fin de evitar cambios abruptos que pudiesen dañar los demás dispositivos conectados posteriormente a la salida. Para lograr esto, optamos por conectar un arreglo derivador a la salida, como se muestra en la Fig. 43, consistente en una resistencia y un capacitor.

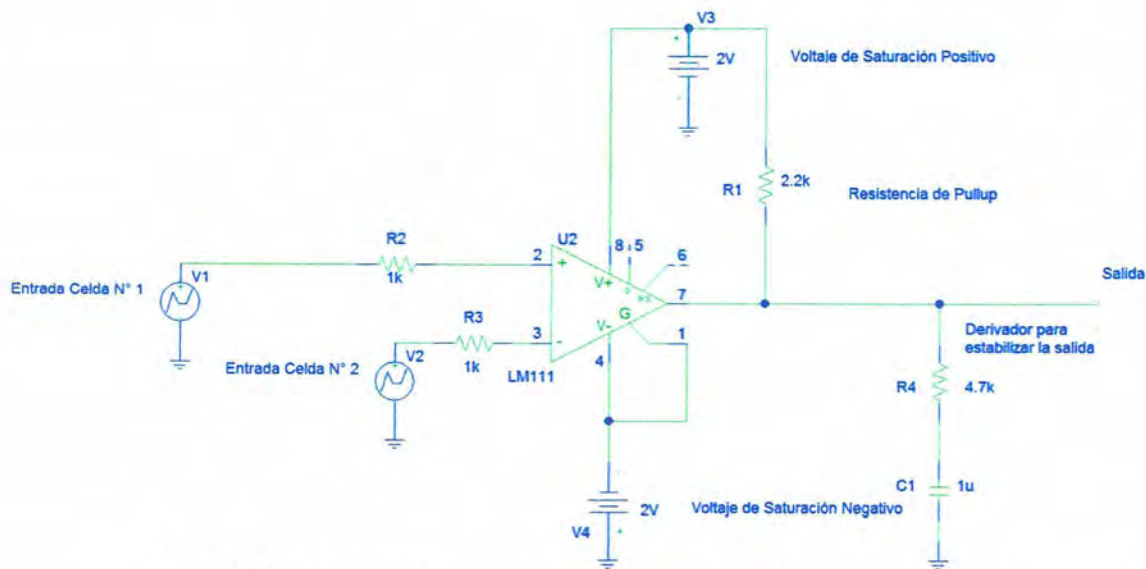


Fig. 43 → Circuito de control reajustado para evitar cambios abruptos en la conmutación

Una vez más, se realizó la simulación SPICE en el tiempo, con el objetivo de comprobar que el reajuste del circuito fuese el deseado.

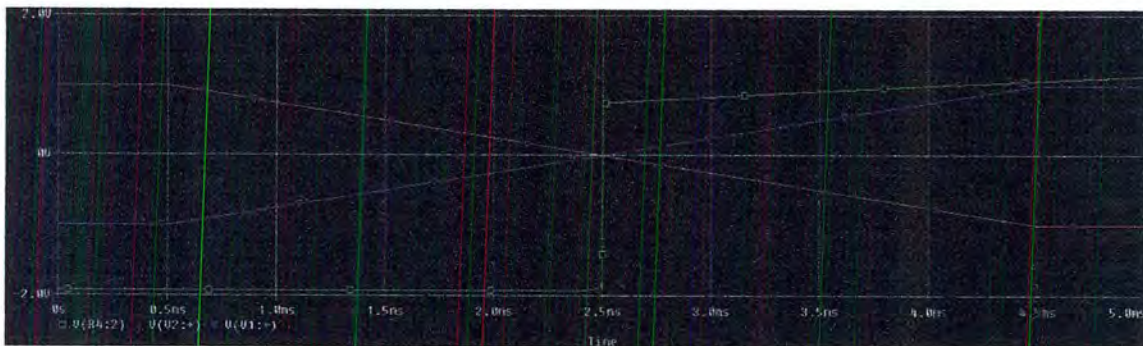


Fig. 44 → Simulación SPICE del circuito reajustado

Finalmente, cambiamos el voltaje de saturación del comparador por uno real, que en este caso será de ± 12 V, ya que éste es el valor con el que comúnmente se alimenta este dispositivo. Para corroborar que el funcionamiento siguiese siendo el mismo, volvimos a generar la simulación SPICE.



Asimismo, se aumentó el voltaje entregado a las entradas a 5 V, con el propósito de hacer más simétrica la gráfica resultante.

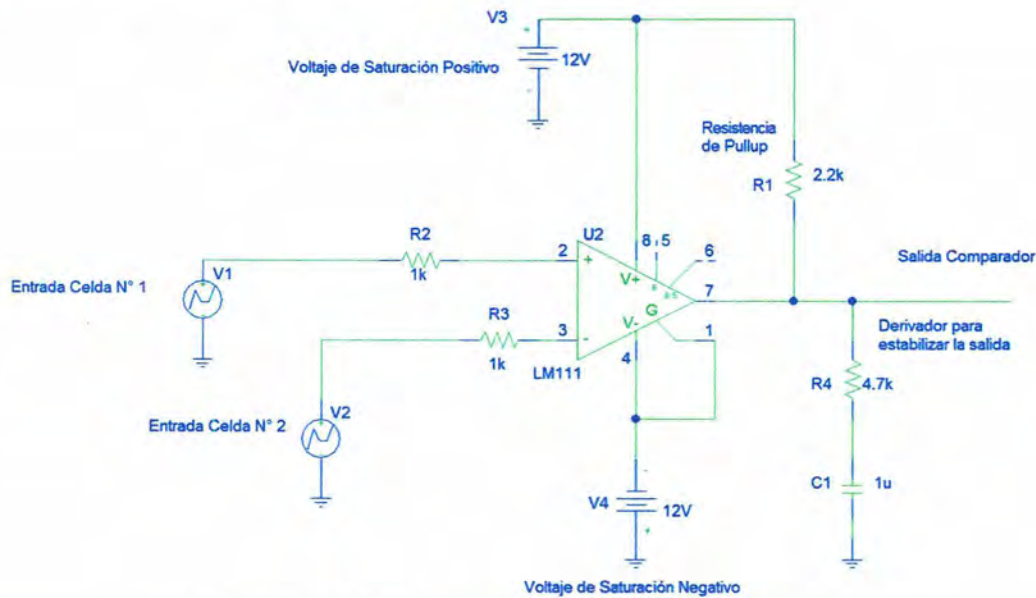


Fig. 45 → Circuito con los voltajes de entrada y saturación reajustados.

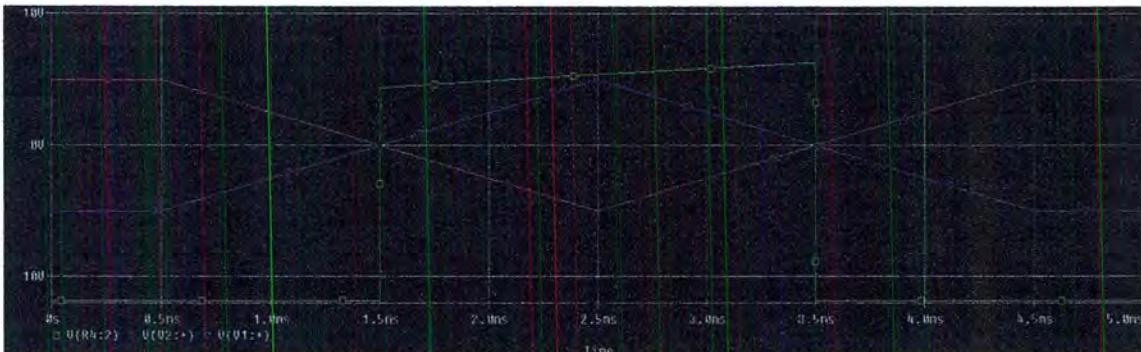


Fig. 46 → Simulación SPICE con los voltajes de entrada y saturación reajustados.

Cabe mencionar que por el efecto que tiene el arreglo derivador en la salida, la parte positiva de la misma (línea verde), no alcanza a llegar a +12 V debido a que el LM311 es un dispositivo muy rápido y conmuta de regreso a la parte negativa de la señal antes de que esto ocurra.

Una vez que se estableció la etapa de control, se agregó la etapa de potencia al circuito diseñado, con el fin de conocer y observar el comportamiento del sistema. En las figuras 47 y 48 se presentan el circuito completo y su respectiva simulación.

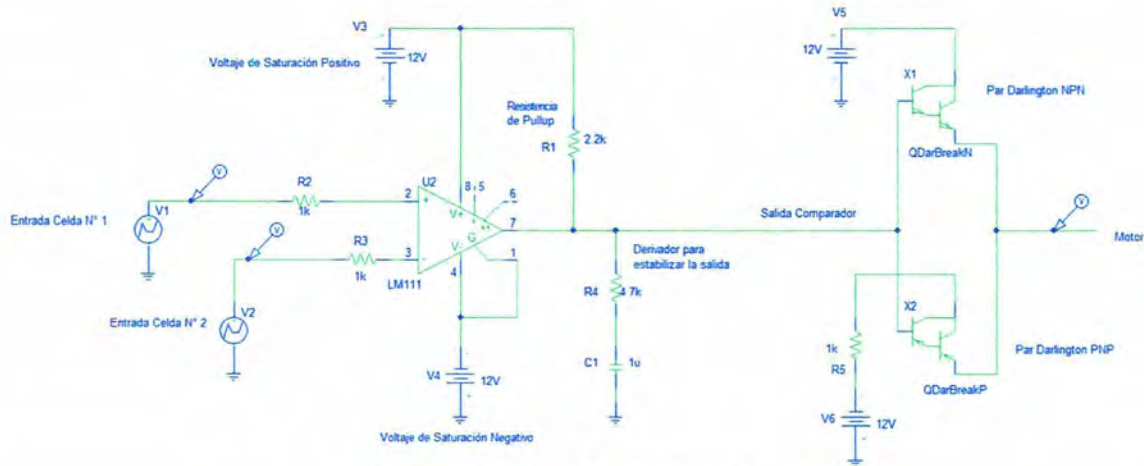


Fig. 47 → Circuito completo, con ambas etapas conectas.

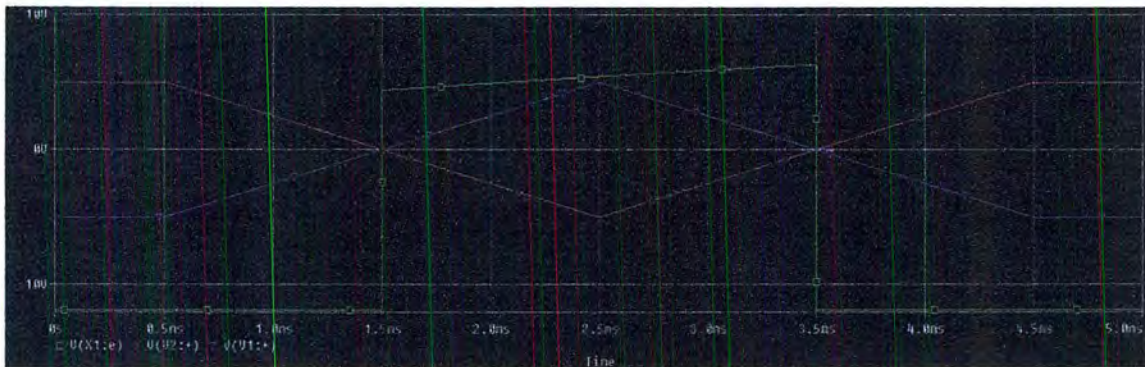


Fig. 48 → Simulación SPICE del circuito completo.

Microcontrolador

Control Clásico

Realizamos simulaciones sobre otros tipos de control propuestos para ejemplificar sus desventajas y generar un punto de comparación respecto a nuestra propuesta.

En el control por medio de ecuaciones o GPS, se requiere tener una referencia con muchos datos, estos son la declinación solar, la latitud, longitud, además del ángulo horario, estos valores cambian de acuerdo al lugar de instalación y época del año, para operar un sistema de este tipo se necesita introducir datos diariamente o tener una gran base de datos almacenada en el sistema. Estos sistemas se representan en la Fig. 49.

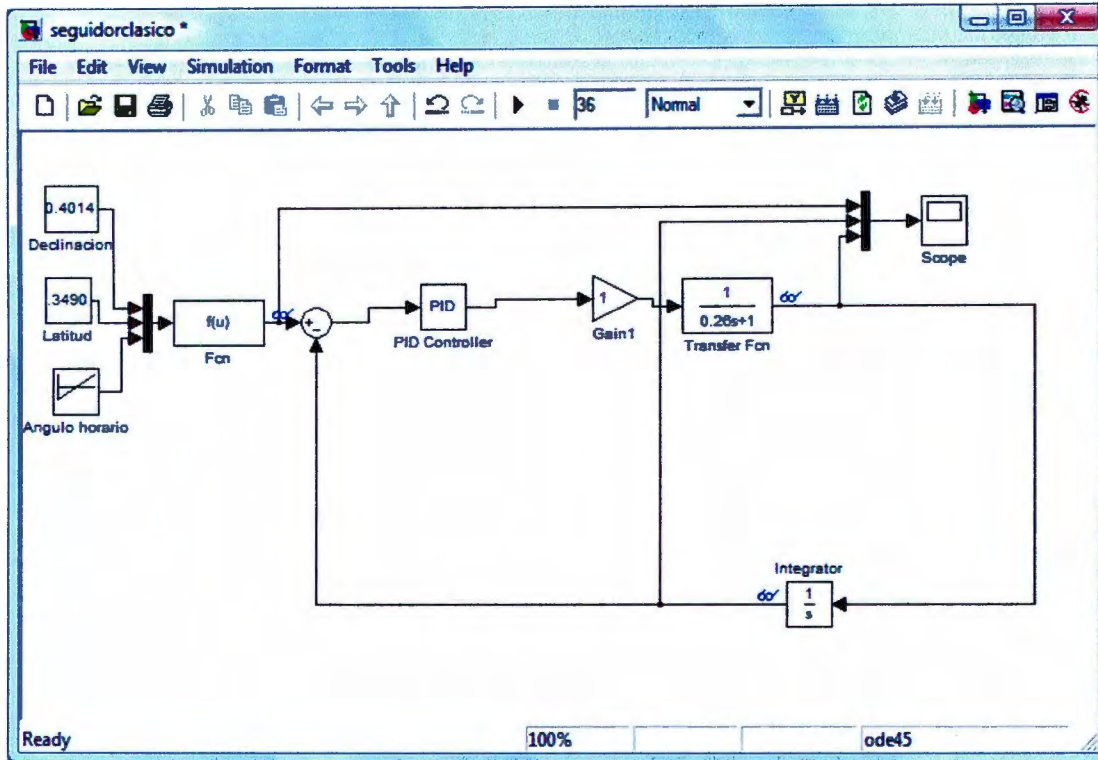


Fig. 49 → Lazo de control de un sistema seguidor con referencia solar.

Al simular el sistema anterior obtenemos la siguiente respuesta:

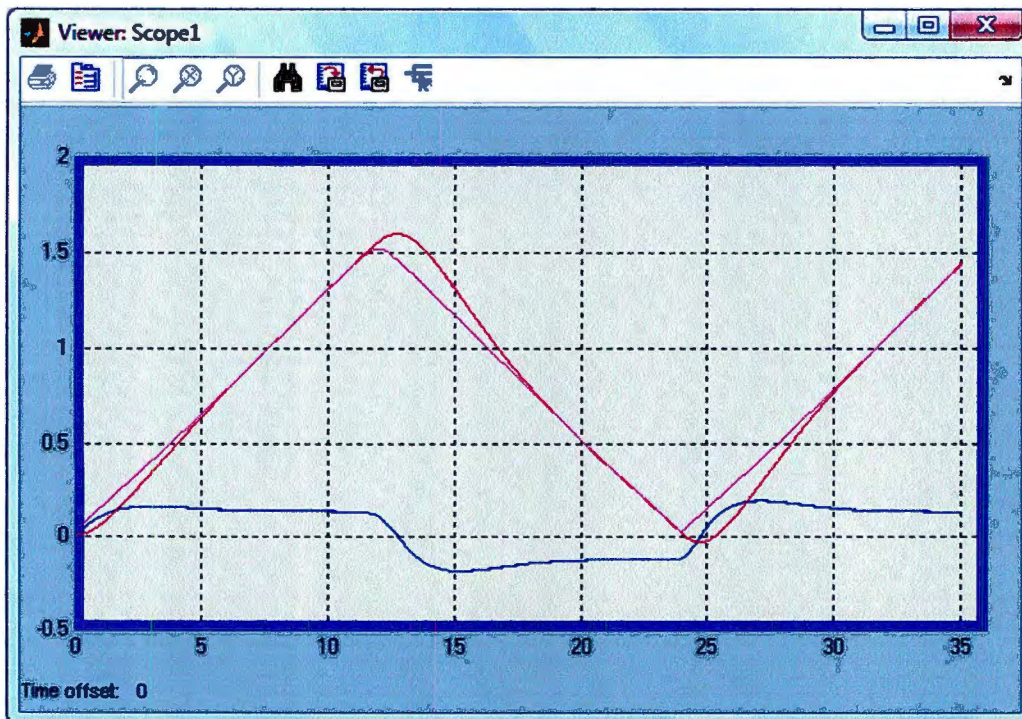


Fig. 50 → Simulación Sistema seguidor solar con referencia directa de la posición solar



En la simulación se observan tres líneas la amarilla representa la posición solar aproximada para la ciudad de México en el mes de Abril, la morada es la posición del seguidor solar controlado mediante un PID y la azul la velocidad angular del motor.

Controlador PID con nuestra propuesta de referencia cero

La primer pregunta que nos hicimos al ver nuestra propuesta es, ¿Porqué no utilizar un controlador PID, no se eligió este tipo de control porque presenta la desventaja de que para sintonizarlo se requiere conocer el modelo de la planta o tener una caracterización muy precisa, y si algún parámetro en la planta cambia afecta completamente el funcionamiento del controlador.

Para ejemplificar el proceso de sintonización de un controlador PID realizamos la siguiente simulación.

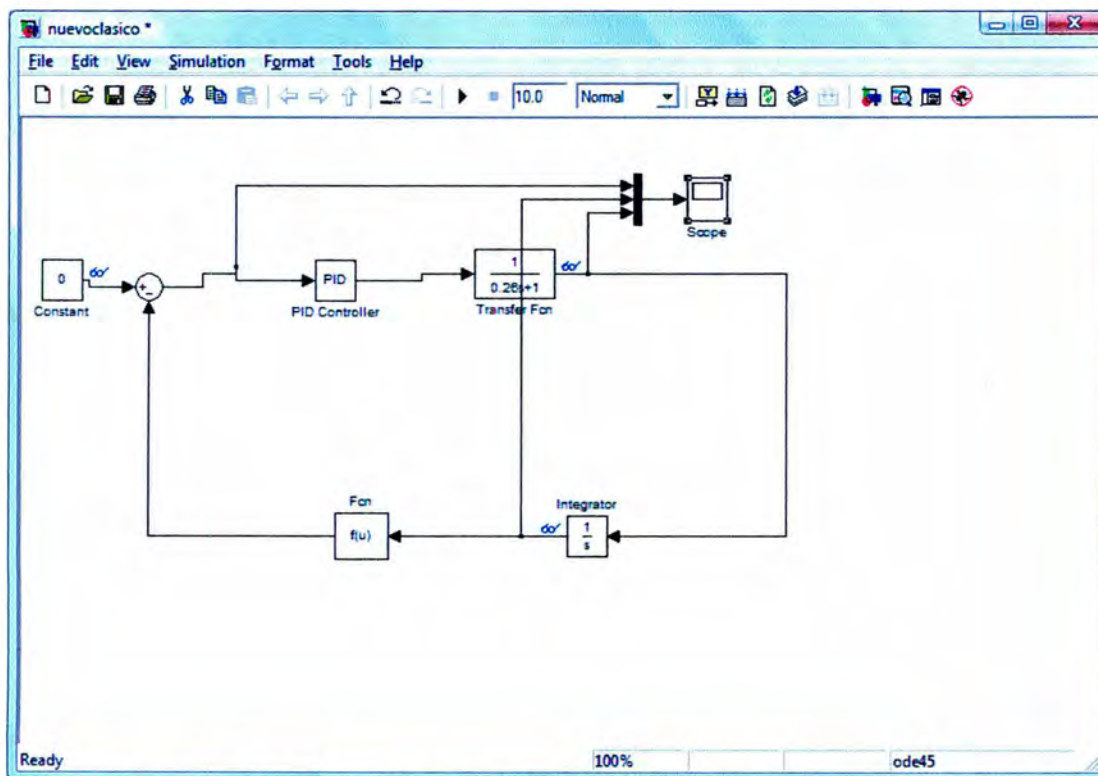


Fig. 51 → Simulación de nuestra propuesta con un controlador tipo PID



Al correr la simulación obtuvimos la siguiente grafica:

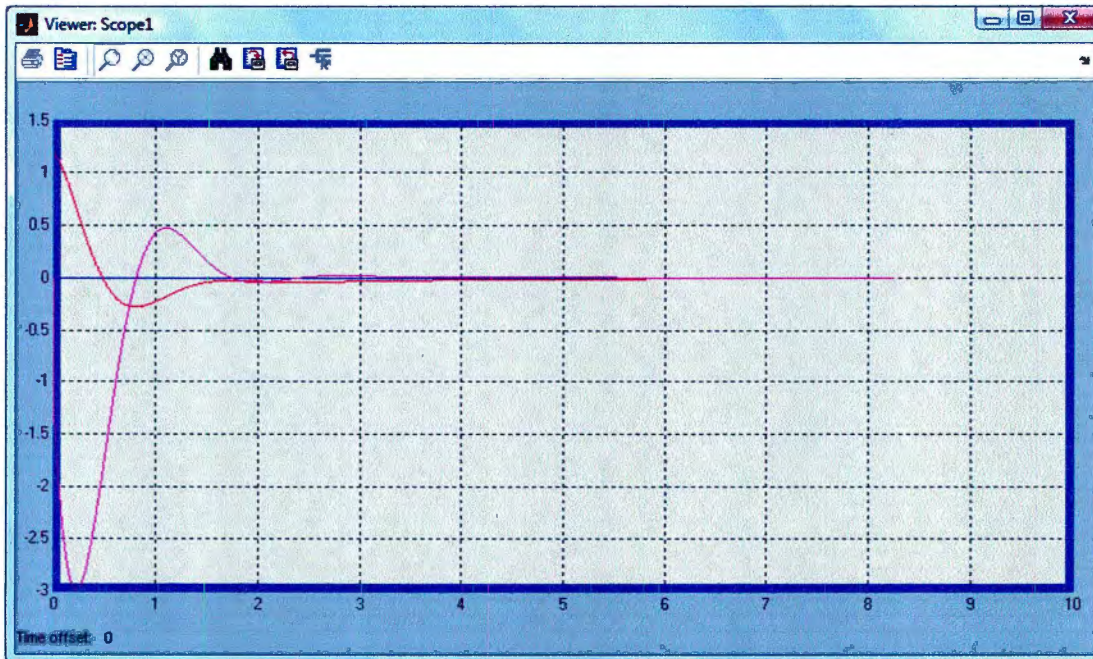


Fig. 52 → Simulación respuesta con un controlador PID

En la Fig. 52, la posición deseada es cero y la línea morada es la posición angular del motor que llega a la referencia en 2 segundos aproximadamente.

La sintonización se realizó de la siguiente manera. Primero se conectó en lazo abierto la función de transferencia de la planta, esto se muestra en la Fig. 53.

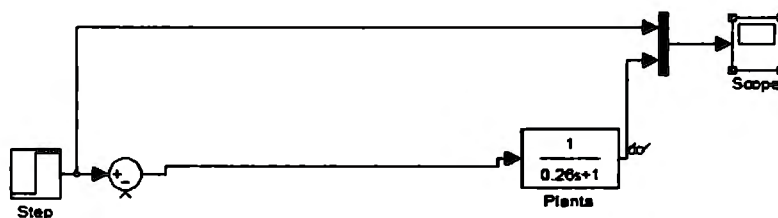


Fig. 53 → Simulación de la función de transferencia en lazo abierto.



La respuesta obtenida a un escalón unitario en la entrada fue:



Fig. 54 → Respuesta del sistema a un escalón unitario.

De la Fig. 54 se obtienen los siguientes datos: 1) L , que es el tiempo que tarda el sistema en reaccionar e iniciar la salida, que es $L=0.05s$ y 2) T , que es el tiempo que tarda el sistema en llegar al 63% de la respuesta total, que $T=0.35s$. Estos parámetros se usan en la siguiente tabla para calcular los valores de K_p , K_d y K_i que son utilizados en el bloque del controlador PID.

PID	Formula	Resultado
K_p	$1.2 T/L$	8.4
K_i	$2L$.1
K_d	$0.5 L$.025

Tabla 2 → Cálculo de los parámetros PID.

4.3.6 Diseño e Impresión de los Circuitos

Todos los circuitos diseñados fueron construidos en protoboard con el fin de realizar las pruebas de funcionamiento. Los circuitos en protoboard llegan a ser muy sensibles, propensos a errores o fallas en conexiones. Una vez hechas las pruebas, se procedió a realizar los diseños de las conexiones en pistas (Express PCB) y posteriormente la construcción de los circuitos en tablas fenólicas.



En las Fig. 55 y 56 se muestran los diseños de las pistas y la del circuito impreso en tabla.

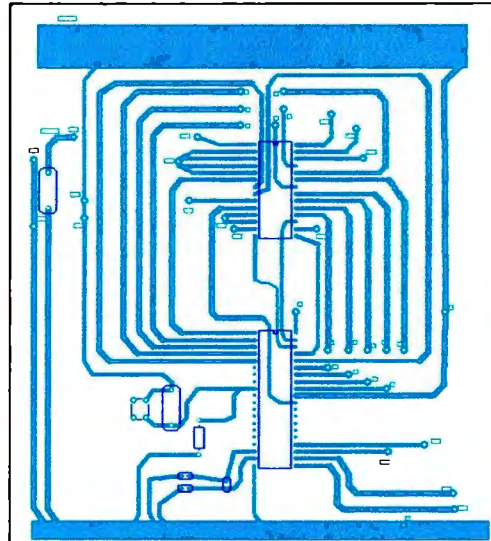


Fig. 55 → Pista de Microcontrolador y ADC 0808

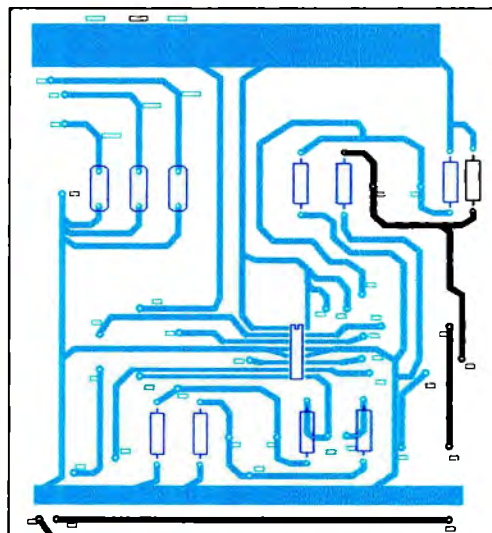


Fig. 56 → Pista Motores, sensores y puente H



4.4 Estructura Mecánica

4.4.1 Diseño

4.4.1.1 Concepto

Para realizar el mecanismo consideramos el movimiento del sol en 2 trayectorias independientes, la primera es la posición del sol dependiendo del día del año que sea, y la segunda dependiendo de la hora del día, en conjunto estas 2 trayectorias conforman el movimiento del sol todas las horas del año en las cuales el sol es visible.

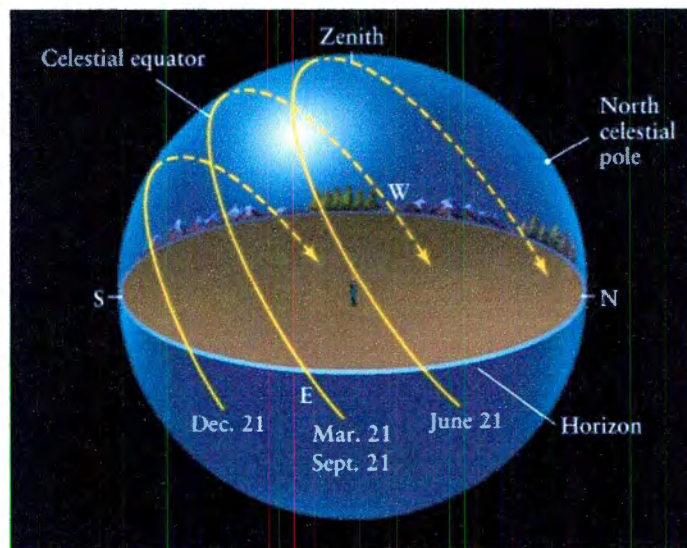


Fig. 57 → Trayectoria del sol a lo largo del año. [29]

4.4.1.2 Construcción a Escala

Debido a varios factores, como presupuesto, tiempo disponible y facilidad de manejo, decidimos construir nuestro sistema a escala. Esto significa que el dispositivo tendrá menores dimensiones en general que las que en realidad debería tener. Asimismo, se optó por utilizar materiales más económicos para este prototipo, que lo vuelven menos estético, pero la razón es que primero deseamos perfeccionar su funcionamiento y después enfocarnos en mejores materiales.

4.4.1.3 Observaciones

El tipo de montaje Azimut-Elevación es el más utilizado, tiene un eje vertical y otro horizontal perpendicular a él. Esta configuración fue elegida porque permite gran robustez mecánica sin grandes complicaciones de la estructura y de los mecanismos de giro.



4.4.2 Mecanismo

4.4.2.1 Funcionamiento

Un eje deberá controlar el ángulo solar de Azimut, mientras que el otro eje realizará el seguimiento del ángulo de elevación (altitud). El efecto continuo y combinado de ambos movimientos permitirá mantener la superficie del colector siempre apuntando hacia el sol.

4.4.2.2 Ventajas y desventajas

- **Ventajas**
 - Cobertura total del movimiento solar.
 - Económico.
 - Fácil de producir.
- **Desventajas**
 - Diseñado para celdas fotovoltaicas, por lo que no soporta colectores solares de mayor peso, como calentadores de agua.
 - Necesita motores con reducción para aumentar su torque.

4.4.3 Prototipo

4.4.3.1 Diseño

Como se ha mencionado previamente, se consideró el movimiento solar como 2 trayectorias independientes. De la misma forma se realizó el mecanismo. El primer eje, el que soporta mayor peso debido a que tiene que sostener la estructura del segundo eje, será el que menos se mueva siguiendo al sol a lo largo del año, sin importar la hora del día. El segundo eje será más liviano debido a que su movimiento seguirá al sol a lo largo del día.

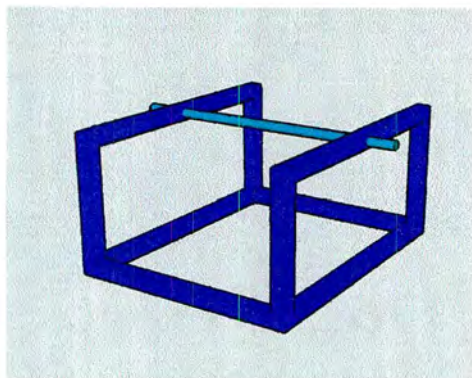


Fig. 58 → Diseño del primer eje y la base de todo el mecanismo.

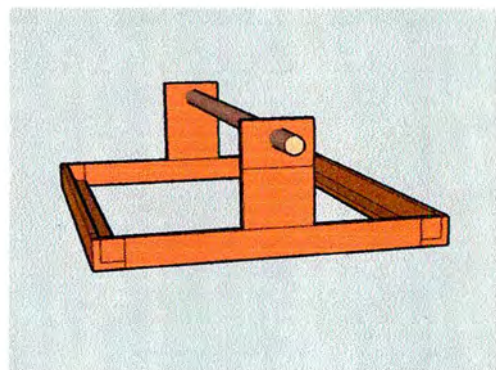


Fig. 59 → Diseño del segundo eje.



Al juntar los 2 ejes se obtiene un mecanismo capaz de seguir la trayectoria del sol.

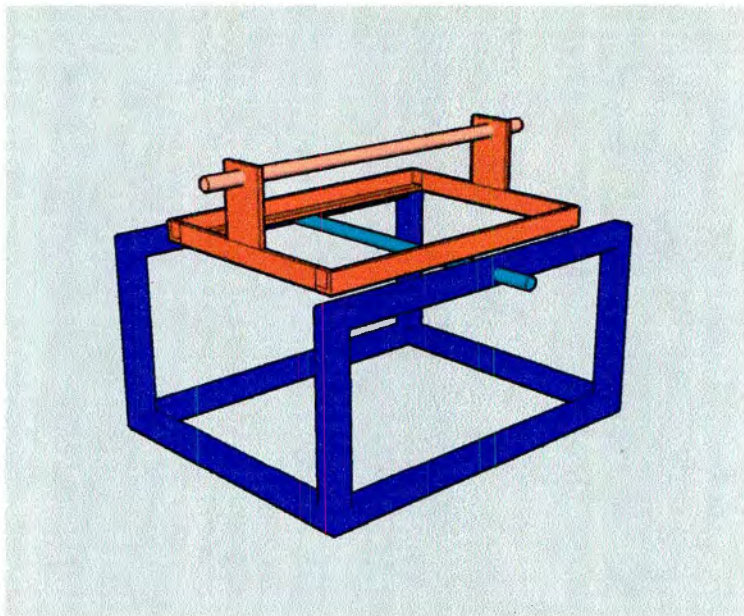


Fig. 60 → Sistema de dos ejes ya acoplados.

4.4.3.2 Elección de materiales

Después de analizar el diseño propuesto, se decidió hacer la elección de los materiales necesarios con base en la robustez que debía presentar el mecanismo. Por lo tanto, para la base del sistema se optó por utilizar PTR de una pulgada (parte azul en los diagramas anteriores). Ambos ejes son de tubo moflero de media pulgada de diámetro interior y $5/8$ de diámetro exterior. En el caso de la base del segundo eje (parte naranja en los diagramas anteriores) se usaron perfil y solera de una pulgada.

4.4.3.3 Construcción

Se dividió en dos etapas principales la construcción del prototipo, con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento de cada una. La primera etapa consistió en armar la base y montar el primer eje. En la segunda etapa se armó la base del segundo eje, se montó éste y se acopló al primer eje.

Para realizar la primera parte del mecanismo se hicieron 2 marcos de PTR uniendo las esquinas con soldadura por electrodo. Estos marcos se juntaron por medio de otros 2 tramos de PTR, para conseguir la forma de prisma rectangular, como se muestra en la Fig. 61.



Fig. 61 → Base del mecanismo.

En la parte superior de los marcos, se colocó un eje centrado para instalar la segunda parte del mecanismo. La segunda parte del mecanismo consiste en una base rectangular hecha con perfiles. En los lados más cortos se colocaron soleras para montar el segundo eje.

El motor trasmite la fuerza por medio de un arreglo de engranes y cadena, con el fin de que el peso del mecanismo no recaiga sobre el eje del motor. En la Fig. 62 se puede observar dicho arreglo.



Fig. 62 → Arreglo de engranes y cadena.

4.4.3.4 Pruebas Mecanismo

Con el fin de asegurar que el sistema funcionara correctamente, cada etapa de la construcción fue probada en dos ocasiones. En la primera, se conectó el motor directamente a una fuente de voltaje y se hizo girar al mecanismo en un



sentido. Posteriormente se invirtió el cableado para lograr el giro en el sentido contrario. Al hacer esta prueba se pudo comprobar el correcto giro del eje en ambos sentidos, sin que hubiera alteraciones en la velocidad y sin que se atorara el sistema.

Una vez comprobado el funcionamiento de esta manera, se procedió a conectar el sistema de control al motor, con el fin de observar que los desplazamientos radiales de cada eje fueran los requeridos por el programa grabado en el microcontrolador. Esta prueba fue repetida para cada eje de manera independiente.

Función de Transferencia

Para identificar la función de transferencia del motor utilizado, se acopló su eje a un segundo motor de CD de mucho menor tamaño, para que funcionara como generador. El modelo obtenido de esta forma es un aproximado porque incluye la dinámica interna del segundo motor, pero consideramos que como es menor a la dinámica del motor que buscamos analizar, puede despreciarse y considerar la respuesta obtenida como una buena aproximación a la función de transferencia real. Cabe destacar que el modelo obtenido se usa únicamente en simulaciones a manera de comparación y no afecta el desempeño de la solución implementada, por lo tanto la exigencia en la precisión del modelo no es crítica.

Se alimentó cada eje con una señal de escalón con amplitud de 5V. En la lectura del motor de CD se tomaron las figuras 63 y 64. La escala vertical en ambas figuras es de 2V por cuadro. Posteriormente se identificó la curva como una función de primer orden.

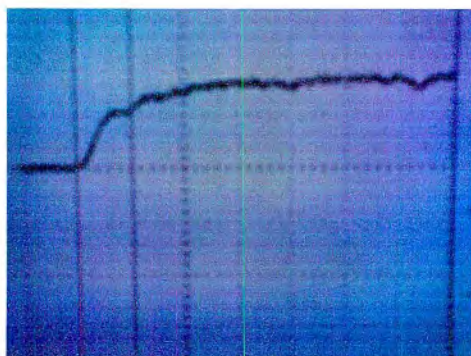


Fig. 63 → Eje 1

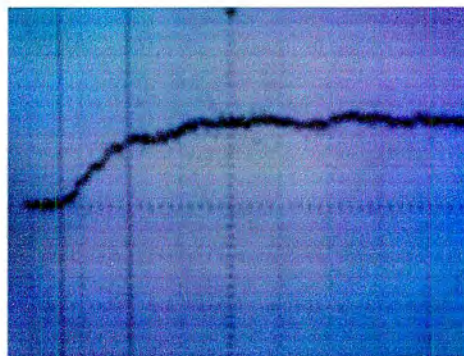


Fig. 64 → Eje 2

Para el Eje 1, como podemos observar de la Fig. 63, que es un sistema de primer orden sin retardo y se puede representar como:

$$G(s) = \frac{K}{\alpha s + 1} \dots\dots\dots(3)$$



Donde:

K es la ganancia.

α la constante de tiempo.

En el dominio del tiempo se representa de la siguiente forma:

$$y(t) = K(1 - e^{-t/\alpha}) \dots\dots\dots(4)$$

Para K tenemos que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = K = y(\infty) \dots\dots\dots(5)$$

Y para α tenemos:

$$y(\alpha) = 0.632y(\infty) = 0.632K \dots\dots\dots(6)$$

De la gráfica obtenida experimentalmente al ingresar un escalón de 5 V, encontramos:

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}} \approx \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{5}{5} = 1 \dots\dots\dots(7)$$

y para alpha:

$$y(\alpha) = 0.632y(\infty) \dots\dots\dots(8)$$

De la gráfica $\alpha = 0.26$ segundos

Por lo tanto:

$$G_1(s) = \frac{1}{0.26s + 1} \dots\dots\dots(9)$$

Del mismo modo podemos obtener la función de transferencia del segundo motor, partiendo de la Fig. 64, que resulta:

$$G_2(s) = \frac{1}{0.34s + 1} \dots\dots\dots(10)$$



4.5 Sistema de Almacenamiento

4.5.1 Objetivo

Entre el panel solar o celada fotovoltaica y la batería existe un elemento con una función muy importante, este es el controlador de carga. Una de sus tareas es (si es necesario), entregar la mayor cantidad de energía fotovoltaica posible a la carga o a la batería, además de hacerlo con la mayor eficiencia posible.

4.5.2 Modos de acoplamiento

Existen tres maneras de acoplar el módulo fotovoltaico con la batería. La primera, un circuito de carga directa, con un diodo auxiliar para evitar que la batería se descargue a través del panel solar. La segunda solución es implementar un inversor DC/DC, que funcionaría como un transformador convencional en un circuito AC. El voltaje del Panel se conecta a la entrada del inversor DC/DC que tiene cierta razón entre el embobinado primario y secundario que define el voltaje de salida, convirtiéndolo en adecuado para la batería especificada.

La tercera forma surge de la segunda, ahora usando un inversor con pulsos, este tipo de inversor se le llama "step-down", y su uso es transformar señales de entrada de alto voltaje en DC a señales de salida de bajo voltaje en DC con una eficiencia del 90%, la importancia de este método es que la razón de inversión que controla el voltaje de salida respecto a la entrada es variable, esto permite que en la salida siempre se ajuste el voltaje que requiere la batería para un máximo de carga [10].

Para el prototipo se elige la primera solución que tiene la ventaja de que es la más simple y mas barata, su uso se limita a sistemas en donde la diferencia entre el voltaje nominal del panel solar y el voltaje de la batería es mínima, en nuestro caso específico esta situación no se encuentra presente por lo que la solución es viable.

4.5.3 Diseño del circuito

Se propone el circuito mostrado en la Fig. 65 que, al cargar la batería de la manera antes mencionada, evita una sobrecarga de la misma.

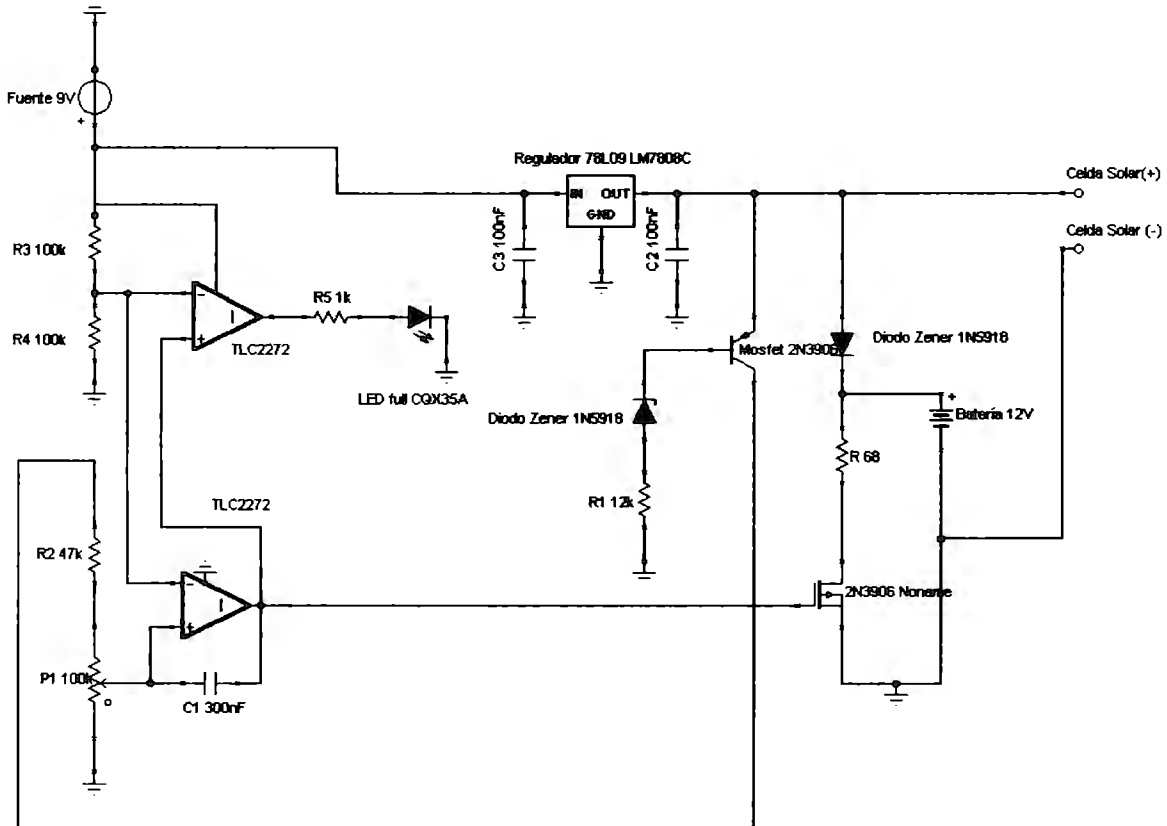


Fig. 65 → Circuito Almacenador de Energía

La potencia se transfiere a la batería a través del diodo Schottky que evita la descarga inversa. Cuando la batería se llena, la salida del amplificador inferior se activa, cerrando el MOSFET que conecta la carga en paralelo con la batería. La carga provoca que el voltaje caiga y el comparador se apague. Este proceso continúa mientras exista luz solar, el capacitor en retroalimentación positiva hace que las oscilaciones sean más lentas.

Cuando el Voltaje es mayor a 12 V en el Panel Solar, el transistor conectado con el diodo Zener en su base se enciende permitiendo que trabajen los comparadores. La parte alta de los comparadores simplemente invierte la señal de la carga de descarga para encender un LED, éste solo se enciende cuando la batería se encuentra llena.

El convertidor de voltaje provee al circuito de 9 V regulados, esta energía se toma totalmente del panel solar por lo que no se consume energía adicional.

4.5.4 Consumo de Energía

Para calcular el consumo de energía del sistema se separo en 2, la energía consumida por el microcontrolador y la energía consumida por el motor.



Ya que el microcontrolador permanece prendido todo el tiempo y siempre consume la misma cantidad de energía solo fue necesario obtener su potencia instantánea y después convertirla a Watt – hora. Para el motor fue necesario calcular el tiempo que esta prendido y la energía que consume por día, para después calcular cual es su consumo proporcional por hora.

Motor	
Tiempo que se prende por día en horas	0.004144
Corriente (A)	0.3
Voltaje (V)	1.5
Energía consumida (Wh)	0.000259

Microcontrolador	
Corriente (A)	0.05
Voltaje (V)	5
Energía consumida (Wh)	0.25

Total (Wh)	0.250259
------------	----------

Tabla 3 → Tabla de Energía Consumida

El consumo total del sistema es de tan solo 0.25 W-h el cual resulta casi despreciable al considerar que la potencia de las celdas solares promedio es de 100 a 200 W.

4.6 Resumen de capítulo

Dentro de la propuesta de solución presentada se tienen distintos módulos independientes que permiten un diseño más simple y con mayor flexibilidad. Los módulos diseñados son los siguientes:

- Sensado.
- Sistema de Control y potencia.
- Sistema de Mecánico.
- Sistema de almacenamiento.

En cada módulo se buscó hacer una propuesta funcional, viable y económica.

En el módulo de sensado se toman elementos electrónicos comunes como los LDR y se adaptan a las necesidades del sistema generando la respuesta deseada de forma sencilla y funcional.



En el módulo de Control y potencia se propone la mayor innovación, en la que se cambia la referencia para simplificar la operación de seguidor solar automático. El sistema de lazo cerrado se retroalimenta mediante la diferencia de *Voltaje* detectada en los sensores y no mediante la posición angular del motor. Además la referencia a seguir es cero y no la posición del sol medida mediante ecuaciones o sistemas de posicionamiento global.

El sistema mecánico tiene dos grados de libertad que permiten seguir los dos movimientos solares en cualquier parte del mundo sin ninguna alineación previa o ajuste inicial.

El sistema de almacenamiento se basa en la opción más sencilla del mercado, únicamente se conecta la celda a la batería mediante un diodo para evitar la descarga, y además se implementó un circuito que anula la sobrecarga de la batería para no dañarla.



CAPITULO 5 PRUEBAS Y CÁLCULOS

5.1 Eficiencia

Se realizaron 2 tipos de pruebas de eficiencia con el fin de determinar que la solución propuesta en este trabajo es tan funcional y mejor como los seguidores solares existentes y las celdas fijas respectivamente. La primer prueba se basó en determinar cuanta generación de energía es capaz de incrementar un panel solar empotrado en el seguidor solar automático propuesto, con respecto a un panel solar fijo.

La prueba consistió en que durante 3 días se colocó una celda fotovoltaica sobre el seguidor automático (Panel Móvil); y otra celda con las mismas características, se posicionó con una orientación fija de 30° con el suelo (Panel Estático). El tiempo de duración de la prueba varió cada día, sin embargo, se buscó que fueran en la mañana ya que es cuando el sol se presenta con mayor fuerza. Se muestreó cada 5 minutos el voltaje generado por cada uno de los paneles, tanto fijo como móvil, mediante una aplicación desarrollada en LabView. Dicha aplicación adquirió la muestra de cada celda y la guardó en un documento de NOTEPAD, para posteriormente utilizar los datos para graficar en EXCEL.

Por medio de esta prueba fue posible determinar si mantener un panel solar con una posición óptima al sol aumenta la eficiencia de energía, o en este caso, voltaje generado por las celdas. Los resultados se presentan a continuación.

En la Fig. 66 y Fig. 67, se observa la aplicación diseñada en LabView para la adquisición periódica de muestras.



Fig. 66 → Interfaz de Adquisición de Datos

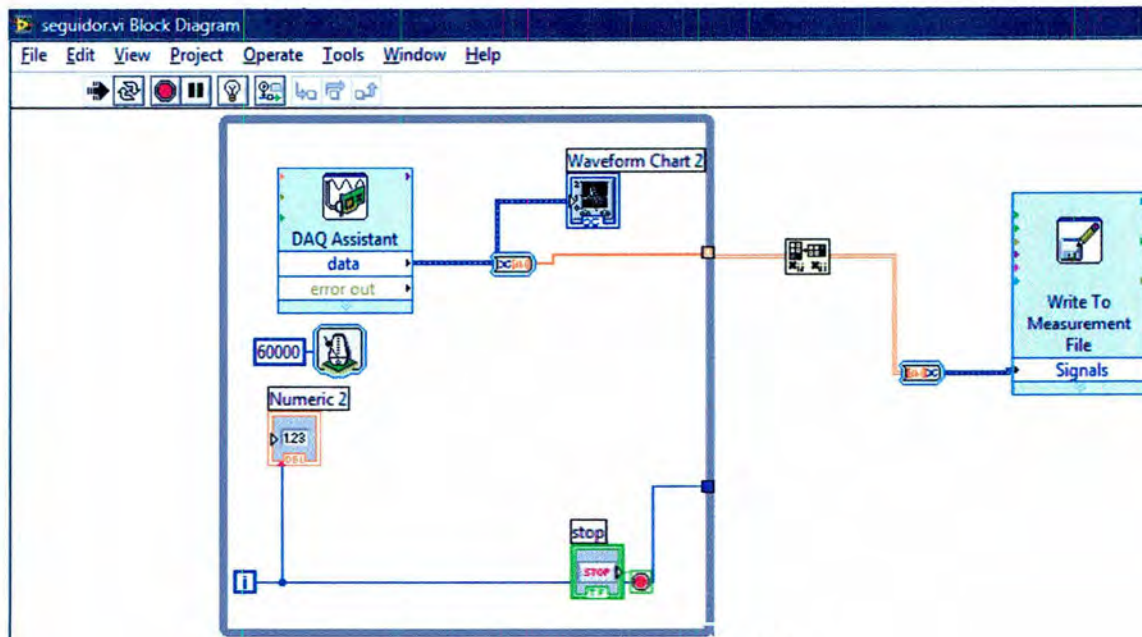


Fig. 67 → Programación en LabView (bloques)

Las gráficas resultantes de voltaje contra tiempo, obtenidas de una celda móvil con respecto a una celda estática se presentan a continuación.

El primer día de prueba fue el 19 de abril de Abril de 2008.

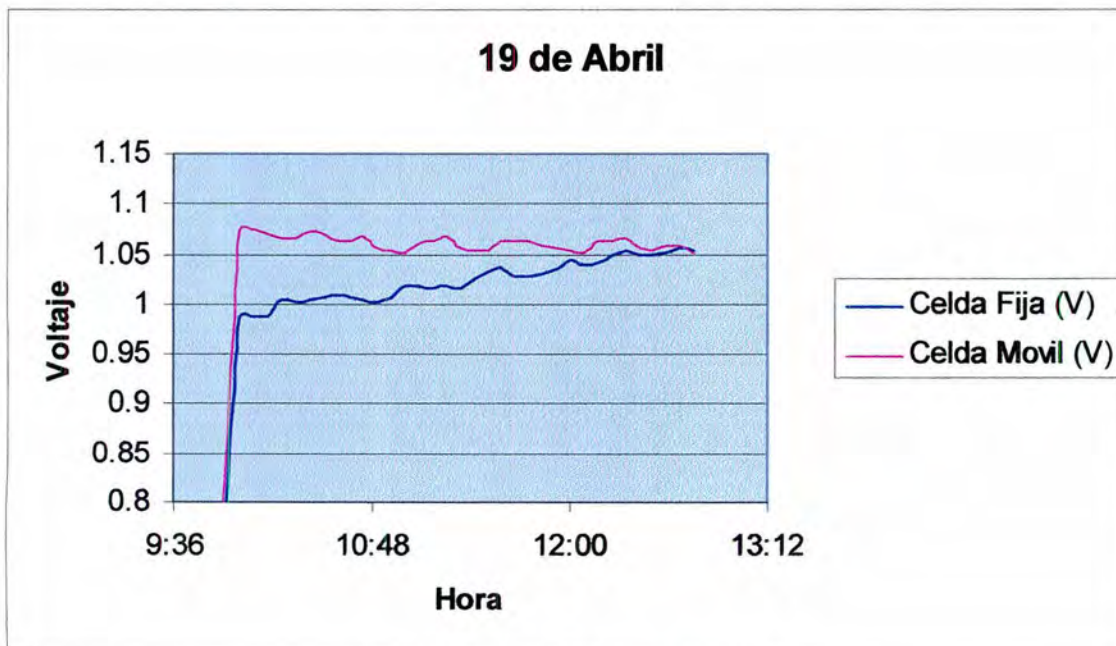


Fig. 68 → Prueba de Eficiencia 19 Abril 2008



El segundo día de prueba fue el 21 de Abril de 2008.

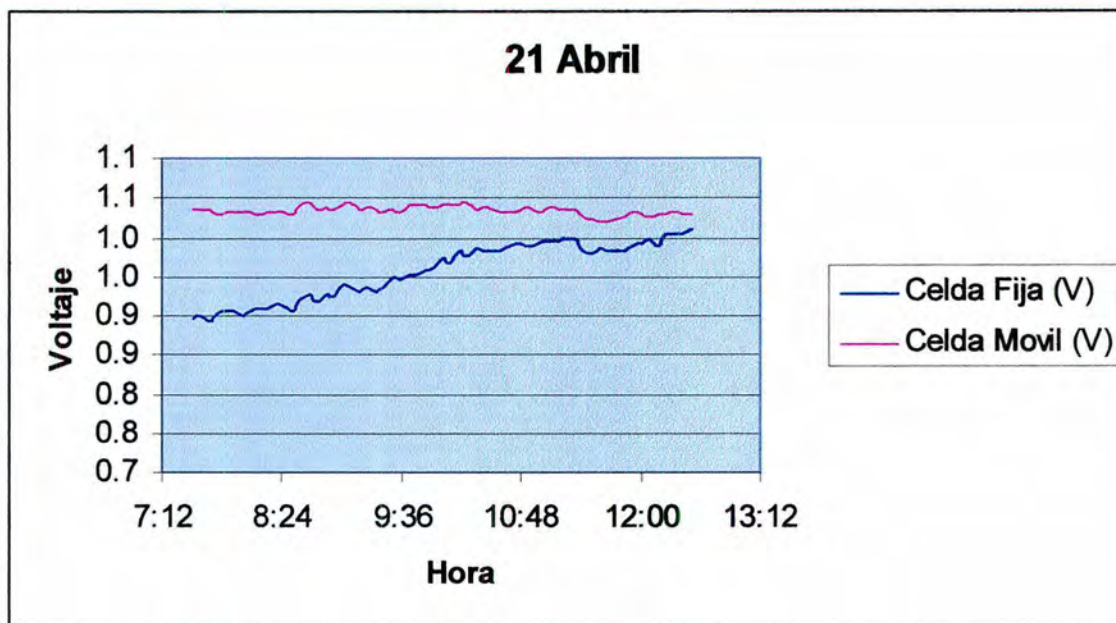


Fig. 69 → Prueba de Eficiencia 21 Abril 2008

El tercer día de prueba fue el 22 de Abril de 2008.

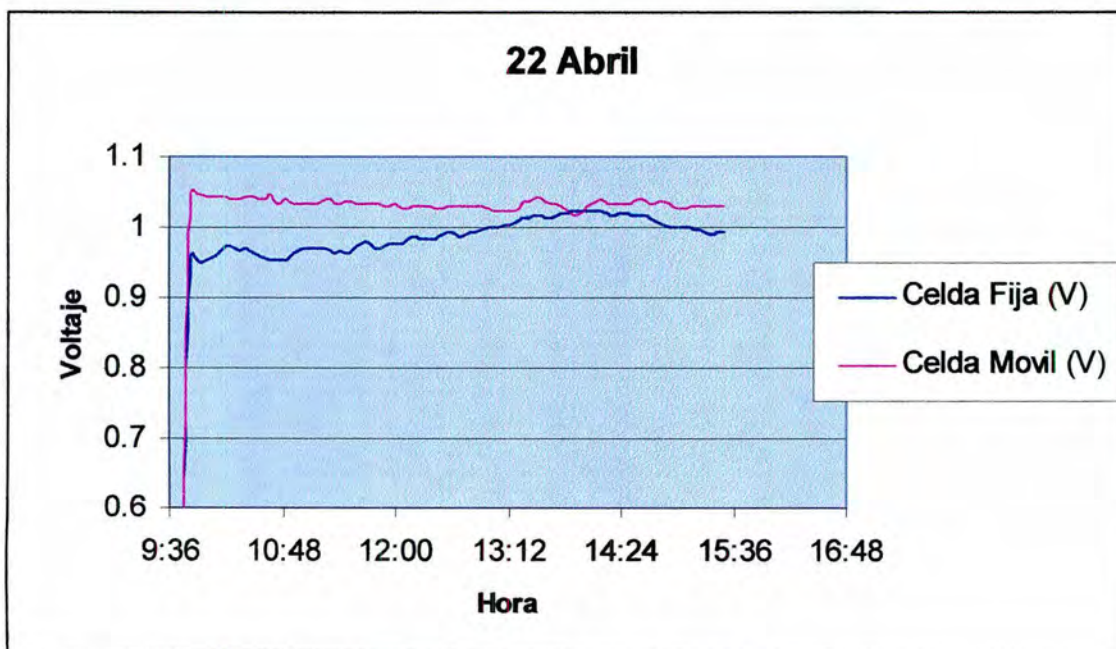


Fig. 70 → Prueba de Eficiencia 22 Abril 2008

Las gráficas muestran que existe una diferencia notable entre el voltaje generado por la celda móvil y la celda fija. Es claro que en los 3 casos, la señal



generada por la celda móvil se mantiene constante durante el tiempo de la prueba. Se atribuye este incremento considerable a que la celda móvil mantiene una orientación óptima a la incidencia de los rayos solares, mientras que la incidencia de los mismos es variable durante el tiempo de la prueba.

Un factor a considerar son las horas a las que se iniciaron las pruebas los 3 días, existe una mayor diferencia de voltajes mientras más temprano se realizó la prueba. Las Fig. 71, 72 y 73 muestran el porcentaje de eficiencia incrementado por la celda móvil con respecto a la celda fija. Este porcentaje se calculó tomando como 100% de eficiencia el voltaje generado por la celda fija, y la diferencia entre celdas muestra el porcentaje incrementado.

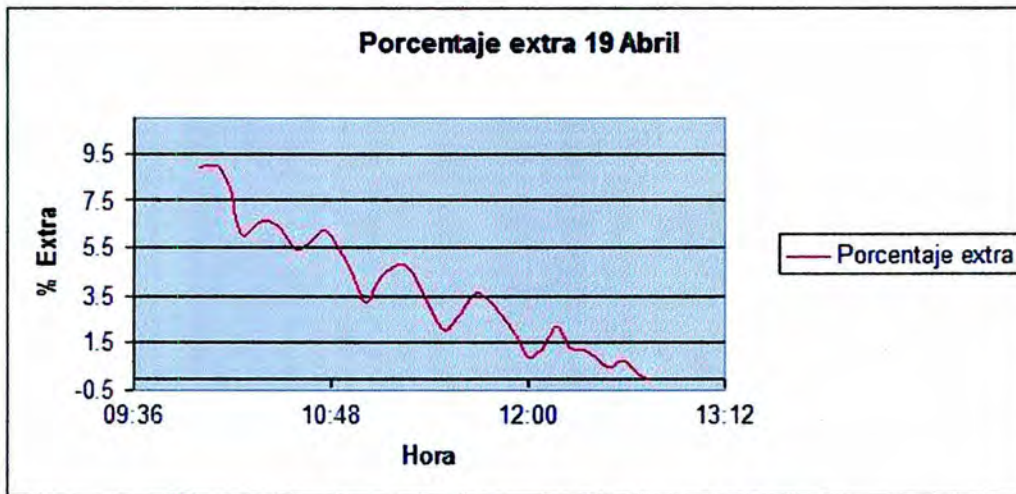


Fig. 71 → Porcentaje incrementado 19 Abril 2008

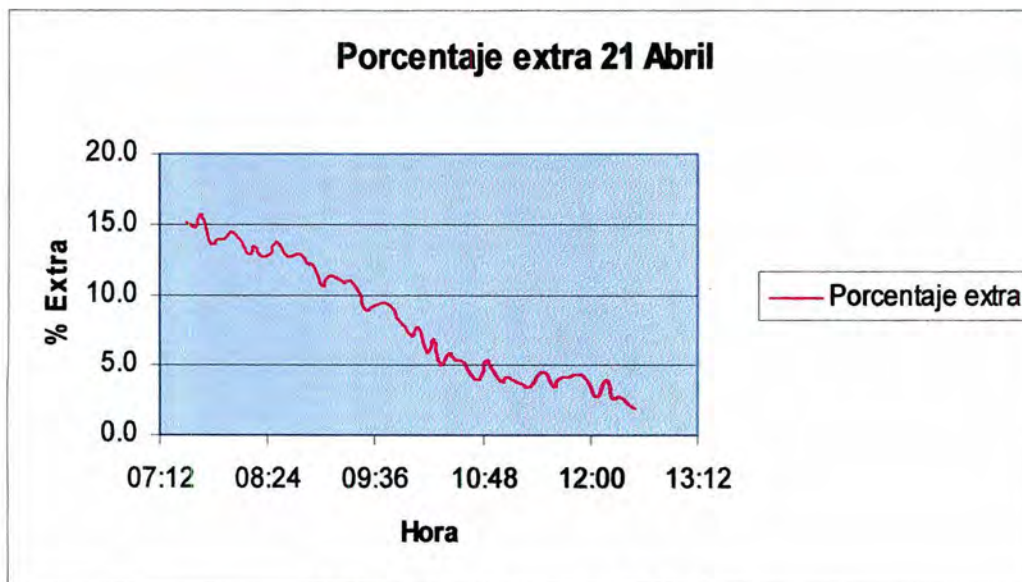


Fig. 72 → Porcentaje incrementado 21 Abril 2008



Fig. 73 → Porcentaje incrementado 22 Abril 2008

La máxima diferencia de voltaje obtenida para el día 19 de Abril fue de 8.91%, siendo el promedio de todo el día de 3.65%. Para el día 21 de Abril, la máxima diferencia de voltaje obtenido fue de 15.13%, con un promedio del día de 8%. Finalmente, para el tercer día de prueba, 22 de Abril, se reportó una máxima diferencia de voltaje de 10.43% y un promedio de 4.47%. Dichas diferencias radican en las diferentes horas a las que se iniciaron las pruebas.

Fue el día 22 de Abril cuando se presentó la mayor eficiencia de la celda móvil, eso se debe a que la prueba inició a las 7:30 de la mañana, en donde se presenta la mayor diferencia entre las muestras.

Posteriormente a los 3 días de prueba mencionados, se realizó una prueba más referente a la eficiencia que incrementa el sistema seguidor. Para esta prueba fue necesario utilizar un solarímetro. Este dispositivo sirve para medir la radiación que recibe una superficie, las unidades que maneja son Watts / m², en otras palabras potencia por área.



Fig. 74 → Solarímetro utilizado para las pruebas.

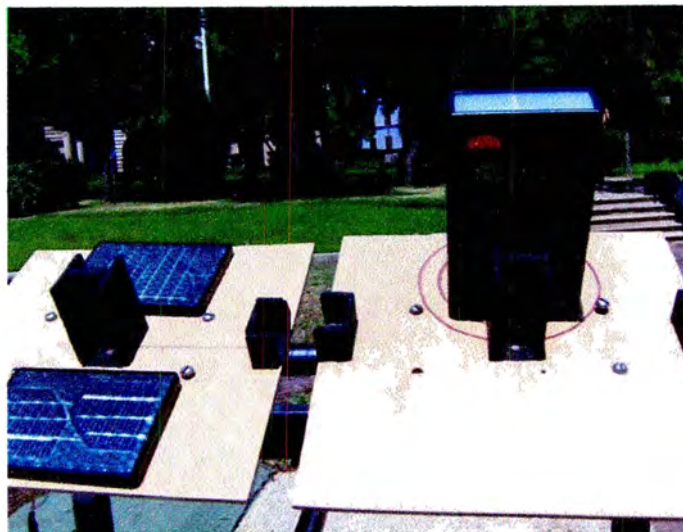


Fig. 75 → Posicionamiento del Solarímetro sobre el Seguidor Solar Automático.

La metodología de esta prueba consistió en muestrear la potencia marcada por el solarímetro cada determinado tiempo, tanto acoplado al seguidor como simulando una celda fija. La ventaja de utilizar este instrumento es que se elimina la problemática hablar únicamente de voltaje, sino que se habla de la eficiencia en términos de energía; por otro lado, es posible adaptar esta energía obtenida del solarímetro para calcular la energía producida por un panel de cualquier tamaño.

Los resultados de la prueba se presentan a continuación.

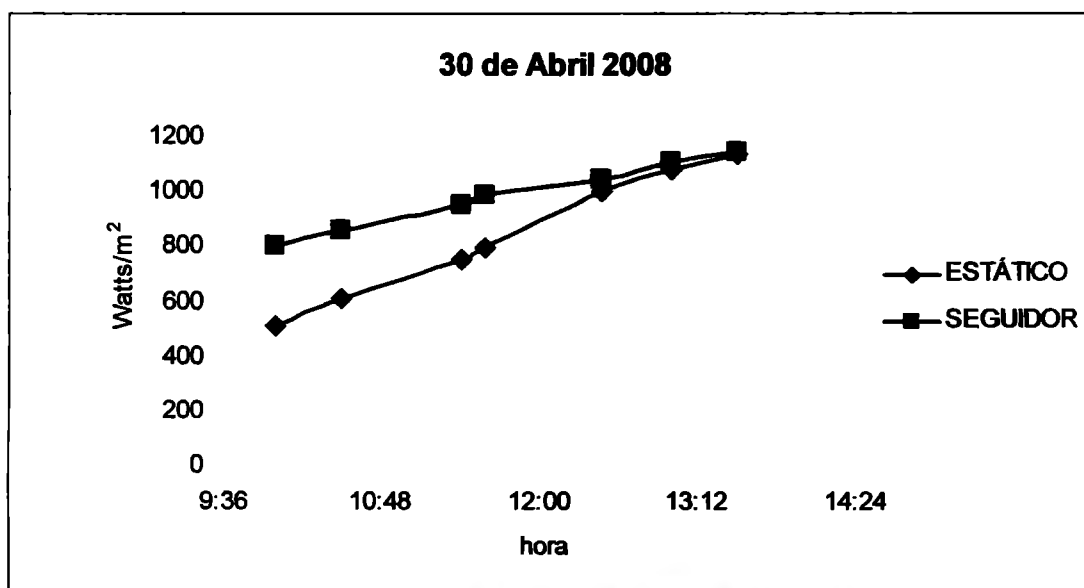


Fig. 76 → Prueba de Eficiencia con Solarímetro 30 de Abril 2008



La Fig. 76 muestra como el seguidor solar automático genera una mayor cantidad de energía a horas más tempranas; y como conforme se acerca el medio día, las potencias se comienzan a igualar. Es un comportamiento similar al que se vio con la prueba de los voltajes.

En la Fig. 77 se observa como varía la diferencia de energía entre las dos modalidades del solarímetro, fijo y móvil:

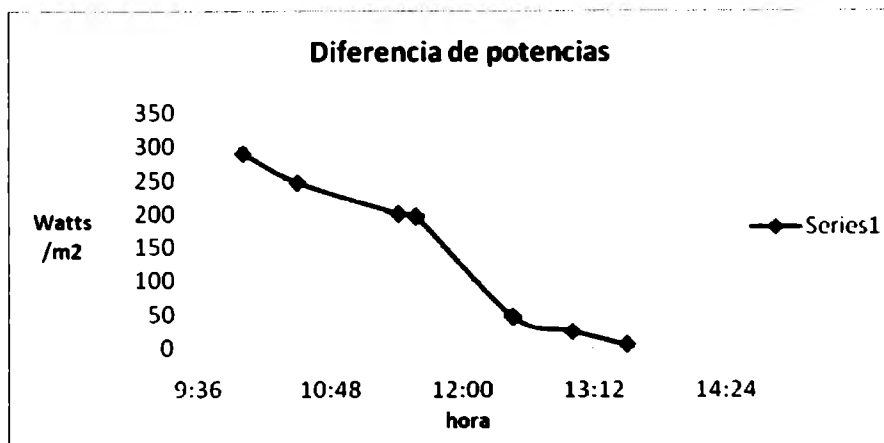


Fig. 78 → Variación de la energía captada en ambas modalidades.

En la gráfica se observa que aproximadamente a las 10:00 a.m., se muestra la mayor diferencia de energías, lo que nos lleva a determinar que el máximo nivel de eficiencia generado en esta prueba, fue de 56.86 %, con un promedio de 2.46 %.

Se considera que las mediciones con el solarímetro son más precisas que las hechas con las celdas fotovoltaicas, por lo que la eficiencia máxima es mayor en este caso; lo anterior gracias a que el solarímetro es una herramienta exclusivamente para medir la radiación del sol sobre una superficie.

5.2 Precisión

Un factor de importancia en los seguidores solares es la precisión con la que pueden localizar la posición del sol en el cielo; este parámetro depende en gran medida del sistema del control que se use para dicha tarea. Debido a que la solución propuesta no tiene una referencia fija, sino que toma una referencia de cero, se esperaba de las pruebas una gran precisión.

La prueba consistió en colocar una barrera perpendicular a la posición del panel, a partir de ésta se calculó el ángulo de error con base en la sombra proyectada (Fig. 78). El Sistema alcanzaría la máxima precisión si dicha barrera no generara sombra alguna, lo que significa que el mecanismo se posiciona exactamente con dirección al sol.

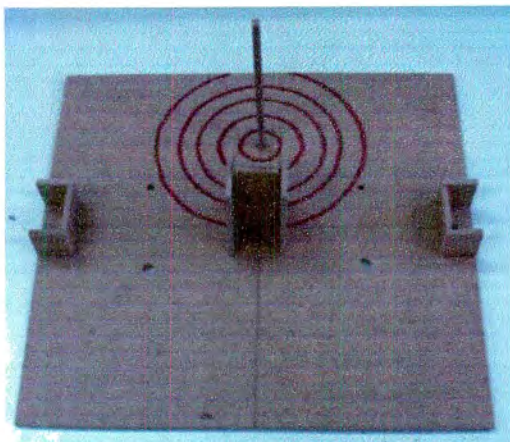


Fig. 78 → Herramienta para medir precisión.

En la Fig. 78 se observa la herramienta utilizada para la medición de precisión. El palo vertical en el centro de los círculos genera la sombra que nos indica cual es el error existente; la distancia entre cada círculo es de 1 cm., simplemente para tener una aproximación del error a primera vista.



Fig. 79 → Prueba de precisión

En la Fig. 79 se observa como se ha generado una sombra sobre la placa, lo que nos da la pauta para determinar el ángulo de error.

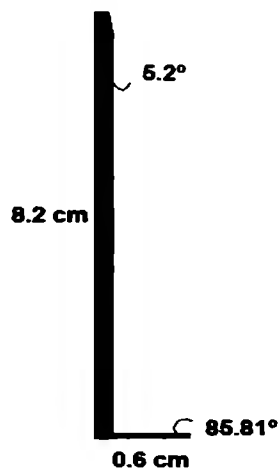


Fig. 80 → Trigonometría para determinar el error

Conociendo la distancia de la barrera (8.2 cm.) y la longitud de la sombra generada se puede determinar el ángulo de error, que en este caso fue de 5.2 grados. En bibliografía utilizada, se reportaron errores mínimos de 5 grados [5], por lo que decidimos mejorar el error. Dicha mejora se logró pegando los sensores a la barra divisoria.

Se repitió esta prueba dos veces, con el fin de adquirir resultados certeros.

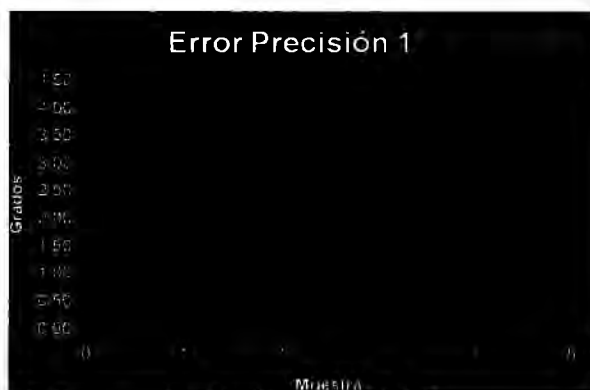


Fig. 81 -> Error de Precisión 1

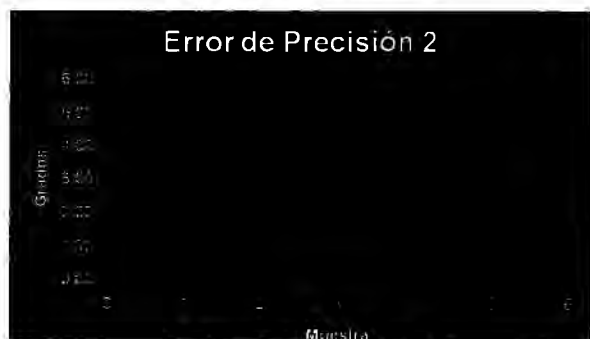


Fig. 82 -> Error de Precisión 2



Los resultados muestran que el seguidor presenta diferentes ángulos de error entre los periodos de movimiento del mecanismo. Se alcanzó un error máximo de 4.8 grados, el cual se midió un instante antes de que el sistema seguidor ajustara su eje. El error mínimo que se obtuvo fue de 0.5 grados, y se presentó justo después de haberse ajustado el eje.

5.3 Factibilidad

Un punto muy importante para este proyecto es conocer su factibilidad. En otras palabras, que tan viable sería construir este sistema con fines de venta. Como pudimos aprender a lo largo de este proyecto, los paneles solares pueden alcanzar precios elevados. Por consiguiente al implementar el Seguidor Solar Automático, a un costo menor y con mayor eficiencia que una segunda celda, este proyecto resulta una opción atractiva.

5.3.1 Análisis Económico

Se realizó un estudio económico para comprobar que el seguidor solar es un sistema que nos dará más energía por menos dinero. Para realizar este estudio se creó una base de datos de celdas solares existentes en el mercado mexicano, mostrada en la Tabla 4.

Wattaje	Precio(MXN)
10	\$799.00
40	\$2,375.00
50	\$3,093.00
55	\$3,266.00
60	\$3,256.50
65	\$4,168.00
70	\$4,156.25
75	\$4,875.00
80	\$4,748.00
90	\$5,344.00
100	\$6,278.00
110	\$6,391.00
120	\$6,975.00
125	\$7,265.00
130	\$7,557.00
140	\$8,138.00
150	\$8,719.00
160	\$9,300.00
170	\$10,169.00
180	\$10,463.00
190	\$11,044.00
200	\$11,625.00
210	\$12,207.00

Tabla 4 → Base de datos de precios de celdas en México.



Se comparó tanto en precio como en potencia obtenida con estas mismas celdas montadas sobre el seguidor de sol. Para obtener el precio del sistema con seguidor solar se le agregó el precio de la celda (varía de \$1,000 a \$1,400 dependiendo del tamaño de la celda), y para obtener la potencia se multiplicó la del panel solar por el porcentaje de eficiencia obtenido. Como resultado se obtuvo la Fig. 83.

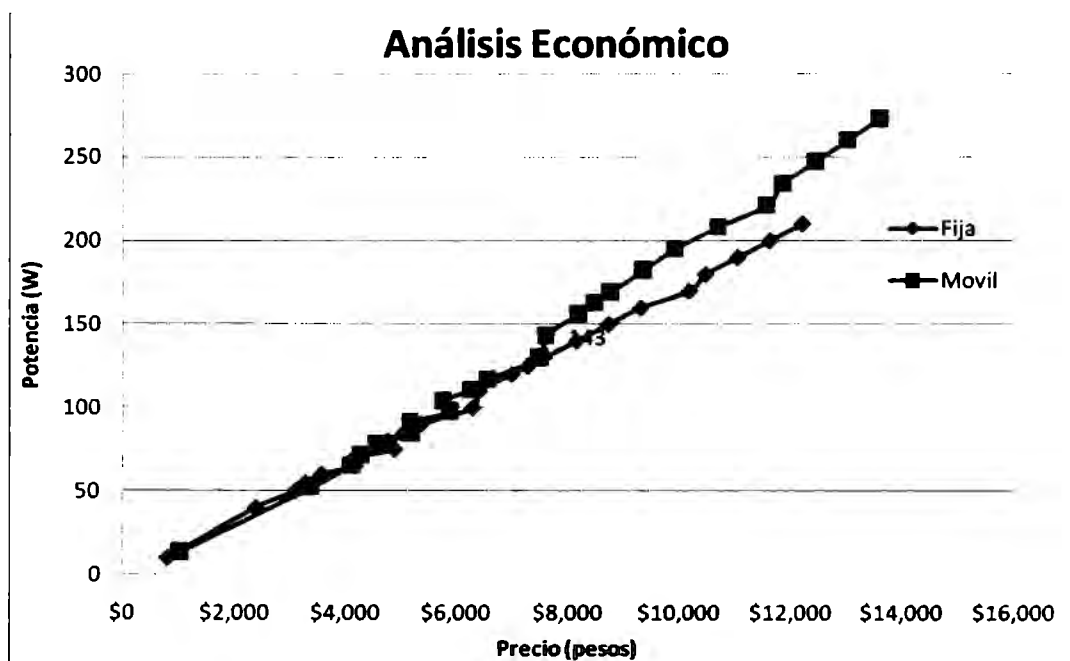


Fig. 83 → Análisis Económico entre una celda fija y una móvil.

Con los resultados obtenidos se puede deducir que es conveniente instalar el seguidor de sol cuando sea los requerimientos de energía sean mayores a **140W**.

CONCLUSIONES

Basándonos en las pruebas realizadas tanto con celdas solares como con el solarímetro se puede concluir que el seguidor de sol aumenta la eficiencia de un panel solar de manera considerable.

El diseño del sistema es modular por lo que se puede modificar uno de los módulos y seguir siendo compatible con el resto del sistema. Esto es muy importante para este proyecto ya que facilita el trabajo al momento de realizar otros sistemas de mayor escala.

Este sistema fue diseñado para utilizar componentes sencillos y económicos para garantizar un precio bajo con un funcionamiento óptimo.



La forma en la que opera este Seguidor Solar Automático no fue encontrada en Bibliografías ni en artículos en publicaciones de ingeniería por lo cual es una forma nueva para seguir al sol.

Debido a su lógica de funcionamiento este sistema puede operar en cualquier parte del mundo sin la necesidad de ingresar fecha o coordenadas lo cual lo convierte en un producto versátil y de fácil uso.

El error obtenido en las pruebas de precisión es menor a 6 grados el cual es aceptable de acuerdo a la bibliografía encontrada al respecto.

Trabajo Futuro

Existe interés por parte de empresas y particulares por el Seguidor Solar Automático. En general las propuestas han sido para la implementación a gran escala en parques ecológicos y en desarrollos de interés social. Con el adecuado financiamiento, sería posible llevar a cabo estos proyectos.



REFERENCIAS

- [1] "Artículo de periódico JORNADA: El petróleo se agotará antes de lo previsto", página Web, consultada el día 28 de agosto 2007:
<http://www.jornada.unam.mx/2007/06/14/index.php?section=economia&article=026n1eco>
- [2] Fan Jiang; Wong, A. "Study on the performance of different types of PV modules in Singapore", The 7th International Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005, Nov. 29 2005-Dec. 2 2005 Page(s):1 – 109.
- [3] Yazidi, A.; Betin, F.; Notton, G.; Capolino, G.A. "Low cost two-axis solar tracker with high precision positioning", Environment Identities and Mediterranean Area, 2006, ISEIMA '06. First international Symposium on July 2006, Page(s):211 – 216.
- [4] Poulek, V. "Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors". Photovoltaic Energy Conversion, 1994, Conference Record of the Twenty Fourth; IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1994, 1994 IEEE First World Conference on Volume 1, 5-9 Dec. 1994 Page(s):1131 - 1133 Vol.1.
- [5] Ahmad Maliki Omar, Sulaiman Shaari, Abdul Rahman Omar, Muhamad Rizuwan Yahir. "An Automated Solar Photovoltaic Biaxial Tracking System: SoIT2A", First International Power and Energy Conference PECon 2006, November 28-29, 2006, Putrajaya, Malaysia.
- [6] Ralph, E.L.; Linder, E.B., "Advanced solar panel designs", Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE. 13-17 May 1996 Page(s):297 – 300.
- [7] Sharp, J.K. "Consumer incentives for solar energy", Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1981 20th IEEE Conference on Volume 20, Part 1, Dec. 1981, Page(s):849 – 851.
- [8] Beltran A., J.; Gonzalez Rubio S., J.L.; Garcia-Beltran, C.D. "Design, Manufacturing and Performance Test of a Solar Tracker Made by a Embedded Control", Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2007, CERMA 2007. 25-28 Sept. 2007, Page(s):129 – 134.
- [9] Alexander B. Maish, "Performance of a self-aligning solar array tracking controller", A.B.; Photovoltaic Specialists Conference, 1990, Conference Record of the Twenty First IEEE, 21-25 May 1990, Page(s):864 - 869 vol.2
- [10] Grzesiak, W., "MPPT Solar Charge Controller for High Voltage Thin Film PV Modules", Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 2, May 2006, Page(s):2264 – 2267.



-
- [11] "Different Type of Photovoltaic Systems: Describing Photovoltaic Module Performance". POLAR POWER INC. Página Web, consulta 05 Mayo 2008.
<http://www.polarpowerinc.com/info/operation20/operation23.htm#2.3.3>
- [12] J.W. Twidell, A.D. Weir, "Renewable Energy Resources", E & F.N. Spon, London, 1986.
- [13] G. Boyle (Ed.), "Renewable Energy: Power for Sustainable Future", Oxford University Press in association with the Open University, New York, UK, 1996.
- [14] T. Markvart, "Solar Electricity", Wiley, New York, 2000.
- [15] Vilela OC, Fraidenraich N, Tiba C. "Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors: experiments and simulation", Solar Energy 2003. 74:45-52.
- [16] Kh.S. Karimov, J.A. Chattha, M.M. Ahmed, et al., J. Acad.Sci. Tajikistan XLV (9) (2002) 75-83.
- [17] M.J. Clifford, D. Eastwood, "Design of a novel passive solar tracker", Solar Energy 77 (2004) 269-280
- [18] Lorenzo, E., Pérez, M., Ezpeleta, A., Acedo, J., 2002. "Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis". Progress in Photovoltaics 10, 533-543.
- [19] Patil, J.V., Nayak, J.K., Sundersingh, V.P., 1997. "Design, fabrication and preliminary testing of a two-axes solar tracking system", Reric International Energy Journal 19, 15-23.
- [20] Gay CF, Yerkes JW, Wilson JH. "Performance advantages of two-axis tracking for large flat-plate photovoltaic energy system", en: Proceedings of 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1982. p. 1368-71.
- [21] "Panel fotovoltaico", página Web de la Universidad de Burgos, España, consultada el día 4 de septiembre de 2007:
http://www.ubu.es/investig/aulavirtual/trabajos_07/Las_energias_en_nuestra_coma_rca/solar/panel_fotovoltaico.htm
- [22] T. Markvart, "Solar Electricity", Wiley, New York, 2007
- [23] "Empresa Argentina dedicada a sistemas de energía renovable", página Web, consulta el día 20 Septiembre 2007. <http://www.leiger.com/>



[24] "Sunflower", página Web de Wikipedia, consultada el día 1° de octubre de 2007:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Sunflower>

[25] "Maps of the World", página Web de la Universidad de Alabama, consultada el día 5 de octubre de 2007:

<http://alabamamaps.ua.edu/contemporarymaps/world/world/index.html>

[26] "MERCATOR PROJECTION", página Web de Integrated Publishing, consultada el día 5 de octubre de 2007:

http://www.tpub.com/content/engineering/14070/css/14070_185.htm

[27] "How the Sun Works", página Web de How Stuff Works, consultada el día 1° de septiembre de 2007: <http://science.howstuffworks.com/sun.htm>

[28] "Voltage Comparators: Comparator Equivalent", página Web, consultada el día 18 de septiembre de 2007: <http://home.cogeco.ca/~rpaisley4/Comparators.html>

[29] http://www.courses.psu.edu/astro/astro010_pjm25/F02_14.jpg

[30] Floriani, J.C.A., "Generalized analysis of current ripple in a pulsewidth modulation H-bridge converter with unipolar-bipolar switching", Power Electronics Letters, IEEE Volume 2, Issue 3, Sept. 2004 Page(s):83 – 86.