

657

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO
SOLAR PARA PANELES FOTOVOLTAICOS**

**ANTHONY DAVID ATENCIO MOSCOTE
U00053316**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
INGENIERÍA MECÁTRONICA
SANTANDER-BUCARAMANGA
2015**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO
SOLAR PARA PANELES FOTOVOLTAICOS**

**ANTHONY DAVID ATENCIO MOSCOTE
U00053316**

LINEA DE INVESTIGACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

**Director
Hernando Gonzalez Acevedo**

**Asesor
Yecid Muñoz Maldonado**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÓNICAS
INGENIERÍA MECÁTRONICA
SANTANDER-BUCARAMANGA
2015**

CONTENIDO

	pág.
1. Objetivos	1
2. Introducción	2
3. Energía solar	3
3.1. Tiempo Solar	4
3.2. Posición relativa del Sol con un punto en la Tierra	6
3.3. Cálculo del ángulo de control	8
3.3.1. Ejemplo numérico del cálculo del ángulo de control	10
3.3.2. Programa para calcular el ángulo de control	12
3.3.3. Validación del algoritmo de cálculo de posición del Sol	13
4. Diseño mecánico	17
4.1. Mecanismo de giro	17
4.2. Diseño de la estructura mecánica	19
4.3. Estudio estático de la base de la estructura teniendo en cuenta la fuerza del viento	22
5. Diseño eléctrico y electrónico	27
6. Componentes electrónicos	29
6.1. Motor driver Pololu dual VNH5019	29
6.2. Sensores	30
6.3. Datalogger Shield Arduino Xd05	32
6.4. Conexiones del sistema	32
6.5. Filtrado del ruido en señal de retroalimentación	34
7. Sistema de control	35
7.1. Controlador	35
7.2. Pruebas del controlador sin RTC	36
8. Pruebas del controlador con seguidor montado	40
9. Conclusiones	43
Presupuesto	44
Anexos	45

1. Objetivos

Objetivo General

- Diseñar de un sistema de seguimiento solar automático de un eje, para los paneles fotovoltaicos ubicados en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB).

Objetivos Específicos

- Diseñar una estructura física con un grado de libertad que soporte los paneles fotovoltaicos ubicados en el LER de la UNAB.
- Establecer apropiadamente los materiales de construcción y los elementos de máquinas a usar en la estructura física para soportar los paneles solares.
- Seleccionar la instrumentación y actuadores necesarios para la automatización del sistema.
- Programar un algoritmo para el seguimiento relativo del Sol y monitoreo de las variables tensión y corriente en la salida del panel para calcular la potencia y la energía diaria generada, en función del ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos.

2. Introducción

El Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Autónoma de Bucaramanga cuentan con paneles solares fijos de referencia YL250P-29b para convertir radiación solar en energía eléctrica, pero debido a su posición y ángulo de elevación fijos, no se puede aprovechar toda la radiación solar en el transcurso del día y por eso se requiere de un sistema que permita a los paneles cambiar su inclinación en relación con el Sol durante el día. Normalmente para realizar un seguimiento completo del Sol se requiere dos grados de libertad en dos ejes de rotación pero dada la ubicación geográfica de Colombia, esta se encuentra cerca de la línea ecuatorial donde es posible realizar un seguimiento del Sol usando un solo ángulo de rotación en la inclinación de los paneles con una ganancia de energía aceptable y por este motivo la estructura del sistema de seguimiento se diseñara con un solo eje. Comúnmente se utilizan fotoceldas para alinear el panel con el Sol pero en este caso se utilizaran ecuaciones que permiten ubicar el Sol en el cielo a partir de la hora y la fecha, estos datos se obtendrán de un reloj en tiempo real(RTC). A partir de las ecuaciones se obtiene el ángulo de inclinación del panel fotovoltaico sobre su eje, este ángulo es enviado a un controlador proporcional derivativo(PD) el cual controla un actuador lineal conectado por un mecanismo de manivela al eje del seguidor solar para convertir su movimiento lineal en rotatorio y alinear el panel solar al Sol.

3. Energía solar

El Sol es una estrella, formada casi toda Hidrógeno y Helio, en la que se genera una gran cantidad de energía, debido al proceso de fusión nuclear que se crea en su interior, reacción que tiene lugar gracias a las altas temperaturas y presiones que en ella se alcanzan. El Sol emite una cantidad tremenda de energía en forma de luz y otros tipos de radiación, incluyendo los rayos-X. Esta energía llega al planeta en forma difusa o reflejada por las partículas como las nubes y gases presentes en la atmósfera terrestre. Esta energía no está disponible en iguales cantidades alrededor del globo, las partes del planeta que mayor disponibilidad tienen de esta energía son aquellas cercanas a la línea del ecuador como se puede apreciar en la Figura 1 la cual representa el potencial de energía solar en el mundo. Colombia, al estar cerca a la línea del ecuador se favorece al tener una disponible una gran cantidad de radiación solar con pocas variaciones en el año a diferencia de los países en latitudes medias.[1]

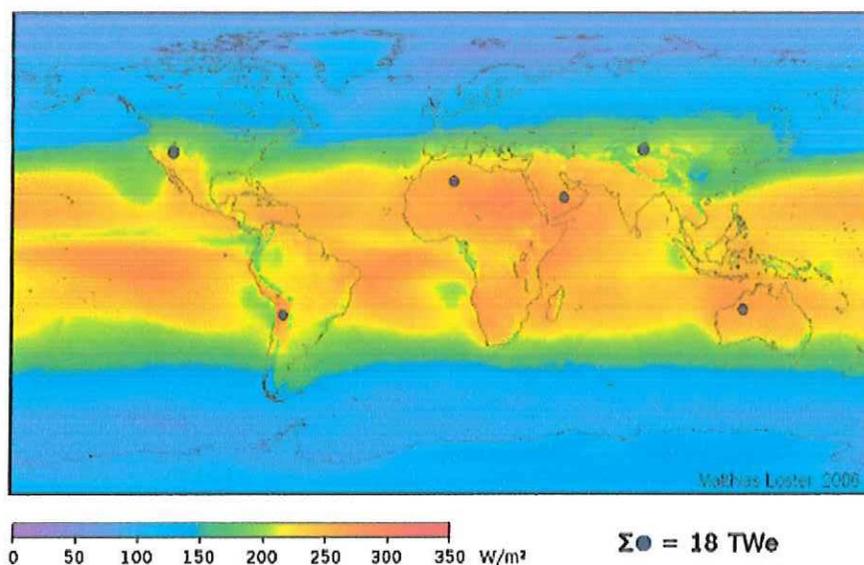


Figura 1: Mapa de radiación solar en la Tierra ¹

¹http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/index.html

3.1. Tiempo Solar

El movimiento aparente solar no es uniforme y la duración de un día solar no es constante a lo largo del año. La diferencia entre el tiempo solar aparente y el tiempo solar promedio se llama la ecuación del tiempo. Dos características bien conocidas de nuestro sistema solar se encuentran en las irregularidades periódicas en el movimiento solar. La velocidad angular de la tierra en relación con el sol varía periódicamente en el curso de un año. El plano de la órbita de la Tierra está inclinado con respecto al plano ecuatorial. Por lo tanto, la velocidad angular del movimiento relativo tiene que ser proyectada desde la eclíptica sobre el plano ecuatorial antes de ser incorporado en la medición del tiempo. La expresión matemática del factor de proyección para velocidades angulares de la eclíptica produce una función oscilante con dos períodos por año. Con el fin de visualizar los factores que contribuyen a la ecuación de tiempo, ha sido construido un modelo que representa la órbita elíptica de la tierra, donde la velocidad angular cambia periódicamente incluyendo el eje inclinado de la tierra.[2]

Entonces para saber la hora solar con una buena precisión es necesario usar la ecuación del tiempo[3]:

$$ET(\text{minutos}) = 12 + 0,1236 \sin(d) \times 0,0043 \cos(d) + 0,1538 \sin(2d) + 0,0608 \cos(2d) \quad (3.1)$$

Donde d es el ángulo de desviación según el día consecutivo del año N suponiendo que $N=1$ es 1 de Enero y $N=365$ es 31 de Diciembre:

$$d = \frac{360}{364}(n - 81) \quad (3.2)$$

Ahora se calcula el tiempo solar, el cual es necesario para calcular la posición del sol pero utilizando la ecuación del tiempo se logra obtener un dato de tiempo mas cercano al real:

$$TS = TC - ET \quad (3.3)$$

Donde TS es el tiempo solar y TC la hora local o civil.[4] [5]

3.2. Posición relativa del Sol con un punto en la Tierra

En la Figura 3 se observa que cualquier línea vertical dibujada en algún punto específico sobre la tierra intersecta la bóveda celeste en los puntos llamados *zenith* y *nadir*. El complemento del ángulo entre esta vertical y el eje polar se llama *latitud*, ϕ . Este es tomado como positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur. El *meridiano local* es el gran círculo en que contiene los polos, zenith y nadir. [6]

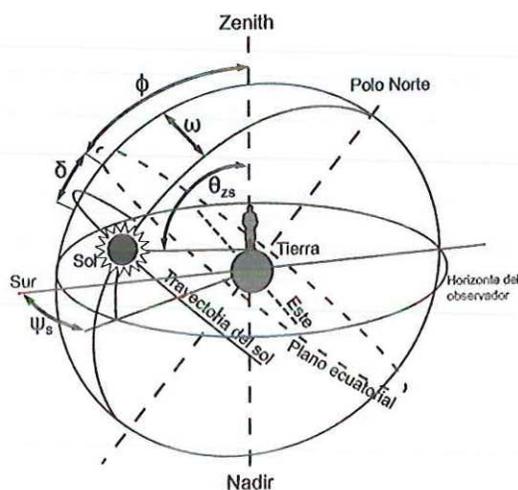


Figura 3: La bóveda celeste y el sistema de coordenadas con origen en un punto sobre la Tierra. [7]

Se usan dos coordenadas para especificar la posición relativa entre dos puntos, usando el sol como ejemplo, este sería un punto en la bóveda celeste en relación con un punto en la Tierra. Para ubicarlo se usa: *ángulo zenith*, θ_{zs} , entre la vertical y el plano horizonte del punto en la Tierra; *azimuth*, ψ_s , el ángulo entre los meridianos del punto en la Tierra. El azimuth es definido como positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste. El complemento de θ_{zs} es llamado *elevación* γ . [6]

Para el cálculo del ángulo azimuth ψ_s es necesario conocer la altura solar y el ángulo de declinación. La altura solar se calcula de la siguiente forma:

$$\sin(h) = \cos(L) \cos(\Gamma) \cos(hs) + \sin(L) \sin(\Gamma) \quad (3.4)$$

Donde L es la latitud del lugar, Γ el ángulo de declinación y hs el ángulo horario

El ángulo de declinación D se se obtiene de:

$$D = 23,45 \sin \left[(284 + N) \frac{360}{365} \right] \quad (3.5)$$

donde N es el número de días contados desde el comienzo del año. Claramente N varia desde 1 hasta 365 desde el 1 de Enero hasta el 31 de Diciembre, respectivamente.

El ángulo horario varia 15° por cada hora y es el ángulo que se forma entre el medio día solar y la hora deseada o de referencia. En esta ecuación se usara como hora de referencia el Tiempo solar(TS).

$$hs = (12 - TS) \times 15 \quad (3.6)$$

Entonces para calcular el ángulo azimuth se tiene la siguiente ecuación:

$$\sin(\psi_s) = \frac{\cos(\Gamma) \sin(hs)}{\cos(h)} \quad (3.7)$$

Este ángulo es medido en relación al plano vertical Este-Oeste así que es necesario seguir las siguientes reglas al realizar el cálculo

$$\cos(hs) < \frac{\tan(\Gamma)}{\tan(L)} \rightarrow \psi_s = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\Gamma) \sin(hs)}{\cos(h)} \right] \quad (3.8)$$

$$\cos(hs) < \frac{\tan(\Gamma)}{\tan(L)} \rightarrow \psi_s = 180^\circ - \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\Gamma) \sin(hs)}{\cos(h)} \right] \quad (3.9)$$

3.3. Cálculo del ángulo de control

El seguidor dispone de un eje horizontal en dirección Norte-Sur en el cual se acopla un panel fotovoltaico con un plano con una normal en dirección al cielo. El ángulo de control del seguidor permite el seguimiento del ángulo proyectado en el plano vertical Este-Oeste, este ángulo se calcula según la proyección de la trayectoria solar sobre este plano (Ver Figura 4). [6]

El ángulo de control se calcula usando trigonometría, teniendo previamente el valor de la altura solar (h) y el ángulo azimuth (as) se realiza el siguiente cálculo:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\sin(\phi_s)} \right) \quad (3.10)$$

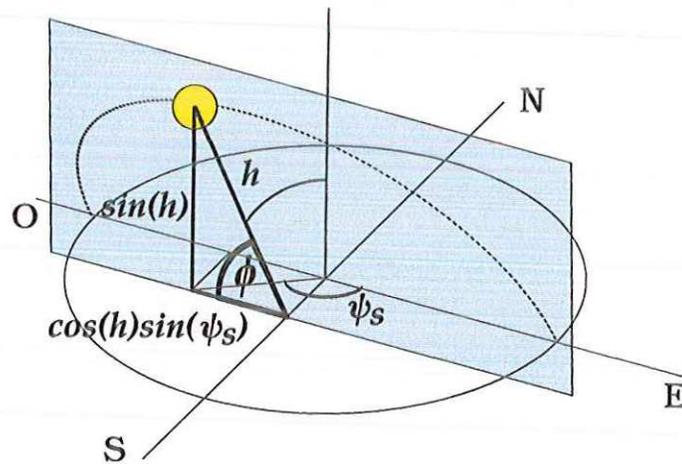


Figura 4: Ángulo de control en el plano Este-Oeste [6]

Para el uso del ángulo de control en el programa se requiere seguir la siguiente lógica:

$$\tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\sin(as)} \right) > 0 \rightarrow \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\sin(as)} \right)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\sin(as)} \right) < 0 \rightarrow \phi = 180^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\sin(as)} \right)$$

Si por ejemplo se calcula el ángulo de control durante un día entre las 6 y 18 horas se puede observar que esta tiene un comportamiento lineal(Ver Figura 5).

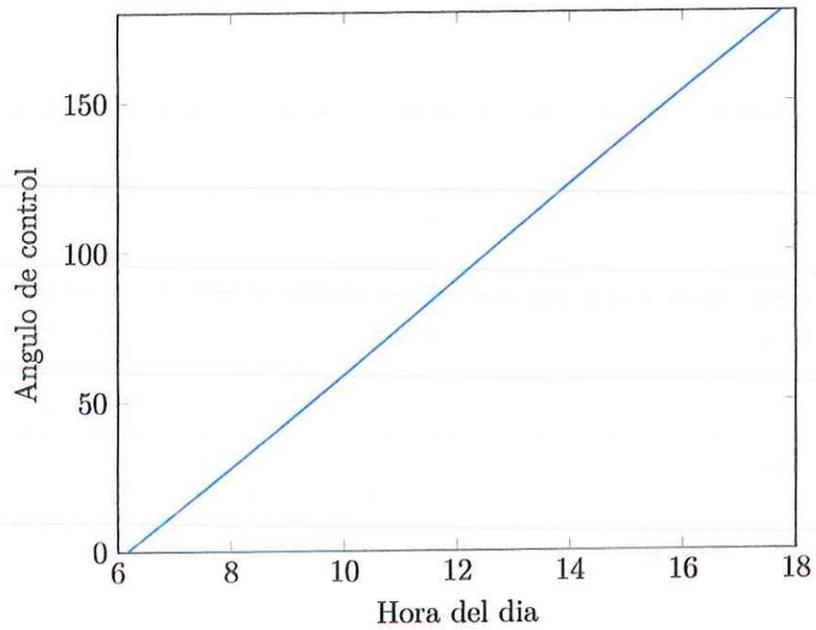


Figura 5: Gráfica del ángulo de control durante el primer día de Enero entre las 6 y 18 horas.

3.3.1. Ejemplo numérico del cálculo del ángulo de control

Como ejemplo se calculara la posición del sol desde la tierra en la ubicación geográfica de la UNAB con 7.11 de latitud y -73.1 de longitud, para un 17 de Octubre a las 10:36 horas.

Cálculo del tiempo solar

$$\text{Día del año} \quad N = 290$$

$$\text{Tiempo} \quad \text{Hora} = 10$$

$$\text{Minutos} = 36$$

$$\begin{aligned} \text{Ángulo de desviación Ecu.(3,2)} \quad d &= \frac{360}{365}(N - 81) \\ &= 206,14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecuación del tiempo Ecu.(3,1)} \quad ET &= 9,87 \sin(2d) - 7,53 \cos(d) - 1,5 \sin(d) \\ &= 9,87 \sin(2 \cdot 206,14) - 7,53 \cos(206,14) - 1,5 \sin(206,14) \\ &= 15,227 \text{ minutos} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Hora actual} \quad TC &= \text{Hora} + \frac{\text{Minutos}}{60} \\ &= 10 + \frac{36}{60} \\ &= 10,6 \text{ horas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo solar Ecu.(3,3)} \quad TS &= TC - \frac{ET}{60} \\ &= 10,411 \text{ horas} \end{aligned}$$

Cálculo del ángulo azimuth

Latitud del lugar $L = -7,11$

Ángulo de declinación *Ecu.*(3,5)
$$\begin{aligned} D &= 23,44 \sin \left((284 + N) \frac{360}{365} \right) \\ &= 23,44 \sin \left((284 + 290) \frac{360}{365} \right) \\ &= -10,326^\circ \end{aligned}$$

Ángulo de inclinación solar *Ecu.*(3,6)
$$\begin{aligned} hs &= (12 - TS) \cdot 15 \\ &= (12 - 10,411) \cdot 15 \\ &= 23,836 \end{aligned}$$

Altura solar *Ecu.*(3,4)
$$\begin{aligned} h &= \sin^{-1}(\cos(L) \cos(D) \cos(hs) + \sin(L) \sin(D)) \\ &= \sin^{-1}(\cos(-7,11) \cos(-10,326) \cos(23,836) \\ &\quad + \sin(-7,11) \sin(-10,326)) \\ &= 66,229^\circ \end{aligned}$$

Ángulo azimuth *Ecu.*(3,7)
$$\begin{aligned} \phi &= \sin^{-1} \left(\frac{\cos(D) \sin(hs)}{\cosd(h)} \right) \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{\cos(-10,326) \sin(23,836)}{\cosd(66,229)} \right) \\ &= 80,521^\circ \end{aligned}$$

Ángulo de control *Ecu.*(3,10)
$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\sin(\phi)} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{\tan(66,229)}{\sin(80,521)} \right) \\ &= 66,518^\circ \end{aligned}$$

3.3.2. Programa para calcular el ángulo de control

Este programa sirve para encontrar el ángulo de control del seguidor solar. Se utiliza el integrado DS1307, un reloj en tiempo real el cual permite saber la hora y la fecha en un momento dado. Luego de encontrar el ángulo de control esta es enviada a un controlador que calcula la acción de control y envía una señal PWM al actuador lineal, y así modificar la inclinación del panel montado al seguidor.

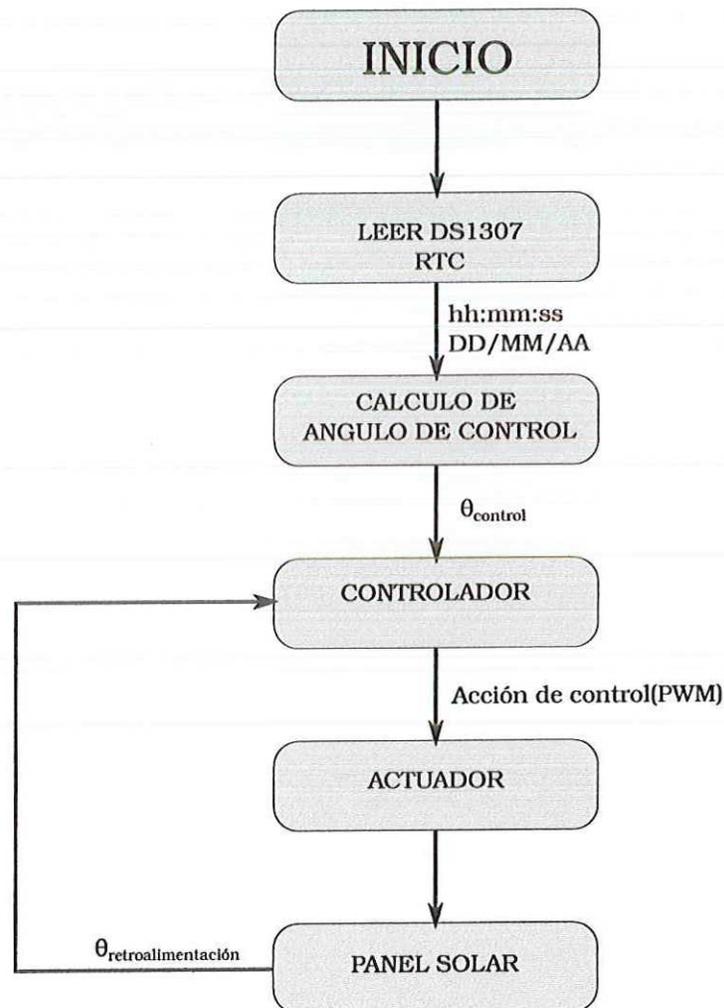


Figura 6: Diagrama de flujo del funcionamiento del seguidor solar

3.3.3. Validación del algoritmo de cálculo de posición del Sol

Para verificar la precisión de las ecuaciones usadas en el algoritmo se utilizó un método sencillo el cual es usado para encontrar en que momento del día la luz directa del sol es bloqueada por un obstáculo en algún punto. Pero en este caso se utilizó para saber la posición del sol en el cielo por medio de los ángulos azimuth y la elevación, utilizando el indicador de la Figura 7. Estos indicadores fueron colocados en una superficie horizontal orientada al Sur y otra vertical la cual se giraría para que apuntase al Sol (Ver Figura 9). [8]

Se registraron datos experimentales durante el día utilizando este método para compararlos con el teórico encontrado matemáticamente en el algoritmo. El error fue pequeño y aceptable, con una diferencia promedio de $3,66^\circ$ y $4,18^\circ$ en los ángulos azimuth y de elevación respectivamente. Los resultados pueden ser observados en la Tabla 1 donde se comparan el ángulo azimuth y de elevación solar teóricos obtenidos por el algoritmo con los mismos ángulos obtenidos experimentalmente con los indicadores antes mencionados. Estos son comparados utilizando el error absoluto y el error relativo que corresponden a las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$\text{error absoluto} = |\text{valor medido} - \text{valor real}| \quad (3.11)$$

$$\text{error relativo} = \frac{\text{error absoluto}}{\text{valor real}} \quad (3.12)$$

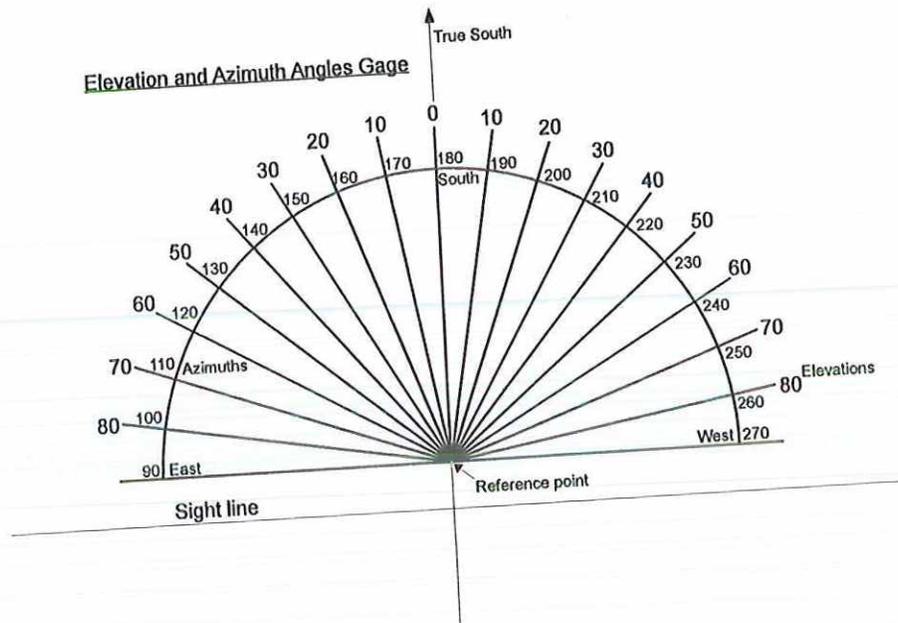


Figura 7: Indicador de azimuth y elevación para encontrar la posición del Sol

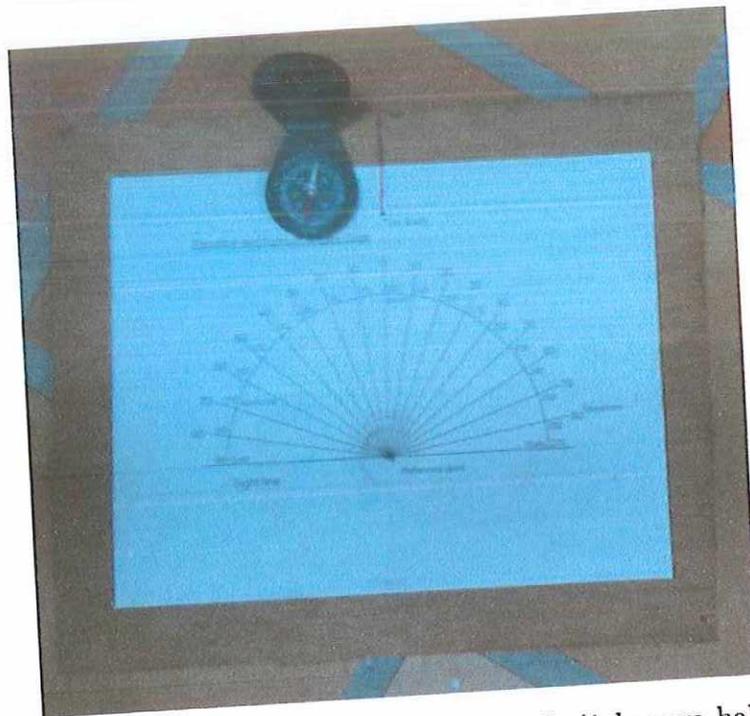


Figura 8: Superficie horizontal con indicador y brújula para hallar el Sur

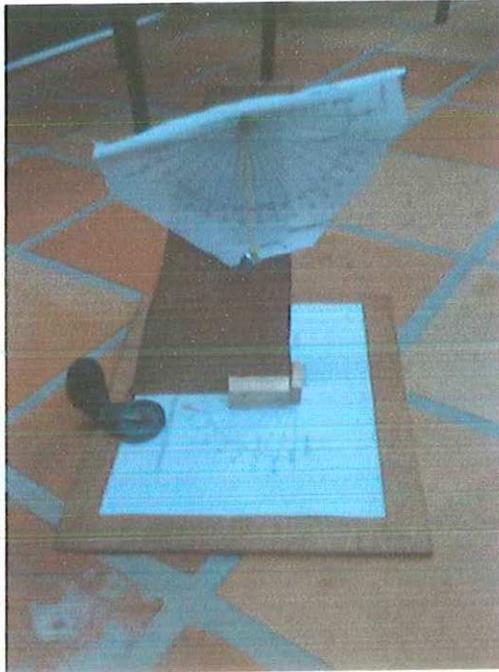


Figura 9: Estructura completa con los dos indicadores.

Hora	Experimental		Teórico		Error absoluto		Error relativo (%)		Áng. de Control	
	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación
08:39	98	43	93,3	38,19	4,7	4,81	4,80%	11,19%	38,24	38,24
08:50	98	46	93,78	40,92	4,22	5,08	4,31%	11,04%	40,98	40,98
09:05	102	48	94,49	44,63	7,51	3,37	7,36%	7,02%	44,72	44,72
09:20	102	52	95,29	48,34	6,71	3,66	6,58%	7,04%	48,46	48,46
09:35	103	55	96,21	52,04	6,79	2,96	6,59%	5,38%	52,2	52,2
09:50	104	60	97,27	55,73	6,73	4,27	6,47%	7,12%	55,95	55,95
10:05	104	62	98,54	59,42	5,46	2,58	5,25%	4,16%	59,7	59,7
10:20	105	65	100,11	63,09	4,89	1,91	4,66%	2,94%	63,45	63,45
10:35	105	67	102,1	66,74	2,9	0,26	2,76%	0,39%	67,21	67,21
11:05	115	80	108,55	73,93	6,45	6,07	5,61%	7,59%	74,73	74,73
14:35	265	47	263,67	52,47	1,33	5,47	0,50%	11,64%	127,35	127,35
14:50	265	45	264,6	48,76	0,4	3,76	0,15%	8,36%	131,1	131,1
15:05	267	42	265,41	45,06	1,59	3,06	0,60%	7,29%	134,84	134,84
15:20	267	38	266,13	41,35	0,87	3,35	0,33%	8,82%	138,58	138,58
15:35	267	39	266,79	37,63	0,21	1,37	0,08%	3,51%	142,31	142,31
15:50	267	25	267,39	33,92	0,39	8,92	0,15%	35,68%	146,05	146,05
16:05	269	20	267,95	30,2	1,05	10,2	0,39%	51,00%	149,78	149,78

Tabla 1: Datos de comparación entre datos experimentales y los obtenidos por el algoritmo

4. Diseño mecánico

Para el movimiento de giro se utiliza un actuador lineal eléctrico junto a un mecanismo que convierte un movimiento alternativo en giratorio. El mecanismo puede formularse como un sistema *manivela-biela-corredera* centrado como se puede ver en la Figura 10. El actuador modifica la longitud R_{CB} y el punto C representa el punto de inicio de la carrera del pistón del actuador. El ángulo θ_2 representa el ángulo de inclinación del panel fotovoltaico y la longitud R_{BA} el largo de la manivela.[9]

4.1. Mecanismo de giro

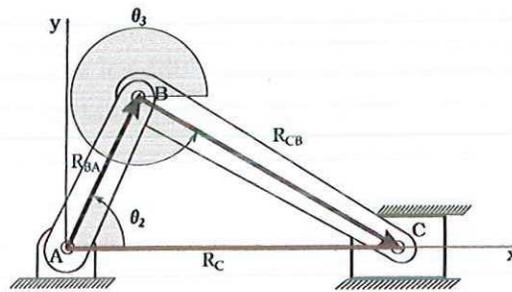


Figura 10: Mecanismo de giro Manivela-Biela-Corredera

Las ecuaciones que representan el comportamiento de los ángulos en el sistema son las siguientes:

$$\theta_2 = \frac{R_C^2 + R_{BA}^2 - R_{CB}^2}{2R_C R_{BA}} \quad (4.1)$$

$$\theta_3 = \frac{R_C^2 + R_{CB}^2 - R_{BA}^2}{2R_C R_{CB}} \quad (4.2)$$

Para el diseño del sistema se utilizó las ecuaciones 4.1 y 4.2 para hallar la ecuación 4.3, esta permite obtener un valor para la longitud R_C .

$$R_C = R_{BA} \cos(\theta_2) + (R_{BA}^2 \cos^2(\theta_2) - R_{BA}^2 + R_{CB}^2)^{1/2} \quad (4.3)$$

Si se supone que $R_{BA} = 7,5\text{cm}$, θ_2 es de aproximadamente 180° y que el recorrido del actuador $R_{CB} = 15\text{cm}$ se podrá obtener el valor de R_C en centímetros que permitan al

4.2. Diseño de la estructura mecánica

La diseño de la estructura se realizo para soportar un panel fotovoltaico de referencia YIGLI SOLAR modelo YL250P-29b con dimensiones $(1650mm \times 990m \times 40mm)$ ¹ y un peso aproximado de 19Kg. El material a usado en la estructura fue completamente en aluminio, no solo por su resistencia química al trabajar a la intemperie sino por la necesidad de tener una estructura ligera debido a que esta seria colocada sobre una cubierta.

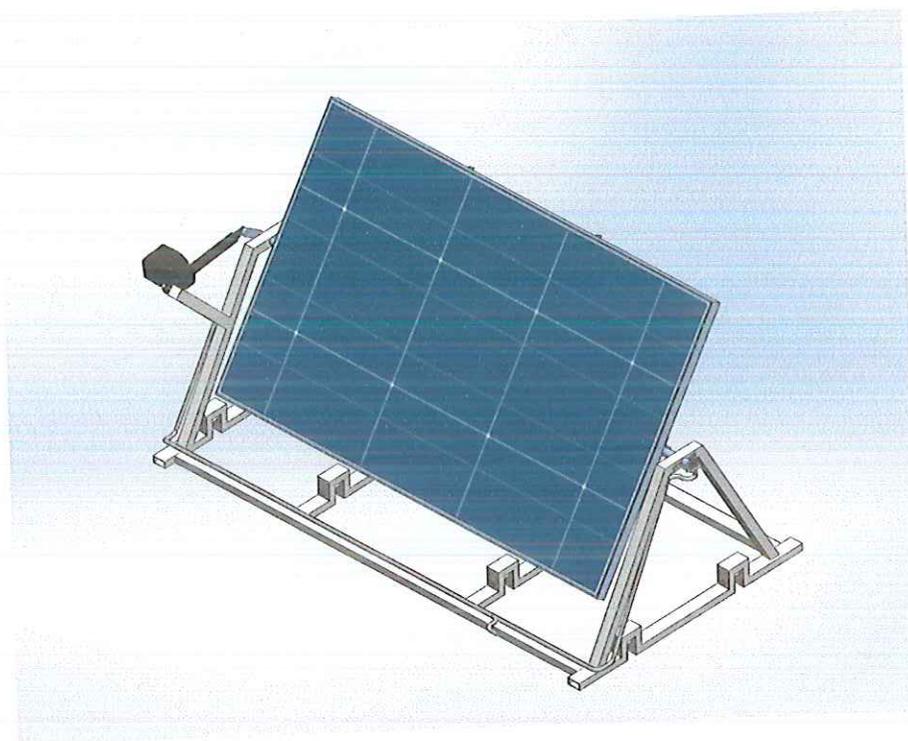


Figura 12: Estructura de seguidor solar

La base de la estructura tiene un diseño simple, la parte inferior se diseño para que el área que esta en contacto con la cubierta sea amplia y permita distribuir mejor el peso sobre la cubierta y así evitar que esta falle. La base es construida con tubos en aluminio de perfil rectangular con dimensiones $3'' \times 1,5''$.

¹(Alto, Ancho, Profundidad)

Para saber la inclinación de los paneles en todo momento, se usara un potenciómetro acoplado directamente al eje de rotación del seguidor. El montaje del potenciómetro se observa en la Figura 13. El potenciómetro es acoplado al eje usando una estructura hecha con un polímero.

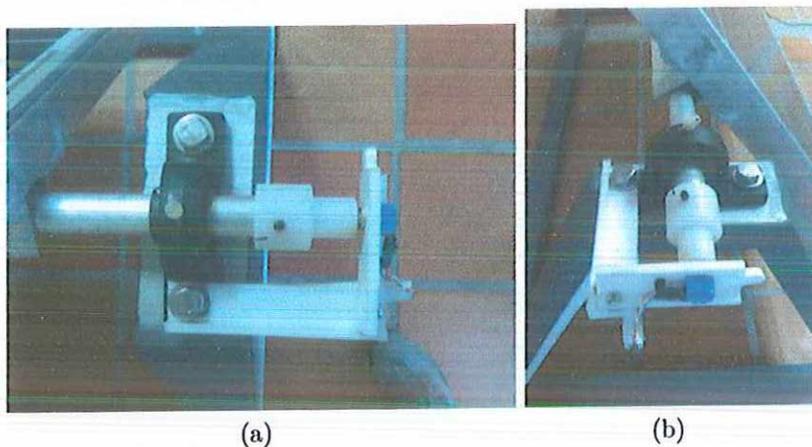


Figura 13: Montaje del potenciómetro acoplado al eje del seguidor.

En un costado es acoplado el actuador lineal, este se acopla por un pin cilíndrico al brazo que sobresale de uno de los soportes verticales de la estructura, el extremo del vástago es unido con un pasador a la manivela unida al eje de rotación.



Figura 14: Mecanismo de giro con actuador lineal en el seguidor

En el momento del montaje fue necesario reforzar la sección de la estructura que sujeta el actuador debido a que la fuerza del mismo empezó a afectar negativamente la estructura. La Figura 15 se puede ver el refuerzo aplicado a la estructura y evitar la flexión que producía el actuador en el brazo que sobresale en uno de los lados de la estructura a la cual es sujeto el actuador.

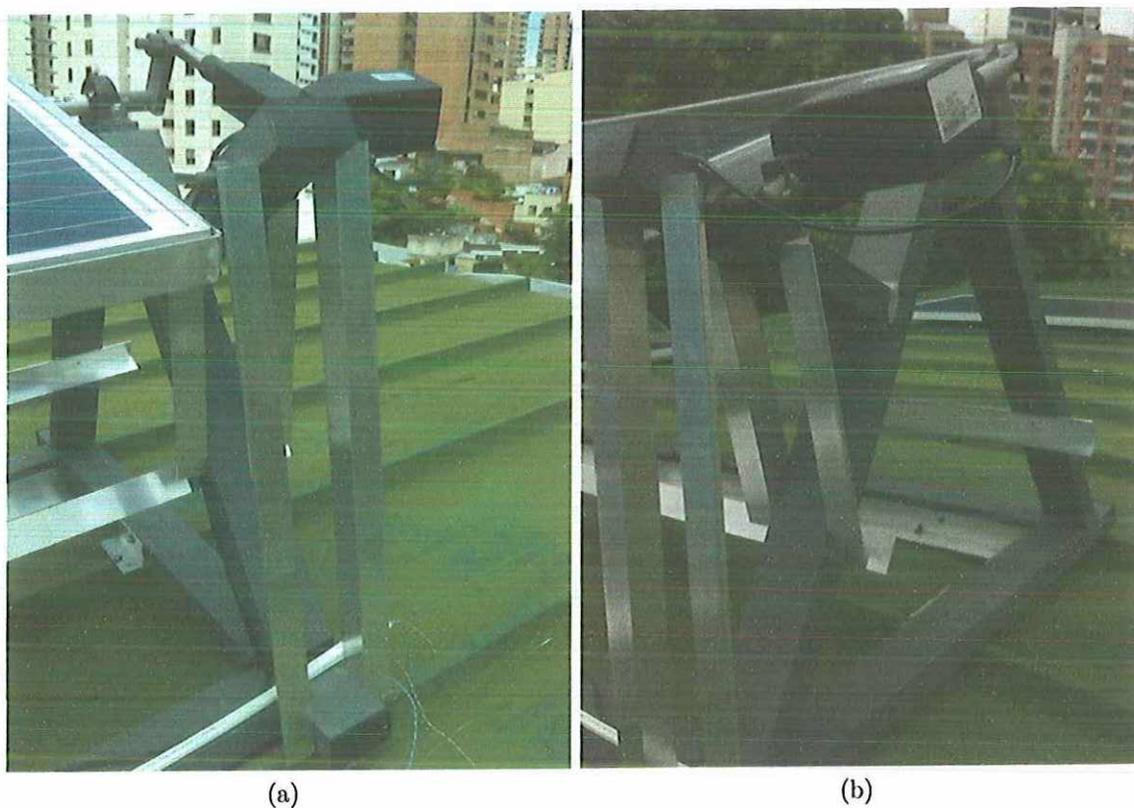


Figura 15: Estructura del seguidor con refuerzo

4.3. Estudio estático de la base de la estructura teniendo en cuenta la fuerza del viento

Se sabe que la mayor velocidad del viento registrada por la estación meteorológica del laboratorio de energías renovables de la UNAB ha sido de $20m/s(72Km/h)$. Este dato se usó junto a la normativa del *Decreto 1400 del año 1984*, la cual asigna un modo de calcular la presión del viento según su velocidad y la altura sobre el suelo sobre la cual se ubica la estructura. La ecuación sugerida por el decreto para calcular la presión del aire es la siguiente:

$$P_w = 0,005V_m^2(H/10)^{2/7} \quad (4.5)$$

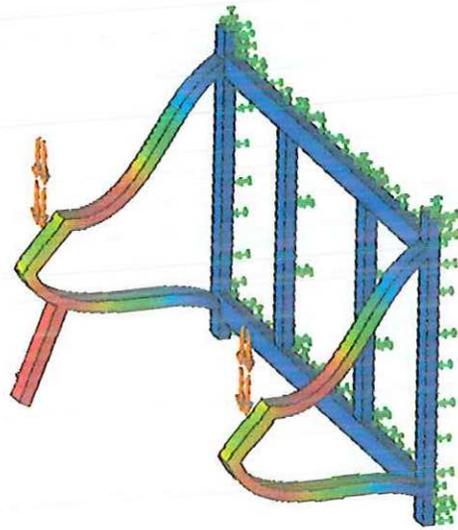
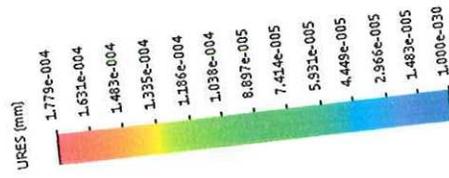
Donde P_w es la presión del viento sobre la superficie, V_m es la velocidad del viento básico y H es la altura sobre el suelo de la estructura. Tomando como $3,5m$ el valor aproximado de cada nivel del Edificio de Ingenierías de la UNAB, además de que la estructura estará ubicada encima del octavo nivel del edificio se tendrá que $H = 3,5m \times 9 = 31,5m$. Entonces si reemplazamos el valor de la altura H y la velocidad del viento básica en la ecuación 4.6, se obtiene:

$$P_w = 0,005(72)^2 * (31,5/10)^{2/7} = 35,97 \text{ Kg/m}^2 \quad (4.6)$$

Esta presión sera incluida en el análisis estático con el FEM de Solidworks® y se analiza nuevamente el desplazamiento del material por la flexión. Este estudio se realiza en el peor escenario, cuando el plano de la superficie del panel es completamente perpendicular al suelo y la presión del viento se aplica directamente a la superficie del panel o lateral a la estructura. En las Figura 16 y 17 se puede observar que le desplazamiento de la estructura fue mínima, con un máximo $0,1776\mu m$ ante vientos frontales y $1,243\mu m$ ante vientos laterales.

En las simulaciones de tensión(Figura 18 y 19) el aluminio no supero ni logró acercarse a su limite elástico de $34,5 \times 10^6 N/m^2$ ². Ante vientos frontales la tensión máxima en la estructura fue de $7673,9N/m^2$, mientras que ante vientos laterales la tensión fue de $25612,57N/m^2$. Esto indica que el material no fallara cuando enfrente vientos de $72Km/h$ cuando este instalado en el Laboratorio de Energías Renovables.

²Valor tomado de la base de datos de materiales de Solidworks



Nombre de modelo: Base seguidor-sin paso de rieles
Nombre de estudio: Analisis estatico 11-Predefinido-1
Tipo de resultado: Desplazamiento estatico Desplazamientos1
Escala de deformación: 1.13734e+006



Figura 16: Simulación de desplazamiento de la base de la estructura ante vientos frontales

Nombre de modelo: Base seguidor-Sin paso de rieles
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamiento-
Escala de deformación: 158837

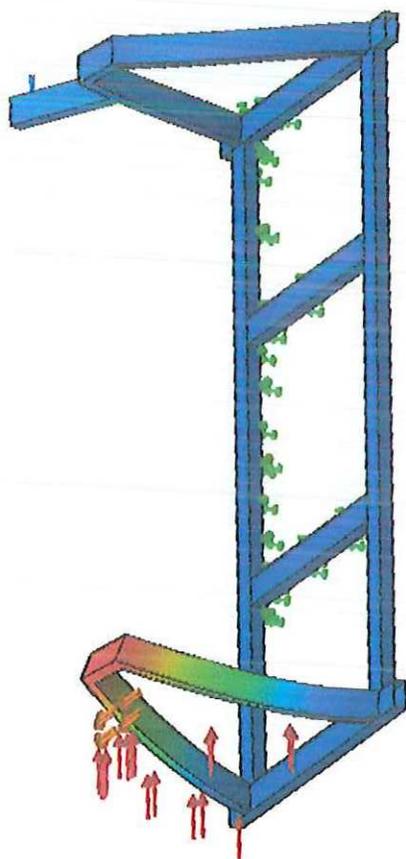
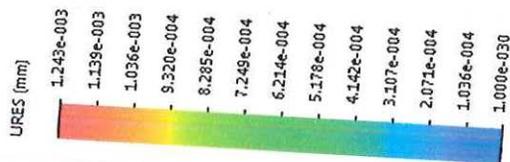


Figura 17: Simulación de desplazamiento de la base de la estructura ante vientos laterales

Nombre de modelo: Base seguidor.Sin paso de rieles
Nombre de estudio: Análisis estático II(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1

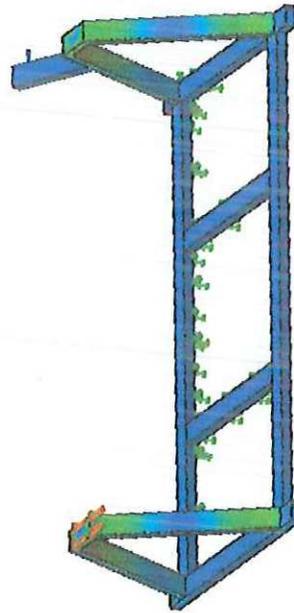
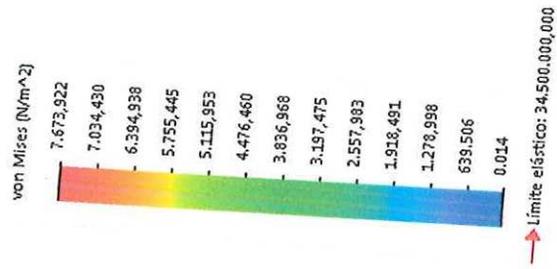


Figura 18: Simulación de tensión de la base de la estructura ante vientos frontales

Nombre de modelo: Base seguidor-Sin paso de rieles
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(Predefinido-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 1

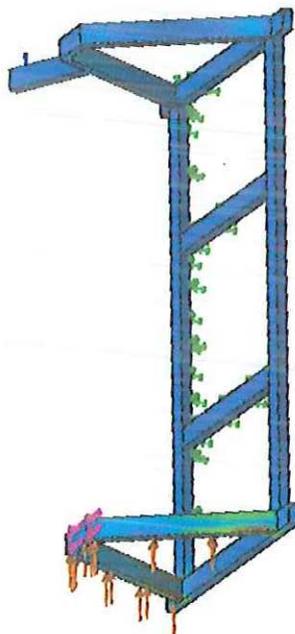
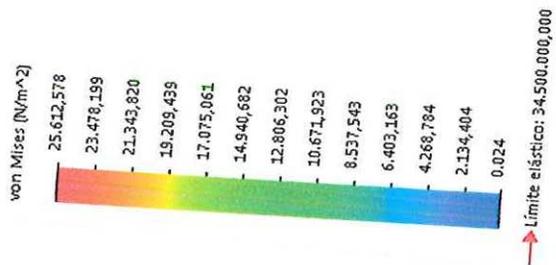


Figura 19: Simulación de tensión de la base de la estructura ante vientos laterales

5. Diseño eléctrico y electrónico

Actuador

El actuador utilizado en el seguidor es un actuador lineal o brazo eléctrico de referencia *LINKAN A/C LA32* con las siguientes características:



Figura 20: Actuador Lineal LA32 LINKAN A/C

- Trabaja a 24V DC con un consumo de corriente de 1-5A por lo que puede funcionar con la misma energía producida por el panel solar y almacenada en el banco de baterías del Laboratorio de energías renovables (LER).
- Tiene un recorrido de 15cm.
- Tiene protección clase IP54¹, esto significa que puede resistir el agua de lluvia y las partículas de polvo del exterior.
- Resistencia a la corrosión de la intemperie.
- Puede realizar movimientos pequeños con velocidades de 3,0 ~ 16,7mm/s.
- Puede mantener su última posición cuando está desenergizado.

¹IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). International Electrotechnical Commission, Geneva.
IP= International Protection; IP5X=Protección contra polvo; IPX4= Chorros de agua.

Para saber el torque a necesitar en el sistema se realizo una simulación en el estudio del movimiento de la estructura en Solidworks. Se tomó en cuenta el peso de los materiales y del panel mientras el actuador giraba el panel de 0° a 180° . La simulación arrojó la gráfica de la figura 21, donde se observó que la máxima fuerza aplicada por el motor fue de 607.1 N.

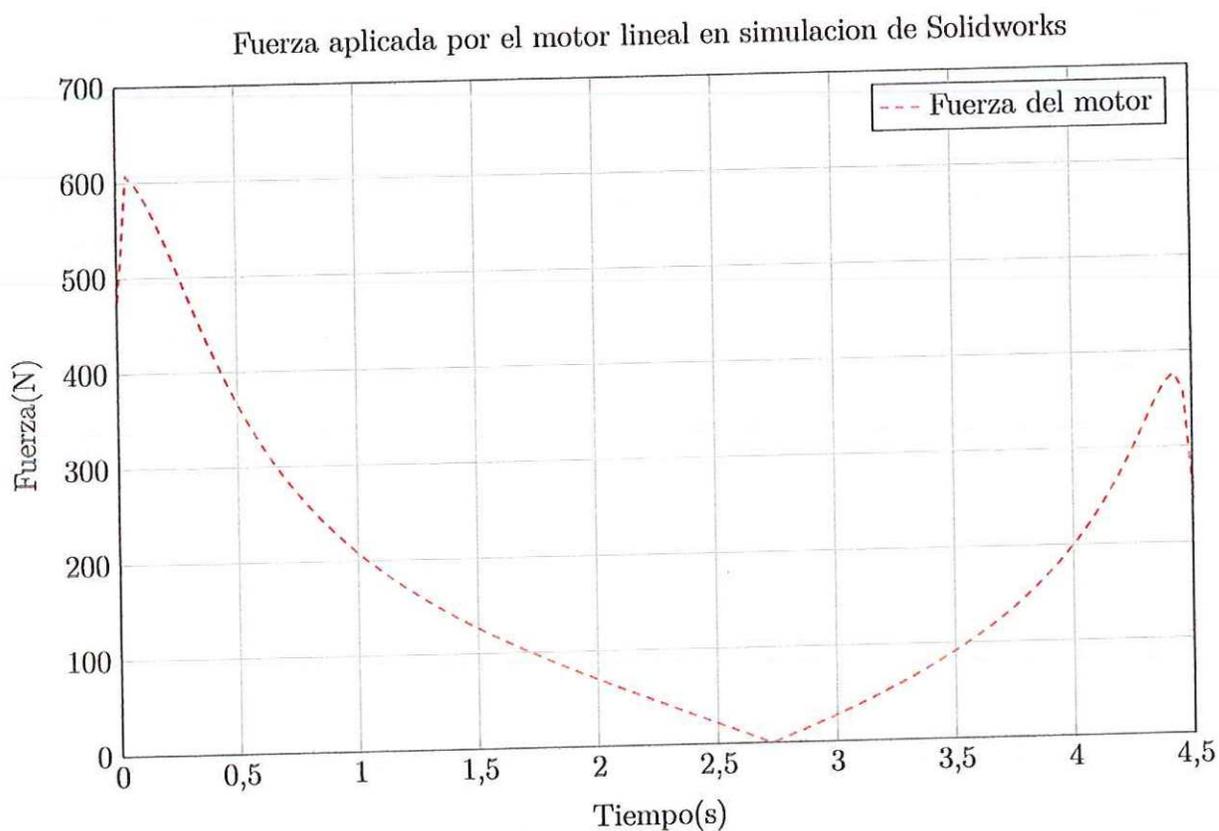


Figura 21: Gráfica de fuerza aplicada por el motor según simulación en Solidworks

6. Componentes electrónicos

Arduino UNO R3

El procesamiento de datos y el control del sistema se programara el algoritmo de seguimiento en un Arduino UNO R3, este es un hardware basado en una placa con un microcontrolador equipado con entradas análogas y digitales necesarias para la comunicación con los sensores de posición y tiempo a usar.

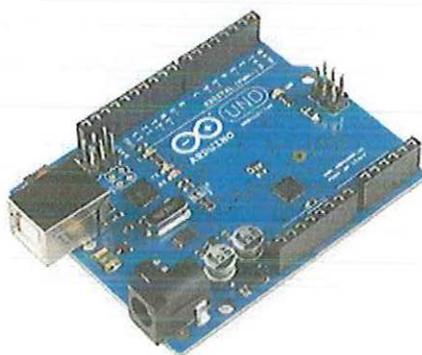


Figura 22: Arduino UNO R3

6.1. Motor driver Pololu dual VNH5019

El control del actuador se realizara con la Shield para Arduino Pololu dual VNH5019, el cual puede operar entre 5.5 y 24V y puede soportar continuamente una corriente 12A.

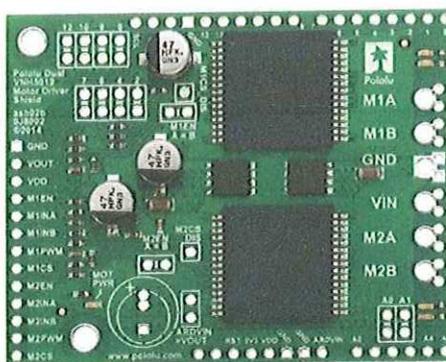


Figura 23: Pololu dual VNH5019

6.2. Sensores

Reloj de tiempo real(RTC)

El DS1307 es *real-time clock(RTC)* de bajo consumo que hace la función de Reloj y Calendario. El DS1307 utiliza el bus de comunicación I²C para intercambiar información con otros dispositivos. El integrado incluye un sock para una batería tipo botón de 3V para mantener su configuración interna en caso de un apagón. El circuito integrado puede dar las siguientes variables necesarias para el control del sistema: Hora, Minutos, Segundos, Día, Mes y Año.

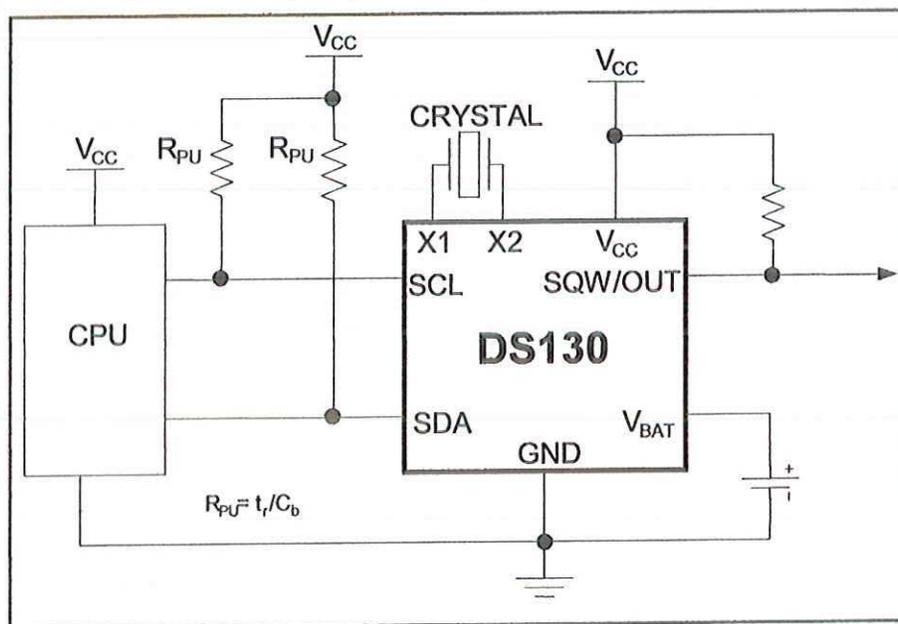


Figura 24: Típico circuito de operación

La figura 24 muestra el esquema de la configuración y las conexiones del integrado con una CPU, donde la CPU sería el Arduino al cual se comunica por los pines SCL y SDA por el protocolo de comunicación I²C el cual no se entra mucho en detalles porque viene programado en la librería *DS1307.h*. El CRYSTAL es un oscilador de cristal de 32.768 kHz (2^{25} ciclos por segundo) también conocido como cristal de tiempo real. Las resistencias *Pull-Up* o de polarización para aumentar la tensión a la salida de estos dispositivos.

Potenciómetro lineal

Para la retroalimentación de la posición del panel fotovoltaico se utiliza un potenciómetro lineal marca BOURNS de $5K\Omega$ y una vuelta, alimentado a 3.3V. Este no fue alimentado al típico 5V debido a que no se utiliza todo el giro del potenciómetro, adicionalmente fue reducido a 1.1V el voltaje de referencia del Arduino para obtener mas resolución del umbral de 1V en el cual trabaja el potenciómetro al montarlo en el sistema.

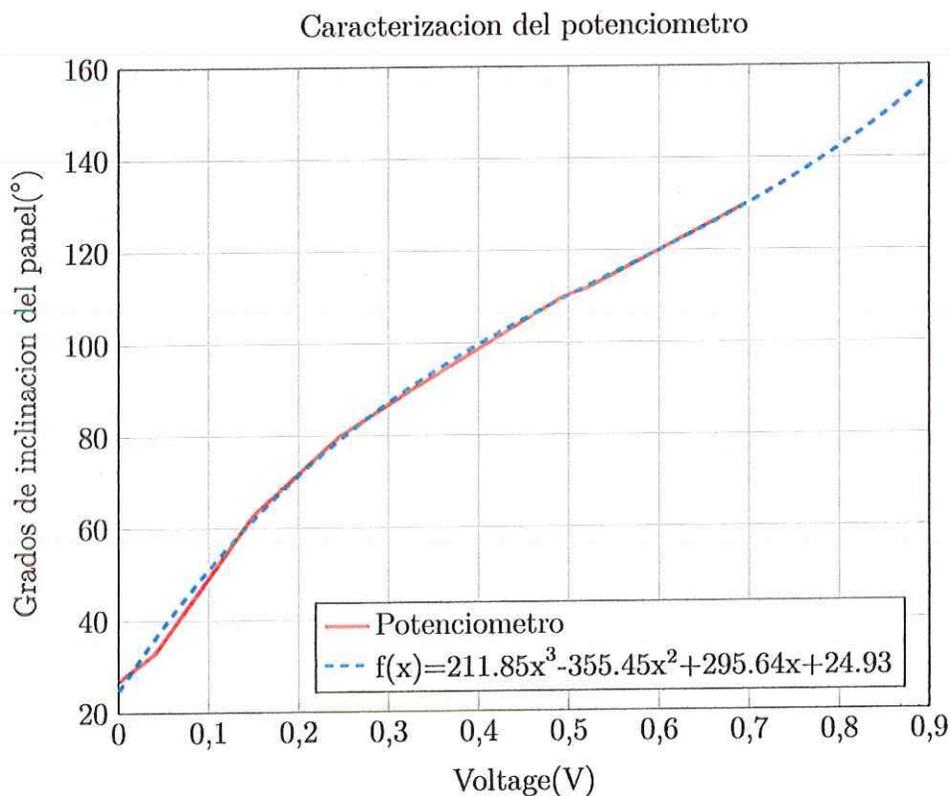


Figura 25: Gráfica de caracterización del potenciómetro.

6.3. Datalogger Shield Arduino Xd05

El datalogger es acoplado al Arduino y se utiliza para almacenar datos en una memoria SD. Este utiliza las E/S digitales del 10 al 13 para la comunicación para escribir o leer datos en la memoria SD la cual debe tener formato FAT16 o FAT32.

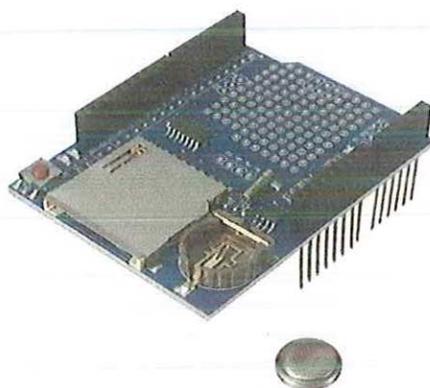


Figura 26: Datalogger Shield Arduino Xd05

6.4. Conexiones del sistema

Partiendo de la placa Arduino, esta se alimenta por medio de un adaptador de corriente conectado a un punto de corriente alterna a 110V. El potenciómetro y el RTC son alimentados por la salida de 3.3V y 5V de la placa Arduino, respectivamente. Al Arduino también se le conectan los respectivos cables que envían las señales a procesar para ser utilizados en el algoritmo de seguimiento.

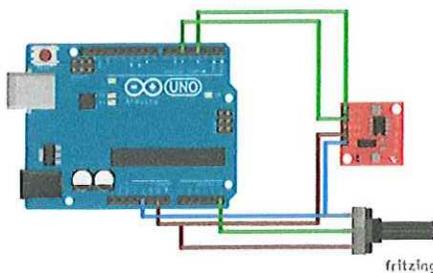


Figura 27: Conexiones de sensores al Arduino UNO

6.5. Filtrado del ruido en señal de retroalimentación

El ruido en la señal de retroalimentación obtenida del potenciómetro acoplado al eje del seguidor necesita ser tratado antes de utilizarse en el algoritmo y se optó por aplicar a la señal un filtro digital pasa-bajos Butterworth.

Este tipo de filtro tiene la característica de aplanar las señales con muy pocas ondulaciones como un filtro pasabanda. Así que sabiendo que el periodo de muestreo del código usado en el Arduino es de aproximadamente $5,56 \text{ ms}$ se ejecuto realizo el diseño de un filtro Butterworth de segundo orden con una frecuencia de corte de 3 Hz :

Al diseñarlo resulta la función de transferencia:

$$\frac{Y_f}{Y} = \frac{0,002554z^2 + 0,005109z + 0,002554}{z^2 - 1,852z + 0,8622}$$

Esta función de transferencia se pasa a ecuaciones de diferencia para ser usada en el Arduino:

$$\frac{Y_f}{Y} = \frac{0,002554 + 0,005109z^{-1} + 0,002554z^{-2}}{1 - 1,852z^{-1} + 0,8622z^{-2}}$$

$$Y_f = 0,002554Y + 0,005109Y(n-1) + 0,002554Y(n-2) + 1,852Y_f(n-1) - 0,8622Y_f(n-2)$$

Donde Y es la señal de entrada con ruido y Y_f la señal filtrada.

7. Sistema de control

El sistema de control constara de un Arduino el cual obtiene los datos de *Tiempo* del integrado DS1307 necesarios para realizar los cálculos matemáticos y encontrar el ángulo de inclinación θ que debe tener el seguidor solar para seguir el sol. El microcontrolador controla el actuador lineal utilizando un *Puente H* para manipular la dirección de giro del motor en el actuador lineal y este por medio del mecanismo de giro modifica el ángulo de inclinación. Se dispone de un potenciómetro acoplado directamente al eje para retroalimentar la inclinación actual del panel fotovoltaico, esta señal es enviada al microcontrolador para realizar el cálculo de la acción de control.

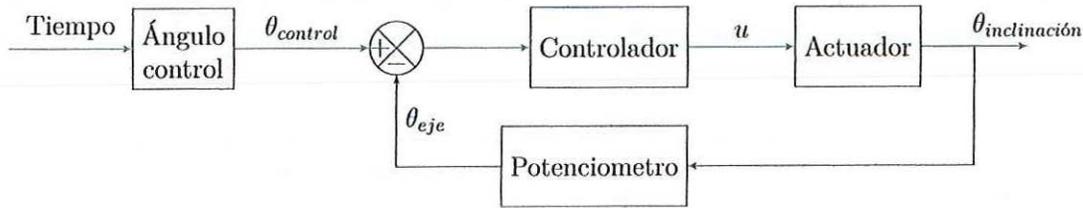


Figura 30: Diagrama del sistema de control

7.1. Controlador

Para el control de posición del sistema se utiliza un controlador Proporcional Derivativo (PD) discreto porque este permite entregar una respuesta rápida ante pequeños cambios en la variable del proceso cuando esta este cerca a su punto de consigna y evitar lo posible la zona muerta del actuador. El controlador es representado en ecuaciones de diferencia para ser usado en el Arduino, el controlador utiliza el error (valor de consigna-variable del proceso) la cual es multiplicada por la ganancia proporcional K_p mientras que la ganancia derivativa K_d se multiplica por la diferencia del error actual con el de la muestra anterior.

$$u(t) = K_p * td \frac{de(t)}{dt} + K_p * e(t) \quad (7.1)$$

$$u(kT) = K_p \left[e(t) + \frac{td}{T} (e(kt) - e(k-1)) \right] \quad (7.2)$$

$$\frac{u(z)}{E(z)} = K + K_d(1 - z^{-1}) \quad (7.3)$$

$$u(n) = K_p e(n) + K_d(e(n) - e(n-1)) \quad (7.4)$$

7.2. Pruebas del controlador sin RTC

Para probar y ajustar empíricamente las constantes controlador PD se realizó la configuración mostrada en la Figura 31. Originalmente el ángulo de control es enviado por el algoritmo que utiliza los datos del RTC pero en este caso se reemplaza por una la señal analógica de voltaje modificada con un potenciómetro y así modificar manualmente el valor del SetPoint enviado al controlador.

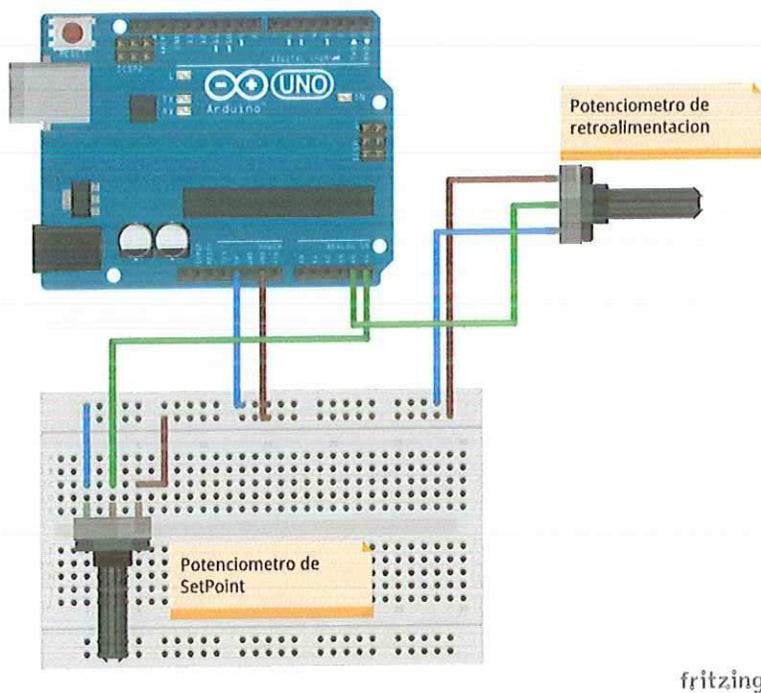


Figura 31: Esquema de la configuración usada para ajustar el controlador

Durante el ajuste del controlador se variaron las constantes $K_1(K_p)$ y $K_2(K_d)$ de la ecuación:

$$y(n) = K_1 e(n) - K_2 e(n-1) \quad (7.5)$$

Se encontró que usando el controlador con las constantes $K_p = 7$ y $K_d = 3$ se lograba un buen control del sistema, con un error aproximadamente 2° en estado estable. Esto se puede observar en la Figura 32.

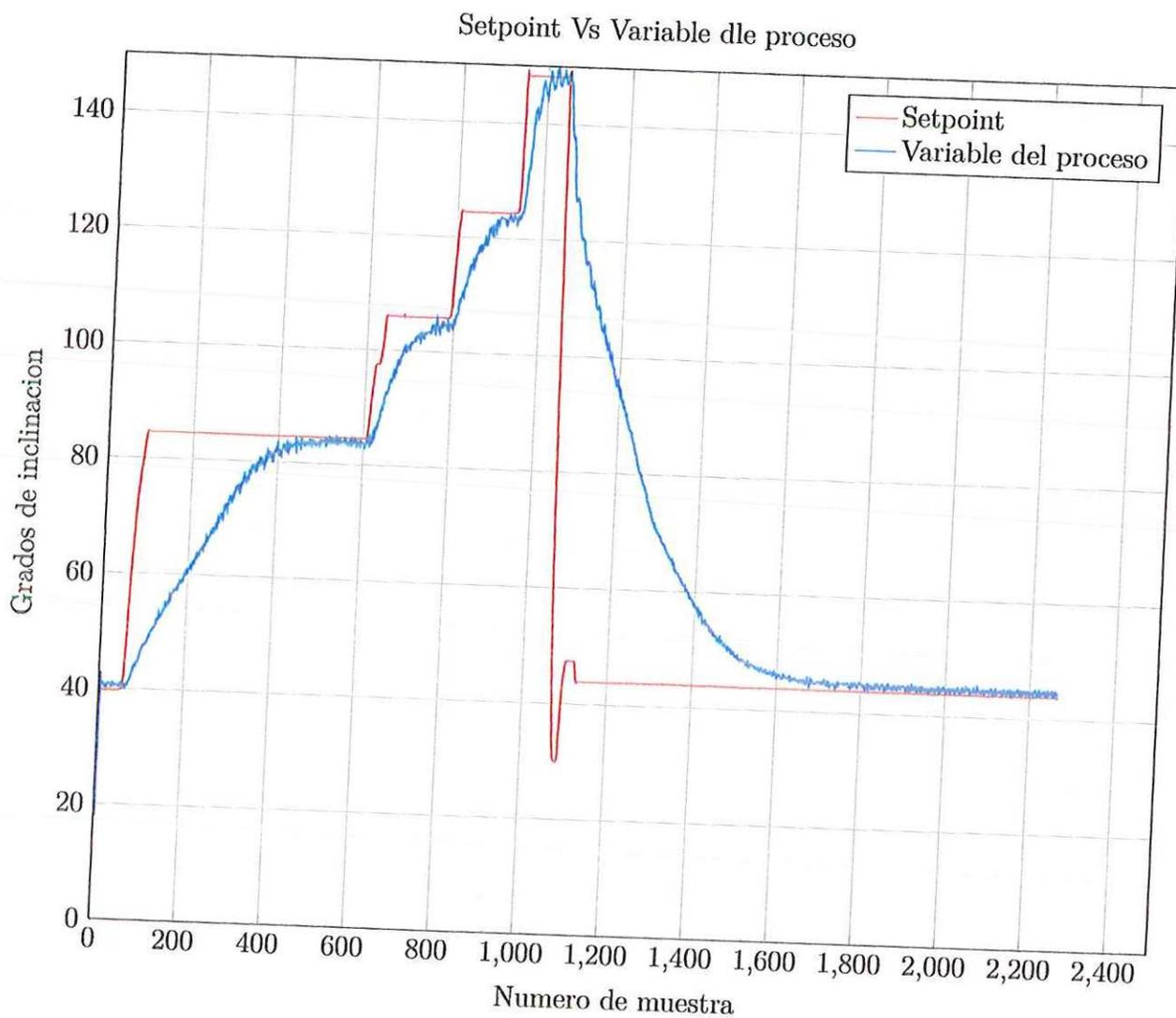


Figura 32: Gráfica de Setpoint Vs Variable del proceso

En la Figura 33 se muestra la acción de control, donde se puede observar el efecto que causa el ruido en la señal de retroalimentación, cuando se acerca a su punto de consigna. Pero aun así esto no presenta mayor problema por presentarse cerca a la zona muerta del motor que es entre 2.5V y -2.5V equivalente al 10% del PWM aproximadamente.

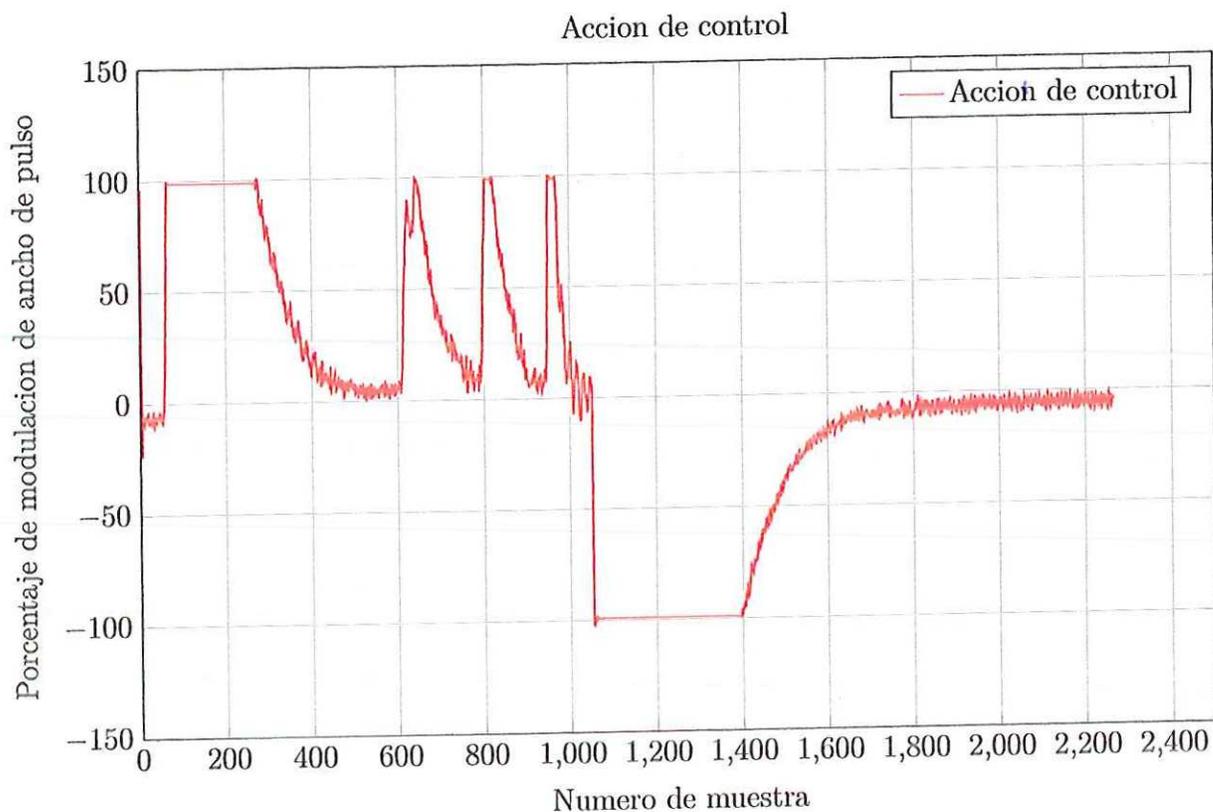


Figura 33: Gráfica de acción de control

Durante las pruebas se encontró mucho ruido en la señal de retroalimentación, volviendo oscilante la acción de control enviada por el controlador, por lo cual fue necesario aplicar un filtro digital a la señal de retroalimentación, el efecto de este filtrado se puede observar la Figura 34.

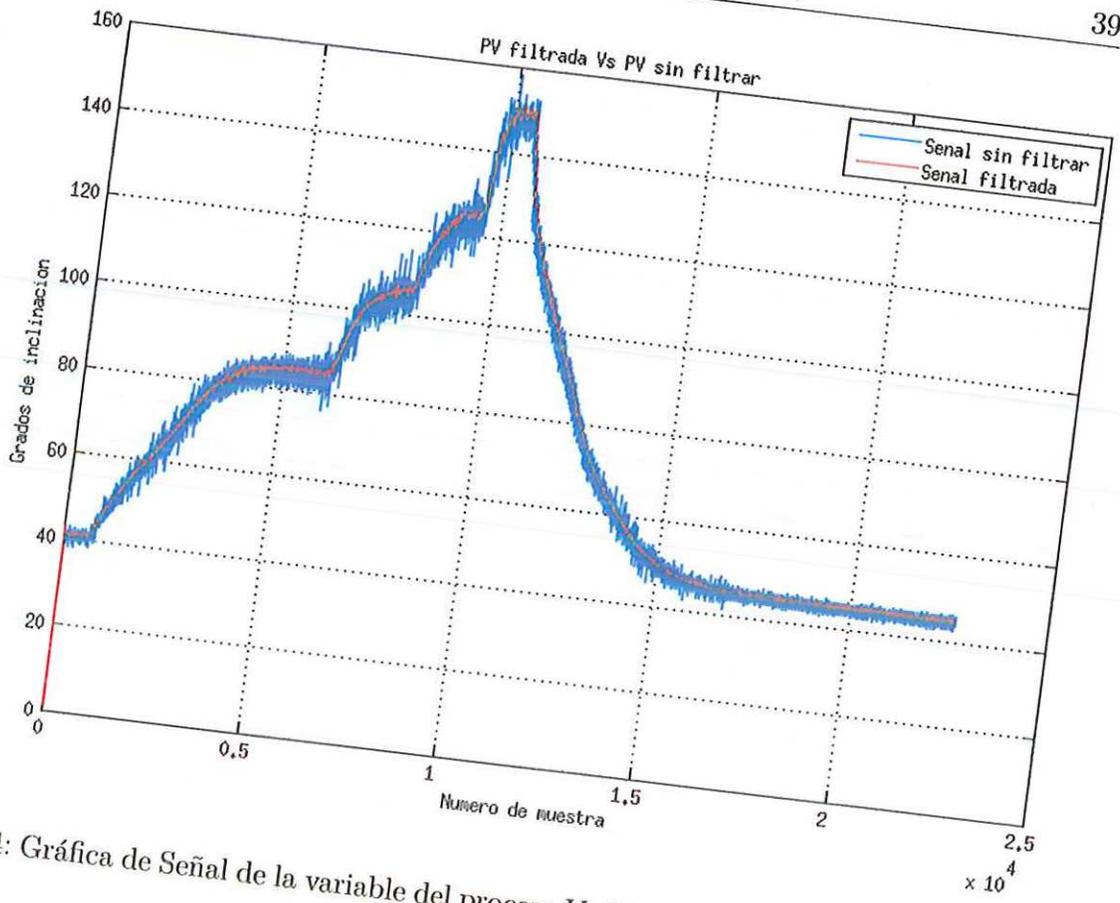


Figura 34: Gráfica de Señal de la variable del proceso Vs Señal de la variable del proceso filtrada

8. Pruebas del controlador con seguidor montado

Luego de montar el seguidor en su lugar correspondiente, se registró las variables del controlador. En la Figura 35 se muestra la gráfica del punto de consigna junto a la variable del proceso, donde se puede observar que la variable del proceso presenta mucho más ruido que en las pruebas realizadas antes de montar el seguidor y esto podría deberse a la cercanía con una antena de telecomunicaciones adyacente al lugar, pero aún así el sistema pudo realizar un seguimiento del sol aunque no con la precisión esperada.

En la figura se puede observar marcas de tiempo del momento en el cual se registraron los datos. A las 17:30 horas el seguidor se encuentra en estado de reposo, es decir, en ángulo de 90° durante la noche. Luego a las 8:00 del día siguiente el seguidor empieza a correr el algoritmo de seguimiento para ubicarse en un ángulo de 60° , esto se debe al límite programado en el seguidor para trabajar entre ángulos de 60° y 150° . Entre las 8:00 y las 10:00 el algoritmo entregó un ángulo de control menor o cercano a los 60° y por este motivo se observa que el punto de consigna no cambió durante este intervalo. Entre las 10:00 y las 16:00 se puede observar claramente el seguimiento realizado por el sistema hasta que el algoritmo empieza a enviar ángulos de control mayores a 150° a partir de las 16:00.

En la Figura 36 se observa el gráfico de la acción de control con muchos picos que representan el arranque y la caída a cero de la acción de control durante cada ciclo en el cual se ejecutó el algoritmo. El algoritmo se ejecuta cada 15 minutos entre las 8:00 y las 16:45, luego entre las 17:30 y las 7:30 cada 60 minutos es ejecutado el código que ubica el panel en un estado de reposo (90°) para disminuir la posibilidad de que un viento fuerte afecte la estructura. Los dos picos al inicio representan la transición de 150° a los 90° de estado de reposo que toma el sistema durante las noches, el segundo pico se debe a la transición de 90° a los 60° de las 8:00 cuando se empieza a correr nuevamente el algoritmo de seguimiento.

La Figura 37 muestra la variable del proceso con ruido y la versión filtrada, se puede observar mucha diferencia con la Figura 34 donde los datos fueron tomados antes de montar el dispositivo sobre la cubierta y es posible que este incremento del ruido se deba a que el Arduino es alimentado por un adaptador de corriente y además se encuentra ubicado adyacente a una antena de telecomunicaciones.

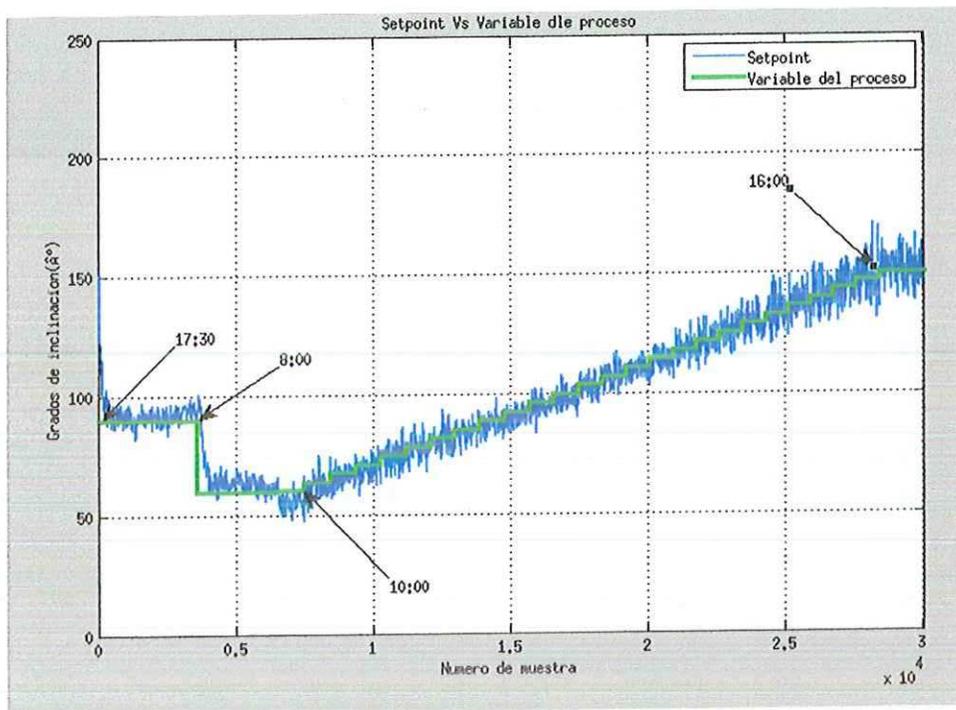


Figura 35: Gráfica de Setpoint Vs Variable del proceso

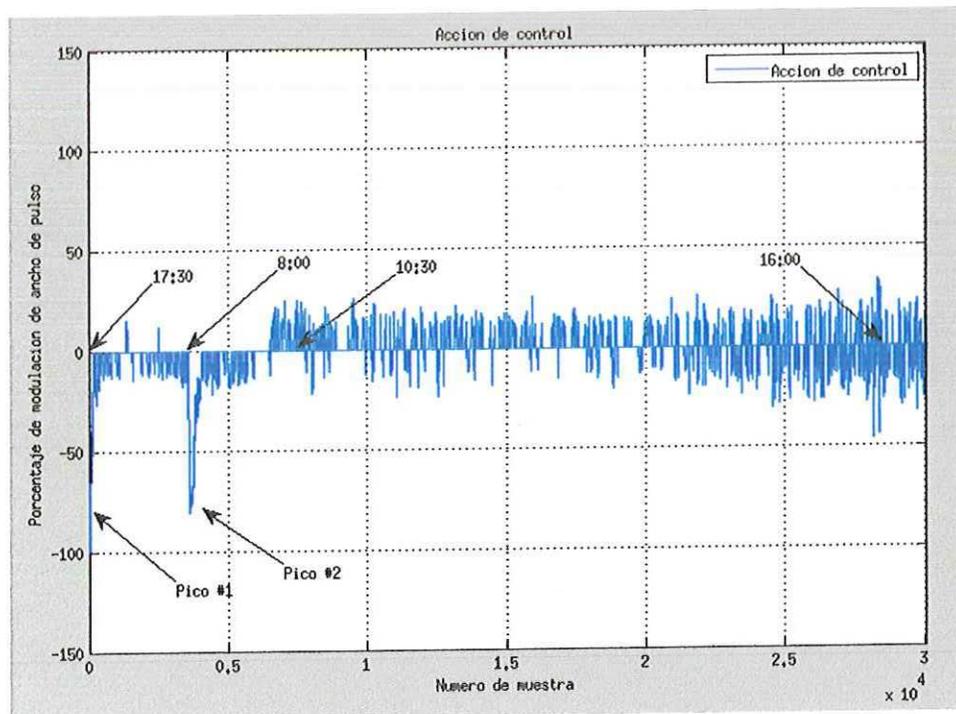


Figura 36: Gráfica de acción de control

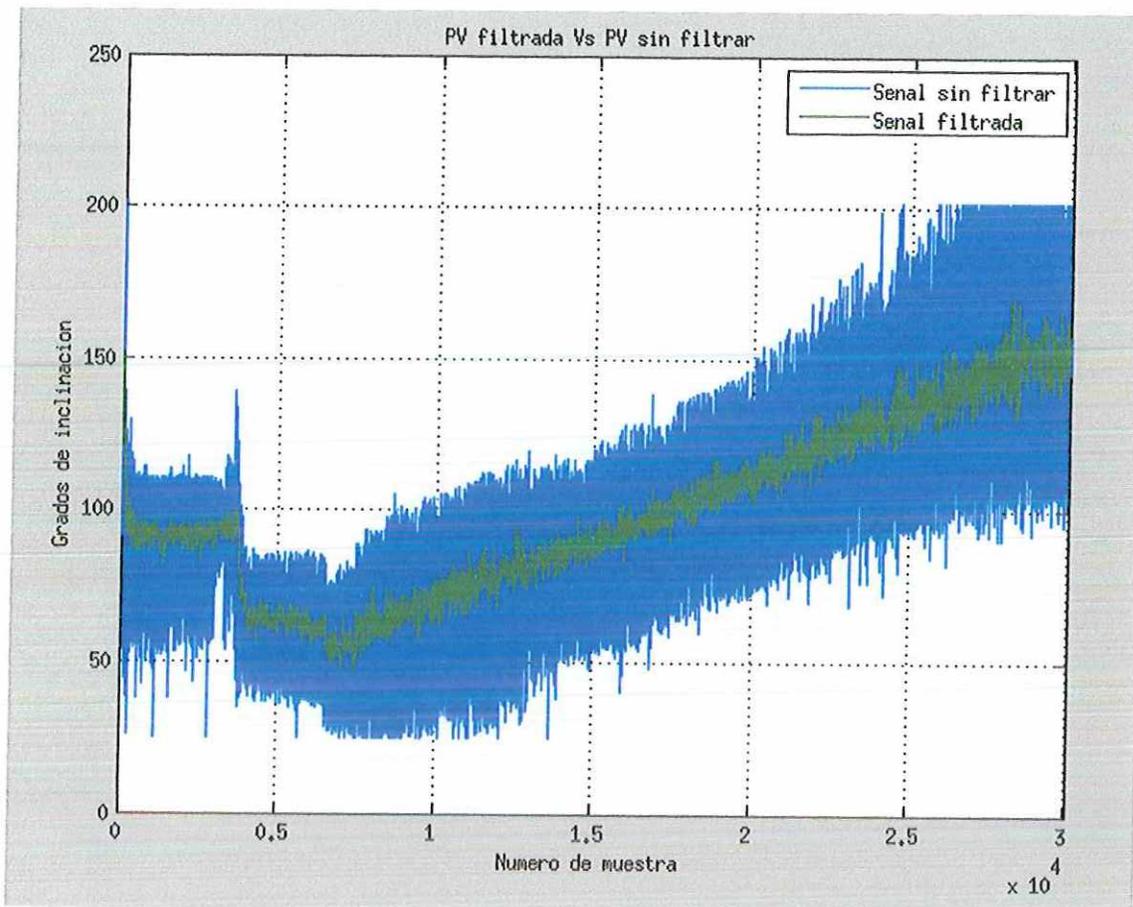


Figura 37: Gráfica de Señal de la variable del proceso Vs Señal de la variable del proceso filtrada

9. Conclusiones

- Aunque el inesperado ruido al montar el seguidor fue alto, el sistema pudo trabajar y realizar el seguimiento del Sol pero la precisión del sistema fue reducida. Esto quizás puede resolverse utilizando otro tipo de sensor diferente al potenciómetro para medir la posición del panel. Un acelerómetro sería una mejor opción.
- Debido a problemas de tiempo para culminar el proyecto y la ubicación de la instalación del seguidor solar, el eje de este no pudo ser alineado correctamente entre el Norte y el Sur. Una solución a esto es crear una plataforma sobre su ubicación que permita alinear y fijar fuerte mente la estructura a la cubierta sobre la cual esta instalada.
- Durante el diseño del algoritmo de posición se encontraron otros métodos para aumentar la precisión utilizando datos atmosféricos y climatológicos pero se considero que estos no aportaban una mejora significativa a la precisión del sistema.
- No se alcanzo a realizar un estudio comparativo de producción energética entre los dos paneles: el fijo y el montado en el seguidor. Esto fue debido a problemas con el equipo necesario para inyectar a red la energía producida por el panel acoplado al seguidor. Pero en caso de haber estado funcionando el estudio comparativo se hubiera realizado con un equipo de monitoreo electrico TED 5000, el cual mediría la producción de los dos paneles por separado.
-

Presupuesto

Tabla 2: Tabla de presupuesto del proyecto

Descripción	Costo
Seguidor	
Estructura del seguidor	\$500.000
Actuador lineal LINKAN LA32	\$354.000
Tornillería	\$25.000
Otros	\$30.000
Electrónica	
Arduino UNO R3	\$50.000
Módulo Control Motor DC - Puente H	\$145.000
Potenciómetro	\$15.000
Shield Arduino SD Datalogger con DS1307	\$12.000
Alimentación	
Fuente 24V DC 5A	\$75.000
Costo total del montaje	\$1.206.000

ANEXOS

Anexo 1: Programa en Arduino para cálculo del ángulo de control

```

#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include <math.h>
#include "DualVNH5019MotorShield.h"
#include <SD.h>

File Datos; // Archivo para guardar en la SD
const int chipSelect = 10; // Se elige el pin 10 correspondiente al modelo del
  datalogger
DualVNH5019MotorShield md;
unsigned long aux_time; // Variables a usar para calcular el tiempo de ejecucion del
  controlador

unsigned long aux_time1;
boolean Primer_arranque=HIGH;
boolean Primer_calculo=HIGH;
// Verificacino del motor
void stopIfFault()
{
  if (md.getMIFault())
  {
    Serial.println("MI fault");
    while(1);
  }
}
//Variables del controlador

float en=0.0;
float en1=0.0;
float PV_n1=0.0;
float PV_n2=0.0;
float PVf_n1=0.0;
float PVf_n2=0.0;
float Valor_SP=0;
float PVf=0;
float u=0;

RTC_DS1307 rtc; // Variable del RTC

//Dias del mes
int DMes[]={31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31};
int Year;
int Mes;
int Dia;
float Hora;
float Minutos;
float Segundos;
float N;
float d;
float ET;
float TS;

```

```

float TC;
float L=-7.1162588; // Latitud del lugar
float D;
float hs; // Angulo horario
float h; // Altura solar
float ang_control;
float as;
float r2d=57.29578;
float Pv; // Variable del proceso
float U; // Accion de control
int Sp; // Setpoint
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  analogReference(INTERNAL);
  md.init(); // Encender puente-H
  //Comunicacion con datalogger
  #ifdef AVR
  Wire.begin();
  #else
  Wire1.begin(); // Shield I2C pins connect to all I2C bus on Arduino Due
  #endif

  ///CONFIGURACION DEL RELOJ/////
  rtc.begin();
  if (!rtc.isrunning()) {
    Serial.println("El RTC no esta funcionado!");
  }
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Configurar el RTC con la hora
  y fecha del computador

  ///CONFIGURACION DE LA MEMORIA SD/////

  Serial.print("Iniciando memoria SD ...");
  pinMode(10, OUTPUT);
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Fallo la memoria, o no esta presente");
    return;
  }
  Serial.println("Inicio de memoria SD finalizado.");
}

void loop()
{
  // Obtener la hora y fecha del DS1307
  DateTime t= rtc.now();
  Year=t.year();
  Mes=t.month();
  Dia=t.day();
  Hora=t.hour();
  Minutos=t.minute();
  Segundos=t.second();
  N=0; // Inicializar numero de dias

```

```

//Año bisiesto
if((Year%4==0&&Year%100!=0)||Year%400==0)
{
    DMes[1]=29;
}
else
{
    DMes[1]=28;
}
///// Realizar seguimiento del sol entre 8 am y 5 pm
if (Hora>=8&&Hora<=16){
    ///// Realizar seguimiento cada 15 min
    if(Minutos==0||Minutos==15||Minutos==30||Minutos==45||Primer_arranque==HIGH){
        /// Ejecutar el controlador por 1 min
        aux_time=millis();
        do{
            while(Primer_calculo==HIGH) {
                for (int i=0; i<=(Mes-2); i++){
                    N=N+DMes[i];
                }
                N=N+Dia;
            }
            //Calculo de ecuacion del tiempo
            d=0.98630137*(N-81); //angulo de desviacion
            ET=9.87*sin(2*d*PI/180)-7.53*cos(d*PI/180)-1.5*sin(d*PI/180); // Ecuacion del
            tiempo
            TC=Hora+Minutos/60; //Hora actual
            TS=TC-ET/60; //Tiempo solar
            //Calculo de angulo acimut
            D=23.44*sin((284+N)*360/365*PI/180); // Angulo de declinacion
            hs=(12-TS)*15; //Angulo inclinacion solar
            h=asin(cos(L*PI/180)*cos(D*PI/180)*cos(hs*PI/180)+sin(L*PI/180)*sin(D*PI/180))
            *180/PI; //Altura solar
            as=asin(cos(D*PI/180)*sin(hs*PI/180)/cos(h*PI/180))*180/PI; // Angulo acimut
            ang_control=atan(tan(h*PI/180)/sin(as*PI/180))*180/PI; // Angulo de control
            if (ang_control<0){
                ang_control=180+ang_control;
            }
            Primer_calculo=LOW;
        }
    }

    ///////////CONTROLADOR////////////////////////////////////

    float Valor_SP= ang_control;
    float PV_Pot= analogRead(A2)*1.1/1023.0; // Leer voltaje del potenciómetro
    float PV=211.85*PV_Pot*PV_Pot*PV_Pot-355.45*PV_Pot*PV_Pot+295.64*PV_Pot+24.93; //
    Convertir a angulo
    float PVf=0.002554*PV+0.005109*PV_n1+0.002554*PV_n2+ 1.852*PVf_n1-0.8622*PVf_n2;
    // Filtrar PV
    // Limitar valor de punto de consigna
    if (Valor_SP>150){
        Valor_SP=150;
    }
    if (Valor_SP<60){
        Valor_SP=60;
    }
}

```

```

}
en=Valor_SP-PVf; // Error
int Kp=2.5; // Ganancia proporcional
int Kd=0.5; // Ganancia derivativa

float u= Kp*en+Kd*(en-en1); // Accion de control

// Limitar accion de control
if (u>100){
    u=100;
}
if (u<-100){
    u=-100;
}

//Cerca a cero accion de control cero
if (u<10){
    if (u>-10){
        u=0;
    }
}

int Uc=u*4; // Puente H recibe valores entre -400 y 400
md.setM1Speed(Uc); // Enviar valor de PWM al puente H
stopIfFault(); // Detener motor si algo falla

// Actualizar valores anteriores
en1=en;
PV_n2=PV_n1;
PV_n1=PV;
PVf_n2=PVf_n1;
PVf_n1=PVf;

//GUARDAR A LA MEMORIA SD/////
Datos = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE); // Abrir archivo
if (Datos) { // Escribir en memoria SD si esta presente
    Datos.print(Valor_SP);
    Datos.print(",");
    Datos.print(PV);
    Datos.print(",");
    Datos.print(PVf);
    Datos.print(",");
    Datos.print(u);
    Datos.print(", ");
    Datos.print(t.year(), DEC);
    Datos.print('/');
    Datos.print(t.month(), DEC);
    Datos.print('/');
    Datos.print(t.day(), DEC);
    Datos.print(' ');
    Datos.print(t.hour(), DEC);
    Datos.print(':');
    Datos.print(t.minute(), DEC);
    Datos.print(':');
}

```

```

    Datos.print(t.second(), DEC);
    Datos.println();
    Datos.close(); // Cerrar archivo en memoria SD
}

// Enviar al Serial
Serial.print("SP= ");
Serial.print(Valor_SP);
Serial.print(" ");
Serial.print("PV= ");
Serial.print(PVf);
Serial.print(" ");
Serial.print("U= ");
Serial.print(u);
Serial.print(" ");
Serial.print(t.year(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(t.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(t.day(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(t.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(t.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(t.second(), DEC);
Serial.println();

Primer_arranque=LOW;
aux_time1=millis()-aux_time;
} while(aux_time1<61000);
}
}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////CODIGO PARA LA NOCHE////////////////////////////////////
////////////////////////////////////ESTADO DE REPOSO////////////////////////////////////
if (Hora<8||Hora>16){
    //// Realizar seguimiento cada 15 min
    if(Minutos==30||Primer_arranque==HIGH){
        // Ejecutar el controlador por 1 min
        aux_time=millis();
        do{

////////////////////////////////////CONTROLADOR////////////////////////////////////

float Valor_SP=90;
float PV_Pot= analogRead(A2)*1.1/1023.0; // Leer voltaje del potenciómetro
float PV=211.85*PV_Pot*PV_Pot*PV_Pot-355.45*PV_Pot*PV_Pot+295.64*PV_Pot+24.93; //
    Convertir a angulo
float PVf=0.002554*PV+0.005109*PV_n1+0.002554*PV_n2+ 1.852*PVf_n1-0.8622*PVf_n2;
    // Filtrar PV
// Limitar valor de punto de consigna
if (Valor_SP>150){
    Valor_SP=150;
}
}
}
}

```

```

if (Valor_SP<60){
    Valor_SP=60;
}
en=Valor_SP-PVf; // Error
int Kp=2.5; // Ganancia proporcional
int Kd=0.5; // Ganancia derivativa

float u= Kp*en+Kd*(en-en1); // Accion de control

// Limitar accion de control
if (u>100){
    u=100;
}
if (u<-100){
    u=-100;
}

//Cerca a cero accion de control cero
if (u<10){
    if (u>-10){
        u=0;
    }
}

int Uc=u*4; // Puente H recibe valores entre -400 y 400
md.setMISpeed(Uc); // Enviar valor de PWM al puente H
stopIfFault(); // Detener motor si algo falla

// Actualizar valores anteriores
en1=en;
PV_n2=PV_n1;
PV_n1=PV;
PVf_n2=PVf_n1;
PVf_n1=PVf;

//GUARDAR A LA MEMORIA SD/////
Datos = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE); // Abrir archivo
if (Datos) { // Escribir en memoria SD si esta presente
    Datos.print(Valor_SP);
    Datos.print(",");
    Datos.print(PV);
    Datos.print(",");
    Datos.print(PVf);
    Datos.print(",");
    Datos.print(u);
    Datos.print(", ");
    Datos.print(t.year(), DEC);
    Datos.print('/');
    Datos.print(t.month(), DEC);
    Datos.print('/');
    Datos.print(t.day(), DEC);
    Datos.print(' ');
    Datos.print(t.hour(), DEC);
    Datos.print(':');
}

```

```
Datos.print(t.minute(), DEC);
Datos.print(':');
Datos.print(t.second(), DEC);
Datos.println();
Datos.close(); // Cerrar archivo en memoria SD
}
// Enviar al Serial
Serial.print("SP= ");
Serial.print(Valor_SP);
Serial.print(" ");
Serial.print("PV= ");
Serial.print(PVf);
Serial.print(" ");
Serial.print("U= ");
Serial.print(u);
Serial.print(" ");
Serial.print(t.year(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(t.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(t.day(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(t.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(t.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(t.second(), DEC);
Serial.println();

Primer_arranque=LOW;
aux_time1=millis()-aux_time;
} while(aux_time1<61000);
}
}
Primer_calculo=HIGH;
}
```

Anexo 2: Manual para reprogramar la fecha Y hora en el el Arduino del seguidor solar

1. Asegurarse de tener instalado la IDE de Arduino y las librerías para el RTC y el Dual-VNH5019

Librería de Dual VNH5019: <http://github.com/pololu/dual-vnh5019-motor-shield>

RTC DS1307: <https://github.com/adafruit/RTClib/archive/master.zip>

2. Cargar el programa Código1.ino en el arduino (Este carga la hora del computador al arduino)
3. Cargar el programa Código2.ino en el arduino (Este evitara que el arduino reinicie su hora a la del computador cada vez que se apague. En vez de eso el usara la hora mantenida por la batería del reloj)

Anexo 3: Manual De Conexiones Del Arduino Al Seguidor

ADVERTENCIA: Antes de desconectar algún cable se debe desenchufar la fuente DC. También debe ser lo último a conectarse al conectar nuevamente el sistema o cargar un nuevo programa.

Potenciómetro → Arduino

Cable marron a 3.3V

Cable azul a GND

Cable Azul/Blanco a Entrada analoga A2

Fuente DC → Puente H (Borneras azules)

V+ a VIN(Bornera Azul)

V- a GND(Bornera Azul)

Motor → Puente H (Borneras Azules)

Cable Azul a M1A

Cable Marron a M1B

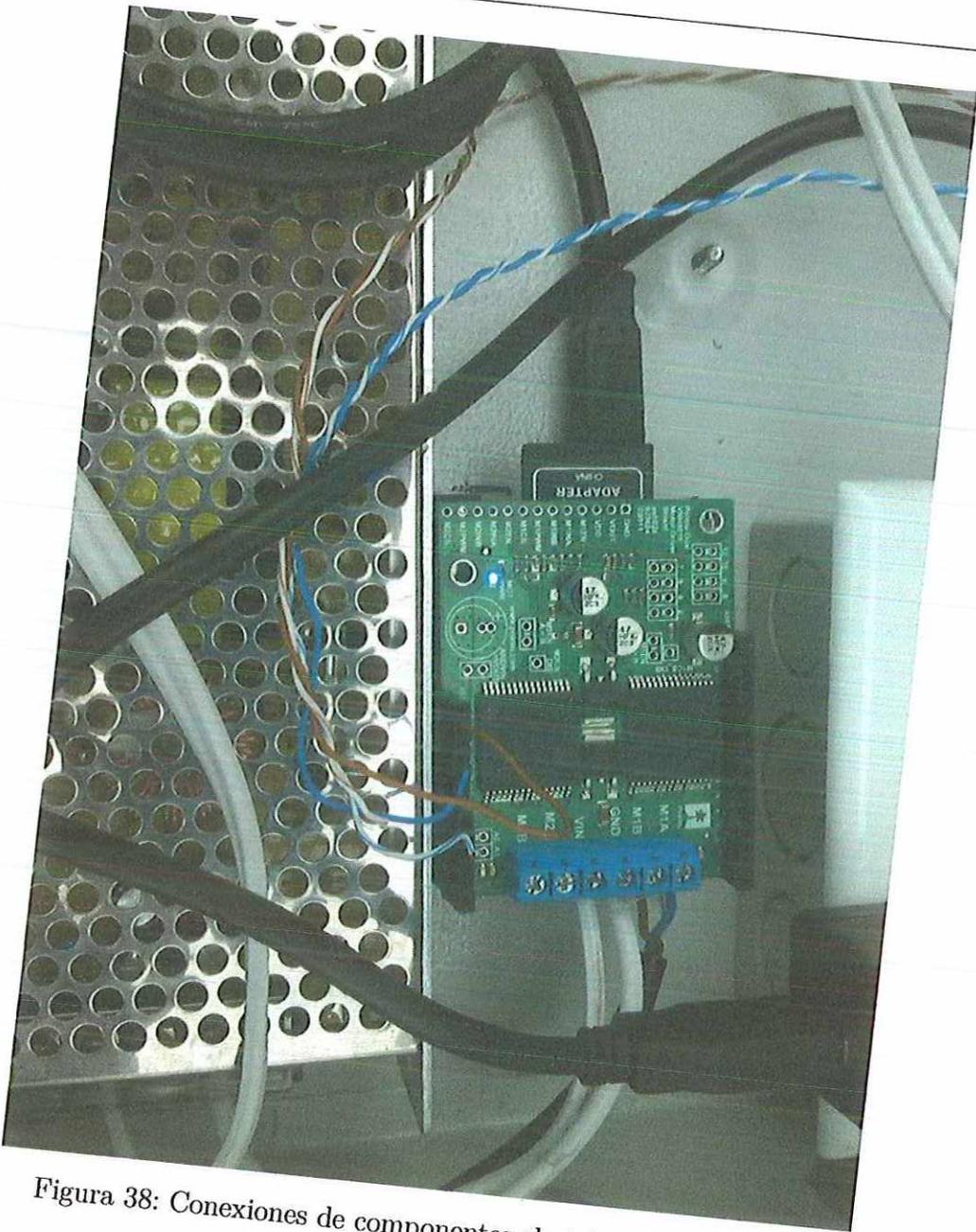


Figura 38: Conexiones de componentes electricos y electronicos

Bibliografía

- [1] Luis Jutglar Bayeras. *Energía solar(Energía Alternativas y Medio Ambiente)*. CEAC, 2004. Libro.
- [2] J Muller M. Equation of time – problem in astronomy. *Acta Phys Pol A 88 Supplement, S-49*, 1995.
- [3] Jan F. Kreider. *Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power*,, volume 4. 3 edition, 2006.
- [4] Soteris Kalogirou. *Solar energy engineering processes and systems*. Elsevier/Academic Press, 1 edition, 2009. Libro.
- [5] Claude Audoin. *The measurement of time : time, frequency and the atomic clock*. Cambridge University Press, Cambridge New York, 2001.
- [6] José Beltrán Adán. Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos. Tesis de maestría de ciencias, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2007.
- [7] Roger Messenger. *Photovoltaic systems engineering*. CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [8] Gary Reysa. Evaluating your site for solar energy. http://builditsolar.com/SiteSurvey/site_survey.htm, 2006. [Online; accedido Dic-11-2014].
- [9] Joseph Shigley. *Teoria de máquinas y mecanismos*. McGraw-Hill, México, 1988.