

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA



## **CONTROL DE PLATAFORMA PAN-TILT PARA SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO DE FUENTES LUMÍNICAS PARA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA.**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**Estudiantes:**

Karen Viviana Charry Ibarra  
Diana Isabel Solís Abella

**Director:**

Ing. Gabriel Perilla G. M.Sc.

**Facultad de Ingeniería  
Departamento de Electrónica  
Bogotá 2014-1**

El presente documento tiene como objetivo tener una normativa a seguir, para proveer los mejores medios de comunicación logrando un entendimiento más ágil y fluido con lo referente al tema a tratar “Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica”. Se espera que este documento cumpla con su objetivo y se logre una claridad en el contenido.

## Tabla de contenido

<b>1. Introducción.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Marco teórico.....</b>	<b>7</b>
2.1 Célula Fotovoltaica. ....	7
2.2 Energía Solar. ....	8
2.2.1 Ventajas de la energía solar.....	8
2.2.2 Desventajas de la energía solar. ....	8
2.3 Motores DC de paso unipolares a 5 - 20V: .....	8
2.4 Microcontrolador Arduino uno R3:.....	12
2.5 Batería polímero de litio (LiPo): .....	13
2.6 Seguidor Solar.....	16
<b>3. Especificaciones. ....</b>	<b>17</b>
3.1 Sistema de sensado.....	18
3.2 Sistema de control.....	18
3.3 Plataforma pan-tilt.....	19
3.4 Sistema de almacenamiento. ....	20
3.5 Motor paso a paso unipolar .....	21
3.6 Integración del sistema.....	21
3.7 Elevadores .....	22
<b>4. Desarrollo.....</b>	<b>23</b>
<b>5. Análisis de resultados.....</b>	<b>33</b>
<b>6. Conclusiones. ....</b>	<b>37</b>
<b>7. Bibliografía y fuentes de información. ....</b>	<b>38</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>39</b>
<b>Anexo 2.....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participación de las distintas fuentes en el consumo mundial de energía primaria.....	4
Figura2. Sistema de adquisición de radiación solar.....	5

***Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.***  
***Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.***

---

Figura 3. Motor paso a paso.....	9
Figura 4. Principio de funcionamiento de un motor paso a paso.....	10
Figura 4. Esquema motor Unipolar.....	10
Figura 5. Secuencia normal motor paso a paso unipolar .....	10
Figura 6. Secuencia del tipo Wave drive motor paso a paso unipolar .....	11
Figura 7. Secuencia del tipo medio paso motor paso a paso unipolar .....	11
Figura 8. Microcontrolador arduino uno R3.....	12
Figura 9. Celda LiPo.....	13
Figura 10. Grupo de celdas LiPo.....	13
Figura 11. Perfil de descarga batería Polímero de Litio.....	14
Figura 12. Esquema seguidor solar con dos grados de libertad.....	15
Figura 13. Diagrama de bloques.....	16
Figura 14. Plataforma con dos grados de libertad.....	18
Figura 15. Diagrama de flujo movimiento motores paso a paso.....	20
Figura 16. Celda solar utilizada.....	22
Figura 17. Relación corriente-voltaje celda solar.....	23
Figura 18. Característica corriente-voltaje celda solar.....	23
Figura 19. Potencia suministrada por la celda solar.....	23
Figura 20. Amplificador operación con G 30.....	24
Figura 21. Arduino uno R3.....	24
Figura 22. Esquemático motor pasó a paso.....	25
Figura 23. Driver motor pasó a paso.....	25
Figura 24. Caracterización pasos de encendido del motor.....	26
Figura 25. Entrada-salida salida motor DC.....	26
Figura 26. Modelo eléctrico y mecánico del motor.....	26
Figura 27. Esquema de conexión para la obtención de parámetros.....	27
Figura 28. Constante de tiempo en lazo abierto.....	28
Figura 29. Boost DC 3V-35V.....	28
Figura 30. Cargador Batería de LI-Ion para 2 Celdas.....	29

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de los diferentes tipos de Células fotovoltaicas.....	7
Tabla 2. Angulo de pasos estándar.....	12
Tabla 3. Nomenclatura del microcontrolador arduino uno R3.....	12
Tabla 4. Indicador numérico batería Polímero de Litio.....	13
Tabla 5. Tabla comparativa entre tecnologías de baterías.....	19
Tabla 6. Parametrización celda solar.....	22
Tabla 7. Características microcontrolador.....	25
Tabla 8. Características Boost DC utilizado.....	29

## 1. Introducción.

El presente documento desea dar a conocer la metodología, diseño y práctica utilizada para desarrollar el proyecto “Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica”. Donde se permitirá proveer al lector un conocimiento del tema de forma básica y sencilla.

Desde siempre la energía ha sido una necesidad básica para la vida del hombre. Conforme este ha ido encontrando nuevas fuentes energéticas se ha ido desarrollando cada vez más. Las fuentes de energía utilizadas han ido evolucionando en el tiempo. En la antigüedad la energía era proporcionada por la madera de los bosques, la esclavitud y los animales. En la edad media se introdujeron otras fuentes como la hidráulica y la eólica, pero fue el descubrimiento de los combustibles fósiles en el siglo XIX, primero el carbón y posteriormente el petróleo, lo que ha llevado a la humanidad a la formidable prosperidad con la que vive hoy día.

La utilización indiscriminada de estos combustibles fósiles, hizo que el consumo per-capita se multiplicara por 4 en pocos años, esto ligado a un incremento exponencial de la población hizo que el consumo energético mundial creciera a tales niveles que provocó grandes crisis. Hoy en día podemos decir que en países industrializados el hombre consume unas 17 veces más de la energía mínima requerida para vivir, tal consumo de energía primaria se reparte entre las siguientes fuentes:

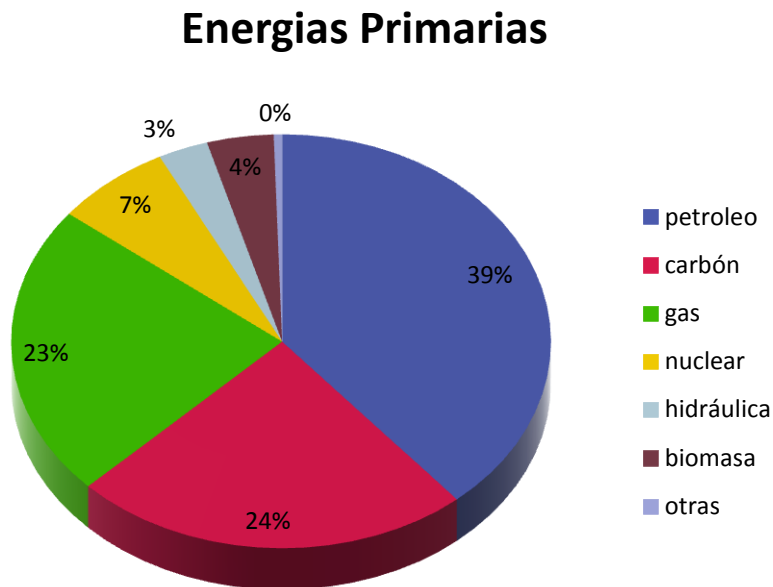


Figura 1. Participación de las distintas fuentes en el consumo mundial de energía primaria.

De acuerdo con la gráfica el modelo energético actual se basa en la utilización a gran escala de los combustibles fósiles: petróleo, gas y carbón, con una participación de la energía consumida de más del 80% . Esto genera tres problemas fundamentales que marcan su carácter de no sostenibilidad de este modelo: desarrollos centralizados, agotamiento de los recursos y deterioro medioambiental.

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.**  
**Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

El interés por realizar el proyecto surge por el deterioro medioambiental, el deseo de mejorar y contribuir al medio ambiente, viendo la opción de disminuir el consumo de energías convencionales, fundamentalmente las ocasionadas por el agotamiento de los recursos fósiles, e incrementar el desarrollo de mecanismos que generen energías renovables de una manera eficiente, mejorando la calidad de vida del ser humano y contribuyendo a que las personas de bajos recursos tengan acceso a este tipo de tecnología.

Es por esta razón que este proyecto de grado consiste en implementar y diseñar un sistema de control de posición con el objetivo de lograr posicionar la célula fotovoltaica en el punto de máxima radiación solar, para optimizar la adquisición de la energía usando el método de girasol (método que sigue el recorrido del sol de oriente a occidente). El seguidor solar consiste en mover una plataforma pan-tilt<sup>1</sup> (dos motores de corriente continua DC) con una celda de conversión fotovoltaica sobre ella (seguidor solar) que permitirá determinar la máxima radiación incidente, con el fin de posicionar la plataforma en función de la mayor cantidad de luz, irradiación, de tal modo que la plataforma y la celda solar obtengan un mejor desempeño en la captación de energía solar.

Para ello, se utiliza la celda solar como sensor para determinar la dirección de la mayor cantidad de luz emitida por el sol y un sistema de salida en corriente que se transformara a voltaje por medio de un convertidor de corriente a voltaje para lograr controlar la rotación y el ángulo de giro de la plataforma.

Finalmente se desea que el sistema se alimente de forma autónoma permitiendo el movimiento de la plataforma, con el fin de no requerir una fuente externa y así lograr que el sistema sea eficiente generando un lazo cerrado productivo. El diagrama de bloques y sus componentes se muestran en la figura 2.

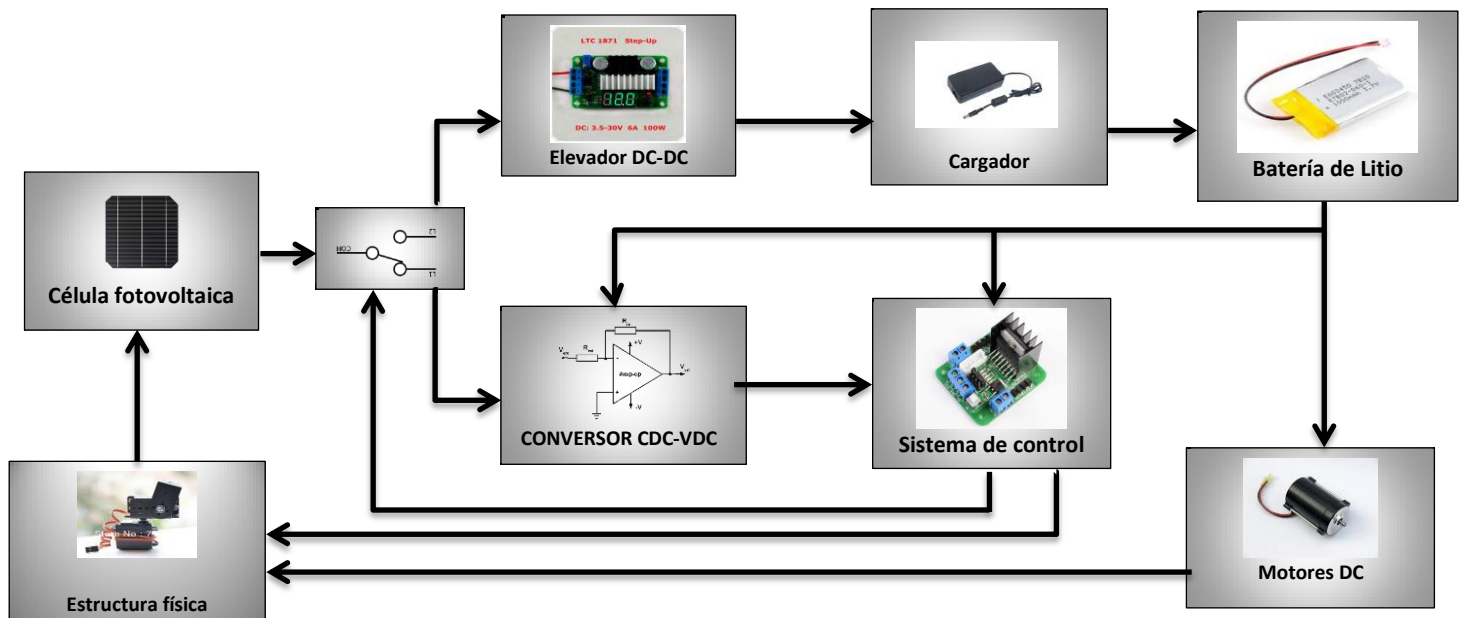


Figura2. Sistema de adquisición de radiación solar.

<sup>1</sup> Plataforma con dos grados de libertad, que se mueve de norte a sur y de oriente a occidente.

***Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.***

---

Por tal motivo se plantea como objetivo general desarrollar un sistema de orientación para una plataforma pan-tilt, mediante el seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica. Y como objetivos específicos controlar una plataforma pan-tilt para lograr la mayor radiación incidente, desarrollar el sistema de sensado de la radiación incidente y desarrollar el sistema de control de posición de la plataforma.

## 2. Marco teórico

Un seguidor de fuentes lumínicas (seguidor solar) es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares o células fotovoltaicas de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, abarcando el recorrido que hace el sol desde el oriente hasta el occidente y los movimientos mínimos que se generan de norte a sur. Para entender más el funcionamiento de este sistema se explicará en forma detallada las características de cada uno de los módulos a utilizar en el prototipo.

### 2.1 Célula Fotovoltaica.

Es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía lumínica en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico. Compuesto de un material que presenta efecto fotoeléctrico: absorben fotones de luz y emite electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada. La eficiencia de conversión media obtenida por las células disponibles comercialmente está alrededor del 14%, pero según la tecnología utilizada varía desde el 6% hasta un 25%. Para obtener potencias mayores las celdas son conectadas en serie o paralelo formando módulos con potencias típicas del orden de los 50 W. a 100 W. (Morelos, 2009).

La característica principal de un módulo fotovoltaico es la eficiencia en la conversión de energía que está determinada por el tipo de material y tecnología utilizada en su fabricación. A continuación presentamos la Tabla 1. (Council, 2005), donde podemos evidenciar cómo se encuentra el mercado de células fotovoltaicas:

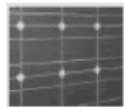
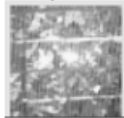

Módulo	Eficiencia		Color	Fabricación	% Mercado
	Laboratorio	Campo			
Monocristalino cSi 	24%	15-18%	Azul	A partir de silicio puro fundido y dopado de Boro	32%
Policristalino pSi 	19-20%	12-14%	Distintos tonos de azul	Igual que el monocristalino pero menor número de fases de cristalización	58%
Amorfo 	16%	Menor al 10%	Marrón	Se deposita como lámina delgada sobre un sustrato	10%

Tabla1. Características de los diferentes tipos de Células fotovoltaicas

Las celdas solares de silicio se elaboran utilizando planchas (wafers) monocristalinas, planchas policristalinas o láminas delgadas

Las planchas monocristalinas (de aproximadamente 1/3 a 1/2 de milímetro de espesor) se cortan de un gran lingote monocristalino que se ha desarrollado a aproximadamente 1400°C, este es un proceso muy costoso. El silicio debe ser de una pureza muy elevada y tener una estructura cristalina casi perfecta.



*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.*

*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

Las planchas policristalinas son realizadas por un proceso de moldeo en el cual el silicio fundido es vertido en un molde y se lo deja asentar. Entonces se rebana en planchas. Como las planchas policristalinas son hechas por moldeo son apreciablemente más baratas de producir, pero no tan eficientes como las celdas monocristalinas. El rendimiento más bajo es debido a las imperfecciones en la estructura cristalina resultando del proceso de moldeo.

El silicio amorfo, una de las tecnologías de lámina delgada, es creado depositando silicio sobre un sustrato de vidrio de un gas reactivo tal como silano ( $\text{SiH}_4$ ). El silicio amorfo es de un grupo de tecnologías de lámina delgada. Este tipo de célula solar se puede aplicar como película a sustratos de bajo costo tales como cristal o plástico.

## **2.2 Energía Solar.**

Existen fuentes de energía que por su carácter de renovables, o por la enorme cantidad de reserva de la que se dispone pueden ser consideradas ilimitadas, es el caso del sol. Este se comporta como un cuerpo negro que por medio de un proceso de fusión nuclear, en donde se unen los núcleos de átomos ligeros como el hidrógeno y el helio, liberan grandes cantidades de energía radiante que llegan hasta la superficie del sol pasando de unos 20 millones de grados centígrados a unos  $6000^\circ\text{C}$ .

La cantidad de energía solar recibida anualmente por la tierra es  $1,5 \times 10^{18}$  kWh, representa 10.000 veces el consumo de energía en ese mismo periodo, esto se interpreta como que además de que el sol es el actor principal de los procesos biológicos en la tierra, este puede ser considerado una fuente inagotable de energía la cual puede ser aprovechada mediante un adecuado sistema de captación y conversión a otro tipo de energía.

### **2.2.1 Ventajas de la energía solar.**

La energía solar es una de las alternativas energéticas más importantes en la actualidad, esta ofrece una serie de ventajas como:

- Recursos naturales inagotables.
- Es una energía limpia que no genera emisiones de gases contaminantes.
- Es una solución ideal para disponer de electricidad en zonas alejadas.

### **2.2.2 Desventajas de la energía solar.**

Entre los inconvenientes comparados con los de las fuentes de energías convencionales se encuentran:

- El impacto visual de los parques solares, que suelen ocupar grandes superficies.
- El costo de la instalación es elevado.
- El periodo de amortización de la inversión es largo.

## **2.3 Motores DC de paso unipolares a 5 - 20V:**

Cuando se adquirió la plataforma pan-tilt FY160 contaba con dos motores paso a paso unipolares; se realizó la investigación de estos motores y se evidenció que su movimiento presenta un elevado grado de exactitud y una muy buena regulación de la velocidad. Por tal motivo se decidió trabajar con base en el funcionamiento de estos motores ya que suplen la necesidad del proyecto de posicionar una celda solar, con mecanismos que producen movimientos muy precisos.

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.*  
*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se les aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.2^\circ$ , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 300 para el segundo caso ( $1.2^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$ .

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

El motor paso a paso está constituido esencialmente por dos partes:

- Una fija llamada "estator", construida a base de cavidades en las que van depositadas las bobinas que excitadas convenientemente formarán los polos norte-sur de forma que se cree un campo magnético giratorio.
- Una móvil, llamada "rotor" construida mediante un imán permanente, con el mismo número de pares de polos, que el contenido de una sección de la bobina del estator, y este conjunto va montado sobre un eje soportado por dos cojinetes que le permiten girar libremente.



**Figura 3. Motor paso a paso.**

Si por el medio que sea, conseguimos excitar el estator creando los polos N-S, y hacemos variar dicha excitación de modo que el campo magnético formado efectúe un movimiento giratorio, la respuesta del rotor será seguir el movimiento de dicho campo, produciéndose de este modo el giro del motor.

Puede decirse que un motor paso a paso es un elemento que transforma impulsos eléctricos en movimientos de giro controlados, ya que podemos hacer girar el motor en el sentido que deseamos y dar el número de vueltas y grados que necesitamos.

La figura 4 ilustra el modo de funcionamiento de un motor paso a paso unipolar, suponemos que las bobinas L1, L2, L3 y L4 poseen un núcleo de hierro dulce capaz de imantarse cuando dichas bobinas sean

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.**  
**Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

recorridas por una corriente eléctrica. Por otra parte el imán puede girar libremente sobre el eje de sujeción central.

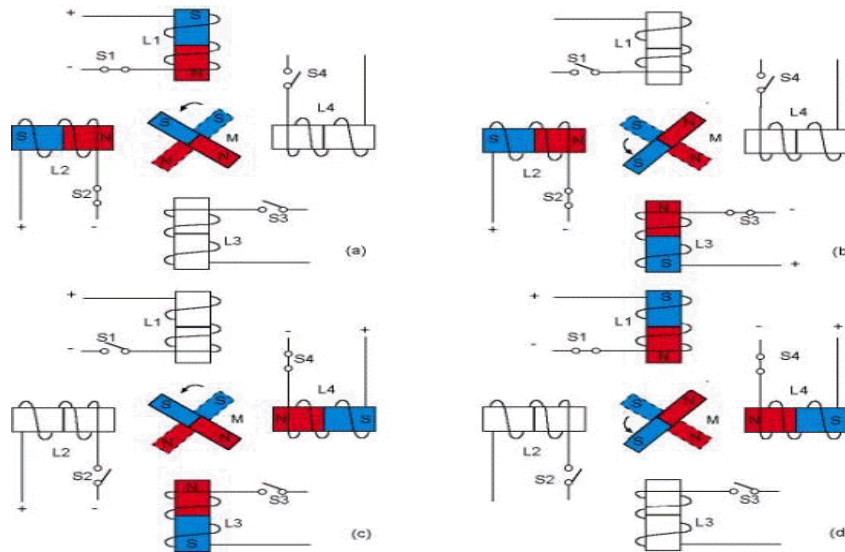


Figura 4. Principio de funcionamiento de un motor paso a paso unipolar

El motor paso a paso unipolar contiene cuatro fases y la corriente circula por las bobinas en un único sentido.

Si inicialmente se aplica la corriente a L1 y L2 cerrando los interruptores S1 y S2, se generarán dos polos norte que atraerán al polo sur del imán hasta encontrar la posición de equilibrio entre ambos como puede verse en la Figura 4(a). Si se abre posteriormente S1 y se cierra S3, por la nueva distribución de polos magnéticos, el imán evoluciona hasta la situación representada en la Figura 4(b). Siguiendo la secuencia representada en la Figuras 4 (c) y 4 (d); de la misma forma se obtienen avances del rotor de 90 grados.

Ahora bien, si las secuencias de excitación se generan en orden inverso, el rotor girará en sentido contrario, por lo que fácilmente podemos deducir que el sentido de giro en los motores paso a paso es reversible en función de la secuencia de excitación y, por tanto, se puede hacer avanzar o retroceder al motor un número determinado de pasos según las necesidades.

Dichos motores se controlaran con la ayuda de un driver ULN2803, el cual es un arreglo de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar cargas hasta de 500 mA., ideal para aplicaciones entre los circuitos digitales de bajo nivel lógico. Las entradas de activación pueden ser directamente activadas por un microcontrolador.

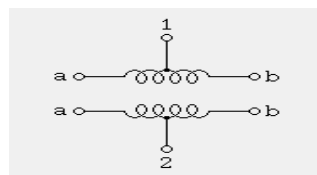


Figura 5. Esquema motor Unipolar.

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.*  
*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

En los motores unipolares las bobinas del estator están conectadas en serie formando cuatro grupos. Estas a su vez, se conectan dos a dos, también en serie, y se montan sobre dos estatores diferentes como se observa en la figura 6.

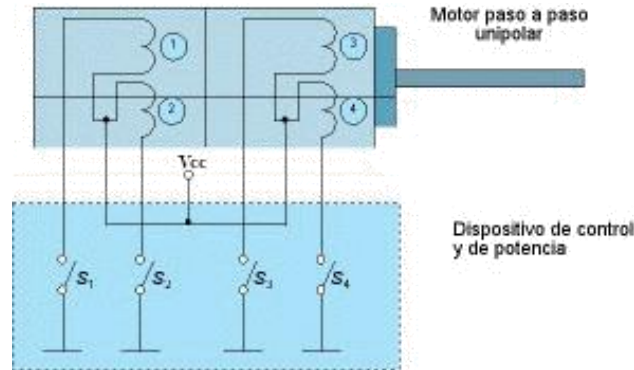


Figura 6. Control motor unipolar.

Existen tres secuencias posibles para este tipo de motores. Todas las secuencias comienzan nuevamente por el paso 1 una vez alcanzado el paso final (4 o 8). Para revertir el sentido de giro, simplemente se deben ejecutar las secuencias en modo inverso. Estos motores suelen tener 5 o 6 cables de salida, dependiendo de su conexión interna. Este tipo se caracteriza por ser más simple de controlar. En nuestro caso utilizamos secuencia normal la cual se describe a continuación:

**Secuencia normal:** Esta es la secuencia más usada y la que generalmente recomienda el fabricante. Con esta secuencia el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención como se muestra a continuación:

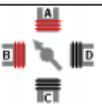



PASO	A	B	C	D	
1	1	1	0	0	
2	0	1	1	0	
3	0	0	1	1	
4	1	0	0	1	

Figura 7. Secuencia normal motor paso a paso unipolar. (SEBASTIAN, 2006)

Desde el punto de vista mecánico, es conveniente conocer el significado de algunas de las principales características y parámetros que se definen sobre un motor paso a paso:

- Par dinámico de trabajo (Working Torque): Es el momento máximo que el motor es capaz de desarrollar sin perder paso, es decir, sin dejar de responder a algún impulso de excitación del estator y

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.**

**Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

dependiendo, evidentemente, de la carga. Hay que tener en cuenta que, cuando la velocidad de giro del motor aumenta, se produce un aumento de la f.e.m. en él generada y, por tanto, una disminución de la corriente absorbida por los bobinados del estator, como consecuencia de todo ello, disminuye el par motor.

- Par de mantenimiento (Holding Torque): Es el par requerido para desviar, en régimen de excitación, un paso el rotor cuando la posición anterior es estable, es mayor que el par dinámico y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable dada
- Par de detención (Detention Torque): Es un par de freno que siendo propio de los motores de imán permanente, se deriva de la acción del rotor cuando los devanados del estator están desactivados.
- Angulo de paso (Step angle): Se define como el avance angular que se produce en el motor por cada impulso de excitación. Se mide en grados, siendo los pasos estándar más importantes los siguientes:

Grados por impulso de excitación	Nº de pasos por vuelta
0,72°	500
1,8°	200
3,75°	96
7,5°	48
15°	24

**Tabla 2. Angulo de pasos estándar.**

- Numero de pasos por vuelta: Es la cantidad de pasos que ha de efectuar el rotor para realizar una revolución completa.

$$NP = \frac{360}{\alpha}, \text{ donde } \alpha \text{ es el angulo de paso}$$

- Frecuencia de paso máximo (Maximum pull-in/out): Se define como el máximo número de pasos por segundo que puede recibir el motor funcionando adecuadamente.
- Momento de inercia del rotor: Es su momento de inercia asociado que se expresa en gramos por centímetro cuadrado.

#### **2.4 Microcontrolador Arduino uno R3:**

Este microcontrolador se seleccionó debido a que cumple con los tiempos de respuesta, memoria y periféricos de in/out suficientes para dar respuesta a nuestros requerimientos. Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, cada uno de los cuales cumple una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de proceso, memoria y periféricos de entrada/salida.

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.*

*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

Este microcontrolador viene con una nomenclatura con números y letras los cuales se detallan en la siguiente tabla:

Modelo	Microcontrolador	Voltaje de entrada	Voltaje del sistema	Frecuencia de Reloj	Digital I/O	Entradas Analógicas	PWM	Interfaz de Programación
<b>Arduino Uno - R3</b>	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	USB via Atmega16U2

**Tabla 3. Nomenclatura del microcontrolador arduino uno R3.**

El Arduino uno puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La tarjeta puede funcionar con un suministro externo de 6 a 20 voltios. Si se proporcionan menos de 6V, no obstante, el pin de 5V puede suministrar menos de cinco voltios y las salidas análogo/digital pueden ser inestables. Si se utiliza más de 12V, el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

Los pines se distribuyen de la siguiente manera:

Cada uno de los 14 pines digitales en el Uno se puede utilizar como una entrada o salida, usando (funciones) `pinMode ()`, `digitalWrite ()`, y `digitalRead`. Operan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA. y tiene una resistencia de pull-up (desconectado por defecto) de 20-50 kOhms.



**Figura 8. Microcontrolador arduino uno R3.**

## **2.5 Batería polímero de litio (LiPo):**

El Litio es un metal con gran potencial electroquímico, al ser uno de los metales más reactivos, permite alcanzar una alta densidad de energía para aplicaciones que requieran un almacenamiento considerable. Existen muchas variaciones de la química básica del Litio, lo que permite desarrollar y optimizar su funcionamiento en módulos denominados celdas. En la actualidad, este tipo de celdas no usan solo Litio,

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.**

**Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

sino una combinación con otros elementos, lo que genera un compuesto no reactivo con el agua, brindando mayor seguridad debido a los incidentes ocurridos con los primeros prototipos. La denominación de LiPo, se debe a que su composición “Lithium-ion polymer”, en donde se utiliza una matriz de iones de polímeros conductivos, para realizar la reacción con iones de Litio líquidos. Además se utiliza un electrolítico a base de polímeros de plástico, que permite una mejor y más sólida celda resistente a fugas. Para mayor información del proceso electroquímico y el funcionamiento específico consultar la referencia. (Energy, 2008).

Las baterías de polímero de Litio se manejan en paquetes que contiene una o más celdas, dependiendo de este arreglo se puede determinar características como la tensión (conexión en serie / paralelo), Capacidad (número de bloques en paralelo) y la clasificación C, posteriormente desarrollada. Un ejemplo de lo anteriormente ilustrado, se puede ver en la Figura 9 y 10.

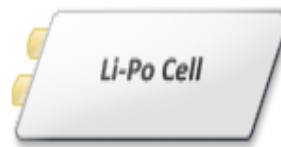


Figura 9. Celda LiPo. (Energy, 2008)

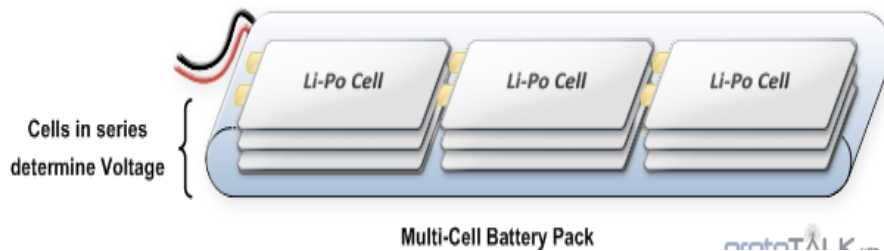


Figura 10. Grupo de celdas LiPo. (Energy, 2008)

• **Tensión**

La tensión se determina según el número de celdas conectadas en serie, este valor se determina mediante un indicador o un valor numérico impreso. Según sea el caso se tiene una equivalencia para este valor según la Tabla 4.

Indicador	Tensión Nominal
1S	3,7V
2S	7,4V
3S	11,1V
4S	14,8V

Tabla 4. Indicador numérico batería Polímero de Litio. (Energy, 2008)

Generalmente este tipo de batería tiene una tensión nominal que abarca el rango de 3,7 V a 14,8V, en el cual el valor de 3,7 V es la tensión promedio por celda. Dependiendo de su uso, cada celda empieza desde una tensión máxima de 3,7 V hasta 3,4 V, valor en el cual la batería se agota. Si se sigue utilizando, esta



**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.**  
**Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

permite llegar hasta un voltaje de 3,0 V en donde el circuito de protección la desconecta. Este perfil de descarga se puede ver con mayor claridad en la Figura 11.

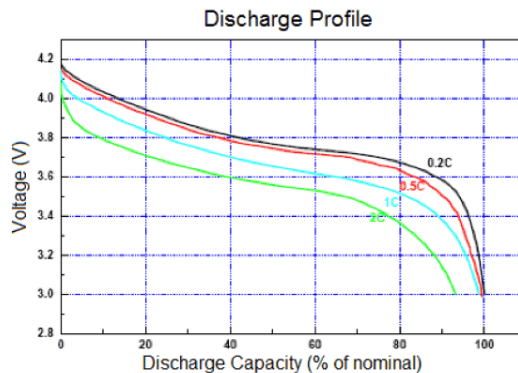


Figura 11. Perfil de descarga batería Polímero de Litio. (Moore, 2008)

- **Capacidad:**

La capacidad de la batería se basa en dos aspectos, el primero es la capacidad de una sola celda y el segundo en el número de bloques en paralelo. Para poder aumentar la capacidad de la batería, se debe por lo menos duplicar la cantidad de celdas.

- **Clasificación C:**

Este tipo de clasificación define la máxima descarga continua que se puede obtener de una batería, con la que se puede determinar cuántos Amperios puede entregar al sistema sin sobrepasar el límite de temperatura. Es importante saber cuánto es el consumo del sistema, debido a que una alta tasa de descarga aumentaría considerablemente la temperatura y podría llegar a producir la combustión de la misma. Una forma de saber cuánta corriente puede entregar la batería es utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Capacidad [mAh]}}{1000} * C \text{ rating} = \# \text{ Amperios}$$

Las bondades de estas baterías están relacionadas con una reducción del peso de los dispositivos por unidad. Las baterías de litio son más ligeras que sus equivalentes de níquel cadmio o níquel hidruro. Los electrodos de las baterías de este metal y de carbono son mucho más ligeros, además, el litio es un metal muy reactivo. Existe una gran cantidad de energía potencial almacenada en sus enlaces atómicos, mucha cantidad de energía en muy poco espacio.

Mientras una batería de litio es capaz de almacenar del orden de 150 vatios hora de electricidad por kilogramo de peso de la batería, una pila ordinaria de metal de níquel solo llega a acoger 100 vatios hora para la misma relación de peso, también la batería puede perder, en el peor de los casos, un 5% de su energía acumulada, otro tipo de baterías pueden disipar hasta un equivalente del 20% si no se recarga, además las baterías de litio no tienen lo que se denomina como efecto memoria, en teoría las baterías corrientes hay que descargarlas, las de litio no.



*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.*

*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

Adicionalmente las baterías de litio pueden soportar cientos de ciclos de carga y descarga sin que se vea afectado su rendimiento, por tal motivo y según lo expresado anteriormente se seleccionó este tipo de batería para nuestro diseño, debido a que cuenta con más bondades que problemas, y sus bondades se adaptan perfectamente a nuestro diseño.

## 2.6 Seguidor Solar.

Es un dispositivo conformado por una parte fija y una móvil, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar, para lo cual cuenta con una superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento. Los seguidores solares pueden ser clasificados según el tipo de movimiento que realicen y según el proceso de seguimiento. En nuestro caso se desea implementar un seguidor solar de dos ejes debido a que debemos posicionar la celda para obtener el punto máximo de radiación solar abarcando distintos movimiento para aprovechar todos los puntos de recepción. Por eso nuestro enfoque es lograr un movimiento azimut y rotacional. Por tal motivo el seguidor seleccionado cuenta con dos grados de libertad y está en capacidad de realizar un seguimiento total del sol, tanto en inclinación como en posición azimut (Pereira, 2010).



Figura 12. Esquema seguidor solar con dos grados de libertad.

### 3. Especificaciones.

Para el siguiente trabajo de grado se realizó un sistema que permite direccionar una plataforma pan-tilt a la posición deseada, la cual se mueve por medio de dos motores paso a paso unipolares por corriente, los cuales se activan con un microcontrolador arduino que permite controlar el ángulo de giro y la velocidad del motor.

Es un sistema que permite controlar el torque en intervalos de tiempo y de forma periódica, pues la problemática es posicionar la plataforma de la forma más idónea para lograr la mayor radiación solar incidente sobre la celda. Razón por la cual el diseño, debe estar en la capacidad y condiciones de operar sin problema alguno durante un día conforme sale y se oculta el sol.

Por último debe cumplir la condición de ser autosuficiente y estar en capacidad de cargar la batería conforme sea necesario para evitar que el sistema deje de funcionar.

Por consiguiente en el desarrollo del trabajo de grado se planteó utilizar 6 bloques importantes para ejecutar la idea propuesta y realizar el control de la plataforma pan-tilt, como se muestra en la figura 13. Estos seis bloques están constituidos por una celda solar monocristalina, un cargador con una batería de litio, un elevador DC, un convertidor, un microcontrolador y dos motores DC, los cuales permiten desarrollar la solución al problema de la aplicación.

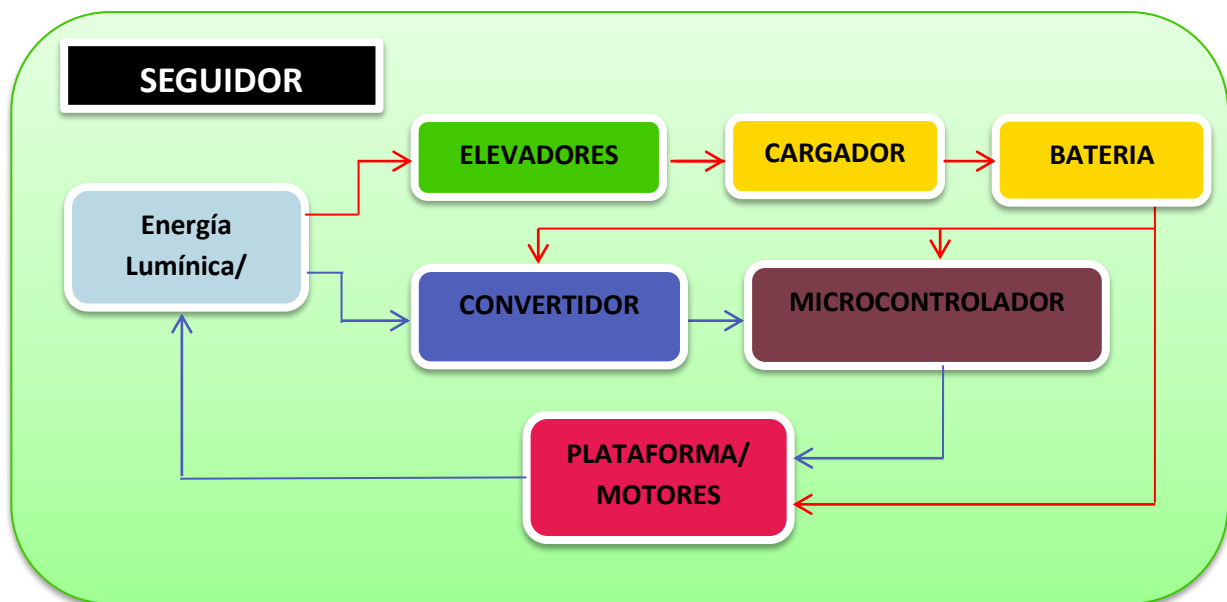


Figura 13. Diagrama de bloques.

Los requerimientos necesarios para el desarrollo del proyecto de grado se describen a continuación:

Inicialmente se adquirió la plataforma pan-tilt, estructura cuya base se forma de dos motores paso a paso unipolares, a partir de esta base comenzaron a surgir los criterios necesarios para desarrollar el proyecto.

### **3.1 Sistema de sensado.**

Este sistema permite identificar los puntos máximos de la radiación solar mediante la corriente de corto circuito de una celda fotovoltaica, esta corriente pasa por un conversor corriente-voltaje para entrar en voltaje al control de la plataforma el cual no debe ser mayor a 5 V, este sensado se hará durante un tiempo de 8 segundos cada 5 minutos y para ello se pondrá a conmutar. A continuación se describen los elementos necesarios:

#### ***Celda fotovoltaica:***

Debido a las características de los motores se debe utilizar una celda liviana que no genere un alto torque en el movimiento. Por ello se utiliza la siguiente celda solar:

- Dimensiones: 14 cm x 12.3 cm
- Corriente de corto circuito: 500 mA
- Voltaje máximo: 5 V

#### ***Mosfet en región activa:***

La necesidad de poder hacer que la celda tenga dos funciones en el sistema nos hace pensar en utilizar un mosfet que sea capaz de controlarse con un microcontrolador, es por ello que debe ser un mosfet de nivel lógico que cumple con las siguientes características:

- Mosfet de nivel lógico, canal N.
- $R_{ds(on)} \leq 300 \text{ m}\Omega @ V_{gs} = 5 \text{ V}$

#### ***Amplificador operacional:***

Pensando en que la variable de medida tiene como máximo un mayor muy pequeño para ser comparado dentro de un microcontrolador, surge la necesidad de amplificar este valor, el amplificador debe tener un límite de voltaje a la salida para proteger la entrada del microcontrolador.

- Supply voltage: 5 V

### **3.2 Sistema de control.**

Un componente bastante importante dentro de este proyecto es el microcontrolador o sistema embebido, que cumple la función de ejecutar algunas órdenes previamente programadas en su memoria con el fin de buscar una solución específica y útil. Por tanto, en este caso será el encargado de realizar la tarea de comparación entre las diferentes lecturas de voltaje que arrojará la celda solar situada en la parte superior de la plataforma pan-tilt, controlar el movimiento y la velocidad de los motores. Este mismo controlador dará el tiempo de switcheo, durante 5 minutos el sistema estará almacenando energía, cumplido este tiempo el microcontrolador envía una señal la cual permite la conmutación del mosfet para comenzar el proceso de sensado, el cual debe tener las siguientes especificaciones:

- Debe estar en condición de manejar PWM, que serán los encargados del control de la secuencia para la alimentación de las fases, garantizando el funcionamiento del motor.

***Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.***  
***Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.***

---

- Debe tener canales de conversión análogo-digital (ADC), con la suficiente velocidad de conversión, para poder procesar la corriente que está consumiendo el motor en su ejecución.
- Para la interacción con señales externas, el microcontrolador debe contener las suficientes I/O de propósito general para recepcionar la señal de la medida entregada por el operacional y así mismo enviar información a los motores para su movimiento y al mosfet para el correcto switcheo.
- El requerimiento para la programación se basa tanto en el lenguaje de programación como en la cantidad de memoria disponible dentro de este Microcontrolador que será necesaria para procesar la información e incorporar el control del motor. Por último este debe estar en capacidad de transmitir los datos al computador con un módulo asíncrono, donde se desarrollará la programación y simulación del comportamiento del sistema.

Según las especificaciones mencionadas anteriormente se opta por utilizar el microcontrolador de ARDUINO serie uno R3 con las siguientes especificaciones:

***Microcontrolador arduino uno R3:***

- Microcontroller ATmega 328
- Voltaje de operación: 5
- Voltaje de entrada: 5V – 20V
- Pines I/O: 14 ( 6 PWM output)
- Pines de entrada análogas: 6
- Corriente DC I/O Pins: 40mA
- Memoria flash: 32 KB
- Frecuencia del reloj: 16 MHz
- Memoria RAM interna: 128 x 8-Bit
- Dos Timers de 16-Bit
- Seis fuentes de interrupción
- Consumo 50mA

Por otro lado se requiere de un driver el cual es el encargado de la etapa de potencia del motor DC y que debe estar en condición de suministrar a este la energía suficiente en la conmutación de las fases:

***Driver de motor:***

- Tensión de entrada: -0,5 - 30 V
- Tensión de salida: -0,5 - 50 V
- Corriente de salida: Max.500 mA
- Voltaje de inversa del diodo: 50 V

### **3.3 Plataforma pan-tilt.**

Sistema que permite orientar la célula fotovoltaica de la manera más adecuada para que esté perpendicular a los rayos solares. Esto se hace mediante una plataforma pan-tilt la cual es obtenida de la cabeza robótica YF016 y comprende dos movimientos azimut y rotacional los cuales son necesarios para desarrollar este proyecto.



Figura 14. Plataforma con dos grados de libertad.

**Estructura:**

- Altura: 10 cm.
- Peso: 162 g.
- Pan: eje vertical (azimut).
- Tilt: eje horizontal (rotacionales).

**3.4 Sistema de almacenamiento.**

La batería es un elemento fundamental en el entorno del proyecto, pues la idea es poder almacenar energía proporcionada por el sol para poder utilizar esta misma como fuente de alimentación del sistema.

En general al realizar la investigación de los diversos tipos de baterías disponibles en el mercado, se encontró que para el proyecto, era de gran importancia utilizar un tipo de batería que fuera compacta, tener un peso moderadamente liviano además de poseer una capacidad de almacenamiento de energía considerable a las demás opciones y una recarga en corto tiempo, el sistema debe controlar el almacenamiento en la batería y la alimentación de esta a todos los sistemas, para ello la opción a escogida es la de Polímero de Litio de 3,7 V a 1200 mAh, la cual tiene un potencial alto y una buena capacidad de energía en comparación con su antecesor de Ion-litio, en nuestro caso específico es necesario tomar dos celdas para lograr un voltaje de 7,4 V a 1200 mAh.

Al utilizar polímeros sólidos, estas reemplazan los electrolíticos líquidos inflamables usados en otros tipos de baterías, por lo cual incrementan la seguridad cuando son utilizadas para cualquier tipo de aplicaciones y más si se habla de proyectos de investigación. La siguiente figura explica las características previamente enunciadas:

Tipo	Energía/ peso	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
Plomo	30-50 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14h *	30%
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2h-4h *	20%
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,16 V	4000	2h-4h	25 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1h-1,5h	10%

Tabla 5. Tabla comparativa entre tecnologías de baterías. (ELO)

Como se observa en la tabla 5 se seleccionó la batería de polímero de litio debido a que en comparación con las otras posee una vida útil más larga proporcionando un mayor número de recargas a un menor tiempo y un nivel de auto descarga dentro de 15% considerado.

### 3.5 Motor paso a paso unipolar

Para lograr el objetivo del trabajo, se utilizaron dos motores paso a paso unipolares a 7,4 V, estos motores están en capacidad de mover y orientar la celda solar de manera continua y con una alta precisión realizando un movimiento de  $1,4^\circ$  en 1 paso.

### 3.6 Integración del sistema

Para que el sistema de control opere con las señales necesarias para hacer mover los motores, se desarrolló un diagrama de flujo ilustrado en las figuras 15 y 16. De igual forma el código detallado se anexa en el anexo No 1 donde se explica línea a línea que metodología se implementó para lograr los resultados esperados en el control de los motores.

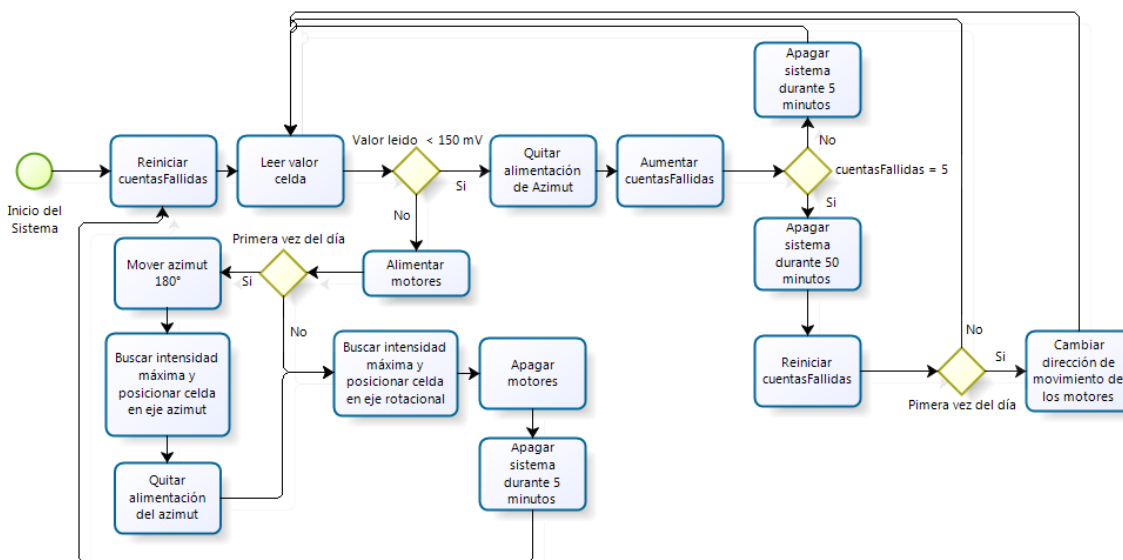
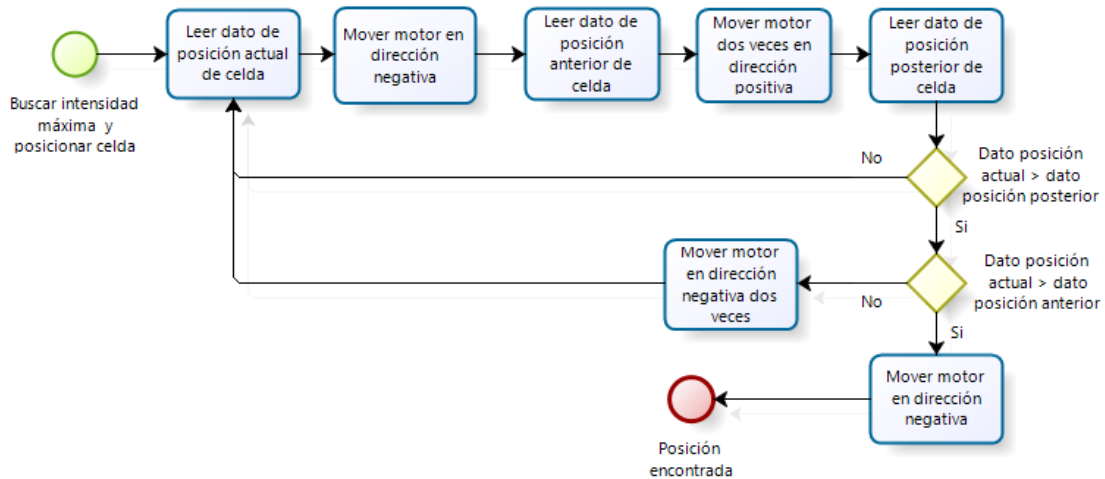


Figura 15. Diagrama de flujo lógica de control movimiento motores paso a paso.



**Figura 16. Algoritmo de búsqueda movimiento motores paso a paso.**

Para la implementación del diagrama de flujo se programó el microcontrolador en el lenguaje de arduino, y se simuló el sol mediante un bombillo halógeno de 300 W. Para visualizar el correcto funcionamiento del sistema, se realizaron varios algoritmos de búsqueda logrando posicionar los dos motores en el mejor punto y haciendo búsqueda en sentido horario y anti-horario.

### 3.7 Elevadores

Es importante disponer de este tipo de componentes, ya que se tiene una sola fuente de alimentación, de la cual se deben obtener varios valores de tensión diferentes a los nominales. Se utiliza un booster DC de bajo consumo y que tenga la capacidad de elevar de 3 V a 10 V con una corriente máxima de 80 mA, este parámetro se definió así, debido a que la celda solar entrega 70 mA cuando recibe una radiación mínima, y se presenta cuando el cielo está altamente nublado.

#### 4. Desarrollo

Para la realización del seguidor solar se debe proceder al desarrollo de los siguientes pasos, los cuales nos darán las pautas a seguir para el correcto desempeño del mismo y tener en cuenta que el diseño a desarrollar debe presentar ventajas de desempeño, mayor economía, movimientos precisos y en esencia que sea un diseño más robusto e íntegro.

En la ejecución de este trabajo se analizaron distintas variables necesarias para la orientación de la plataforma, desde la intensidad de radiación lumínica por el sol, pasando por la capacidad por cm<sup>2</sup> de recepción de rayos solares por la celda, hasta la medición y parametrización de los motores DC paso a paso.

Inicialmente se adquiere una plataforma pan-tilt con unos motores paso a paso unipolares de 1.4 grados de giro, debido a esto se prosigue a conseguir una celda solar de un peso ligero, la cual permita ser movida por los motores sin generar un consumo alto.

Para comenzar se realizaron mediciones de la celda bajo la radiación solar en diferentes situaciones, sol intenso, día nublado y poca visibilidad del sol las cuales se describen a continuación:



Figura 17. Celda solar utilizada.

No.	Característica	Valor
1	Max voltaje open circuit	5,6 V
2	Mín voltaje open circuit	20 mV
3	Max I short circuit	460 mA
4	I average y V average	250 mA , 3,8 V

Tabla 6. Parametrización celda solar.

Se toma como valor mínimo de funcionamiento el momento en el cual la corriente de corto circuito de la celda produce sobre la resistencia de muestreo una tensión de 40 mV. Si el microcontrolador detecta que se está por debajo de este voltaje apaga su sistema evitando pérdida de energía (gasto de corriente en los motores), hasta que detecta un voltaje mayor. Si se encuentra por encima opera de manera adecuada.

Para definir el voltaje mencionado anteriormente se utiliza el modelado de las celdas solares donde su característica principal es la relación entre corriente y voltaje de esta que está dada en la siguiente ecuación:

$$I = \frac{I_x}{1 - \exp\left(-\frac{1}{b}\right)} \left[ 1 - \exp\left(\frac{V}{bV_x} - \frac{1}{b}\right) \right]$$



Figura 18. Relación corriente-voltaje celda solar. (Ilorente, 2008)

Donde  $V_x$  es el voltaje de circuito abierto,  $I_x$  es la corriente de corto circuito de la celda solar y la constante  $b$  es una constante característica de la celda.

La figura 18 muestra la característica corriente-voltaje obtenida en la ecuación anterior (figura 17). Las características ilustradas corresponden a la relación de corriente-voltaje de las celdas solares. Es importante aclarar que esta curva corresponde a la irradiación y temperatura Bogotá  $3.5 \text{ kWh/m}^2$  y  $18^\circ\text{C}$ , ya los puntos extremos de la curva son ampliamente afectados por estas dos variables (UPME, 2003).

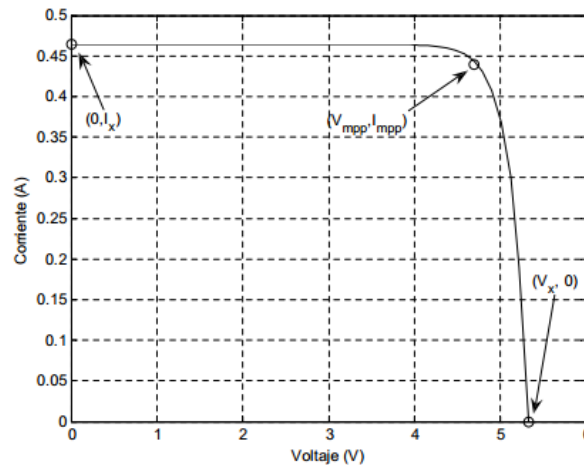


Figura 19. Característica corriente-voltaje celda solar. (Gonzales & Farah, 2012)

$$v_x = 4,7 \text{ V} \quad I_x = 460 \text{ mA}$$

Por otro lado la potencia suministrada por la celda corresponde al producto de la corriente y el voltaje, el cual se describe en la figura 20. Se observa que existe un único valor de voltaje para una radiación determinada, donde la potencia es máxima y según la gráfica mostrada anteriormente existe una corriente correspondiente a dicho voltaje, estos valores de corriente y voltaje corresponden al punto de máxima potencia.

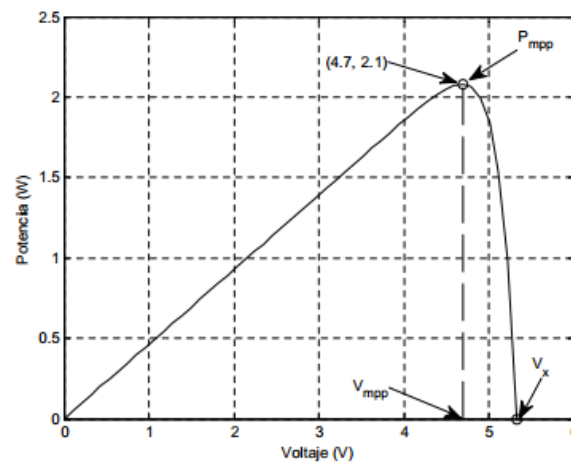
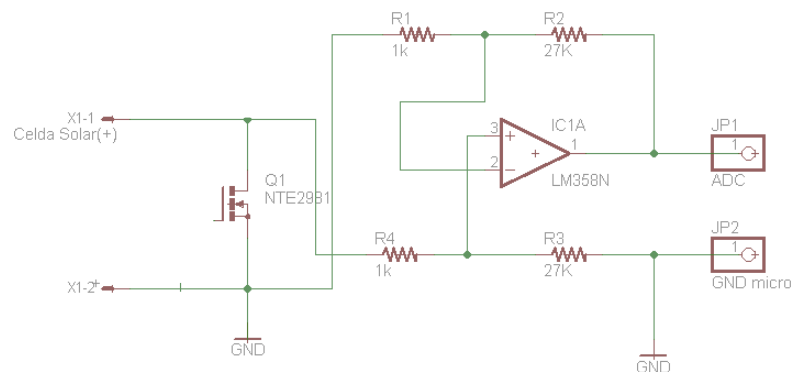


Figura 20. Potencia suministrada por la celda solar. (Gonzales & Farah, 2012)

$$P_{\text{cell}} = 2,16 \text{ W}$$

La corriente de corto circuito de la celda se usa para sensar la radiación solar, esto se hará por un tiempo determinado mientras el sistema de control logra posicionar la plataforma en el lugar más óptimo, luego de encontrar esta posición la celda entrega un voltaje para cargar unas baterías. Es por esto que en el sistema de sensado incluimos un mosfet de nivel lógico el cual se controla con el Microcontrolador, durante el tiempo de sensado que son aproximadamente 5 minutos, el mosfet se encuentra en región Activa o Resistiva, esto quiere decir que su voltaje Gate-Source es igual a 5V y me genera un voltaje a la entrada del operacional.

Al entrar el mosfet en resistiva la corriente de la celda pasa por una resistencia de aproximadamente 250 mΩ la cual corresponde a  $R_{\text{dson}}$ , este paso de corriente genera un voltaje en el Drain del mosfet que también se encuentra a la entrada del amplificador operacional diferencial el cual funciona con una configuración de dos entradas, en la que se amplifica la diferencia de potencial entre ambas. Para obtener las expresiones correspondientes a esta configuración tendremos en cuenta que su comportamiento es en todo momento lineal. Por ello, aplicaremos el teorema de superposición. Primero supondremos que una de las tensiones de entrada es nula y obtendremos la salida correspondiente, a continuación supondremos que la otra tensión es nula y también obtendremos la expresión de  $V_o$ , la solución completa se consigue mediante la suma de ambas. A continuación se muestra el diseño del sistema de sensado:



**Figura 21. Amplificador operación con G 27.**

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1, \text{ siendo } V_2 = 0$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_+ = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_2 = \frac{R_3}{R_4} V_2, \text{ siendo } V_1 = 0$$

$$V_+ = I * R_3 = \frac{V_G}{R_4 + R_3} R_3 \quad \text{si } I = 0$$

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

$$V_{TOTAL} = V_{0(V_2=0)} + V_{0(V_1=0)} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_3}{R_4} V_2 = (V_2 - V_1) \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_2 = R_3 = 27k\Omega$$

$$R_1 = R_4 = 1k\Omega$$

$$G = \frac{V_0}{V_2 + V_1} = \frac{R_2}{R_1} = 27$$

**Análisis con el Mosfet en resistiva.**

$$V_i = I_{cell} * R_{dsON}$$

$$V_{GS} > V_{TH} \text{ y } V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH})$$

Para este diseño se tienen las siguientes consideraciones:

$$I_{cell} = 500 \text{ mA} \quad R_{dsON} = 250 \text{ m}\Omega \quad V_0 = 54 \text{ mV}$$

Donde la corriente está dada por la celda, la  $R_{dsON}$  es sacada de la hoja de especificaciones del NTE 2809.

Luego de obtener el voltaje a la salida del amplificador operacional, se integra el microcontrolador el cual tiene como objetivo programar los motores DC para su correcto funcionamiento, este dispositivo fue seleccionado debido a su amplia gama de funcionamiento y a conocimientos previos adquiridos en la carrera mencionados en el numeral 2.4. Se implementó también debido a la facilidad de controlar dispositivos eléctricos que permiten ser programados mediante software.

La programación consistió en activar los pines del motor Azimut inicialmente, el cual da el giro de la celda horizontalmente, es decir para darle una ubicación de Norte-Sur, Posteriormente se activan los pines del motor rotacional, este permite posicionar la celda en el sentido Oriente-Occidente. La activación de estos motores sucede durante el sensado de la corriente de corto circuito de la celda, si el sistema no está sensando el microcontrolador apaga los motores para que estos no consuman corriente.

El tiempo de switcheo es dado por el pin 2, el cual también es un pin de propósito general, este se encuentra activo durante un tiempo no mayor a 20 segundos, tiempo en el cual se realiza la medición de sensado y se encuentra apagado durante 5 minutos, tiempo en el cual tarda el sistema en volver a tomar medidas.

Adicionalmente el microcontrolador utiliza el pin A3. Este pin es una entrada análoga utilizada para obtener el valor sensado, el cual se compara por software para lograr así posicionar la celda de forma adecuada.

La tarjeta de desarrollo seleccionada se muestra a continuación:



Figura 22. Arduino uno R3

No.	Característica	Valor
1	Microcontroller	Atmega328
2	Operation Voltage	5V
3	Input voltaje	7V-12V
4	Input voltage (limit)	6V-20V
5	Digital I/O Pins	14
6	DC Current per I/O	40 mA
7	DCcurrent for 3.3V pin	50 mA
8	Flash memory	32KB
9	SRMA	2KB
10	EEPROM	1KB
11	Clock speed	16MHz

Tabla 7. Características microcontrolador.

Adicionalmente se utilizó un driver ULN2803 que permite desarrollar la etapa de potencia para el motor compuesto por un arreglo darlington. Analizando que a partir de la programación que se realice en el microcontrolador para configurar el driver, estos componentes están en capacidad de controlar independientemente hasta 8 señales de PWM, realizar la secuencia de conmutación hasta el 100% del ciclo útil y soportar los picos de corriente de inicio pedida por el motor a un voltaje en su polarización entre 5V y 20 V. Dependiendo de la programación, estos componentes permiten incorporar al sistema, protecciones para que el actuador y la tarjeta de desarrollo, disminuyan el riesgo de sufrir recalentamientos o posibles daños si ocurre una sobre carga de corriente o un corto circuito mientras está en funcionamiento también evita el flujo inverso de corrientes que puedan afectar la tarjeta. El circuito esquemático del driver se muestra en la figura 23.

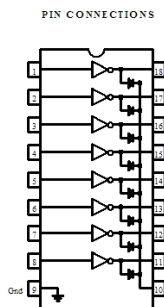
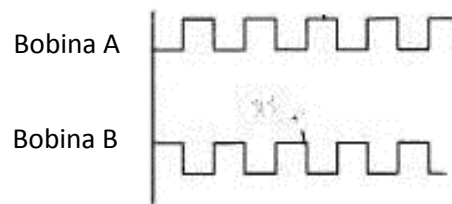


Figura 23. Driver motor pasó a paso.

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.**  
**Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

El driver ULN2803 se polariza con la batería a 7,4 V y sus pines de entrada estan dados por los pines de salida del microcontrolador, asi mismo los pines de salida de este driver van directamente conectados a los dos motores paso a paso.

Para realizar el movimiento de los motores, se envia una señal analoga al microcontrolador que es la que transporta el voltaje tomado de la celda solar, con esta señal el arduino comienza a comparar hacia adelante y hacia atrás para encontrar un valor superior, enviando pulsos a los motores para hacerlos mover. Estos pulsos son eviados de forma secuencial con las siguientes características: Enciende de forma secuencial Bobina A,B,C y D



$$T = 96.29ms$$

$$f = 10.38 Hz$$

$$Ancho = 48.13ms$$

$$Amplitud = 9.2V$$

Figura 24. Caracterización pasos de encendido del motor.

Los parámetros del motor identificados facilitaron en gran medida el control del proceso, por lo tanto es necesario seguir una serie de pasos para llevar a cabo esta identificación.

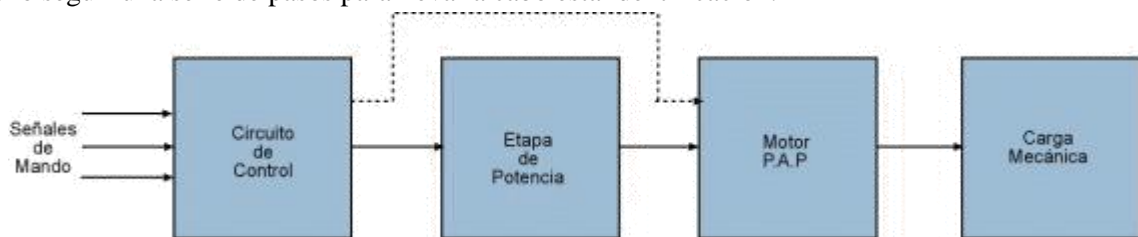


Figura 25. Diagrama de bloques de un sistema con motor pasó a paso

Para lograr cargar la batería se alimenta el cargador de la batería con el boost, energizando el circuito con 10 V, el cual tiene como entrada el voltaje de la celda solar que oscila entre 1.9 V y 4.5 V y no es suficiente para cargarla por tal motivo fue necesario utilizar este dispositivo. La corriente mínima que se le debe entregar al Boost es de 80 mA para lograr la diferencia de potencial necesaria entre sus pines:



**Figura 26. Boost DC 3V-35V.**

No.	Característica	Valor
1	Model	Boost Converter+Voltmeter
2	Input voltaje	DC 3-35V
3	Input current	9A Max.
4	Output voltage	DC 3-35V
5	Output Current	6A Max.
6	Output power	65-100W
7	Output Ripple	40 mV
8	Conversion efficiency	96%
9	Voltage Meter Error	$\pm 0.1V$

**Tabla 8. Características Boost DC utilizado.**

Finalmente se implementó un cargador de batería el cual permite cargar la batería cada vez que no se esté realizando ninguna medición, para lograr este fin se utilizó el integrado LM3647 el cual es un cargador de batería universal y se adecuo a la batería de Li-ion de 7,4V que estamos utilizando como se muestra en la figura 27, ver anexo 2 para mayor claridad del circuito.

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
luminicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

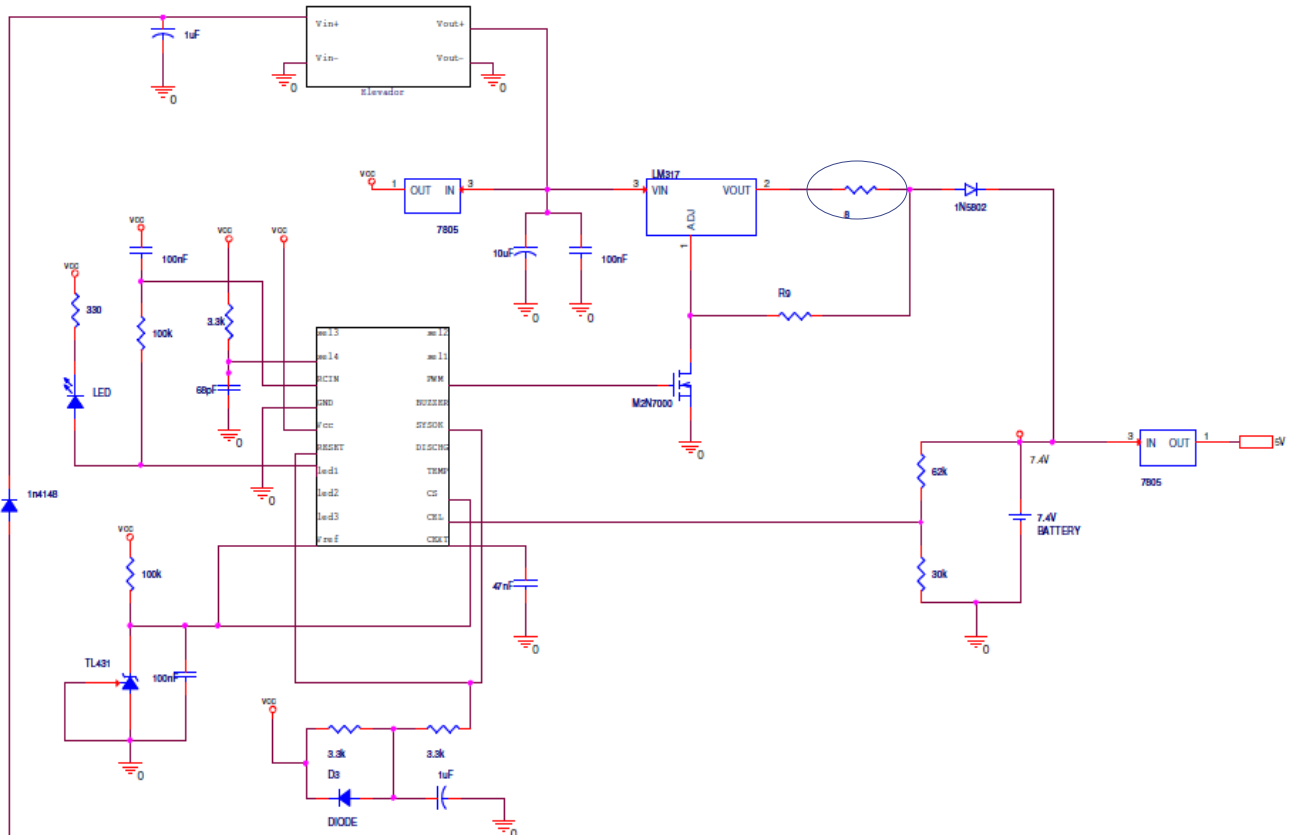
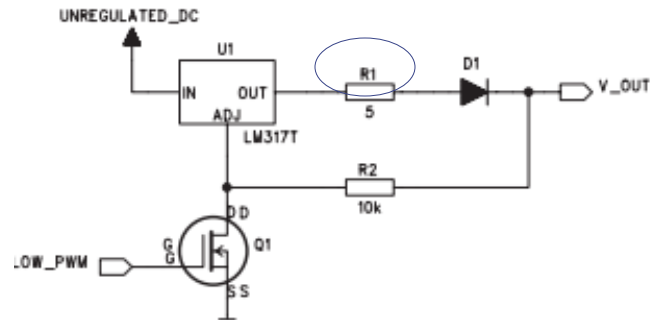


Figura 27. Cargador Batería de LI-PO para 2 Celdas.

La corriente que me entrega el circuito está controlada por la resistencia que se encuentra encerrada en la figura 27, y se describe con la siguiente ecuación:

$$I_{out} = \frac{1.25 - V_d}{R1} \quad V_d = \text{Voltage Drop Across D1}$$



Dependiendo de que tanto variara R1, varia la corriente de salida y por ende disminuye o aumenta el tiempo de carga de la batería. Para nuestro caso se definió una corriente de salida  $I = 150mA$ .

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

---

Manejando los siguientes tiempos:

- Tiempo de carga: 10 mA en 17 s
- Tiempo de descarga 10 mA en 10 s
- Output/salida = 8,4 V  $\approx$  150 mA

Con lo mencionado anteriormente, se inició el proceso de pruebas y validación del sistema de control, mediante los equipos de medición brindados por el laboratorio con el propósito de finalizar y entregar este sistema implementado y realizar los ajustes necesarios.



**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

Esquemático completo:

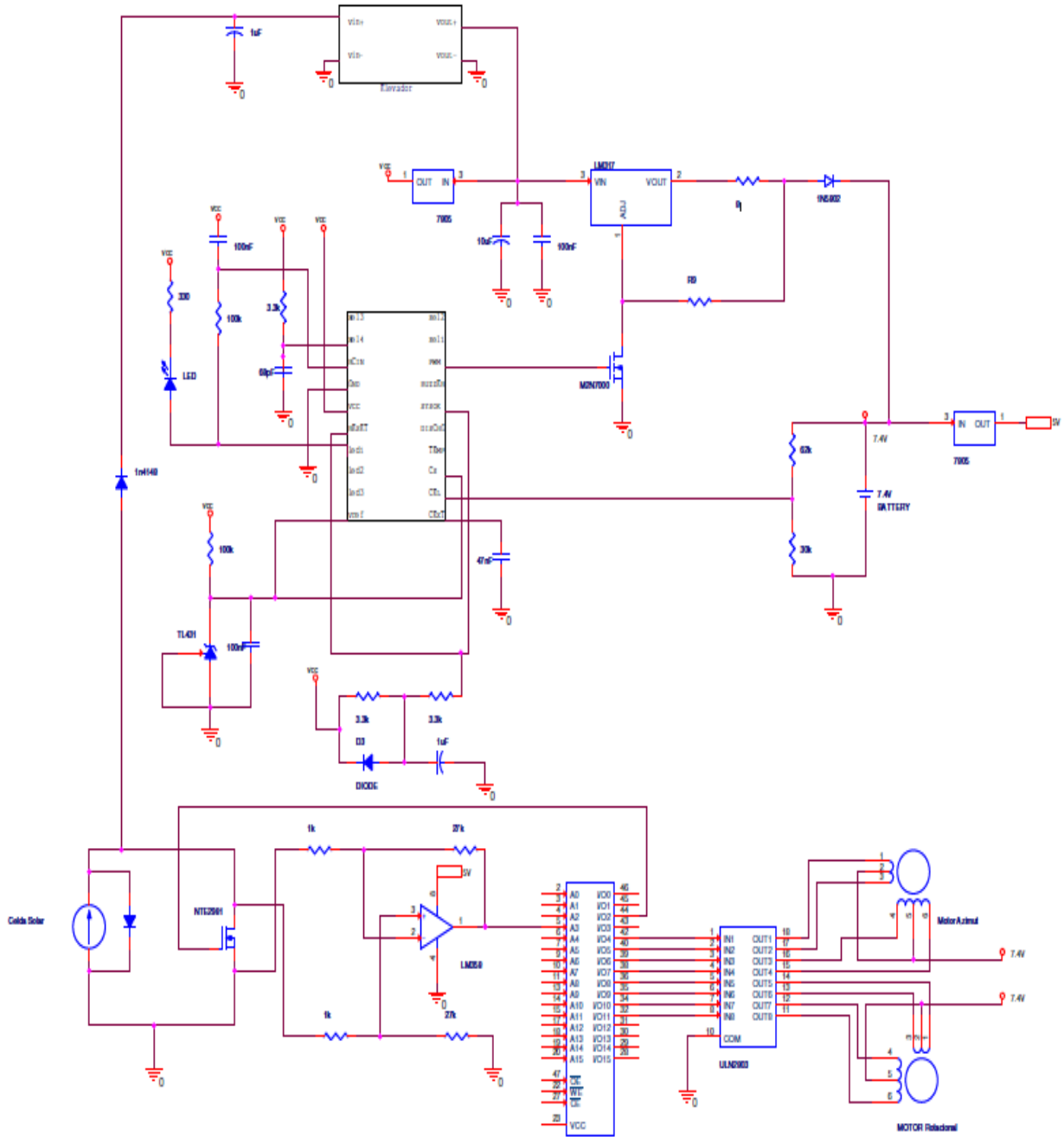


Figura 28. Esquemático prototipo.

## **5. Análisis de resultados.**

Partiendo de los objetivos del proyecto se observa que para lograr mover dos motores DC unipolares se debe contar con una celda solar lo suficientemente robusta capaz no solo de alimentar el circuito sino de generar una ganancia que permita hacer uso de ella en distintas aplicación.

Se midió el consumo por cada una de las etapas con las que contamos y también se observó la diferencia de este cuando tenemos los motores activos o estáticos los valores obtenidos fueron los siguientes:

- Consumo Boost DC = 80 mA.
- Consumo Motor Azimut encendido = 110 mA
- Consumo Motor Rotacional encendido = 200 mA
- Consumo Motor Azimut apagado= 0 mA
- Consumo Motor Rotacional apagado =0 mA
- Consumo Arduino = 50 mA
- Consumo cargador de Batería =30 mA

Total consumo = 320 mA durante el periodo de medición que consta de 8 s Aproximadamente. Mientras el sistema se encuentre cargando, periodo de 5 minutos, el consumo se reduce a 30 mA.

Se observó que hay muchos factores que afectan el correcto funcionamiento del proyecto, pero el que genera más impacto es la interrupción a los rayos solares producidos por nubes u objetos que interfieren entre estas dos partes, por eso es importante que la celda busque el punto máximo de radiación que quizás pueda no estar en la dirección que se encuentra el sol.

Por tal motivo se hicieron pruebas simulando el sol con una lámpara de 300W lo que me permitió visualizar en óptimas condiciones de funcionamiento el sistema. Logrando modelar el microcontrolador de la mejor manera para evitar problemas de posicionamiento o que se generara algún tipo de frenado por el cableado, este último generó problemáticas debido a lo cual se optó por configurar el código parametrizando que cada vez que comience una mañana el sistema rote en sentido contrario al día anterior. Así se logra un giro invertido al pasar los días y se evita que el motor azimut se enrede con el cableado.

### **Switcheo al iniciar la medición:**

- Control: oscila entre 0 V y 5 V, según los tiempos que se hayan definido en el algoritmo en este caso está definido que el switcheo se realiza cada 5 minutos y controla el Mosfet que envía la señal al diferenciador.
- Medición ADC: según en qué estado se encuentra el control, el voltaje del ADC varia, cuando control están en 0 se está cargando la batería y a la salida de nuestro operacional tenemos 3,6 V. Cuando control está en 5 el sistema se encuentra sensando y a la salida de nuestro operacional tenemos rango de voltaje entre 50 mV y 480 mV.

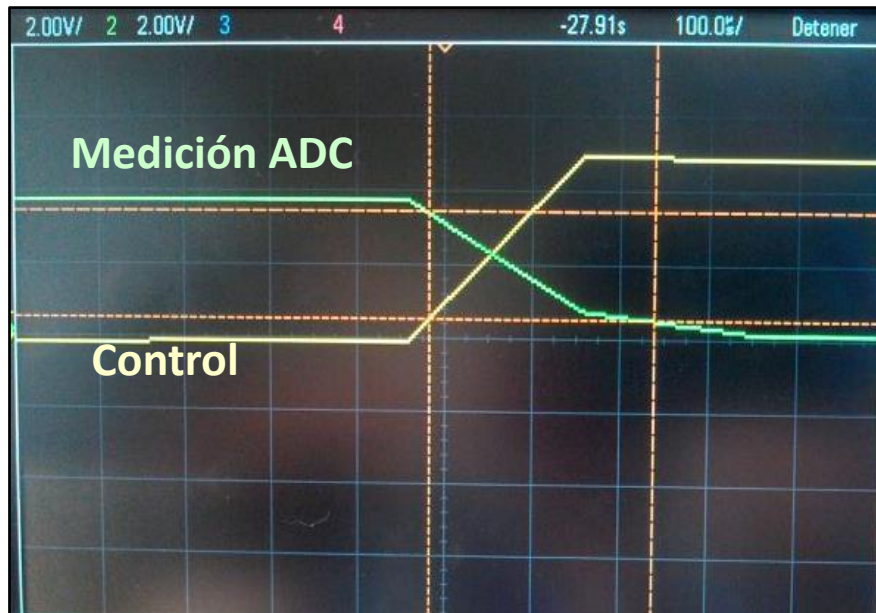


Figura 29. Switcheo al iniciar la medición.

Datos de las dos señales al inicio de la medición:

- Valor Máximo Medición ADC: 3,6 V
- Valor Máximo Control: 5 V
- Valor Mínimo Medición ADC: 45 mV
- Valor Mínimo Control: 0 V
- Tiempo de subida Señal de Control: 158  $\mu$ S
- Tiempo de bajada Medición ADC: 256  $\mu$ S

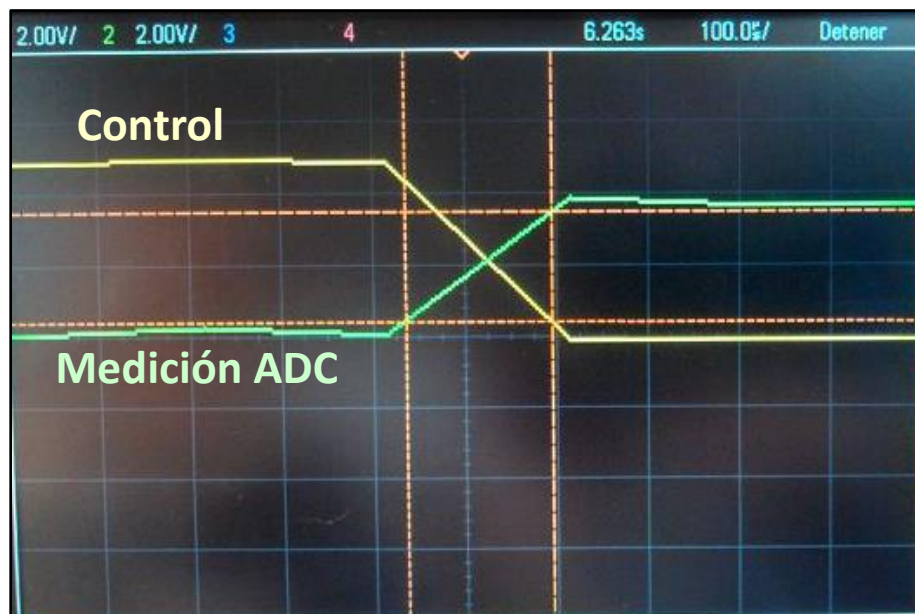


Figura 30. Switcheo al finalizar la medición.

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes lumínicas para conversión fotovoltaica.*  
*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

Datos de las dos señales al finalizar la medición:

- Valor Máximo Medición ADC: 3,6 V
- Valor Máximo Control: 5 V
- Valor Mínimo Medición ADC: 45 mV
- Valor Mínimo Control: 0 V
- Tiempo de subida Señal de Control: 160  $\mu$ s
- Tiempo de bajada Medición ADC: 158  $\mu$ s

El tiempo de subida de la señal de control cuando se está haciendo el sensado debe ser mayor al tiempo de bajada de la medición del ADC para obtener una medición satisfactoria, mientras que el tiempo de subida y de bajada de las señales no tiene relevancia cuando se está cargando la batería, debido a que no importa que bajen al mismo tiempo porque ya no se tomará ninguna medida más.

Los 3,6 V cuando la señal de control está en 0V se deben a la saturación que se presenta en el operacional del sistema de sensado.

**Movimiento de los motores:**

La siguiente grafica muestra la secuencia normal con la que se encuentran programados los motores para realizar su movimiento:

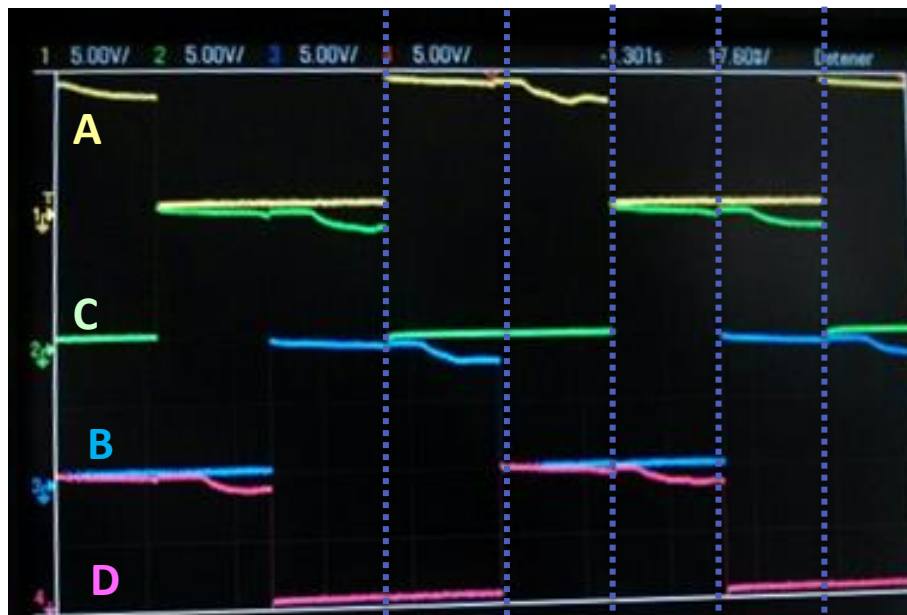


Figura 31. Movimiento motor eje azimut.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
1	ON	ON	OFF	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	OFF	ON	ON
4	OFF	ON	ON	OFF

Tabla 9. Secuencia normal motor paso a paso.

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.*  
*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

---

Datos de los pasos del motor:

- Periodo: 91,16 ms
- Frecuencia: 10,96 Hz
- Ancho: 46 ms
- Amplitud: 7,2 V
- Tiempo de subida: 8,02  $\mu$ s
- Tiempo de bajada: 7,89  $\mu$ s

Los análisis y resultados descritos anteriormente se realizan con una lámpara de 53 W.

## **6. Conclusiones.**

Luego de realizar el algoritmo para controlar el movimiento de la plataforma se evidenció que para lograr una medición efectiva y un posicionamiento idóneo fue necesario implementar unos tiempos de delay en el código para la toma de la medición, debido a que se debía disminuir el tiempo de switcheo del microcontrolador para tomar un valor real de la medida.

Por otro lado fue necesario modificar el diseño físico inicial que constaba de tener encima del motor rotacional la celda solar, debido a que para este diseño se requería más fuerza en el motor, así que se decidió colocar la celda con su centro de masa a la misma altura que el rotor para disminuir consumo por parte del motor.

Así mismo para optimizar consumo, se implementó en el código un algoritmo que me permite dormir el microcontrolador para un determinado tiempo, encendiéndolo solo en los momentos que se realiza el posicionamiento. Así no se energizan las bobinas de los motores cuando no es necesario y no se genera un consumo adicional.

Se realizó la medición o la toma de datos de la celda solar por medio en un Mosfet en resistiva para obtener un valor en voltaje referente a la corriente de corto circuito de la celda.

Finalmente se diseñó este prototipo a una escala pequeña, pensando en replicarlo en paneles de gran tamaño, como nuestro enfoque no podía ser la estructura mecánica que soporta el panel por eso se toma la decisión de diseñar el sistema en una estructura pequeña que no requiera mayor exigencia, pero con capacidad de réplica a cualquier escala.

## **7. Bibliografía y fuentes de información.**

- Arduino. (01 de 05 de 2002). <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.
- Council, R. b. (2005). *A vision for Photovoltaic Technology*. Europa: Europea Comision.
- DIAZ, C. (2001). <http://electronica.webcindario.com/componentes/lm358.htm>. Obtenido de LM358.
- digitales, t. (2000). [http://materias.fi.uba.ar/6665/material/Clase\\_01\\_Introduccion.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6665/material/Clase_01_Introduccion.pdf). Obtenido de [http://materias.fi.uba.ar/6665/material/Clase\\_01\\_Introduccion.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6665/material/Clase_01_Introduccion.pdf).
- ELO. (s.f.). <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>.
- ENERGIZAR. (2010). [http://www.energizar.org.ar/energizar\\_desarrollo\\_tecnologico\\_seguidor\\_solar\\_como\\_funciona.html](http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_seguidor_solar_como_funciona.html).
- Energy, B. a. (2008). <http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm#polymer>. Obtenido de <http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm#polymer>.
- factory, G. (2011). Obtenido de <http://www.geekfactory.mx/tutoriales/convertidor-boost-con-circuito-integrado-555/>.
- factory, G. (s.f.). <http://www.geekfactory.mx/tutoriales/convertidor-boost-con-circuito-integrado-555/>.
- Gonzales, J., & Farah, J. (27 de julio de 2012). *laccei*. Recuperado el 15 de abril de 2104, de <http://www.laccei.org/LACCEI2012-Panama/RefereedPapers/RP223.pdf>
- llorente, J. g. (2008). *Mximizando la potencia en celdas solares*. España.
- Moore, A. (14 de november de 2008). [http://revolution-robotics.com/articles/lithium\\_polymer\\_lipo\\_battery\\_guide](http://revolution-robotics.com/articles/lithium_polymer_lipo_battery_guide).
- Morelos, J. M. (2009). *Libro de ciencia y tecnologia*. Mexico: CINVESTAV.
- Pereira, U. t. (2010). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SEGUIDOR SOLAR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO*. Pereira.
- SEBASTIAN, O. P. (2006). *Construccion de un modulo para verificar los programas a implementar en microcontroladores AT89C51*. Quito: Escuela de formacion tecnologica.
- Universidad De Alcalá, I. T. (2003). *Identificación de parámetros de un motor DC*. ESPAÑA.
- UPME, U. d. (2003). *Atlas de radiacion Solar en colombia*. bogota.
- Valderrama, F. F. (2011). *un convertidor de potencia dc-dc tipo boost*. bogota.

## Anexo 1

### Código utilizado para controlar los motores.

```
#include <Stepper.h> //libreria motor unipolar
#include <LowPower.h> //libreria motor unipolar

//-----CONFIGURACION DEL MOTOR-----
#define stepsPerRevolution 256 //NUMERO DE PASOS DEL MOTOR
#define barrido 4 //NUMERO DE PASOS POR POSICION
Stepper Azimut(stepsPerRevolution, 8,9,10,11); //PINES DE CONEXION DEL ARDUINO AL
ULN2003
Stepper Rotacional(stepsPerRevolution, 4,5,6,7); //PINES DE CONEXION DEL ARDUINO AL
ULN2003

//-----FIN DE LA CONFIGURACION-----
#define analogInput A3 //puede ser cualquiera entre A0 y A5
#define led 13
#define motores 2

//Tiempos
int tEstabilizacion = 200;
int tMotor = 4000;
//Voltajes
int voltajeMinMotor = 2000; //Voltaje minimo que recibe el motor rotacional sin perder fuerza
int voltajeMinCelda = 150;
//Consumos
bool controlarConsumoAzimut = true;
bool controlarConsumoRotacional = true;
//Variables
int firstInput=0; //Primer valor de lectura para verificar si es de día o de noche
int revisarSiguiente=0; //Variable que indica si el motor debe seguir buscando el maximo o permanecer en
la posicion actual
int datoADC=0; //variable para leer dato de la celda
int cuentasFallidas = 0; //Numero de cuentas donde el voltaje es minimo (no hay luz)
//bool buscarAdelante=false; //Variable que indica la direccion en la que debe girar el rotacional
int direccionMotor = 1; //Variable que indica la direccion hacia donde giran los motores (Cambia cada
comienzo del día)
bool firstTime = true; //Variable que indica si es la primera vez del dia que se mueve el motor
int i=0; //Variable de fors
int VOLTAJE_MIN_ROTACIONAL = 500;

//Estructura del dato tomado por el motor
struct dt{
    int anterior;
    int actual;
    int siguiente;
} dato;

int margen_de_error=10;
```



*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.*

*Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

---

//Funcion para setear configuracion (Llamada una vez al presionar reset)

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);
  pinMode(analogInput, INPUT);
  pinMode(led, OUTPUT);
  pinMode(motores, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  Azimut.setSpeed(10); //EL MOTOR CON VELOCIDAD 10RPM
  Rotacional.setSpeed(10); //EL MOTOR CON VELOCIDAD 10RPM
}
```

//Funcion para leer dato de la celda y mapearlo de 0 a 5V

```
int leerADC(void)
{
  int primerValor;
  int segundoValor;
  int tercerValor;

  datoADC=(analogRead(analogInput))/2;//Filtro para reducir error
  primerValor = map (datoADC, 0, 1024, 0 , 5000);//Mapea salida a 5V
  delay(tEstabilizacion);

  datoADC=(analogRead(analogInput))/2;//Filtro para reducir error
  segundoValor = map (datoADC, 0, 1024, 0 , 5000);//Mapea salida a 5V
  delay(tEstabilizacion);

  datoADC=(analogRead(analogInput))/2;//Filtro para reducir error
  tercerValor = map (datoADC, 0, 1024, 0 , 5000);//Mapea salida a 5V
  delay(tEstabilizacion);

  return (primerValor + segundoValor + tercerValor / 3);
}
```

//Funcion loop llamada constantemente por el micro

```
void loop()
{
  //Reiniciando cuentas fallidos
  cuentasFallidas = 0;
  //Leer valor de celda
  firstInput = leerADC();

  //Mientras el voltaje sea minimo (no haya luz)
```

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

---

```

while(firstInput < voltajeMinCelda)
{
    delay(tEstabilizacion);
    Serial.println("Valor minimo");
    delay(tEstabilizacion);
    Serial.println(firstInput, DEC);
    delay(tEstabilizacion);
    Serial.println("Cuentas Fallidas");
    delay(tEstabilizacion);
    Serial.println((cuentasFallidas+1), DEC);
    delay(tEstabilizacion);

    //Quitar energia a motores del azimut para reducir consumo
    if(controlarConsumoAzimut)
    {
        delay(tEstabilizacion);
        Serial.println("Quitando energia azimut");
        delay(tEstabilizacion);
        digitalWrite(8, LOW);
        digitalWrite(9, LOW);
        digitalWrite(10, LOW);
        digitalWrite(11, LOW);
    }

    //Aumento de cuentas fallidas
    cuentasFallidas++;

    //Si las cuentas fallidas llegan a 5 (25 minutos en oscuridad) (?)
    if(cuentasFallidas==5)
    {
        //Apagar durante 50 minutos (?)
        //for(i,i<370,i++)
        LowPower.powerDown(SLEEP_1S, ADC_OFF, BOD_OFF); //TIEMPO LARGO

        //Reiniciar cuentas fallidas
        cuentasFallidas = 0;

        //Si es la primera vez del dia que se ejecuta
        if(!firstTime)
        {
            //Cambiar la direccion hacia donde giran los motores
            direccionMotor *= -1;
        }

        //Es la primera vez que se ejecuta en el día
        firstTime = true;
    }
    else
    {
        //Apagar durante 5 minutos (?)
        //for(i,i<37,i++)
    }
}

```

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

---

```
        LowPower.powerDown(SLEEP_1S, ADC_OFF, BOD_OFF);
    }

    //Esperar un segundo y volver a leer el valor
    delay(1000);
    firstInput=leerADC();
}

//Sale de voltaje minimo (celda recibe luz)
delay(tEstabilizacion);
Serial.println("Valor adecuado para funcionamiento");
delay(tEstabilizacion);
Serial.println(firstInput, DEC);
delay(tEstabilizacion);

//Encender motores rotacional
if(controlarConsumoRotacional)
{
    delay(tEstabilizacion);
    Serial.println("Subiendo energia rotacional");
    delay(tEstabilizacion);
    digitalWrite(4, HIGH);
    digitalWrite(5, HIGH);
    digitalWrite(6, HIGH);
    digitalWrite(7, HIGH);
}

//Encender motores
digitalWrite(motores, HIGH);
delay(1000);

//Proceso inicial del dia (Solo una vez)
if(firstTime)
{
    //Encender motores azimut
    if(controlarConsumoAzimut)
    {
        digitalWrite(8, HIGH);
        digitalWrite(9, HIGH);
        digitalWrite(10, HIGH);
        digitalWrite(11, HIGH);
    }

    //Mover rotacional a la mitad (Antes, ahora se hara con el azimut para consumir menos energia)
    //Rotacional.step(-stepsPerRevolution/2);
    //Mover rotacional 20 grados para iniciar la celda en angulo
    delay(tEstabilizacion);
    Serial.println("Girando rotacional a posicion inicial");
    delay(tEstabilizacion);
    Rotacional.step(-stepsPerRevolution * (-direccionMotor) / 14);
```

**Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.**

---

```
//Mover azimut 180 grados para iniciar celda hacia donde sale el sol
delay(tEstabilizacion);
Serial.println("Girando azimut a posicion inicial");
delay(tEstabilizacion);

//Azimut.step(-stepsPerRevolution * (direccionMotor) / 2);
for(i = 0; i < 32; i++)
{
  Azimut.step(-barrido * direccionMotor);
  delay(tEstabilizacion);
}

//Buscar valor maximo en azimut
delay(tEstabilizacion);
Serial.println("Buscando en azimut");
delay(tEstabilizacion);

do
{
  //Leer datos de las 3 posiciones
  dato.actual=leerADC();
  Azimut.step(-barrido);
  delay(tEstabilizacion);
  dato.anterior=leerADC();
  Azimut.step(2*barrido);
  delay(tEstabilizacion);
  dato.siguiete=leerADC();

  //La posicion siguiente es mayor (Sigue buscando hacia adelante)
  if(dato.siguiete > dato.actual && dato.siguiete > dato.anterior)
  {
    revisarSiguiete = 1;
  }
  //La posicion actual es mayor (Sale del ciclo)
  else if(dato.actual > dato.anterior)
  {
    revisarSiguiete = 0;
    Azimut.step(-barrido);
  }
  //La posicion anterior es mayor (Sigue buscando hacia atras)
  else
  {
    revisarSiguiete = 1;
    Azimut.step(-2*barrido);
  }
}
while(revisarSiguiete == 1);

//Posicion azimut encontrada, ya no vuelve a mover el resto del día
firstTime = false;
delay(tEstabilizacion);
```

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

---

```
Serial.print("Valor de azimut: ");
delay(tEstabilizacion);
Serial.println(dato.actual, DEC);

//Apagar azimut para reducir consumo
if(controlarConsumoAzimut)
{
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
}
}

//Buscar valor maximo en rotacional
delay(tEstabilizacion);
Serial.println("Buscando en rotacional");

do
{
    //Leer datos de las 3 posiciones
    dato.actual = leerADC();
    Rotacional.step(-barrido * direccionMotor);
    delay(tEstabilizacion);
    dato.anterior = leerADC();
    Rotacional.step((2 * barrido) * direccionMotor);
    delay(tEstabilizacion);
    dato.siguiete = leerADC();

    //La posicion siguiente es mayor (Sigue buscando hacia adelante)
    if(dato.siguiete > dato.actual && dato.siguiete > dato.anterior)
    {
        delay(tEstabilizacion);
        Serial.println("SIGUIENTE");
        delay(tEstabilizacion);
        revisarSiguiete = 1;
    }
    //La posicion actual es mayor (Sale del ciclo)
    else if(dato.actual > dato.anterior)
    {
        delay(tEstabilizacion);
        Serial.println("ACTUAL");
        delay(tEstabilizacion);
        revisarSiguiete = 0;
        Rotacional.step(-barrido * direccionMotor);
    }
    //La posicion anterior es mayor (Sigue buscando hacia atras)
    else
    {
        delay(tEstabilizacion);
        Serial.println("ANTERIOR");
```

*Control de plataforma pan-tilt para seguimiento automático de fuentes  
lumínicas para conversión fotovoltaica.  
Proyecto de grado-Ingeniería Electrónica.*

---

```
        delay(tEstabilizacion);
        revisarSiguiete = 1;
        Rotacional.step((-2 * barrido) * direccionMotor);
    }
}
while(revisarSiguiete == 1);

//Posicion rotacional encontrada
delay(tEstabilizacion);
Serial.println("Rotacional: ");
delay(tEstabilizacion);
Serial.println(dato.actual, DEC);
delay(tEstabilizacion);
Serial.println("Posicion de celda encontrada");
delay(tEstabilizacion);

//Fin de busqueda, apagar motores
digitalWrite(motores, LOW);
if(controlarConsumoRotacional)
{
    delay(tEstabilizacion);
    Serial.println("Quitando energia rotacional");
    delay(tEstabilizacion);
    digitalWrite(4, VOLTAJE_MIN_ROTACIONAL);
    digitalWrite(5, VOLTAJE_MIN_ROTACIONAL);
    digitalWrite(6, VOLTAJE_MIN_ROTACIONAL);
    digitalWrite(7, VOLTAJE_MIN_ROTACIONAL);
}
//Apagar por 5 minutos (4 segundos temporalmente)
//for(i,i<37,i++)
LowPower.powerDown(SLEEP_4S, ADC_OFF, BOD_OFF);
//Delay del codigo por 5 minutos (4 segundos temporalmente)
//Estos tiempos deben ser iguales para evitar una desincronizacion
delay(tMotor);
//Bajar voltaje a motor rotacional para reducir consumo
}
```

## Anexo 2

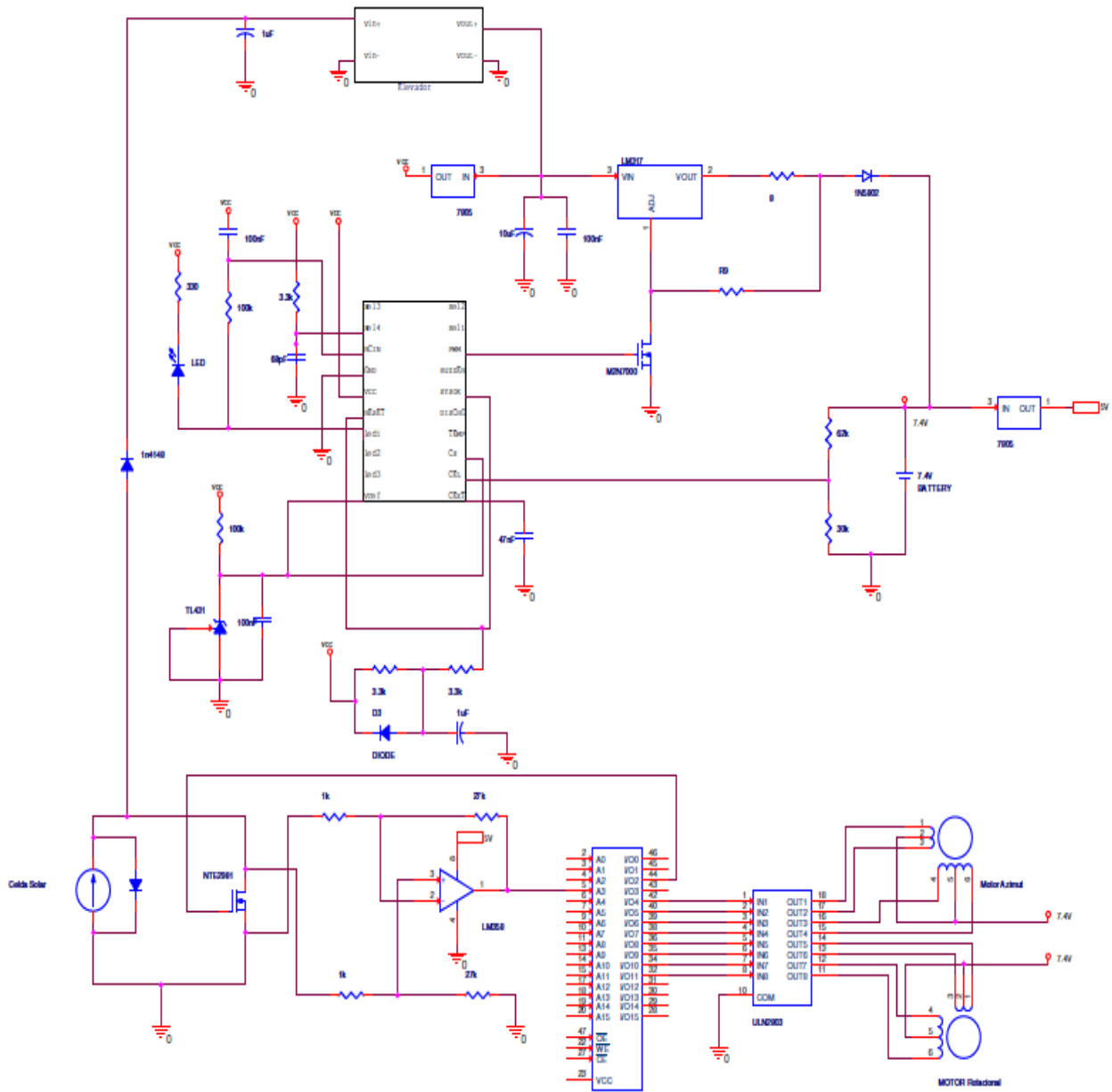


Figura 32. Esquemático diseño completo.