



INSTITUTO SUPERIOR
MINERO METALÚRGICO DE MOA
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

Ingeniería Eléctrica

Facultad: Metalurgia Electromecánica

Trabajo de Diploma

en opción al Título de

Ingeniero Eléctrico

Título: Diseño de un seguidor solar con
fines docentes.

Autor: Javier Moreira Laborit

Tutor: Ing. Eduardo Smith Galeano

Moa, Holguín, Cuba
Junio del año 2017
“Año 59 de la Revolución”

Declaración de autoridad

Yo, Javier Moreira, autor del trabajo de diploma “Diseño de un seguidor solar con fines docentes” certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes, educativos e investigativos. Para que así conste se firma la presente a los__ días del mes de junio de 2017.

Javier Moreira Laborit
(Diplomante)

Ing. Eduardo Smith Galeano
(Tutor)

Pensamiento

...La felicidad no consiste en alcanzar lo que nos guste sino en que nos gusten las cosas que hemos alcanzado...

José María Vargas Villa

Agradecimientos

A Dios, porque aunque yo no sea cristiano, reconozco que sin él no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

A toda mi familia, especialmente a mi madre Audelis Laborit Lobaina, a mi padre Samuel Moreira Cobas y a mi hermano Jaddiel Moreira Laborit que lo dieron todo por mí para que pudiera graduarme y salir adelante en la vida.

A mis abuelos Luis y Mercedes por su apoyo incondicional y la atención prestada.

A mi tutor Eduardo Smith Galeano y a mi gran amigo Franki Córdoba Batista, por su gran cooperación para realizar este trabajo.

A todos aquellos profesores que colaboraron con mi preparación como profesional, especialmente a Daniel Mendiola, Oscar W. Peña, René Guardiola, Reineris Montero, Osmany Pérez y Liomnis Osorio.

A todos mis compañeros de aula, en especial a Osvaldo Sardina, Michel Canelles, Rodrigo García, Luis Enrique Fuentes, Yoendrys Armas y Randy Carmenate, que estuvieron ahí cuando los necesité.



Dedicatoria

Realizar una obra requiere de tiempo y sacrificio de nuestra parte y en el empeño de realizarla, muchas personas intervienen en el camino ayudándonos de incontables y desinteresadas maneras por lo que a todos ellos va dedicado este trabajo.

A mi familia que me ha apoyado en cada una de las decisiones que he tomado en el transcurso de mi vida y que me ha sabido aconsejar en momentos cruciales.

A Dios quien me ha enseñado que la gloria requiere de sacrificios y que ha permitido que me formara como un hombre de bien.

Resumen

La Eléctrica es una actividad eminentemente práctica, además de teórica, de ahí que en su enseñanza las prácticas de laboratorio sean un elemento indispensable, pues permiten integrar conocimientos y habilidades al mismo nivel, permitiendo que el estudiante aprenda técnicas elementales y se familiarice con el manejo de diversos instrumentos. La incorporación de dispositivos basados en microcontroladores en dichas prácticas en el proceso de enseñanza-aprendizaje constituye un quehacer diario e imprescindible para la confrontación y verificación de los conocimientos teóricos y el dominio de las distintas herramientas de apoyo, las cuales son necesarias en el análisis de los resultados.

El trabajo a desarrollar responde al reto anteriormente expuesto y se fomenta en el diseño de un seguidor solar para el desarrollo de laboratorios en la asignatura Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética, el cual contribuirá a lograr mayor protagonismo y participación de los estudiantes en su propia formación académica, permitiéndoles adquirir las habilidades prácticas del ejercicio de la profesión e incentivando el interés por la explotación de la energía solar como una alternativa energética sostenible.

Para lograr esto se propone un seguidor de dos ejes, activo, de una gran autonomía y que consta de una parte electrónica y otra mecánica. Brinda la posibilidad de elegir el régimen de operación: sin el uso de un computador o usándolo, ampliando así sus prestaciones. En el análisis técnico económico realizado se muestra la validez de la aplicación mostrada, por su importancia para la docencia.



Summary

The Electric is an eminently practical, as well as theoretical, activity, which is why laboratory practices are an indispensable element, since they allow the integration of knowledge and skills at the same level, allowing the student to learn elementary techniques and become familiar with the management Instruments. The incorporation of devices based on microcontrollers in these practices in the teaching-learning process is a daily and essential task for the confrontation and verification of the theoretical knowledge and mastery of the different support tools, which are necessary in the analysis of the results.

The work to be developed responds to the above challenge and is promoted in the design of a solar tracking system for the development of laboratories in the subject Applications of Microcontrollers to Electroenergetics, which will contribute to achieve greater participation and participation of students in Their own academic formation, allowing them to acquire the practical skills of the exercise of the profession and encouraging the interest for the exploitation of solar energy as a sustainable energy alternative.

To achieve this, a two-axle, active, high-autonomy follower, consisting of an electronic and a mechanical part, is proposed. It offers the possibility to choose the operating regime: without the use of a computer or using it, thus extending its performance. The economic technical analysis carried out shows the validity of the application shown, because of its importance for teaching.

Tabla de contenido

Declaración de autoridad.....	I
Pensamiento.....	II
Agradecimientos.....	III
Dedicatoria.....	IV
Resumen.....	V
Summary.....	VI
Tabla de contenido.....	VII
Introducción General.....	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO-CONTEXTUAL.....	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Trabajos precedentes.....	7
1.3 Energía Solar y su aprovechamiento.....	10
1.3.1 Radiación Solar.....	10
1.3.2 Energía solar fotovoltaica.....	11
1.4 Panel solar fotovoltaico.....	11
1.4.1 Producción del panel fotovoltaico en función de la orientación del mismo.....	12
1.5 Seguidores Solares.....	13
1.5.1 Caracterización de los Seguidores Solares.....	14
1.5.2 Tipos de seguimiento del sol.....	14
1.5.3 Métodos de seguimiento.....	15
1.5.4 Clasificación de los seguidores solares.....	15
1.6 Selección del tipo de seguidor.....	20
1.7 El seguidor solar como puesto de laboratorio.....	20
1.8 Conclusiones del capítulo.....	23
CAPÍTULO II: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR.....	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 PROTEUS como herramienta de diseño y simulación.....	25
2.3 MikroC PRO for PIC como herramienta de programación.....	26
2.4 Diseño electrónico del seguidor solar.....	27
2.4.1 Bloque de Medición.....	28
2.4.2 Bloque de Procesamiento.....	32
2.4.3 Bloque de Actuadores.....	36
2.4.4 Bloque de Comunicación.....	41
2.4.5 Circuito completo del seguidor solar.....	42
2.4.6 Algoritmo a seguir para el desarrollo del programa.....	43
2.5 Diseño mecánico del seguidor solar.....	44
2.5.1 Reductores de velocidad de engranajes.....	45
2.5.2 Estructura del seguidor solar.....	46
2.6 Conclusiones del capítulo.....	47
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y VALORACIÓN ECONÓMICA.....	48
3.1 Introducción.....	48
3.2 Montaje experimental del circuito del seguidor solar.....	48
3.3 Generalidades de la Práctica a desarrollar con el seguidor solar.....	50
3.4 Valoración técnica.....	61
3.5 Valoración económica.....	61



3.6 Impacto social	63
3.7 Conclusiones del capítulo	63
Conclusiones generales.....	64
Recomendaciones	65
Bibliografía	66
Anexos.....	68

Introducción General

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene en un solo chip las unidades de memoria para el almacenamiento de datos, la aritmética – lógica para el cálculo de operaciones, las unidades de entrada y salida para comunicación con otros periféricos, los temporizadores y el controlador de interrupciones.

Su costo reducido, poco consumo de energía, gran velocidad y alta flexibilidad han dado lugar al crecimiento exponencial de su aplicación y, en consecuencia, a su invasión en muchos de los productos típicos del mundo moderno. La distribución de las ventas según su aplicación es la siguiente:

- El 30% lo absorbe la industria informática, puesto que casi todos los periféricos del computador disponen de uno o varios microcontroladores, como sucede con las impresoras, teclados, discos duros, escáneres, etc.
- Un 25% se utiliza en las aplicaciones de consumo (electrodomésticos, TV, vídeo, etc.)
- El 20% se destina al área de las comunicaciones y sus sistemas de transferencia de información, siendo el teléfono móvil su componente más representativo.
- Un 15% se emplea en aplicaciones industriales (robótica, visión artificial, control de motores, fuentes de alimentación ininterrumpibles, etc.).
- El resto de los microcontroladores vendidos en el mundo, aproximadamente un 10% los adquieren las industrias de automoción, la cual es una firme candidata a incrementar su consumo para soportar las nuevas y cada vez más exigentes funcionalidades de los vehículos modernos, pues los componentes electrónicos deben operar bajo condiciones extremas de vibraciones, choques, ruido, etc. y seguir siendo fiables. De hecho, algunas de las familias de microcontroladores actuales se desarrollaron pensando en este sector, siendo modificadas posteriormente para adaptarse a sistemas más genéricos.



Los modernos microcontroladores van afianzando sus posiciones en el mercado, siendo las áreas de más interés la electromedicina, el procesamiento de imágenes, las aplicaciones militares, el control de los dispositivos de almacenamiento masivo de datos, los edificios inteligentes, los juegos, la navegación espacial, etc. Todos ellos se presentan en una amplia variedad, lo que permite que sean empleados desde aplicaciones básicas hasta muy complejas usando el mismo conjunto de instrucciones, lo que involucra la función de un ingeniero; el cual debe elegir un modelo de microcontrolador que mejor satisfaga las necesidades de un proyecto con el mínimo presupuesto.

En la comunidad científica internacional existen diversos fabricantes que se esmeran en aumentar sustancialmente sus prestaciones y reducir su tamaño y coste. Hasta el año 2002, Motorola había ocupado el primer puesto del ranking mundial según el volumen de ventas y la diversidad de modelos. A partir de dicho año, Microchip le ha reemplazado como líder mundial de este tipo de dispositivos. Otros importantes fabricantes son: Atmel, Mitsubishi, NEC, Intel, Hitachi, Toshiba, AT&T, Siemens, National Semiconductor, etc.

Actualmente en nuestro país, los microcontroladores gozan de una buena aceptación por parte de los profesionales, pero su uso es limitado debido a la difícil adquisición de la instrumentación requerida para su desarrollarlo. A pesar de eso, el estudio de estos dispositivos es de primordial importancia en la enseñanza superior para estar a un nivel de información adecuado con la velocidad de avance de las nuevas tecnologías en el mundo.

En el Instituto Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, como parte de la estrategia trazada por el Ministerio de Educación Superior (MES) para el desarrollo de habilidades en los estudiantes, apoyado en las prácticas laborales y las prácticas de laboratorios, se ha prestado especial atención a la asignatura Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética, la cual cuenta con varios medios para el desarrollo de los laboratorios pero no tiene realizadas las prácticas que se necesitan para su implementación.



En aras de dar solución a este problema se pueden seguir dos metodologías: la primera consiste en crear una práctica específica para un tema determinado, limitándose únicamente a interactuar con las aplicaciones relacionadas con el tema escogido; la segunda consiste en optar por una práctica que integre varios contenidos a la vez, donde los estudiantes tengan que apelar a todos sus conocimientos para poder desarrollarla, por lo que esta opción se presenta como la alternativa más recomendable.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone el diseño y simulación de un seguidor solar con fines docentes, el cual permitirá el trabajo con sensores, transistores de potencia, motores de posicionamiento angular y un microcontrolador. Esta variante es de bajo costo y altas prestaciones, por lo que permitirá explotar al máximo los recursos que ponen en nuestras manos los microcontroladores.

Desde el punto de vista docente el diseño de los sistemas de seguimiento solar exige la puesta en práctica por los estudiantes de un conjunto de habilidades necesarias para su desempeño posterior en la vida laboral, por lo que la elaboración de dichos diseños como ejercicio de laboratorio puede proveer a los futuros ingenieros de la práctica necesaria para el enfrentamiento al ámbito profesional en el mañana.

Situación Problemática:

Los microcontroladores tienen una amplia gama de aplicaciones y constituyen una variante inevitable a tener en cuenta cuando se busca reducir los costos por cantidad de dispositivos a utilizar y en consecuencia, por mantenimiento. La carrera de Ingeniería Eléctrica cuenta con varios puestos de laboratorios que permiten consolidar los conocimientos prácticos en los estudiantes en diversas asignaturas tales como Electrónica de Potencia y Electrónica Analógica; sin embargo, la asignatura de Aplicación de los Microcontroladores a la Electroenergética carece de los mismos, lo que hace necesaria la implementación de prácticas que contribuyan a la formación de habilidades en los estudiantes.

Problema:

Necesidad de diseñar un seguidor solar que permita desarrollar laboratorios en la asignatura de Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética.

Hipótesis:

Si se diseña un seguidor solar a base de microcontroladores se contará con una nueva práctica para el desarrollo de laboratorios en la asignatura de Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética.

Objeto de estudio:

Seguidor solar basado en microcontroladores.

Campo de acción:

Aplicaciones de los microcontroladores para prácticas de laboratorio.



Objetivo General:

Diseñar un seguidor solar para el desarrollo de laboratorios en la asignatura de Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética.

Objetivos específicos:

- Realizar un estudio de proyectos basados en microcontroladores para prácticas de laboratorio.
- Diseñar un seguidor solar con el PIC18F4550 de gama alta destinado a las prácticas de laboratorio.
- Elaborar una guía de laboratorio para la organización, realización y evaluación de la práctica.

Tareas de la investigación:

- Realización del estado del arte con los seguidores solares.
- Diseño y simulación del seguidor solar.
- Montaje a nivel experimental del circuito propuesto.
- Elaboración de una guía para la práctica de laboratorio desarrollada.

Métodos de investigación:

- Histórico-lógico.
- Análisis-síntesis.
- Inductivo-deductivo.
- Sistémico-estructural.
- Análisis documental clásico.
- Modelación-Simulación-Experimento.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO-CONTEXTUAL

1.1 Introducción

En la actualidad existen fuentes energéticas que por su carácter de renovables, o por la enorme cantidad de reserva de la que se dispone son consideradas ilimitadas. La más importante de ellas es el sol, el cual aporta la energía que mantiene en funcionamiento los procesos climáticos y que a la vez es aprovechada por los seres fotosintéticos, que constituyen la base de la cadena trófica (Millanes 2015), por lo que es el eslabón principal para los procesos biológicos del planeta. A pesar de que su energía es muy abundante, sostenible y completamente libre de costo, el hombre ha dependido de él sin darle la importancia que representa en las actividades humanas.

La energía solar, como su nombre lo indica, es producida por el sol, y tiene múltiples aplicaciones, pero su principal empleo se basa fundamentalmente en la producción de electricidad, que recibe la denominación de energía solar fotovoltaica. Sin embargo, por el momento, el acceso a la utilización de la misma es muy costoso para las personas, lo cual impide que su aprovechamiento se encuentre al alcance de todos (Millanes 2015). A pesar de los obstáculos, las diferentes tecnologías de fabricación, así como la producción a gran escala han contribuido de manera significativa a la reducción de los precios de los módulos fotovoltaicos.

Todo esto ha aumentado la necesidad de que el hombre, valiéndose de ideas muy innovadoras, perfeccione sus diseños con el objetivo de lograr un mayor aprovechamiento de la energía solar para explotar al máximo las potencialidades que brindan las instalaciones fotovoltaicas, las cuales deben recoger la mayor cantidad posible de energía recibida en un determinado lugar. Para lograr esto existen dos metodologías: la primera consiste en mejorar los componentes internos de un panel fotovoltaico de manera que su rendimiento aumente; y la segunda consiste en aumentar la cantidad de radiación solar recibida por el panel, lo que se logra controlando que su área permanezca en posición perpendicular a la radiación lumínica de la fuente de luz. En los sistemas fotovoltaicos el hombre se las ha ingeniado para crear algo realmente innovador que consiste en implementar un dispositivo



adicional con el fin de optimizar la adquisición de radiación solar y por ende la energía suministrada por la instalación, tal dispositivo es un seguidor solar.

Los seguidores solares son utilizados para mejorar la eficiencia de los equipos que utilizan esta energía para su directa utilización, tales como: cocinas, hornos, colectores y secadores solares. Sus aplicaciones también se extienden a paneles fotovoltaicos y sistemas de medición de radiación solar.

En este capítulo se abordan los principales elementos teóricos sobre los seguidores solares, partiendo de un profundo estudio de los trabajos precedentes.

1.2 Trabajos precedentes

Para la confección de este trabajo se realizó el estudio de algunas obras donde se hace referencia a los seguidores solares y al diseño de aplicaciones para la creación de puestos de laboratorios con el objetivo de enriquecer el aprendizaje y mejorar el trabajo docente. A pesar de que los autores proponen ideas muy innovadoras, se encontraron ciertas limitaciones que hacen poco factible la implementación de sus proyectos.

La gran mayoría de ellos basan sus diseños en el uso de microcontroladores asistidos por computador, como es el trabajo desarrollado por (Salermo 2013) donde mediante el uso de un microcontrolador 87C752, dos fotosensores, un circuito de fuerza y un motor de posicionamiento angular se logra el movimiento del dispositivo, el cual presenta un bajo rendimiento ya que se trata de un seguidor solar de un eje, lo que trae como consecuencia que no se pueda realizar un seguimiento completo del Sol.

El sistema desarrollado por (Gámez 2013), mediante el uso del microcontrolador PIC16F84, una tarjeta de adquisición de datos y un driver L293 conectado a un motor de posicionamiento angular (motor paso a paso) efectúa el control del dispositivo, logrando un posicionamiento eficaz del prototipo pero careciendo de autonomía por la presencia obligatoria de un computador para su correcto funcionamiento.

Otros autores han preferido diseñar dispositivos descartando el uso de microcontroladores para lograr una mayor autonomía del sistema de



seguimiento, como se puede apreciar en el trabajo realizado por (Moreno 2008) en el que se realiza el diseño y montaje de un seguidor solar cuyo mecanismo es totalmente mecánico, es decir, que no utiliza dispositivos electrónicos. Este diseño presenta un control poco eficaz del mecanismo y no explora la posibilidad de incorporar un microcontrolador, lo que hubiera enriquecido en gran medida las funciones del dispositivo.

El sistema presentado por (Gutiérrez 2012) con la utilización de fotosensores, un motor de corriente directa, un circuito de fuerza y la ayuda de un PLC (Programmable Logic Controller) logra el seguimiento de la trayectoria; pero los componentes del sistema presentan un costo elevado, por lo que se encarece grandemente su confección.

En todos los trabajos mencionados anteriormente se desarrollan posibles variantes de seguidores solares, pero no se vinculan con fines docentes, descartando así la posibilidad de que los estudiantes interactúen con medios de enseñanza que permitan realizar prácticas de laboratorio reales y así desarrollar habilidades en la programación de los microcontroladores.

A continuación, se citan algunos trabajos que sí están encaminados a la creación de puestos de laboratorio y, por tanto, constituyen materiales muy útiles para el desarrollo de habilidades prácticas:

En el trabajo desarrollado por (González 2014) se realiza el diseño y la construcción de un inversor de tensión monofásico haciendo uso de un circuito temporizador LM555N, los circuitos operacionales LM324N y LM358N, varias compuertas lógicas, optoacopladores y un circuito de fuerza. Se abordan diferentes técnicas de mando como el control por uno y varios pulsos por semiperiodo y la modulación por ancho de pulso, todos estos a escala de laboratorio con el objetivo de realizar prácticas docentes reales y estudiar el comportamiento de las diferentes etapas en la asignatura Electrónica de Potencia; pero no se estudió la posibilidad de integrar otras técnicas de modulación implementando la utilización de circuitos programables.

La propuesta de (Díaz 2015) abarca el diseño, la simulación y fabricación de un inversor con carga resonante de alta frecuencia controlado por un microprocesador 87C752 en uno de los puestos de prueba del laboratorio de electrónica, se implementa un circuito de control para hornos de inducción



de alta frecuencia con fines docentes, con modulación PWM (UPWM). Además, incluye los demás agregados en circuitería electrónica que se necesita en el control de inversores resonantes de alta frecuencia como un display LCD PC-16D21C1-2V, optoacopladores, un regulador de tensión LM317, compuertas lógicas y un circuito de fuerza; pero no se explora la posibilidad de la automatización a través de sensores para perfeccionar el medio de enseñanza.

El dispositivo realizado por (Tamayo 2015) es un circuito de mando experimental, a base de un microcontrolador 87C752, un amplificador operacional LM358N, optoacopladores y un circuito de fuerza, para la regulación de velocidad de motores de CD (Corriente Directa) implicando varias técnicas tales como la variación del ángulo de disparo para tiristores (SCR) de un rectificador monofásico semicontrolado y la Modulación por Ancho de Pulso para regular tensión mediante un Chopper o troceador. El circuito fue diseñado y simulado con el objetivo de implementarlo para los puestos de laboratorios de las asignaturas Electrónica de Potencia y Aplicaciones Microcontroladores a la Electroenergética, sin embargo, no permite la comunicación con un computador, lo que dificulta registrar los datos para su posterior análisis.

A pesar de que los trabajos citados anteriormente tienen como objetivo la creación de puestos de laboratorios, no incorporan en sus diseños el trabajo con fotosensores (LDR) ni con motores de posicionamiento angular y tampoco utilizan la transferencia de datos por vía USB.

Todos los requerimientos mencionados anteriormente son corregidos en el presente trabajo, el cual pretende mostrar el diseño de un dispositivo en el cual se realiza una combinación de un microcontrolador PIC18F4550 (el cual posibilita el empleo del protocolo de comunicación USB), 4 fotosensores y 2 motores paso a paso para lograr la mayor exactitud en el posicionamiento de un seguidor solar de dos ejes, con autonomía; que brinda la posibilidad de elegir el régimen de operación: sin el uso de un computador o usándolo, lo que amplía grandemente sus prestaciones. Además de esto, servirá como un medio de enseñanza para enriquecer los puestos de laboratorio de la asignatura Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética, lo que permitirá desarrollar habilidades en la programación y aprender a



interactuar con programas como Mikro C y Proteus, usando todas las herramientas que ponen en nuestras manos. También ayudará a incentivar entre los estudiantes el interés por la explotación de fuentes energéticas sostenibles y evitar el uso desmedido e irracional de los recursos, porque partiendo de ideas realmente brillantes es posible, ante una inminente contaminación ambiental del planeta, cambiar la situación que hasta ahora es lamentable.

1.3 Energía Solar y su aprovechamiento

La energía solar se puede definir como la energía obtenida mediante la captación de luz y calor emitidos por el sol, los cuales son producidos por radiaciones nucleares en el interior del mismo y transmitidos en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio (Millanes 2015). Esta energía se caracteriza por no ser contaminante, al contrario, es extremadamente limpia, siendo además de acceso libre e ilimitado, por lo que ante la búsqueda de nuevas fuentes de energía, la energía solar se convierte en una alternativa viable de cara a los problemas actuales de contaminación ambiental generalizada, porque a pesar de que los gases que hay en la atmósfera terrestre retengan el 47% de la energía que llega hasta la superficie de la tierra, llegan hasta nosotros 0.7 trillones de kWh, que es una energía 4000-7000 veces superior a la que consumimos los humanos (Gómez 2014).

1.3.1 Radiación Solar

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, que no tienen la misma intensidad, si no que tienen una distribución espectral y se distribuyen desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Los tres factores que la afectan al atravesar la atmósfera son: reflexión, absorción y difusión, ya que los rayos solares pueden sufrir muchas variaciones antes de alcanzar la superficie terrestre (Mejía, Londoño et al. 2010). La radiación solar puede llegar a la tierra de tres maneras diferentes: directa, difusa y reflejada. De ellas, la radiación directa es la que va a ser útil para obtener energía solar fotovoltaica, y es aquella que proviene directamente de la esfera solar sin sufrir ningún cambio.

1.3.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica consiste en la obtención de electricidad directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula (celda) fotovoltaica.

La célula fotovoltaica es un dispositivo semiconductor fabricado generalmente de silicio, capaz de convertir los fotones procedentes del sol en electricidad de una forma directa e inmediata, es decir, es el dispositivo responsable del efecto fotovoltaico, mostrado en la figura 1.1, el cual consiste en la transformación parcial de la energía luminosa en energía eléctrica. Las celdas solares pueden ser **crystalinas** (interconectadas unas con otras para formar los paneles solares, lo que trae consigo que sean las de mayor eficiencia y por tanto, las más caras) o **amorfas** (conformadas de una película de Silicón depositada sobre otra lámina de materiales como el acero, por lo que el panel se forma de una sola pieza, lo que provoca que su eficiencia sea menor a las anteriores) (Millanes 2015).

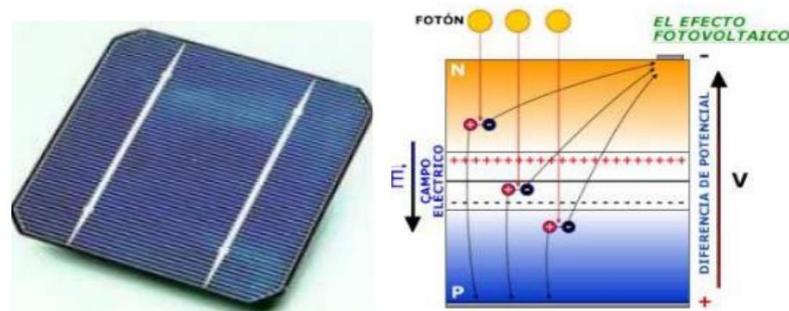


Figura 1.1. Célula fotovoltaica y efecto fotovoltaico.

La energía generada por células fotovoltaicas se usa para alimentar innumerables aparatos autónomos. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de celdas e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años.

1.4 Panel solar fotovoltaico

Como la corriente que genera una celda fotovoltaica es muy pequeña (1.1-1.7 V), casi siempre se agrupan las células para conseguir una corriente mayor; a este arreglo se le conoce como panel (módulo o colector) solar fotovoltaico (Gómez 2014).

Estos dispositivos se encargan de transformar parte de la radiación solar que incide en ellos en energía eléctrica y sus principales componentes son las celdas de silicio. En la figura 1.2 se muestra un módulo fotovoltaico.

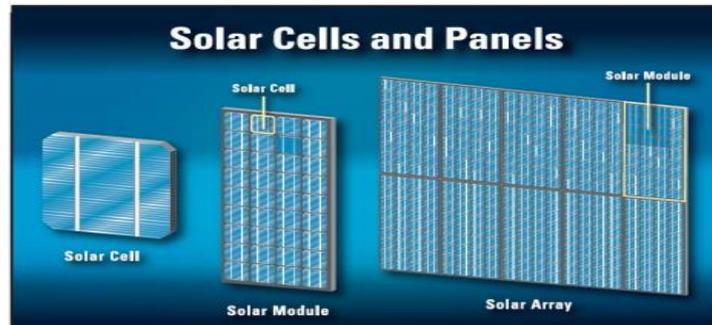


Figura 1.2. Módulo solar fotovoltaico.

El armazón o marco de los módulos debe ser a la vez resistente y ligero. Se suele hacer de aluminio con resinas para hacerlo hermético. La cubierta del panel suele ser de cristal templado, resistente a impactos, transparente, deja pasar las radiaciones solares en más del 92%. Su fijación al suelo debe ser firme, ya que tienen que permanecer fijos en el suelo más de 25 años (su vida útil) (Gómez 2014).

Los paneles solares se deben orientar al sol, según la hora, día, mes, año, y lugar geográfico, si se dispone de sistemas de inclinación variable. Cuando los paneles son fijos se escoge una orientación media, la más adecuada para la zona. Usualmente la inclinación fija tiene un costo inferior.

1.4.1 Producción del panel fotovoltaico en función de la orientación del mismo

La producción de energía eléctrica de un panel fotovoltaico (Gómez 2014), viene determinada por la siguiente expresión:

$$P = G \cdot \eta \cdot \eta_1 \cdot \text{sen}(a) \quad (1.1)$$

Dónde:

P : Potencia del panel

G : Potencia solar

η : Rendimiento del panel

η_1 : Perdidas por temperatura

a : Ángulo de incidencia de la radiación

En la figura 1.3 se puede observar la variación del ángulo de incidencia.

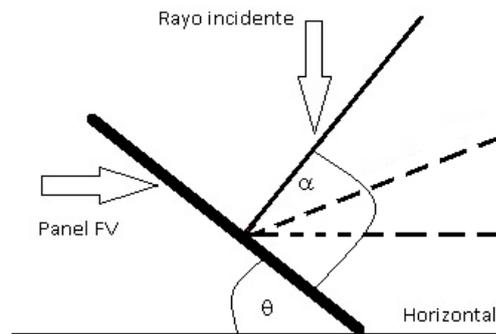


Figura 1.3 Variación del ángulo de incidencia

Se puede deducir que la mayor potencia se obtiene cuando alfa es igual a 90 grados o está próximo a este, debido a que el $\sin(90)$ es 1, de lo contrario el valor es menor que 1; orientando los paneles de forma correcta se obtendrá incrementos de potencia. El ángulo de incidencia de la luz solar tiene un papel relevante en la cantidad de energía recibida, por lo que su corrección disminuirá las pérdidas considerablemente.

Además de las pérdidas por la mala orientación del panel existen aquellas que son por suciedad, temperatura, viento (debido al enfriamiento), conectar paneles diferentes, espectro solar, caídas óhmicas del cableado, rendimiento propio del panel, de la batería, del inversor, etc., pero en tales casos no se puede hacer casi nada, por lo que siempre van a existir factores externos que limitarán el voltaje que pueda proporcionar el panel.

Generalmente, la cantidad de poder que se genera con un panel solar es de 12 voltios, los cuales se pueden utilizar de manera independiente o como conjunto en una red. Es posible conectar en serie o en paralelo un grupo de paneles de energía solar para lograr generar un mayor voltaje.

1.5 Seguidores Solares

La incidencia de los rayos solares sobre el plano de los paneles solares fotovoltaicos difiere de la perpendicularidad a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida la eficiencia de los paneles solares. Es posible corregir esta situación utilizando un seguidor solar que oriente los paneles a la posición del Sol, lo que se muestra en el anexo 1.

Los seguidores solares son dispositivos mecánicos que hacen que el panel o el colector, siga la trayectoria del sol durante el día y al final de este se repositone para continuar con este movimiento al siguiente día. En resumen este dispositivo simula la propiedad que tienen los girasoles de realizar un moviendo de orientación hacia la luz del sol. Los paneles fotovoltaicos con seguimiento siguen el movimiento del sol, obteniendo un mayor rendimiento en comparación con los sistemas fotovoltaicos con paneles fijos, entre un 30 y un 34% más (Castañeda, Ramírez et al. 2010).

1.5.1 Caracterización de los Seguidores Solares

Un seguidor solar está conformado básicamente por una parte fija y una móvil, la 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, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar. Su movimiento está inspirado en la trayectoria seguida por los girasoles y hay dos movimientos que se deben controlar, el de la trayectoria del Sol durante el día y la variación de esta trayectoria durante el año. Los seguidores solares acoplados a los sistemas captadores (sistema de seguimiento solar) se utilizan para posicionar los sistemas captadores de radiación, de forma que éstos permanezcan cercanos a la perpendicular paralela de los rayos solares (Cervantes, Carralero et al. 2015), para convertir la energía captada en calor o energía eléctrica y ser utilizada en viviendas, complejos urbanísticos o en la industria.

1.5.2 Tipos de seguimiento del sol

Dependiendo de la aplicación que se le va a dar al seguidor y las necesidades de los usuarios, entonces se elegirá el tipo de seguimiento a emplear (Gámez 2013). Existen dos prototipos que se pueden llevar a cabo:

- **Seguimiento Ecuatorial:** Consiste en el seguimiento de dos ejes paralelos a los de la tierra (N-S/E-O), donde el movimiento en Norte-Sur proporciona el movimiento diurno y el movimiento Este-Oeste proporciona el ángulo que se toma con respecto al eje polar.
- **Seguimiento Azimutal:** Es uno de los más empleados, sobre todo cuando se trata de estructuras pesadas. Uno de los ejes es vertical y



proporciona el seguimiento en azimut y el otro eje es horizontal y proporciona el seguimiento de altura. El seguimiento se realiza en los dos ejes.

1.5.3 Métodos de seguimiento

El seguimiento solar se puede realizar mediante la utilización de distintas técnicas, como son:

- **Seguimiento por sensores:** Es el que permite la detección o medida que falta en el correcto ángulo entre la radiación solar y la superficie del panel solar, el cual debe ser de 90° para una eficiente captación.
- **Seguimiento por reloj solar:** Está sujeto a la unidad de tiempo de 24 horas, variando su posición respecto al ciclo día de esta unidad.
- **Seguimiento por coordenadas calculadas:** Sigue la trayectoria del sol entre cada posición mediante el cálculo de sus coordenadas astronómicas, no precisa de la presencia de radiación.

1.5.4 Clasificación de los seguidores solares

En el siguiente apartado se mostrarán las distintas clasificaciones de los seguidores solares atendiendo a sus características particulares (Grassi 2012):

➤ Atendiendo a su estructura:

- **Seguidor de estructuras fijas:** Son las más robustas y flexibles del mercado y permiten adaptarse a cualquier tipo de terreno con desniveles superiores al 5%.
- **Seguidor de estructuras móviles:** Son menos robustas que las anteriores y permiten ser trasladadas hacia lugares de mayor incidencia del sol.

➤ Según el tipo de sistema fotovoltaico

- **Seguidores de sistemas fotovoltaicos concentrados:** Son aquellos que requieren que la componente de luz directa esté concentrada en un punto específico, y por lo tanto debe estar orientado con mucha precisión, arrojando pérdidas en caso contrario. Los seguidores de este tipo orientan ya sea el sistema



o un espejo o conjunto de espejos para que la luz recibida sea enfocada en un colector fotovoltaico. La precisión requerida en este caso va desde un máximo de 2° hasta un mínimo de 0.1° para entregar el 90% de la potencia nominal de salida.

- **Seguidores de sistemas fotovoltaicos no concentrados:** En el caso de los paneles fotovoltaicos aceptan tanto la luz directa como la difusa, de manera que en estos casos no requieren gran precisión para entregar una potencia aceptable, como en el caso anteriormente explicado. El seguimiento en estos tipos de sistemas se usa para minimizar el ángulo de incidencia entre la luz incidente y la normal de los paneles, para producir la mayor cantidad de energía. La precisión requerida puede intuirse entonces que no es tan grande, ya que la potencia recibida por el panel está afectada por el coseno del ángulo entre la normal del panel y el rayo incidente.

➤ **Según el dispositivo que realiza el movimiento:**

- **Seguidor pasivo:** Es un seguidor que carece de un control electrónico para su funcionamiento, el cual se basa en el cambio de densidad de un líquido de bajo punto de ebullición, regularmente freón. También puede usar un gas comprimido de bajo punto de ebullición, el cual es conducido hacia un lado o hacia otro, según sea calentado por la luz solar incrementando la presión en el gas, provocando que el seguidor se mueva en respuesta a ese desbalance. Como es un tipo de seguimiento impreciso no puede utilizarse para sistemas concentrados, pero sí en sistemas fotovoltaicos no concentrados.
- **Seguidor activo:** Este tipo de seguidor utiliza un control electrónico para ubicar la posición del Sol, el cual se retroalimenta a base de sensores o por cálculos numéricos y utilizan algún actuador para realizar el movimiento. Puede utilizar motores eléctricos, brazos electromecánicos con engranajes o tornillos sin fin, los cuales son controlados por un

circuito electrónico. Este tipo de seguidor debe estar energizado ya sea por una fuente externa al sistema FV o por el mismo, convirtiendo al seguidor en “autónomo”. Se debe considerar que la energía en el panel solar debe ser suficiente para energizar el seguidor, de lo contrario, no podrá orientarse. En el mercado existen diferentes tipos de seguidores activos que se diferencian entre sí por el número de movimientos automáticos que realizan y el volumen de trabajo que pueden desarrollar.

➤ **Según su algoritmo de movimiento:**

- **Seguidores por punto luminoso:** Poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar. El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal integrada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad. Presentan una mayor facilidad para implementar el algoritmo de seguimiento, pero presentan poca fiabilidad. Son más baratos y de fácil construcción, además de ser una tecnología robusta y confiable.
- **Seguidores con programación astronómica:** Estos, mediante un programa conocen en qué punto debería estar el Sol a cada hora y apuntan a dicha posición. Presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento. Presenta una mayor fiabilidad, pero es más difícil la implementación del algoritmo de seguimiento. Es usado mayormente en sistemas fotovoltaicos basados en un seguimiento directo del Sol, pero

es una tecnología muy cara y engorrosa desde el punto de vista de su mantenimiento y control.

➤ **Según los grados de libertad:**

❖ **Seguidores de un solo eje:** Estos sólo tienen un grado de libertad, es decir se mueven en un solo eje de rotación. Hay varios tipos de seguidores de un solo eje, que se explican brevemente a continuación:

- **Un solo eje horizontal:** Este tipo de seguidor tiene el eje horizontal respecto al suelo. En este caso, el eje horizontal está orientado Norte-Sur, y a lo largo del día los paneles horizontales girarán sobre este eje, siguiendo el movimiento aparente del Sol. Este tipo de seguidor es aceptable en latitudes cercanas al ecuador.
- **Un solo eje vertical:** En este caso el eje está vertical respecto al suelo. En latitudes lejanas al ecuador son recomendables este tipo de seguidores. Los paneles suelen estar orientados con un ángulo respecto al eje de rotación, y cuando giran forman un cono alrededor del eje.
- **Un solo eje inclinado:** El seguidor de un solo eje que no sea ni vertical ni horizontal, es un seguidor de eje inclinado. Los paneles están inclinados con la misma inclinación del eje, y cuando giran forman un cilindro alrededor de este eje. Una variación de este tipo de seguidor es la que tiene la inclinación igual a la latitud donde se encuentra la instalación, con una orientación de su eje de polo a polo. Es decir que apunte a un polo celeste, simulando con su movimiento el de La Tierra, solo que en sentido contrario.

❖ **Seguidores de dos ejes:** Estos tienen dos grados de libertad, es decir, dos ejes de rotación. Estos ejes están típicamente perpendiculares el uno del otro. El eje primario es el que está fijo respecto a La Tierra, y el otro eje, que está referenciado al

eje primario se llama eje secundario. Hay varios tipos de seguidores de dos ejes, estos son los más comunes:

- **Seguidor de dos ejes de inclinación (TIP-TILT):** Este tipo de seguidor tiene su eje primario horizontal respecto a la tierra. El eje secundario es perpendicular al primario. Los ejes de rotación están típicamente alineados con el Norte magnético o con algún paralelo Este-Oeste. Uno de los ejes permite orientar al panel en su posición Norte-Sur y el otro en la posición Este-Oeste que se encuentre el Sol en el cielo.
- **Seguidor de Azimut-Altitud:** Este tipo de seguidor tiene su eje primario vertical respecto al suelo. El eje secundario es perpendicular al primario. Este tipo de seguidor de dos ejes es el más implementado debido a su sencillez en la estructura, además que no requiere estar a gran altura por sobre el suelo; esto es especialmente importante en el caso de tratarse de grandes instalaciones. Este tipo de seguidor ubica a los paneles solares frente al Sol girando alrededor de su eje vertical un ángulo conocido como Azimut, y elevando la inclinación de los paneles a la Altitud a la que se encuentra el Sol.

Los seguidores de un eje y de dos ejes presentan características diferentes, que influyen en su producción de electricidad. Como en el seguidor de dos ejes la superficie se mantiene siempre perpendicular a los rayos solares, es el que consigue un mayor aprovechamiento de la energía solar. Aunque la ganancia energética no depende sólo del tipo de seguidor, si no también depende en gran medida del emplazamiento, como se ha visto en el apartado anterior. Debido a que la mecánica de los seguidores de dos ejes es complicada, en algunas ocasiones, como en buena parte de las cubiertas, no resulta rentable teniendo en cuenta el incremento de energía obtenido, por lo que en esos casos es más común la utilización de seguidores solares de un eje (Gómez 2014).

En la tabla 1.1 se muestran las principales ventajas y desventajas que caracterizan a estos dispositivos.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas entre seguidores de uno y dos ejes.

Seguidor	Ventajas	Desventajas
Un eje	Menor costo, simplicidad, posibilidad de adaptación a cubiertas,	Seguimiento solar impreciso, menor energía captada
Dos ejes	Seguimiento solar más preciso, incrementos de la producción en torno a cubiertas en un 35% con respecto a una planta fija, generalmente dificultan el robo de paneles fotovoltaicos.	Mayor costo

1.6 Selección del tipo de seguidor

La mejor manera para elegir un tipo de seguidor es analizando su desempeño individual, lo que determinará su rendimiento en el campo de operación. Por esto, se optó por un seguidor solar activo por punto luminoso, de dos ejes del tipo acimutal. El término activo lo define el empleo de dos motores eléctricos del tipo paso a paso y un circuito eléctrico de control del mecanismo y es por puntos luminosos porque se emplearán cuatro fotosensores. Se escogió la variante de dos ejes por tener un seguimiento solar más preciso y mayor eficiencia en comparación con los seguidores de un eje, y el tipo azimutal debido a la sencillez de la estructura necesaria para su funcionamiento. Además de esto, el movimiento del seguidor no será continuo en el tiempo, reduciéndose el consumo al no estar los motores constantemente energizados.

1.7 El seguidor solar como puesto de laboratorio

Las prácticas de laboratorio constituyen una parte importante dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje, ya que solo a través de ejercicios prácticos reales es que se adquieren las habilidades necesarias para su utilización en la vida laboral, así como la confrontación y verificación de los conocimientos teóricos, formándose así en el estudiante un método científico

de trabajo. También ofrecen la posibilidad de resolver tareas haciendo uso de diferentes herramientas y permiten cumplimentar el objetivo instructivo fundamental de la asignatura. Para que se realicen eficientemente es imprescindible que se asegure el trabajo individual de los alumnos y la posibilidad de ejercitar lo suficiente para lograr un dominio del manejo de los instrumentos y el análisis de los resultados. Además de esto, los laboratorios deben estar dotados de una infraestructura adecuada, la que permitirá satisfacer las demandas y necesidades de los usuarios en mayor o menor grado, según el acondicionamiento que posean.

Es por esto que el diseño de este seguidor solar está encaminado a enriquecer la realización de prácticas de laboratorio de la asignatura Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética, la cual vincula sus contenidos con las técnicas de computación, por lo que ésta adquiere un enfoque moderno y constituye una base fundamental de la carrera de Ingeniería Eléctrica. Su estudio permite el desarrollo del pensamiento lógico para enfrentar las exigencias de la Electrónica de Potencia, los Accionamientos Eléctricos Automatizados y las Protecciones Eléctricas, relacionadas con la algoritmización, programación y configuración de dispositivos lógicos programables que permitan controlar procesos industriales.

Se complementa con otras asignaturas como Circuitos Eléctricos y Mediciones Eléctricas, las cuales se fundamentan en la necesidad de obtener la información y controlar los procesos que se desarrollan en los sistemas y equipos eléctricos. La gran variedad de instrumentos y métodos de medición que se han desarrollado, desde la aparición misma de la aplicación a la industria de los fenómenos eléctricos, hacen necesaria la sistematización y orientación de su estudio, motivo por el cual a este medio de enseñanza se le incorporaron puntos de medición con el objetivo de que los alumnos puedan interactuar y realizar una serie de mediciones con diversos instrumentos como el multímetro y el osciloscopio, requerimientos que permiten explotar todas las capacidades del microcontrolador para lograr los ajustes óptimos esperados en el diseño y garantizar el aprendizaje por parte de los estudiantes.

Es beneficioso que se incluyan en cada asignatura la mayor cantidad posible



de ejercicios y problemas prácticos de aplicación directa en la carrera, con lo cual se le ilustra al estudiante cómo se aplican en las disciplinas subsiguientes los conocimientos y habilidades adquiridas, propiciando así la motivación interna por la profesión.

Objetivos generales educativos:

- Desarrollar las formas del pensamiento lógico y la capacidad de razonamiento mediante el desarrollo de habilidades que se deriven de la aplicación de conceptos, métodos, algoritmo y tecnología moderna, que contribuyan a la formación de hábitos laborales indispensable en su formación profesional.
- Formar una concepción de ahorro y uso racional de la energía y los recursos materiales, así como de la conservación del medio ambiente.
- Desarrollar la capacidad de manejar la información científico- técnica y la utilización del idioma inglés y la computación aplicada a la explotación de los sistemas electrónicos.

Objetivos generales instructivos:

- Utilizar las posibilidades de comunicación a través del protocolo USB.
- Resolver la selección y explotación de instrumentos eléctricos y electrónicos para realizar mediciones de magnitudes asociadas a los seguidores solares.
- Conectar y operar instrumentos de medición que permitan verificar el correcto funcionamiento del seguidor solar.

Sistema de conocimientos:

- Protocolo de comunicación USB.
- Elementos del hardware del seguidor solar.
- Programas de aplicación, que incluyen la utilización de sensores, motores de posicionamiento angular, unidades de E/S, etc.
- Funciones básicas y características de los elementos que componen el seguidor solar.

Sistema de habilidades:

- Describir las funciones básicas de los elementos que componen el seguidor solar.

- Conectar, escoger el campo de medición y realizar la lectura con instrumentos analógicos y digitales.
- Conectar y operar los circuitos necesarios para realizar la verificación del correcto funcionamiento del seguidor solar.
- Explicar el principio de funcionamiento, las ventajas y desventajas del seguidor solar.
- Operar el seguidor solar procesando las señales de los sensores.

1.8 Conclusiones del capítulo

- Se realizó una revisión bibliográfica del diseño de seguidores solares, así como la implementación de dispositivos para la creación de puestos de laboratorios con el objetivo de enriquecer el aprendizaje y mejorar el trabajo docente.
- Se llevó a cabo un estudio de los tipos de seguidores solares, sus características fundamentales y las ventajas y desventajas que poseen cada uno de ellos.

CAPÍTULO II: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR

2.1 Introducción

El diseño de este seguidor solar consistirá en un circuito capaz de detectar el desbalance luminoso entre cuatro fotorresistencias ubicadas en la misma posición que un panel solar, de manera que cuando estas no estén orientadas hacia el Sol, el circuito pueda activar dos motores que actúen sobre la estructura del panel para orientarlo hacia el Sol y corregir dicho desbalance. La figura 2.1 muestra un esquema básico del funcionamiento del sistema, el cual está compuesto por una parte electrónica y otra mecánica. La parte electrónica es la que realiza el control del sistema en general, ya que en esta se encuentra el microcontrolador, el cual es el encargado de realizar todas las tareas necesarias para lograr un seguimiento directo al Sol. Además, se encuentran los bloques de entrada de la medición de los fotosensores y los actuadores usados en el control de los motores de pasos. La parte mecánica consta de los elementos necesarios como bases, plataformas, cilindros, engranajes, entre otros, donde van acoplados los motores de pasos y las fotorresistencias.



Figura 2.1. Principio de funcionamiento del sistema de seguimiento solar.

En este capítulo se abordan aspectos relacionados con las herramientas utilizadas y se propone el diseño de un sistema de seguimiento solar capaz de comunicarse con una PC mediante el protocolo de comunicación USB.

2.2 PROTEUS como herramienta de diseño y simulación

El software de diseño y simulación Proteus de Labcenter Electronics (figura 2.2) es una herramienta útil para estudiantes y profesionales que desean acelerar y mejorar sus habilidades para el desarrollo de aplicaciones analógicas y digitales.

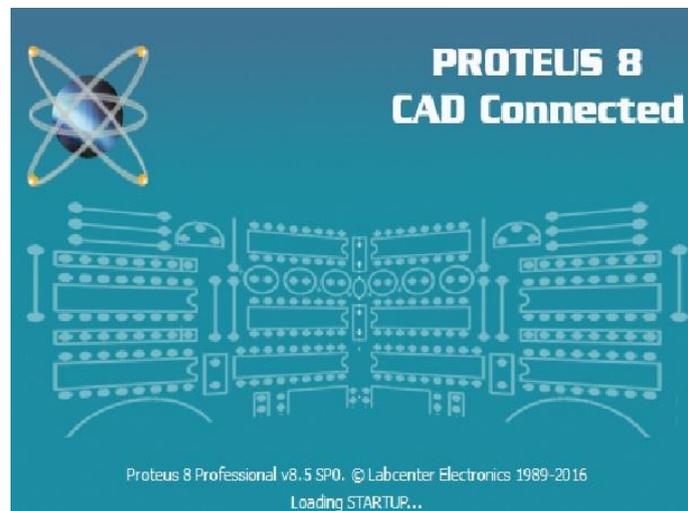


Figura 2.2. Software Proteus, de Labcenter Electronics.

Este programa es una aplicación de diseño que se compone de tres módulos específicos:

- ISIS (Intelligent Schematic Input System): módulo de captura de esquemas, utilizado para el diseño gráfico.
- ARES (Advanced Routing Modelling): para la realización de circuitos impresos.
- VSM (Virtual System Modelling): el módulo de simulación virtual.

Permite el diseño de circuitos empleando un entorno gráfico en el cual es posible colocar los símbolos representativos de los componentes y realizar la simulación de su funcionamiento sin el riesgo de ocasionar daños a los circuitos.

La simulación puede incluir instrumentos de medición y la inclusión de gráficas que representan las señales obtenidas en la simulación.

Lo que más interés ha despertado para su elección es la capacidad de simular adecuadamente el funcionamiento de los microcontroladores más populares (PICs, ATMEL-AVR, MOTOROLA, INTEL, etc.), empleando el Sistema de Modelos Virtuales (VSM), dispone de herramientas para compilar

y depurar programas en diversos lenguajes de programación tales como el C++, ensamblador, entre otros.

Proteus permite el diseño esquemático de circuitos conformados por microprocesadores y microcontroladores conectados con elementos electrónicos (fuentes, resistencias, capacitores, inductores, LEDs), dispositivos de entrada/salida (displays siete segmentos y LCD, teclados, botones), elementos electromecánicos (contactos, motores), circuitos integrados y otros componentes.

Luego de construir el circuito mediante una interfaz de dibujo esquemático, el usuario puede programar virtualmente los microcontroladores presentes en el circuito, y correr una completa simulación del mismo. Esto permite validar el diseño, corregir errores e introducir mejoras antes de implementar el circuito real en el Laboratorio.

La simulación de Proteus es interactiva, puesto que el usuario, mediante clicks del mouse sobre los dispositivos periféricos, puede cambiar el estado de las señales de entrada al micro y observar la respuesta de éste de acuerdo a su programación.

También tiene la capacidad de pasar el diseño a un programa integrado llamado ARES en el cual se puede llevar a cabo el desarrollo de placas de circuitos impresos.

Posee una muy buena colección de bibliotecas de modelos tanto para dibujar, simular o para las placas. Además, permite la creación de nuevos componentes, su modelización para su simulación e, incluso, la posibilidad de solicitar al fabricante (Labcenter Electronics) que cree un nuevo modelo (Merencio 2016).

2.3 MikroC PRO for PIC como herramienta de programación

Para la programación del microcontrolador se optó por el compilador MikroC PRO for PIC (figura 2.3), debido a que este es un compilador con todas las funciones ANSI C para dispositivos PIC de Microchip®. Cuenta con IDE intuitivo, potente compilador con optimizaciones avanzadas, muchas bibliotecas de hardware y software, y herramientas adicionales que son de gran ayuda en el trabajo. Presenta una gran cantidad de librerías y permite agregar otras desarrolladas específicamente para ciertas funciones. Este



compilador viene con archivos de ayuda integrada y un gran número de ejemplos listos para usar, diseñados especialmente para que puedan ser consultados por principiantes en programación.



Figura 2.3. Software MikroC PRO for PIC.

A continuación, se citan algunas de sus ventajas:

- Cuenta con cuatro niveles de optimización que pueden reducir el tamaño de su código hasta en un 20%.
- Uno de los mejores IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) disponibles en la actualidad: intuitivo, rápido y rico en características, lo que permite una gran comodidad durante la programación.
- Presenta más de 500 funciones de librerías lo que se traduce en un enorme ahorro de esfuerzo y tiempo.

2.4 Diseño electrónico del seguidor solar

Para satisfacer las necesidades del sistema en desarrollo, se plantea el diseño de un circuito electrónico que cumpla las siguientes condiciones:

- ✓ Capacidad para efectuar mediciones empleando sensores analógicos.
- ✓ Posibilidad de procesamiento para el filtrado de las mediciones y ejecución de un algoritmo de control.
- ✓ Capacidad de comunicación con PC.
- ✓ Facilidad de ajuste y configuración por software.
- ✓ Debe incluir actuadores para los motores de pasos, así como algún dispositivo de posicionamiento.
- ✓ Bajo consumo energético y bajo costo de producción.

Los cuatro bloques funcionales que conforman el circuito electrónico, se muestran en la figura 2.4. Los mismos se describen a continuación:

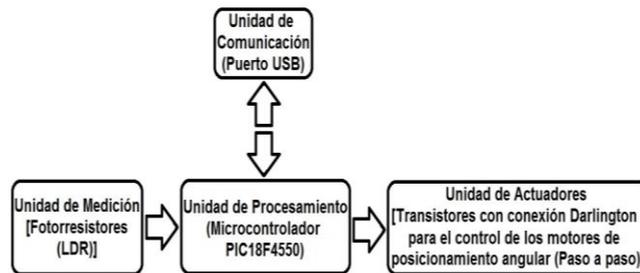


Figura 2.4. Bloques principales del circuito electrónico del seguidor solar.

2.4.1 Bloque de Medición

Para efectuar la captación de la luz en el seguidor se implementa una pequeña unidad basada en el empleo de 4 fotorresistencias. Cada fotorresistencia se conecta a una resistencia para ajustar los valores de entrada al microcontrolador. La señal de salida de la fotorresistencia se conecta a una entrada analógica del microcontrolador, el que se encarga de medir en cada momento el valor equivalente al nivel de iluminación que incide sobre la fotorresistencia.

Sensores LDR

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una Tensión eléctrica (como en un termopar o en sensor de efecto Hall), una corriente eléctrica (como en un fototransistor), etc. (Gomez 2016).

En la actualidad gracias a los avances en electrónica la mayoría de los seguidores solares están provisionados de sensores ópticos que logran la reorientación de un panel solar, colector u otro dispositivo según los movimientos reales del sol, pareciéndose totalmente a un girasol. Un caso clásico se logra utilizando cuatro fotorresistores (LDR): 2 situadas en la parte superior del eje de altura y 2 situados en el eje de azimut, todos al lado del área efectiva.

Los sensores LDR, son dispositivos que cambian su resistencia en función de la intensidad de luz, cuanto mayor sea la intensidad de la luz, menor es la resistencia que ofrece la LDR (Mendoza 2011). Estos dispositivos son útiles para determinar, la presencia o ausencia de luz en el ambiente, es posible concebir con estos dispositivos controles de luminosidad. La apariencia física y una de las vistas posibles en el simulador ISIS, son las que se muestran en la figura 2.5.

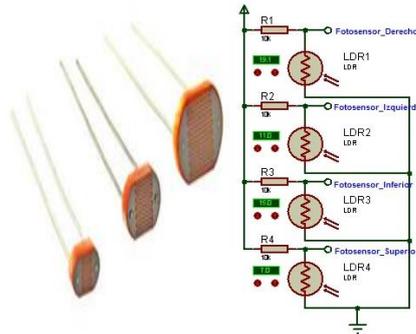


Figura 2.5. Apariencia física y vista en el simulador ISIS de los LDR.

Las características eléctricas de estos dispositivos no son fácil de conseguir dado su simple funcionamiento y gran variedad de fabricantes, las LDR, o fotorresistencias, se adquieren comercialmente en tamaños diversos, esto implica que el rango de resistencia cambia en función del tamaño, una LDR, de tamaño grande tiene rangos de cambio menor que una LDR pequeña. Incluso los cambios de resistencia no son exactamente iguales en dos LDR, del mismo tamaño. Estas razones hacen que la forma de mayor simplicidad para su uso sea la lectura de su resistencia, o el voltaje que se desempeña en sus terminales. Para usar una LDR, la forma más simple es realizar un divisor de voltaje con una resistencia fija (Mendoza 2011), para entender este concepto se puede observar el arreglo o circuito mostrado en la figura 2.6.

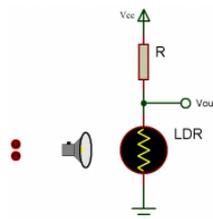


Figura 2.6. Vista en el simulador ISIS de la conexión del LDR con una resistencia para aplicar un divisor de tensión.

Asumiendo la teoría básica de circuitos eléctricos para un divisor de voltaje se puede implementar la siguiente ecuación:

$$V_{adc} = \frac{LDR(V_{cc})}{LDR + R} \quad (2.1)$$

Despejando de la ecuación (2.1), el valor de la fotorresistencia LDR se obtiene la siguiente ecuación:

$$LDR = \frac{(V_{out})(R)}{V_{cc} - V_{out}} \quad (2.2)$$

Dado que el valor de salida V_{out} se puede ingresar a una entrada AD, del microcontrolador se puede asumir como V_{adc} , con la siguiente relación y un voltaje de referencia positivo de 5 voltios:

$$V_{adc} = \frac{(R_{adc})(5)}{1023} = (R_{adc}) * 0,004887585 \quad (2.3)$$

Remplazando la ecuación (2.3) en la ecuación (2.2), y asumiendo que V_{cc} es de 5 voltios, obtenemos la siguiente relación:

$$LDR = \frac{(R_{adc})(0,04887585)(R)}{5 - (R_{adc})(0,04887585)} \quad (2.4)$$

El módulo de sensores es la primera etapa del sistema de control donde se adquieren las señales físicas, las mismas que serán transformadas en señales eléctricas de voltaje para ser llevados al módulo de control. El módulo está constituido por cuatro LDR que forman un circuito de divisor de voltaje. Este tipo de arreglos de LDR's se utiliza mayormente en robótica, cuando es necesario que un dispositivo sea guiado por un haz de luz para un determinado fin. También es utilizado en seguimiento solar, pero no precisamente con esta aplicación. De la figura 2.7 se desprende que la precisión de este tipo de arreglos depende de varios parámetros, por ejemplo las características propias de las LDR's, la separación entre ellas, el ancho del tabique, etc.



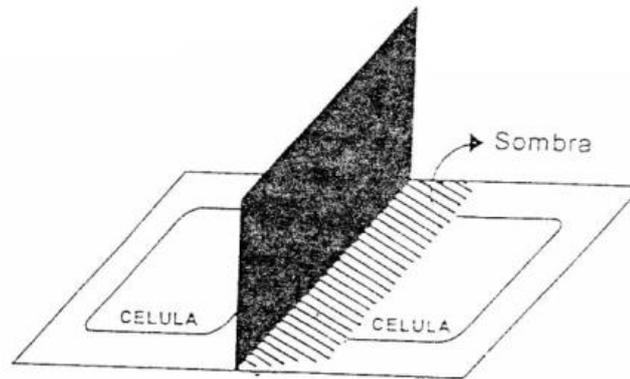


Figura 2.7. Disposición de los sensores LDR's utilizados para captar la luz del Sol.

Entre más cerca estén las fotorresistencias del tabique, el sistema será más sensible, ya que una ligera variación en la posición del sol hará sombra sobre alguna LDR; depende además de la altura del tabique, que al ser pequeño disminuye la sensibilidad, puesto que la sombra es más pequeña. La sensibilidad no siempre es muy deseada pues ello implicaría oscilaciones permanentes en el sistema al tratar de buscar la posición óptima (Gómez 2014), lo cual estaría en contra del ahorro que se está proponiendo. Para ello las posiciones de los sensores LDR deben estar de manera tal que haya un margen de error de 1 grado respecto a la posición del sol, lo que daría un descanso al motor paso a paso.

Las características propias de las fotorresistencias pueden ser diferentes entre sí, y es necesario asegurarse de que ambas LDR's a utilizar sean lo más idénticas posible. Es recomendable sustituir las LDR's por otras que, no solamente sean iguales entre sí, sino que tengan valores altos (más de 50 k ohm). Además debe procurar que la variación sea lo más lineal posible.

Límites de posición

El circuito dispone de cuatro sensores o límites de posición, los cuales indican que el seguidor solar ha llegado a alguno de los extremos y en este caso se utilizan para corregir errores en los ángulos calculados y para evitar que el panel se desplace más allá de los 150 grados previstos en la teoría conceptual del seguidor. En el simulador dichos límites fueron representados a través de los modelos de botones o pulsadores como se observa en la figura 2.8.

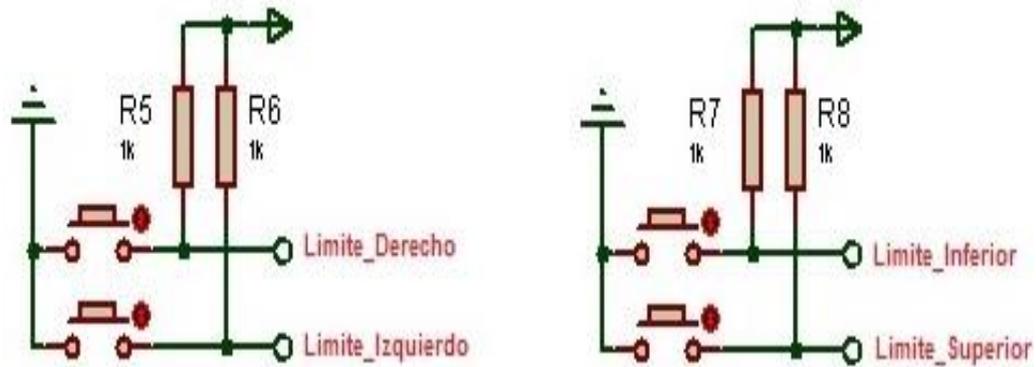


Figura 2.8. Vista en el simulador ISIS de los límites de posición de altura y azimut.

2.4.2 Bloque de Procesamiento

Esta parte del circuito está constituida por el microcontrolador PIC18F4550, el cual es el encargado de realizar el control sobre el sistema, pues tiene que manipular los actuadores para el movimiento del motor de pasos, procesar y almacenar las mediciones de los fotosensores, así como realizar la comunicación con la PC.

Microcontrolador PIC 18F4550

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres unidades funcionales principales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada y salida, y las facilidades de entrada salida, como son la gestión de interrupciones, puertos paralelos, serie y temporizadores, todo en un único circuito integrado. Pueden incluir también entradas y salidas analógicas asociadas a convertidores A/D y D/A y circuito de Watch Dog (Perro Guardián) (Gomez 2016).

Entre los dispositivos más empleados en el desarrollo de sistemas de seguimiento solar se encuentran los microcontroladores, de aquí la decisión de desarrollar este proyecto a partir de un microcontrolador, el PIC 18F4550 de Microchip, que cumple con los requerimientos necesarios (figura 2.9).

Principales características del microcontrolador PIC18F4550

El PIC18F4550 es un microcontrolador enfocado a aplicaciones de baja potencia (nanoWatt) y elevada conectividad. Viene con soporte nativo para USB, lo cual quiere decir que incluye un controlador USB 2.0 interno que dispone de patas de salida para conectar directamente al ordenador, sin la necesidad de circuitería externa (Inc 2007). Tiene las siguientes características:

- Frecuencia máxima de operación de 48MHz
- Memoria de programa de 32.768 bytes
- Memoria RAM de datos de 2.048 bytes
- Memoria EEPROM de datos de 256 bytes
- 20 Interrupciones
- 35 Líneas de E/S
- 4 Temporizadores
- 1 Módulo de Comparación/Captura/PWM (CCP)
- 1 Módulo de Comparación/Captura/PWM mejorado (ECCP)
- Canales de Comunicación Serie MSSP y EUSART
- 1 Canal USB
- 1 Puerto Paralelo de Transmisión de Datos (SSP)
- 13 Canales de Conversión A/D de 10 bits
- 2 Comparadores analógicos
- 75 juego de instrucciones (83 extendidas)
- Encapsulados PDIP, QFN o TQFP (todos con 40 pines)

El microcontrolador, según la programación que se le ha introducido es el encargado de procesar las señales provenientes de cuatro fotorresistores que forman cuatro divisores de tensión, los cuales al estar sometidos a la acción de los rayos solares, y estando separados por un tabique opaco, reciben en cierto momento diferente radiación, entregando de esta manera a las entradas conectadas al microcontrolador, distintas tensiones, las cuales oscilan entre 0 y 5V. El conversor analógico-digital del microcontrolador realiza estas cuatro lecturas y envía la acción designada al módulo de fuerza.



Circuito del oscilador de frecuencia

Como elemento fundamental en la parte electrónica se tiene al microcontrolador PIC18F4550 cuyas principales características fueron tratadas anteriormente. Para su funcionamiento, además de la alimentación, éste necesita de una señal de reloj que le servirá como base para la ejecución de las instrucciones y la generación de los tiempos internos: un oscilador que, básicamente, está formado por dos condensadores del orden de los pico Faradios (pF) conectados a los terminales X1 y X2 del microcontrolador y un cristal de cuarzo que puede llegar a ser de hasta 48 MHz (máxima frecuencia que admite el PIC18f4550), como se evidencia en la figura 2.11. Para este caso el cristal seleccionado fue de 12 MHz para cumplir con las exigencias de muestreo y para evitar muchos cálculos al realizar el proceso de transmisión.

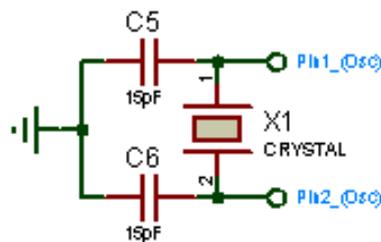


Figura 2.11. Circuito oscilador de frecuencia del microcontrolador PIC18F4550.

Circuitos de reset externo

Se conoce como reset a la puesta en condiciones iniciales de un sistema. Este puede ser mecánico, electrónico o de otro tipo (Ecured 2017). Todo microcontrolador o sistema basado en microprocesadores necesita en algún momento ser reiniciado. Esto se logra dando un pulso positivo al pin RESET. Los circuitos para resetear el PIC y la comunicación USB pueden ser apreciados en la figura 2.12 que aparece a continuación.

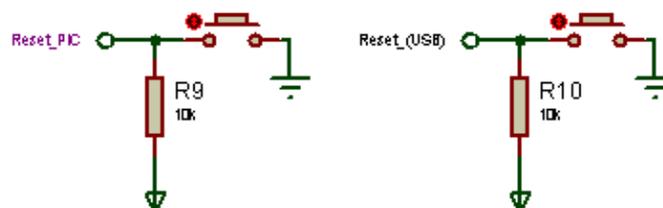


Figura 2.12. Circuitos para resetear el microcontrolador PIC18F4550 y la conexión USB.

2.4.3 Bloque de Actuadores

La Unidad de Actuadores para controlar el movimiento de los motores de pasos se diseñó usando ocho salidas del microcontrolador: cuatro para activar el circuito de fuerza 1, correspondiente al primer motor; y las cuatro restantes para activar el circuito de fuerza 2, correspondiente al segundo motor. La vista en el simulador ISIS del encapsulado de estos circuitos se puede apreciar en la figura 2.13.

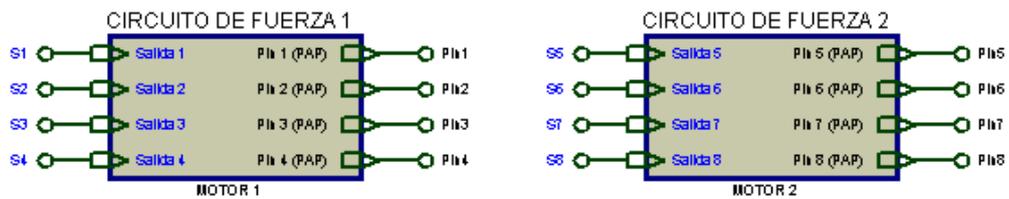


Figura 2.13. Vista en el simulador ISIS de los encapsulados correspondientes a los circuitos de fuerza del primer y segundo motor de pasos.

Cada circuito de fuerza está formado por una pareja de transistores conectados en Darlington, los cuales activan las bobinas de los motores para lograr el movimiento en un sentido u otro, figura 2.14. La secuencia de activación de las bobinas determina el sentido de giro del motor.

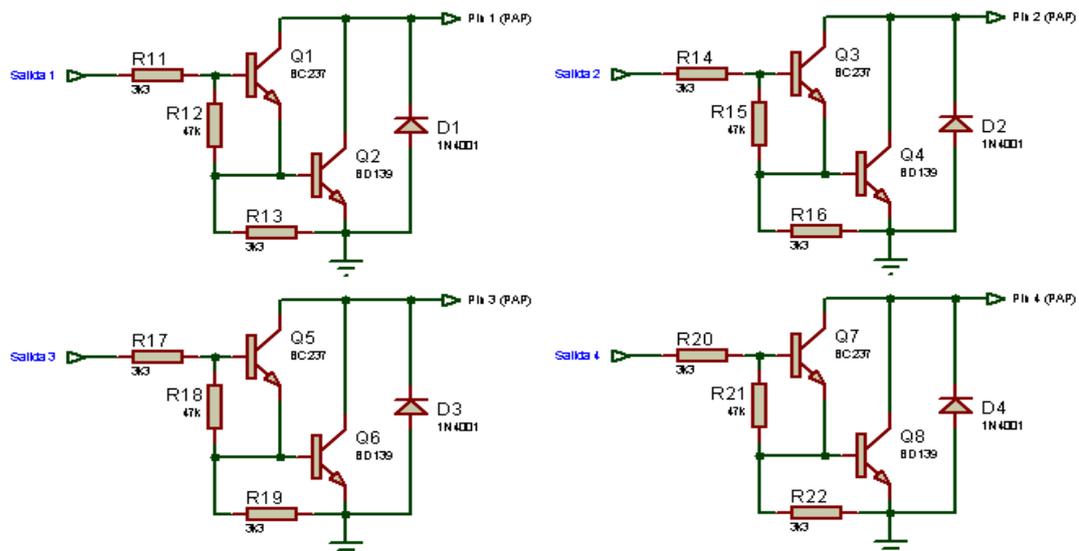


Figura 2.14. a) Vista en el simulador ISIS del circuito de fuerza correspondiente al primer motor de pasos.



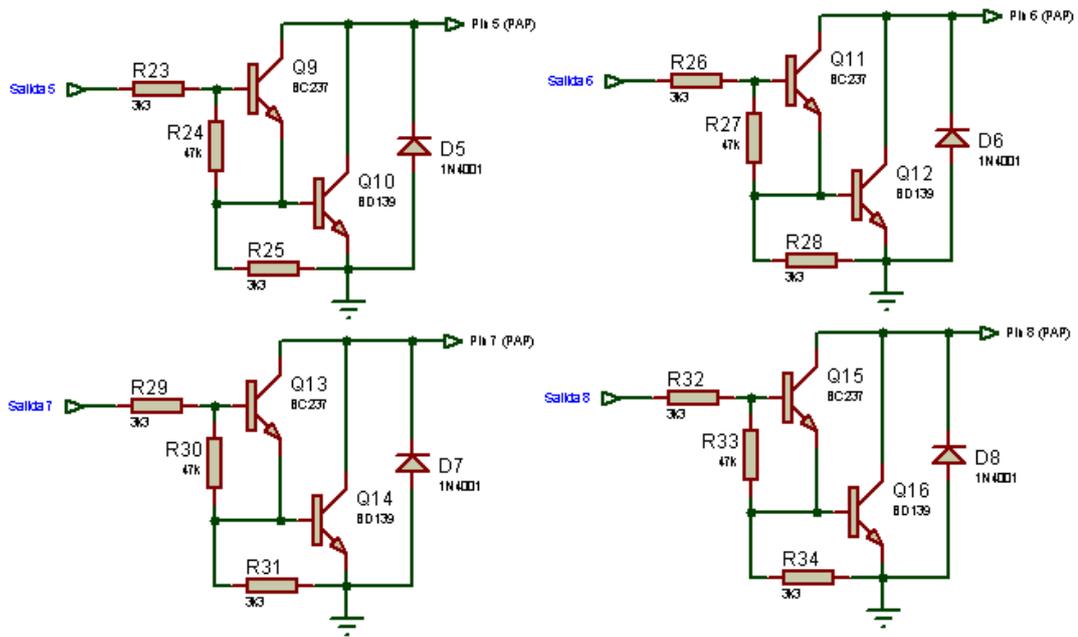


Figura 2.14. b) Vista en el simulador ISIS del circuito de fuerza correspondiente al segundo motor de pasos.

Especificaciones de los módulos de fuerza

Los módulos de fuerza:

- Poseen cada uno 8 transistores en configuración Darlington para darle una mayor sensibilidad a la señal proveniente del microcontrolador.
- Tienen alimentación independiente para cada motor de paso.
- Cuentan con una red de resistencias para condicionar la señal que le es suministrada a los transistores.

Conexión Darlington

Se utilizó esta configuración (figura 2.15), para que el dispositivo sea capaz de proporcionar una gran ganancia de corriente. La ganancia total del Darlington es el producto de la ganancia de los transistores individuales.

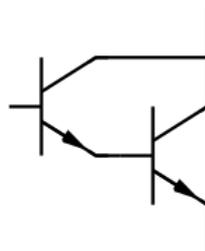


Figura 2.15 Conexión Darlington



Un dispositivo típico tiene una ganancia en corriente de 1000 o superior. También tiene un mayor desplazamiento de fase en altas frecuencias que un único transistor, de ahí que pueda convertirse fácilmente en inestable. La tensión base-emisor también es mayor, siendo la suma de ambas tensiones base-emisor, y para transistores de silicio es superior a 1.2V. La beta de un transistor o par Darlington se halla multiplicando las de los transistores individuales. La intensidad del colector se halla multiplicando la intensidad de la base por la beta total (González 2014).

Fuente de alimentación

Todo circuito electrónico necesita de al menos una fuente de alimentación de CD, en el esquema propuesto se puede observar que los motores de paso se alimentan con 12 VCD, sin embargo, el microcontrolador no es compatible con ese nivel de tensión, por lo que se realizó una pequeña fuente de alimentación que cuenta con un transformador que se va a encargar de bajar el voltaje a los niveles necesarios, a la salida del cual se tiene un rectificador tipo puente de diodos que va a convertir la forma de onda de corriente alterna a corriente directa, la onda obtenida se filtra mediante un condensador y mediante dos reguladores de tensión, se fijan los voltajes a la salida de los reguladores, 12V para el 7812 y en la salida de éste se coloca en cascada el regulador 7805 para estabilizar 5V en su salida. En la figura 2.16 se puede observar la configuración de la fuente de alimentación.

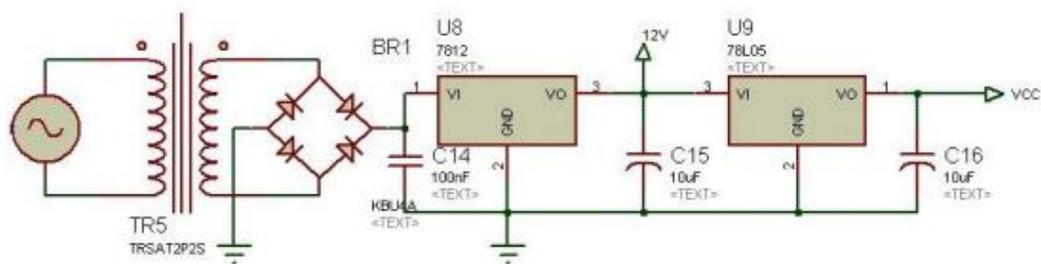


Figura 2.16. Vista en el simulador ISIS de la fuente de alimentación.

Motores de posicionamiento angular (paso a paso)

El motor paso a paso es el convertidor electromecánico que permite la conversión de una información en forma de energía eléctrica, en una energía

mecánica y una información de posición. Está constituido por un estator cuyos devanados se llaman fases y un rotor de un elevado número de polos. Su funcionamiento es síncrono y la alimentación cíclica de sus fases debe originar un cambio de configuración del giro elemental del rotor, constante llamada paso (Mendoza 2011).

Estos dispositivos electromecánicos permiten hacer giros fraccionados por grados y son de dos naturalezas; unipolares y bipolares. Un motor unipolar cuenta con cuatro embobinados, que se energizan uno o dos a la vez, y siempre con la misma polaridad. Los motores paso bipolares cuentan con solo dos bobinas, las cuales se polarizan al mismo tiempo, pero alternando la polaridad (Mendoza 2011). Este efecto genera una secuencia en las bobinas y su polaridad. Manipulando la velocidad de la secuencia se controla la velocidad de giro del motor, y con el orden de la secuencia se controla la dirección de giro del motor.

En la figura 2.17 se puede apreciar la apariencia física de estos motores y su vista en ISIS:



Figura 2.17. Apariencia física y vista en el simulador ISIS de los motores de paso.

Los motores unipolares, cuentan generalmente con 5 o 6 terminales, de las cuales 4 corresponden a los embobinados, y 1 o 2 son terminales comunes.

La secuencia de activación para los motores unipolares puede ser de dos formas; con una sola entrada activa, o dos entradas activas simultáneamente. Cuando se activan dos entradas simultáneamente el torque del motor es mayor, pero al mismo tiempo la corriente es mayor. La siguiente tabla muestra la forma de activar las secuencias en los dos casos:

Tabla 2.1. Formas de activación de las secuencias para motores de paso unipolares.

Secuencias para motores paso unipolares								
PASO	Secuencia con una activación				Secuencia con dos activaciones			
	LA	LB	LC	LD	LA	LB	LC	LD
1	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
2	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
3	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON

Para los motores bipolares se implementa un puente H doble, de tal forma que se pueda hacer una secuencia con doble polaridad. Para el control de este tipo de motores se requiere de la siguiente secuencia de polaridad:

Tabla 2.2. Secuencia de polaridad para motores de paso bipolares.

PASO	Secuencia para Bipolar			
	LA	LB	LC	LD
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

Existe una gran diversidad de modelos de estos motores dependiendo del número de fases de su estator, de si la alimentación de estas es unipolar o bipolar, del número de paso por vuelta y de si su rotor es de reluctancia variable, imanes permanentes o híbridos (Mendoza 2011). En cuanto al control, existen tres modos de realizarlos: paso entero, medio paso y micropaso.

En el paso entero, cada vez que se modifica la alimentación de las fases del estator se avanza un paso disponiendo de par nominal del rotor. En el medio paso se avanza sólo medio paso con lo que se dispone de mejor resolución, pero el par en las posiciones situadas entre pasos regulares se reduce a la mitad. Estos dos tipos de funcionamiento disponen en el mercado de gran variedad de integrados para su control. El funcionamiento en micropaso consiste en alimentar al mismo tiempo varias fases a la vez con corrientes medias distintas, de modo que la posición media del flujo en el entrehierro se puede fijar en cualquier posición. Con este funcionamiento se consigue una resolución inmejorable y existen en el mercado distintas tarjetas de control basadas en microprocesadores. Merece la pena comentar que el motor paso a paso es la primera de las máquinas eléctricas que sin el uso de la electrónica no tiene razón de ser.



El control de posición de motores paso a paso se puede efectuar en lazo abierto siempre que se tomen las precauciones necesarias para no perder ningún paso. Utilizando técnicas de PWM para el control de la corriente, asegurando de esta manera un aprovechamiento máximo de par y con la programación adecuada de aceleración y deceleración, se puede trabajar perfectamente en lazo abierto siempre que las variaciones que el par de carga sean conocidas de antemano. Es en estas aplicaciones de carga conocida donde el motor paso a paso tiene sus posibilidades industriales. En el caso de tener que accionar cargas desconocidas, su funcionamiento en lazo cerrado sería del todo perfecto, pero el coste del transductor de realimentación generalmente no justifica esta aplicación.

Para la confección de este diseño se escogieron dos motores de paso exactamente iguales. Son bipolares y serán controlados mediante paso entero a lazo abierto, ya que esto se ajusta perfectamente a las necesidades del diseño. Las especificaciones técnicas de ellos se muestran a continuación:

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de los motores de pasos elegidos.

Modelo	Ángulo de paso	Torque máximo	No. de líneas	Corriente de fase	Inductancia de las fases	Inercia del rotor	Peso	Longitud
MY3002	1.8 grados	7 N*cm	6	0.95 A	1.6 mH	12 g*cm ²	140 g	39.5 mm

2.4.4 Bloque de Comunicación

El bus USB (Universal Serial Bus) se ha convertido en los últimos años en el método habitual de comunicación entre los ordenadores y sus periféricos. Este tipo de bus tiene importantes ventajas, como su velocidad, facilidad de conexión e incluso la capacidad de alimentar directamente elementos de bajo consumo, permitiendo la interacción entre la persona y la máquina (Merencio 2016).

Para la aplicación que se desarrolla se requiere comunicación USB debido a que se usará para transmitir información de la posición en la que se



encuentra el seguidor y cuantos grados se va desplazando, lo que se puede almacenar en una Pc con el objetivo de graficar los datos para poder interpretarlos mejor. El microcontrolador utilizado cuenta con un módulo USB integrado en el mismo encapsulado, lo que facilita enormemente las aplicaciones que requieren realizar este tipo de conexión, ya que exenta de circuitería adicional para lograrla. Por lo tanto, para establecer una conexión USB basta con conectar los pines RC4/D-/VM y RC5/D+/VP directamente con los terminales correspondientes, D+ y D-, del conector USB, como se aprecia en la figura 2.18.

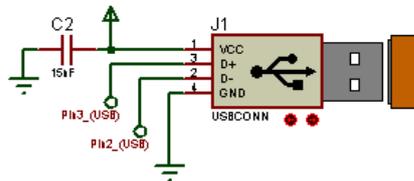


Figura 2.18 Vista en el simulador ISIS del conector USB.

2.4.5 Circuito completo del seguidor solar

El circuito electrónico completo del seguidor solar queda estructurado como se muestra a continuación:

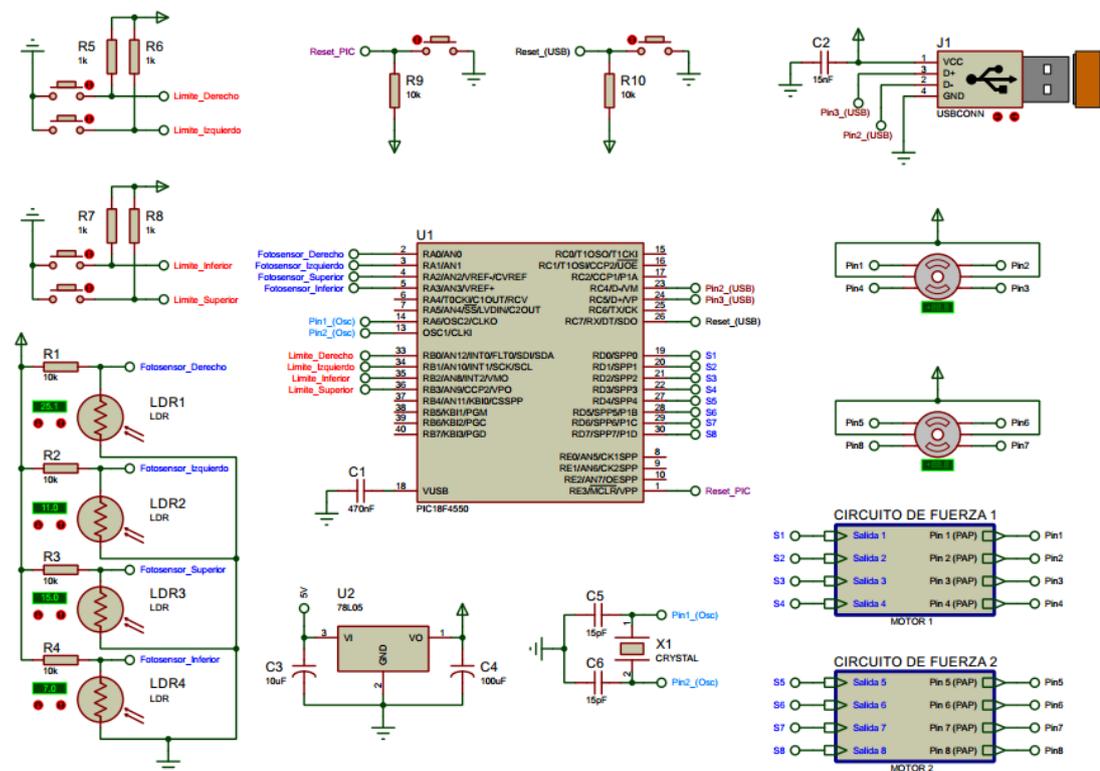


Figura 2.19. Vista en el simulador ISIS del circuito completo.



2.4.6 Algoritmo a seguir para el desarrollo del programa

La programación del microcontrolador 18F4550 se realiza en lenguaje C mediante el programa MikroC PRO for PIC y consta de dos rutinas fundamentales: la principal y la de orientación. La estructura del código está concebida para que el seguidor pueda trabajar de forma automática en la búsqueda del sol. La rutina principal es la encargada de llamar a las otras sub-rutinas que permiten el funcionamiento del seguidor. Su diagrama de flujo se muestra en el anexo 3. La subrutina de orientación es la encargada de encontrar la posición en los ejes de azimut y de altura en que se encuentra el sol en ese momento. Esta se encarga de mover los motores de pasos en busca del menor valor de resistencia de las fotorresistencias, posición donde debe estar el Sol. El diagrama de flujo de esta rutina se muestra en el anexo 4.

El procedimiento consiste básicamente en configurar la comunicación USB y las variables de conteo para luego proceder con la lectura de los valores de los sensores de luz (LDR) los cuales se comparan y verifican si están dentro del rango establecido, en cuyo caso se espera por una demora de 4 min para luego repetir la acción. Si por el contrario resulta de una diferencia mayor que lo establecido entonces se verifican los límites izquierdo, derecho, inferior y superior para evitar mover el panel más allá del rango establecido (15° - 165°); si los límites no están activados entonces se inicia el proceso de movimiento de 1° para luego volver al ciclo, siempre actualizando los valores de las variables y verificando los límites.

El programa está formado además por varias subrutinas que en su conjunto permiten obtener un adecuado modelo del sistema propuesto lo cual es validado a través de la simulación efectuada en el Proteus. Para ello se contó con varios elementos interactivos los cuales dan una apreciación muy cercana a la realidad, entre esos elementos se encuentran: el conector USB, los Motores de Paso, los botones simulando los límites, el microcontrolador y también se dispuso de modelos interactivos de las LDR. El programa se muestra en el anexo 7.

2.5 Diseño mecánico del seguidor solar

Los criterios más importantes que se deberán tener en cuenta para la construcción de la estructura mecánica son los siguientes:

- ✓ Deberá ser un sistema de posicionamiento automático con el cual la superficie captadora del panel solar, se oriente perpendicularmente a los rayos solares; que tenga las dimensiones apropiadas para su fácil traslado e instalación en espacios reducidos; con una firmeza estructural que garantice el soporte del peso de sus componentes; que tenga una elevada estabilidad que impida el vuelco y que sea económicamente viable.
- ✓ El movimiento debe ser excesivamente lento debido al pequeño recorrido que realizará y se necesita que se mueva en dos ejes, es decir, que posea movimiento hacia dos direcciones de forma lineal (del tipo de doble inclinación), perpendicularmente opuestas (figura 2.20).

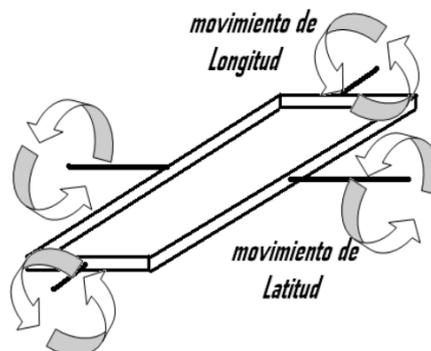


Figura 2.20. Silueta de movimientos requeridos para el panel fotovoltaico.

- ✓ Su base tendrá en un mono-poste y no en tipo carrusel, es decir un único apoyo central, un ejemplo de este diseño se muestra en la figura 2.21.



Figura 2.21. Ejemplo de estructura mono-poste.

- ✓ La plataforma se moverá por medio de dos motores de paso acoplados cada uno con un reductor de engranajes, como se muestra la figura 2.22.



Figura 2.22. Motor de paso acoplado a un reductor de engranajes.

2.5.1 Reductores de velocidad de engranajes

Los engranajes tienen la función de transmitir una relación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constante. Se denomina relación de transmisión (i) al cociente entre la velocidad angular de salida y la de entrada w_1 :

$$i = \frac{w_2}{w_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.5)$$

Donde:

w_2 : Velocidad angular de rueda conducida

w_1 : Velocidad angular de rueda conductora

N_1 : Número de dientes de la rueda conducida

N_2 : Número de dientes de la rueda conductora

Dicha relación puede tener signo positivo si los ejes giran en el mismo sentido o signo negativo si los giros son de sentido contrario. Del mismo modo, si la relación de transmisión es mayor que 1 ($i > 1$) se supondrá el empleo de un mecanismo multiplicador, y si es menor que 1 ($i < 1$) que suele resultar lo más habitual, supondrá el empleo de un mecanismo reductor, o simplemente de un reductor. Es claro que la obtención de una relación de transmisión de carga entre dos ejes, no es algo exclusivo de los engranajes, ya que lo mismo puede obtenerse con poleas o cadenas (Fuentevilla 2012).

Los reductores de velocidad utilizados son de engranajes y vienen acoplados a los motores de paso de tal forma que constituyen un solo módulo, figura 2.23.



Figura 2.23. Módulo de motores acoplados a los reductores.

La rueda conducida posee 48 dientes y la rueda conductora posee 24. Al sustituir estos valores en la ecuación 2.6 resulta que la relación de transmisión es de:

$$i = \frac{24}{48} = 0.5 \quad (2.6)$$

Esto indica que cuando el motor gire una vuelta completa la rueda dentada girará media vuelta sobre su eje. Igualmente con la relación de transmisión se puede determinar el desplazamiento angular que hay que lograr en el motor para provocar un desplazamiento de 1 grado en la rueda dentada:

$$w_1 = w_2 * \frac{N_1}{N_2} = 1^\circ * \frac{48}{24} = 2^\circ \quad (2.7)$$

2.5.2 Estructura del seguidor solar

La estructura de soporte principal debe servir para brindar firmeza estructural al seguidor, soportar los sistemas y ofrecer puntos de unión y agarre de los mismos, ya que el seguidor solar planteado en este proyecto está diseñado para realizar un movimiento siguiendo la orientación del sol de este a oeste y de norte a sur. En la figura 2.24 se puede observar el diseño de la estructura mecánica que soportará el seguidor solar.



Figura 2.24. Estructura del seguidor solar.

Su diseño fue basado en el uso de dispositivos muy comunes en nuestro país, que son de fácil adquisición a un bajo costo, lo que demuestra la robustez de su construcción.

2.6 Conclusiones del capítulo

- Se definieron cada uno de los elementos que compondrán el seguidor solar. Estos fueron caracterizados y se explicó brevemente su funcionamiento.
- Se abordó sobre la importancia del uso de las herramientas para el diseño, programación y simulación del circuito, el cual se logró montar hasta nivel experimental.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y VALORACIÓN ECONÓMICA

3.1 Introducción

Una valoración económica eficiente permite analizar las posibilidades reales de una inversión, evaluar los costes de la técnica e implementar su ahorro; por lo que actualmente es primordial que todo profesional tenga conocimientos que le permitan escoger, no solo las variantes más eficientes sino también las más económicas. Esta es la razón que hace imprescindible el análisis técnico-económico de cada proyecto a ejecutar. El desarrollo de este capítulo trae consigo este propósito y para eso se toman los precios estándares en el mercado mundial de los dispositivos utilizados. Se aborda, además, el impacto social del trabajo con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos, se analizarán los aportes que trae consigo en los estudiantes y la facilidad que les brinda a los profesores para un mejor control de la evaluación de la asignatura en cuestión, así como comprobar de manera interactiva si el estudiante ha vencido los conocimientos recibidos en la carrera.

3.2 Montaje experimental del circuito del seguidor solar

Para comprobar la veracidad del diseño realizado se llevó a cabo el montaje experimental en un protoboard del seguidor solar propuesto, figura 3.1.

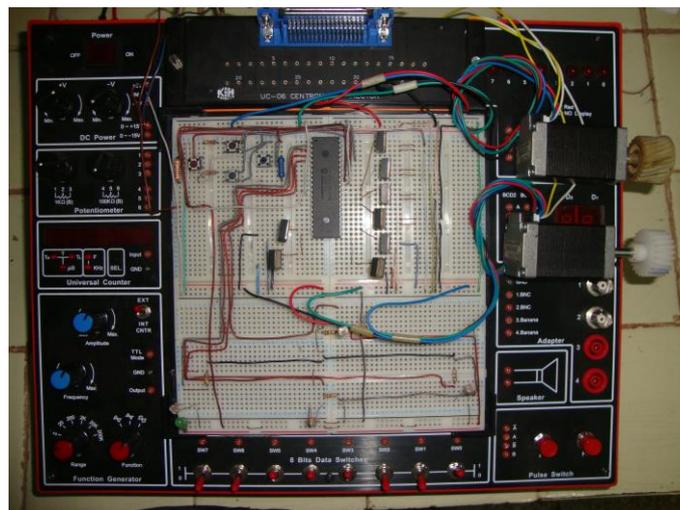


Figura 3.1. Montaje en un protoboard del circuito del seguidor solar propuesto.

Para la alimentación de los motores de paso se empleó una fuente variable con la que se dispone en el laboratorio, figura 3.2.

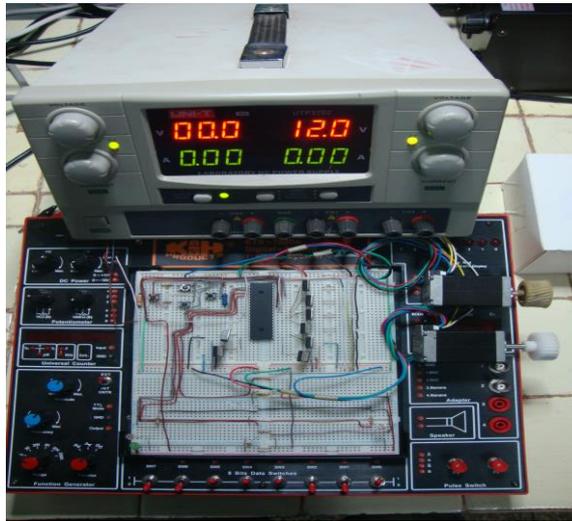


Figura 3.2. Alimentación independiente de los motores de paso.

Se realizaron diversas mediciones con el multímetro y el osciloscopio (figura 3.3) con el objetivo de comprobar la alimentación del microcontrolador y los motores de paso para verificar si los LDR estaban enviando las señales correspondientes al microcontrolador. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.



Figura 3.3. Mediciones realizadas con el multímetro (izquierda) y el osciloscopio (derecha) al circuito del seguidor solar.

3.3 Generalidades de la Práctica a desarrollar con el seguidor solar

Para incluir este trabajo en el sistema de aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica se desarrolla un laboratorio el cual se incluirá en el plan de la asignatura Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética de 5to año.

Práctica de Laboratorio

Título: Manejo de los puertos del microcontrolador para el trabajo con sensores LDR y el control de motores de paso mediante la utilización de un seguidor solar.

Objetivos:

- Dotar al estudiante de los conocimientos suficientes acerca de los microcontroladores PIC 18F4550, los sensores LDR y los motores de paso.
- Adquirir habilidades en la manipulación de los seguidores solares y sus componentes.
- Familiarizarse experimentalmente con el funcionamiento de los motores de paso y los sensores LDR.
- Controlar los movimientos de dos motores de paso a través de los puertos paralelos de un microcontrolador mediante la incidencia de luz en cuatro sensores LDR.

Fundamento Teórico:

Motores de paso

Los motores paso a paso permiten construir sistemas muy simples de control de movimiento y posición por lo tanto se utilizan en una gran variedad de aplicaciones. La más cercana a todos los usuarios de computadores es el manejo de las cabezas de los discos duros y flexibles de almacenamiento magnético. Cuando el computador quiere recuperar un archivo de un disco, por ejemplo, pone en marcha un sistema de control de un motor paso a paso que le permite “contar” el número de pistas o “tracks” del disco hasta llegar al punto físico donde se inicia el archivo. De manera similar trabaja el mecanismo que controla el avance del papel y la posición de la cabeza en una impresora. La mayoría de las máquinas de movimiento X-Y de la

industria están construidas con motores de este tipo. Algunos robots industriales y didácticos, utilizan motores paso a paso para realizar el control de posición de cada una de sus juntas.

En fin, la naturaleza digital de este motor facilita el control de la posición del eje en muchas aplicaciones porque reduce todo a llevar la cuenta de los pasos o ángulos que avanza. Este sistema es más simple que el de los servomecanismos, en los cuales se debe detectar, en cada momento, la posición del eje del motor, lo que requiere de circuitos y software adicionales.

Construcción

Un motor paso a paso es un dispositivo que convierte pulsos eléctricos en movimientos discretos (por pasos) de rotación mecánica. Está conformado por un rotor y un estator. La clave de un motor paso a paso, radica en el diseño de una combinación de rotor y estator que tiene posiciones de equilibrio espaciadas regularmente y creada por polos magnéticos (Norte – Sur – Norte...). El rotor está construido de un imán permanente de material cerámico que tiene un patrón fijo de polos Norte y Sur alternados.

El estator está compuesto por dos secciones en forma de copa de hierro con dientes, energizado por dos embobinados separados. Las parejas de polos (Norte – Sur) que forman las bobinas entre los dos estatores, están desplazada mecánicamente en $\frac{1}{2}$ recorrido de un polo. Entre las dos parejas de polos de un estator, hay un desplazamiento de $\frac{1}{4}$ del recorrido de un polo. La interacción entre el estator y el rotor (polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen) causa que el rotor se mueva $\frac{1}{4}$ de recorrido de polo por cada cambio de polaridad en el embobinado. Un motor de dos fases con 12 parejas de polos por cada sección de estator, se moverá, entonces 48 paso por revolución a 7.5 grados por cada paso.

Alimentación del motor

Las conexiones necesarias para lograr una secuencia de cuatro pasos se muestran en la figura 3.4.



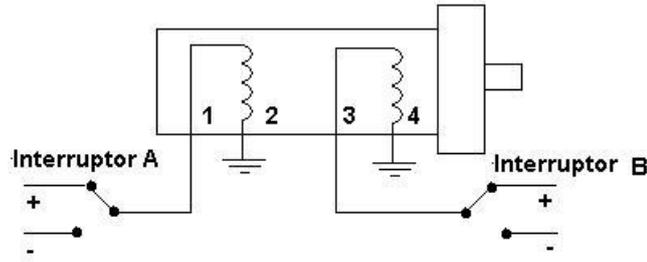


Figura 3.4. Configuración de la alimentación de un motor de pasos.

Tabla 3.1. Secuencia de conmutación de las bobinas de un motor de pasos.

Pasos	Bobina A	Bobina B
1	+	+
2	+	-
3	-	-
4	-	+
1	+	+

Cada una de las dos bobinas se conecta a un sistema de conmutación para tener las polaridades positiva y negativa. Para que el motor avance por pasos en el sentido de las agujas del reloj, se debe aplicar la secuencia de polaridades 1, 2, 3 y 4 como la tabla 3.1.

Si se invierte el orden de esta secuencia el motor avanzará en la dirección inversa, o sea en el sentido contrario al giro de las agujas del reloj. Como se puede observar en la figura, la implementación de la excitación de las bobinas se puede lograr utilizando circuitos de flip-flop y algún tipo de transistor como interruptor. Si la frecuencia de operación es constante, la forma de onda de las señales en las bobinas del estator tiene un defasaje de 90 grados. Como cada paso del rotor se controla con una onda cuadrada aplicada en las bobinas, el motor paso a paso se puede comandar desde circuitos de microprocesadores o microcontroladores, lo que garantiza un manejo exacto de la velocidad y la posición.

Hay dos tipos de secuencias de pulsos que permiten el giro por pasos de un motor de esta clase. En el método llamado “manejo por ola” solamente una fase de los bobinados del estator se alimenta al tiempo. La otra secuencia de funcionamiento se llama “manejo de dos fases”. En el segundo método las



dos fases del estator se alimentan simultáneamente. De esta manera se logra un mayor torque en el eje del motor, por la razón anterior, es el método más utilizado para controlar el movimiento de los motores paso a paso. Cualquiera de las dos secuencias, hará que un motor de N grados/pasos avance en pasos completos.

Operación con dos polaridades

Los motores paso a paso de dos bobinas necesitan alimentación de potencia de polaridad positiva y negativa. El flujo en el estator de un motor de este tipo se invierte cuando se invierte, también la corriente por el bobinado. El circuito de potencia que alimenta las bobinas debe estar compuesto por un puente de interruptores que permiten aplicar las dos polaridades como se muestra en la figura 3.5. En el caso expuesto se utiliza un puente compuesto por cuatro transistores. Cuando q1 y q4 conducen se tiene polaridad positiva en la bobina, si q2 y q3 lo hacen, la polaridad será negativa.

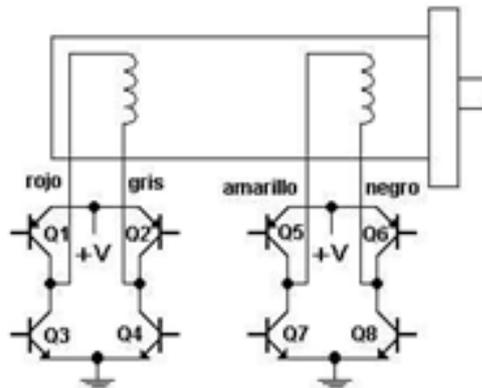


Figura 3.5. Configuración bipolar de un motor de pasos.

Tabla 3.2. Secuencia de conmutación de las bobinas para la configuración bipolar.

Pasos	Q1-Q4	Q2-Q3	Q5-Q8	Q1-Q7
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	OFF

3	ON	OFF	OFF	ON
4	OFF	OFF	OFF	ON
5	OFF	ON	OFF	ON
6	OFF	ON	OFF	OFF
7	OFF	ON	ON	OFF
8	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	OFF	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF

Operación con una sola polaridad

Esta clase de motores tiene dos bobinas en cada uno de los estatores. El flujo se invierte por medio de la energización de una de las bobinas con una fuente de una sola polaridad. El circuito que maneja este tipo de motor paso a paso es más simple y utiliza menos transistores o interruptores como se observa en la figura 3.6.

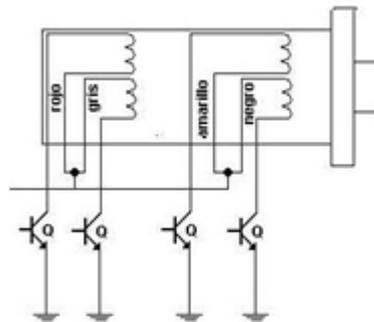


Figura 3.6. Configuración unipolar de un motor de pasos.

Tabla 3.3. Secuencia de conmutación de las bobinas para la configuración unipolar.

Pasos	Q1	Q2	Q3	Q4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	OFF
3	ON	OFF	OFF	ON



4	OFF	OFF	OFF	ON
5	OFF	ON	OFF	ON
6	OFF	ON	OFF	OFF
7	OFF	ON	ON	OFF
8	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	OFF	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF

Métodos de operación

Un motor paso a paso tiene varios métodos de operación, según la velocidad de la secuencia y la carga aplicada al eje. Si se activa con una secuencia lenta el motor alcanza el reposo al final de cada paso. En las aplicaciones que no requieren una respuesta rápida y las distancias son cortas, esta operación es la más simple. Si la velocidad de la secuencia aumenta, el movimiento cambia de paso discretos a movimientos continuos como el de cualquier motor. El motor no alcanza el reposo entre paso y, por lo tanto, llegan del control nuevas órdenes de conmutación cuando aún se tiene una velocidad positiva o negativa. En estos casos la velocidad de la secuencia debe seleccionarse según las especificaciones del catálogo del motor o se tendrá un comportamiento completamente inestable del mismo.

Vale la pena destacar el hecho que no existe una única manera de manejar los motores paso a paso, se pueden desarrollar un gran número de circuitos que posean configuraciones diferentes, pero que cumplen el mismo objetivo. Existen circuitos integrados especializados en esta labor, pero su desventaja es la limitación en la corriente que pueden manejar. De la misma manera, el control de dichos motores puede realizarse a través del puerto paralelo de la PC. También los microcontroladores tienen gran aplicabilidad en este campo, y es precisamente con estos dispositivos que se controlarán los motores en este laboratorio.

Los PIC18F4550 tienen varias instrucciones que pueden ser muy útiles para controlar un motor paso a paso, tales como las instrucciones de rotación de bits (++ ó --). El empleo de las subrutinas es muy útil específicamente

cuando se requieren realizar un conjunto de acciones de forma repetitiva, como es el caso de las demoras entre paso y paso.

Identificación de las bobinas de un motor paso a paso.

Identificar como se encuentran dispuestas las bobinas de un motor de esta naturaleza es fácil, por lo regular tiene cuatro bobinas, las cuales presentan externamente cinco, seis u ocho terminales. Cuando se tiene cinco terminales uno de ellos es común a todos, cuando son seis los terminales, se presentan un punto común por cada dos bobinas, teniéndose por tanto dos terminales comunes independientes, cuando son ocho los terminales, quiere decir los terminales de cada bobina están totalmente libres. Los puntos comunes se identifican fácilmente con la ayuda de un óhmetro, ya que marcan un menor valor de resistencia entre este y el resto de los terminales del motor.

El proceso que se debe seguir para conectar un motor paso a paso si desconocemos la forma en la cual están distribuidas las bobinas es la mostrada en la técnica operatoria. Los motores que más fácilmente se consiguen poseen cinco o seis terminales, para ambos casos se ha dispuesto este conector y el único requisito es disponer los terminales comunes a los extremos.

Sensores LDR

Los sensores LDR, son dispositivos que cambian su resistencia en función de la intensidad de luz, cuanto mayor sea la intensidad de la luz, menor es la resistencia que ofrece la LDR. Estos dispositivos son útiles para determinar, la presencia o ausencia de luz en el ambiente, es posible concebir con estos dispositivos controles de luminosidad.

Las características eléctricas de estos dispositivos no son fáciles de conseguir dado su simple funcionamiento y gran variedad de fabricantes, las LDR, o fotorresistencias, se adquieren comercialmente en tamaños diversos, esto implica que el rango de resistencia cambia en función del tamaño, una LDR, de tamaño grande tiene rangos de cambio menor que una LDR pequeña. Incluso los cambios de resistencia no son exactamente iguales en dos LDR del mismo tamaño. Estas razones hacen que la forma de mayor

simplicidad para su uso sea la lectura de su resistencia, o el voltaje que se desempeña en sus terminales. Para usar una LDR, la forma más simple es realizar un divisor de voltaje con una resistencia fija, para entender este concepto se puede observar el arreglo o circuito mostrado en la figura 3.7.

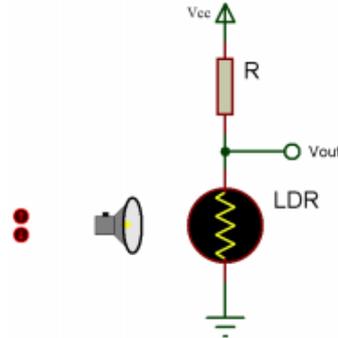


Figura 3.7. Vista en el simulador ISIS de la conexión del LDR con una resistencia para aplicar un divisor de tensión.

Asumiendo la teoría básica de circuitos eléctricos para un divisor de voltaje se puede implementar la siguiente ecuación:

$$V_{adc} = \frac{LDR(V_{cc})}{LDR + R} \quad (3.1)$$

Despejando de la ecuación (3.1), el valor de la fotorresistencia LDR se obtiene la siguiente ecuación:

$$LDR = \frac{(V_{out})(R)}{V_{cc} - V_{out}} \quad (3.2)$$

Dado que el valor de salida V_{out} se puede ingresar a una entrada AD, del microcontrolador se puede asumir como V_{adc} , con la siguiente relación y un voltaje de referencia positivo de 5 voltios:

$$V_{adc} = \frac{(R_{adc})(5)}{1023} = (R_{adc}) * 0,004887585 \quad (3.3)$$

Remplazando la ecuación (3.3) en la ecuación (3.2), y asumiendo que V_{cc} es de 5 voltios, obtenemos la siguiente relación:

$$LDR = \frac{(Radc)(0,04887585)(R)}{5 - (Radc)(0,04887585)} \quad (3.4)$$

El microcontrolador PIC 18F4550 mediante la instrucción ADC_Read(0) permite leer un canal determinado del conversor analógico-digital, en este caso se trata del canal 0.

Preguntas de control

1. Explique resumidamente en qué consiste el funcionamiento de los motores de paso y de los sensores LDR.
2. ¿Cómo se clasifican los motores paso a paso?
3. ¿Para qué son útiles las LDR? Mediante qué método se puede calcular el valor de una LDR.
4. ¿En cuántas secuencias de pasos pueden ser configurados los motores paso a paso?
5. ¿Qué pasa cuando disminuye la incidencia de luz sobre una LDR?
6. ¿Cuáles son las configuraciones más comunes de los motores paso a paso?
7. ¿Cuál LDR tiene rangos de cambio menor; una de tamaño grande o una de tamaño pequeño?
8. ¿En qué consisten el manejo por ola y por dos fases?
9. ¿Los cambios de resistencia son exactamente iguales en dos LDR del mismo tamaño?
10. ¿Cómo se identifican las bobinas de un motor paso a paso?

Ejercicio

Realice un programa que realice las operaciones siguientes:

- Cuando la lectura del sensor LDR inferior sea mayor que la del sensor superior, el primer motor deberá girar hacia la derecha; si es menor deberá girar hacia la izquierda. Si las dos lecturas son iguales el motor no deberá girar.



- Cuando se opriman las teclas o contactos conectados en los pines RB0 o RB1 (Límites de posición de azimut) el primer motor deberá detenerse.
- Cuando la lectura del sensor LDR derecho es mayor que la del sensor izquierdo, el segundo motor deberá girar hacia la derecha; si es menor deberá girar hacia la izquierda. Si las dos lecturas son iguales el motor no deberá girar.
- Cuando se opriman las teclas o contactos conectados en los pines RB2 o RB3 (Límites de posición de altura) el segundo motor deberá detenerse.
- Establezca una demora de 200 ms entre los pasos para ambos motores.

Consideraciones a tener en cuenta en la confección de los programas:

Se debe asegurar que mientras el programa no se está ejecutando y está conectado el circuito al puerto paralelo, no se encuentren energizadas algunas de las bobinas, dando lugar a calentamiento, para esto debe asegurarse que, al finalizar, el dato presente en el puerto paralelo sea cero. Mientras que no se haga lo anterior, lo más conveniente es tener desconectada la fuente de alimentación del motor.

El retardo es indispensable, ya que permite mantener el pulso en las bobinas el tiempo necesario para que el motor responda, si este es demasiado bajo, el motor no alcanza a sincronizar los pulsos recibidos con el movimiento ejecutado y empezará a oscilar alrededor de una posición. Si el retardo es demasiado alto, se puede presentar calentamiento excesivo del motor, ya que constantemente se están energizando las bobinas de manera innecesaria. La razón para ejecutar dos retardos en los programas, está en que el primero ejecuta la labor mencionada anteriormente, mientras que el segundo es el tiempo que el usuario desea mantener entre paso y paso, este puede ser ampliado o disminuido a voluntad. En los programas se debe considerar que el motor posee un paso de 1.8 grado por paso para un giro completo (360 grados) se requieren 200 pasos.

Técnica Operaria:

- Antes de realizar cualquier montaje se deberá identificar los terminales del motor paso a paso para una correcta conexión al circuito interface.
- Identificar cual es el terminal común dentro de los bobinados.
- Unir los terminales comunes al negativo de una fuente de alimentación.
- Tomar uno de los cuatro terminales restante del motor, márcalo con la letra “A”, y unirlo momentáneamente al terminal positivo de la fuente de alimentación.
- Mientras se observa el eje del motor, tomar cada uno de sus terminales y unirlos momentáneamente al positivo de la fuente, verificando que el movimiento que se obtiene de este, se realice siempre en el sentido de las manecillas del reloj.
- A partir del terminal “A” denominar a los otros “B, C, D” con base en el orden mediante el cual se conseguía el giro.
- Elaborar la siguiente tabla de equivalencias:

Bobinas	Letra
1	A
2	C
3	B
4	D

- El orden numérico de las bobinas (1, 2, 3 y 4) es el que debe realizarse para las conexiones descritas en el diagrama esquemático.

Instrumentos y equipos a utilizar.

- ✓ Seguidor solar
- ✓ Módulos auxiliares.
- ✓ IBM PC.
- ✓ Multímetro
- ✓ Osciloscopio

Contenido del Informe:

- ✓ Título de la práctica.
- ✓ Introducción

- Objetivos.
 - ✓ Desarrollo
 - Teoría acerca de los sensores LDR y los motores de paso.
 - Mediciones realizadas
 - Algoritmos de cada ejercicio.
 - Análisis de los resultados.
 - ✓ Conclusiones.

Bibliografía:

- ✓ Diseños de Equipos Electrónicos.
- ✓ Manual de Microprocesadores Tomo I.
- ✓ Conjunto de Instrucciones (Microcampus).
- ✓ Capítulo 3 del trabajo de diploma de Orlando Doimeadiós (2003).

3.4 Valoración técnica

Desde el punto de vista técnico, la propuesta del diseño de un seguidor solar con fines docentes cumplió con las expectativas de poder aplicar los microcontroladores en la electroenergética, abriendo la posibilidad de creación de una práctica de laboratorio que facilite la asimilación de conocimiento en el área del accionamiento, la electrónica en general y el control automático.

El movimiento del seguidor solar no es continuo en el tiempo sin embargo se logra la velocidad de 15 grados por hora o lo que es lo mismo 1 grado cada 4 minutos, reduciéndose el consumo al no estar los motores constantemente energizados. Se realizaron varias pruebas que permitieron ajustar cada uno de los bloques que conforman el circuito. Fueron empleadas diversas herramientas de software reconocidas internacionalmente que permitieron diseñar, simular y programar cada uno de los bloques que conformaron la aplicación. Los instrumentos empleados pueden considerarse de buena actualidad y con magníficas prestaciones que garantizaron el buen funcionamiento de todo el sistema de mediciones.

3.5 Valoración económica

Cada proyecto realizado debe estar sujeto a un análisis económico que junto a su viabilidad técnica determinará la posibilidad de su ejecución, en este

trabajo se realizó el diseño y simulación de un seguidor solar permitiendo el desarrollo de prácticas de laboratorio, por lo que los gastos económicos están determinados por el costo de los dispositivos necesarios para implementar el hardware propuesto.

Tabla 3.4. Precios de los elementos utilizados en el circuito propuesto.

Nombres de los componentes	Cantidad	Precio por Unidad	Precio Total
Diodos	8	0.056	0.448
Fotosensores (LDR)	4	0.67	2.68
Cristal de 4 MHz	1	1.10	1.10
Condensador	2	0.19	0.38
Microcontrolador PIC18F4550	1	3.90	3.90
Módulo motorreductor	2	5.69	11.38
Resistencias de 3.3K	16	0.10	1.6
Resistencia de 10K	6	0.30	1.8
Resistencia de 47K	8	0.10	0.8
Resistencia de 1k	4	0.10	0.4
Regulador de voltaje LM7805	1	1.30	1.30
Regulador de voltaje LM7812	1	2.15	2.15
Transistor	16	0.27	4.32
Estructura	1	4	4
Total			36.25

Como se puede observar en la tabla 3.4, el precio total de la implementación del hardware es de \$36.25 CUC que equivale a \$906.25 en MN.

Teniendo en cuenta que la mayoría de los componentes (electrónicos y estructurales) utilizados en el diseño se pueden localizar en el instituto, por lo que pueden ser reciclados y que la construcción del dispositivo puede llevarse a cabo en el centro por la simplicidad del mecanismo es evidente

que la construcción de un dispositivo de seguimiento solar con las características del diseño propuesto representa un evidente ahorro de capital y se demuestra la factibilidad e importancia en el aspecto económico del proyecto mostrado.

3.6 Impacto social

Las prácticas de laboratorios consolidan la teoría recibida, demuestran la veracidad de éstas, logran llevar al estudiante a un nivel superior de aprendizaje, y posibilitan una vinculación más directa con la industria. Con este trabajo se sientan las bases para crear nuevas prácticas de laboratorio que pueden ser aprovechadas en la asignatura Aplicación de los Microcontroladores a la Electroenergética, por tener características que facilitan explotar las habilidades adquiridas por el estudiante en la teoría y además sirve para estimular el interés de los estudiantes por la asignatura.

3.7 Conclusiones del capítulo

- Se analizaron los resultados obtenidos después del montaje experimental del dispositivo observando que realmente se asemejan a los alcanzados en la simulación.
- Se demostró la factibilidad de reciclar componentes de tarjetas en desuso y/u obsoletas que permitirán incrementar las prácticas de laboratorio en la asignatura Aplicación de los Microcontroladores a la Electroenergética; y a través de un sencillo cálculo económico basándose en el costo de los componentes que integran el módulo construido se obtuvo la cifra ahorrada por el departamento en este caso.
- Se elaboró una guía para poder desarrollar la práctica de laboratorio y cumplir con los objetivos que se proponen en la misma.

Conclusiones generales

- Los materiales bibliográficos consultados sirvieron de base para el fundamento teórico de la investigación, además permitió vislumbrar el estado del arte sobre los seguidores solares tanto nacional como internacionalmente.
- Tanto el diseño esquemático en el Proteus, como los resultados de las simulaciones del circuito electrónico a base del microcontrolador PIC18F4550 demostraron que es posible la implementación de este proyecto para el desarrollo de laboratorios en la asignatura Aplicaciones de los Microcontroladores a la Electroenergética.
- La selección adecuada de los modelos de cada uno de los componentes del circuito de control en el Proteus, así como las simulaciones efectuadas permitieron determinar los valores óptimos de selección y ajustes de algunos componentes.
- El algoritmo implementado constituyó una guía fundamental para el desarrollo eficiente del programa en lenguaje "C" para el microcontrolador PIC 18F4550.
- Se diseñó un puesto de laboratorio con una guía, la cual contribuirá a desarrollar habilidades prácticas en los estudiantes.

Recomendaciones

- Implementar el sistema propuesto en este trabajo de diploma sobre la base de los resultados obtenidos y la validación económica demostrada.
- Profundizar en el estudio de la estructura mecánica que soporta al seguidor solar desde el punto de vista de la resistencia de los materiales.
- Realizar la implementación del circuito en una placa impresa.
- Realizar una aplicación en Labiew para la lectura de datos.
- Implementar el uso de los microcontroladores en otras asignaturas de la carrera donde este tenga aplicación.

Bibliografía

Castañeda, H. M., J. I. R. Ramírez and A. d. J. R. Argüelles (2010). Diseño de un seguidor solar para eficientar la captación de la energía solar en los paneles fotovoltaicos. Instituto Tecnológico Superior de Arandas, Programa de Ingeniería Industrial.

Cervantes, A. L., L. L. O. Carralero, J. B. Henríquez, O. E. Costa and N. M. Escalona (2015). "Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar." Aplicaciones Industriales **XXXVI**(2/2015): 190-199.

Díaz, E. J. (2015). Implementación de circuitos de control para hornos de inducción de alta frecuencia con fines docentes. Ingeniero Eléctrico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Fuentevilla, J. S. (2012). Diseño y construcción de un sistema fotovoltaico, Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Gámez, M. V. G. (2013). _Diseño de un sistema de seguimiento solar de un eje para el aprovechamiento de la energía solar en sistemas fotovoltaicos.

Gareis, G., J. Stivanello, M. Benito and F. Cuestas (2010). Solar economic follower of an axle. Technological National University Regional Faculty Paraná, Laboratory of Alternative Energy.

Gomez, D. E. L. (2016). Diseño e implementación de un sistema de medición de temperatura con fines docentes. Ingeniero Eléctrico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".

Gómez, R. A. (2014). Diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar autónomo de dos ejes para un panel fotovoltaico., Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas Campus Montecillo

González, R. R. (2014). Implementación de puesto de laboratorio, técnicas de mando para inversor de tensión monofásico. Ingeniero Eléctrico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".

Grassi, F. (2012). Diseño de un seguidor solar de dos ejes parametrizado por PC.

Gutiérrez, G. V. (2012). _Seguidor solar de dos ejes para un horno solar.

Inc, M. T. (2007). Datasheet de la familia PIC18F2455/2550/4455/4550.



Mejía, A. E., M. H. Londoño and J. C. O. R. (2010). "Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico." Scientia et Technica Año XVI, No 44. Universidad tecnológica de Pereira (abril).

Mendoza, J. R. C. (2011). Diseño y simulación de Sistemas microcontrolados en lenguaje C. Colombia, mayo del 2011.

Merencio, D. M. (2016). Desarrollo de una aplicación de software para el control de motores de CD. Ingeniero Eléctrico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".

Millanes, Z. L. (2015). Desarrollo de software para Seguidor Solar. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Jaén.

Moreno, O. E. H. (2008). Diseño y construcción de un seguidor mecánica para un potabilida solar parabólico.

Salermo, F. A. E. (2013). Diseño de un sistema de seguimiento solar para la propuesta del Generador Solar Fotovoltaico del centro de red del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Ingeniero Eléctrico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".

Tamayo, A. M. (2015). Aplicación de los microcontroladores en la regulación de velocidad de motores de corriente directa. Ingeniero Eléctrico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".



Anexos

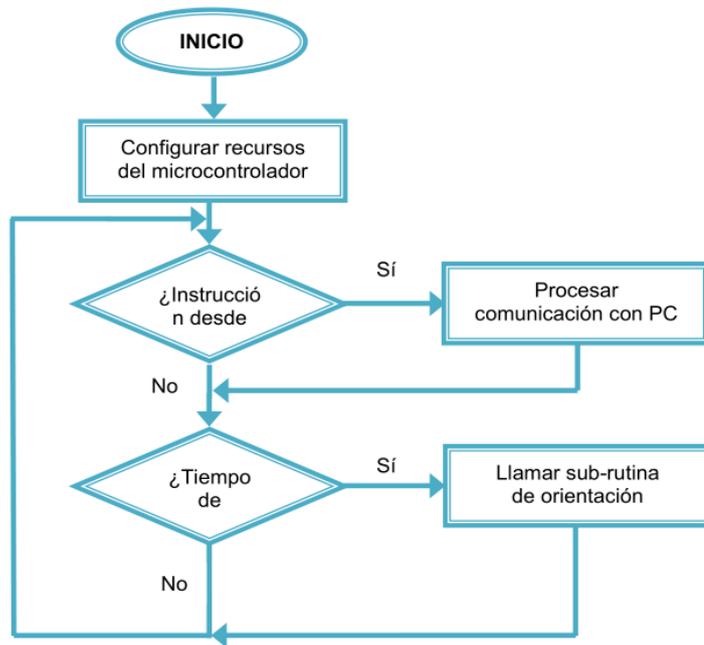
Anexo 1. Ejemplos de sistemas de seguimiento solar en el mercado (Gómez 2014).

Empresa	Descripción	Figura
WATTSUN	Sistema de seguimiento con un grado de libertad, soporta hasta 6 módulos fotovoltaicos (no incluidos). Precio: \$6,250.00 USD.	 AZ-225
SAT CONTROL	Sistema de seguimiento a dos ejes, soporta dos módulos fotovoltaicos (no incluidos), software y hardware limitados. Interfaz USB. Precio: 511.00 €	
ALIBABA	Sistema de seguimiento a dos ejes, soporta dos módulos fotovoltaicos (no incluidos). Fuente de 24V 3ª DC. Interfaz RS485 Precio: \$2,500.00 USD	
EBAY	Sistema de seguimiento a dos ejes incluye dos módulos de 125 W c/u Precio: \$8,900.00 USD	

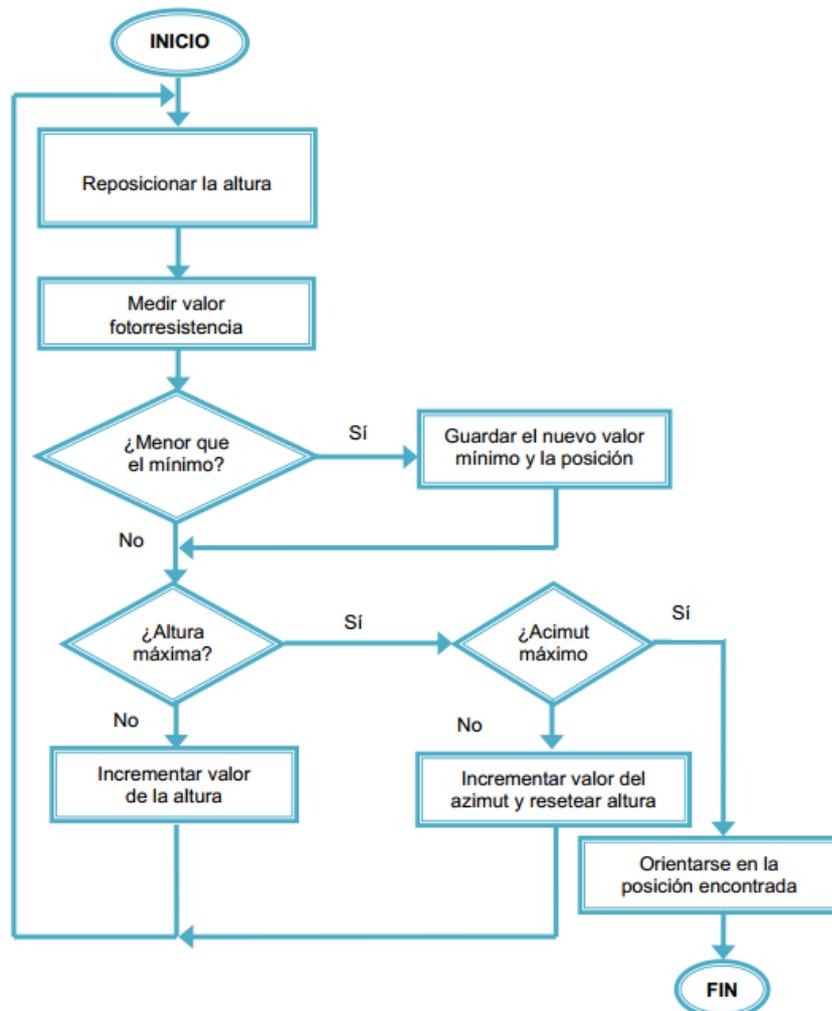
Anexo 2. Fotografía de la estación espacial internacional (ISS), con sus paneles fotovoltaicos desplegados (Gareis, Stivanello et al. 2010, Gómez 2014).



Anexo 3. Diagrama de flujo de la rutina principal.



Anexo 4. Diagrama de flujo de la sub-rutina de orientación.



Anexo 5. Estructura del seguidor solar (Millanes 2015).



Anexo 6. Acople del motor de pasos con el reductor (Millanes 2015).



Anexo 7. Programación del microcontrolador PIC 18F4550.

```
#include<18f4550.h>
#device adc=10
#fuses HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL5,CPUDIV1,VREGEN
#use delay(clock=48MHz,crystal=20MHz,USB_FULL)

//Declaracion de variables
int16 sensor_derecha;
int16 sensor_Izquierda;
int16 sensor_Arriba;
int16 sensor_Abajo;
int16 motores=0x11;
int16 alta;
int16 baja;
//Funciones para movimiento
void mover_Drecha()
{
    alta = motores & 0xF0;
    baja = motores & 0x0F;
    if(baja<8)
    {
        baja *= 2;
        motores = alta | baja;
        output_d(motores);
    }
    else
    {
        motores = alta | 0x01;
        output_d(motores);
    }
}
void mover_Izquierda()
{
    alta = motores & 0xF0;
    baja = motores & 0x0F;
    if(baja>1)
    {
        baja /= 2;
        motores = alta | baja;
        output_d(motores);
    }
    else
    {
        motores = alta | 0x08;
        output_d(motores);
    }
}

{
    alta = motores & 0xF0;
    baja = motores & 0x0F;
    if(alta<128)
    {
        alta *= 2;
        motores = alta | baja;
        output_d(motores);
    }
    else
    {
        motores = 0x10 | baja;
        output_d(motores);
    }
}
void mover_Abajo()
{
    alta = motores & 0xF0;
    baja = motores & 0x0F;
    if(alta>16)
    {
        alta /= 2;
        motores = alta | baja;
        output_d(motores);
    }
    else
    {
        motores = 0x80 | baja;
        output_d(motores);
    }
}
//Programa principal
void main()
{
    port_b_pullups(0xFF);
    SET_TRIS_B( 0xFF );
    port_d_pullups(0xFF);
    output_d(0x00);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN4);
    while(TRUE)
    {
        set_adc_channel(0);
        sensor_derecha=read_adc();
        set_adc_channel(1);
        sensor_Izquierda=read_adc();
        set_adc_channel(2);
        sensor_Arriba=read_adc();
        set_adc_channel(3);
        sensor_Abajo=read_adc();

        if(sensor_derecha > sensor_Izquierda)
        {
            if( !input(PIN_B0))
            {
                mover_Drecha();
                delay_ms(200);
            }
        }
        if(sensor_derecha < sensor_Izquierda)
        {
            if( !input(PIN_B1))
            {
                mover_Abajo();
                delay_ms(200);
            }
        }
    }
}
```



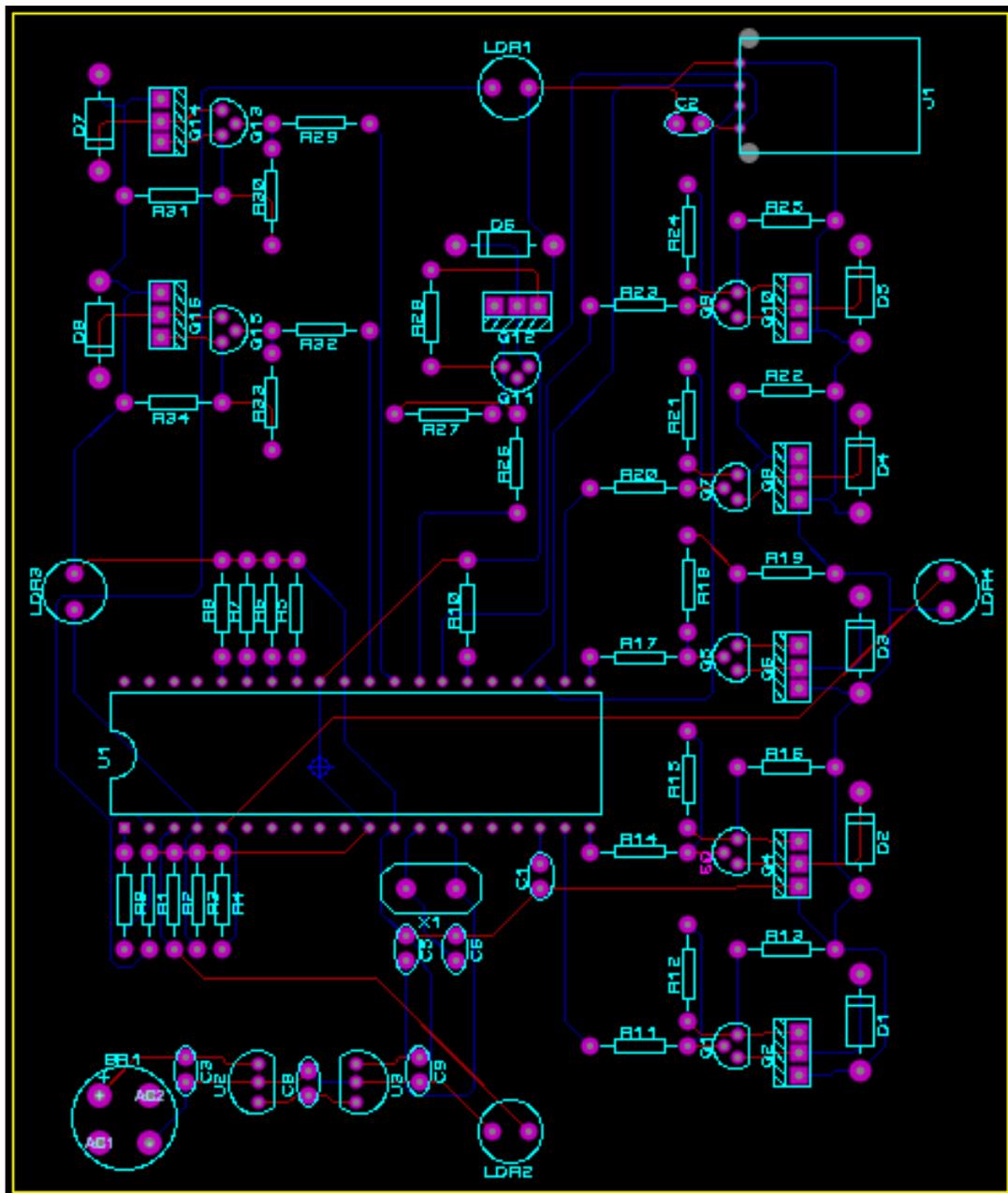
```

{
  mover_Izquierda();
  delay_ms(200);
}
}
if(sensor_Arriba > sensor_Abajo)
{
  if( !input(PIN_B2))
  {
    mover_Arriba();
    delay_ms(200);
  }
}
}

if(sensor_Arriba < sensor_Abajo)
{
  if(!input(PIN_B3))
  {
    mover_Abajo();
    delay_ms(200);
  }
}
}

```

Anexo 8. Vista esquemática del circuito impreso en el módulo Ares del programa Proteus.



Anexo 9. Vista en 3D de los componentes en la placa impresa.

