

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA UN GENERADOR TERMO SOLAR

Camacás Pérez Gerson Bolívar.
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
Universidad Técnica del Norte, Av. 17 de Julio 5-21 Ibarra
gerson_electricalwork@outlook.com

Resumen— El presente proyecto de investigación consiste en el diseño e implementación de un sistema automático de seguimiento solar, para un generador termo solar de la Universidad Técnica del Norte ubicado en las instalaciones de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico. Se describe la implementación de un sistema basado en ecuaciones de posicionamiento astronómico que permitirán saber la posición del sol en cada hora del día, el sistema de automatización se diseñó y programó utilizando Arduino como el controlador principal y Labview como interfaz gráfica, para la visualización de los datos. La movilidad del sistema se la realiza en un grado de libertad siguiendo el movimiento del sol de mayor cobertura el cual es, de Este a Oeste. El sistema mecánico está formado por cables tensores ubicados en los extremos del generador, los cuales son recogidos por un motor de AC para dar movilidad según la dirección y posición que ordene el controlador principal.

Índice de Términos— Arduino, generador termo solar, seguidor solar, sistema automático.

I. INTRODUCCIÓN

El sol es una fuente de energía inagotable, el uso de su calor ha inspirado las mentes más brillantes a lo largo de la historia; cómo aprovechar esta energía y la construcción de dispositivos captadores se convirtieron en temas de continuo desarrollo y evolución.

En 1867 el científico suizo Horace de Saussure desarrolló el primer colector solar. Más recientemente, hace un poco más de 100 años, el científico francés Auguste Mouchout usó calor de un colector solar para producir vapor y mover un motor. Fue así como la gran producción científica

y los avances de la tecnología llevaron a la industrialización del uso de la energía solar, desde la construcción de casas con la orientación adecuada para captar la luz, hasta las modernas celdas fotovoltaicas delgadas, el ser humano aprovecha la radiación solar para cubrir sus necesidades de energía [8]. Los sistemas más novedosos para mejorar la captación de calor poseen seguidores solares con lo que se aumenta el rendimiento de los colectores.

En la actualidad se conocen distintos tipos de seguidores solares que tienen como un mismo propósito mejorar el aprovechamiento de la energía Solar. Algunos estudios de forma general, dicen que el seguimiento azimutal recoge de un 10% a un 20% más que las estructuras fijas y puede llegar hasta el 25% en algunos casos. Entre los diferentes tipos de seguidores a dos ejes existen variaciones de entre el 30% y el 45% de incremento de producción en comparación con instalaciones fijas [10]. En la Escuela de Educación Técnica de la Universidad Técnica del Norte, principal centro universitario de la zona uno del Ecuador, se ha promovido la indagación y el uso de energías renovables. Un ejemplo específico se evidencia en el laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico (CIMANELE), donde existe un sistema descentralizado de generación termo solar de disco parabólico y motor Stirling que permanece en posición fija y durante cierto transcurso de tiempo utiliza la radiación solar a su máximo esplendor para generar 12 V en corriente continua y alimentar un aplicativo que utiliza un lámpara UV para purificar agua de un recipiente. Es aquí,

donde se centrará el presente trabajo que trata de fortalecer el sistema de captación de luz solar mediante la implementación de un sistema automático de seguimiento solar.

De los tipos de seguidores investigados, el seguidor elegido a implementarse debe ser primeramente de tipo activo pues para el movimiento de giro se utilizara un motor controlado mediante una tarjeta electrónica en este caso Arduino que es una alternativa más económica en comparación a otros autómatas como el PLC.

El seguidor solar será de un solo grado de libertad en el eje horizontal de la superficie captadora debido a que el Ecuador es un país privilegiado por la incidencia perpendicular de los rayos del sol.

El algoritmo de seguimiento será uno de tipo astronómico, el cual a pesar de tener mayor dificultad en su implementación, brinda una mayor fiabilidad en cuanto al seguimiento del sol, lo que garantiza que el sistema no dependerá de las condiciones climáticas para su funcionamiento.

II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO DEL SEGUIDOR

Se ha realizado el diseño de un seguidor cuyo movimiento se realiza con cables tensores que permiten inclinar el disco parabólico según el giro diario o azimutal, Este-Oeste.

En la Fig. 1 se representa mediante un esquema simplificado el diseño mecánico, donde los componentes principales están señalados, el esquema se realizó utilizando software SketchUp.

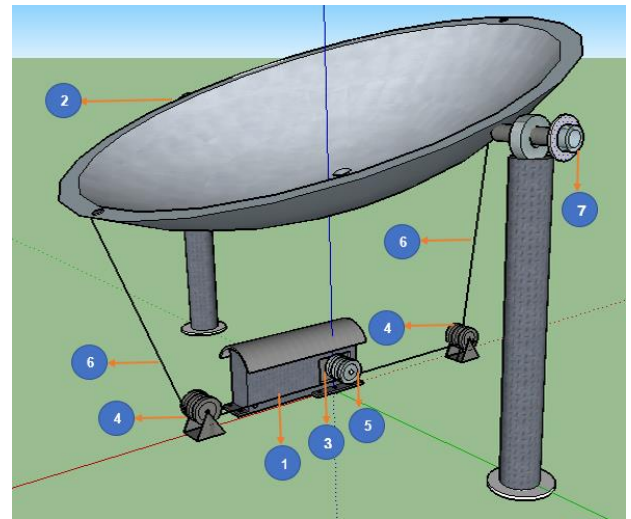


Fig. 1. Esquema simplificado del seguidor solar diseñado (sin escala).

TABLA I
COMPONENTES PRINCIPALES DEL DISEÑO MECÁNICO

1	Base para el motor
2	Generador Termo Solar
3	Motor AC con caja reductora
4	Poleas
5	Polea para eje del motor
6	Cable tensor
7	Acople para el sensor de posición

A. Base para el motor

Este soporte metálico se ha diseñado con la finalidad de situar el motor de AC con su respectiva caja reductora, para que este posicionado correctamente, además la base sirve como apoyo para evitar el contacto con el suelo, consta de perforaciones necesarias para que se mantenga fijo, proporcionando seguridad y estabilidad al sistema en general. En la figura 2 podemos observar el diseño de la base para el motor realizada en SolidWorks.

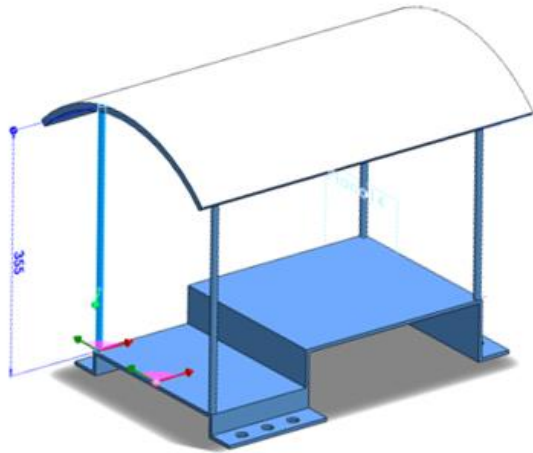


Fig. 2. Base de motor vista 3D.

B. Generador termo solar

El diseño mecánico del seguidor solar, es para un generador termo solar, que se encuentra ubicado en las instalaciones de CIMANELE.



Fig. 3. Generador termo solar de disco parabólico y motor stirling.

Este generador está formado por un colector de disco parabólico, el cual capta la radiación solar, la cual es transmitida en forma de calor hacia un motor de tipo Stirling y mediante un ciclo termodinámico esta energía calórica se transforman en mecánica, el motor esta conectado a un alternador para convertir la energía mecánica en eléctrica, las características de este generador se observan en la Tabla II.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL GENERADOR TERMO SOLAR

Características Físicas	
Diámetro del disco parabólico	4m
Altura de las columnas de soporte	2 m 28 cm
Movilidad proporcionada por el eje rotatorio del disco parabólico	60° de ambos lados
Características de Funcionamiento	
Voltaje entregado por el motor stirling en vacío	12 V
Irradiancia de operación	1.162 W/m ²
Temperatura de operación	347 °C

C. Motor

Previamente antes de dimensionar el motor se analizó implementar un sistema en donde la fuerza aplicada sea en los extremos del disco parabólico, para determinar la cantidad de fuerza necesaria se utilizó un instrumento de medida llamado dinamómetro, el cual es una herramienta que a partir de los cambios en la elasticidad de un muelle con una determinada calibración, permite el cálculo del peso de un cuerpo o la medición de una fuerza, el esquema de medición se lo puede observar en la Fig. 4.

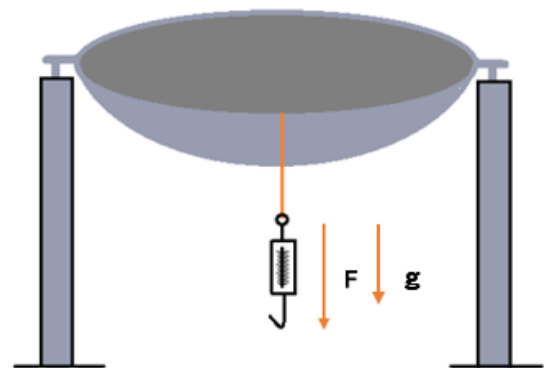


Fig. 4. Esquema de medición de fuerza.

La medida obtenida en kgf es de 10.5 kg en cada uno de los extremos del disco parabólico, transformando a Newton para determinar la fuerza necesaria que deberá aplicarse queda lo siguiente.

La masa es = 10.5 kg, la aceleración es $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$F = \text{masa} \times \text{gravedad}$

$$F = 10.5 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$F = 102.9 \text{ N} \quad N = [\text{kgm/s}^2]$$

La fuerza fue medida inclinando al máximo el disco parabólico pero se considera un desplazamiento máximo de un metro en cada lado por ello el torque sería.

$F = \text{fuerza aplicada [N]}$

$d = \text{distancia de desplazamiento [m]}$

$$T = F \times d$$

$$T = 102.9 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

$$T = 102.9 \text{ Nm}$$

Se dispone de un motor AC trifásico de inducción con una potencia de 1 HP = 746 W a 1660 rpm, para que el sistema funcione de manera adecuada se necesita que su movimiento sea lento, es decir que las rpm sean más bajas que el valor nominal del motor, por ello se vio la necesidad de implementar una caja reductora de engranajes Fig. 5 cuya finalidad es disminuir las rpm y así obtener un movimiento más suave y a su vez aumentar el torque del motor, ya que el que posee originalmente no es suficiente para mover al disco parabólico, las características de la caja reductora se observan en la Tabla III.



Fig. 5. Motor de AC con caja reductora.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS CAJA REDUCTORA DE VELOCIDAD

Revoluciones	1800 rpm
Potencia	1 HP
Velocidad requerida	60 rpm
Velocidad real	1660 rpm
Frame del Motor	80
Torque máximo	166 Nm
i utilizado	25
i calculado	27, 666
Velocidad calculada Ns1	66,4 rpm
Torque calculado	107,293 Nm
Factor de Servicio (Fs)	1,5471

D. Poleas

Las poleas se implementaron al sistema después de las primeras pruebas realizadas únicamente con el motor y su eje de rotación, para distribuir la carga del peso del generador termo solar se colocó dos poleas para motor de dos canales debidamente adaptadas para ser empotradas en el piso, gracias a las poleas Fig. 6 se logra jalar el disco parabólico con una importante componente paralela al movimiento que va realizar el disco parabólico de esta manera además de facilitar la movilidad del disco parabólico sirven como punto de apoyo y sujeción ante la presencia de cambios climáticos.



Fig. 6. Poleas utilizadas en el mecanismo.

E. Cables tensores

Para la movilidad del disco parabólico se ha utilizado cables tensores lo cuales por sus características son óptimos para la función que van a realizar, pues soportan una carga de hasta 154 kg.

F. Acople para el sensor de posición

Para el correcto funcionamiento del sistema, la variable principal a medir es la posición en la que se encuentra el disco parabólico, gracias al acelerómetro se puede obtener esta medida en grados. Es necesario adaptar el sensor de posición es decir el acelerómetro al eje de movilidad del disco parabólico, para ello se diseñó un acople metálico con una carcasa plástica para que el sensor este protegido de las condiciones climáticas como se ve en la Fig. 7.



Fig. 7. Acople y carcasa de protección para el acelerómetro.

III. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO SOLAR

El algoritmo de seguimiento del sistema se basa en ecuaciones de posicionamiento astronómico, las cuales permiten saber la posición del sol en cada momento del día, la ecuación principal es la que calcula el ángulo azimutal (1), puesto que el sistema es un seguidor solar de un solo grado de libertad con seguimiento de ángulo azimutal.

$$az = \arcsin \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(e)} \quad (1)$$

Los resultados mostrados en la Tabla IV son los correspondientes al ángulo de seguimiento azimutal para el día 31 de mayo del 2016.

TABLA IV
RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL ÁNGULO AZIMUTAL

Hora del día	Ángulo azimutal en grados
6	21,91
7	22,31
8	24,24
9	28,39
10	36,5
11	53,02
12	84,10
13	118,97
14	139,51
15	149,62
16	154,75
17	157,26
18	158,10

IV. DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SEGUIDOR SOLAR

A. Introducción

El diseño del seguidor solar se basa principalmente en la creación de un algoritmo de programación utilizando una placa electrónica arduino, el programa a desarrollarse realizará los cálculos mediante fórmulas preestablecidas para la correcta orientación y posicionamiento del disco parabólico hacia el sol a lo largo del día.

El circuito electrónico envía las señales de activación y desactivación, mediante el uso de relés a un variador de frecuencia, para que el motor de AC realice el movimiento correcto del disco parabólico hacia el sol, debido a que las fórmulas nos dan un resultado de posición en ángulos es necesario retroalimentar la señal mediante un acelerómetro analógico, el cual confirmará la posición correcta y nos permitirá saber en qué ángulo está orientada la superficie captadora.

Se realizó una interfaz gráfica utilizando Labview en donde se podrán observar las variables y su comportamiento, el usuario mediante esta interfaz podrá corregir ciertos parámetros manualmente desde un computador.

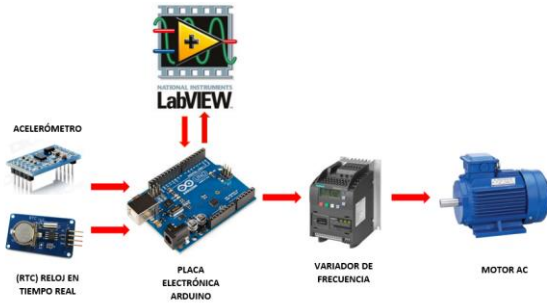


Fig. 8. Esquema básico del seguidor solar.

B. Circuito electrónico

Este circuito está formado por cada uno de los componentes electrónicos que forman parte del sistema automático de seguimiento solar, aquí se incluyen los dispositivos de entrada, de control y de comunicación.

En la Fig. 9 se muestra la placa diseñada en el software PCB wizard para el sistema de seguimiento solar, la cual nos sirve como esquema general de los componentes que fueron necesarios para su diseño.

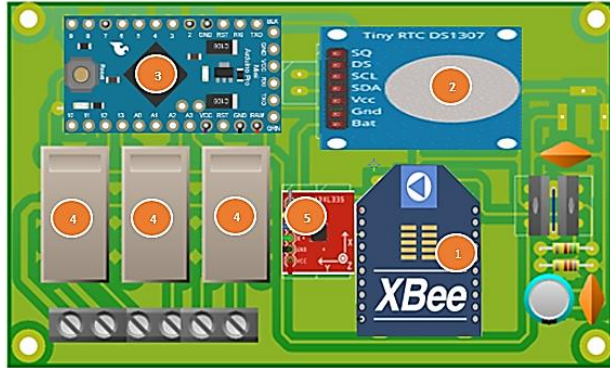


Fig. 9. Placa electrónica de control.

En la Tabla V se enlista los elementos utilizados para la placa de control.

TABLA IV
COMPONENTES DE LA PLACA ELECTRÓNICA

1	Acelerómetro 3 ejes GY-61 ADXL335
2	Reloj en tiempo real (RTC) DS1307
3	Arduino Pro Mini
4	Relés
5	Xbee pro S1

C. Variador de frecuencia

El sistema de control para la movilidad del disco parabólico requiere de una etapa de potencia que permita controlar el motor de CA, y el variador de frecuencia es un sistema que permite el control de la velocidad rotacional del motor, arranque y adicionalmente la inversión de giro.

Los variadores de frecuencia disponen de modos de trabajo ya sea manual o automático, según las necesidades del proceso, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual.

El variador fue adquirido de acuerdo a las características del motor de CA con una capacidad de 1 hp para más detalles sobre sus características véase la Tabla VI.

TABLA VI
CARACTERÍSTICAS VARIADOR DE FRECUENCIA

Modelo	Sinamics V20
Voltaje de funcionamiento	200-230V
Corriente nominal de entrada	10 A
Corriente nominal de salida	4.2 A
Frecuencia de salida	0-63 Hz
Potencia	1hp
Rango de tensión	200 V a 240 V CA (tolerancia: de -10 % a +10 %) 47 Hz a 63 Hz Existe reducción de corriente con tensiones de entrada o frecuencias de conmutación superiores a 230 V / 8kHz.
Clase de protección	IP 20
Nivel de humedad máxima	95 % (sin condensación)

D. Circuito eléctrico

El diagrama de conexión eléctrica tanto de la parte de potencia como la parte de control se la puede observar en la Fig. 11.

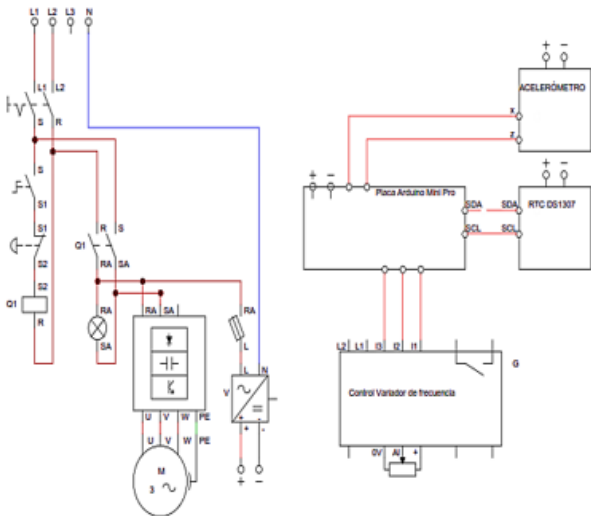


Fig. 10. Diagrama de conexión eléctrica.

V. PROGRAMACIÓN

La programación del dispositivo de control en este caso arduino pro mini se realizó utilizando el software de su plataforma de desarrollo, cuyo lenguaje de programación está basado en C++.

La estructura básica del lenguaje de programación de arduino es sencilla y se divide en al menos dos partes las cuales contienen funciones, declaraciones, instrucciones que van hacer ejecutadas según las especificaciones del programa.

Las dos etapas principales en las que se divide el programa son:

A. Declaración de variables *setup()*

La parte que se encarga de almacenar la configuración es decir la declaración de las variables es la función *Setup()* Fig. 11, es la primera que será ejecutada en el programa y por una sola vez.

Esta se utiliza ya sea para iniciar o configurar las entradas y salidas de la placa arduino o para configurar la comunicación serial.

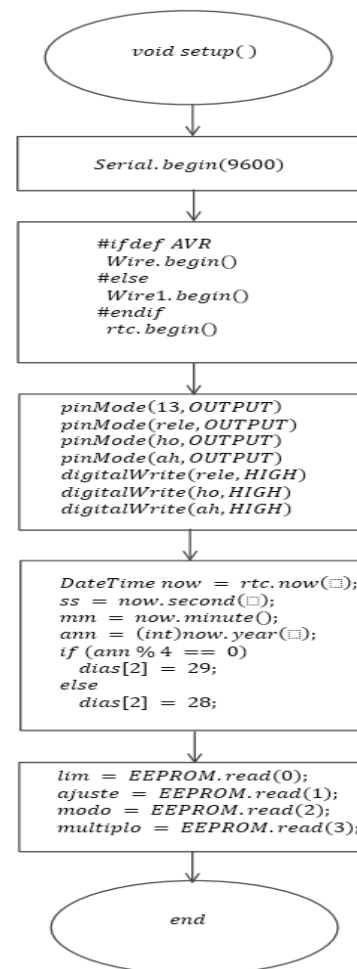


Fig. 11. Diagrama de flujo void *setup()*.

B. Función *Loop()*

Después de haber declarado la variables en la función *Void Setup()*, la función *Loop()* Fig. 12 permite que el programa se ejecute de forma cíclica, es decir el programa responderá de manera continua ante los sucesos que están ocurriendo en el micro controlador de el arduino.

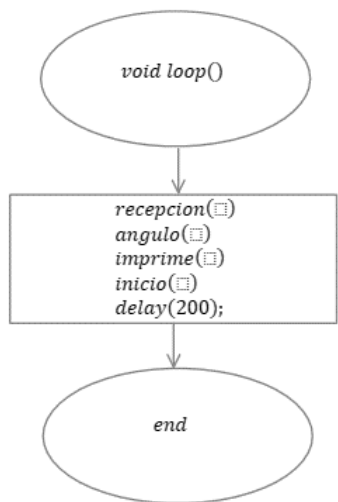


Fig. 12. Diagrama de flujo void loop ().

VI. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO LABVIEW

El principal objetivo del programa desarrollado en LabVIEW, es que funcione como una interfaz gráfica de usuario, la cual permitirá ingresar ciertos parámetros para el correcto funcionamiento del sistema y también para poder monitorear los ángulos deseados, todo esto mediante una interfaz agradable con el usuario.

Algunos de los requerimientos que debe cumplir el software son:

- Permitir el ingreso de ciertos parámetros necesarios para el posicionamiento del generador termo solar tales como: latitud, ángulo máximo de inclinación en dirección Este, ángulo de inclinación máximo dirección oeste.
- Recibir los datos de la placa electrónica Arduino e interpretarlos para mostrarlos en la interfaz del usuario.
- Obtener datos reales y actuales como los ángulos de posición así como la hora y fecha en que se están ejecutando.

La plataforma Labview Fig. 13 se utilizó como un visor y editor de datos y no como un controlador.



Fig. 13. Interfaz gráfica LabVIEW.

Entre las partes principales de la interfaz gráfica destacan las siguientes.

A. Puerto de comunicación

El usuario debe seleccionar el puerto de comunicación serial donde se conectará el Xbee para establecer posteriormente la comunicación serial entre el computador y Arduino, la velocidad de comunicación debe ser igual tanto en arduino como en labview.

B. Parámetros

Esta sección permite cambiar ciertos parámetros dentro de la programación del sistema que modificaran el funcionamiento del mismo de acuerdo a las necesidades del usuario, a continuación se describe cada uno de ellos de forma general.

- **Longitud:** longitud del lugar donde está ubicado el captador solar.
- **Latitud:** Latitud del lugar donde está ubicado el captador solar.
- **Límites:** son los ángulos máximos de inclinación del disco parabólico o cualquier sistema de captación solar tanto hacia el Este como al Oeste.
- **Ajuste:** En caso de que el acelerómetro presente un error en el valor angular de la posición, ya sea por la distancia o por fallas propias del sensor este ajuste

permitirá calibrarlo para tener una medición más acertada.

- Intervalos: El usuario puede elegir en que intervalo de tiempo quiere que se realice el seguimiento solar, los intervalos van desde un minuto hasta una hora.

VII. CONCLUSIONES

La investigación de los distintos tipos de sistemas de seguimiento solar permitió determinar que el más óptimo debido a la gran ventaja que tiene el Ecuador en cuanto a recurso solar, es el seguidor solar horizontal azimutal con un grado de libertad, basado en ecuaciones de posicionamiento astronómico cuya precisión se encuentra dentro de los estándares de los seguidores comerciales.

Se ha logrado la implementación de un sistema mecánico sencillo y de fácil montaje que cumple con los requerimientos necesarios para el sistema de seguimiento solar en un grado de libertad.

El diseño electrónico utilizando arduino como el controlador principal cumplió con los requerimientos necesarios mostrando que arduino puede ser dinámico, funcional y sobre todo económico a la hora de utilizarlo en este tipo de proyectos de Energías Renovables y automatización.

Se desarrolló una interfaz en Labview la cual mediante comunicación serial con arduino, nos permite monitorear la posición del captador solar en tiempo real, además Labview permitió hacer un sistema editable y que puede ser usado en cualquier ciudad del país únicamente modificando los valores de latitud y longitud del lugar donde se desee implementar este sistema.

RECONOCIMIENTO

Un agradecimiento muy especial a Dios, el ser supremo y creador de todas las cosas, a mis Padres: Sr. Alfonso Camacás y Sra. Marilú Pérez, un infinito agradecimiento al Ing. Mauricio Vásquez director y guía de este trabajo

investigativo. Muchas gracias para cada uno de los docentes e ingenieros, que aportaron con sus conocimientos y recomendaciones, Hernán Pérez, Pablo Méndez, Ramiro Flores, Claudio Otero, Leuber Rosa.

REFERENCIAS

- [1] G Abal, G., & Durañona, V. (2013). *Manual Técnico de Energía Solar Térmica*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República de Uruguay.
- [2] Bishop, R. (2002). *The Mechatronics Handbook*. California, EEUU: Editor in Chef.
- [3] Costas, P. C. (2005). *Montaje e instalación en planta de máquinas industriales, procesos, instrumentos y técnicas básicas de construcción y organización del trabajo*. España: Ideaspropias.
- [4] Chandi Paguay, K. A., & Ruano Vega, E. S. (2015). *Estudio de un sistema de generación termo solar mediante disco reflector parabólico y motor stirling e implementación de un modelo a escala para la alimentación eléctrica de un filtro de purificación de agua con luz ultravioleta (tesis de pregrado)*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- [5] Duffie, J and Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3rd ed.). Wiley: ISBN 0471698679.
- [6] Dutch, S. I. (2004). *World Book Online.*, de World Book, Inc.: www.nasa.gov
- [7] Lorenzo, E. (2003). *Retratos de la Conexión fotovoltaica a la red*. Madrid, España: Instituto de energía solar – Universidad Politécnica de Madrid.
- [8] Méndez Muñoz, J. M. (2011). *Energía solar térmica*. Fundación Cofemetal.
- [9] Pintos Lanzuela, C. (2010). *Seguidor Solar Ligero Para Cubiertas (proyecto fin de carrera)*. Madrid, España: Universidad Pontificia Comillas.