


	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 07 de Diciembre de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

Los suscritos:





Santiago Ochoa García, con C.C. No. 1.075.270.609, Daniel Fernando Murcia Perdomo, con C.C. No. 1.075.270.470, autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado Diseño e Implementación de un Sistema de Seguimiento Solar Automatizado con Control Difuso presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico; autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

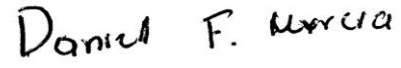
EL AUTOR/ESTUDIANTE:





EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:



Firma:



	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Diseño e Implementación de un Sistema de Seguimiento Solar Automatizado con Control Difuso

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Ochoa García	Santiago
Murcia Perdomo	Daniel Fernando

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Sendoya Losada	Diego Fernando

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre





PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Electrónico

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Electrónica

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2016 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 77

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						 ISO 9001 SC 7384-1	 GP 205-1	 CERTIFIED I:Net MANAGEMENT SYSTEM CO-SC 7384-1
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO								
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4		

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general ___ Grabados ___ Láminas ___
Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___ Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO: Fotografías de resultados finales , diagramas esquemáticos, tablas de resultados y códigos de programación contenidos en la careta anexos.

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):





PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Control Difuso	Diffuse Control	6. Temperatura	Temperature
2. Energía Solar	Solar Energy	7. Radiación Solar	Solar Radiation
3. Panel Solar	Solar Panel	8. Convertidor Boost	Boost Converter
4. Eficiencia	Efficiency		
5. Seguimiento Solar	Solar Tracking		

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El Diseño e implementación de un sistema de seguimiento solar fotovoltaico aplicando control difuso compara la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos tanto en modo estático, como en movimiento. Desarrollado mediante el control difuso de dos variables de entrada (intensidad de radiación solar y temperatura), estas variables darán como salida del sistema la variable de posición que ubicará de la mejor manera posible el panel solar fotovoltaico y puede tener la mayor cantidad de energía posible; siempre y cuando la temperatura no supere un umbral, si es superado este umbral se ubicará en una nueva posición intentado buscar siempre el máximo punto de radiación evitando pérdidas de eficiencia provocadas por temperatura.

Para observar la eficiencia, el sistema posee un convertidor Boost ideal para alimentar un

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4

motor DC de mediana potencia, este convertidor está conectado a los paneles solares fotovoltaicos. De igual manera, mediante la tarjeta raspberry pi que permite de una forma intuitiva la comunicación entre el operador y todas las funciones del sistema tales como encendido o apagado del motor, apagado del control del seguidor solar, encendido y apagado del conversor Boost, entre otras.

Desplegando al final un estudio comparativo entre un sistema solar estático y la propuesta de seguidor solar que atiende potencia producida vs potencia consumida, eficiencia, costos y complejidad del sistema mediante la implementación de un prototipo experimental.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The design and implementation of a photovoltaic solar tracker using fuzzy control, compare the efficiency between the solar static photovoltaic system and the photovoltaic solar follower system. The system was developed via fuzzy control, using two inputs (solar radiation intensity and temperature), these variables control the panel position, trying to find the best angle to collect the maximum solar energy, as long as the temperature do not exceed the threshold, if it exceed the threshold it will be repositioned, always looking for maximum radiation point, avoiding efficiency losses caused by temperature. The way to observe the system's efficiency, is using the converter dc-dc (boost) ideal to supply the power to a DC motor; this converter is connected to the solar panel. Furthermore, the raspberry pi board allows an easy communication between the use rand the system



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

4 de 4

functions as turn on/off
of the motor, of the solar follower and of the boost converter.
At the end, a comparative survey between the static solar system and the solar follower,
display the power produced and the power consumed, the efficiency, the cost and the
system complexity.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Faiber Ignacio Robayo

Firma:

Nombre Jurado: Germán Martínez Barreto

Firma:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO
SOLAR AUTOMATIZADO CON CONTROL DIFUSO**

**DANIEL FERNANDO MURCIA PERDOMO
SANTIAGO OCHOA GARCÍA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA
2016**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO
SOLAR AUTOMATIZADO CON CONTROL DIFUSO**

**DANIEL FERNANDO MURCIA PERDOMO
SANTIAGO OCHOA GARCÍA**

Trabajo De Grado Para Optar Al Titulo De Ingeniero Electrónico

**Director
Diego Fernando Sendoya Losada
Magister en Ingeniería de Control Industrial**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA
2016**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Neiva, Diciembre 6 de 2016

A Dios por bendecirme en cada momento de mi vida y colmarme de sabiduría y entendimiento. A mi familia por cada uno de los valores que inculcaron en mí para desarrollarme como persona, en especial a mis padres gracias por todo ese afecto, comprensión durante toda mi vida y ahora en este nuevo inicio como ingeniero. A mi madre por luchar conmigo para entrar esta carrera, a mi padre por educarme y enseñarme el camino de la vida, a mi hermano Orlando Murcia y futuro colega por ser un eje vital en mi carrera y mi vida. A Valentina Pinzón y su familia por su gran bondad y apoyo. A mi compañero de tesis y a los muchachos gracias por su cariño, amistad, paciencia y humildad permanente. A todos los profesores que aportaron su grano de arena en mi formación como ingeniero.

Daniel Fernando Murcia Perdomo

He de agradecer primero a Dios por iluminarme el camino ideal de la vida, a mis padres por ese gran apoyo que recibí a lo largo de mi vida, en especial a mi madre por enseñarme a luchar por nuestras metas, a mis hermanos Camilo Ochoa y Sebastian Ochoa por brindarme todo el apoyo y las fuerzas necesarias para culminar este gran proyecto, a toda mi familia por esas voces de apoyo. A mi compañero de tesis por su gran esfuerzo y dedicación, a Ángela Rocío Suarez por todo el apoyo que me brindó, amigos, profesores y trabajadores de la universidad que compartieron conmigo a largo de este gran camino y a todas aquellas personas que hicieron de esto un gran sueño

cumplido

Santiago Ochoa García

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos primeramente a Dios, por permitir culminar con éxito nuestro proyecto y siempre estar a nuestro lado. Al programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana, a los profesores con quienes compartimos a lo largo de nuestra carrera y aquellos que indirectamente nos dieron un consejo y nos extendieron su mano. Ingeniero Diego Sendoya, por el apoyo y las asesorías brindadas como director del proyecto. A nuestra codirectora Catalina González Castaño por el soporte en el desarrollo del mismo; A nuestro futuros colegas Armando Losada y Felix Alejandro Sanchez por el gran apoyo para el desarrollo del proyecto y al Semillero de Energías Alternativas SEA por toda la ayuda que nos brindaron. Colombia Energy S.A.S, por el préstamo de infraestructura y algunos materiales para el montaje del proyecto y en especial, al Ingeniero Víctor Mosquera, quien nos brindó asesoría constante en la ejecución del mismo. A nuestras familias y a todas aquellas personas que quizá olvidamos mencionar, quienes con su colaboración y ayuda hicieron posible la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. MARCO TEORICO	17
4.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	17
4.1.1 Efecto fotoeléctrico	17
4.1.2 Energía Solar	17
4.1.3 Tipos de Irradiación	18
4.1.4 Tipos de Radiación	18
4.2 CELDA SOLAR FOTOVOLTAICA	19
4.2.1 Tipos De Celdas Solares Fotovoltaicas	19
4.2.2 Parámetros eléctricos de las celdas fotovoltaicas	19
4.3 PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO	20
4.3.1 Curva IV - PV	20
4.3.2 Temperatura	20
4.4 POSICIÓN	22
4.4.1 Movimiento Sol-Tierra	22
4.4.2 Movimiento de traslación	22
4.4.3 Movimiento de rotación	23
4.4.4 Inclinación	23
4.5 COORDERNADAS CELESTES	24
4.5.1 Coordenadas Celestes Horizontales	24
4.6 CLIMA EN LA CIUDAD DE NEIVA	24
4.7 LÓGICA DIFUSA	25
4.7.1 Sistema Difuso	26
4.7.2 Controlador Difuso	26
4.8 CONVERTOR DE VOLTAJE DC-DC	27
4.8.1 Reguladores Lineales	27
4.8.2 Reguladores Conmutados	28
5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROYECTO	29
5.1 SELECCION DEL MOTOR	29
5.2 ESTRUCTURA MOVIL	30
5.2.1 Estructura	31
5.2.2 Rotor YAESU G-5500	32
5.2.3 Unidad de control manual G-5500	33
5.2.4 Conexion rotor Yaesu - Unidad Manual	33
5.3 UNIDAD DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN	34
5.3.1 Fuente de Alimentación	35
5.3.2 Unidad Central de Procesamiento	36
5.3.3 Módulo Reloj	36
5.3.4 Comunicación Inalámbrica	37
5.3.5 Instrumentación	38
5.3.6 Placa de Control	41
5.4 ACOUPLE DE CARGA: CONVERTIDOR DC-DC BOOST	43
5.4.1 Convertidor DC-DC boost	44

5.4.2	Arrancador suave	46
5.5	CONTROL FUZZY DE POSICIÓN DEL MODULO SOLAR FOTVOLTAICO	49
5.6	INTERFAZ GRAFICA	57
5.7	ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTVOLTAICA	57
5.7.1	Panel solar Fotovoltaico	57
5.7.2	Banco de Almacenamiento	58
5.7.3	Controlador de Carga	58
5.7.4	Cableado	59
5.8	MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO	59
5.8.1	Instalación	60
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	61
6.1	CONSUMO DE ENERGÍA	63
6.1.1	Calculo de consumo energético	64
6.2	PROYECCIÓN	65
6.3	COSTOS	66
7.	CONCLUSIONES	67
	ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Costos del Rotor	30
Tabla 2. Especificaciones del Rotor Yaesu G-5500	33
Tabla 3. Distribucion de Pines Unidad Manual	34
Tabla 4. Caracteristicas Diodo Schttky 1N5408	45
Tabla 5. Especificaciones técnicas del panel solar usado	57
Tabla 6. Especificaciones técnicas del PRS1515	59
Tabla 7. Consumo de Corriente Prototipo experimental	64
Tabla 8. Consumo de Corriente	64
Tabla 9. Tiempo de duración rotor G5500	64
Tabla 10. Tiempo de duración servomotor SG90	64
Tabla 11. Potencia de consumo Rotor G5500	65
Tabla 12. Potencia de consumo Servomotor SG90	65
Tabla 13. Costos del Montaje experimental	66
Tabla 14. Costos de la Instalación	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Efecto Fotoeléctrico	17
Figura 2. Mapa de Radiación Global Promedio Multianual de Colombia	18
Figura 3. curva características IV	21
Figura 4. Influencia de la Temperatura sobre P _{máx}	21
Figura 5. Posición de la Tierra sobre su órbita.	22
Figura 6. Posición de los Astros	24
Figura 7. Temperatura Media Anual del Huila	25
Figura 8. Temperatura y Precipitación en el Huila	25
Figura 9. Ejemplo Conjuntos Difusos	26
Figura 10. Estructura De Un Modelo Difuso	27
Figura 11. Diagrama de bloques del sistema	29
Figura 12. Estructura móvil modelo a pequeña escala	31
Figura 13. Estructura Móvil	32
Figura 14. Unidad de Control manual	34
Figura 15. Índice de conexión	35
Figura 16. Fuente de Alimentación	35
Figura 17. Distribuciones de Pines PIC16F887	36
Figura 18. Configuración Módulo Reloj	37
Figura 19. Módulo XBEE	37
Figura 20. Alimentación Módulo Xbee	38
Figura 21. Sensor de corriente	38
Figura 22. División de Tensión Panel Solar	39
Figura 23. Sensor de corriente	39
Figura 24. División de Tensión de Carga	40
Figura 25. Sensor de Temperatura	40
Figura 26. Filtros de Entrada Sensor de Posición	41
Figura 27. Acople de Salida	41
Figura 28. Visualización 3D Placa de control	42
Figura 29. Diagrama de Bloques Acople de carga	43
Figura 30. Encapsulado TO263-51 del XL6009	44
Figura 31. Diagrama de bloques del XL6009	45
Figura 32. Esquemático Convertidor Boost	46
Figura 33. Respuesta en el tiempo motor de carga	47
Figura 34. Respuesta en el tiempo motor de carga con el arrancador suave	47
Figura 35. Comparación Gráficos de repuesta de la carga	48
Figura 36. Esquemático arrancador suave	48
Figura 37. Diagrama de reducción de ruido	49
Figura 38. Iluminación Vs Resistencia	50
Figura 39. Diagrama conexión LDR	50
Figura 40. Configuración LDR	51
Figura 41. Función de membresía Trapezoidal	52
Figura 42. Funciones de membresía de entrada del control difuso	53
Figura 43. Funciones de membresía de Salida del control difuso	53
Figura 44. Tabla de Reglas base	54
Figura 45. Simulación en Simulink del control difuso	54
Figura 46. Resultados de Simulación Control Difuso	55
Figura 47. Diagrama de flujo Control Difuso	56
Figura 48. Panel Solar Fotovoltaico Infinity New Energy	58

Figura 49.	Bateria 12VDC 205Ah referencia MT122050	58
Figura 50.	PRS1515	59
Figura 51.	Energía Producida estudio experimental	61
Figura 52.	Curva de Potencia con respecto al tiempo	62
Figura 53.	Valores de Irradiación	62
Figura 54.	Curva de temperatura sobre el panel solar	63
Figura 55.	Influencia de la temperatura en el Voltaje de circuito abierto	63

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Esquemático Placa de Control	71
Anexo B: Interfaz Gráfica en Python 2.7	73
Anexo C: Fotos	74

RESUMEN

El Diseño e implementación de un sistema de seguimiento solar fotovoltaico aplicando control difuso compara la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos tanto en modo estático, como en movimiento. Desarrollado mediante el control difuso de dos variables de entrada (intensidad de radiación solar y temperatura), estas variables darán como salida del sistema la variable de posición que ubicará de la mejor manera posible el panel solar fotovoltaico y puede tener la mayor cantidad de energía posible; siempre y cuando la temperatura no supere un umbral, si es superado este umbral se ubicará en una nueva posición intentado buscar siempre el máximo punto de radiación evitando pérdidas de eficiencia provocadas por temperatura.

Para observar la eficiencia, el sistema posee un convertidor Boost ideal para alimentar un motor DC de mediana potencia, este convertidor está conectado a los paneles solares fotovoltaicos. De igual manera, mediante la tarjeta raspberry pi que permite de una forma intuitiva la comunicación entre el operador y todas las funciones del sistema tales como encendido o apagado del motor, apagado del control del seguidor solar, encendido y apagado del conversor boost, entre otras.

Desplegando al final un estudio comparativo entre un sistema solar estático y la propuesta de seguidor solar que atiende potencia producida vs potencia consumida, eficiencia, costos y complejidad del sistema mediante la implementación de un prototipo experimental.

PALABRAS CLAVE:

Solar fotovoltaico, seguidor solar, control difuso, radiación solar, temperatura, Boost, raspberry pi.

ABSTRACT

The design and implementation of a photovoltaic solar tracker using fuzzy control, compare the efficiency between the solar static photovoltaic system and the photovoltaic solar follower system. The system was developed via fuzzy control, using two inputs (solar radiation intensity and temperature), these variables control the panel position, trying to find the best angle to collect the maximum solar energy, as long as the temperature do not exceed the threshold, if it exceed the threshold it will be repositioned, always looking for maximum radiation point, avoiding efficiency losses caused by temperature.

The way to observe the system's efficiency, is using the converter dc-dc (boost) ideal to supply the power to a DC motor; this converter is connected to the solar panel. Furthermore, the raspberry pi board allows an easy communication between the user and the system functions as turn on/off of the motor, of the solar follower and of the boost converter.

At the end, a comparative survey between the static solar system and the solar follower, display the power produced and the power consumed, the efficiency, the cost and the system complexity.

KEYWORDS:

solar photovoltaic energy, solar tracker, fuzzy control, solar radiation, temperature, boost converter, raspberry pi.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las fuentes de energía no renovables aportan índices de contaminación y calentamiento global muy altos, por lo que la energía alternativa se convierte poco a poco en una solución para la disminución de los mismos. La energía solar fotovoltaica proveniente de la radiación solar es una fuente inagotable de energía y su captación es lograda mediante paneles solares, tecnología que hoy en día está muy desarrollada. Los sistemas más usados de generación de energía eléctrica a partir de radiación solar son estáticos, sistemas que son eficientes solo en horas donde la incidencia de radiación solar es directa.

Los paneles solares generan una cantidad prudente de energía eléctrica directamente proporcional a la intensidad de radiación solar, por lo tanto sin radiación solar no producirá energía eléctrica. En los sistemas estáticos fotovoltaicos su principal defecto es que al estar orientados en un ángulo determinado la cantidad de incidencia solar máxima que pueda lograr en un instante se limita a la posición directa del panel y la posición del sol, además la eficiencia de los paneles solares es afectada negativamente por la temperatura, disminuyendo la cantidad de energía eléctrica producida.

Ahora bien, los sistemas de seguimiento solar son una solución para conseguir mayor incidencia de radiación solar sobre el sistema, logrando aumentar la captación en comparación a un sistema estático. Sin embargo, los sistemas de seguimiento solar convencionales no tienen en cuenta el factor de la temperatura por lo que se pueden alcanzar temperaturas muy altas ocasionando que su eficiencia sea muy baja, afectando además la vida útil de los paneles solares, por lo tanto a continuación se plantea un seguidor solar teniendo en cuenta las variables ambientales más influyentes en la captación de radiación solar en los paneles solares como son la posición y la temperatura e ignorando humedad, viento.

2. JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de seguimiento solar son una solución para conseguir mayor incidencia de radiación en comparación a un sistema estático. Un sistema de seguimiento produce una mejora significativa en la eficiencia energética con respecto a un sistema fijo¹. Dado que es posible adquirir una cantidad mayor de energía solar a partir de los sistemas fotovoltaicos, se debe entrar a evaluar los posibles problemas que se puedan presentar por temperatura.

La temperatura en todos los sistemas fotovoltaicos tiene consecuencias de gran repercusión como disminución de la vida útil de los paneles solares, derretimiento de las celdas por altas temperaturas y factores de eficiencia debido a que pierde el 0.5% de eficiencia de captación de energía por cada grado a partir de 25 grados celcius[1].

Transportando estos problemas asociados a los sistemas de seguimiento solar notamos que la eficiencia en determinados momentos puede llegar a límites prácticamente nulos donde sería totalmente ineficiente el movimiento de seguimiento solar, debido a larga exposición a la radiación que tendría en comparación a un sistema estático. Teniendo en cuenta estos factores es necesario un sistema que considere el seguimiento del sol mediante la incidencia de radiación solar y la temperatura que posea el panel, para así mismo determinar cuál sería la posición ideal.

¹<http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/11844/TFGTurrillasSalobreEduardo2014.pdf>
Estudio comparativo de la eficiencia energética en seguidores solares.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de seguimiento solar fotovoltaico aplicando control difuso con el fin de comparar la eficiencia de este tipo de tecnologías en modo estático y en movimiento constante.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un control difuso con dos variables de entrada, temperatura e incidencia de radiación solar en el panel fotovoltaico con fin de controlar su posición.
- Implementar un convertidor Boost ideal para alimentar un motor DC de mediana potencia que será usado con fines de observar rendimiento y eficiencia del sistema.
- Incorporar al sistema una interfaz HMI con tarjeta de desarrollo Raspberry Pi que permita una intuitiva comunicación entre el operador y todas las funciones del sistema.
- Realizar un estudio comparativo entre un sistema solar estático y la propuesta de seguidor solar que acoja potencia producida vs potencia consumida, eficiencia, costos y complejidad del sistema mediante la implementación de un prototipo experimental.

4. MARCO TEORICO

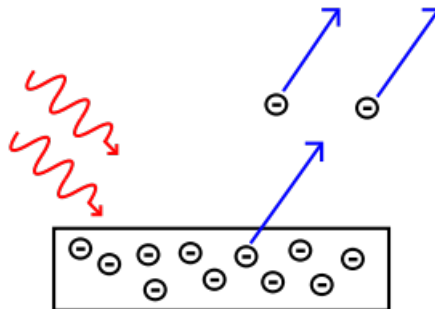
4.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica, es la energía que se produce mediante la transformación de la radiación electromagnética proveniente del sol. Esta radiación sufre una serie de transformaciones dadas por las condiciones ambientales tales como el cruce a través de hidrometeoros, para luego llegar a los paneles fotovoltaicos y que se transforme tal radiación en energía eléctrica, mediante el efecto fotoeléctrico.

4.1.1 Efecto fotoeléctrico

Cuando algunos metales se ponen bajo iluminación se crea una fuerza electromotriz o una diferencia de voltaje. Si se le conecta una carga, se produce una corriente. Esta corriente producida es proporcional al flujo luminoso que reciben ².

Figura 1. Efecto Fotoeléctrico



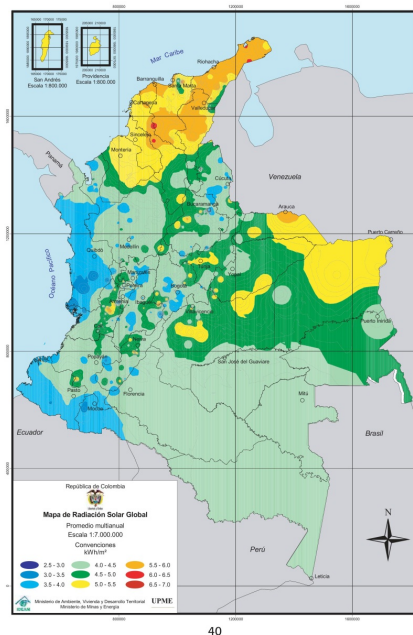
Fuente: <http://www.genciencia.com/tag/cuantica>

4.1.2 Energía Solar

La energía solar, es representada comúnmente como la radiación incidente en un área determinada. Esta variable tiene el nombre de irradiación, su notación es en vatios por metro cuadrado (w/m^2). Ahora bien, la irradiación es variable, debido a que depende de condiciones climatológicas, estas condiciones climatológicas afectan en ciertas regiones de Colombia la captación de la energía solar, sin embargo, la media anual presenta irradiaciones altas y media altas en muchas regiones siendo totalmente viable un dispositivo de captación solar.

²<http://sieeco.com.mx/articulos/aprovechando-el-recurso-solar> Aprovechando el Recurso Solar.

Figura 2. Mapa de Radiación Global Promedio Multianual de Colombia



Fuente: Mapa de radiación solar sobre una superficie plana En: UPME pp. 18.

4.1.3 Tipos de Irradiación

La radiación global (simbolizada con la letra G) se encuentra dentro de la atmósfera, esta viaja hacia la superficie terrestre donde sufre dos factores de diferente índole.

- **Factores astronómicos:** Los factores astronómicos son determinados a través de la ubicación, distancia, coordenadas geográficas y trayectoria, entre la fuente de radiación (Sol) y la tierra. De esta manera se puede determinar la radiación y el ángulo donde inciden los rayos solares.
- **Factores climáticos:** Las características ambientales desarrollan un rol en la captación de radiación solar, debido a que esta atenuará de acuerdo a diferentes factores como son los hidrometeoros, vapor de agua, contaminación, entre otros elementos dentro de la atmósfera que pueda atenuar dicha captación. Es así como estos factores son los responsables de producir dos tipos de radiaciones y otro debido a condiciones geográficas de la superficie terrestre.

4.1.4 Tipos de Radiación

- **Radiación Difusa:** Radiación que llega a la superficie terrestre con obstrucciones causadas por hidrometeoros, gases, vapor de agua o cualquier tipo de factor ambiental que la atenúe.
- **Radiación Reflejada:** Radiación incidente en la superficie que procede de la reflejada

por el suelo o las pendientes de elevaciones del suelo.

- **Radiación Directa:** Es la radiación que llega directamente a la superficie terrestre sin ningún tipo de obstrucción.

4.2 CELDA SOLAR FOTOVOLTAICA

Es una unidad compuesta de semiconductores y dos bornes conductores metálicos. Los rayos de sol reflejan directamente sobre el panel, sus variados componentes llevan su energía a los electrones de los materiales semiconductores de tal manera que pueden romper la barrera de potencial de la unión P-N, y al final convertirse en energía eléctrica.

4.2.1 Tipos De Celdas Solares Fotovoltaicas

Existe una variedad de semiconductores para la elaboración de paneles solares; los más usados, eficientes y avanzados tecnológicamente son los compuestos por silicio.

- **Celdas Monocristalinas:** Elaboradas a partir de un cristal de alta pureza, estas celdas presentan la más alta eficiencia del 17%, son las más costosas. Conserva una apariencia de textura suave, se puede detallar viendo el grosor de la rebanada.
- **Celdas Policristalinas:** Conformada por varios cristales de silicio, con esto se abarata el proceso disminuyendo el costo de los paneles. Son un poco menos eficientes que los paneles solares.
- **Celdas Amorfa:** Como su nombre lo indica estas celdas no presentan patrones de ordenamiento en su estructura cristalina, su eficiencia ronda por el 5% y el 10%, la vida útil es la menor en comparación de las demás celdas; es de 10 años máximo. Son las más económicas del mercado, además, estas no necesitan radiación directa para producir energía.

4.2.2 Parámetros eléctricos de las celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas producen electricidad por lo tanto es necesario conocer las variables eléctricas características del mismo:

- **Corriente:** Es el flujo de electrones a través de un conductor durante un tiempo determinado, su unidad de medida es el amperio representada por la letra A.
- **Voltaje:** Es la cantidad de fuerza externa que se realiza sobre los electrones y estos se excitan generando corriente. Su unidad de medida es el voltio representado con la letra V.
- **Potencia:** Es el paso de energía de un flujo en un lapso de tiempo determinado por un material determinado. Matemáticamente es el producto entre corriente y voltaje. Es directamente proporcional al voltaje y a la corriente. Su unidad de medida es el vatio

(W), y se simboliza con la letra W.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

- **Energía eléctrica:** Definida como el nivel de potencia consumida o generada durante un lapso de tiempo determinado. Su unidad es el vatio-hora (Wh) o el Joule (J); $1J=1Wh$, simbolizado con la letra J.

$$E = P \cdot t \quad (2)$$

4.3 PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Es un arreglo de celdas fotovoltaicas configuradas de tal manera que generan electricidad a partir de la luz solar; estas celdas deben estar configuradas de manera que ofrezcan la máxima transferencia de potencia, para comprobar el desempeño de un panel fotovoltaico se deben conocer a plenitud las siguientes características:

- **Corriente a corto circuito I_{cc} (I_{sc}):** La corriente máxima que puede generar un panel solar es conocida como corriente a corto circuito. Para medir esta corriente se usa una carga con resistividad nula, luego se mide la corriente en este caso mediante un multímetro común, este valor depende demasiado del área del módulo y de la radiación presente en el momento de la medición. Su unidad de medida es el Amperio.
- **Voltaje a circuito abierto V_{ca} (V_{oc}):** Es el máximo voltaje que genera un panel solar fotovoltaico. Sin conectar ningún tipo de carga a este, se mide el voltaje usando un multímetro común. Su unidad de medición es el Voltio.

4.3.1 Curva IV - PV

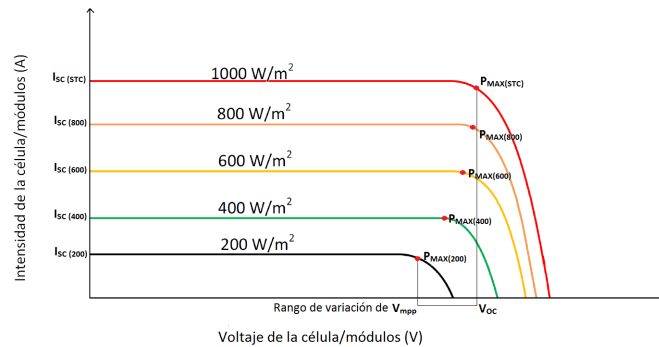
El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (curva IV) o potencia contra voltaje (curva PV) que los caracteriza. La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva IV. La Figura 3 muestra curvas IV y PV para un módulo fotovoltaico típico. Bajo condiciones estándares de prueba (irradiancia de $1kW/m^2$ y temperatura de celda de $25^{\circ}C$), cada modelo de módulo tiene una curva IV (o PV) característica.

Los fabricantes de paneles solares ubican en la respectiva tabla de la curva IV-PV en su correspondiente hoja de datos, junto con el modelo y especificaciones eléctricas.

4.3.2 Temperatura

La temperatura es una variable que afecta de manera determinante en la generación de energía en un panel solar fotovoltaico. La potencia nominal de un panel solar fotovoltaico sufre una reducción de aproximadamente 0.5% por cada grado Celsius a partir de $25^{\circ}C$ (temperatura ideal) en que se incrementa la temperatura tomando como

Figura 3. curva características IV



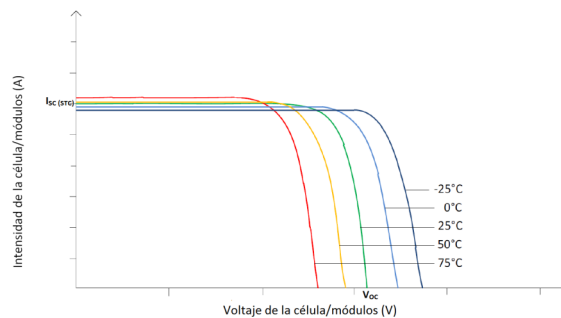
Fuente:

<https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>

temperatura ideal o ambiente 25°C ³.

En la siguiente grafica se puede apreciar como la temperatura puede afectar considerablemente la potencia máxima de un módulo fotovoltaico.

Figura 4. Influencia de la Temperatura sobre Pmáx



Fuente:

<https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>

Las principales razones por las cuales un panel solar fotovoltaico disminuye su potencia producto a elevadas temperaturas son:

- **Tamaño De La Banda Prohibida:** Una celda solar fotovoltaica compuesto por un semiconductor de tipo P y tipo N, este tipo de juntura conserva una diferencia entre estos dos tipos de materiales denominada banda prohibida. Esta banda contiene una anchura característica variable, la banda prohibida tiene una dependencia de temperatura inversa, su anchura decrece de tamaño con respecto a la temperatura. Siendo así que la temperatura al aumentar, disminuye la eficiencia de un panel solar fotovoltaico.

³tomado de: <http://varinia.es/blog/2009/06/15/%C2%BFcomo-afecta-la-temperatura-al-rendimiento-de-las-celulas-fotovoltaicas/>

- **Aumento De Las Corrientes De Fuga:** Las celdas solares fotovoltaicas tienen un flujo de corriente normal desde el terminal positivo hacia el terminal negativo gracias al efecto fotoeléctrico, sin embargo existe una corriente en sentido contrario conocida como corriente de fuga, tal corriente de fuga al ir en dirección contraria disminuye la potencia del panel solar fotovoltaico. De esta manera cuando se produce altas temperatura sobre los paneles esta corriente aumenta considerablemente disminuyendo aún más la potencia del panel.

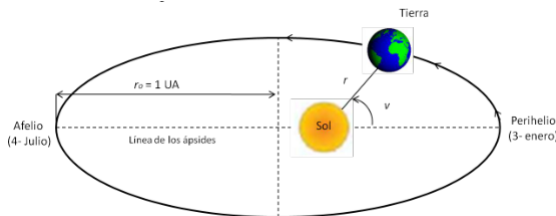
4.4 POSICIÓN

Para conseguir una mayor producción de energía, los paneles solares fotovoltaicos deben contar con una posición ideal de acuerdo a los parametros de orientación e inclinación.

4.4.1 Movimiento Sol-Tierra

El movimiento del planeta es una trayectoria elíptica alrededor del sol. Gracias a esta forma, la distancia entre el sol y la tierra varia según la época del año. La distancia media Tierra-Sol, equivalente a 149.597.910 km, elegida como unidad de medida en el ámbito del sistema solar.

Figura 5. Posición de la Tierra sobre su órbita.



Fuente: <http://www.astromia.com/glosario/unidadastronomica.htm>

La tierra posee dos movimientos estos determinan los años y los dias, ellos son:

4.4.2 Movimiento de traslación

La traslación de la Tierra es el movimiento que realiza este planeta alrededor del Sol. La razón de este movimiento, es la fuerza que ejerce la gravedad solar sobre nuestro planeta, debido a que la superficie solar es mucho más grande que la terrestre, hay una mayor fuerza de atracción por parte del Sol. Si se toma como referencia la posición de una estrella, la Tierra completa una vuelta en un año sidéreo cuya duración es de 365 días, 6 horas, 9 minutos y 9,54 segundos, este año sidéreo es de poca importancia práctica. Tomando como referencia el Sol, resulta lo que se denomina año tropical, lapso necesario para que se repitan las estaciones del año, el cual, dura 365 días, 5 horas y 47 minutos. Para las actividades terrestres tiene mayor importancia la medición del tiempo según las estaciones, por ello, se utiliza este año para realizar los calendarios, agregando cada cuatro años un año bisiesto, que tiene un día extra y se presenta en

febrero.

4.4.3 Movimiento de rotación

Paralelamente al movimiento de traslación definido, la Tierra gira sobre un eje que pasa por los polos, en un movimiento de rotación que puede presumirse perfectamente uniforme. El período de rotación de la Tierra, es decir, el tiempo que tarda en dar una vuelta completa sobre sí misma, es levemente inferior a un día, exactamente 23 h 56 min 4,099 s. El plano normal al eje de rotación que pasaría por el centro de gravedad de la Tierra se denomina plano ecuatorial o plano del ecuador. Esta rotación es la causa de la visibilidad o no (día, noche) del Sol desde un determinado lugar de la Tierra y, por tanto, suministra la definición del tiempo solar en proporción con la posición angular relativa observador-Sol.

4.4.4 Inclinación

Los sistemas de generación de electricidad a través de paneles solares necesitan obtener el máximo aprovechamiento de radiancia solar que incide sobre el mismo, por tal motivo se trata que los rayos solares incidan lo más perpendicular posible sobre la superficie del panel. Para ello se debe tener en cuenta el ángulo de elevación que tiene el sol a lo largo del año, y en base a ello, determinar la inclinación que este arreglo debe tener. El ángulo de inclinación del globo terráqueo en su eje polar es de 23.45° y llamamos declinación (δ) al ángulo de desviación del sol respecto al plano ecuatorial de la tierra y n el día del año, está definido como:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (n - 80)}{365}\right) \quad (3)$$

La inclinación óptima con la que debe optar el sistema se ve reflejada en la siguiente ecuación:

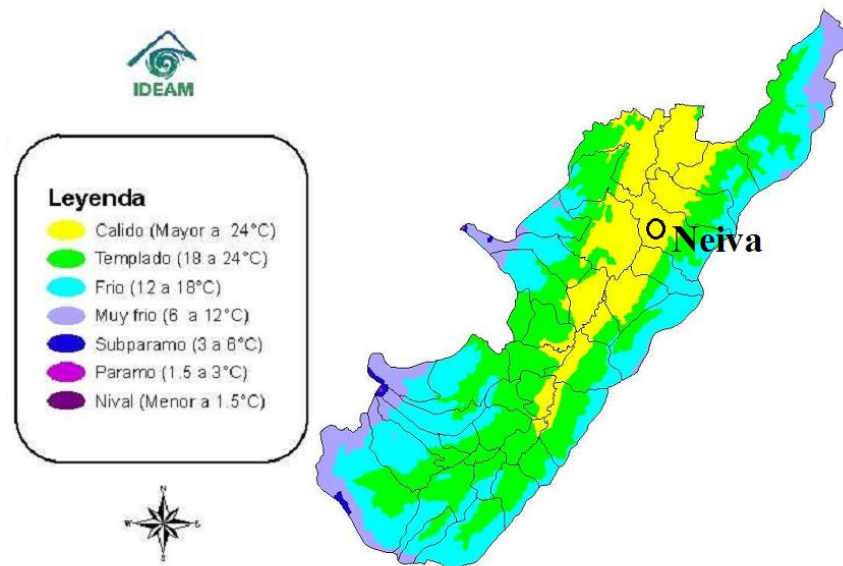
$$\theta_z = \phi - \delta \quad (4)$$

Donde ϕ es la latitud de la zona (10° para Colombia), en el mayor de los casos la inclinación ϕ_z está definida solo por la latitud, por lo que para los diseños locales se opta por una inclinación entre 5° y 15° ⁴.

⁴de <https://docs.google.com/viewer?url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F4212357.pdf>

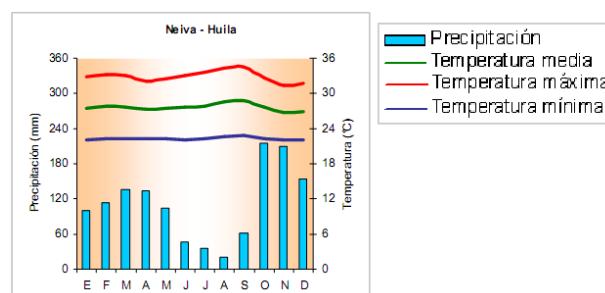
temperaturas anuales que oscilan entre los 21° y los 35° Celsius. Esto depende mucho de la precipitación presente en el transcurso del año y de más factores climatológicos.

Figura 7. Temperatura Media Anual del Huila



Fuente: Atlas Climatico de Colombia IDEAM pp. 54

Figura 8. Temperatura y Precipitación en el Huila



Donde en el eje horizontal encontramos los meses del año. Fuente: Atlas Climatico de Colombia IDEAM pp. 54

4.7 LOGÍCA DIFUSA

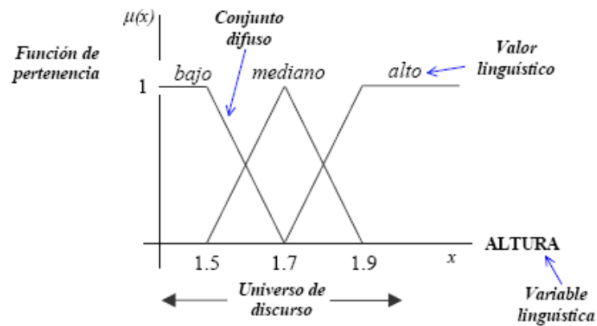
Lógica difusa es una técnica de la inteligencia computacional que ayuda o permite trabajar con información que es imprecisa y no está bien definida. Pertenece a la lógica multivaluada pero la lógica borrosa se diferencia de ésta en que nos permite introducir

valores intermedios entre la afirmación completa o la negación absoluta⁵.

4.7.1 Sistema Difuso

Son esquemas que son planteados sobre la base de conocimiento de un experto obtenido de un proceso, se pueden expresar de forma sintetizada mediante una base de reglas tipo condicionales SI-ENTONCES; Los conjuntos difusos son la generalización de un conjunto clásico representado mediante funciones de membresía.

Figura 9. Ejemplo Conjuntos Difusos



Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf

4.7.2 Controlador Difuso

Los controladores difusos se basan en la lógica difusa utilizando expresiones para formular reglas que controlaran tales sistemas. En los controladores difusos necesitan una base de conocimientos proporcionada por la experiencia de un experto o varios, con esto se realiza la toma de decisiones.

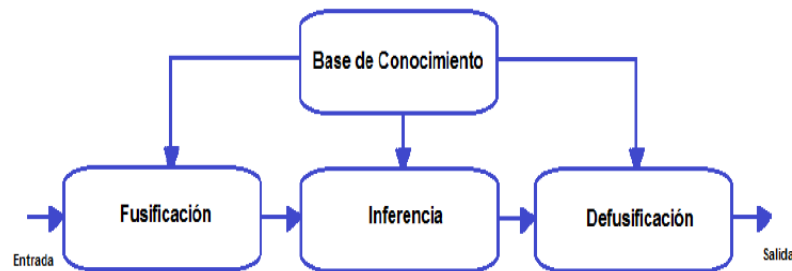
- **Fusificación:** El proceso de fusificación convierte valores reales a valores difusos. En ésta se asignan grados de pertenencia a cada una de las entradas con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos (Cahuantzi Diaz, 2013).
- **Base de conocimiento:** En esta se encuentra la información asociada con el dominio de la aplicación y los objetivos del control. En este proceso se deben definir las reglas lingüísticas de control encargadas de la toma de decisiones para un correcto funcionamiento del sistema (Cahuantzi Diaz, 2013).
- **Inferencia:** Relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definirán el sistema. En la inferencia se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de reglas heurísticas de la forma SI

⁵Tamara B. & Duran M. LÓGICA BORROSA .Universidad Carlos III

(antecedente) ENTONCES (consecuente), donde el antecedente y el consecuente son los conjuntos de entrada y salida respectivamente (Cahuantzi Diaz, 2013).

- **Defusificación:** La defusificación es el proceso inverso a la fusificación, es decir, en esta etapa se adecuan los valores difusos a valores reales que posteriormente se utilizarán en el proceso de control. En la defusificación suelen usarse métodos matemáticos simples como el Método del Centroide y el método del Promedio Ponderado.

Figura 10. Estructura De Un Modelo Difuso



Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf

4.8 CONVERTOR DE VOLTAJE DC-DC

El Convertor corriente directa a corriente directa (DC-DC), es un dispositivo electrónico que transforma corriente continua a partir de un voltaje de entrada, produciendo en su salida otro voltaje con diferente dimensión. Los convertidores deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Conservar el voltaje de salida invariable independientemente de las oscilaciones de la entrada y la temperatura.
- Conservar el voltaje de salida invariable, independiente de la carga (dentro de sus límites de capacidad).
- El voltaje de salida no debe contener componentes de alternos altos.
- Debe ser capaz de limitar la corriente de salida en caso de sobrecarga.

Existen dos tipos de reguladores DC-DC:

4.8.1 Reguladores Lineales

Los reguladores lineales son basados en un semiconductor operando en la región activa. Esta clase de reguladores son ineficientes en términos energéticos debido a la alta disipación que producen, sin embargo poseen un bajo ruido de salida y una respuesta muy rápida.

4.8.2 Reguladores Conmutados

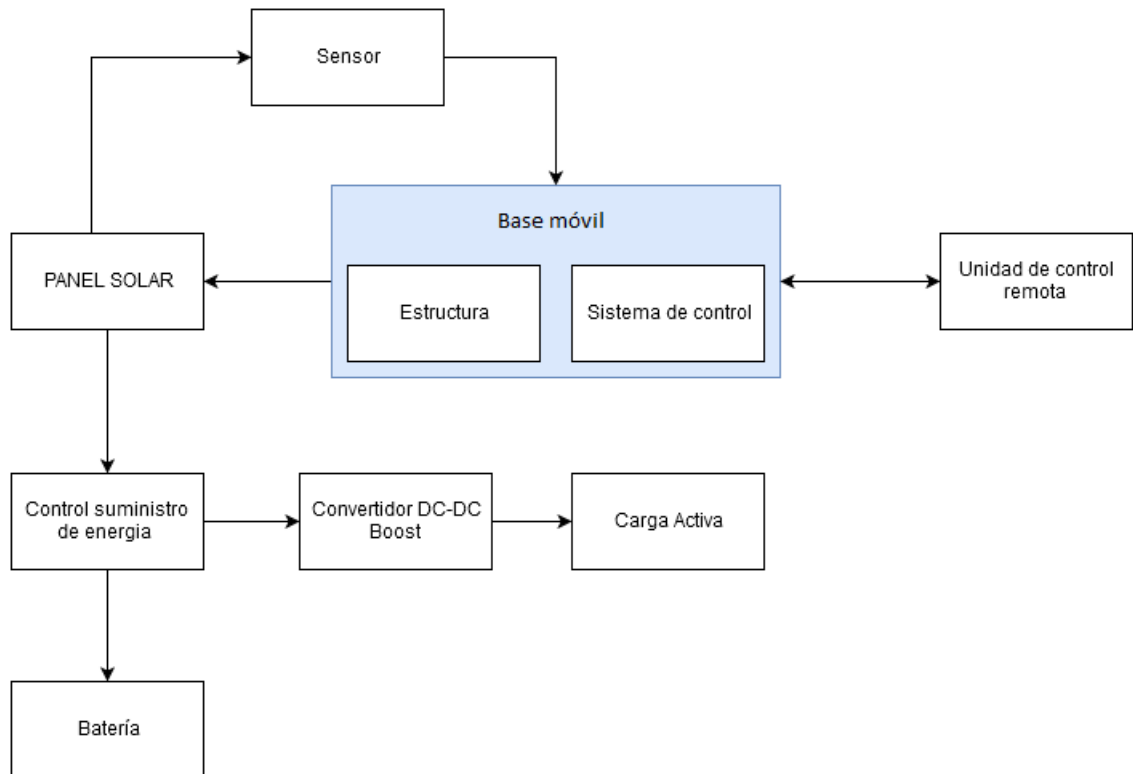
Los reguladores conmutados usan como elemento regulador un transistor que como su nombre lo indica permanece en estado de conmutación es decir permanece en un determinado tiempo encendido y otro determinado tiempo apagado. Este transistor se encuentra en regiones no lineales y la región inactiva; Esta frecuencia de apagado y encendido en particular es alta del orden de los kilohertz. Estos tipos de conmutadores son muy eficientes, sin embargo inyectan diferentes armónicos además de que son los principales generadores de ruido por interferencia electromagnética (EMI). Existen diferentes topologías, mostraremos las tres más comunes:

- Buck: Es uno de los convertidores más usados, carece de aislamiento galvánico, tiene a su salida un voltaje menor que a su entrada, maneja hasta 1000 w de potencia. Puede funcionar como fuente de voltaje variable o fuente de voltaje fija.
- Convertidor Boost: Es un convertidor elevador de tensión es decir que a su salida tiene un voltaje mayor que a su ingreso, no maneja grandes potencias. Es muy común agregar filtro RC para mejorar el rendimiento y suprimir oscilatorios en la salida.
- Convertidor BuckBost: Este tipo de convertidor es la unión de dos convertidores el buck y el boost como su nombre lo indica por lo tanto puede lograr que el voltaje de salida puede ser mayor o menor que la magnitud del voltaje de entrada, incluso hasta manejar voltajes negativos a la salida, sin embargo carece de aislamiento galvánico.

5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROYECTO

La base de este proyecto es la tesis realizada por los estudiantes Sergio Andres Pantoja y Diego Alejandro Barrera en el año 2010 para optar por el título de ingeniero electrónico de la universidad Surcolombiana, por estas razones lo primero que se planteo fue una lectura intensa de los resultados y acatar las recomendaciones para mejorar la propuesta presentada desde el Semillero de Energías Renovables SEA.

Figura 11. Diagrama de bloques del sistema



5.1 SELECCION DEL MOTOR

El sistema fotovoltaico seguiría la trayectoria del sol desde el alba hasta el ocaso, si bien el movimiento del sol a lo largo del año requiere de dos grados de libertad, para ello son necesarios dos motores; Uno para el movimiento de elevación de 0° a 180° y otro de 0° a 360° para el azimut. Los motores eléctricos son los más idóneos para este fin, debido a su control, su energización, precisión y alto torque.

Se observa las cotizaciones realizadas por S. Pantoja y D. Barrera, realizadas con el fin de analizar y escoger, la opción más viable para la realización del seguidor.

Tabla 1. Costos del Rotor

Características	Motor DC	Motor paso a paso	Motor AC	Rotores YAESU		Costo aprox.
				G-550	G-5500	
Caja reductora	No	Si	No	Si	Si	\$250000
Encoder	No	Si	No	Si	Si	\$200000
Frenos	No	No	No	Si	Si	\$150000
Impermeabilidad	No	No	No	Si	Si	\$150000
Montaje y acople	No	No	No	Si	Si	
Control	Fácil	Fácil	Difícil	Fácil	Fácil	
Costo del motor	\$160000	\$650000	\$220000	\$760000	\$1620000	

TIPO	COSTO
Motor DC (+250000+200000+150000+150000)	\$910000 + montaje y acople.
Servomotor (+150000+150000)	\$950000 + montaje y acople.
Motor AC (+250000+200000+150000+150000)	\$970000 + montaje y acople.
Rotor YAESU G-550	\$760000
Rotor YAESU G-5500	\$1620000

Al detallar, se observa que la opción del rotor Yaesu G-5500 es la mejor opción, siendo un motor versátil, robusto y no requiere de mantenimiento. Mientras que los motores DC, AC y servomotores requieren de costos adicionales siendo el mayor inconveniente el mantenimiento constante que exigen esta clase de montajes por estar expuestos a la intemperie.

5.2 ESTRUCTURA MOVIL

En primera estancia se diseñó una estructura de tamaño menor con el objetivo de observar el comportamiento del sistema antes de plasmarlo en un modelo a escala mayor. Esta estructura se realizó con tubos PVC y de con el fin de disminuir su peso, posee dos ejes de rotación que están conectados a dos servomotores de referencia SG90, estos servomotores poseen un torque de 1.8kg/cm por lo que era necesario que la estructura liberar su peso sobre balineras y bujes.

Figura 12. Estructura móvil modelo a pequeña escala



Por otra parte la estructura de mayor tamaño donde se realizó esta implementación está compuesta por, el rotor Yaesu G5500 encomendado de realizar el movimiento del panel solar, de tal manera que siempre este buscando la mayor incidencia solar con las condiciones planteadas en el control. Este motor va acoplado con una estructura que sujeta el panel solar fotovoltaico, junto con una base que reposa sobre el suelo.

5.2.1 Estructura

Si bien, la estructura debe soportar el peso y el movimiento del panel solar fotovoltaico, por tal motivo está hecha en aluminio y tubería circular galvanizada, recubierto con pintura negra anticorrosiva para proteger de las diferentes variables originadas por el medio ambiente, como el óxido y la corrosión; A el rotor de elevación se fija usando un eje circular tubular hueco de 1,5m(largo del eje) y 1" 1/4 de diámetro por medio de dos agarraderas para cada extremo del eje, estas fueron bien ajustados y asegurados con tuercas de seguridad. A el panel fotovoltaico fue diseñado una estructura tipo H que se sujeta mediante cuatro tornillos tipo lámina, ubicados cada uno en los extremos del panel. El mástil, de 1.55m de altura, está formado por un polín de madera maciza

Figura 13. Estructura Movil



insertado en un tubo de hierro hueco de 2" de diámetro fijado a una base cuadrada de 30cm x 30cm con refuerzos en cada esquina de esta apuntados hacia el mástil, fijada a una segunda base cuadrada en madera de 60cm x 60cm con tornillos de acero en cada esquina.

Esta estructura es una mejora a la estructura planteada en su momento para el proyecto Sistema De Control Girasol Para El Aprovechamiento De La Energia Solar Y Suministro De Energia Eléctrica, donde se sustituye el armazón más grande de acero estructural por aluminio aligerando el peso de la estructura. La unión entre la estructura y motor fue reducido de tal manera que se pudiera aprovechar el máximo torque del motor y con ello aumentar el tamaño del modulo fotovoltaico. El peso de la estructura más el panel fotovoltaico es de 45Kg aproximadamente.

5.2.2 Rotor YAESU G-5500

El rotor Yaesu G-5500 es un dispositivo electromecánico compuesto de dos motores independientes que proveen 450° azimut y 180° en elevación, cajas de engranajes, frenos mecánicos y dos sensores de posición. Las dos unidades de motores vienen lubricados de fabrica, alojados y revestidos de aluminio fundido recubierto de resina de melanina resistente a la intemperie, proporcionando un rotor libre de mantenimiento y funcionamiento sin contratiempos en todas las condiciones climáticas adversas que se puedan presentar.

Tabla 2. Especificaciones del Rotor Yaesu G-5500

Requerimientos de voltaje	110-120Va.c. / 220-240 V.a.c.
Voltaje de motor	24 V.a.c
Tiempo de rotación	Elevación (180°): 67 segundos. Azimut (360°): 58 segundos
Tiempo máximo operación	5 minutos
Torque de rotación Elevación:	14Kg-m Azimuth: 6Kg-m
Torque de frenado Elevación	40Kg-m Azimuth: 40Kg-m
Carga vertical	200Kg
Precisión de posición	±4%
Superficie que soporta al viento	1m ²
Cables de control Conductores	2X6 - #20 AWG o mayor
Diámetro del mástil	38 – 63 mm (1" ½ - 2"½)
Diámetro del boom	32 – 43 mm (1"¼ - 1" 5/8)
Peso	Rotores:9Kg Controlador: 3Kg

5.2.3 Unidad de control manual G-5500

El rotor G5500 posee una unidad de control manual para su manejo y posicionamiento, este se encarga básicamente de alimentar con 24 VAC , además realiza una lectura de los sensores de posicionamiento ubicados en los motores con el fin de mostrar los valores a través de una interfaz analógica, compuesta por dos medidores analógicos uno para los ángulos de elevación con una escala de 0° a 180° y azimut con una escala de 0° a 450°. Para el control posee 4 pulsadores de color negro, donde dos controlan el ángulo azimut por medio del botón izquierda o derecha y para elevación usando los botones de arriba y abajo junto a un switch de encendido y apagado.

En el respaldo del controlador se encuentran el puerto para realizar las conexiones a cada rotor, también se encuentra el puerto de control externo, este es un puerto DIN de 8 pines permite que el usuario acceda a los valores que indican los sensores de posición, las tierras pertinentes , fuente de alimentación y pines de entradas de control para el movimiento de los dos rotores.

5.2.4 Conexion rotor Yaesu - Unidad Manual

Los dos motores, elevación y azimut, son conectados a la unidad de control manual por medio de un cable UTP no blindado cat. 5e de 16 hilos, que soporta una temperatura de

Figura 14. Unidad de Control manual

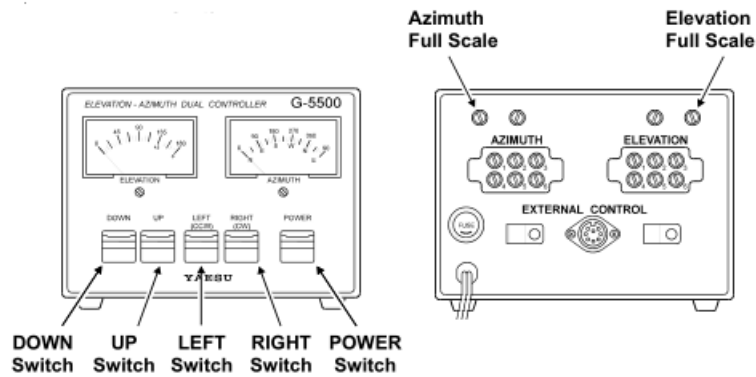


Tabla 3. Distribucion de Pines Unidad Manual

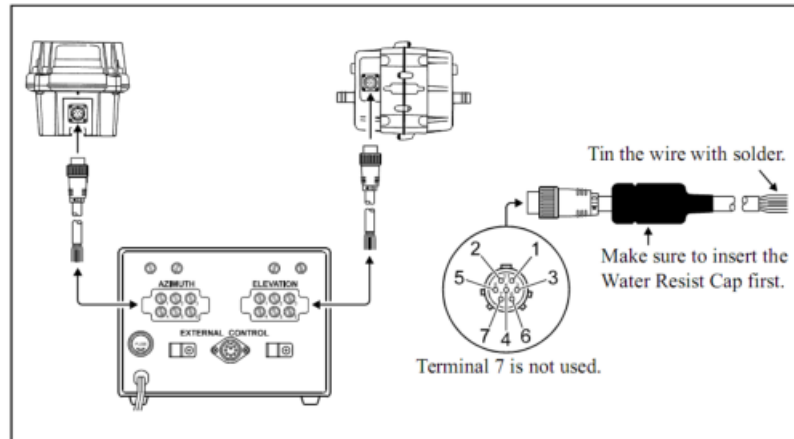
Características	Numero pin
Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia arriba	1
Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la derecha	2
Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la izquierda	3
Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia abajo	4
Provee una fuente de voltaje de 6 a 13 voltios con una corriente de 200 mA	5
Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 450°	6
Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 180°	7
Común GND	8
N.C	9

funcionamiento de -20°C a 60°C y protección contra incendios bajo norma IEC60332-1 (CM), UL 1581 VW-1. Los terminales que se conectan a los motores son tipo Din de 7 pines.

5.3 UNIDAD DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

Como herramienta para el monitoreo y control de las variables eléctricas y climáticas del sistema, se diseñó una unidad de control compuesta de las siguientes partes:

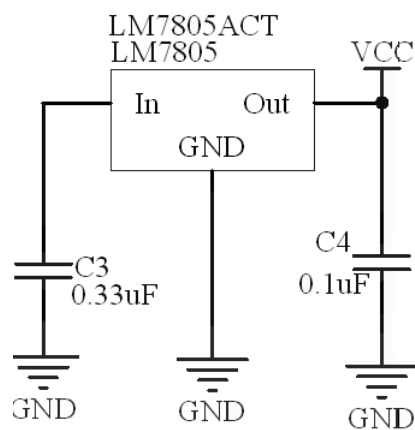
Figura 15. Índice de conexión



5.3.1 Fuente de Alimentación

La energía usada para alimentar esta unidad proviene de la unidad de control del rotor Yaesu, esta unidad provee una fuente de 13VDC 200mA en los pines 7 y GND, dado que es necesario regular ese voltaje a 5VDC, por lo que toda la instrumentación y la unidad de procesamiento funciona a este nivel de voltaje, se empleó un regulador de 5VDC LM7805 con la siguiente configuración

Figura 16. Fuente de Alimentación



En la entrada se conecta el pin 7 del controlador del rotor y en la salida encontramos los 5VDC regulados.

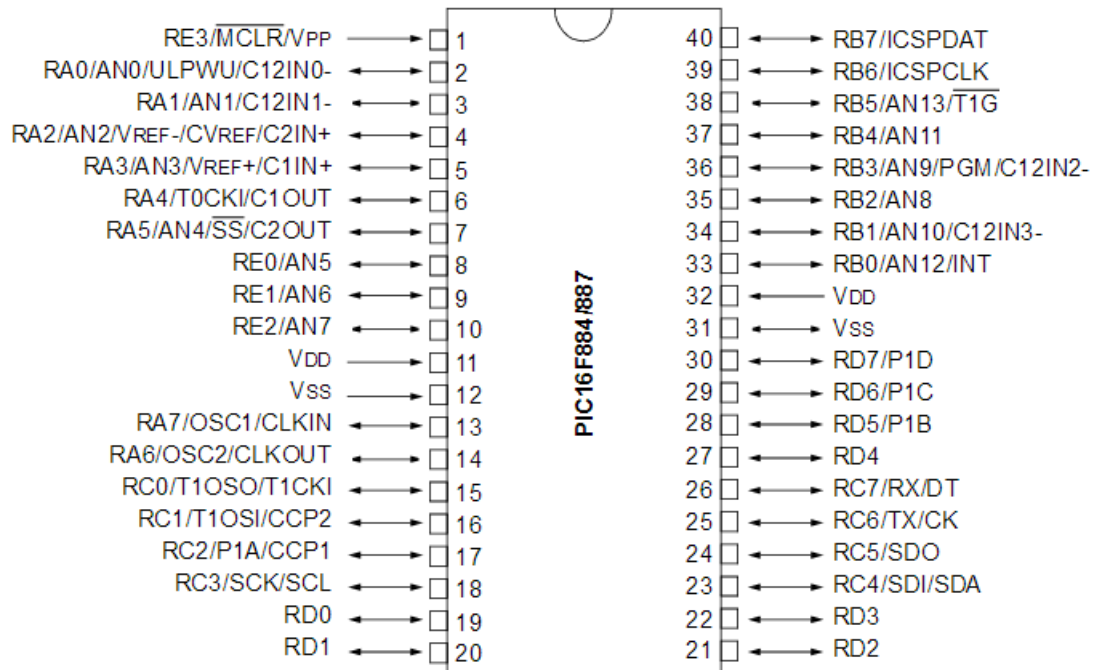
5.3.2 Unidad Central de Procesamiento

El PIC 16F877 es un microcontrolador de 8 bits, fabricado por Microchip Technology, posee un consumo de potencia bajo. En su encapsulado tipo DIP posee 40 pines, está programado para ser usado con un reloj interno de alta precisión de 4MHz, su distribución de entradas y salidas están dadas en 5 puertos donde el puerto A cuenta con 6 líneas, el puerto B 8 líneas, C con 8 Líneas, el puerto D con 8 líneas y por ultimo el puerto E con 3 líneas.

Posee un modulo ADC (Analog Digital Converter) de 10 bits en 8 canales, usados para las entradas de instrumentación encargadas del monitoreo del sistema.

Figura 17. Distribuciones de Pines PIC16F887

40-pin PDIP

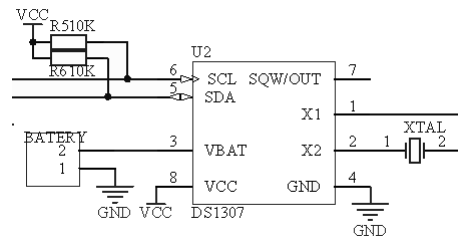


Fuente: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291D.pdf>

5.3.3 Módulo Reloj

Para este modulo se empleó un reloj serial en tiempo real DS1307 con un protocolo de comunicación I2C, es capaz de entregar segundos, minutos, horas, días, mes y año. Posee una alimentación externa con una pila CR2032 de 3,3VDC para evitar perdidas de información. Y está configurado como se muestra en la figura 19.

Figura 18. Configuración Módulo Reloj



5.3.4 Comunicación Inalámbrica

Para este apartado se vio la necesidad de usar los módulos Xbee, son pequeños chip azules capaces de establecer una comunicación inalámbrica unos con otros. Estos módulos utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para crear redes punto a multipunto o redes punto a punto. Cuenta con un antena Whip que es un pequeño cable que sobresale recubierto de un material aislante.

Figura 19. Modulo XBEE

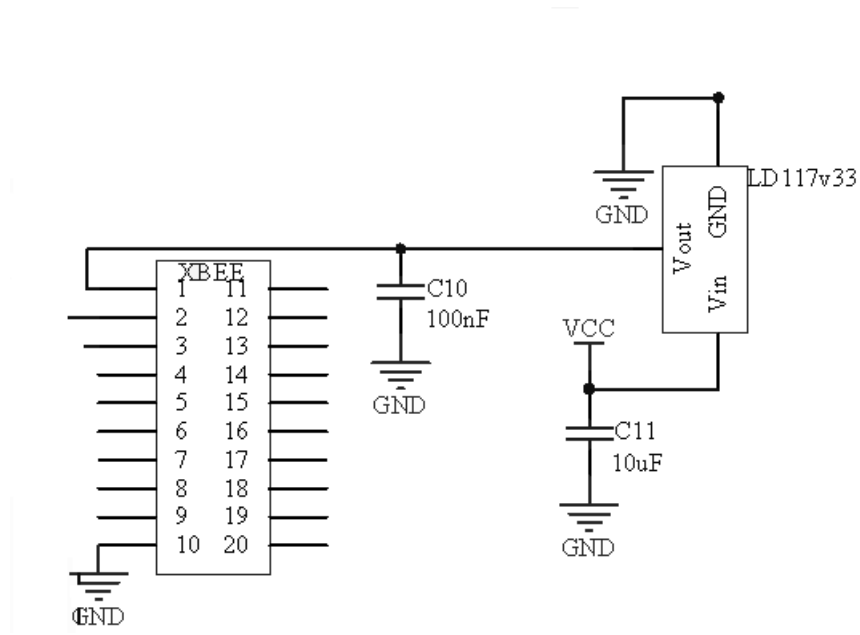


Fuente: <http://xbee.cl/que-es-xbee/>

Posee una distribución de 20 pines de los cuales para esta aplicación solo se usan 4, en el pin numero 1 y 10 encontramos la entrada de alimentación VCC y tierra respectivamente que puede estar entre 2.8VDC y 3.4VDC a 40mA, en los pines 2 y 3 encontramos el pin de transmisión y el pin de recepción de datos respectivamente, son usados para un comunicación punto a punto con otro chip de iguales características, el primero situado en la placa central de procesamiento encargada de enviar todos los datos eléctricos y ambientales del sistema y el segundo chip situado en el módulo Raspberry pi que se encarga de procesar todos los datos de entrada con fin de visualización.

Para proveer una fuente de alimentación que establezca 3.3VDC a los chip Xbee, se emplea un LD117v33 es un regulador de voltaje a 3v3 capaz de proporcionar una corriente de salida de 800mA suficientes para la alimentación de este módulo inalámbrico, configurado de la siguiente manera.

Figura 20. Alimentacion Modulo Xbee

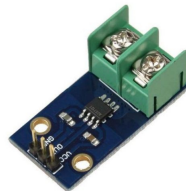


5.3.5 Instrumentación

El sistema tiene la capacidad de medir voltaje, corriente en el panel, voltaje y corriente en la carga activa, temperatura ambiente y temperatura sobre la superficie del panel solar fotovoltaico, ángulos de orientación y elevación del panel solar fotovoltaico, dado por el controlador del rotor.

Sensor de corriente del panel solar fotovoltaico: El modulo generador según sus especificaciones entrega 8.28Amp como corriente máxima entre sus bornes, por lo que se escoge un sensor de corriente integrado de referencia ACS712ELCTR-30A-T de 30Amp fácilmente encontrado en el mercado, con una sensibilidad de 66mV/A típica ideal para esta aplicación.

Figura 21. Sensor de corriente

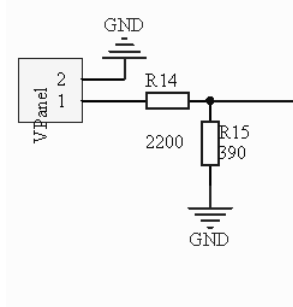


Fuente: Allegro Microsystems ACS712ELCTR-30A-T

Divisor de tensión como sensor de voltaje del panel fotovoltaico: Dado que el

voltaje de circuito abierto(VOC) del panel solar fotovoltaico es de 45.4VDC se diseña un divisor de tensión hasta 50VDC.

Figura 22. División de Tensión Panel Solar



Sensor de corriente de la carga: Como carga activa se usó un motor DC de 90v, que posee una corriente en estabilización de 800mA y una corriente pico que ronda los 4Amp, aunque se diseñó un arrancador suave para evitar el pico de corriente el sensor encargado de esta medición es un módulo sensor de corriente de 5Amp de referencia ACS712ELCTR-05B-T que a su salida entrega una sensibilidad de 185mV/A típico.

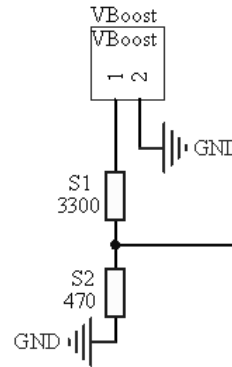
Figura 23. Sensor de corriente



Fuente: Allegro Microsystems ACS712ELCTR-05B-T

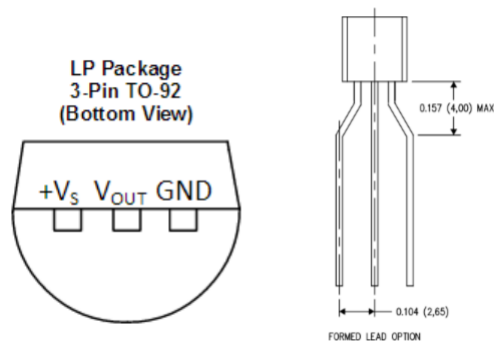
Divisor de tensión como sensor de tensión de la carga: El motor se encuentra alimentado con un voltaje de 24VDC constantes provenientes del convertidor boost diseñado para este fin, se planteó diseñar un divisor de tensión hasta los 30VDC con la siguiente configuración:

Figura 24. División de Tensión de Carga



Temperatura Ambiente y Temperatura sobre el panel: Como sensores de temperatura se empleó el LM35, es un sensor muy bueno calibrado a 1°C que posee un rango de medición desde -55°C hasta los 150°C es un sensor de salida lineal con una sensibilidad de 10mV/°C además de poseer una impedancia de salida muy baja es ideal para la conexión directa al microcontrolador.

Figura 25. Sensor de Temperatura



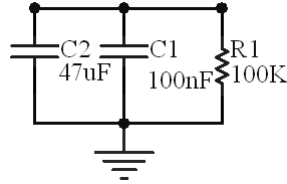
Fuente: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

El sensor de temperatura ambiente fue ubicado en la sombra para evitar cualquier tipo de exposición directa al sol mientras que el sensor de temperatura del panel fue fijado a un costado del panel solar para que se hiciera contacto directo entre la superficie del módulo y el sensor, además de evitar cualquier sombra sobre una celda solar.

Sensores de posición: Los pines 6 y 7 del puerto Rs232 proveen un tensión proporcional a la posición actual del rotor. el pin 6 entrega entre 2VDC y 4.5VDC de 0° a 450° de azimuth, y el pin 7 entrega entre 2VDC y 4.5VDC de 0° a 180° de elevación. Para evitar ruidos en estas lecturas se emplea una configuración con filtros

de la siguiente manera.

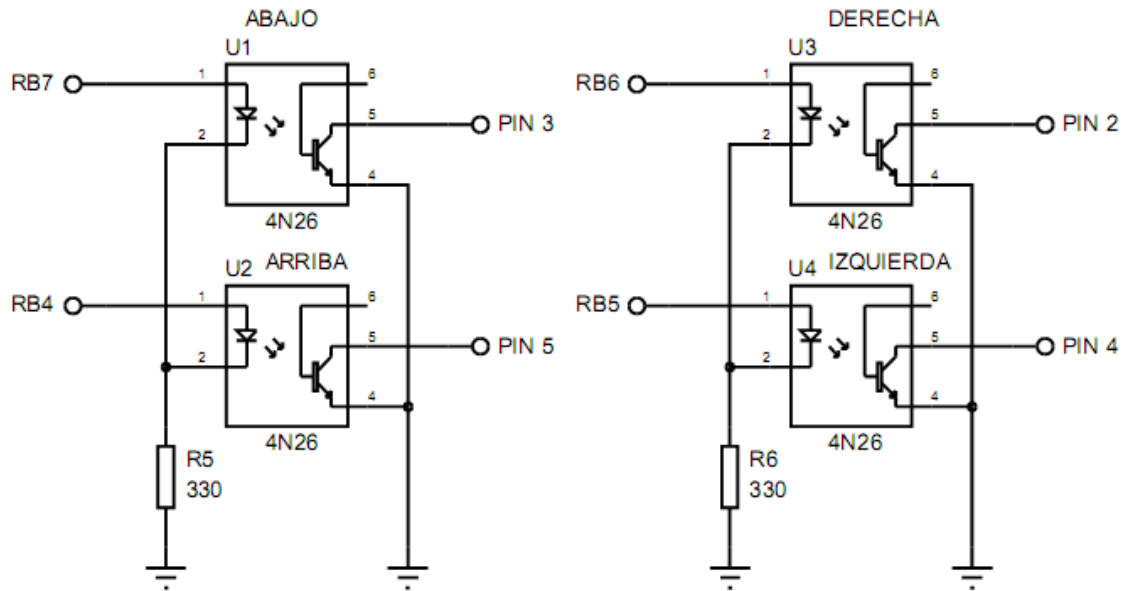
Figura 26. Filtros de Entrada Sensor de Posición



Fuente: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

Acople de salida: El controlador del rotor posee dos pines de entrada para el control externo del mismo, activados en bajo. En esta etapa se hace necesario un acople por medio óptico para unir la etapa de control con la de potencia. Para esto se usa 4 optoacopladores 4N26 cuya función será la de conmutar el fototransistor interno cuando a su entrada se presente un uno lógico, este alimentará el fotodiodo interno que conmutará el fototransistor y enviara a la entrada del controlador una señal de 0VDC que servirá para desplazar el rotor en la dirección deseada.

Figura 27. Acople de Salida

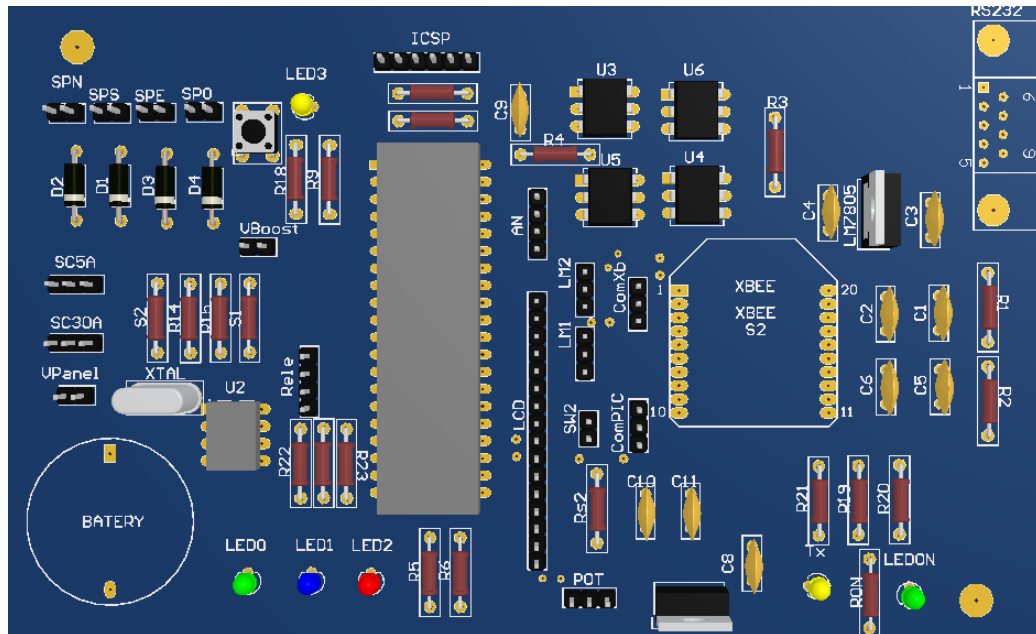


5.3.6 Placa de Control

Toda la unidad de control e instrumentación fue diseñada como circuito impreso, la distribución de elementos la hace muy accesible además de tener puertos para una posible ampliación y un puerto para visualización en LCD si así se requiere. El

esquemático completo esta presentado en el Anexo A. Y en la Figura28 se ilustra el modelo 3D de la placa base.

Figura 28. Visualización 3D Placa de control



Lista de componentes:

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| *2 Resistencia de 470 Ohm 1/4 w | *1 Reloj Serial DS1307 |
| *2 Resistencias de 100k Ohm 1/4 w | *1 Cristal de 16MHz |
| *3 Resistencia de 330 Ohm 1/4 w | *6 Conectores Molex de 2 Pines |
| *6 Resistencias de 1k Ohm 1/4 w | *7 Conectores Molex de 3 Pines |
| *1 Resistencias de 2k Ohm 1/4 w | *2 Conectores Molex de 4 pines |
| *2 Resistencias de 10k Ohm 1/4 w | *1 Conector Molex de 6 pines |
| *1 Capacitor cerámico de 100pF | *2 Conectores molex de 8 pines |
| *2 Capacitores cerámicos de 47uF | *1 LED amarillo de 2mm |
| *3 Capacitores cerámicos de 100nF | *1 LED amarillo de 3mm |
| *1 capacitor cerámico de 0.1uF | *1 LED azul de 2mm |
| *1 capacitor cerámico de 10uF | *2 LED verde de 2mm |
| *1 capacitor cerámico de 0.33uF | *1 LED rojo de 2mm |
| *1 capacitor cerámico de 0.1uF | *1 LD1117v33 |
| *1 PIC16F887 | *1 Pulsador |
| *2 Conectores de 2mm para Xbee | *1 Portapilaspara CR2032 |
| *4 Diodos 1N4001 | *1 pila de 3v3 CR2032 |
| *1 Puerto RS232 | *1 base para DIP de 40 Pines |
| *1 Regulador LM7805 | |
| *4 Optoaclopadores 4N26 | |

Código de programación: El microcontrolador PIC16F887 es el elegido para el control de todas las variables de medición y el encargado de ejecutar el seguimiento establecido, tiene como entradas analógicas 2 sensores de tensión, 2 sensores de corriente, 2 sensores de temperatura y 2 sensores de posición, Además de ser el encargado de recolectar esa información y transmitirla inalámbricamente a través de los módulos xbee hacia la instalación del usuario.

El código inicia con un pequeño mensaje de bienvenida, posteriormente si la hora que presenta el reloj serial esta entre las horas establecidas para hacer movimiento (10am, 11am, 12pm, 1pm, 2pm o 3pm) el microcontrolador calculará la posición exacta del sol, obteniendo el angulo de elevación y el angulo de azimuth seguido a esto si la radiación esta un nivel alto y la temperatura no supera los 70°C sobre la superficie del panel activará los pines de control para que poco a poco el rotor mueva la estructura, haciéndolo en pasos de 1 segundos hasta que la diferencia de la posición calculada y la posición de la estructura sea menor a 5° logrando así que el panel solar este directamente orientado a la ubicación del sol.

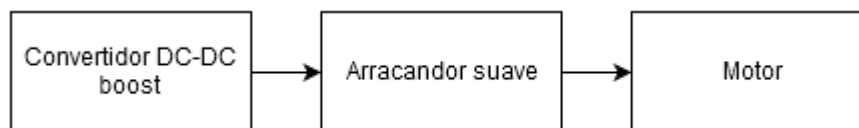
Luego de ubicar el panel solar en la mejor posición el microcontrolador, evaluará el estado de todos los sensores de entrada y enviará por medio serial toda la información al modulo Xbee para que este sea transmitido inalámbricamente hasta la ubicación del usuario.

El código de programación es presentado en el AnexoD.

5.4 ACOPLA DE CARGA: CONVERTIDOR DC-DC BOOST

Unos de los grandes retos de los sistemas fotovoltaicos es el manejo de cargas inductivas tales como los motores. Los motores eléctricos para marchar necesitan de un excedente de corriente, mayor que su corriente en estado estacionario, esta corriente de arranque fácilmente puede ser de dos veces la corriente en estado estacionario (nominal) hasta ocho veces la corriente nominal. Este valor es instantáneo o muy pequeño con respecto al tiempo, sin embargo estas cantidades tan grandes de corrientes pueden provocar daños en la circuitería interna. Por tal motivo es necesario un suavizador de arranque o arrancador suave. El circuito de acople de carga esta dado por el diagrama de bloques de la Figura 30.

Figura 29. Diagrama de Bloques Acople de carga



5.4.1 Convertidor DC-DC boost

La salida del regulador Steca provee un voltaje de 12 voltios a 15 amperios en corriente continua, su regulación de salida no es grande, el voltaje no es el que se desea para alimentar el motor; Un convertidor DC-DC elevador tipo boost, es la solución donde este regula el voltaje de salida usando altas frecuencias de conmutación y agregando otros elementos pasivos como bobinas , además que estos reguladores a diferencia de los lineales presentan una mayor eficiencia, lo cual habría menos perdidas en la cargas y menos disipación en el regulador.

EL XL6009 Es un regulador conmutado es una de la mejores opciones para elevadores de mediana potencia. Este es de la marca Kylinchip Electronic Co.ltda (shangai), capaz de manejar voltajes positivos o negativos de salida. Puede ser configurado como regulador boost, flyback,SEPIC o inversión de voltaje. El x6009 tiene un transistor Mosfet de potencia canal N interno de salida, además que permite frecuencia de conmutación de hasta 400khz.

Figura 30. Encapsulado TO263-5l del XL6009



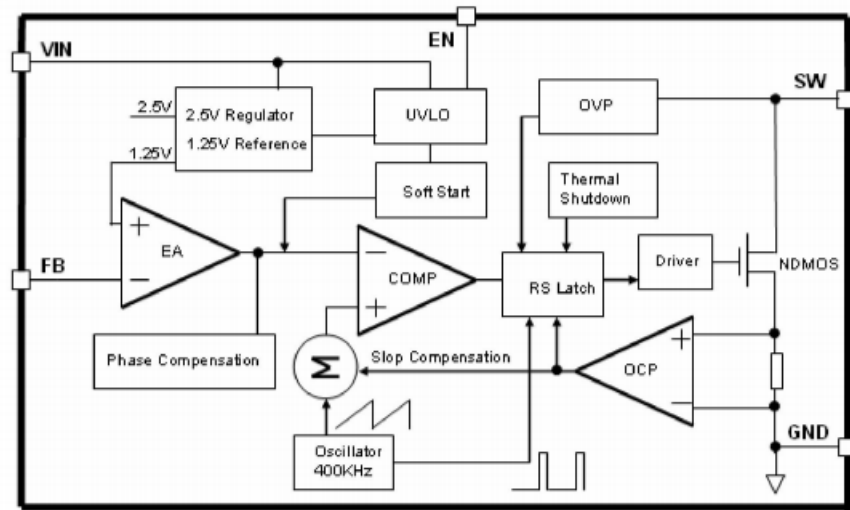
Fuente: Hoja de datos XL6009 Kylinchip electronic Co.ltda (Shangai)

Características:

- Rango de voltaje entre 5 y 32v
- Positiva o negativa salida de tensión y con regulación por retroalimentación.
- Frecuencia de conmutación 400 khz.
- Máxima corriente en el transistor 4 A.
- Excelente regulación de línea y carga.
- Terminal externo de habilitación.
- Alta eficiencia 94% típico.
- Protección en caso de cortocircuito, protección por sobre corriente y protección térmica.

El diodo conmutador es un aspecto esencial en el regulador debido a que debe soportar las corrientes picos que provengan de la entrada, este regulador debe ser de conmutación rápida y de baja caída voltaje en directo. Para ello se escogió el diodo schottky 1n5408

Figura 31. Diagrama de bloques del XL6009



Fuente: Hoja de datos XL6009 Kylinchip electronic Co.ltda (Shangai)

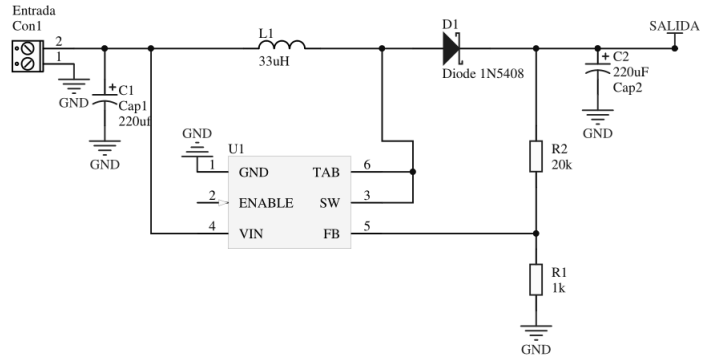
que cuenta con las siguientes especificaciones técnicas.

Tabla 4. Características Diodo Schttky 1N5408

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Corriente promedio	3A
Voltaje inverso máximo	1.2v
Temperatura máxima	150°C
Corriente pico máxima(8.3ms)	200A

Para este convertidor se toma como referencia el regulador conmutado XL6009, este regulador configurada en modo boost a una frecuencia de 400KHz, donde son necesarios algunos pocos elementos pasivos. El circuito esquemático es el siguiente:

Figura 32. Esquemático Convertidor Boost



Para el XL6009 su voltaje de salida es programado mediante un arreglo de dos resistencias en serie, configuradas como divisor de voltaje para la entrada de realimentación (FB-Feedback); Esta entrada de realimentación varía el ciclo útil de la señal de conmutación según el voltaje de entrada dando como resultado una alta regulación. El voltaje de salida es totalmente configurable y está dado por la siguiente fórmula, donde R1 es la resistencia entre el nodo FB y tierra, R2 es la resistencia entre el nodo de salida y el nodo FB y V_o es el voltaje de salida del XL6009.

$$V_o = 1.25 + (1 + R2/R1) \quad (5)$$

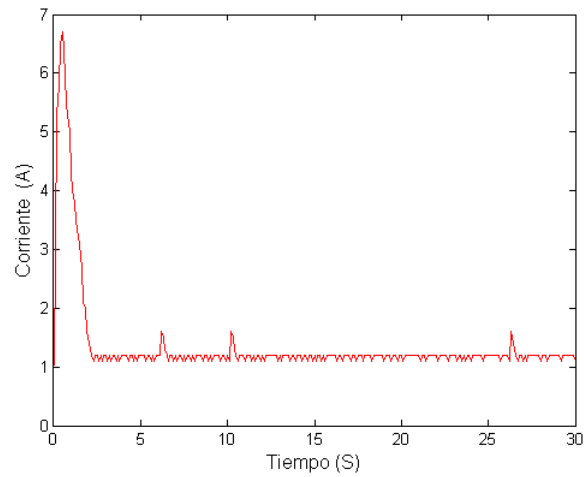
La eficiencia factor determinante en las instalaciones solares, por tal motivo el diseño del convertidor DC-DC tiene que ser un sistema eficiente y competitivo con respecto a otros reguladores comerciales. De esta manera el convertidor DC-DC tipo boost diseñado y un convertidor DC-DC tipo Boost Step-up 150W tipo comercial serán comparados en iguales condiciones. Obteniendo así una eficiencia de 91.7% para el convertidor DC-DC tipo Boost Step-up 150W tipo y para el convertidor tipo boost 88.9%.

5.4.2 Arrancador suave

El arrancador suave es el encargado de proteger los motores y los dispositivos electrónicos. Como se mencionó anteriormente es muy importante este tipo de sistemas para amortiguar la corriente de arranque. El arrancador suave emplea un control mediante modulación de ancho de pulso (PWM)⁶, usando una interfaz transistorizada con un transistor mosfet de canal N de referencia IRFZ44N. De esta manera el objetivo es poder reducir esa cantidad de corriente que necesita el motor para romper la inercia. A continuación la gráfica de corriente versus tiempo del motor a controlar.

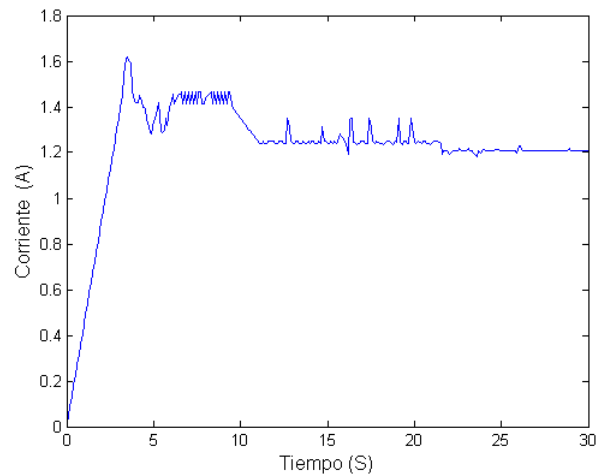
⁶la modulación por ancho de pulso (PWM) es la base para el control de la electrónica de potencia. modificando el ciclo útil de una señal periódica representa una manera de conducir los dispositivos semiconductores de potencia modernos. tomado de Sun, J. (2012). Pulse-width modulation. In Dynamics and Control of Switched Electronic Systems (pp. 25-61). Springer London.

Figura 33. Respuesta en el tiempo motor de carga



Como se observa produce una corriente de arranque considerable y claramente perjudicial para cualquier regulador. Del mismo modo el arrancador suave debe proveer también un sobre impulso pequeño debido a que con este sobre impulso el motor rompe la inercia y además debe regular su ciclo para no exceder la corriente pico que generó antes, es decir que este se regule y solo maneje un sobre impulso pequeño, con esas condiciones se obtuvieron los siguientes resultados.

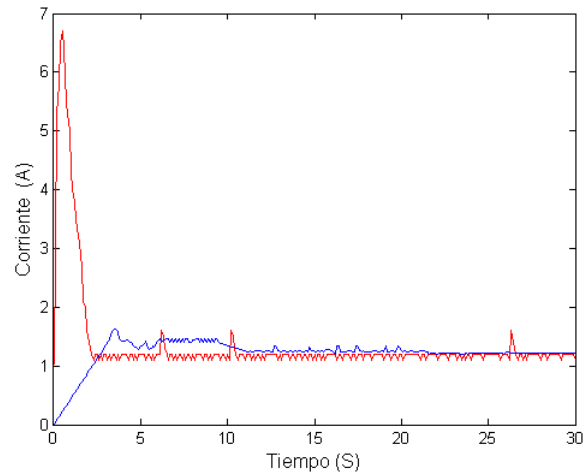
Figura 34. Respuesta en el tiempo motor de carga con el arrancador suave



Se obtuvo un sobre impulso de 1.6 Amperios, se notan algunas oscilaciones pero estas son aceptadas debido a que son mínimas y no perjudiciales. El estado estacionario del

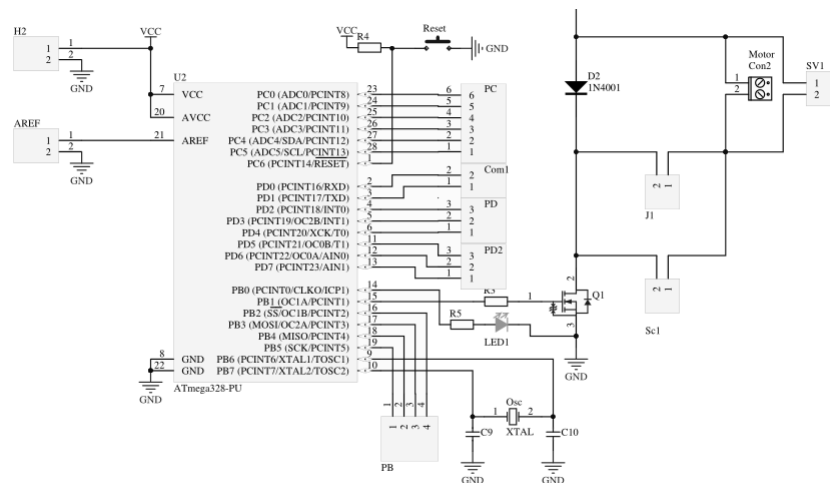
motor se obtiene mucho tiempo después, pero cabe destacar de que el motor cuando llega a su estado estacionario no presenta ningún pico de corriente.

Figura 35. Comparación Graficos de repuesta de la carga



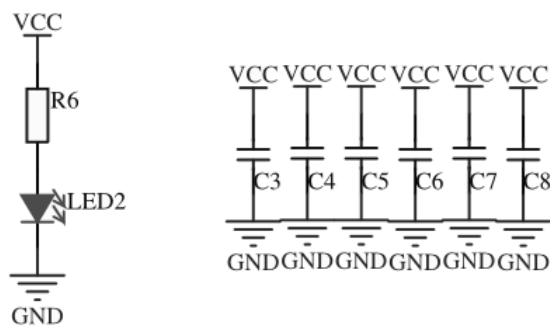
El circuito encargado de enviar la señal de modulación por ancho de pulso, es un circuito integrado con capacidad de microprocesamiento de referencia Atmega328 de la marca Atmel Corporation, una empresa del grupo Microchip Technology Inc, funcionando a una frecuencia de operación de 16Mhz y energizado a 5v de alimentación. Este junto a la interfaz de potencia compuesta por el transistor IFRZ44N y un diodo de protección de referencia 1n4007 que evita cualquier tipo corriente inversa debido al frenado del motor.

Figura 36. Esquemático arrancador suave



Un aspecto importante que cabe resaltar es la ubicación de varios capacitores ubicados entre la fuente de alimentación y tierra, con el fin de eliminar los ruidos eléctricos producidos por las corrientes de devanados. Además se agrega un LED indicador de encendido para el bloque acople de carga.

Figura 37. Diagrama de reducción de ruido



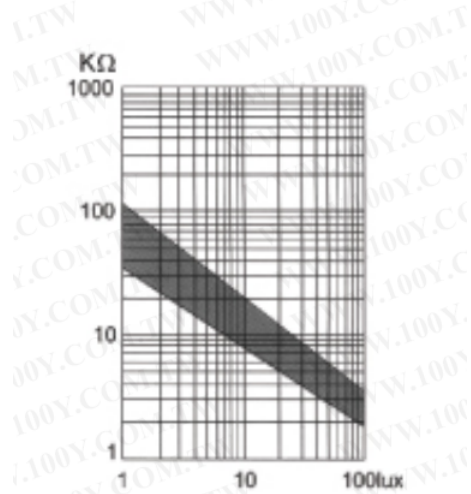
5.5 CONTROL FUZZY DE POSICIÓN DEL MODULO SOLAR FOTOVOLTAICO

La principal idea de elaborar un diseño del controlador difuso para realizar la tarea de posición automática con fin de garantizar una perpendicularidad entre el panel solar fotovoltaico y el Sol viene de encontrar de una manera lógica cual es el mejor procedimiento para realizar esta tarea. De acuerdo a la incidencia de luz directa sobre la superficie de una serie de sensores podemos determinar la posición exacta del Sol.

Con fin de identificar la posición se propone un dispositivo conformado por 4 fotorresistencias llamadas LDR por sus siglas en ingles light dependent resistor que están distribuidas de tal manera que 2 LDR entregue la posición en Azimut y los otros 2 LDR entreguen el valor de Elevación, teniendo así un cálculo exacto de la posición actual del Sol. Para medir la incidencia de radiación sobre los paneles se usa un arreglo de fotorresistencias (LDR), las cuales posee una característica donde disminuyen su resistividad cuando la incidencia de luz reside sobre ellas.

Figura 38. Iluminación Vs Resistencia

Illuminance Vs. Photo Resistance



Fuente: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Imaging/SEN-09088-datasheet.pdf>

Este arreglo de sensores se adecuan ubicando una resistencia en ellas de un valor promedio a los 10kOhm, para ubicarnos en una región de los 10 lux (promedio de un día con nubes), este con motivo de tener una relación buena en caso de que se presente una gran cantidad de nubes en el día. La Figura 39 ilustra el diagrama usado para la conexión de las 4 fotoresistencias conectadas a 4 entradas analógicas del microcontrolador a través del PIN Salida.

Figura 39. Diagrama conexión LDR

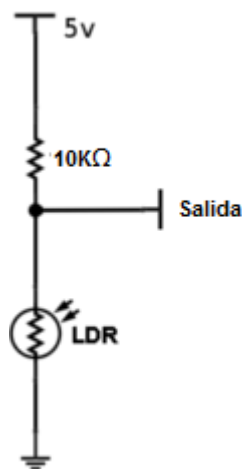
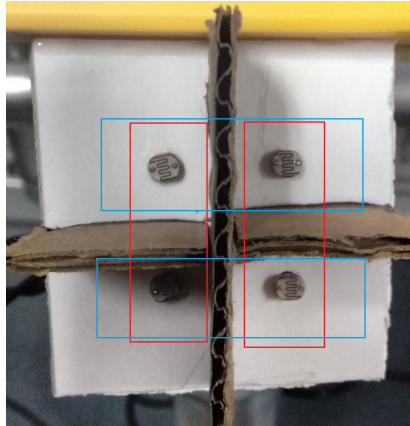


Figura 40. Configuración LDR



Los dos sensores laterales serán llamados A1 y A2, entre ellos se presentan una diferencia que puede ser positiva o negativa dependiendo de sobre cual incida una mayor cantidad de Luz. Del mismo modo los sensores superior e inferior serán llamados E1 y E2 y de igual manera su diferencia puede ser negativa o positiva. Estas diferencias toman el nombre de **Diferencia-Azimuth** y **Diferencia-Elevation**, dependiendo de la incidencia de luz sobre los sensores estas variables tomarán un valor positivo si la incidencia de luz es mayor en A1 para **Diferencia-Azimuth**, valor **OK** si la diferencia se encuentra muy cercana a 0 (Se hace para evitar un movimiento constante tratando de hacer nula la diferencia) y toma un valor negativo si A2 es mayor. De igual manera **Diferencia-Elevation** tomará un valor **positivo** si E1 es mayor, un valor **OK** si la diferencia es muy cercana a 0 y un valor **negativo** si E2 es mayor.

Estas variables **Diferencia-Azimuth** y **Diferencia-Elevation** son las variables de entrada del control difuso y este entrega a su salida dos estados de posición uno para el control del ángulo Azimut y el otro para el valor de Elevación, es decir que si el valor de **Diferencia-Elevation** es **negativo** el motor de Elevación gira en un sentido que toma el nombre de **Ele1**, si es **Ok** mantiene su posición actual tomando un valor de **NoEle** y si es positivo gira en sentido contrario **Ele2**, un funcionamiento igual tiene el motor de Azimut, si **Diferencia-Azimuth** es **negativo** el motor gira en sentido de las manecillas del reloj llamado **Rotar2**, si es **Ok** mantiene su posición **NoRotar** y si es **positivo** gira en sentido contrario **Rotar1**. De esta forma se logra que de acuerdo a los estados de estas variables de entrada podamos controlar la posición de los rotores y así llegar al punto de equilibrio que se presenta cuando el valor **Diferencia-Azimuth** está en **Ok** y a su vez **Diferencia-Elevation** está en **Ok**, en este punto se puede decir que el panel está ubicado exactamente perpendicular a la posición del sol.

Estas reglas están plasmadas sobre una función de membresía de tipo trapezoidal definida de la forma:

Figura 41. Función de membresía Trapezoidal

Forma Trapezoidal

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ (x-a)/(b-a) & \text{si } x \in (a, b] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ (d-x)/(d-c) & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$$

Tomada de Capítulo I. LÓGICA DIFUSA Y SISTEMAS DE CONTROL

Para la construcción de la reglas bases se usó el tipo de reglas Mamdani, que permiten presentar las entradas y el resultado de una manera lógica a diferencia de algunos otros tipos de reglas que a su salida se propone una función matemática o algunos otros valores que no son necesarios para la aplicación. Las reglas de tipo Mamdani están definidas como:

SI x_1 es **A** AND x_2 es **B** AND x_3 es **C** ENTONCES u_1 es **D**, u_2 es **E**

Donde x_1 , x_2 y x_3 son variables de entrada. **A**, **B** y **C** son funciones de membresía de la entradas que pueden adoptar valores lingüísticos Alto, Bajo, Caliente, Frio entre otros. u_1 , u_2 son las acciones a controlar y por ultimo **D** y **E** son las funciones membresía de salida. Partiendo de esto se diseñó una serie de reglas que regirán el control propuesto.

- Si **Diferencia-Azimuth** es **Negativo** Entonces **Azimuth** es **Rotar2**
- Si **Diferencia-Azimuth** es **OK** Entonces **Azimuth** es **NoRotar**
- Si **Diferencia-Azimuth** es **Positivo** Entonces **Azimuth** es **Rotar1**

Y para el control del rotor de elevación se planteó:

- Si **Diferencia-Elevation** es **Negativo** Entonces **Elevation** es **Ele1**
- Si **Diferencia-Elevation** es **OK** Entonces **Elevation** es **NoEle**
- Si **Diferencia-Elevation** es **Positivo** Entonces **Elevation** es **Ele2**

El proceso de fuzzificación se realiza a todo instante de tiempo, es un proceso matemático en el que de acuerdo al valor de entrada este le proporciona una función de membresía a la cual pertenece. Es decir que este proceso evaluará si la diferencia pertenece a las funciones de membresía **Negativo**, **OK** o **Positivo**.

Figura 42. Funciones de membresía de entrada del control difuso

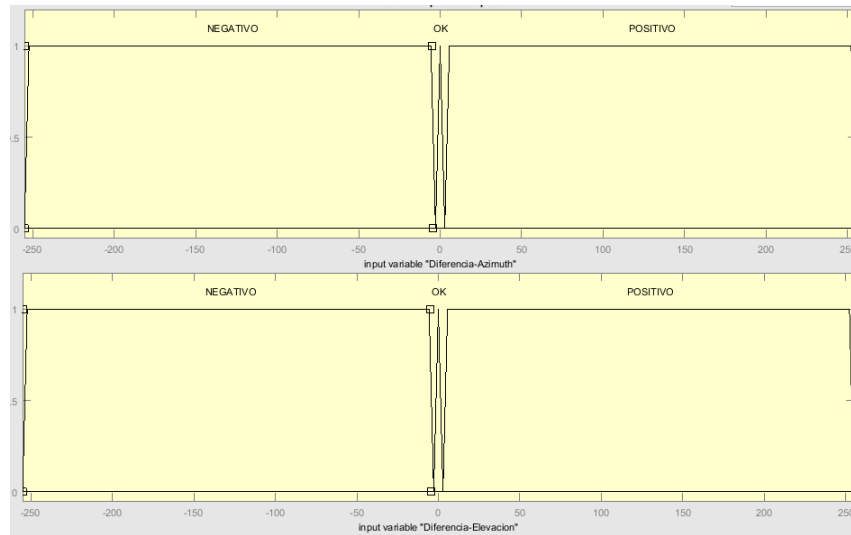
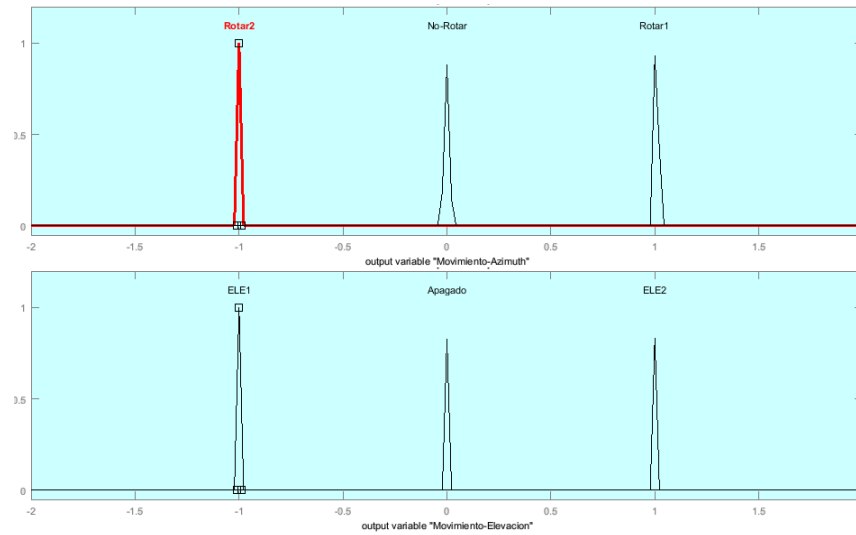


Figura 43. Funciones de membresía de Salida del control difuso



Con fin de representar de una mejor manera las reglas que regulan el control difuso se presenta una tabla con todas la descripción del control y su correspondiente diagrama de flujo del control difuso.

Figura 44. Tabla de Reglas base

	MOVIMIENTO AZIMUTH
Diferencia-Azimuth	
Positivo	Rotar1
Centrado(ok)	NoRotar
Negativo	Rotar2

Rotar1: Gira en sentido de la manecillas del reloj.
 NoRotar: El motor permanece apagado
 Rotar2:Gira en sentido de la manecillas del reloj.

	MOVIMIENTO ELEVATION
Diferencia-Elevation	
Positivo	Ele1
Centrado(ok)	apagado
Negativo	Ele2

Ele1: Movimiento de Elevacion 1
 Apagado: El motor permanece apagado
 Ele2: Movimiento de Elevacion 2

Para comprobar un correcto funcionamiento antes de poner a prueba sobre una estructura real, se realizó una simulación con la herramienta Simulink de Matlab, que nos permite una correcta visualización de el control diseñado. Efectivamente la simulación arrojó los valores esperados ilustrados en la Figura 46, una vez realizado esta simulación se implemento el control sobre un microcontrolador para realizar la tarea de posicionamiento.

Figura 45. Simulación en Simulink del control difuso

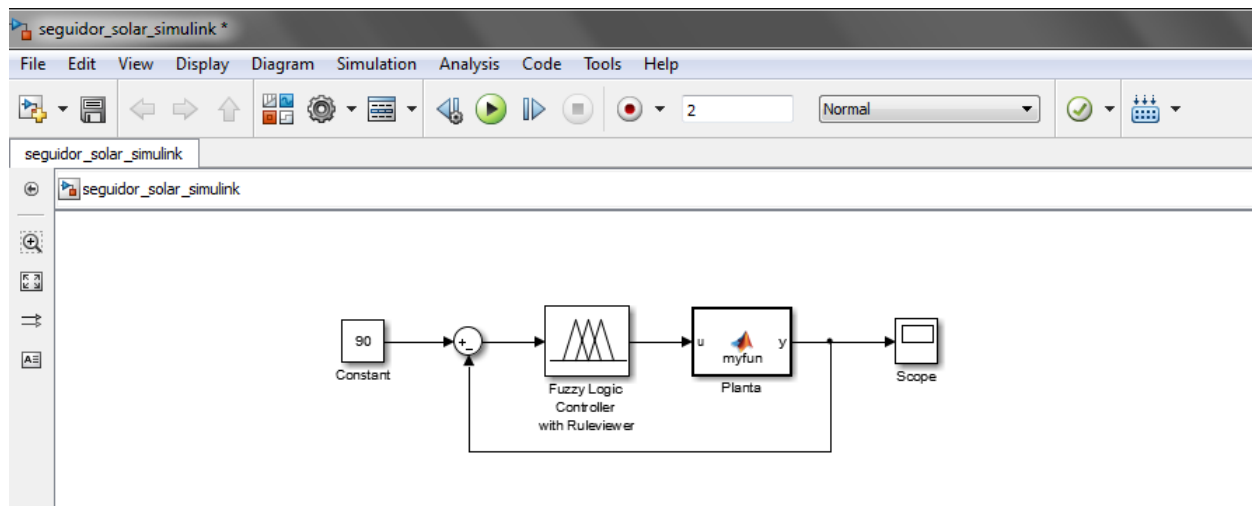


Figura 46. Resultados de Simulación Control Difuso

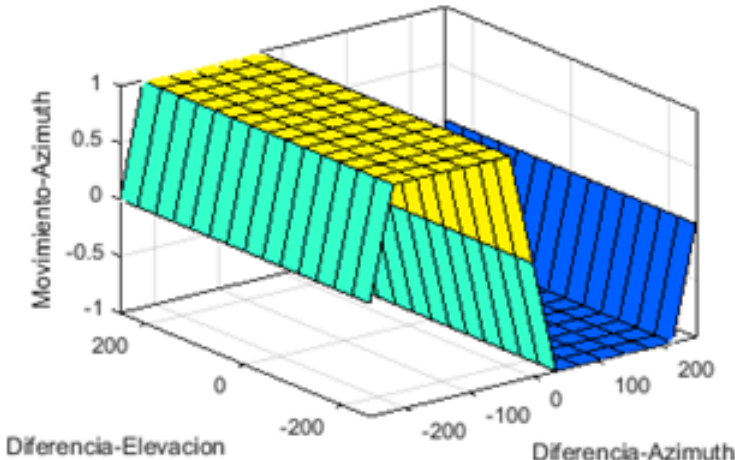
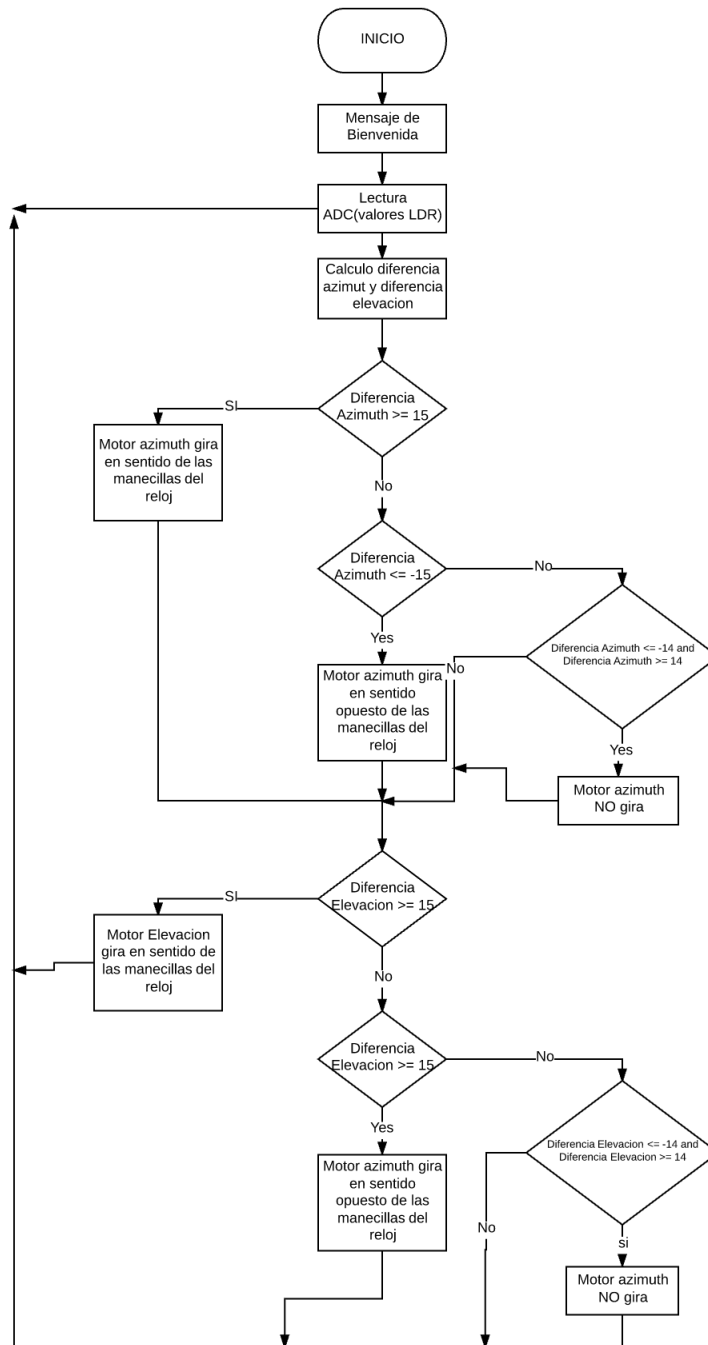


Figura 47. Diagrama de flujo Control Difuso



5.6 INTERFAZ GRAFICA

Para una facilidad en la visualización de los parámetros climáticos y de potencia del sistema, se diseña una interfaz gráfica en el software libre Python 2.7, usando Tkinter que es una herramienta de la biblioteca grafica Tk usada para el diseño de interfaz gráfica de usuario (GUI).

En la GUI se pueden visualizar un botón de nombre "Refrescar", al ser presionado se mostrarán en la interfaz todos los valores que el microcontrolador está leyendo en ese momento, obteniendo así en tiempo real la tensión, corriente y potencia del módulo fotovoltaico, la tensión y corriente del motor usado como carga, la temperatura ambiente y sobre el panel y la hora en la fue registrada esa lectura.

Seguido a esto se puede visualizar dos "checkboxbutton" correspondientes al encendido y apagado del motor, con esto el usuario puede controlar la carga.

Además de diferentes Cuadro de textos donde se mostrarán todos los valores en tiempo real que están siendo leídos por el microcontrolador. Una vez se cargan todos los valores, la interfaz genera un archivo de Excel con todos los datos proporcionados por la unidad de control.

En el AnexoB se incluye una imagen completa de la interfaz grafica.

5.7 ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

En la instalación realizada se pueden los dispositivos que componen una instalación solar fotovoltaica, tales como:

5.7.1 Panel solar Fotovoltaico

El panel usado para este proyecto fue un panel policristalino de 300W de potencia máxima de marca Infinty New Energy fabricado en china que gracias a Colombia Energy SAS se pudo usar para la investigación y con que cuenta con las siguientes propiedades eléctricas:

Tabla 5. Especificaciones técnicas del panel solar usado

MaximumPower (Pmax)	300w
MaximumPower voltaje (Vmp)	37,5
MaximumPowerCurrent (Imp)	8.0 A
Open CircuitVoltage (Voc)	45.4V
Short CircuitCurrent (Isc)	8.38 A
MaximumsystemVoltage	1000 VDC
Nominal Operatingcell temperatura	45+- 2°C
TemperatureRange	-40°C to 85°C
Weight	25kg
Module Dimension	1956x992x49mm

El fabricante especifica que estos valores se presenta bajo condiciones de 1000w/m2 de irradiación solar y 25°C en la celda fotovoltaica.

Figura 48. Panel Solar Fotovoltaico Infinity New Energy



5.7.2 Banco de Almacenamiento

Para el proyecto se usó una batería de 12VDC 205Ah de marca Mtek de referencia MT122050, conectada al controlador de carga por medio de un cable de calibre 12 que puede soportar una corriente de 25Amp ideal para este sistema y que fue suministrada por Colombia Energy SAS.

Figura 49. Batería 12VDC 205Ah referencia MT122050



5.7.3 Controlador de Carga

El controlador Steca PRS1515 es un dispositivo sencillo pero de alta potencia del fabricante Steca Elektronik, con un diseño moderno y una serie de LEDs de varios colores que informan al usuario el estado del sistema y de las baterías. este dispositivo se pudo conseguir gracias al Centro de Energía Alternativas CEA y que cuenta con las siguientes características.

Tabla 6. Especificaciones técnicas del PRS1515

Funcionamiento	
Tensión del sistema	12 V (24V)
Consumo Propio	< 4mA
Datos de entrada CC	
Tensión de circuito abierto del modulo	< 47V
Corriente del modulo	15 A
Datos de salida CC	
Corriente de consumo	15 A
Tensión de reconexión	12,4 V....12,7V (24,8V....25,4V)
Protección contra descarga profunda	11,2 V....11,6V (22,4V....23,2V)
Datos de la batería	
Tensión de la batería	9V....17V (17,1V....34V)
Tensión final de carga	13,9V(27,8V)
Condiciones de uso	
Temperatura ambiente	-25°C....+ 50°C
Equipamiento y diseño	
Terminal	16mm ² / 25mm ² – AWG 6 / 4
Dimensiones	187 x 96 x 45 mm
Peso	345 g

Figura 50. PRS1515



5.7.4 Cableado

La conexión entre el modulo solar al regulador y de la batería al regulador se realizó con un cable encauchetado de calibre 12 de 200V con una corriente admisible de 25Amp.

5.8 MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO

En el momento en que se requiera hacer el montaje es muy importante tener en cuenta que los sensores encargados de la medición de intensidad de luz no estén cubiertos o que algún material externo genere sombra alguna sobre ellos de igual manera es importante recalcar que el rotor debe estar en una posición en la cual este libre de hacer todo tipo de movimiento sin objetos que se lo impidan porque todos esto puede generar mediciones erróneas o mal funcionamiento del sistema.

Estas mediciones se pueden ver de dos diferentes maneras, por medio de una visualización multiplexada a través de un LCD y leds indicadores o a través de una interfaz HMI ubicada en un radio menor a 15 metros preferiblemente, donde se podrán visualizar todos los datos de la respectiva instrumentación a su vez que estos datos serán gravados en un archivo Excel automáticamente y por ultimo un control de encendido/apagado del motor.

5.8.1 Instalación

Para la instalación del sistema de control difuso debe seguir los siguientes paso antes de accionar el sistema.

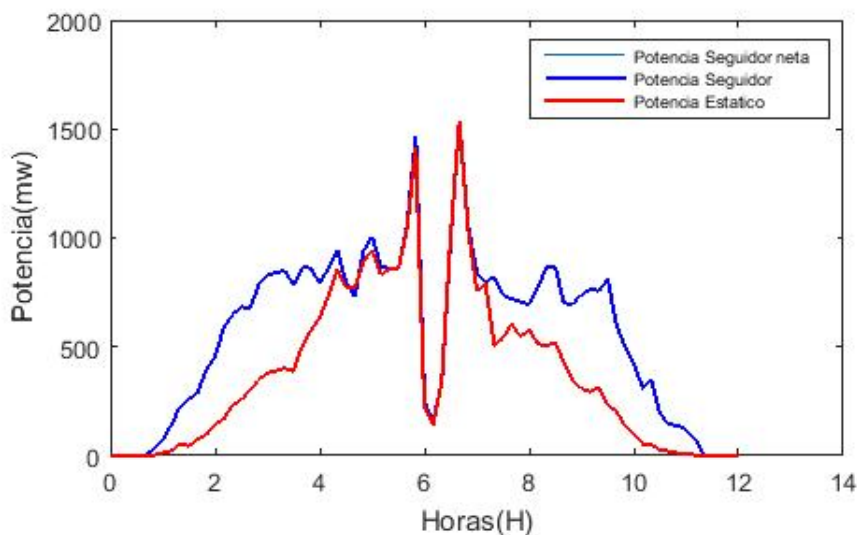
- **Conexión de los componentes del sistema:** Revisando cada uno de los sensores a instalar se busca y se instala los respectivas conexiones.
- **Calibraciones rotor yaesu:** Al momento de energizar los motores se debe verificar de que los rotores estén debidamente ubicados en 0° observando las marcas que presenta en su extremos y ajustar el medidor analógico en dicha ubicación.
- **Conexiones estación fotovoltaica:** Antes de realizar la conexión del regulador se debe observar muy bien cuál es la ubicación del respectivo terminal y su polaridad. Las conexiones siempre deben realizarse en el siguiente orden, Batería, Panel y por ultimo carga. Recordar siempre al momento de realizar las conexiones de la estación fotovoltaica apretar muy bien y ubicar muy bien los cables en los terminales respectivos del regulador. Un terminal que no sea bien ajustado puede producir una conducción por calentamiento produciendo daños en los dispositivos.
- **Verificar transmisión inalámbrica:** Una vez abierta la interfaz HMI intentar buscar la manera que las antenas estén ubicadas de forma direccional directa, realizar el respectivo chequeo desde la interfaz y por ultimo enlazar la aplicación.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

El modelo experimental diseñado sirvió para estudio comparativo ideal, es decir, podíamos tener dos paneles exactamente iguales a prueba los mismos días y de esta forma realizar una comparación eficiente que arrojó una respuesta contundente del control diseñado.

Se usaron dos paneles de 1.8W de pequeño tamaño para este estudio, uno estaba anclado al seguidor experimental y el otro orientado a sur con una elevación de 11 grados. Se realizó el estudio obteniendo como resultado la siguiente gráfica.

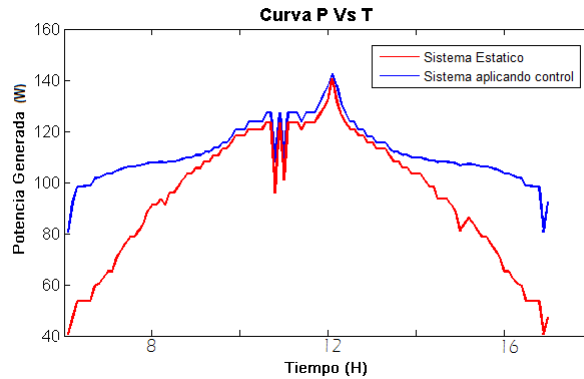
Figura 51. Energía Producida estudio experimental



En la gráfica se puede apreciar que el sistema de seguimiento solar diseñado efectivamente logró generar más energía a lo largo de un día, exactamente un 47.75% más de energía, esta medición se realizó el día 1 de Noviembre del año 2016. El panel solar fotovoltaico estático produjo a lo largo del día 4.619WDía por otro lado el panel situado sobre la estructura experimental y regido por el control difuso produjo 6.825WDía a lo que da un aumento del 47.75%.

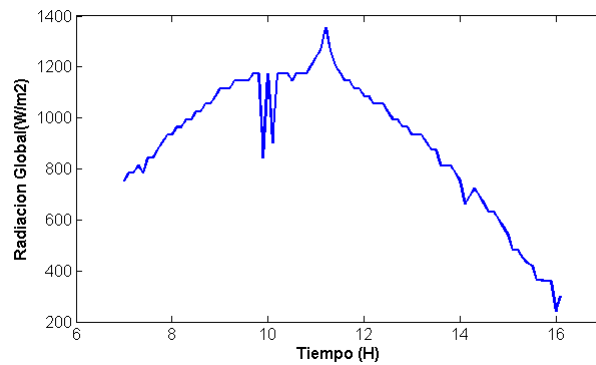
Algo parecido ocurrió con el diseño realizado a mayor escala ya que solo se disponía de un solo panel es posible realizar una comparación entre los dos bajo las mismas condiciones identificando ambos sistemas y luego evaluarlos con los mismos valores de entrada, estas mediciones no van a ser de exactas pero se puede llegar a crear una tendencia de como pueden operar este tipo de sistemas.

Figura 52. Curva de Potencia con respecto al tiempo



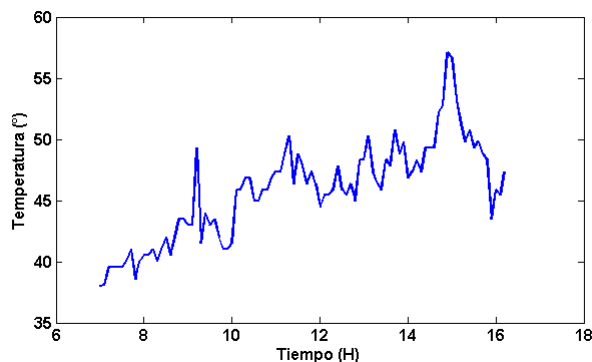
En la figura se puede observar la comparación entre la curva de potencia generada por el panel solar fotovoltaico utilizando el sistema de control y el panel fijo. Para saber la cantidad de energía generada por cada sistema, durante un día solar, se halló el área bajo la curva de potencia, dando como resultado 1.03 KW/día con el controlador diseñado y 866W/día con el panel fijo.

Figura 53. Valores de Irradiación



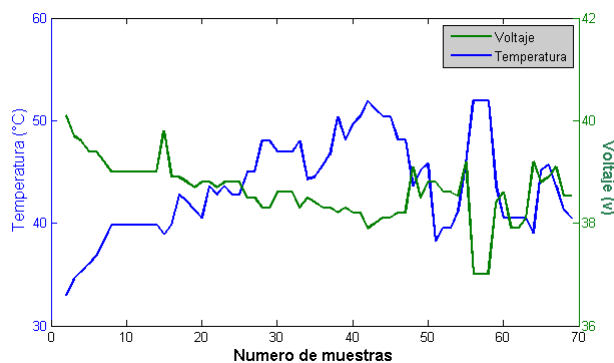
En la Figura se observa la radiación global obtenida para los días de prueba. Esta radiación fue la aplicada a los dos sistemas para obtener la respuesta de los mismos.

Figura 54. Curva de temperatura sobre el panel solar



La Figura representa la temperatura promedio de los días con seguimiento, como se observa en ningún momento superó el umbral de los 70° sin embargo, cuando el panel se encontraba configurado en estático presentó un pico de temperatura. Por tal motivo, se ejecutó un algoritmo de seguimiento que cubre el recorrido del sol durante las 12 horas de presencia del mismo para observar la influencia de la temperatura en la potencia máxima del panel, obteniendo el siguiente resultado.

Figura 55. Influencia de la temperatura en el Voltaje de circuito abierto



Se puede observar que aunque la temperatura presente en la superficie del panel afecta el voltaje en circuito abierto, no es una fuerte caída de tensión. Tan solo se presentó una pérdida de 9VDC en una temperatura pico de 52°C .

6.1 CONSUMO DE ENERGÍA

El consumo de corriente del prototipo experimental se plantea en la siguiente tabla.

Tabla 7. Consumo de Corriente Prototipo experimental

Especificacion	corriente (mA)
Servomotor SG90 de Elevacion en Reposo	0,02
Servomotor SG90 de Elevacion en Movimiento	30
Servomotor SG90 de Rotacion en Reposo	0,02
Servomotor SG90 de Rotacion en Movimiento	30

En la siguiente tabla se muestra el consumo de corriente del rotor G5500 cuando está en reposo y cuando presenta un movimiento constante.

Tabla 8. Consumo de Corriente

Especificación	Corriente
Rotor Yaesu en reposo	60 mA
Rotor Yaesu en movimiento (Un Eje)	0,55 A
Rotor Yaesu en movimiento (Dos Ejes)	1,05 A

Dado que el movimiento del eje de elevación se hace 6 veces al día, mientras que el movimiento del eje azimut se puede llegar a presentar una vez cada mes, es necesario plantear una tabla donde se muestre el tiempo que dura cada movimiento y el tiempo total por día.

Tabla 9. Tiempo de duración rotor G5500

Especificación	Tiempo
Rotor Yaesu en reposo diario	8 Horas
Rotor Yaesu en movimiento de solo el eje Azimut diario	0,008333333 Horas

El prototipo experimental se diseño para que siempre estuviera en movimiento y observar el comportamiento presenta una tabla un poco diferente.

Tabla 10. Tiempo de duración servomotor SG90

Especificacion	Potencia(mW)
Servomotor SG90 en reposo	150
Servomotor SG90 en Movimiento	0,1

6.1.1 Calculo de consumo energético

El calculo de consumo energético se obtiene de la fórmula matemática

$$Energia = Potencia * Tiempo \quad (6)$$

En la siguiente tabla se plantea la potencia para cada caso

Tabla 11. Potencia de consumo Rotor G5500

Especificación	Potencia
Rotor Yaesu en reposo	7,2 W
Rotor Yaesu en movimiento del eje elevación	126 W

Tabla 12. Potencia de consumo Servomotor SG90

Especificación	Potencia
Rotor Yaesu en reposo	7,2 W
Rotor Yaesu en movimiento del eje elevación	126 W

De acuerdo a la ecuación 11 de energía, obtenemos el calculo de energía para el servomotor SG90:

$$EnergiaEnReposo = Potencia * tiempo = 0.1mW * 11,98 = 1.198mW/H \quad (7)$$

$$EnergiaEnMovimiento = Potencia * tiempo = 150mW * 0.012 = 1.91mW/H \quad (8)$$

$$ConsumoDiario = 1.198mW/H + 1.91mW/H = 3.115 \quad (9)$$

y para el Rotor G5500

$$EnergiaEnReposo = Potencia * tiempo = 7.2 * 8 = 57.6W/h \quad (10)$$

$$EnergiaEnMovimiento = Potencia * tiempo = 126 * 0.008333333 = 1.0499W/h \quad (11)$$

$$ConsumoDiario = 57.6 + 1.0499 = 58.6499 \quad (12)$$

La energía captada mediante el seguimiento solar fue de 1.03 KW/día, a este dato se resta el consumo por día de la energía usada en el seguimiento dando como resultado 972 w/dia. De esta manera comparando con la potencia 866W/día producida por el panel fijo. Da como resultado un aumento en la captación de 12.4%.

Si bien el seguidor sigue produciendo más energía a comparación del sistema estático. El costo de los equipos usados para el seguimiento es el punto débil del sistema, el rotor Yaesu g5500 usado en el proyecto posee un precio \$2 '261.764, mientras que un panel Inifity Energy de 300w tiene un precio de \$690.00 ,en cifras simples se podría comprar 3 paneles solares Inifity Energy de 300w a cambio del rotor y queda un monto sobrante de \$191.764 .

6.2 PROYECCIÓN

Este sistema busca ser un potencializador de todos los sistemas de captación de energía a través de la radiación solar, donde este protegería a los paneles de la temperaturas inclementes que pueden llegar a registrar en diferentes zonas y controlar además el seguimiento si el sol no presenta garantías para realizar un buen seguimiento. Con esto queda demostrado que aun es inviable un seguimiento solar por lo menos en este presente. Demostrando también que es posible realizar diseño software utilizando otras plataformas diferentes a las pagas, además de mostrar todas las prestaciones que pueden aportar los nuevos microcomputadores.

6.3 COSTOS

A continuación, se presentan los costos del montaje y puesta en marcha de los dos sistemas fotovoltaicos implementados en su totalidad. Los costos pueden sufrir cambios debido a las tarifas que se presentan en el proyecto ya que todos los componentes son importados.

Tabla 13. Costos del Montaje experimental

Descripcion	Precio
Dos Balnearas 1/2"	\$12.000
Codos y Union PVC 1/2"	\$8.000
Tubos PVC 1/2"	\$6.000
2 Servomotores Ref. SG90	\$18.000
Tabla de madera MDF	\$2.000
Panel solar fotovoltaico de 1.8W	\$13.000
Pintura Gris Metalizado	\$9.000
Lubricante Traxxas	\$2.000
Total	\$70.000

A continuación se presenta una descripción del costo de la instalación solar fotovoltaica.

Tabla 14. Costos de la Instalación

DESCRIPCION	PRECIO
Rotor YAESU G-5500	\$ 1'620.000
Cable UTP 5e de 16 Hilos conexión rotor-unidad de control	\$ 15.000
Estructura sistema	\$ 150.000
Sistema de control	\$ 700.000
Regulador STECA 12/24V – 15A	\$ 200.000
Cable ST-C AWG 2X14. Panel FV – regulador – batería	\$15.000
Batería 12v -205 Ah	\$1'115.920
Panel infinity solar 300w	\$690.000
Total	\$4'505.920

7. CONCLUSIONES

Se logró diseñar e implementar un sistema de seguimiento solar fotovoltaico aplicando control difuso con el fin de comparar la eficiencia de este tipo de tecnologías en modo estático y en seguimiento constante.

El control difuso aplicado en los sistemas solares fotovoltaicos es una de las mejores opciones para sistemas donde la base del conocimiento del experto puede llegar a ser incluso más eficiente que un modelo matemático.

En base a los resultados obtenidos, actualmente no es conveniente realizar seguimiento solar para aumentar la captación de energía de los mismos, por lo menos en esta zona del mundo; Dado que en esta zona al estar cercanos a la línea del ecuador no se presentan muchos cambios en el movimiento azimut, sin embargo esta tecnología debe ser muy viable en aquellas regiones donde se presentan movimientos de mayor envergadura tanto elevación como azimut.

El punto débil del seguimiento solar es la inversión que se tiene que realizar en los elementos electromecánicos, ya que para la situación que evaluó el proyecto resulta mucho más conveniente comprar más paneles solares fotovoltaicos, que la compra de un rotor Yaesu G5500 usado para seguimiento solar.

Es posible realizar un diseño capaz de controlar un motor DC de mediana potencia diseñado teniendo en cuenta las necesidades energéticas de esta carga, con la ayuda de un sistema de arrancador suave para evitar los altos picos de corriente hace que esta implementación sea muy económica y eficiente para este tipo de sistemas.

Los microcomputadores de placa única como Odroid, C.H.I.P, Raspberry pi entre otras son una solución muy versátil para sustituir las funciones de un computador personal, debido a que poseen una salida para monitor, un precio muy bajo y alta tasa de procesamiento, además de ser capaz de sostener sobre su sistema una interfaz gráfica suficiente para crear una interacción entre el usuario y el sistema diseñado.

La temperatura en la superficie de los paneles solares, no es la misma que en la celda solar fotovoltaica debido a que entre de la celda y el vidrio protector se encuentra un encapsulado de Etil Vinilo Acetato(EVA), un filtro de protección para humedad, abrasión y rayos UV. Debido a esto el voltaje en circuito abierto no se ve drásticamente afectado.

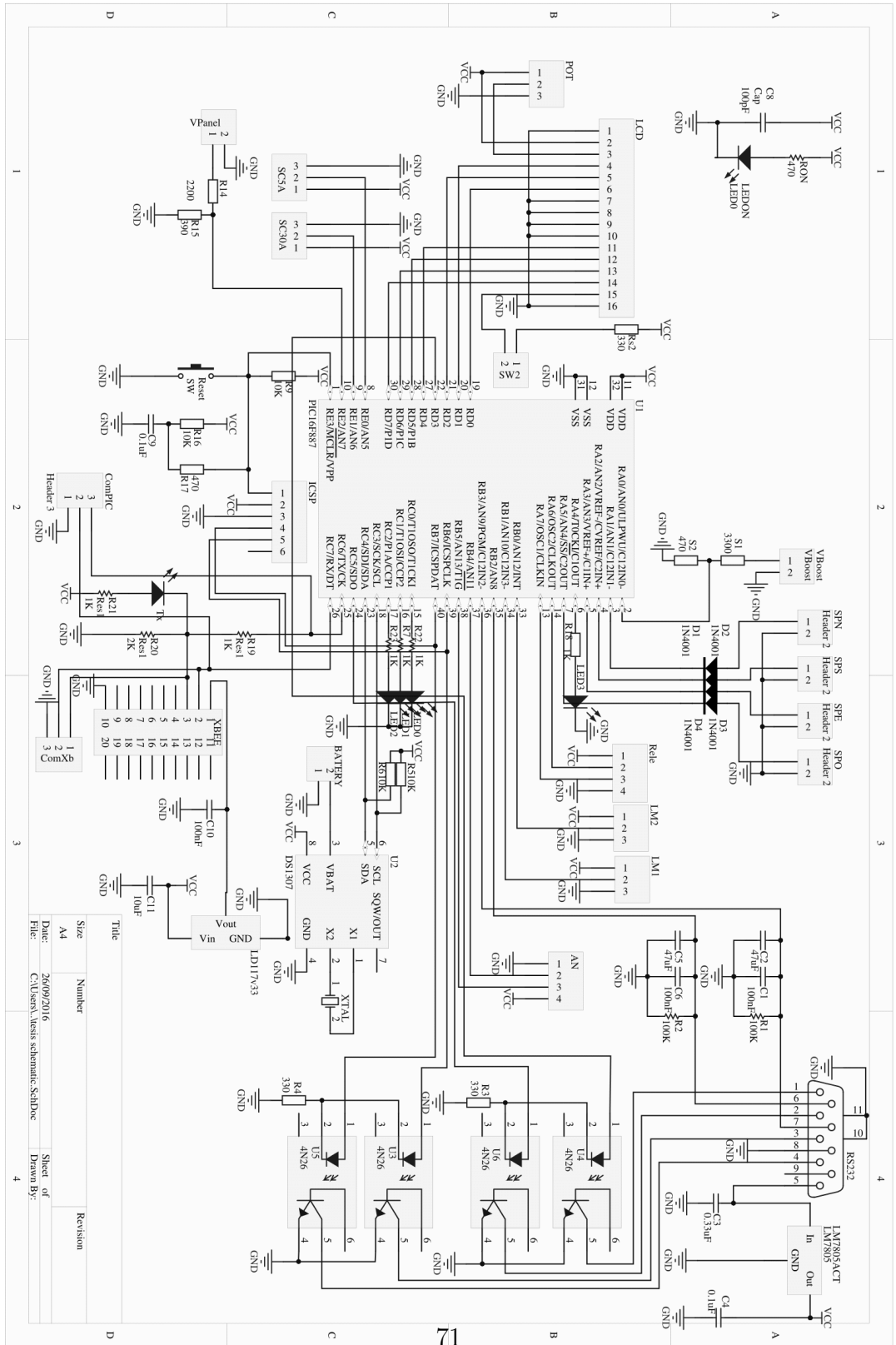
BIBLIOGRAFIA

- Pantoja Prado, S. Barrera Reza, D (2010), Sistema de control girasol para el aprovechamiento de la energía solar y suministro de energía eléctrica Universidad Surcolombiana, Neiva - Colombia.
- Dubey, R., Joshi, D. (2012, December), A fuzzy logic MPPT control scheme for solar photovoltaic module connected with DC drive. In Power India Conference, 2012 IEEE Fifth (pp. 1-6), MIEEE. Shivalik College of Engineering , Dehradun-India
- Cheikh, M. A., Larbes, C., Kebir, G. T., Zerguerras, A. (2007). Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme. *Revue des energies Renouvelables*, 10(3), 387-395, Département d'Électronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algerie
- Dubey, R. (2014, March), Neural network MPPT control scheme with hysteresis current controlled inverter for photovoltaic system. IEEE. Shivalik College of Engineering , Dehradun - India
- Chim, C. S., Neelakantan, P., Yoong, H. P., Teo, K. T. K. (2011, March), Fuzzy logic based MPPT for photovoltaic modules influenced by solar irradiation and cell temperature. In Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2011 UkSim 13th International Conference on (pp. 376-381)
- Cuchango, H. E. E., Sierra Vargas, F. E. (2012, October). Optimization of an analog controller for a solar tracker using genetic algorithms and particle swarm optimization. In Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE), 2012 IEEE International Symposium on (pp. 1-6). IEEE.Univ. Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia
- Moran, C., Guisella, D., Mawyn, M., Patricia, O., Zambrano, F., Daniel, S.(2010).Diseño Del Control Y Simulación De Un Sistema De Generación De Energía Eléctrica Basado En Paneles Fotovoltaicos, Un Inversor Trifasico Conectado A La Red Y Una Unidad De Almacenamiento SMES. 13
- Mummadi Veerachary, Tomonobu Senjyu, and Katsumi Uezato, Feedforward maximum power point tracking of PV systems using fuzzy controller, IEEE transactions on Aerospace and Electronics Systems, Vol. 38, Issue 3, 2002, pp. 969-981.
- Sistema de información Ambiental de Colombia SIAC, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Radiación Solar, Definición y efectos 2015. Disponible en: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=660&conID=723>;
- Moran, C., Guisella, D., Mawyn, M., Patricia, O., Zambrano, F., Daniel, S. (2010). Diseño Del Control Y Simulación De Un Sistema De Generación De Energía Eléctrica Basado En Paneles Fotovoltaicos, Un Inversor Trifasico Conectado A La Red Y Una Unidad De Almacenamiento SMES.

REFERENCIAS

- [1]Turrillas Solabre Eduardo,Aginaga García jokin,(2014), Estudio Comparativo de la eficiencia energética en seguidores solares Universidad Publica de Navarra, Pamplona - España.
- [2]SIEECO Energías Renovables (2014), Aprovechando el Recurso Solar, Mexico
- [3]Varinia, (2009),Cómo afecta la temperatura al rendimiento de las células fotovoltaicas?, España.
- [4]Arrieta Paternina M.,Olmos Villalba L.,Izquierdo Nuñez J.,Álvarez López R.(2012), Diseño de propotipo de sistema solar fotovoltaico optimizado el ángulo de inclinación de los paneles solares. Colombia
- [5]Tamara B. & Duran M. Lógica Borrosa, Universidad Carlos III
- [6]Sun, J. (2012). Pulse-width modulation. In Dynamics and Control of Switched Electronic Systems (pp. 25-61). Springer London.

ANEXO A: ESQUEMÁTICO PLACA DE CONTROL



Title	Number	Size
A4	26/09/2016	C:\Users\messi\Documents

Revision	Sheet of	Drawn By:

ANEXO B: INTERFAZ GRÁFICA EN PYTHON 2.7

76 Seguimiento Solar

INTERFAZ DE MONITOREO SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

 **USCO**
Semillero de Energías Alternativas USCO

 **Universidad Surcolombiana**

 **Colombia Energy S.A.S**

Sincronización

Control del Motor
 Encendido Apagado
Corriente: (A)
Voltaje: (V)

Estado del Sistema Solar Fotovoltaico



Voltaje en Circuito Abierto: (V) Angulo Azimuth:

Corriente de Corto Circuito: (A) Angulo Elevation:

Potencia Maxima: (W) Incidencia de Radiacion: (W/m2)

Temperatura del Panel: (C) Temperatura Ambiente: (C)

Realizado por: Daniel Fernando Murcia Perdomo y Santiago Ochoa Garcia estudiantes del programa de Ingeniería Electronica Universidad Surcolombiana 2016 con el apoyo de Colombia Energy S.A.S

ANEXO C: FOTOS







