

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

“Diseño e implementación de seguimiento solar automático en un panel fotovoltaico y análisis de eficiencia energética”

TRABAJO RECEPTACIONAL QUE
PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTA:

KEVIN ARNOLDO JIMÉNEZ GÓMEZ

Director del trabajo recepcional

Dr. Marcos Ángel González Olvera

Codirector del trabajo recepcional

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Ciudad de México, diciembre 2016

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Jurado:

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Dr. Marcos Ángel González Olvera

Mtro. José Alfredo Del Oso Acevedo

Mtro. Fermi Vázquez Villanueva

Dr. Daniel Noriega Pineda

Ing. Manuel Alberto Soriano Ávila

Dedicatoria:

A mi madre. Con la mayor gratitud por todos tus esfuerzos, tus desvelos, tus sacrificios para que yo pudiera terminar mi carrera profesional. Gracias por guiar mi camino y estar siempre en los momentos difíciles. Mi triunfo es tuyo.

Kevin Arnoldo Jiménez Gómez

Agradecimientos:

Con profunda admiración y respeto al **Dr. Rogelio Mendoza Pérez**, Por haber dirigido y apoyado en todo momento éste trabajo, por su liderazgo, por su amistad, por su confianza, por su comprensión y por su apoyo constante en mi formación académica.

De igual manera, con respeto y admiración al **Dr. Marcos Ángel González Olvera** por haber dirigido éste trabajo, por su apoyo a lo largo del mismo.

Al **Mtro. José Alfredo Del Oso Acevedo**, le agradezco por todo el apoyo y dejarme ser parte del proyecto de celdas orgánicas fotovoltaicas.

Al **Mtro. Fermi Vázquez Villanueva** por haber sido quien me impulsara mediante sus cursos a desarrollar este trabajo ampliando mis conocimientos. Gracias por las asesorías.

Al **Dr. Daniel Noriega Pineda** por el buen recibimiento en el plantel Casa Libertad, gracias por los cursos de LabView y por ampliar mis conocimientos.

Al **Ing. Manuel Alberto Soriano Ávila** por el apoyo a lo largo de los cursos y ser un excelente profesor.

A mis compañeros del laboratorio Lacytes (Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables). Ing. Francisco Cortez, Mtra. Erendira Velázquez López, Brenda Hernández, Fanny Ávila, Giovanni Albarran, Marco, Fabiola, Ángeles Martínez, Brenda Patricia y Angélica De Jesús Uribe (casa libertad) por su gran apoyo.

De igual manera a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, a esta casa de estudios por abrirme sus puertas para poder realizar mis estudios profesionales.

En a agradecimiento a Conacyt y al el apoyo recibido de los proyectos:

Fomix Conacyt-gdf 189282 2012-2 “manufactura de paneles fotovoltaicos de CdS/ CdTe en áreas de 100cm² y con eficiencias de 8% por la técnica de sublimación y procesos preindustriales asociados”.

“Electropolimerización anódica de compuestos derivados del 3, 4 dialcoxitiofeno, aplicada a la elaboración de celdas orgánicas fotovoltaicas (OPVS)” PI2014-34.

Al proyecto UACM PI2014-65.

Kevin Arnaldo Jiménez Gómez

Capítulo I

Resumen	1
Abstract	2
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Hipótesis	3
Justificación	3
1 Introducción	4
1.1 El recurso de la energía solar	5
1.2 La energía solar	6
1.3 Energía solar en México (energía solar distribuida)	7
1.4 Aprovechamiento solar fotovoltaico en México	8
1.4.1 Sector de las energías renovables en México	9
1.5 Ventajas de la energía solar	10
1.5.1 Desventajas de la energía solar	10

Capítulo II

Fundamentos teóricos

2 Fundamentos teóricos de la conversión fotovoltaica	12
2.1 Introducción	12
2.2 Conceptos elementales de la teoría de semiconductores	12
2.2.1 El efecto fotovoltaico	12
2.2.2 La celda fotovoltaica	13
2.3 La celda solar Estructura y parámetros característicos	14

2.4	Parámetros característicos.....	14
2.5	Modelo de una celda fotovoltaica.....	16

Capítulo III

Análisis, diseño y construcción del prototipo de seguidor solar para panel FV y sistema de monitoreo

3.	Introducción.....	19
3.1	Sistema de generación FV para seguimiento solar	20
3.2	Construcción de estructura para seguidor solar (ESS).....	21
3.3	Tipo de seguidor solar e implementación de parte mecánica.....	23
3.4	Momento de torsión del PFV-Móvil.....	26
3.5	Implementación de la parte mecánica. Transmisión de engranes.....	27
3.6	Relación de engranes de la transmisión.....	28
3.7	Calculo del torque que produce la transmisión de engranes.....	30
3.8	Implementación de la tarjeta electrónica para la etapa de potencia.....	32
3.8.1	Modos de funcionamiento (L297).....	35
3.8.2	Medio paso (Half Step-Mode).....	35
3.8.3	Paso completo con 2 fases activas (Full-Step).....	35
3.8.4	Paso completo con una fase activa.....	36
3.8.5	Tarjeta electrónica (PCB) para la etapa de potencia.....	36
3.9	Sistema de acondicionamiento para monitoreo y adquisición de datos.....	37
3.9.1	Sistema de Medición de voltaje.....	38
3.9.2	Diseño del divisor de tensión para la medición de voltaje.....	38

3.9.3	Sistema de Medición de corriente.....	40
3.9.4	Sensor de corriente ACS711EX y ACS712.....	41
3.10	Sistema de medición de temperatura.....	42
3.11	Sensores fotorresistivos (LDR).....	45
3.11.1	Diseño y acondicionamiento electrónico de sensores fotosensibles.....	46

Capítulo IV

Pruebas del sistema, integración y resultados

4.1	Sistema de captación de luz solar (SCLS).....	53
4.2	Bloque de generación.....	54
4.3	Bloque de acumulación.....	54
4.4	Ciclo de trabajo del controlador de carga solar.....	55
4.4	Diseño analógico del circuito electrónico.....	59
4.5	Bloque de comunicación. Bus-RS-485.....	57
4.5.1	Ventajas de RS-485 respecto a RS232.....	57
4.5.2	I2C.....	58
4.5.3	Porqué usar el BUS-RS485.....	58
4.5.4	Implementación del sistema de comunicación, BUS-RS485.....	59
4.5.5	Microcontroladores en modalidad Maestro y Esclavo.....	60
4.5.6	Diseño e implementación de la etapa de monitoreo (HMI).....	62
4.6	Pruebas del sistema y resultados.....	64
4.7	Resultados experimentales del proceso de seguimiento solar.....	67
4.8	Estado final del prototipo.....	71
5.	Conclusiones.....	73

6. Trabajos futuros.....	74
7. Referencias.....	75
Apéndice.....	77

Índice de figuras

Figura 1.1 Irradiación solar global promedio anual en el territorio nacional (kWh/m ²).....	8
Figura 1.2 Generación distribuida 2014-2028 (MW).....	10
Figura 2.1 Efecto fotovoltaico.....	13
Figura 2.2 Estructura simplificada de una celda fotovoltaica de unión N-P.....	14
Figura 2.4 Curva característica IV de una celda fotovoltaica en iluminación con indicación de algunos de sus parámetros principales. La curva punteada representa la potencia.....	16
Figura 2.5 Circuito equivalente de una celda solar ideal.....	17
Figura 2.6 Celda solar real.....	18
Figura 3.1 Esquema básico de funcionamiento del sistema seguidor solar.....	19
Figura 3.2 Módulo fotovoltaico del sistema de generación.....	20
Figura 3.3 PTR galvanizado para la construcción de la estructura.....	21
Figura 3.4. Estructura base para montaje de los PFV móvil y fijo.....	21
Figura 3.5 Piezas de antena Dish para fijar los módulos fotovoltaicos.....	22
Figura 3.6 Soporte para panel FV-Fijo.....	22
Figura 3.7 Ángulo de seguimiento del seguidor solar con eje horizontal.....	23
Figura 3.8 Latitud y Longitud de la ciudad de México.....	24
Figura 3.9 Soporte metálico para eje de giro.....	25
Figura 3.10 Diferentes ejes de giro para una placa solida.....	25
Figura 3.11 a) Eje de giro del PFV-móvil. b) Diagrama de cuerpo libre.....	26
Figura 3.12 A la izquierda la transmisión de engranes, a la derecha el montaje completo.....	28

Figura 3.13	Engranés acoplados entre sí.....	28
Figura 3.14	Distribución de engranes para cálculo de relación de transmisión (vista superior).....	29
Figura 3.15	Motor a pasos bipolar ST35ST28-0534.....	31
Figura 3.16	Esquema sinóptico del CI L298.....	33
Figura 3.17	Esquema eléctrico de la etapa de la etapa de potencia.....	34
Figura 3.19	Modo de medio paso	35
Figura 3.20	Secuencia de estados y formas de onda se salida para las una fase activa.....	53
Figura 3.21	Diagrama de conexión para simulación e implementación de la PCB.....	37
Figura 3.22	Vista 3D y real de la tarjeta electrónica de potencia.....	37
Figura 3.23	Circuito de acondicionamiento para adquisición de voltaje del panel FV móvil y Fijo.....	38
Figura 3.24	Diagrama de conexión del sensor de corriente y el panel FV.....	41
Figura 3.25	Diagrama de conexión del sensor ACS71258.....	42
Figura 3.26	Sensor de temperatura LM35DZ.....	42
Figura 3.27	Configuración básica para calibrado del sensor de temperatura.....	43
Figura 3.28	Distribución de pines.....	43
Figura 3.29	Circuito para acondicionamiento de sensor de temperatura.....	44
Figura 3.30	Tarjeta electrónica para acondicionamiento de sensores de temperatura.....	44
Figura 3.31	Fotorresistencia (LDR).....	45
Figura 3.32	Dependencia entre iluminación y resistencia para una LDR típica.....	45
Figura 3.33	Disposición de los fotorresistores para la captación de luz solar.....	46
Figura 3.34	Configuración Pull-Up (izq) y Pull-Down (Der).....	46
Figura 3.35	Circuito de acondicionamiento de señal para la captación de luz solar (CAS).....	48

Figura 3.36 A la izquierda se muestra el diseño del bloque que genera las sombras. A la derecha el montaje del bloque en la TECS.....	49
Figura 3.37 a) La TECS b) la derecha Diagrama de pistas y las salidas V_{rv1} y V_{rv2}	49
Figura 3.38 Niveles de voltaje de LDR1 y LDR2 de acuerdo a la posición del Sol.....	50
Figura 4.1 Diagrama de bloques del sistema de seguimiento solar (SSS).....	53
Figura 4.2 Paneles FV montados para el bloque de generación.....	54
Figura 4.3 Control de carga conectado a los PFV y a los acumuladores.....	55
Figura 4.4 Controlador de carga solar RYPV-1A-5A-12/24V	56
Figura 4.5 Cuarto piso del edificio B. UACM.....	58
Figura 4.6 Conexión de la arquitectura maestro-esclavo con PIC16F887.....	59
Figura 4.7 Microcontroladores en modalidad Maestro-Esclavo.....	60
Figura 4.8 Diagramas de flujo para microcontrolador Maestro (izquierda) y esclavo (derecha).....	61
Figura 4.9 Diagrama a bloques del sistema de monitoreo.....	62
Figura 4.10 Interface gráfica de monitoreo del sistema FV.....	63
Figura 4.11 Diagrama a bloques para mostrar los datos adquiridos (V, I y T °C) en un archivo de Excel.....	63
Figura 4.12 Ajuste lineal para la representación de datos de voltaje del PFV-Móvil.....	65
Figura 4.13 Ajuste lineal para del panel FV Fijo.....	66
Figura 4.14 Curvas I-V de los PFV móvil y fijo.....	67
Figura 4.15 Curva obtenida del voltaje vs tiempo de los paneles fotovoltaicos en un periodo de ocho horas. Se observa la medición del voltaje generado tanto por el PFV-Móvil como por el PFV-Fijo.....	68
Figura 4.16 Muestra las curvas de corriente vs tiempo, a lo largo del día, obtenidas para ambos módulos.....	69
Figura 4.17 Curvas características de la densidad de corriente de ambos módulos FV.....	70

Figura 4.18 Muestra las curvas obtenidas de la potencia generada por los módulos fotovoltaicos.....	70
Figura 4.19 Curvas características de temperatura vs hora del día de los módulos fotovoltaicos.....	71
Figura 4.20 Estado final del prototipo seguidor solar (día solar).....	72
Figura 4.21 Sistema de seguimiento solar puesto en operación (modo nocturno).....	72
Figura 4.38 Diagrama de conexión para ambos sensores con su respectivo PFV.....	85
Figura 4.39 a) Imagen real. b) Distribución de pines [Texas Instrumentes].....	86
Figura 4.40 Configuración básica para censado de temperatura.....	87
Figura 4.41 Voltaje de salida a una tensión de 5V en condiciones de temperatura ambiente.	87
Figura 5.6 Diagrama a bloques del sistema de monitoreo.....	95
Figura 5.7 Interfaz de usuario IHM para visualizar los valores de las variables medidas.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Irradiación solar promedio en México por día.....	9
Tabla 1.2 Capacidad instalada en operación y en construcción para la generación de energía eléctrica con fuentes renovables.....	9
Tabla 1.3 capacidad adicional instalada para la generación de electricidad.....	9
Tabla 1.4 Capacidad adicional instalada para la generación de electricidad (MW).....	10
Tabla 3.1 Diámetros de cada uno de los engranes que integran la transmisión.....	30
Tabla 3.2 Correspondencia de engranes y su relación de transmisión.....	30
Tabla 3.3 Valores obtenidos de las fotorresistencias bajo condiciones de luz y sombra...51	
Tabla 4.1. Características de las baterías que conforman el bloque de acumulación.....	55
Tabla 4.2 Valores adquiridos a lo largo de un día.....	64
Tabla 4.3 Datos obtenidos de ambos paneles fotovoltaicos.....	65

CAPÍTULO I

Resumen

En este trabajo se presenta la investigación, desarrollo, diseño e implementación de un sistema de control electrónico para seguimiento solar aplicado a un módulo fotovoltaico con **0.1225 m²** superficie, desarrollado en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México en las instalaciones del laboratorio experimental LACyTES (Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables).

El seguidor solar es un dispositivo tecnológico, cuya función es aumentar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y otros dispositivos de concentración solar por medio de sistemas mecánicos y electrónicos que siguen la trayectoria del Sol como lo haría un girasol, captando de este modo la máxima radiación solar durante el mayor tiempo posible. El seguidor solar está conformado por una estructura metálica en la cual se pueden montar dos paneles fotovoltaicos; un mecanismo constituido por un sistema de engranes que proporciona el torque necesario para mover dicho panel, el cual está acoplado a un motor a pasos bipolar (stepper motor). También se integra a esta estructura una tarjeta electrónica basada en el protocolo de comunicación **RS-485**, microcontroladores y circuitos integrados, realiza la función de llevar a cabo el posicionamiento del panel FV en la trayectoria solar. Debido a que este dispositivo tecnológico (seguidor solar) se orienta hacia el Sol, las paredes fotovoltaicas se encuentran todo el día orientadas directamente sobre la trayectoria del Sol para que de esta forma aumente su rendimiento.

Por ende, un seguidor solar puede optimizar el aprovechamiento de la energía solar no en regiones con una larga duración de radiación solar sino en cualquier región, ya sea en el campo, la ciudad o en zonas desérticas donde la intensidad solar pueda aprovecharse en gran parte.

Palabras claves: stepper motor, bipolar, seguidor solar, PFV, RS-485.

Abstract

In this paper the research, development, design and implementation of an electronic control system for solar tracking applied to a photovoltaic module with 0.1225 m² is presented. Developed at the Autonomous University in Mexico City facilities Lacytes experimental laboratory (Laboratory of Sciences and Sustainable Technologies).

The solar tracker is a technical device whose function is to increase the efficiency of photovoltaic panels and other devices solar concentration by mechanical, hydraulic, electrical and electronic systems that track the sun as you would a sunflower, capturing thus the maximum solar radiation for as long as possible. It is basically composed of: a metal structure which can be mounted, not one but two photovoltaic panels; a mechanism consisting of a gear system which serves the purpose of providing the necessary torque to move said panel, coupled to a bipolar motor steps (stepper motor) .of likewise integrates this procedure an electronic card which, protocol based on RS-485 communication, micro controllers and integrated circuits, perform the function of the positioning of the PV solar panel on trajectory. Likewise, the solar tracker is complemented by a data acquisition system (temperature, voltage and current) consisting of sensors and low-cost components. As the mobile photovoltaic panel is oriented at all times towards the sun, it is found that its performance and energy efficiency is increased, and improving energy efficiency by getting about 20% more electric power of the mobile panel to the panel fixed.

Because this technological device (solar tracker) is oriented toward the sun, photovoltaic walls all day are oriented directly on the path of the sun to thereby significantly increase performance.

Thus, a solar tracker can optimize the use of solar energy not only in regions with a long duration of solar radiation but in any region, whether in the countryside, city or desert areas where solar intensity can benefit greatly part.

Keywords: stepper motor, bipolar, solar tracker, PFV, RS-485.

Objetivo General

El objetivo de este proyecto es el diseño e implementación de un prototipo que permita realizar el seguimiento de la trayectoria solar. El dispositivo podrá adquirir la radiación que incide en el módulo solar mediante el movimiento continuo del panel. Así mismo, este prototipo permitirá mejorar el rendimiento de un panel fotovoltaico móvil respecto un panel fotovoltaico fijo.

Objetivos Específicos

- Establecer las especificaciones para la implementación del seguidor solar y realizar las pruebas correspondientes del prototipo.
- Realizar un sistema mecánico sencillo construir e instalar y de bajo costo.
- Diseño e implementación un sistema de acondicionamiento de datos provenientes de diferentes sensores colocados en el sistema y así estimar diferentes variables.

Hipótesis

Se obtendrá una mejora en el aprovechamiento de la energía solar a través de un módulo fotovoltaico aprovechando el ángulo de incidencia de la radiación solar en dicho panel mediante el seguimiento de una trayectoria solar determinada, lo que permitirá estimar la cantidad de energía producida por un panel fotovoltaico móvil y uno fijo y hacer la comparación correspondiente determinando el rendimiento de ambos.

Justificación

Hoy en día el uso de energía se ha vuelto un factor básico para muchos aspectos de la actividad y el progreso. Por ende, la energía es imprescindible para el progreso de un país, tanto es así que la tasa de consumo energético está muy relacionada con el grado de desarrollo económico, esta es la razón por la cual las energías renovables están siendo muy demandadas ya que su utilización no produce emisiones que son casi imperceptibles para el medio ambiente y se obtienen a partir de fuentes naturales que son virtualmente inagotables siendo el Sol la más importante de ellas.

Gracias a esta alternativa se prevé para un futuro no muy lejano una creciente disminución en la dependencia de las fuentes tradicionales de energía obtenidas a partir de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural).

Pero para ello debemos continuar fomentando la necesidad que tenemos de utilizar este tipo de energías renovables ya que así podremos mejorar la calidad de las energías y, por consiguiente la extensión de las condiciones favorables para permanecer en un mundo habitable a largo plazo

1. *Introducción*

Tal vez no haya otro término en el lenguaje del hombre que pueda definirse de modo tan simple como el de la energía y que sin embargo tenga tantos y tan diversos significados. El diccionario de la academia española lo define como “virtud para obrar”. Más simplemente aún, la energía es la capacidad para lograr que un sistema físico realice un trabajo. Pero pensamos acerca de las consecuencias de estas definiciones: no hay nada de lo que comemos, conducimos, vestimos o realizamos, que no exija, de algún modo, el consumo de energía.

Hoy en día, como resultado del acelerado desarrollo industrial y socioeconómico, uno de los problemas de mayor trascendencia, y que ha afectado a las economías nacionales, es la problemática que representan los energéticos. La limitación de los recursos petrolíferos principal fuente de hidrocarburos y su encarecimiento, permiten prever que en países en vías de desarrollo la posibilidad de ascender a niveles de vida más altos estará cada vez más condicionada. Lamentablemente, ni siquiera la estimación más optimista de reservas adicionales de combustibles puede o debe justificar un continuado consumo acelerado [José A Manrique].

En la actualidad, la tecnología de las energías renovables aún se encuentra en una etapa de pleno desarrollo y esto conlleva a tener un objetivo específico el cual se inclina en lograr que la energía producida compita económicamente con la generada con las fuentes de energía no renovables [Hollander, 2003]. Particularmente, para la energía Solar fotovoltaica el desarrollo se centraliza principalmente en el mejoramiento de la eficiencia y garantizar la acumulación adecuada de dicha energía producida.

El modelo energético actual a base de combustibles fósiles como principal fuente de energía, genera un gran impacto ambiental y no es sustentable debido a que, para satisfacer las demandas de energía actuales, compromete la integridad de las futuras generaciones. Por lo que se hace necesario establecer un nuevo modelo energético que sea sustentable en el que las energías renovables sean el eje de desarrollo [Steven, 2003].

En la actualidad, la tecnología de las energías renovables aún se encuentra en una etapa de pleno desarrollo y esto conlleva a tener un objetivo específico el cual se inclina en lograr que la energía producida compita económicamente con la generada con las fuentes de energía no renovables [Hollander, 2003]. Particularmente, para la energía Solar fotovoltaica el desarrollo se centraliza principalmente en el mejoramiento de la eficiencia y garantizar la acumulación adecuada de dicha energía producida.

El modelo energético actual a base de combustibles fósiles como principal fuente de energía, genera un gran impacto ambiental y no es sustentable debido a que, para satisfacer las demandas de energía actuales, compromete la integridad de las futuras generaciones. Por lo que se hace necesario establecer un nuevo modelo energético que sea sustentable en el que las energías renovables sean el eje de desarrollo [Steven, 2003].

Entre las fuentes de energías renovables, la energía solar es la más significativa, debido a su abundancia y sostenibilidad.

1.1 *El recurso de la energía solar*

La energía solar es la fuente de energía más importante que hay sobre la Tierra y sus habitantes, sin ella no habría vida. Es la fuente de energía que impulsa la reacción de fotosíntesis como tal, es la responsable de toda la biomasa sobre la superficie de la Tierra y del origen de los combustibles fósiles; productos de la fotosíntesis enterrados debajo de la superficie terrestre hace millones de años.

La energía solar crea los vientos en el mundo, evapora el agua que es la responsable de la lluvia. Las olas y la potencia térmica de los océanos son resulta del efecto del Sol, de hecho, una parte de la energía nuclear, la energía geotérmica y la energía de las mareas también se deben al Sol. *Aunque la energía que libera el Sol es producto de las reacciones nucleares en su interior.*

1.2 *La energía solar*

La energía radiada por el Sol es alrededor de 7% de luz ultravioleta, un 47% luz visible y 46% luz infrarroja. Su contenido de energía a la distancia de la Tierra al Sol es de alrededor de 1.4 MW/m^2 y se estima que cada año alrededor de 1500 millones de TWh de energía solar alcanzan la Tierra. No toda esta energía alcanza la superficie de la Tierra, ya que gran parte de la radiación ultravioleta de onda corta es absorbida por la atmósfera; el vapor de agua y el dióxido de carbono absorben energía de longitud de onda mayor, en tanto que las partículas de polvo dispersan más radiación regresando en parte al espacio. Por su parte las nubes también reflejan luz de regreso al espacio.

Cuando todos estos factores son tomados en cuenta, alrededor del 47% de la energía, del orden de 70 millones de TWh alcanzan la superficie, esto es 14000 veces la cantidad de energía, 50 000 TWh usada por el hombre cada año. Mucha de esta energía solar impacta los océanos del mundo y es inaccesible, aún así, con sistemas de conversión de energía razonablemente eficientes, menos del 1% del terreno en el mundo podría proporcionar suficiente energía como para satisfacer la demanda global de electricidad alrededor de 15000 TWh.

Poniendo esto en una perspectiva más práctica, el diseño de las plantas solares térmicas se hace con base a la densidad de energía solar expresada en $\text{KW h/m}^2/\text{año}$, que con una eficiencia estimada de 10% da el valor en la energía real disponible que requiere un área muy importante de terreno.

Hoy en México se cuenta con condiciones favorables para la transición de energías limpias apoyadas por iniciativas gubernamentales que colaboran en el desarrollo del sector. Como líder global en temas de cambio climático, México es uno de los primeros países en vía de desarrollo que adquiere el compromiso de reducción de emisiones a través del uso de energías limpias. Se espera que en el futuro las iniciativas por contar con energías sustentables en el país tengan mayor peso [FUMEC].

1.3 *Energía solar en México (energía solar distribuida)*¹

En general siempre se ha tenido la opinión de que la energía solar es una tecnología cara. Los proyectos en este 2015, han demostrado que ésta energía ya es una alternativa rentable para las empresas en México [monsolar].

La generación de energía de forma distribuida, siempre ha sido una alternativa viable para los países que tienen una visión hacia la seguridad y eficiencia energética. Una de las formas más sencillas de tener energía distribuida es aprovechando los recursos naturales virtualmente ilimitados, como el Sol. Hay varios factores que hacen que la generación distribuida tenga más sentido en los tiempos modernos. Tomemos en cuenta que la tecnología ha avanzado reduciendo los costos de manera considerable. Asimismo, la progresiva disminución de la disponibilidad de las centrales de CFE en operación, ha hecho que en los momentos de demanda pico, se tengan que poner en operación plantas de generación a base de diesel, un combustible muy caro y contaminante.

En muchos lugares es muy complicado transmitir la energía a través de redes de transmisión eficientes y lograr los derechos de vía correspondientes. Otro factor que ha apoyado la generación distribuida son las pérdidas, asociadas por la transformación y distribución de la energía.

Normalmente en México, la energía se genera en algún lugar alejado donde se quema un hidrocarburo, para que con ese calor de alguna manera se haga mover un generador eléctrico, el cual en el proceso de transformación de la energía térmica, a mecánica y eléctrica desperdicia gran parte de su capacidad. Posteriormente esa energía que se genera en relativos bajos voltajes, tiene que ser tratada y transformada por medio de una subestación para elevar su voltaje. En vez de esto cada vez más mexicanos aprovechan los esquemas de generación distribuida, la cual consiste en generar energía a pequeña escala para proporcionar electricidad a manera que se ajuste a las necesidades del consumidor en el sitio que se consume, de una manera mucho más eficiente y segura.

¹[ANES, Energías renovables].

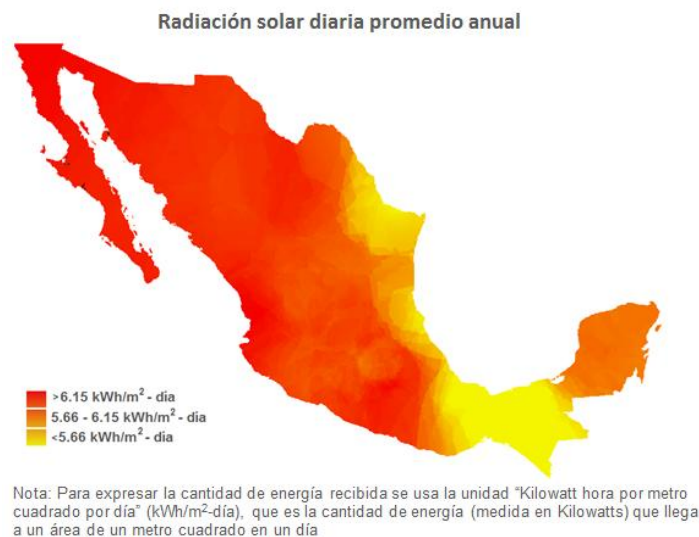
1.4 Aprovechamiento solar fotovoltaico en México

Las fuentes de energías alternativas buscan tener un papel fundamental para el desarrollo de nuestra sociedad. Pues la aplicación de estos sistemas contribuye en varios aspectos; comenzando por ámbito ambiental donde se protege el medio natural donde vivimos a través de la cero emisión de contaminantes, seguido del ámbito económico que mejoraría optimización de recursos y finalmente un ámbito tecnológico que revolucionaría la forma de vida tanto de nuestros hogares como las de las industrias.

Estas nuevas formas de obtención de energías limpias se producen a partir de fuentes fotovoltaicas y fuentes térmicas solares

Considerando la capacidad energética del Sol, la cual perdurará durante millones de años, así como la privilegiada ubicación de México en el globo terráqueo, permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de regiones con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los 4.4 kWh/m² por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m² por día en el norte del país , resulta fundamental la adopción de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en nuestro país (**Figura 1.2** y **Tabla 1.1**) [Castellanos A y Escobedo M].

Figura 1.1 Irradiación solar global promedio anual en el territorio nacional (kWh/m²).



Fuente: [SIGER]

Tabla 1.1. Irradiación solar promedio en México por día

Zona centro	Norte del país
4.4 kWh/m ²	6.3 kWh/m ²

La distribución de la insolación contempla la cantidad promedio de días despejados y nublados para cada región. Así se tiene que el noroeste y norte del país (Sonora, Chihuahua y Baja California) presentan la mayor insolación. Por lo contrario, las ciudades que menos radiación Solar reciben son Orizaba y Jalapa (zona que rodea al pico de Orizaba), en Veracruz. En ellas siempre está nublado [Castellanos A y Escobedo M].

Tabla 1.2 Irradiación solar global diaria promedio mensual en México (kWh/m²)

	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Mínimo	3.1	3.3	3.1	3.5	4.1	4.4	4.5	4.6	4.1	3.2	3.1	2.8
Máximo	5.4	6.3	6.6	7.5	8.3	8.6	7.0	6.6	6.7	6.0	5.7	5.6
Promedio	4.1	4.7	5.3	5.7	5.9	5.6	5.6	5.6	5.1	4.7	4.3	3.8

Fuente: CONUEE. Irradiación global media en la República Mexicana

1.4.1 Sector de las energías renovables en México

De acuerdo con información del gobierno federal (Tabla 1.3), hasta 2013 México contaba con una capacidad instalada para la generación de energía eléctrica de 64,690 MW, de los cuáles 14,891 MW provinieron de fuentes renovables de energía (eólica, Solar, hidráulica, geotérmica y de biomasa), lo que representa el 23% del total de la capacidad instalada [SENER] de acuerdo con datos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Tabla 1.3 Capacidad instalada en operación y en construcción para la generación de energía eléctrica con fuentes renovables 2013

Tipo de energía	Capacidad instalada en operación	Capacidad autorizada en construcción (MW)
Hidráulica	11694	890
Eólica	1638	3332
Geotérmica	823	169
Biomasa	661	120
Solar	76	976
Total	14891	5487

Fuente: Comisión Federal de Electricidad (CFE)/ Comisión Reguladora de Energía

Mientras que para 2028 (**Tabla 1.4**) se estima que se alcanzará una capacidad total instalada superior a 35,000 MW para la generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía. Se prevé un incremento de 21,089 MW (2014-2028) en la capacidad instalada existente, liderado por las energías eólica e hidráulica con una participación de 52% y 25% respectivamente, seguida en orden de magnitud por los proyectos de Solar fotovoltaica (3,508 MW).

Tabla 1.4 Capacidad adicional instalada para la generación de electricidad (MW)

	Servicio Público	Auto-Abastecimiento	Generación Distribuida	Total	Participación %
Eólica	3519	7066	395	10980	52
Hidráulica	4713	476	150	5339	25
Solar					
Fotovoltaica	36	2199	1273	3508	17
Termo Solar	14	29	1	34	0.002
Biomasa	0	539	402	941	0.04
Geotérmica	180	40	57	277	0.01
Total	8462	10348	1279	21089	

Fuente: Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027, SENER

Cabe destacar que, considerando las adiciones acumuladas de la capacidad instalada en proyectos de generación distribuida (**Figura 1.2**) se estima un comportamiento distinto, centrándose la generación de electricidad en la tecnología solar fotovoltaica con 56% del total (1,273 MW), seguida de los proyectos para aprovechamiento de bioenergía (402 MW) hacia el año 2028.

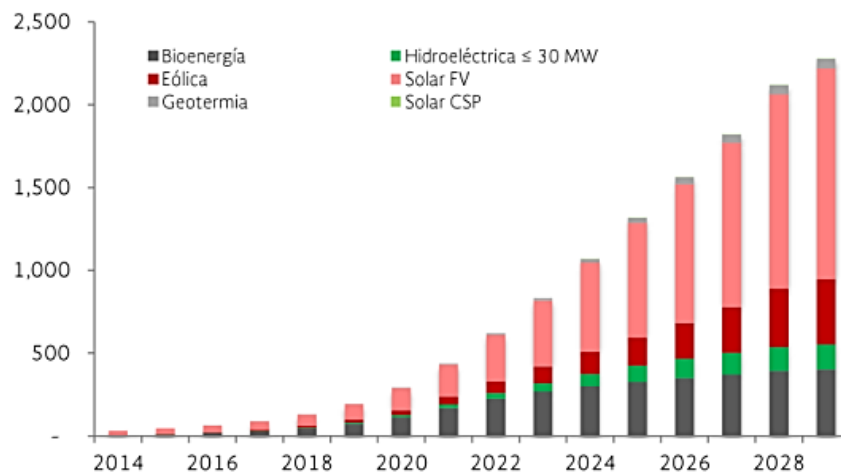


Figura 1.2 Generación distribuida 2014-2028 (MW)

1.5 *Ventajas de la energía solar*

La energía Solar es una de las alternativas energéticas más importantes en la actualidad, ésta ofrece una serie de ventajas.

- Utiliza recursos naturales inagotables: la luz del Sol.
- Es una energía limpia que no genera emisiones de gases contaminantes ni otro tipo de residuos.
- Es una Solución ideal para disponer de electricidad en zonas aisladas.
- Es la única energía renovable que puede instalarse a gran escala dentro de las zonas urbanas.
- En el caso de instalaciones conectadas a la red, hay subvenciones públicas y primas a la producción.
- Los paneles y la estructura de soporte pueden desmontarse al final de la vida útil, pudiendo reutilizarse.

1.5.1 *Desventajas de la energía solar*

Entre los inconvenientes no comparables con los de las fuentes de energías convencionales, esto es, más bien propias de las instalaciones y parques solares, se encuentran:

- El impacto visual de los parques solares, que suelen ocupar grandes superficies de captación.
- Sólo se produce energía mientras hay luz y depende del grado de insolación.
- El costo de las instalaciones es elevado, sobre todo si se compara con otro tipo de instalaciones que generen la misma potencia.
- El rendimiento es bastante bajo, debido a la baja eficiencia de las celdas solares, en muchos casos inferior al 40%.
- El tiempo que deben esperar, según manifiesta la Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF), las pequeñas y medianas instalaciones fotovoltaicas para que las compañías eléctricas las aprueben y compren su producción [12].

CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2. *Fundamentos teóricos de la conversión fotovoltaica*¹

2.1 *Introducción*

Los sistemas fotovoltaicos emplean como medio material un compuesto semiconductor que transforma la radiación en electricidad en un proceso en una sola etapa (absorción-conversión) o cuando mucho, en dos etapas (captación y absorción conversión, en el caso de los sistemas FV de concentración). Existen muchas otras diferencias en cuanto a sus características de funcionamiento [A. Marti].

2.2 *Conceptos elementales de la teoría de semiconductores*

Comenzaremos en este apartado por exponer de forma simple cuál es el fundamento de la conversión fotovoltaica y las propiedades de los materiales semiconductores que los hacen susceptibles de ser utilizados en esta transformación. Se determinará cuál es la estructura y características de las celdas solares convencionales. Se analizarán sus principales parámetros de diseño y las principales influencias que determinan el rendimiento final de estos dispositivos.

2.2.1 *El efecto fotovoltaico*¹

El efecto fotovoltaico (**Figura2.1**) es un fenómeno físico que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados celdas fotovoltaicas. Estas celdas están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada una corriente, utilizando como fuente la radiación luminosa. Las celdas se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula.

¹ A. Martí, “Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica”

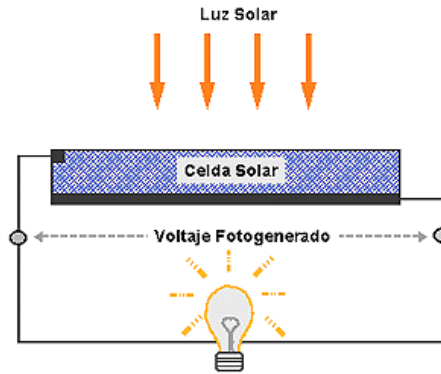


Figura 2.1 Efecto fotovoltaico

2.2.2 La celda fotovoltaica

Una celda solar fotovoltaica (**figura 2.2**) es un dispositivo electrónico de estado sólido capaz de convertir de forma directa la radiación solar en energía eléctrica. Aunque su funcionamiento es muy distinto, podemos pensar inicialmente que una celda solar se comporta cuando recibe la radiación solar, de forma similar a una pequeña pila o batería (de las que utilizamos en nuestras radios, por ejemplo) que es capaz de suministrar una cierta cantidad de corriente mientras mantiene entre sus bordes una diferencia de potencial determinada. La energía eléctrica producida se suministra en forma de una corriente eléctrica continua (DC) a una carga externa conectada mediante un circuito a uno o varios grupos de celdas que se ensamblan en unidades compactas que denominamos módulos fotovoltaicos. Al igual que hacemos con las pilas, las celdas que constituyen un módulo se asocian entre sí mediante conexiones en serie y en paralelo hasta alcanzar los niveles de corriente y tensión adecuados.



Figura 2.2 Celda solar fotovoltaica

2.3 La celda solar. Estructura y parámetros característicos ²

Con las nociones básicas introducidas hasta el momento, se puede comenzar a describir cuál es la estructura y funcionamiento básico de una celda solar. También se señalará cuáles son sus parámetros característicos de funcionamiento.

La estructura simplificada de una celda fotovoltaica se muestra en la **Figura 2.3** y en ella podemos apreciar los principales elementos o secciones que la conforman. Desde el punto de vista de los fotones incidentes, comenzando por su cara anterior, encontramos por este orden.

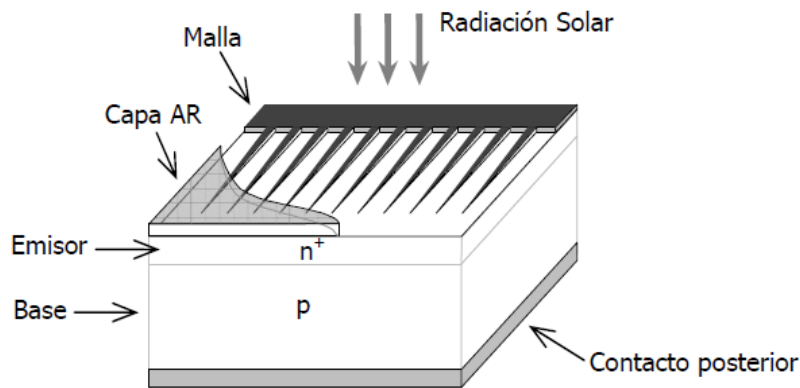


Figura 2.3 Estructura simplificada de una celda fotovoltaica de unión N-P

- Una capa antirreflexiva (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial.
- Una malla de metalización, representada en forma de peine (**Figura 2.3**) esta malla de metalización es debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo, sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible al interior del dispositivo.

2.4 Parámetros característicos

Cuando se irradia un dispositivo como el de la **Figura 2.3** mientras está conectado a una carga externa, éste funciona como generador de energía y exhibe unos valores de corriente y tensión que son variables en función de las condiciones de operación (temperatura, irradiancia) y del punto de trabajo que impone la carga.

² G.L. Araújo, “La celda Solar”, en E. Lorenzo, “Electricidad Solar”. Progensa (1994)

La curva característica de una celda solar operando en *CEM* (*Condiciones Estándar de Medida*, definidas por 1000 W/m² de irradiancia con distribución espectral AM 1.5G y 25°C de temperatura) tiene la forma aproximada que se muestra en la **Figura 2.4** y responde a una ecuación ideal conocida como el *modelo de una exponencial* de la celda. Esta ecuación está basada en considerar como válido el *principio de superposición*, según el cual, la corriente de la celda resulta del balance de la corriente producida por la luz incidente y la correspondiente al diodo de unión P-N que forma su núcleo:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_o \left(\exp \left(\frac{qV}{mkT} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

Donde I_L es la corriente fotogenerada e I_D es la corriente de oscuridad o corriente de diodo. En la expresión de ésta última, I_o se denomina *corriente inversa de saturación* del diodo, q es la carga del electrón, m es el llamado *factor de idealidad* del diodo (un parámetro adimensional con valores típicos entre 1 y 2), k es la cte. de Boltzmann, y T es la temperatura absoluta (en Kelvin). Al término kT/q se le llama habitualmente *voltaje térmico*.

En la **Figura 2.4** se han señalado además tres parámetros fundamentales para describir el comportamiento del dispositivo:

- La *corriente de cortocircuito* (I_{SC}) es el mayor valor de la corriente que puede obtenerse del dispositivo como generador, y que se produce cuando $V = 0$. En ese caso, y según (1).

$$I_{SC} \equiv I(V = 0) \quad (2)$$

- La *tensión de circuito abierto* (V_{OC}) es la mayor tensión que polariza el dispositivo cuando trabaja como generador, dada para $I = 0$. Aplicando esta condición en (1).

El *punto de máxima potencia* (P_M) es un punto de trabajo en el que la potencia entregada por la celda a la carga externa es máxima. Para una carga resistiva, la potencia P entregada viene dada por el producto: $P = V I$, y es la que se ha representado en la **Figura 2.4**. El punto de trabajo correspondiente, (V_M, I_M) define los valores nominales de la tensión y la corriente en el punto de máxima potencia (no confundir con tensión y corriente *máximas*), de forma que: $P_M = V_M I_M$

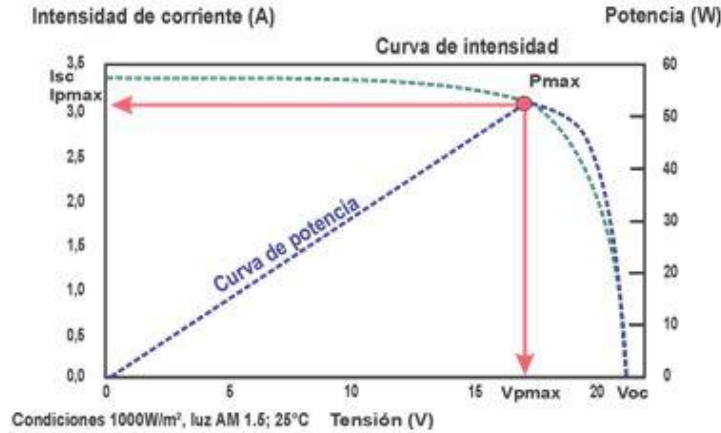


Figura 2.4 Curva característica IV de una celda fotovoltaica en iluminación con indicación de algunos de sus parámetros principales. La curva punteada representa la potencia P

Junto a estos parámetros de operación existen otros dos de enorme importancia:

- El *factor de forma (FF)*: es la relación entre la potencia máxima (o del producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia) y el producto I_{sc} y V_{oc} .

$$FF = \left(\frac{P_M}{I_{sc}V_{oc}} \right) = \frac{I_M V_M}{I_{sc}V_{oc}} \quad (4)$$

Y se usa para cuantificar la forma de la curva característica. Aunque en la práctica es siempre menor que la unidad, su valor es más alto cuando el codo de la curva es más prominente o agudo. Por lo general, un valor bajo de FF está asociado con la existencias de pérdidas en el dispositivo mientras que una celda de buena calidad suele tener valores de FF elevados ($FF > 0.70$).

La *eficiencia de conversión energética* (η), expresada como un porcentaje, viene dada por la relación entre la potencia eléctrica que puede entregar la celda y la potencia P_L de la radiación que incide sobre ella:

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{(I_M V_M)}{(P_L)} = \frac{(FF * I_{sc} V_{oc})}{(P_L)} \quad (5)$$

2.5 Modelo de una celda fotovoltaica

El proceso de modelado del comportamiento de una celda fotovoltaica se basa en su equivalencia hacia un circuito eléctrico y su posterior representación matemática.

Para ello, es necesario saber que cuando se conecta una celda solar a una resistencia de carga y se ilumina, circula una corriente I generada por la radiación solar, la cual se detalla con una fuente de corriente I_L dispuesta en paralelo **Figura 2.5**.

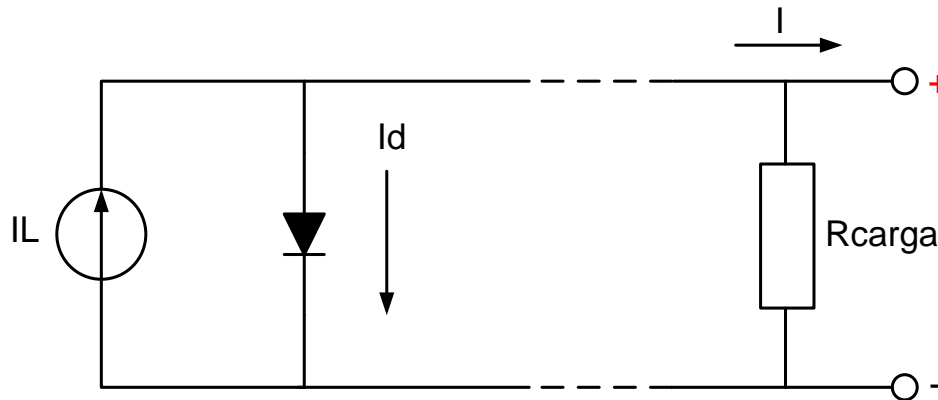


Figura 2.5 Circuito equivalente de una celda solar ideal

Aplicando las leyes de kirchoff al circuito obtenemos la expresión que nos describe su funcionamiento como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_D \tag{6}$$

Donde I_D es la corriente a través del diodo semiconductor, es una función del voltaje aplicado entre sus terminales, la cual se muestra en la ecuación (1), donde:

$$I_D = I_o \left[\left(e^{\frac{V}{V_T}} \right) - 1 \right] \tag{7}$$

Donde $\frac{V}{V_T} = \frac{qV}{kT}$ siendo V el voltaje aplicado al diodo V_T el voltaje térmico.

Este modelo básico, resulta insuficientemente para representar la celda. En ella existen unas corrientes de fuga de comportamiento lineal, que atraviesan la unión. Además, existe una caída de potencial proporcional a la intensidad que circula debida a la resistencia de los contactos y cables de conexión. Es por ello que debe mejorarse el modelo anterior añadiéndole una resistencia en paralelo que denominaremos R_P para representar esas corrientes de fuga. En serie con todo el circuito también dispondremos de una resistencia que denominaremos R_S que representara la resistencia de los contactos. Con todo esto el modelo queda como puede verse en la **Figura 2.6**.

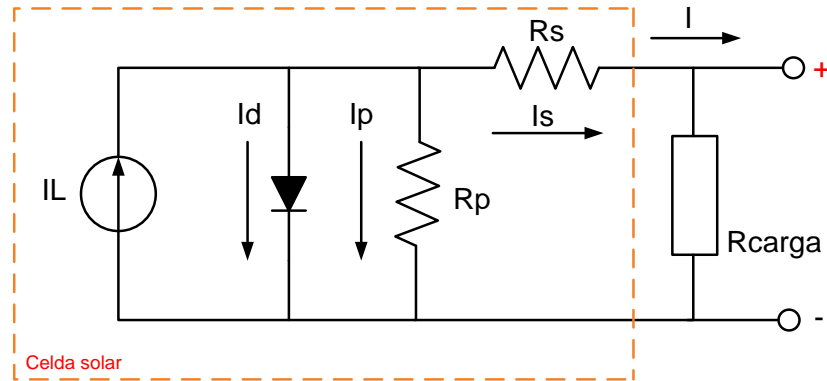


Figura 2.6 Celda solar real.

En este caso, la aplicación de las leyes de Kirchoff nos lleva a las expresiones siguientes:

$$I_L = I_D + I_P + I_S \quad (7)$$

$$I_S = I \quad (8)$$

De esta manera, sustituyendo (8) en (7), $I = I_L - I_D - I_P$ (9)

$$I_P = \frac{-V + IR_S}{R_P} \quad (10)$$

Por tanto, el modelo que representa a una celda solar real queda de la siguiente manera:

$$I = I_L - I_o \left[\left(e^{\frac{qV}{m k T}} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (11)$$

CAPÍTULO III

ANÁLISIS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE SEGUIDOR SOLAR PARA PANEL FV Y SISTEMA DE MONITOREO

3. *Introducción*

El diseño del seguidor solar consiste en el diseño mecánico y electrónico capaz de detectar la energía luminosa incidente entre dos fotorresistencias ubicadas en la misma posición que el panel solar, de tal manera que, cuando éstas reciban la máxima energía luminosa, el circuito pueda activar un motor, haciendo que éste actúe generando el torque necesario a una caja de transmisión formada por engranes acondicionada en la estructura del panel solar para orientarlo y mantenerlo en la trayectoria de este mismo. La **Figura 3.1** muestra un esquema básico del funcionamiento del sistema.

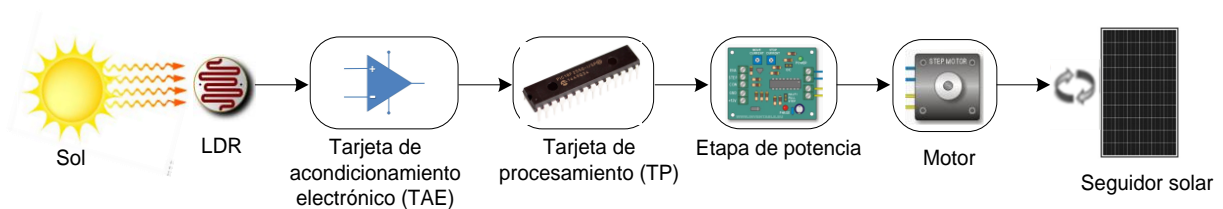


Figura 3.1 Esquema básico de funcionamiento del sistema seguidor solar

3.1 Sistema de generación FV para seguimiento solar

Se inicia describiendo una parte importante del sistema, la cual se refiere a los módulos fotovoltaicos, mismos que suministrarán energía a nuestro sistema. Se emplearon dos módulos con las mismas características aunque antes de eso se tuvieron algunas consideraciones respecto a la parte mecánica del seguidor. Está muy claro que dependiendo del número de módulos FV que conformen al sistema de generación de energía, será la cantidad de corriente o voltaje que se desee obtener, esto dependerá de las necesidades y especificaciones particulares del diseño.

Se cuenta con dos módulos FV y están formados por 36 celdas, cada una con las mismas características, es un arreglo de celdas en conexión paralelo y conexión serie respectivamente **Figura 3.2**.

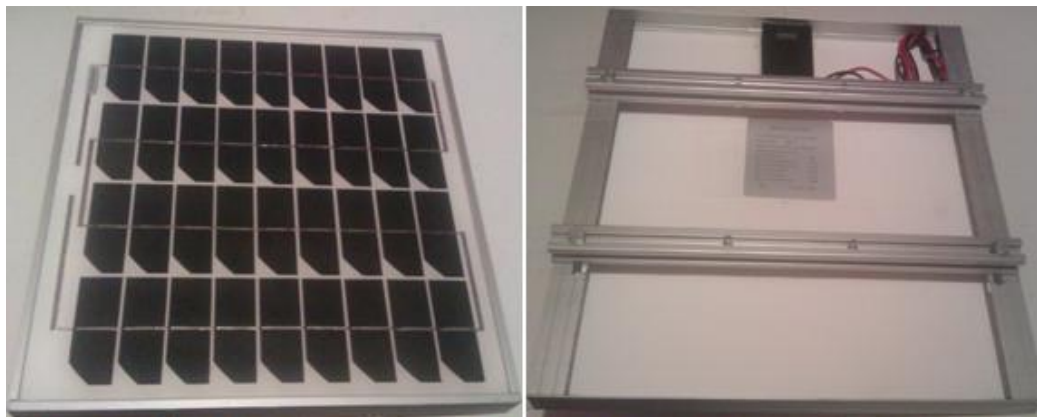


Figura3.2 Módulo fotovoltaico del sistema de generación

Los módulos FV mencionados anteriormente tienen características muy particulares. Estos parámetros se encuentran dentro de las condiciones denominadas SRC (condición de prueba estándar). Se evaluará la potencia, corriente, tensión generada por ambos módulos y de igual manera la temperatura alcanzada por los mismos.

El fabricante ofrece las siguientes características de los módulos en cuestión.

- Irradiación **1KW/m²**, (SRC).
- Potencia Máxima **10 W**.
- Tensión de operación **17.5 V**.
- Corriente de operación **0.58 A**.
- Corriente de corto circuito (I_{SC}) **0.64 A**.
- Tensión a circuito abierto (V_{OC}) **21.5 V**.
- Temperatura ambiente **25°C** (SRC).

3.2 Construcción de estructura para seguidor solar (ESS)

Para la realización de la estructura donde se montarán los paneles FV es necesario saber el peso estimado de los paneles FV y la inclinación que deberán de tener los módulos. La estructura se diseñó para soportar dos módulos **DBF10** como se muestra en la **Figura 3.2**. Para construirla se utilizó perfil cuadrado PTR galvanizado de 32x32 cm (**Figura 3.3**).

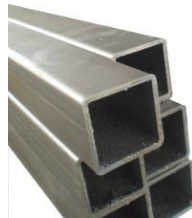


Figura 3.3 PTR galvanizado para la construcción de la estructura

La estructura fue ensamblada a manera que quedara espacio entre ambos módulos FV, separados uno de otro cuidando el libre movimiento del panel FV móvil (seguidor solar) tal como se muestra en la **Figura 3.4**. Como soporte base se utilizaron partes de antenas receptoras Dish (**Figura 3.5**) con su respectiva tornillería, se cortaron y soldaron a manera de adecuarlas a nuestro propósito.

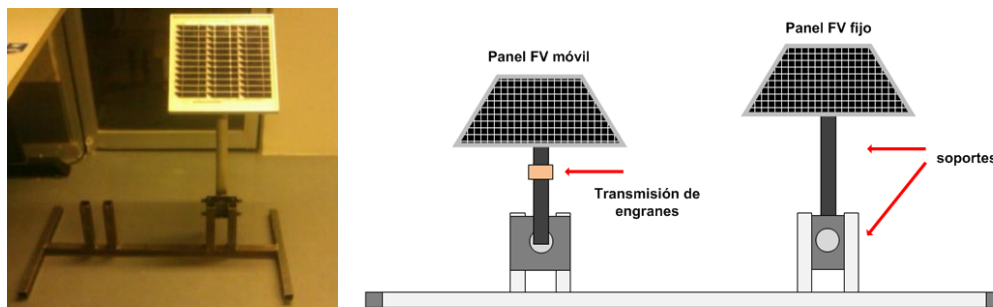


Figura 3.4 Estructura base para montaje de los PFV móvil y fijo

Cabe señalar que se tuvo cierto cuidado a la hora de cortar las piezas dado que se utilizaron herramientas de uso industrial y para la unión de las mismas.

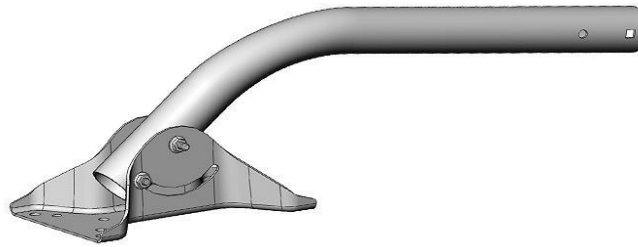


Figura 3.5 Piezas de antena Dish para fijar los módulos fotovoltaicos

Para el montaje de los paneles se optó por fabricar dos brazos para soportar los módulos, mismos que fueron elaborados con partes de antenas satelitales como se menciona anteriormente. **La figura 3.6**, muestra la distribución y armado del brazo-soporte para el panel FV fijo, aunque para el PFV móvil cambia un poco la estructura debido a que tiene que girar libremente.



Figura 3.6 Soporte para panel FV fijo

La estructura del brazo-soporte del PFV fijo es muy sencilla, dado que permite fijar manualmente el ángulo de inclinación del panel a petición del usuario con un simple ajuste de los torillos de sujeción colocados horizontalmente a éste.

3.3 Tipo de seguidor solar e implementación de parte mecánica

El seguidor que se implementará es un seguidor solar activo, es aquel que utiliza motores eléctricos, brazos electromecánicos con engranajes o tornillos sin fin mismos que son controlados por un circuito electrónico. Este seguidor se caracteriza por contar con seguimiento azimutal dado que gira sobre un eje horizontal moviéndose solamente de **este a oeste (Figura 3.7)**, y la superficie del módulo FV tiene una inclinación igual a la latitud del lugar donde éste se encuentra para obtener un mejor rendimiento a lo largo del año. El movimiento es determinado directamente por el valor del ángulo de azimut del Sol. Su diseño suele ser el más simple por lo que su uso se ha extendido entre los fabricantes [Eduardo Lorenzo, 2003]

El Sol se mueve 15 grados cada hora aproximadamente en el plano que contiene su trayectoria, el plano que dibuja la trayectoria del seguidor es igual al plano de la trayectoria del Sol, por lo que el seguidor solar se deberá moverse también 15° por hora, por lo que en total durante su periodo de trabajo se debe mover 120°, **Figura 3.7** [Cenidet].

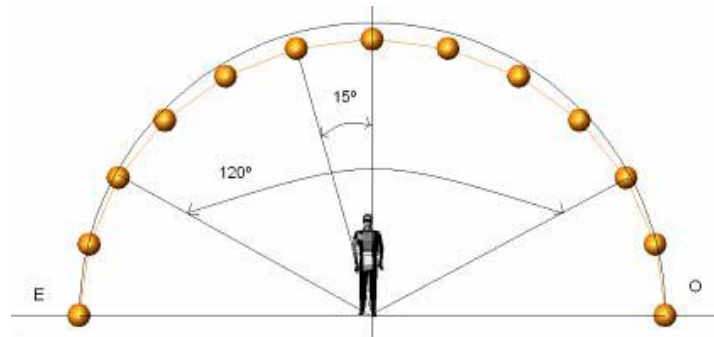


Figura 3.7 Ángulo de seguimiento del seguidor solar con eje horizontal [Cenidet]

Para determinar el ángulo de inclinación que tendrá cada uno de los Paneles FV, sobre todo, el sitio en particular donde se llevan a cabo las pruebas. La Ciudad de México, se ubica a **99°09' longitud oeste, 19°24' latitud norte** **Figura 3.8**, GMT – 6* y a una altura de 2.300 metros sobre el nivel del mar, la superficie aproximada es de 1.500 kilómetros cuadrados. Al norte este y oeste colindan con el Estado de México y al sur con el estado de Morelos.

* GMT es la sigla en inglés de 'Greenwich Mean Time', Hora del Meridiano de Greenwich. Es equivalente a UTC o Tiempo Universal Coordinado, y se utiliza como referencia de la hora internacional.

Tomando en cuenta lo anterior, el lugar donde se realizaron las mediciones fue en las instalaciones de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México plantel San Lorenzo Tezonco. Este lugar está dentro de las coordenadas geográficas especificadas a continuación [INEGI].

- Latitud  19° 18' 00" Norte
- longitud  99° 07' 25" Oeste
- Zona horaria  UT-5:00

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía/INEGI



Figura 3.8 Latitud y Longitud de la ciudad de México

Teniendo estos datos es posible determinar el ángulo de inclinación de ambos paneles FV sobretodo fijar la inclinación del panel FV móvil.

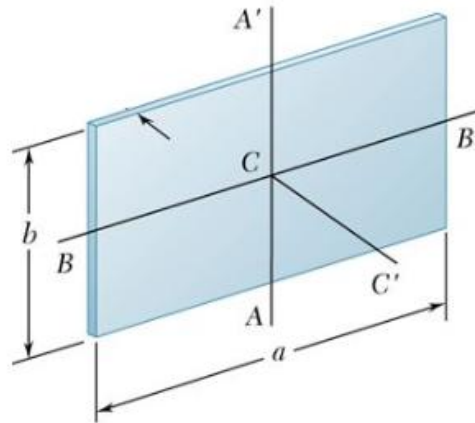
Como se mencionó en párrafos anteriores, necesitamos mover un PFV acoplado a una base metálica, teniendo una masa neta de **2.650 Kg** y tomando en cuenta que el PFV-móvil estará montado sobre un soporte metálico que girará alrededor de un eje fijo como se muestra en la **Figura 3.9**. Aunado a esto, se necesita determinar el momento de inercia correspondiente a una placa equivalente al módulo FV que en este caso será un cuerpo rígido. El momento de inercia ***I*** de un cuerpo alrededor de un eje dado es una medida de su inercia rotacional: cuanto mayor sea el valor de ***I***, más difícil será cambiar el estado de rotación del cuerpo (panel FV-móvil).



Figura 3.9 Soporte metálico para eje de giro

Supongamos una placa sólida rectangular (en este caso nuestra placa sólida será el panel FV) que gira sobre un eje fijo (**Figura 3.11**) y que tenemos diferentes ejes AA', BB' y CC', en este caso tomaremos como referencia el eje de giro BB' (**Figura 3.10**) [Marcelo Alonso].

Figura 3.10 Diferentes ejes de giro para una placa sólida



Fuente: Marcelo Alonso. Volumen I -Mecánica

Tomando en cuenta los datos anteriores, se realizó la siguiente memoria de cálculo. Sabemos que la magnitud de 'a' del panel FV-móvil (**Figura 3.10**) es:

$$a = 0.350 \text{ m}$$

Sabiendo que el momento de inercia para una placa con eje de giro fijo en 'a', es:

$$I = \frac{1}{12} Ma^2 \text{ [Kg m}^2\text{]} \quad (23)$$

Sustituyendo valores el momento de inercia resultante es:

$$I = \frac{1}{12} (2.650 \text{ Kg})(0.350 \text{ m})^2$$

$$\therefore I = 0.027 \text{ [Kg m}^2\text{]}$$

Con éste valor, se puede determinar que el momento de inercia es relativamente pequeño dado que la masa no es muy grande en consideración a otros modelos de PFV y por tanto no costará trabajo al motor y a la transmisión de engranes cambiar el estado de rotación del PFV-móvil.

3.4 Momento torsión del PFV-Móvil

Al aplicar el análogo rotacional de la segunda ley de newton $F = (m \cdot a)$ para un cuerpo rígido, esto quiere decir que si el eje permanece fijo con respecto al cuerpo, el momento de inercia permanece constante. Se consideró al panel FV-móvil como una partícula de masa m (Figura 3.11 (b)) que, mediante la aplicación de una fuerza, se acelera y describe una trayectoria circular. Se sabe que el torque τ equivale al producto del radio por la magnitud de la fuerza perpendicular al brazo de palanca. Siendo F la fuerza que genera el panel FV debido al peso de éste mismo, $r = 0.1 \text{ m}$ la distancia que hay entre el eje de giro y los soportes (Figura 3.11 (a)) la siguiente ecuación relaciona estos parámetros para determinar el torque.

$$\tau = rF \tag{24}$$

$$F = (m \cdot a) \tag{25}$$

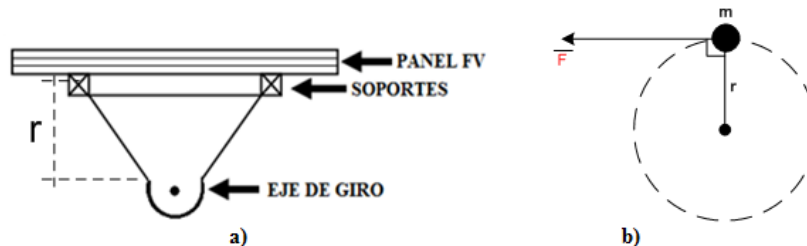


Figura 3.11 a) Eje de giro del PFV-móvil. b) Diagrama de cuerpo libre

Por lo tanto, sustituyendo los valores antes mencionados en las ecuaciones (24) y (25) se obtuvo el valor del torque que producirá el panel FV-móvil de la siguiente manera.

$$\mathbf{F} = (m \cdot a) = (2.650 \text{ Kg}) \cdot (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$\mathbf{F} = 25.971 \text{ [N]}$$

Este valor de F corresponde al peso que tiene el panel FV-móvil medido en Newton.

Y para el torque se tiene que:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{rF} = (0.1 \text{ m}) \cdot (25.971 \text{ N})$$

$$\boldsymbol{\tau} = 2.597 \text{ [Nm]} = 0.264 \text{ Kg-m}$$

Donde 2.597 [Nm] es el la magnitud del torque que producirá el panel móvil.

3.5 *Implementación de la parte mecánica. Transmisión de engranes*

Existen gran variedad de transmisiones de engranes para mover cargas pesadas y generar torques adecuados a cada necesidad, se adaptó un tren de engranes mismo que se consiguió en un depósito de motores viejos. Consta de un sistema de engranes para disminuir la velocidad del PFV-Móvil a un giro más lento (que es útil en la mayoría de las aplicaciones donde se requiere una velocidad muy lenta) que a su vez aumenta el “par” en el último engrane mismo que va acoplado a una banda de transmisión que hace posible el posicionamiento del panel FV.

La transmisión de engranes (**Figura 3.12**) mueve una masa neta (PFV-Móvil) de **2.650 Kg** que en la trayectoria solar mantendrá constante su movimiento sin que su estructura sufra cambios debido a la rotación del panel móvil.

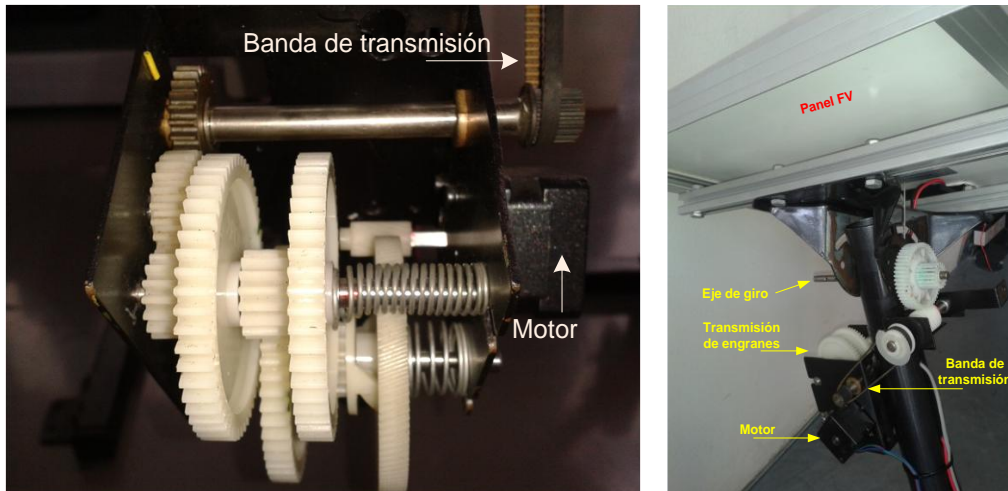


Figura 3.12 A la izquierda la transmisión de engranes, a la derecha el montaje completo

3.6 Relación de engranes de la transmisión



Figura 3.13 Engranes acoplados entre sí

Los engranajes son ruedas dentadas que encajan entre sí (**Figura 3.13**). Un tren de un sistema de engranes consiste en la combinación de dos o más engranes. Los engranes tienen la ventaja de que transmiten movimiento circular entre ejes muy próximos y además ejercen mucha fuerza (torque). La relación de transmisión r_t de un sistema de engranes se puede calcular del siguiente modo:

$$r_t = \frac{D_2}{D_1}$$

Siendo:

D_1 = el diámetro del engrane 1 o de entrada

D_2 = el diámetro del engrane 2 o de salida

O también como...

$$r_t = \frac{n_2}{n_1}$$

Siendo:

n_1 = velocidad (rpm) del engrane de entrada

n_2 = velocidad (rpm) del engrane de salida

Hay dos tipos de sistemas de transmisión por engranes.

- **Reductor:** En este caso la velocidad del engrane de salida es menor que la del engrane de entrada.
- **Multiplicador:** En este caso la velocidad del engrane de salida es mayor que la del engrane de entrada.

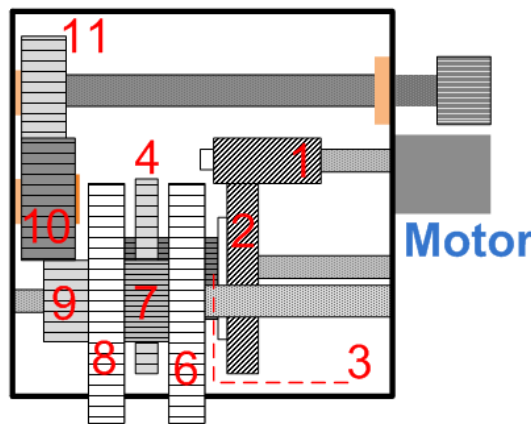


Figura 3.14 Distribución de engranes para cálculo de relación de transmisión (vista superior)

La **Figura 3.14** muestra la organización de la transmisión de engranes y se enumeran desde el engrane motriz (1) hasta el engrane de salida que produce el torque para mover el PFV- móvil que cuenta con una masa neta de **2.650 Kg**. La **Tabla 3.1** muestra los diámetros de cada uno de los engranes que constituyen la transmisión.

# de engrane	Diámetro (cm)
1	0.91
2	5.94
3	1.88
4	5.56
5	1.71
6	5.55
7	1.77
8	5.58
9	1.77
10	2.55
11	2.65

Tabla 3.1 Diámetros de cada uno de los engranes que integran la transmisión

La correspondencia de engranes y su relación de transmisión de muestra en la **Tabla 3.2**.

Correspondencia	r_t
1⇒2	6:1
3⇒6	2:1
4⇒7	3:1
5⇒8	3:1
9⇒10	1.5:1
10⇒11	1:1

Tabla 3.2 Correspondencia de engranes y su relación de transmisión

La relación de transmisión del engrane de entrada (1) con el engrane se salida (11) se determinó (por experimento) a partir de las revoluciones por minuto del engrane de entrada, de esta forma se tiene que 400 rpm del engrane ‘1’ equivalen a 1rpm del engrane ‘11’, dada esta relación de engranes, se tiene como resultado que se cuenta con una transmisión reductora.

$$r_t = \frac{n_{11}}{n_1} = \frac{1}{400}$$

3.7 Cálculo del torque que produce la transmisión de engranes

Para conocer el torque generado por la transmisión de engranes es necesario conocer y determinar el tipo de actuador eléctrico a utilizar para mover el PFV-móvil, no sin antes tener en cuenta las siguientes características generales:

- Funcionamiento con la energía disponible, energía eléctrica de corriente directa que

será suministrada por el mismo sistema en este caso por los mismos PFV en conjunto con un pequeño banco de baterías.

- Idóneo para ejercer movimientos pequeños sin la incorporación de demasiados elementos mecánicos.
- Bajo consumo de corriente.

Con base en estas tipologías y la información obtenida de algunos motores utilizados para la orientación y control de seguidores solares que se ofertan en la actualidad, se optó por el uso de un motor a pasos bipolar. El modelo utilizado es el ST35ST28-0534 (**Figura 3.15**), de la compañía POLOLU [www.pololu.com]. Éste tipo de motor muy utilizado en aplicaciones donde se necesita un torque adecuado para mover ciertas cargas. Por otro lado el consumo de corriente no es tan elevado y su voltaje de alimentación está en el rango de 5 V- 10 V como máximo.



Figura3.15 Motor a pasos bipolar ST35ST28-0534

Los motores paso a paso conjuntan las características de los motores de reluctancia variable y de imán permanente; cuentan con un imán permanente inserto en tapones de hierro dentados (**Figura 3.15**). Los ángulos de paso típicos son de 0.9° y 1.8° . Si un motor tiene fases n en el estator y m dientes en el rotor, el número total de pasos por revolución es nm .

El motor utilizado cuenta con las siguientes características:

- Tamaño: 35mm x 28mm cuadrados (sin incluir el eje)
- Corriente: 500 mA
- Tensión nominal: 10 V
- Resistencia: 20 Ω por bobina
- Par de retención: 1000 g-cm = 0.0980665 N-m = 0.01 Kg-m
- Pasos por revolución: 200

- Ángulo de paso: 1.8°

Para conocer el torque que ejercerá la transmisión de engranes es necesario determinar para éste motor la potencia en HP y las revoluciones por minuto. Respecto a las relación de engranes, el engrane de salida gira a 1rpm y teniendo en cuenta las características del motor, se determina el torque de salida de la siguiente manera [P.E].

$$\frac{\text{Potencia en HP} * 716}{\text{velocidad de giro de la flecha (rpm)}} = \text{Par [Kg - m]} \quad (26)$$

Se tiene que, tomando la corriente real que consume el motor y dado el voltaje de alimentación de éste, se tiene lo siguiente.

$$P = (9V)(535 \text{ mA}) = 4.815 \text{ [W]}$$

Esta potencia equivale a 0.006457 HP. Sustituyendo estos valores en la ecuación (26), se tiene que el torque generado por la transmisión de engranes será:

$$\frac{0.006457 * 716}{1 \text{ (rpm)}} = 4.623 \text{ [Kg - m]} = 45.338 \text{ [N-m]}$$

Por tanto, se determina que la transmisión de engranes puede proporcionar el torque suficiente (dado que está muy por encima del factor de seguridad que por lo regular es de 2) para mover al Panel FV-móvil con todo y su estructura. El torque de salida tiene un FS (Factor de Seguridad) de 15 respecto al del panel FV-móvil, esto es simple, se puede montar un panel FV de hasta 10 Kg de peso. Así es que sin ningún problema puede mover tal carga.

3.8 Implementación de la tarjeta electrónica para la etapa de potencia

Haciendo énfasis en un aspecto importante que es el consumo de corriente del motor a pasos y sabiendo que cada fase de este motor consume 500 mA a una tensión máxima de 10 V, y tomando en cuenta el voltaje de alimentación, se consultaron varias fuentes acerca de dispositivos de conmutación y potencia, se utilizó un circuito integrado capaz de alimentar motores a pasos bipolares, éste puede entregar una corriente máxima de 2 A en la salida de sus terminales. El circuito integrado, es un L298 construido por SGS-Thomson. Es en realidad es el driver del motor, ya que recibe todas las secuencias lógicas para manejar los 8 transistores de potencia situados en su interior **Figura 3.16**.

Estos transistores tienen como misión alimentar a las bobinas A-B y C-D del motor conectadas a los pines OUT1, OUT2, OUT3 y OUT4 respectivamente (**Figura 3.16**).

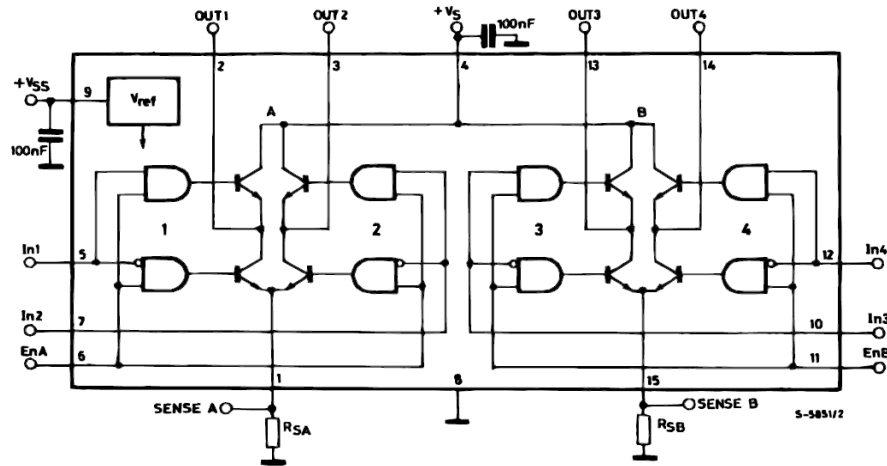


Figura 3.16 Esquema sinóptico del CI L298 [Thompson]

El L298 es un circuito integrado monolítico multiwatt Power-SO20. Este circuito manifiesta una tensión alta, diseñado para aceptar niveles lógicos TTL estándar y manejar cargas inductivas tales como relés, solenoides, motores a pasos y de DC. Dos entradas de habilitación se proporcionan para activar o desactivar el dispositivo independientemente de las señales de entrada como se muestra en la **Figura 3.16**. Como principales características, puede operar suministrándole un voltaje máximo de hasta 46 Volts.

El L298N integra un doble puente en H. Este circuito de tecnología bipolar es capaz de suministrar una corriente de hasta 2 A con disipador externo, pero para las corrientes que se van a manejar inferiores a 1 A es pertinente acoplar uno. Los diodos Schottky (o de barrera) 1N5819 establecen los caminos de recirculación de corriente indispensables en los modos de chopeado de corriente que realiza el L297 para el control del puente en H. El diodo Schottky es un diodo que proporciona conmutaciones muy rápidas entre los estados de conducción directa e inversa (menos de 1ns en dispositivos pequeños) y que tiene muy bajas tensiones de umbral (del orden de 0.2 V). Estas familias de diodos, son utilizadas ampliamente en fuentes de potencia y sistemas digitales.

Para la construcción de la tarjeta de la etapa de potencia fue necesario implementar el circuito que proporciona el fabricante en base a las hojas de especificaciones (**Figura 3.17**).

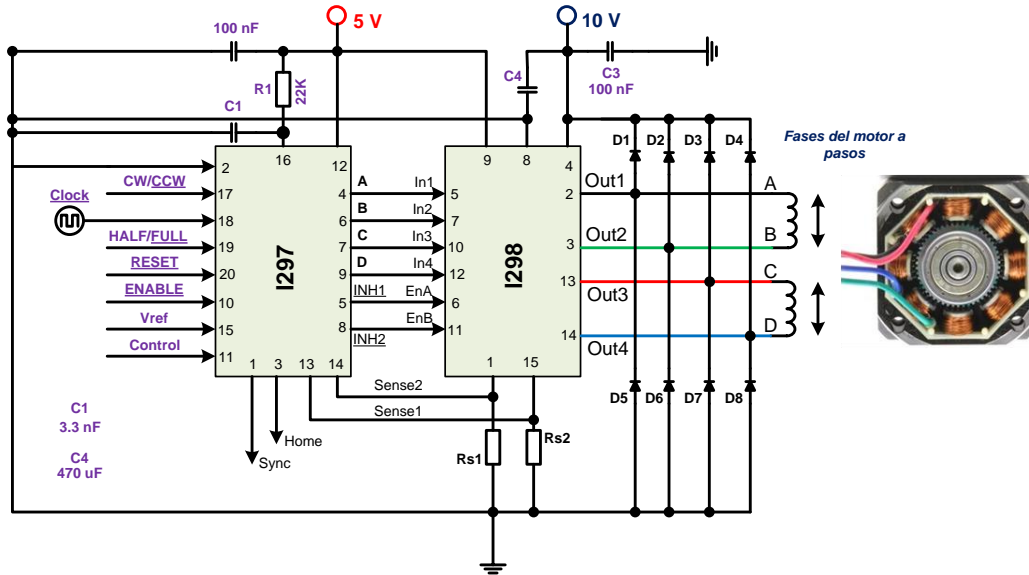


Figura 3.17 Esquema eléctrico de la etapa de potencia [SGS-Thomson]

El esquema anterior también cuenta con un CI L297 (Figura 3.18), diseñado por SGS-Thomson. Este circuito integrado, gracias a su lógica interna, presenta sobre sus salidas 4, 6, 7 y 9 según el modo de funcionamiento que preseleccionemos, (paso completo, con 1 o dos fases activas, o medio paso) todas las combinaciones necesarias para manejar las parejas de bobinas A-B y C-D de un motor a pasos bipolar.

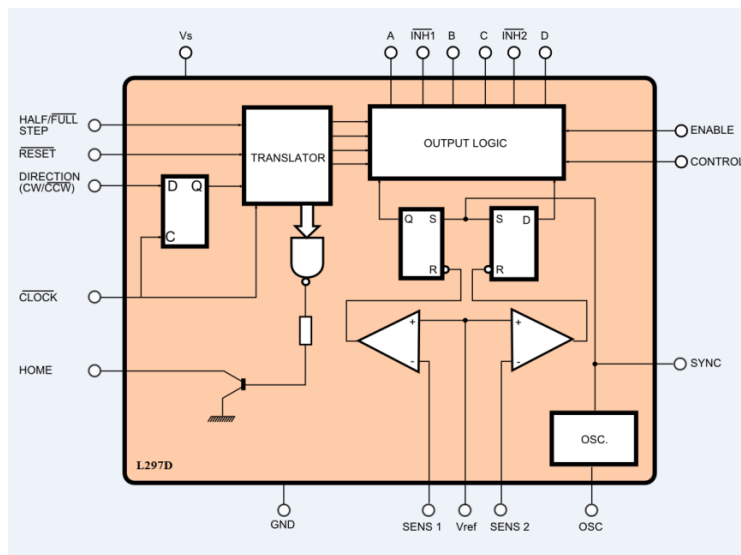


Figura 3.18 Esquema sinóptico del CI L297D [Thomson]

3.8.1 Modos de funcionamiento (L297)

Los modos de funcionamiento son tres, donde las posiciones del motor (códigos emitidos) se harán en el paso del estado bajo al estado alto de la señal CLOCK.

La primera posición (o posición índice) es la que hace ABCD=0101 que será al activar el pin de RESET. El sentido de giro del motor se determinará mediante el pin CW/CCW* (clockwise/counter clockwise) aplicando un nivel "H" (alto), y hará girar el motor en sentido horario, y con un nivel "L" (bajo) girará en sentido anti horario.

El pin CONTROL determinará que el circuito de chopeado actúe sobre las salidas A, B, C y D (pines 4, 6, 7, 9) o las INH1 e INH2 en función de la forma de uso del motor, respecto de la recirculación de la corriente por el puente (de forma rápida o lenta).

3.8.2 Medio paso (Half Step-Mode)

Los modos de funcionamiento del motor se determinarán en función del pin 19 (HALF/FULL), así el modo *medio paso* se ejecutará al poner ésta terminal a nivel "H" como se muestra en la **Figura 3.18**.

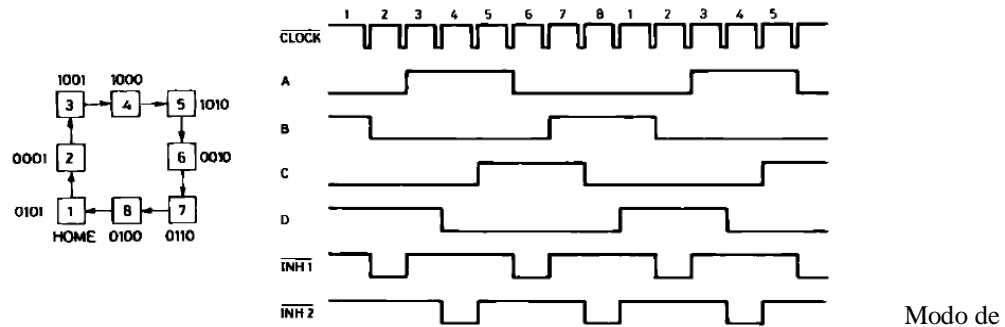


Figura 3.18
 medio paso

Modo de

3.8.3 Paso completo con 2 fases activas (Full-Step)

El modo paso completo con 2 fases activas será ejecutable cuando el pin HALF/FULL esté a nivel "L", quedando las salidas INH1* e INH2* a nivel H, realizando el cambio y manteniendo los estados impares (1, 3, 5 o 7), como se muestra en la **Figura 3.19**.

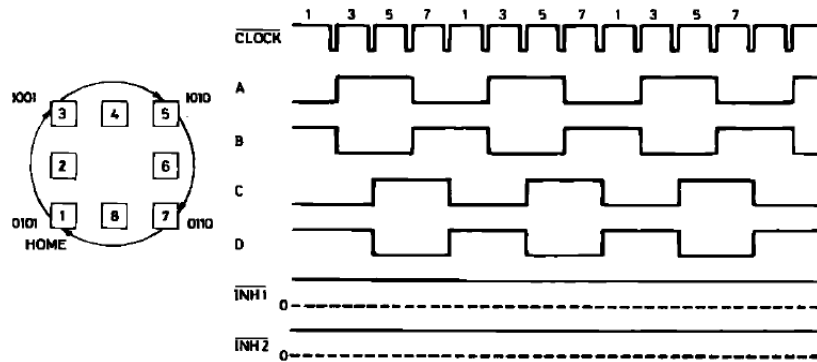


Figura 3.19 Secuencia de estados y formas de onda se salida para las dos fases en secuencia

3.8.4 Paso completo con una fase activa

Por último, el modo paso completo con una Sola fase activa será ejecutable al llevar a nivel "L" el pin HALF/FULL, cuando el chip se encuentre generando una posición par (2, 4, 6 u 8) como se muestra en la **Figura 3.20**.

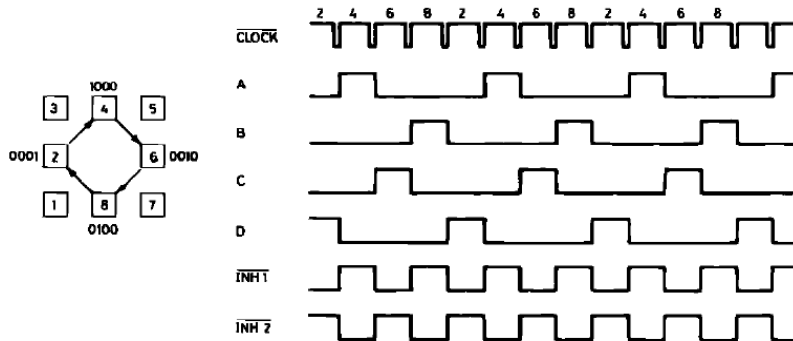


Figura 3.20 Secuencia de estados y formas de onda se salida para las una fase activa

3.8.5 Tarjeta electrónica (PCB) para la etapa de potencia

Como se mencionó anteriormente, los CI encargados de poner en movimiento a nuestro panel FV- móvil tendrán que estar integrados en una sola tarjeta (Board) misma que se llevó a cabo en la plataforma de Proteus 8.0 tanto la simulación, diagrama de conexiones y el diseño de la PCB que se muestra en la **Figura 3.21**

En la **Figura 3.22** se muestra el diseño de la tarjeta electrónica vista desde la perspectiva 3D y su distribución de componentes electrónicos.

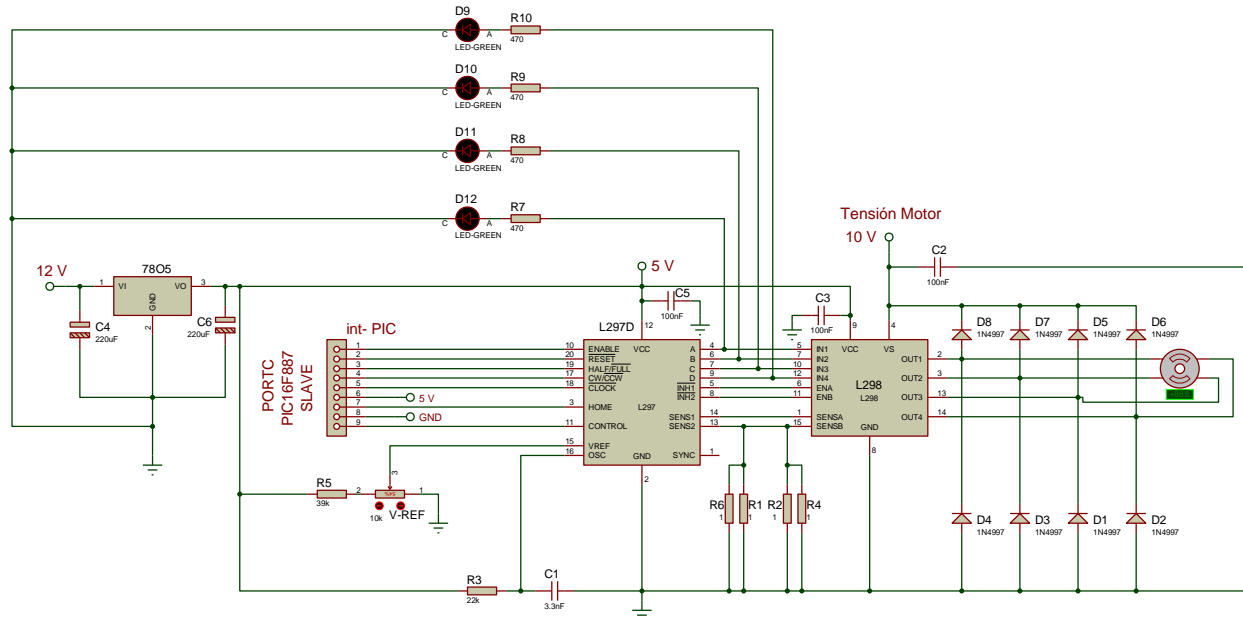


Figura 3.21 Diagrama de conexión para simulación e implementación de la PCB

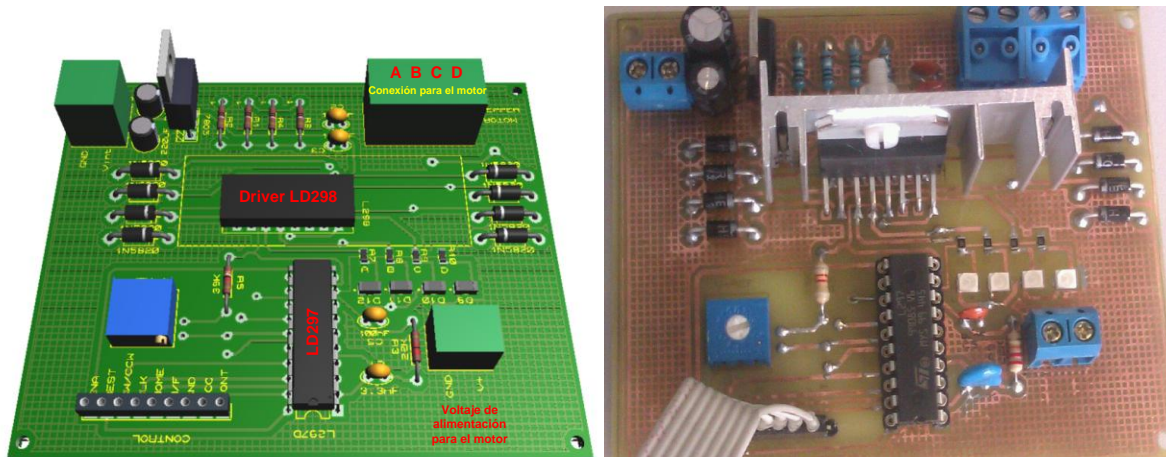


Figura 3.22 Vista 3D y real de la tarjeta electrónica de potencia

3.9 Sistema de acondicionamiento para monitoreo y adquisición de datos

El sistema de monitoreo envía los datos a una PC para su almacenamiento y manipulación, la interfaz entre la adquisición de datos y la computadora se realizó con una tarjeta de adquisición de datos **NI USB-6009** de National Instruments, capaz de leer ocho entradas analógicas, se utilizó una entrada por variable física, temperatura, voltaje de los PFV y corriente generada por estos mismos.

3.9.1 Sistema de Medición de voltaje

Las entradas analógicas leen voltaje en rango de -10 a 10 Volts. El diagrama de la **Figura 3.23** muestra la configuración de los dispositivos utilizados para adquirir los voltajes del PFV móvil y el PFV fijo siendo la misma configuración de dispositivos para ambos casos.

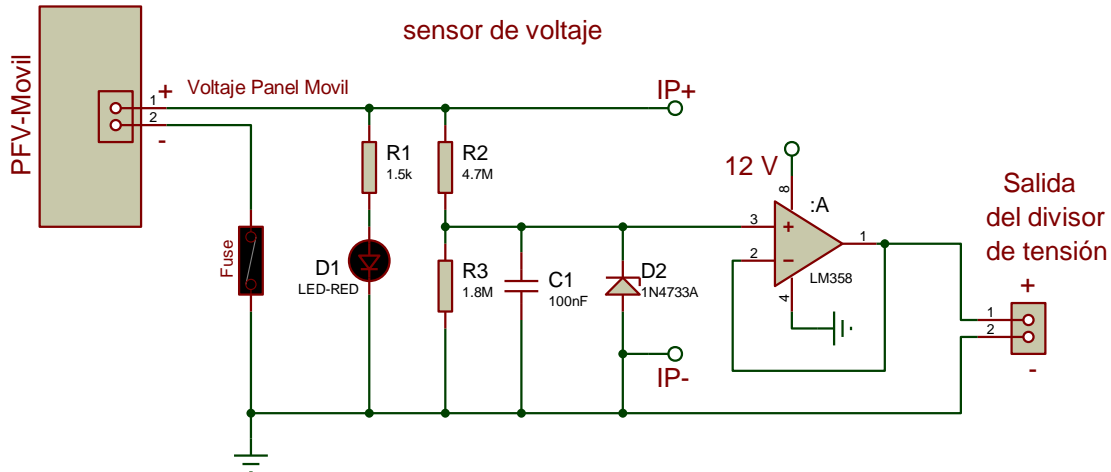


Figura 3.23 Circuito de acondicionamiento para adquisición de voltaje del panel FV móvil y Fijo

Para la medir el voltaje en las terminales del panel FV se utiliza divisor de voltaje el cual consta de dos resistencias conectadas en paralelo (**Figura 4.30**). La salida del divisor se conecta a un circuito básico seguidor de voltaje, se utilizó un CI LM358 como buffer con el único fin de acoplar impedancias, ésta configuración evita el efecto de carga en el circuito y por consiguiente el voltaje y la corriente no disminuye en el circuito, ya que éste toma la tensión de la fuente de alimentación del operacional y no de la señal que se está introduciendo.

3.9.2 Diseño del divisor de tensión para la medición de voltaje

Para el diseño de este divisor de tensión, hay que considerar principalmente que el circuito como tal debe consumir una cantidad de corriente muy pequeña a tal manera que no disminuya el flujo de corriente que el PFV está generando. Además, el divisor de voltaje debe entregar en su salida un valor máximo de 5 V esto se logra colocando a la salida del divisor un diodo zener de 5.1V en paralelo, además de mantener un voltaje constante, sirve como protección hacia la tarjeta de adquisición de datos esto en caso de que hubiese una sobre tensión superior a la que soporta la tarjeta.

Dadas las condiciones establecidas y considerando que el sistema debe estar diseñado para paneles que entreguen un voltaje de circuito abierto (tensión máxima que puede proporcionar el panel sin carga) de 21.5 V a su salida. Es conveniente diseñar un divisor que reduzca por lo menos en 4 veces el voltaje, con lo que se tendrá un voltaje máximo de 5 V. Por lo tanto, la ecuación que determina nuestro voltaje de salida y las resistencias a utilizar será:

$$V_{\text{salida}} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{\text{panel}} \quad (27)$$

Se asume que se debe tener una salida máxima en el peor de los casos de 5 V cuando el panel entregue su voltaje máximo que en este caso es 20 V.

Fijamos el valor de R_2 para determinar R_3

$$5 \text{ V} = \frac{R_3}{4.7 \text{ M}\Omega + R_3} 20 \text{ V}$$

Simplificando y despejando R_3 tenemos como resultado:

$$\frac{V_{\text{salida}} R_2}{(V_{\text{panel}} - V_{\text{salida}})} = R_3$$

Y tenemos que $R_3 = 1566666 \Omega \approx 1.5 \text{ M}\Omega$, que es el valor comercial.

Donde se asume que $R_3 = 1.5 \text{ M}\Omega$ y $R_2 = 4.7 \text{ M}\Omega$. Adicionalmente, se debe calcular la corriente que circulará a través del divisor de voltaje, por lo que tenemos que:

$$I_{\text{max-div}} = \frac{20}{4.7 \text{ M}\Omega + 1.5 \text{ M}\Omega} = 3.191 \mu\text{A}$$

Esta corriente se puede considerar despreciable para fines de esta aplicación dado que no afectará a la medición de la corriente, teniendo este dato podemos calcular la potencia de cada resistencia de la siguiente manera:

$$P_R = (I_{\text{max-div}})^2 * R$$

Donde

$$P_{R_2} = 0.047 \text{ mW}$$

$$P_{R_3} = 0.015 \text{ mW}$$

Además se ha colocado un capacitor en la salida del divisor de tensión para filtrar algún tipo de ruido que pueda presentarse.

3.9.3 Sistema de Medición de corriente

La medición de corriente para este sistema es uno de los factores más importantes a tomar en cuenta, ya que de sus valores dependen las curvas características de un panel FV.

Debido al alcance del proyecto y lo que este contempla, se determinará la cantidad de corriente generada por los paneles solares ya sea el móvil (seguidor) y el panel fijo. Gracias a la hoja técnica de especificaciones de nuestros paneles solares, se sabe que la corriente máxima que se puede obtener es de alrededor de unos 500 mA.

Sin embargo se pueden presentar radiaciones mayores principalmente es al medio día en que se generan corrientes un poco mayores a los 900 mA y en el mejor de los casos se pueden obtener corrientes de hasta 1 A.

Como la corriente a medir en los distintos estados de carga del PFV no es relativamente tan alta a comparación de otros PFV, y ante la posibilidad de condiciones de muy baja radiación o conexión de un panel de baja potencia que genere corrientes pequeñas (que es nuestro caso) es necesario tener una buena resolución en la medida de este tipo de corrientes, por lo tanto se opta por usar dos sensores de efecto hall.

Se decide por el uso de dos sensores de efecto hall, ya que mediante un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, y ante la circulación de corriente crea un voltaje de salida proporcional. La principal ventaja del uso de este tipo de sensores es que no tiene influencia en el camino de la corriente, ya que no es necesario colocar algún elemento resistivo, pues la medición es de tipo magnética.

Se escoge el sensor de corriente ACS711EX que es acondicionado para medir la corriente generada por el panel móvil (seguidor solar) y el sensor de corriente ACS712 para el panel fijo a consecuencia de haberse agotado el ACS711EX en el lugar donde se compraron.

3.9.4 Sensor de corriente ACS711EX y ACS712

Este sensor se puede alimentar a una tensión que va desde 3 V a 5.5 V y tiene una sensibilidad de salida de 45 mV / A cuando es Vcc 3.3 V (o 68 mV / A cuando Vcc es 5 V). Diseñado para la corriente de entrada bidireccional a partir de -31 A a 31 A (sensor IC puede tolerar 100 ms picos de corriente transitoria hasta 100 A). El sensor emite una tensión analógica que es linealmente proporcional a la corriente de entrada. La tensión de salida de reposo es $V_{cc} / 2$ y emite cambios por 45 mV por Amper de corriente de entrada (cuando $V_{cc} = 3,3$ V), con el aumento de corriente positiva, tal sensor se muestra en la **Figura 3.24**.

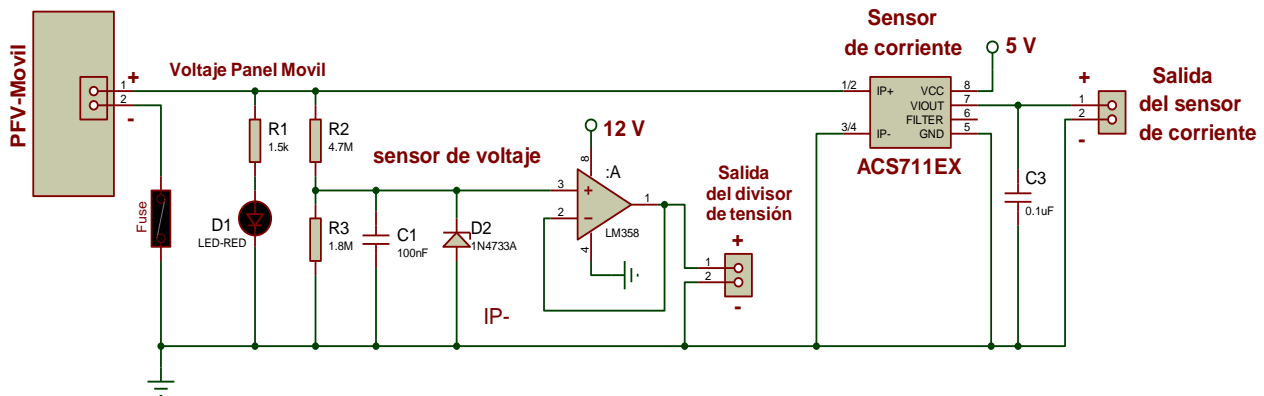


Figura 3.24 Diagrama de conexión del sensor de corriente y el panel FV

Al igual que el sensor anterior, la conexión del ACS712 con el panel FV-fijo es la misma que la **Figura 3.24** aunque tiene diferentes características mismas que se enumeran a continuación.

- Baja resistencia al paso de corriente (≈ 1.2 m Ω)
- Voltaje de operación de 5V
- 66-185 mV / A de sensibilidad de salida
- tensión de salida proporcional a las corrientes AC o DC

Este sensor es un CI de montaje superficial, que se le encuentra comercialmente en forma de placa (**Figura 3.25**). Es un sensor de efecto Hall que brinda medición precisa de corriente tanto para señales alternas y continuas. El ACS712 brinda una salida de voltaje que varía linealmente con la corriente sensada. Éste dispositivo requiere 5V para alimentación y un par de capacitores de filtrado.

3.11 Sensores fotorresistivos (LDR)*

LDR es el acrónimo de *Light Dependent Resistance*, dispositivo cuya resistencia óhmica está en función de la iluminación recibida sobre su superficie (fotorresistencia) como se muestra en la **Figura 3.31**. Su composición consta de materiales que poseen muy pocos electrones libres cuando se encuentran en condiciones de oscuridad, pero el número de electrones libres se incrementa de una forma considerable cuando el dispositivo es iluminado.

Figura 3.31 Fotorresistencia (LDR)



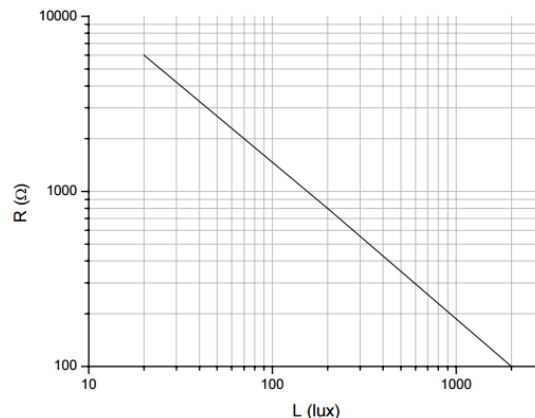
Fuente: <http://electronicxonline.blogspot.mx>

La **Figura 3.32** muestra cómo se comporta una fotorresistencia en presencia de luz. Cuando no incide luz (que medimos en forma de Lux), la resistencia equivalente del sensor LDR es muy alta, y a medida que el brillo aumenta, la resistencia equivalente disminuye.

En consecuencia, la conductividad crece y por tanto la resistencia óhmica disminuye. La dependencia entre resistencia e iluminación es de la forma:

$$R = AL^{-\alpha}$$

Figura 3.32 Dependencia entre iluminación y resistencia para una LDR típica.



Fuente:

<http://electronred.iespana.es/electronred/molineales.htm>

*[Clavijo Mendoza]

4.3 Diseño y acondicionamiento electrónico de sensores fotosensibles

El diseño consiste en un circuito electrónico que acondiciona las señales de voltaje provenientes de las fotorresistencias. Un par de detectores de nivel de voltaje positivo de analizan las señales de voltaje de entrada. El circuito estará basado en fotorresistencias ubicadas de tal manera que sólo puedan proporcionar un valor de tensión determinado estando colocadas ambas frente al Sol. En la **Figura 3.33** se muestra la distribución de los sensores foto-resistivos.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.33 Disposición de los fotorresistores para la captación de luz solar

Para poder medir las señales eléctricas con un sensor LDR tenemos que hacerlo con un divisor de tensión con una resistencia fija o variable, siguiendo el siguiente conexionado **Figura 3.34**.

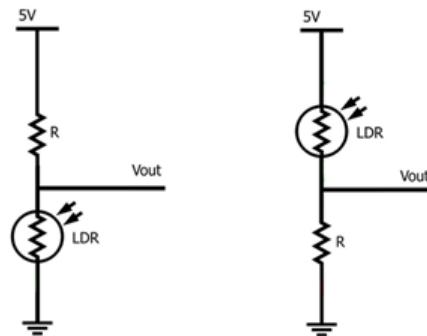


Figura 3.34 Configuración Pull-Up (izq) y Pull-Down (Der) [Clavijo Mendoza]

En ésta aplicación se utilizó la configuración pul-Down que trabaja como sensor de luz. Pero se analizaron las dos configuraciones para su mejor entendimiento.

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

Con la configuración de Pull-Down V_{out} será:

$$V_{out} = \frac{(R)}{(R+LDR)} (V_{cc}) \quad (28)$$

La tensión V_{out} es inversamente proporcional a la resistencia de la LDR.

Con la configuración de Pull-Up V_{out} será:

$$V_{out} = \frac{(LDR)}{(R+LDR)} (V_{cc}) \quad (29)$$

La tensión V_{out} es proporcional a la resistencia de la LDR.

Basando el diseño de este acondicionamiento en la ecuación (28) a manera de que las fotoceldas trabajen como sensor de luz, se propone un V_{out} de 4.5 V a manera de tener valores TTL a la salida, un voltaje de alimentación de V_{cc} de 5V y teniendo fotoceldas de un valor comercial de 100 K Ω , se despeja R dando como resultado lo siguiente.

$$R = \frac{(4.5)}{(5)} (100 \text{ k}\Omega) = 900 \text{ K}\Omega \approx 100 \text{ K}\Omega$$

Pero dentro de las resistencias comerciales no se encuentra este valor, así es que aproximamos a un valor comercial que es de 100K Ω .

El circuito básico se puede apreciar en la **Figura 3.35**. Analizándolo se puede deducir que se trata de un detector de nivel con referencia de voltaje ajustable. Simplemente un *Circuito Acondicionador de Señal* (CAS). Se utilizó un CI LM358 como buffer (seguidor de voltaje) acoplado a la salida de las LDR's con el único fin de acoplar impedancias ya que éste toma la tensión de la fuente de alimentación del operacional y no de la señal que se está introduciendo, si se diera el caso en que la señal llegara con poca corriente, el circuito seguidor compensará esa pérdida con la fuente de alimentación del amplificador operacional.

Sumando estas configuraciones, se decidió en utilizar un sencillo CI que en su interior contiene cuatro Amplificadores operacionales cada uno de ellos con salida a colector abierto, se hace referencia al LM339 dado que es muy sencillo de utilizar y es tanto bipolar como unipolar.

La **Figura 3.35** muestra la configuración de estos comparadores. La simulación del circuito se realizó en la plataforma de **Proteus Design Suite 8.0**.

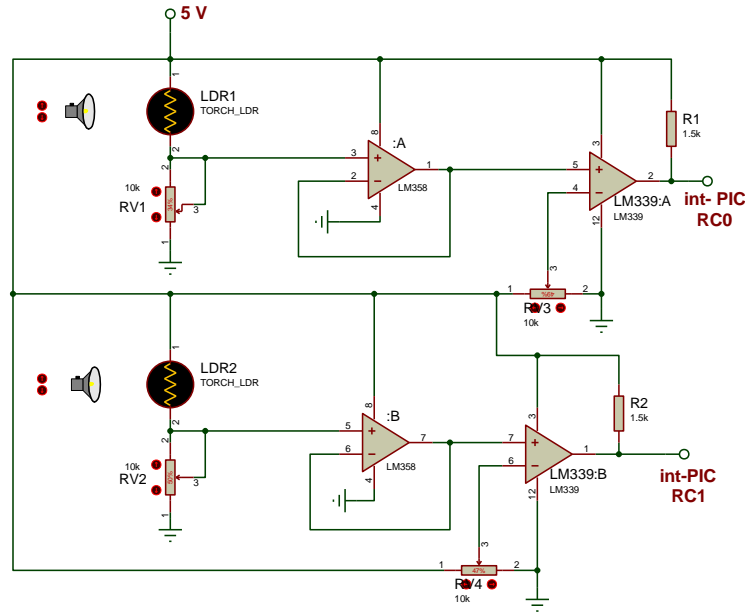


Figura 3.35 Circuito de acondicionamiento de señal para la captación de luz solar (CAS)

Este tipo de configuración de LDR's se utiliza principalmente para uso en robótica, cuando es necesario que un dispositivo sea guiado por un haz de luz para un determinado fin. Sin dejar de lado que también es utilizado en seguimiento solar, aunque también para otras aplicaciones.

La figura anterior muestra de manera sencilla el conexionado de estos dispositivos, pero no solamente se requiere de eso, sino que para el diseño de la tarjeta electrónica se contempló el acondicionamiento de un pequeño bloque rectangular integrado por cuatro diedros, la función de éste es causar un balance y desbalance en la iluminación solar incidente (**Figura 3.36**) en los cuales dos de ellos estarán ocupados por una LDR respectivamente, con el único fin de que las fotorresistencias estén aisladas una de la otra, estas mismas estarán colocadas a manera de coincidir con la trayectoria solar, dado que nuestro seguidor se caracteriza por ser azimutal (este-oeste).

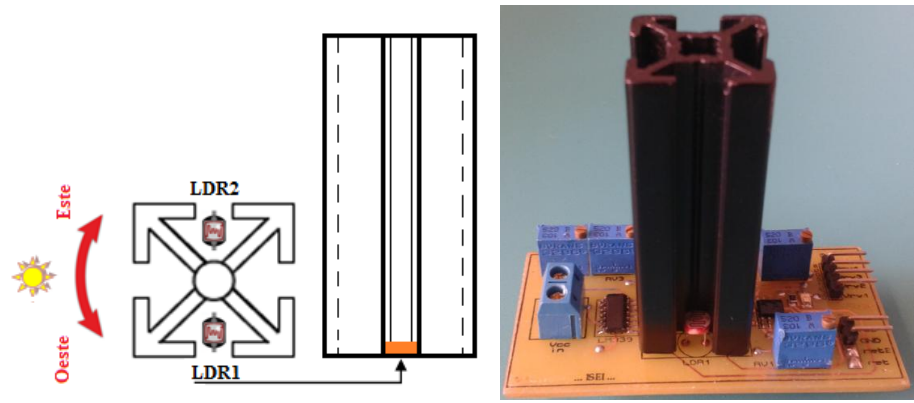


Figura 3.36 A la izquierda se muestra el diseño del bloque que genera las sombras. A la derecha el montaje del bloque en la TECS

Para el correcto funcionamiento de este circuito, lo que se necesita es poder comparar niveles de iluminación, por tanto basta convertir esos niveles de iluminación en un nivel de tensión que se encuentre dentro del rango de 0 V – 5 V esto se hace mediante las configuraciones vistas anteriormente y así el microcontrolador podrá adquirir los voltajes y determinar en qué sentido avanzará el panel solar.

En la tarjeta electrónica para la captación de luz solar (TECS) existen dos terminales que proporcionan las salidas de tensión correspondientes a cada fotorresistencia, las cuales son V_{rv1} y V_{rv2} , que se pueden apreciar en la **Figura 3.37**.

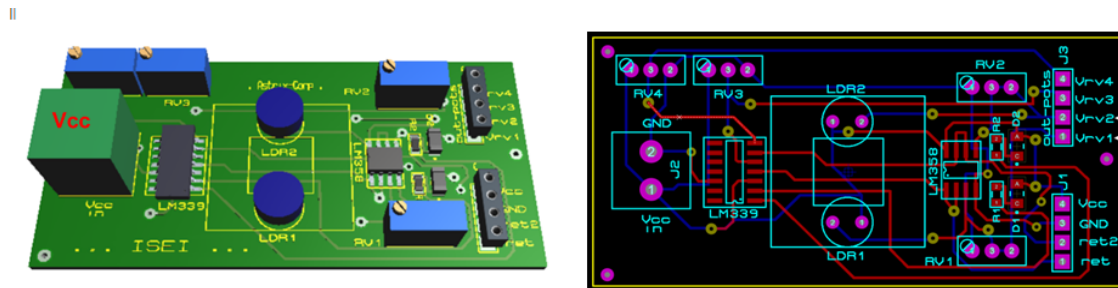


Figura 3.37 a) La TECS. b) la derecha Diagrama de pistas y las salidas V_{rv1} y V_{rv2}

Las señales provenientes de las fotorresistencias son introducidas en dos comparadores, dadas las necesidades, previamente se calibra la sensibilidad de las LDR con dos trimpot's R_{v1} y R_{v2} con valor de 100 K Ω (previamente calculados) y así tener un valor de tensión comprendido entre 0 y 4.5 V sin iluminación y con iluminación respectivamente. De igual manera los trimpot's R_{v4} y R_{v3} con valor de 100 K Ω nos proporcionan la tensión de referencia ajustable para los comparadores.

El circuito cuenta con seis terminales de salida que se muestran en la **Figura 3.37**, estas se enumeran a continuación.

- ✚ **Vrb1:** Es el voltaje de de ajuste de la fotorresistencia LDR1, en esta, se determina la sensibilidad de la misma manipulando el Trimpot (resistencia variable) RV1
- ✚ **Vrb2:** Es el voltaje de de ajuste de la fotorresistencia LDR2, en esta, se determina la sensibilidad de la misma manipulando el Trimpot (resistencia variable) RV2
- ✚ **Vrb3:** Es el voltaje de referencia determinado por RV3 y que será comparado con la tensión generada por LDR1
- ✚ **Vrb4:** Es el voltaje de referencia determinado por RV4 y que será comparado con la tensión generada por LDR2
- ✚ **Vcc:** Es la tensión de alimentación (5Volts) del circuito
- ✚ **GND:** es la Tierra común del circuito en general.

En otro caso, si el valor del voltaje de salida de la fotorresistencia **LDR1** sobrepasará el nivel de voltaje fijado por **R_{V3}**, el comparador correspondiente cambiará su estado de salida de bajo a alto mostrando un voltaje máximo debido a la resistencia de elevación de voltaje pull-up alimentando la etapa siguiente que será el pin RC0 del microcontrolador. Contando con ésta información, se procede de igual forma con **LDR2** y **R_{v4}** respectivamente pero en este caso la etapa a alimentar será el pin RC1 del microcontrolador.

En la **Figura 3.38** se puede visualizar la puesta en marcha de este dispositivo, ésta prueba se realizó en condiciones adecuadas de radiación solar en espacio abierto para fines del experimento y cerciorarnos del buen funcionamiento de la TECS.



Figura 3.38 Niveles de voltaje de LDR1 y LDR2 de acuerdo a la posición del Sol

La tabla 3.3 muestra los valores de tensión de LDR1 y LDR2 bajo condiciones de luz y sombra.

LDR1	Voltaje de salida
Con luz	4.472V
Con sombra	0.7489 V
LDR2	
Con luz	4.451V
Con sombra	0.6557V

Tabla 3.3 Valores obtenidos de las fotorresistencias bajo condiciones de luz y sombra

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DEL SISTEMA, INTEGRACIÓN Y RESULTADOS

En el presente capítulo se realiza el análisis de los datos adquiridos. El desarrollo del sistema de seguimiento solar (SSS) se fraccionó en bloques diferentes, cada uno con tareas específicas, donde se resolvieron de manera particular para su posterior integración. Las diferentes etapas que conforman al sistema son:

- Etapa de captación: Es la encargada de recibir la energía solar
- Etapa de generación: Es la etapa encargada de producir la tensión necesaria para el monitoreo y el movimiento del seguidor solar
- Etapa de acumulación: Es la encargada de almacenar la energía recibida por los PFV
- Com. RS-485: Es la encargada de generar la comunicación entre el μ C- Maestro y el μ C- Esclavo
- μ C- Maestro: Es el encargado de enviar las señales para activar el motor y posicionar al PFV-Móvil
- μ C- Esclavo: Es el encargado de recibir las ordenes del μ C- Maestro para mantener el posicionamiento a lo largo de la trayectoria solar
- Potencia y control: Se encarga de suministrar la energía de acuerdo a las necesidades del actuador eléctrico siempre y cuando se reciban las señales adecuadas enviadas por el μ C- Esclavo

La **Figura 4.1** muestra el diagrama específico de los bloques antes mencionados. Aunque posteriormente se analizará el diseño y la integración de la etapa de monitoreo que es la Interface Humano Máquina (HMI).

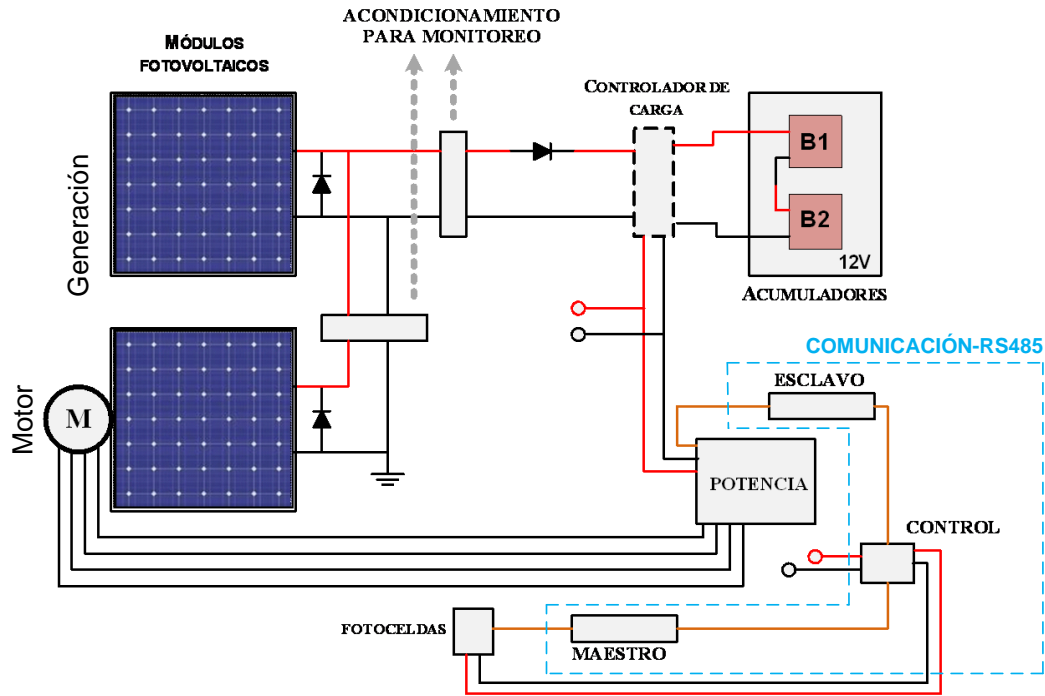


Figura 4.1 Diagrama de bloques del sistema de seguimiento solar (SSS)

4.1 Sistema de captación de luz solar (SCLS)

El sistema de captación de luz solar es la parte más importante, ya que es quien recibe toda la radiación proporcionada por el Sol y envía a nuestro sistema de comunicación (RS-485) las señales eléctricas necesarias para ser procesadas por el μ C-Maestro, que es quien determina cuándo y en qué momento el μ C-Esclavo entrará en operación para activar el motor y así realizar el seguimiento solar.

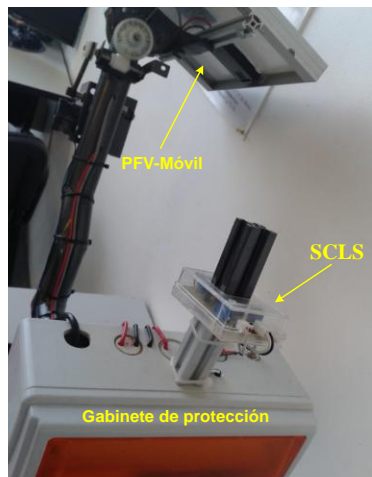


Figura 4.2 Montaje del SCLS

4.2 *Bloque de generación*

Los PFV forman parte de del bloque de generación **Figura 4.3**. En ésta etapa, el número de paneles depende de varios factores. Entre ellos la insolación del lugar, el valor energético de la carga y la máxima potencia de salida del PFV. La acción de estos es equivalente a un generador de CC alimentado por luz solar. La mayor parte de energía generada por estos es almacenada en baterías. Se dice la mayor parte ya que es imposible acumular toda la energía generada debido a las pérdidas asociadas con el proceso de carga.

Es importante recordar que si los paneles permanecen parcialmente sombreados durante una parte del día su capacidad generadora sufre sensiblemente ya que en sombra, esto equivale a conectar un alto valor de resistencia en serie con el generador.

[SOL/DT-002-04].



Figura 4.2 Paneles FV montados para el bloque de generación

4.3 *Bloque de acumulación*

El bloque de acumulación contiene dos componentes: el banco de baterías y el fusible de protección. El banco de acumulación usa en la mayoría de los casos un tipo de batería llamada batería solar de ciclo profundo, esta se caracteriza por guardar energía de modo que las fuentes de corriente eléctrica con las recarguen por medio de alternadores, paneles solares, molinos de viento, etc. Para esta aplicación no se utilizan baterías de ese tipo, se utilizan baterías convencionales (de ciclo corto). Las características de estas baterías se muestran en la **Tabla 4.1**.

Batería	Marca	Modelo	Voltaje (V)	Amp.Hr (A)
B1	Power Sonic	PS-6120TH	6	12.0
B2	Leoch	XK06-0467	6	7.0

Tabla 4.1. Características de las baterías que conforman el bloque de acumulación

El diagrama de la **Figura 4.1** muestra dos baterías de 6 V conectadas en serie que da como resultado un sistema de 12 Volts nominales. Al diagrama, así como el circuito real se le acondiciona un bloque muy importante el cual garantiza un régimen de carga adecuado para las baterías y que evita la descarga de las mismas a través de los paneles FV durante la noche cuando la tensión de salida es nula. Este bloque hace referencia al control de carga (**Figura 4.3**).

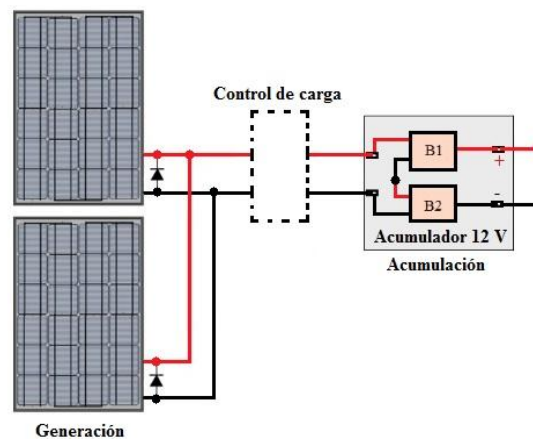


Figura 4.3 Control de carga conectado a los PFV y a los acumuladores

4.4 Ciclo de trabajo de un controlador de carga solar

Se divide en cuatro fases, las cuales se describen a continuación.

- **Primera fase.-** El regulador de carga solar hace posible la entrada de corriente de carga sin interrupción a las baterías que se encuentran vacías, el voltaje se eleva al máximo mientras la batería consume toda la energía posible.
- **Segunda fase.-** En esta fase, la tensión de la carga que se mantiene a lo largo de una hora (aproximadamente) termina, es cuando el regulador interrumpe la carga gradualmente y la batería alcanza el 90% de su capacidad.

- **Tercera fase.-** Aquí se completa la carga final. Una vez que los acumuladores de energía ya están cargados y el panel solar sigue haciendo su trabajo, absorbiendo el calor solar, es cuando el regulador acciona el circuito de control automático para detener la carga a la batería.
- **Cuarta fase.-** Finalmente, la batería está descargada y se encuentra en su mínima capacidad, entrando al proceso de igualación que se refiere cuando la carga de los acumuladores de energía ha sido baja tras un determinado periodo de tiempo. Aquí se acciona de nuevo el circuito del regulador para permitir la entrada de energía e iniciar de nuevo el ciclo.

En el caso de que la fuente de energía principal, que es el sol, esté ausente por más de dos días o incluso y especialmente en las noches, el controlador de carga tiene un papel importante, aunque hay que destacar que la batería solar es un componente esencial. Para que la energía que está almacenada en la batería no vuelva a los paneles, se bloquea esta transmisión a través de un diodo. Los diodos protegen las celdas solares y mantiene que los paneles trabajen normalmente.

Estos dispositivos hacen posible un equilibrio en el flujo de energía a través de todo el circuito que conforma el sistema de energía fotovoltaico, bloquean corrientes inversas, previenen sobrecargas y mantienen apropiadamente la alimentación de las baterías de manera segura para que el sistema esté en condiciones óptimas a largo plazo. Se recomienda un controlador de carga solar **RYPV-1A-5A-12/24V (Figura 4.4)**.



Figura 4.4 Controlador de carga solar **RYPV-1A-5A-12/24V**

4.5 *Bloque de comunicación. BUS-RS-485*

El protocolo RS 485, es un formato de comunicación serial. La comunicación RS 485, implementa un par trenzado de cobre para la transmisión de datos, como características principales de este protocolo se tiene que, puede establecer la comunicación en una topología en forma de bus, con un alcance máximo de 1000 metros sin la necesidad de implementar dispositivos de repetición.

Igualmente es posible conectar al bus de datos a un máximo de 32 nodos, con una conectividad half-duplex, esto quiere decir, que la comunicación es bidireccional pero no al mismo tiempo. El protocolo RS 485 permite establecer comunicaciones con una velocidad de hasta 2,5M bits por segundo [Jan Alexon].

4.5.1 **Ventajas de RS-485 respecto a RS232**

Esta interface tiene muchas ventajas con respecto a RS-232, entre las cuales se mencionan:

a) Bajo costo

Los Circuitos Integrados para transmitir y recibir son baratos y solo requieren una fuente de +5 V para poder generar una diferencia mínima de 1.5 V entre las salidas diferenciales. En contraste con RS-232 que en algunos casos requiere de fuentes dobles para alimentar algunos circuitos integrados y la distancia de comunicación es de apenas un par de metros.

b) Capacidad de interconexión

RS-485 es una interface multienlace con la capacidad de poder tener múltiples transmisores y receptores. Con una alta impedancia receptora, los enlaces con RS-485 pueden llegar a tener a lo máximo hasta 256 nodos con los dispositivos adecuados para esta conexión.

c) Longitud de enlace

En un enlace RS-485 puede tener hasta 4000 pies (1219 m) de longitud, comparado con RS-232 que tiene unos límites típicos de 50 a 100 pies aproximadamente (15.24m – 30.48m).

4.5.2 I2C

Abreviatura de Inter-IC (inter integrated circuits), un tipo de bus diseñado por Philips Semiconductors a principios de los 80s, que se utiliza para conectar circuitos integrados (ICs). El I2C es un bus con múltiples maestros, lo que significa que se pueden conectar varios chips al mismo bus y que todos ellos pueden actuar como maestro, sólo con iniciar la transferencia de datos [I2C].

Características principales

- Bus serie síncrono
- Admite topologías multipunto.
- Admite topologías multimaestro
- El maestro podrá funcionar también como un esclavo
- Velocidad standard de **100Kbit/s** (100kbaudios)
- Longitud de enlace de 10 m aproximadamente

4.5.3 *Porqué usar el BUS-RS485*

La idea principal de este proyecto se basó en la inquietud por tener una pequeña red de generación distribuida, en la cual, con un simple dispositivo manipular varios seguidores solares instalados en la cornisa de los laboratorios ubicados en el cuarto piso del edificio B (**Figura 4.5**) de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, y a su vez la energía generada fuese almacenada para posteriormente fuese utilizada de alguna manera como en la iluminación del corredor. De ahí la idea de usar éste protocolo de comunicación.



Figura 4.5 Cuarto piso del edificio B. UACM

4.5.4 Implementación del sistema de comunicación, BUS-RS485

RS-485 es una comunicación multipunto que permite que múltiples dispositivos puedan ser conectados a un solo bus. La plataforma de programación mikroC PRO para microcontroladores PIC proporciona un conjunto de rutinas de biblioteca para el trabajo cómodo con el sistema RS485 utilizando la arquitectura maestro / esclavo. El maestro y el esclavo son dispositivos de intercambio de paquetes de información. Cada uno de estos paquetes contiene bytes de sincronización, byte CRC, byte de dirección y los datos. Cada esclavo tiene la dirección única y sólo recibe los paquetes dirigidos a él. El esclavo no puede iniciar la comunicación únicamente el maestro permitiendo una comunicación Half-Duplex (la información es enviada bidireccionalmente pero no es simultanea).

La **Figura 4.6** muestra a manera de ejemplo cómo es la conexión de este tipo de arquitectura (maestro-esclavo) utilizando los tranciver LTC485 y los microcontroladores PIC16F887 que hacen posible tal comunicación.

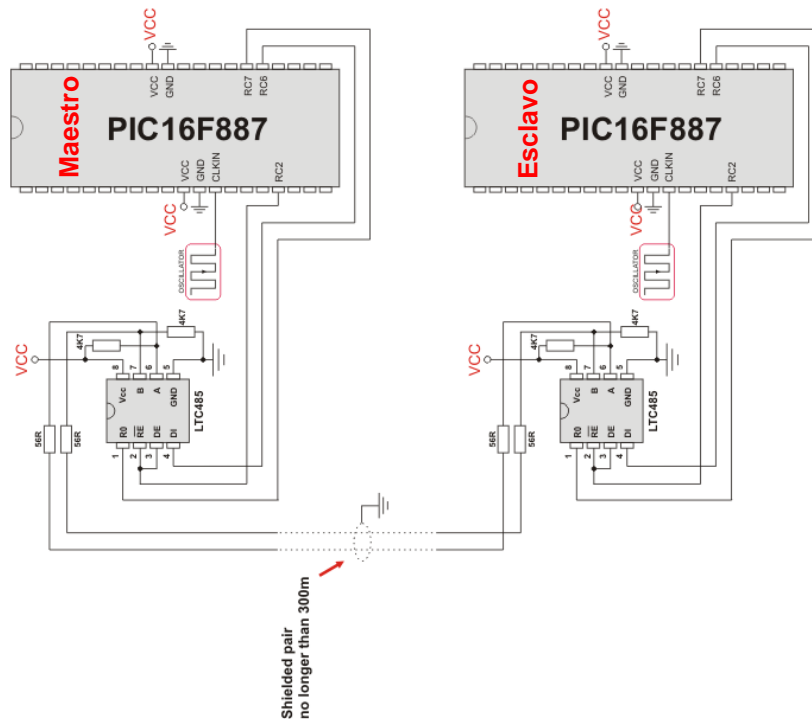


Figura 4.6 Conexión de la arquitectura maestro-esclavo con PIC16F887 [microC PRO.RS-485 Library]

Para la implementación de ésta interface de comunicación, al igual como los demás circuitos antes mencionados, se simularon en la plataforma de **Proteus Design Suite** versión 8.0

4.5.5 Microcontroladores en modalidad Maestro y Esclavo

El microcontrolador Maestro recibe las señales eléctricas provenientes de las fotorresistencias (para LDR1 se dispone del pin RC0 y para LDR2 se dispone del pin RC1) las compara y envía los datos correspondientes al microcontrolador Esclavo y para que éste determine el modo de operación del motor mediante la etapa de potencia. La **Figura 4.7** muestra el esquemático de esta conexión.

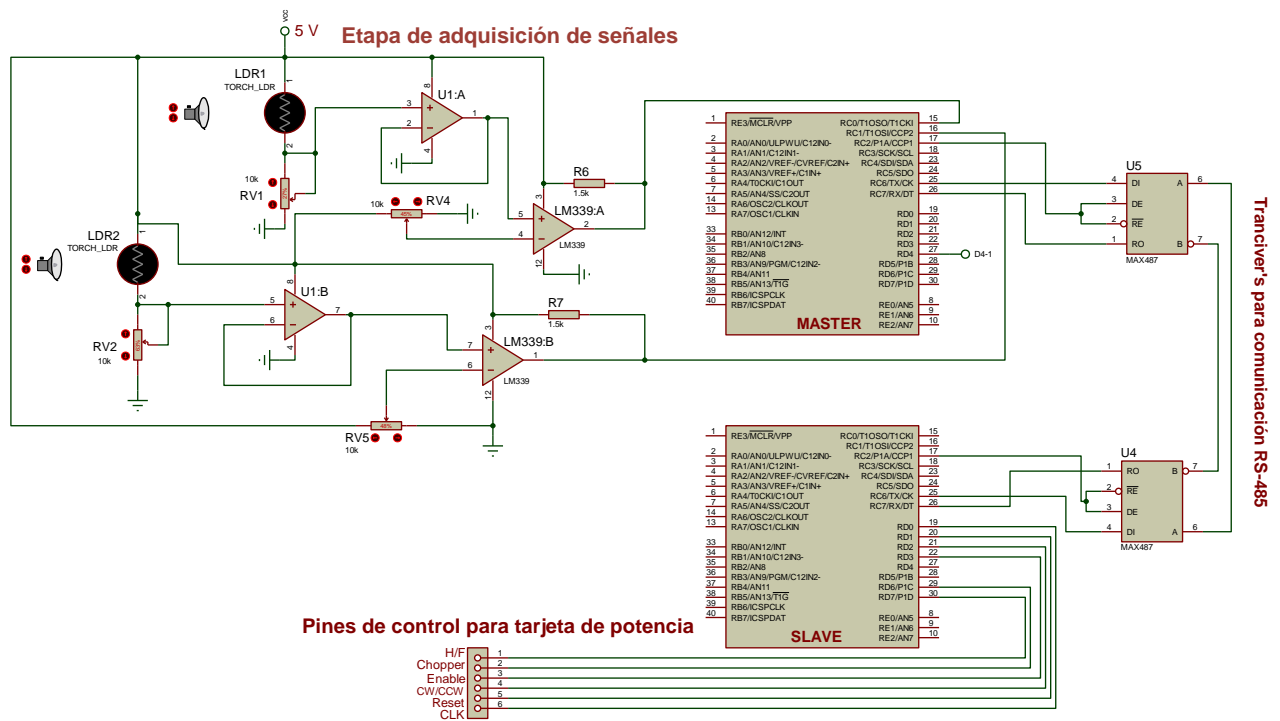


Figura 4.7 Microcontroladores en modalidad Maestro-Esclavo

La **Figura 4.8** muestra el diagrama de flujo correspondiente para el microcontrolador Maestro (a la izquierda) y el diagrama de flujo para el microcontrolador Esclavo(a la derecha).

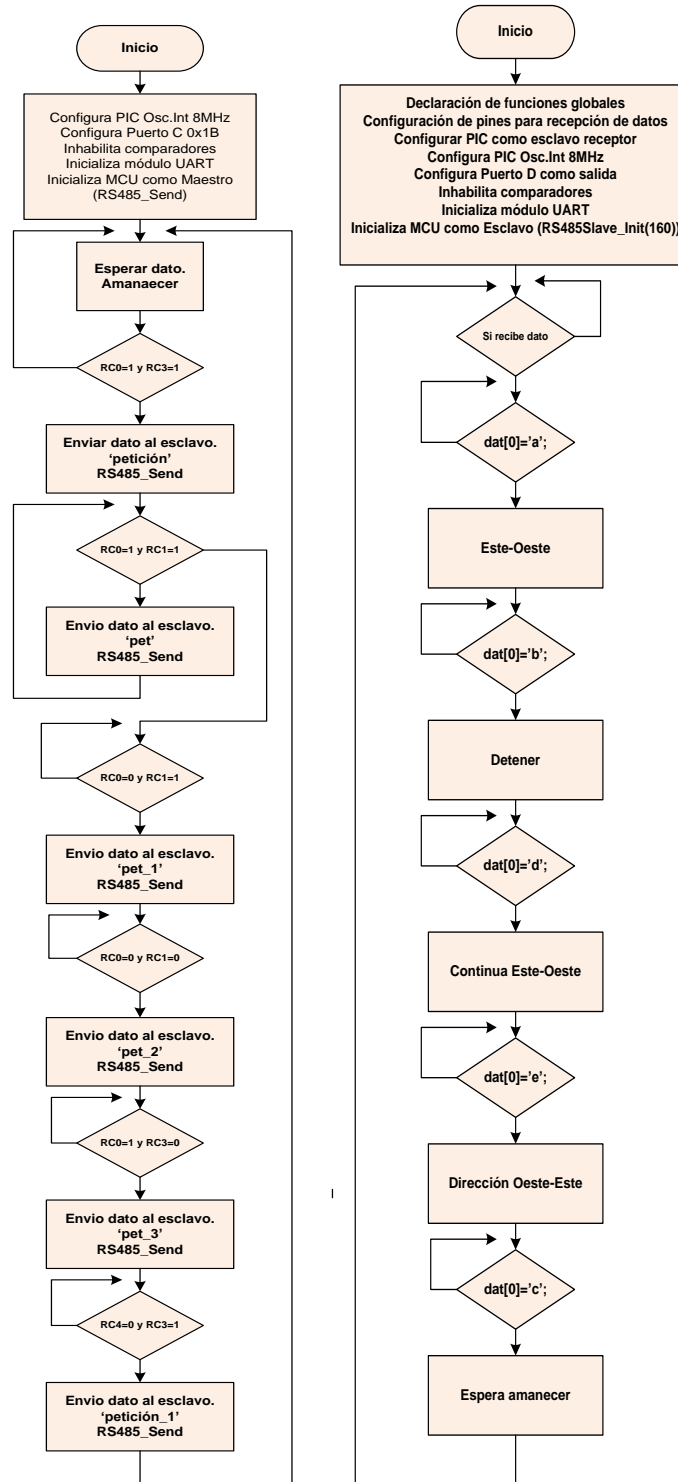


Figura 4.8 Diagramas de flujo para microcontrolador Maestro (izquierda) y esclavo (derecha)

4.5.5 Diseño e implementación de la etapa de monitoreo (HMI)

El diseño de ésta etapa se realizó para poder conocer de manera eficaz el rendimiento del sistema fotovoltaico. Es necesario saber la cantidad de energía que se está produciendo, por ejemplo la tensión que se está generando por medio de los paneles FV, su temperatura y corriente, adquirir esos datos y procesarlos para la realización de sus curvas características.

Para el diseño de ésta interface de monitoreo comúnmente llamada *Interface Humano Máquina* (HMI) fue necesario trabajar con una herramienta muy poderosa que es LabVIEW, ésta es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas de control, procesamiento, adquisición de datos, simulación y monitoreo con un lenguaje de programación visual gráfico.

El sistema de monitoreo (**Figura 4.9**) despliega los datos adquiridos para su almacenamiento y manipulación. La interfaz entre la adquisición de datos y la computadora se realizó con una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 de National Instruments, capaz de leer ocho entradas analógicas, y se utilizó una de ellas por variable física, temperatura, voltaje de los PFV y corriente generada.

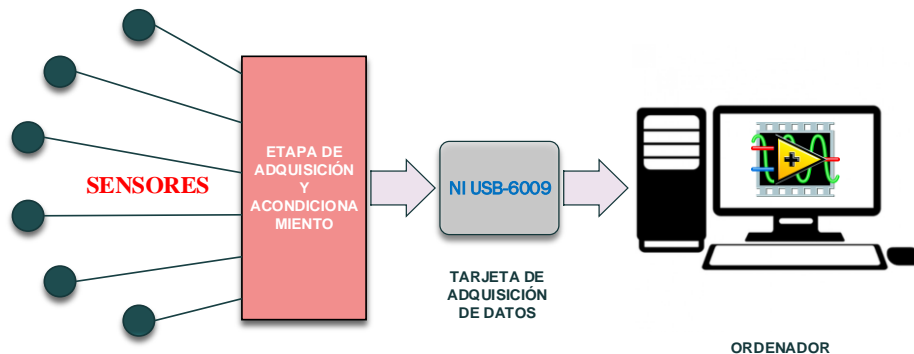


Figura 4.9 Diagrama a bloques del sistema de monitoreo

La interface de usuario asistida por ordenador, fue diseñada en la plataforma de Labview versión 2012, ésta permite la libre interacción del usuario con el sistema y así visualizar los parámetros de una manera más cómoda. Esta interface gráfica consta de un panel frontal (**Figura4.10**) donde mediante menús gráficos despliega los valores a petición del usuario de las señales eléctricas de voltaje y corriente que corresponden a cada panel FV, así como también de las temperaturas de estos mismos, y un menú de paro (STOP/OFF) y arranque (ON) del sistema.

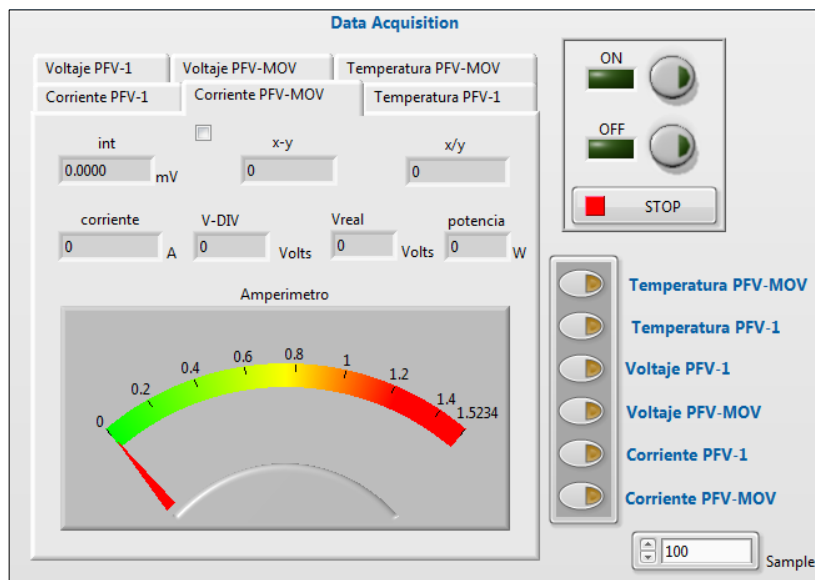


Figura 4.10 Interface gráfica de monitoreo del sistema FV

Los datos adquiridos son enviados y procesados mediante la programación gráfica del diagrama a bloques que se muestra en la **Figura 4.11** y los despliega en un archivo en hoja de cálculo de Excel.

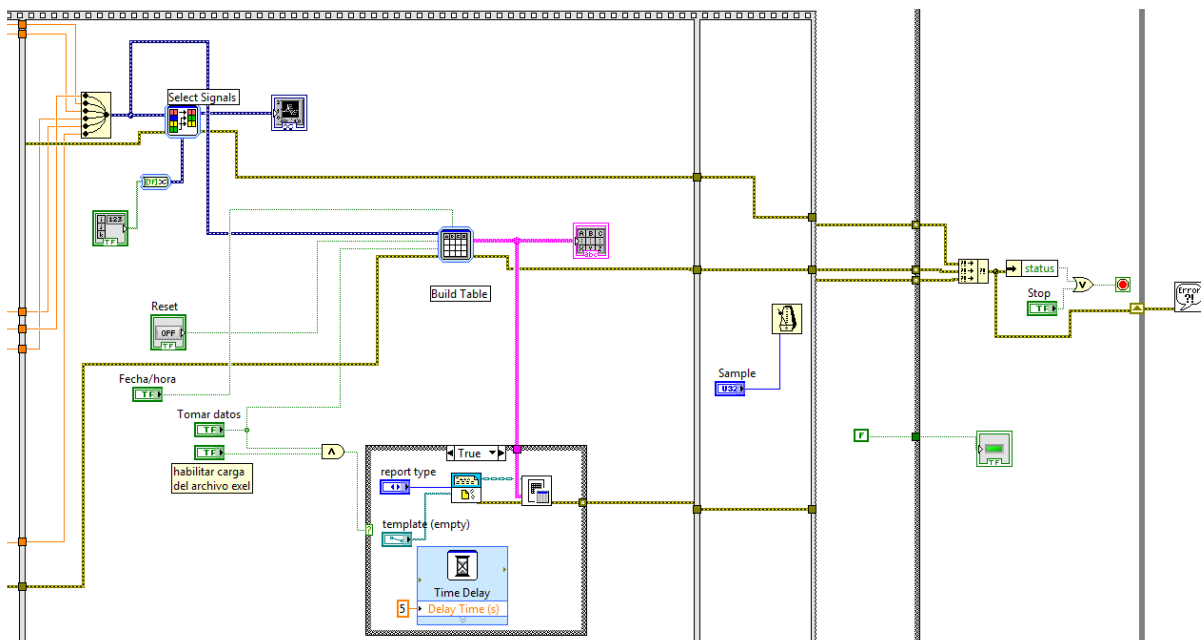


Figura 4.11 Diagrama a bloques para mostrar los datos adquiridos (V, I y T °C) en un archivo de Excel

4.6 Pruebas del sistema y resultados

Las pruebas y resultados de operación del sistema se determinaron una vez que fue puesto en marcha, y se corroboró el buen funcionamiento de cada uno de los bloques antes mencionados. En principio, se realizó con detenimiento y cuidando las conexiones de las tarjetas electrónicas, sensores, paneles FV y acumuladores para que posteriormente no hubiese algún tipo de falla, sobre todo en la etapa de adquisición de las señales de los sensores.

Gracias a la interface adquisición y monitoreo se pudo recabar una lista con diferentes valores de voltaje, corriente y temperatura tomados a diferentes horas del día, se analizaron y procesaron en Origin 8.0 tal como se muestra en la **Tabla 4.2**.

tiempo (hora del día)	Temperatura		Voltaje		Corriente	J (Densidad de corriente) PFV-fijo	Corriente	J (Densidad de corriente) PFV- mov	Potencia	
(h)	°C		V		A	A/cm2	A	A/cm2	W	
	PFV fijo	PFV movil	PFV fijo	PFV movil	PFV fijo		PFV movil		PFV fijo	PFV movil
10	28.34	30.6512	19.51	19.78	0.3428	0.4761	0.41	0.4997	6.68803	8.20474
11.25	31.72	33.44	20.04	20.17	0.45	0.6212	0.54	0.655	8.96515	10.96728
11.50	35.82	37.96	20.15	20.23	0.49	0.675	0.57	0.6881	9.79413	11.55182
11.55	39.24	39.71	20.31	20.36	0.51	0.7113	0.64	0.7721	10.40527	13.04737
12.00	40.25	40.57	20.49	20.53	0.60	0.8337	0.73	0.8834	12.30041	15.05159
12.20	39.40	39.86	20.35	20.57	0.65	0.9076	0.75	0.906	13.3007	15.4687
12.30	39.17	39.24	20.31	20.60	0.66	0.9229	0.75	0.8979	13.49895	15.3496
12.40	38.86	39.35	20.37	20.62	0.68	0.9506	0.76	0.91	13.94234	15.57441
12.50	36.74	37.20	20.35	20.53	0.68	0.9461	0.74	0.8968	13.86261	15.27893
13.00	36.73	37.64	20.25	20.42	0.69	0.9632	0.75	0.8998	14.04141	15.2536
13.20	36.57	37.72	20.28	20.44	0.68	0.9395	0.76	0.916	13.71793	15.53749
13.40	35.74	36.41	20.22	20.38	0.67	0.9359	0.75	0.8978	13.62711	15.18881
14.00	35.15	36.16	20.19	20.35	0.68	0.9512	0.75	0.9038	13.82957	15.26518
14.20	36.12	37.03	20.46	20.61	0.68	0.9448	0.76	0.9171	13.92118	15.69176
14.40	35.77	37.14	20.39	20.56	0.70	0.9738	0.75	0.9074	14.29977	15.48519
15.00	34.97	36.06	20.46	20.54	0.68	0.94	0.75	0.9083	13.84821	15.48375
16.00	33.43	34.87	20.11	20.33	0.46	0.6421	0.68	0.821	9.29816	13.85439
16.30	31.41	33.15	20.07	20.22	0.39	0.5472	0.64	0.7737	7.90908	12.98772
17.00	30.38	30.86	19.72	19.92	0.34	0.4748	0.46	0.551	6.74185	9.11119
17.25	30.11	30.49	19.66	19.89	0.31	0.4363	0.45	0.5464	6.1751	9.0206
17.50	28.33	29.89	19.55	19.84	0.24	0.3376	0.42	0.5067	4.75284	8.34249
18.00	27.49	28.62	19.50	19.68	0.20	0.2832	0.38	0.4527	3.97682	7.39651
18.50	26.35	28.15	19.05	19.40	0.14	0.2013	0.36	0.4337	2.76225	6.984

Tabla 4.2 Valores adquiridos a lo largo de un día

Como se mencionó en el Capítulo III, en el diseño del divisor de tensión para la medición de voltaje, la prueba de caracterización de los paneles FV tanto el móvil como el fijo se realizó tomando diferentes valores de voltaje de entrada y salida del divisor de tensión y así sucesivamente con varios datos hasta obtener la curva de caracterización y su respectiva ecuación. La **Tabla 4.3** muestra los datos obtenidos para ambos paneles fotovoltaicos

Vout-Div-PFV-Movil	Vint PFV-Movil	Vout-Div-PFV-Fijo	Vint-PFV-Fijo
Volts			
Vout Divisor	Vint PFV- Movil	Vout Divisor	Vint PFV- Fijo
2.0336	10.14	2.0236	10.01
2.0539	10.49	2.0543	10.54
2.0744	11.07	2.0821	11.02
2.1051	11.51	2.1149	11.51
2.1285	12.01	2.134	12.01
2.1476	12.52	2.1555	12.51
2.1664	13.01	2.1766	13.01
2.1872	13.52	2.1927	13.52
2.2018	14.02	2.2185	14.01
2.2268	14.51	2.2336	14.51
2.2417	15.03	2.2419	15.02
2.2665	15.52	2.2635	15.55
2.2892	16.01	2.2872	16.02
2.3028	16.51	2.3022	16.51
2.3285	17.02	2.3164	17.01
2.3451	17.51	2.3233	17.51
2.3671	18.02	2.3462	18.02
2.3877	18.52	2.3673	18.53
2.4278	19.01	2.3865	19.03
2.4435	19.54	2.4253	19.56
2.4638	20.01	2.4472	20.02

Tabla 4.3 Datos obtenidos de ambos paneles fotovoltaicos

Los datos de la **Tabla 4.3** fueron tomados a diferentes horas del día para poder aprovechar al máximo la incidencia de luz solar en los paneles FV a lo largo de la trayectoria solar. Los datos obtenidos se analizaron y procesaron en la plataforma de Origin Pro 8.0, usando éste software de análisis de datos fue más cómodo obtener un ajuste lineal para ambos paneles FV dado que para poder visualizar las variables en la plataforma de monitoreo (voltaje, corriente, temperatura) es necesario implantar la ecuación lineal del sistema FV en cuestión. La **Figura 4.12** muestra el resultado del ajuste lineal para el panel FV-Móvil.

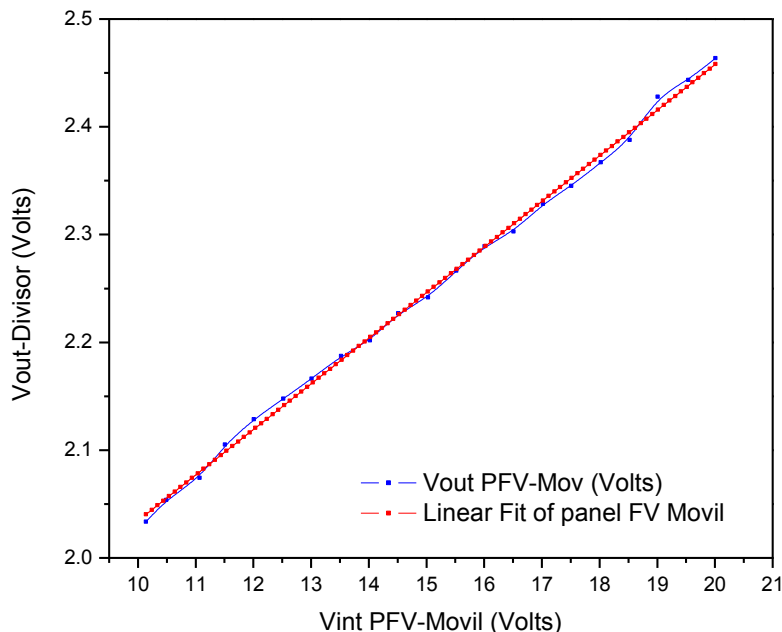


Figura 4.12 Ajuste lineal para la representación de datos del PFV-Móvil

La ecuación que representa el ajuste lineal de los datos obtenidos por el panel FV-móvil es:

$$y = 0.042x + 1.611$$

Donde para obtener en la interface de monitoreo el voltaje real generado por el PFV-Móvil es necesario implantar en el diagrama de bloques de LabView la siguiente ecuación:

$$x = (y - 1.611) / 0.042$$

Para el panel FV-Fijo se llevó a cabo la misma técnica, obteniendo el siguiente ajuste lineal, como se muestra en la **Figura 4.13**.

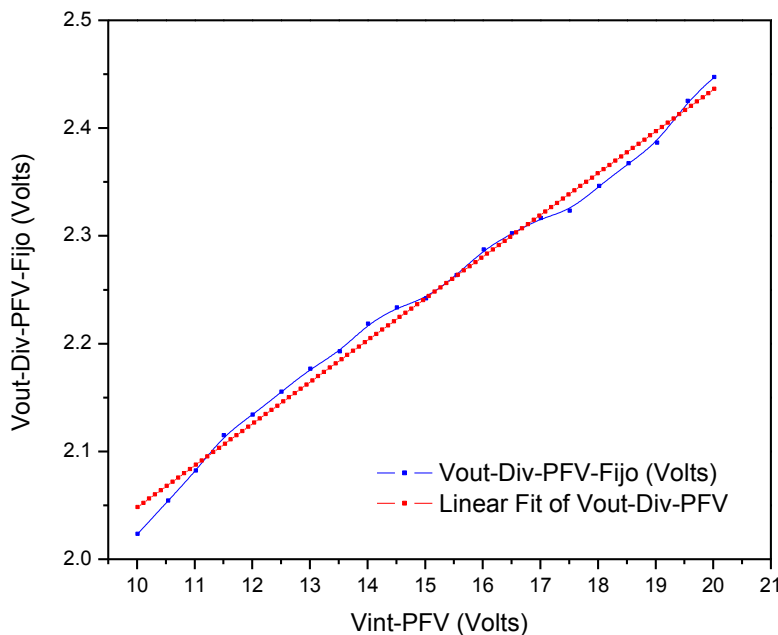


Figura 4.13 Ajuste lineal para del panel FV Fijo

La ecuación que representa el ajuste lineal de los datos obtenidos por el panel FV-Fijo es:

$$y = 0.038x + 1.660$$

Donde para obtener, en la interface de monitoreo, el voltaje real generado por el PFV-Fijo es necesario implantar en el diagrama de bloques de LabView la siguiente ecuación:

$$x = (y - 1.660) / 0.038$$

De igual manera se aplica la misma técnica para determinar el comportamiento de la corriente obteniendo las siguientes ecuaciones tanto como para el PFV-Fijo como para el móvil:

$$X_{PF} = (y - 2.288) / 0.098$$

Donde X_{PF} representa la corriente generada por el PFV- Fijo. Para el PFV- Móvil se tiene la siguiente ecuación para la caracterización de la corriente generada por el panel fotovoltaico.

$$X_{PFM} = (y - 2.253) / 0.111$$

Donde X_{PFM} representa la corriente generada por el PFV- Móvil

4.7 Resultados experimentales del proceso de seguimiento solar

El primer proceso experimental que se realizó en el sistema denominado Xirtsa-I, anteriormente mencionado, fue la caracterización de las variables más importantes en este experimento, tales como el voltaje y la corriente generada por los paneles fotovoltaicos.

Esta prueba se realizó considerando las condiciones climatológicas más adecuadas en las que se registraron las lecturas a partir de las 9:00 am y hasta las 18:50 hrs, considerando la adquisición de los datos cada veinte minutos. Es importante agregar que se realizaron varias pruebas de operación del sistema Xirtsa-I, en las cuales en muchas de ellas, debido a las condiciones ambientales no se obtenían los resultados esperados, hasta que se dieron las condiciones adecuadas para recabar resultados propios y así poder hacer un análisis del funcionamiento del sistema. Tomando en cuenta las especificaciones de los paneles fotovoltaicos se obtuvieron las curvas I-V de cada uno de ellos, sabiendo que estos contaban con una superficie de 830 cm² para el PFV-Móvil y de 720 cm² para el PFV-Fijo, respectivamente (**Figura 4.14**). Se consideró una corriente de corto circuito de 0.64 A y un voltaje de circuito abierto de 21.5 V para el panel móvil, así como 0.487 A y 20.5 V para el panel fijo.

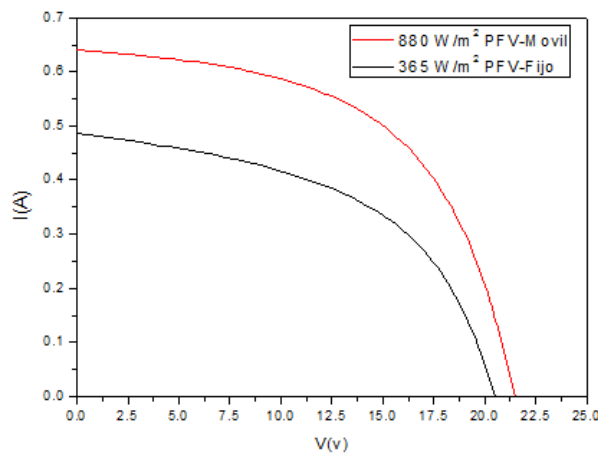


Figura 4.14 Curvas I-V de los PFV móvil y fijo

En la **Figura 4.14** se observan las curvas características I vs V de los paneles fotovoltaicos, Se describen las corrientes de corto circuito y los voltajes de circuito abierto bajo condiciones de irradiación de 1 KW/m^2 , cabe mencionar que son las condiciones de prueba estándar. En rojo, muestra la curva I vs V del PFV-Móvil y en negro la curva I vs V que genera el PFV- Fijo. La energía radiante por unidad de área que incide en el PFV en el instante de tiempo de las mediciones es de:

- 880 W/m^2 para el PFV-Móvil
- 365 W/m^2 para el PFV-Fijo

En el proceso de caracterización para obtener los voltajes fotovoltaicos en función del tiempo de ambos módulos, fue necesario tomar las muestras aproximadamente cada veinte minutos en un periodo de ocho horas, tal como se muestran en la **Figura 4.15**.

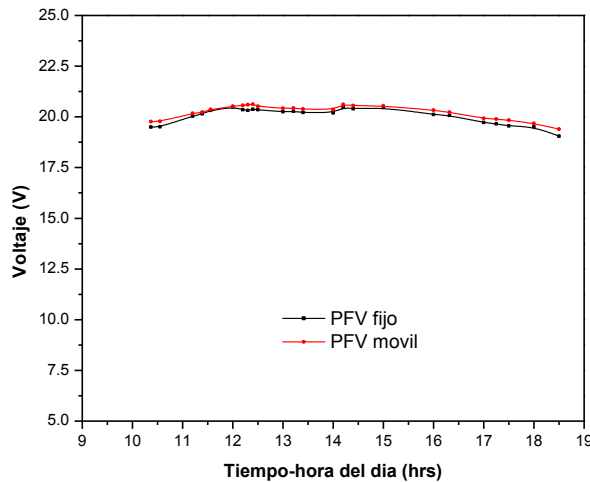


Figura 4.15 Curva obtenida del voltaje vs tiempo de los paneles fotovoltaicos en un periodo de ocho horas. Se observa la medición del voltaje generado tanto por el PFV-Móvil como por el PFV-Fijo

Se puede observar en la **Figura 4.15** cómo los voltajes de ambos paneles fotovoltaicos mantienen una constancia a medida que el Sol realiza su trayectoria solar.

En la **Figura 4.16** se observa una imagen de las curvas características de la corriente generada. Las curvas son el resultado del sistema de monitoreo puesto en marcha y del seguidor solar en operación.

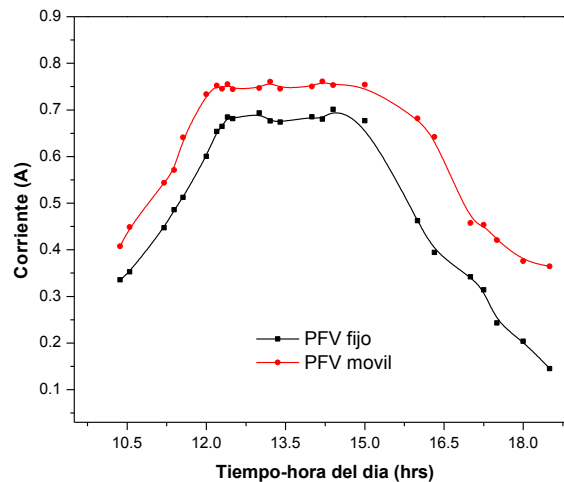


Figura 4.16 Muestra las curvas de corriente vs tiempo, a lo largo del día, obtenidas para ambos módulos

Se puede apreciar claramente que, a partir de las 10:00 am ambos módulos fotovoltaicos comienzan a generar corriente, pero, debido a que el módulo móvil se encuentra orientado hacia el Sol directamente, éste genera más corriente que el módulo fijo, esto se debe, en principio, a su condición de orientación, misma que se mantiene en todo momento siempre y cuando haya incidencia de luz solar. Se puede ver que a medio día la corriente en ambos paneles fotovoltaicos es máxima, esto gracias a que a esa hora del día en particular la radiación Solar incide en la superficie terrestre con más intensidad y va disminuyendo gradualmente a medida que el Sol alcanza el Oeste. Para el caso particular del módulo fijo, éste reduce en gran parte su corriente.

Para el caso de la densidad de corriente J (con unidades de corriente por unidad de área) **Figura 4.17**, se tiene que, para el PFV-fijo se generan valores mayores a los del PFV-móvil, esto se debe a que las superficies de ambos módulos son, en relación, diferentes. Para el PFV-Fijo su superficie viene siendo 720 cm^2 y para el PFV-Móvil con una superficie de 830 cm^2 . Para el caso en el cual se presenta una disminución de la densidad de carga en el PFV-Móvil, esto es causado a la superficie total de las fotoceldas que conforman el módulo ya que a mayor área y como debía de esperarse, la densidad de corriente disminuye.

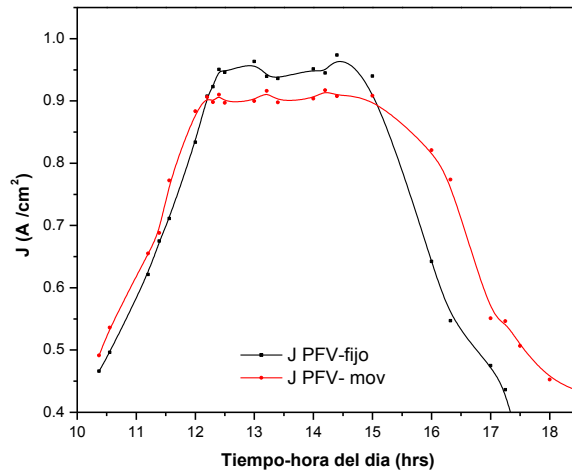


Figura 4.17 Curvas características de la densidad de corriente de ambos módulos FV

En cuanto a la medición de la potencia **Figura 4.18** se tiene que, en relación con la corriente y la tensión generadas, se manifiesta en su mayoría el pronunciado aumento de la potencia debido al total seguimiento del PFV-móvil, también se encuentra presente la notable disminución de potencia por ambos módulos a consecuencia de la puesta del sol siendo que, a partir de las 15:30 hrs la radiación solar es menor y disminuye gradualmente. El incremento de potencia eléctrica generada por el PFV-móvil respecto al PFV-fijo es aproximadamente de un 13%.

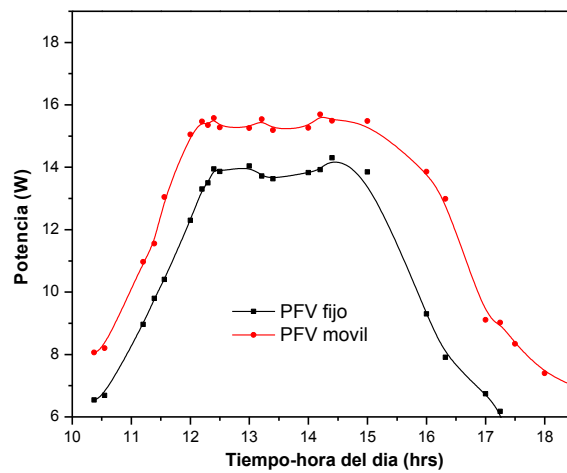


Figura 4.18 Muestra las curvas obtenidas de la potencia generada por los módulos fotovoltaicos

Respecto a la temperatura (**Figura 4.19**) en los módulos fotovoltaicos, la temperatura es un parámetro que afecta directamente la generación de energía en un panel fotovoltaico. Al aumentar la temperatura, la corriente también tiende a aumentar, pero el voltaje cae notablemente, lo que provoca una disminución de la potencia entregada por el panel, en cambio, al disminuir la temperatura el voltaje tiende a aumentar, pero la corriente disminuye, aumentando en una fracción el nivel de potencia entregada. Se estima que la potencia nominal se reduce aproximadamente un 0.5% por cada grado por sobre de 25 °C [CIEMAT].

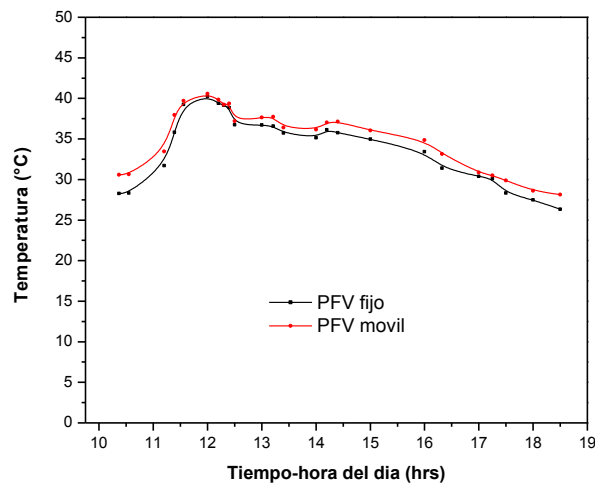


Figura 4.19 Curvas características de temperatura vs hora del día de los módulos fotovoltaicos

4.8 Estado final del prototipo

La **Figura 4.20** muestra el montaje final de seguidor solar. Como se puede apreciar en la figura los módulos fotovoltaicos, el gabinete de protección de tarjetas electrónicas, las partes mecánicas y los acumuladores

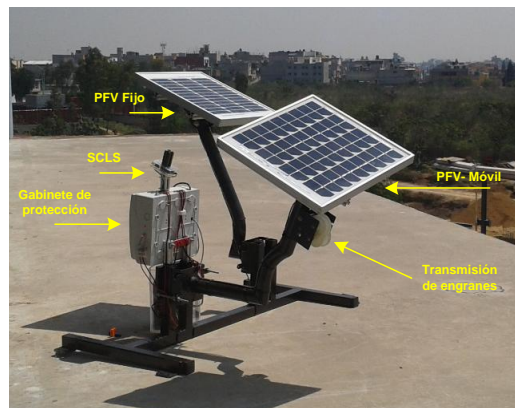


Figura 4.20 Estado final del prototipo seguidor solar (día solar)

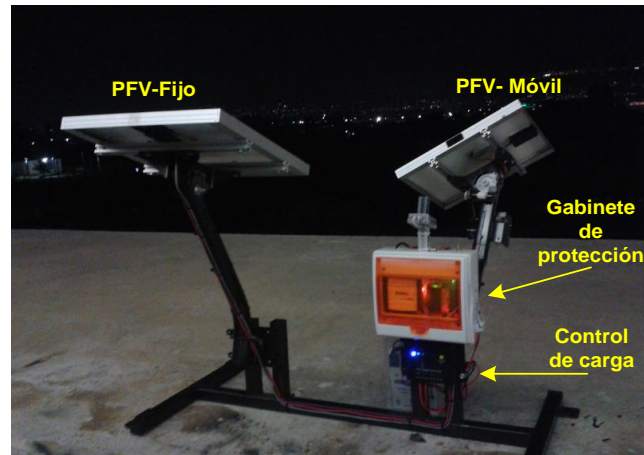


Figura 4.21 Sistema de seguimiento solar puesto en operación (modo nocturno)

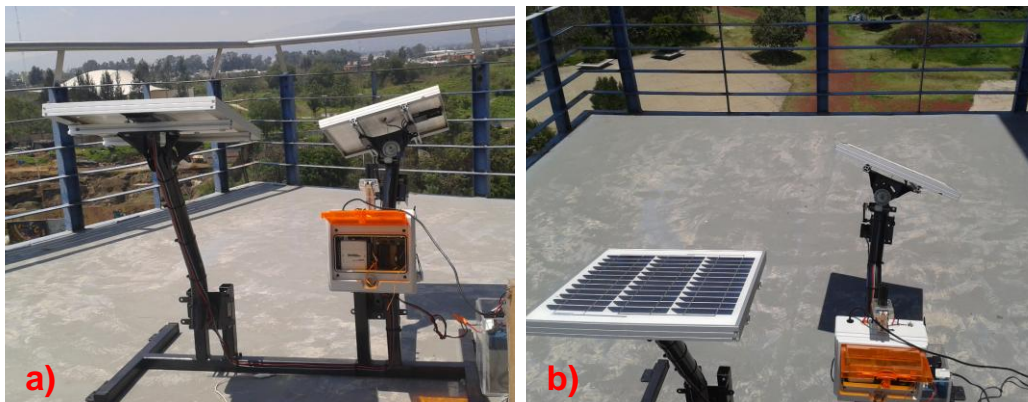


Figura 4.22 SSS en operación. a) SSS en operación 11:15 am. b) SSS en operación 14:35 hrs



Figura 4.23 SSS en operación 15:25 hrs

5 CONCLUSIONES

- Se logró el desarrollo e implementación de un prototipo que permite realizar el seguimiento de la trayectoria solar.
- Se optimizó el desempeño del seguidor solar mediante el diseño e implementación de tarjetas electrónicas PCB propias para el prototipo.
- Se diseño y construyo un sistema mecánico sencillo y de bajo costo.
- Se realizó una interface (HIM) para la adquisición, monitoreo y comparación de los parámetros eléctricos característicos de los PFV como son: corriente, voltaje y potencia eléctrica, entre los PFV-fijo y PFV- móvil.
- La corriente, densidad de corriente y la potencia eléctrica juegan un papel muy importante cuyos valores dependen de la radiación solar, por tanto, se observa la correlación de los parámetros eléctricos obteniéndose un incremento de los valores de la corriente y por tanto de la potencia eléctrica del PFV-móvil respecto al PFV-fijo, mientras que el voltaje se mantiene prácticamente constante entre un módulo y otro. El incremento de potencia eléctrica generada por el PFV-móvil respecto al PFV-fijo es aproximadamente de un 13%.
- Una aportación del sistema de comunicación RS-485, es que, debido a la arquitectura maestro-esclavo se puede interconectar hasta 32 módulos seguidores en modo esclavo en el mismo Bus de comunicación a lo largo de una longitud máxima de 900 m, esto sería adecuado para el diseño de una pequeña planta solar fotovoltaica (sistema autónomo) para electrificaciones locales, proporcionando este servicio a la comunidad en poblaciones poco electrificadas.

6 TRABAJOS FUTUROS

- Efectuar nuevas mediciones para obtener resultados aún mejores.
- Modificar el diseño del programa de adquisición y monitoreo para que éste muestre las curvas características a petición del usuario (corriente, voltaje, potencia e I-V).
- Mejorar la etapa de pre amplificación y acondicionamiento de los sensores de corriente para tener una mejor lectura.
- Realizar la medición de la luminosidad con el sensor DFR0026 Analog Ambient Light Sensor, este detecta la densidad de la luz y refleja la señal en tensión analógica, su rango de iluminación va de 1 LUX hasta 6000 LUX, opera de 3.3 V a 5 V, o en su defecto utilizar un piranómetro para tener mejores lecturas.
- Mejorar el sistema de acumulación, reemplazando las baterías actuales por unas de ciclo profundo para mayor aprovechamiento tal como las que se mencionan en el capítulo cuatro, dado que estas juegan un papel importante en el sistema.
- Rediseñar la estructura de soporte de los paneles fotovoltaicos.

7 REFERENCIAS

[1] A. Martí “Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica”

[Eduardo Lorenzo, 2003] *Retratos de la Conexión fotovoltaica a la red, seguidores y huertas Solares*, Eduardo Lorenzo, 2003, Instituto de energía Solar – Universidad Politécnica de Madrid

Instituto Nacional de Estadística y Geografía/INEGI.

<http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/productosyservicios/default.aspx>

[Eduardo Lorenzo, 2003] *Retratos de la Conexión fotovoltaica a la red, seguidores y huertas Solares*, Eduardo Lorenzo, 2003, Instituto de energía Solar – Universidad Politécnica de Madrid.

[Hollander, 2003] *The Real Environmental Crisis*, Jack M. Hollander, University of California Press, 2003, Pag. 86-144

[INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía/INEGI

[6] CENSOLAR (Centro de Estudios de Energía Solar) Progensa, 1993. Instalaciones de Energía Solar. Tomo 5: Sistemas de conversión eléctrica. Pág. 32. Fig 56

[Clavijo Mendoza, 2011]. Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C. Juan Ricardo Clavijo Mendoza. **ISBN 978-958-44-8619-6**. Primera edición mayo de 2011. Pag.138-140.

[Marcelo Alonso] Marcelo Alonso, Edward J. Finn. Física volumen I: Mecánica.

[Thompson.] DUAL FULL-BRIDGE DRIVER. SGS-Thompson.

[Sunrom] <http://www.sunrom.com/p/current-sensor-20a-ac712>.

[SNIS159F]Texas-Instrumens–AUGUST 1999–REVISED JANUARY 2016

[José A Manrique] Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas. México D.F. 1984, Harla Editores.

[Castellanos A y Escobedo M] La energía Solar en México. Situación actual y perspectivas 1ª edición. Centro de Ecodesarrollo. México D.F.

[Perales Benito] Tomás Perales Benito. Guía del instalador de energías renovables. Limusa Noriega Editores 2006. México D.F.

[Clavijo Mendoza, 2011]. Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C.

[Jan Alexon] Jan Alexon. Lakeview research. Programing and Circuits for RS-232 and RS-485. Links and Networks

[CIEMAT] Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de energía Solar fotovoltaica. Ministerio de industria y energía. España. ISBN 84-7834-303-2

[monsolar] <http://www.monsolar.com/blog/la-energia-solar-fotovoltaica-sin-primas-ya-es-rentable/>

[SIGER] Sistema de Información Geográfica para las Energías renovables en México del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

[Thomson] SGS-THOMSON, MICROELECTRONICS. August 1996. Stepper motor controllers.

[FUMEC].Fundación México Estados Unidos para la Ciencia. www.fumec.org

[SENER] SENER. *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. México, México.

[CENIDET] Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. José Beltrán Adán . Coordinación de Mecatrónica.

[POLOLU] Robotics and Electronics. <https://www.pololu.com/>

[P.E] <http://www.potenciaelectromecanica.com/calculo-de-un-motorreductor/>

[SOL/DT-002-04] SOLARTRONIC. Conversión de la luz solar en energía eléctrica

[I2C] The I2C Bus Specification (version 2.1, January 2000)

URL <http://www.semiconductors.philips.com/acrobat/literature/9398/39340011.pdf>

[microC PRO.RS-485 Library] Plataforma de programación microC PRO.

[Luís E. Benitez] ENGRANAJES, Diseño, Lubricación, Análisis de Fallas y Mantenimiento. julio de 2012. Universidad Nacional de Colombia

APÉNDICE

APPLICATION NOTE

THE L297 STEPPER MOTOR CONTROLLER

The L297 integrates all the control circuitry required to control bipolar and unipolar stepper motors. Used with a dual bridge driver such as the L298N forms a complete microprocessor-to-bipolar stepper motor interface. Unipolar stepper motor can be driven with an L297 plus a quad darlington array. This note describes the operation of the circuit and shows how it is used.

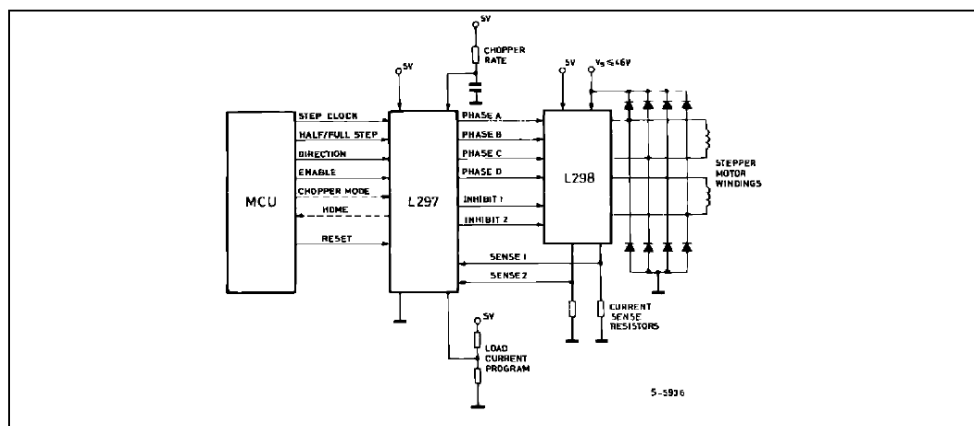
The L297 Stepper Motor Controller is primarily intended for use with an L298N or L293E bridge driver in steppermotor driving applications.

It receives control signals from the system's controller, usually a microcomputer chip, and provides all the necessary drive signals for the power stage. Additionally, it includes two PWM chopper circuits to regulate the current in the motor windings.

With a suitable power actuator the L297 drives two phase bipolar permanent magnet motors, four phase unipolar permanent magnet motors and four phase variable reluctance motors. Moreover, it handles normal, wave drive and half step drive modes. (This is all explained in the section "Stepper Motor Basics"). Two versions of the device are available: the regular L297 and a special version called L297A. The L297A incorporates a step pulse doubler and is designed specifically for floppy-disk head positioning applications.

ADVANTAGES

The L297 + driver combination has many advantages: very few components are required (so assembly costs are low, reliability high and little space required), software development is simplified and the burden on the micro is reduced.



In this typical configuration an L297 stepper motor controller and L298 dual bridge driver combine to form a complete microprocessor to bipolar stepper motor interface.

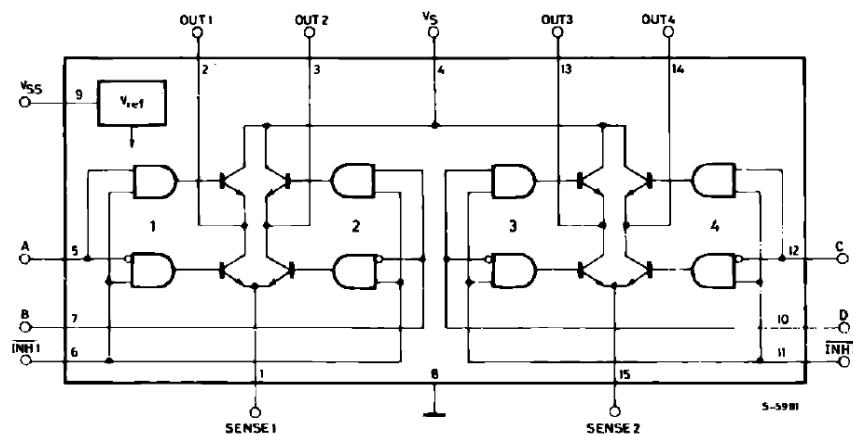
Further, the choice of a two-chip approach gives a high degree of flexibility the L298N can be use donitsown for DC motors and the L297 can be used with any power stage, including discrete power devices (it provides 20mA drive for this purpose).

THE L298N AND L293E

Since the L297 is normally used with an L298N or L293E bridge driver a brief review of these devices will make the rest of this note easier to follow. The L298N and L293E contain two bridge driver stages, each controlled by two TTL-level logic inputs and a TTL-level enable input. In addition, the emitter connections of the lower transistors are brought out to external terminals to allow the connection of current sensing resistors.

For the L298N STMicroelectronics' innovative ion-implanted high voltage/high current technology is used, allowing it to handle effective powers up to 160W (46V supply, 2A per bridge). A separate 5V logic supply input is provided to reduce dissipation and to allow direct connection to the L297 or other control logic. In this note the pins of the L298N are labelled with the pin names of the corresponding L297 terminals to avoid unnecessary confusion.

The L298N is supplied in a 15-lead Multiwatt plastic power package. It's smaller brother, the functionally identical L293E, is packaged in a Powerdip – a copper frame DIP that uses the four center pins to conduct heat to the circuit board copper.



The L298N contains two bridge drivers (four push pull stages) each controlled by two logic inputs and an enable input. External emitter connections are provided for current sense resistors. The L293E has external connections for all four emitters.

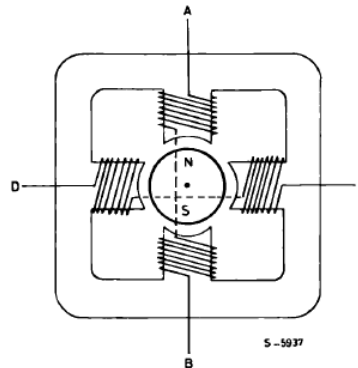
STEPPER MOTOR BASICS

There are two basic types of stepper motor in common use: permanent magnet and variable reluctance. Permanent magnet motors are divided into bipolar and unipolar types.

BIPOLAR MOTORS

Simplified to the bare essentials, a bipolar permanent magnet motor consists of a rotating permanent magnet surrounded by stator poles carrying the windings. Bidirectional drive current is used and the motor is stepped by switching the windings in sequence.

For a motor of this type there are three possible drive sequences.



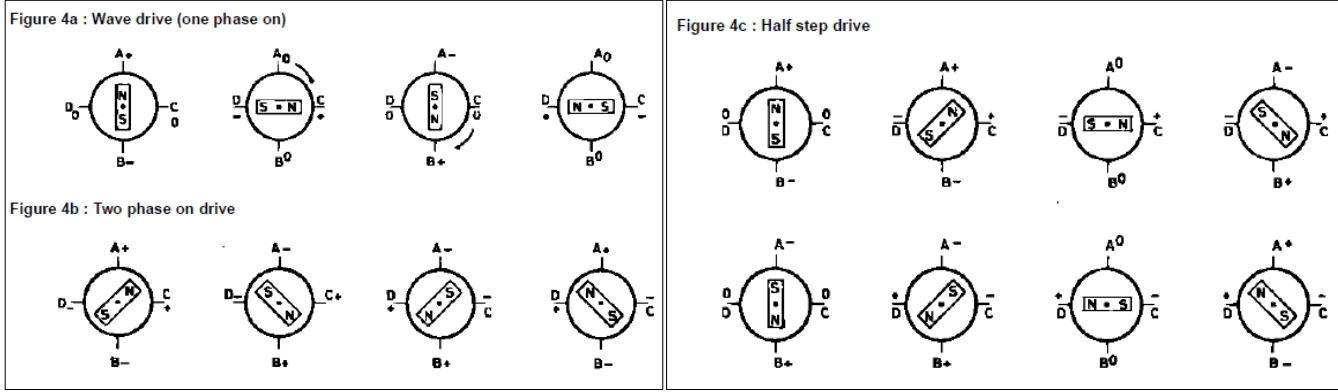
Greatly simplified, a bipolar permanent magnet stepper motor consist of a rota-ring magnet surrounded by stator poles as shown.

The first is to energize the windings in the sequence AB/CD/BA/DC (BA means that the winding AB is energized but in the opposite sense). This sequence is known as "one phase on" full step or wave drive mode. Only one phase is energized at any given moment (figure 4a).

The second possibility is to energize both phases together, so that the rotor always aligns itself between two pole positions. Called "two-phase-on" full step, this mode is the normal drive sequence for a bipolar motor and gives the highest torque (figure 4b). The third option is to energize one phase, then two, then one, etc., so that the motor moves in half step increments. This sequence, known as half step mode, halves the effective step angle of the motor but gives a less regular torque (figure 4c).

For rotation in the opposite direction (counter-clockwise) the same three sequences are used, except of course that the order is reserved.

As shown in these diagrams the motor would have a step angle of 90°. Real motors have multiple poles to reduce the step angle to a few degrees but the number of windings and the drive sequences are unchanged. A typical bipolar stepper motor is shown in figure 5.



The three drive sequences for a two phase bipolar stepper motor. Clockwise rotation is shown.

Diagrama de conexiones de la tarjeta electrónica para comunicación RS-485 (TEC-RS485)

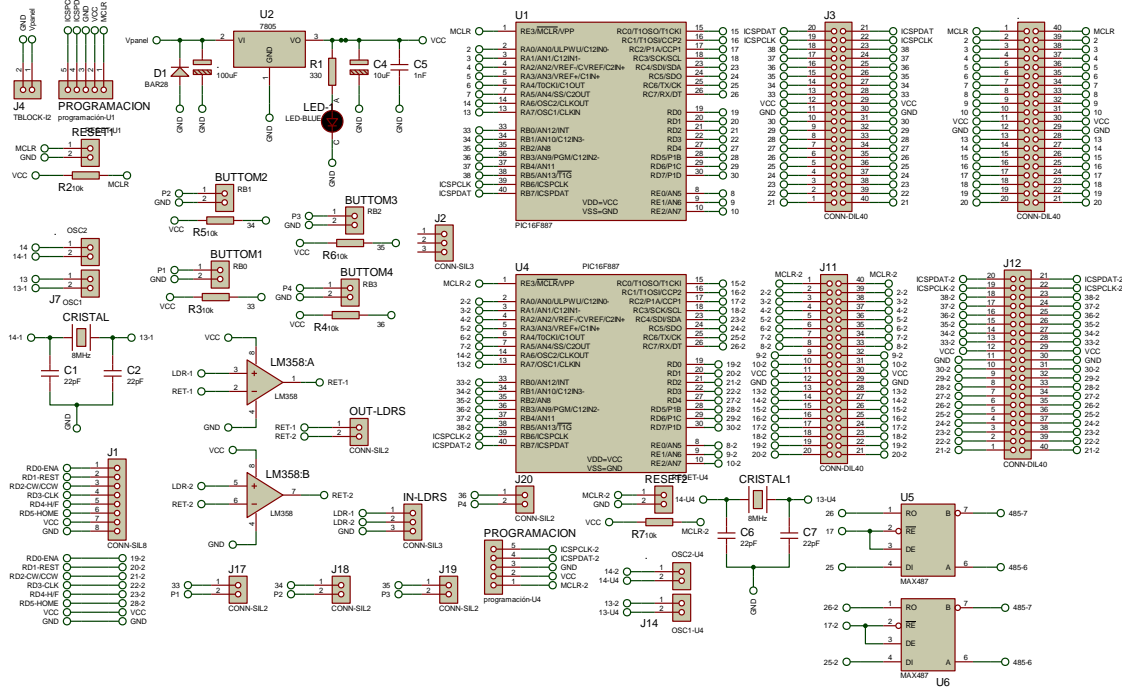
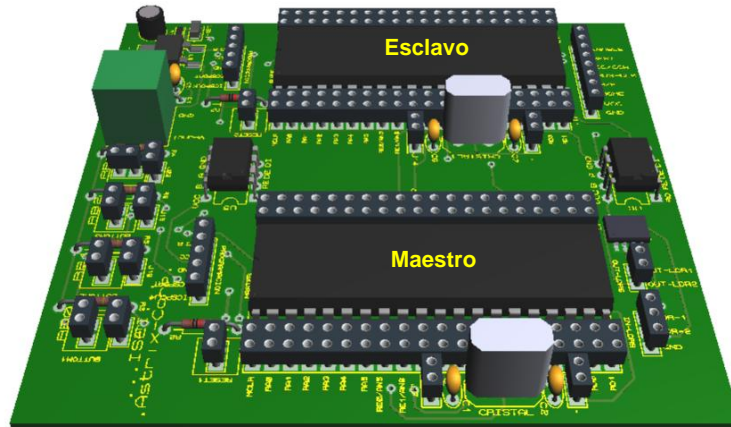
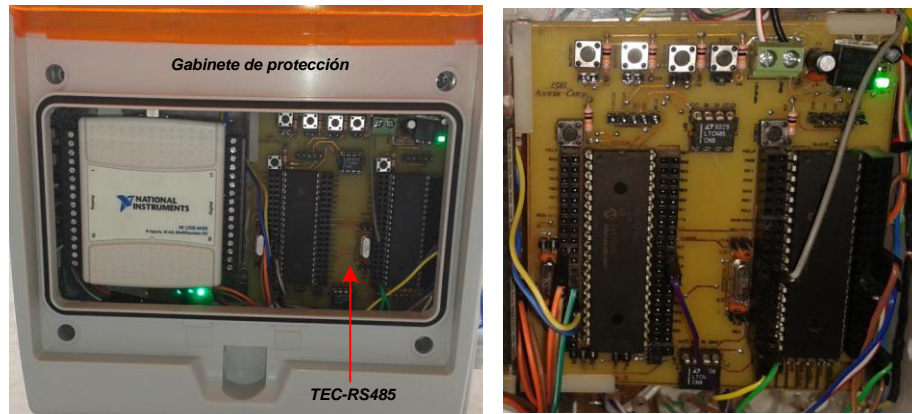


Diagrama de conexiones para la TEC-RS485



Vista 3D de la tarjeta de la *TEC-RS485*



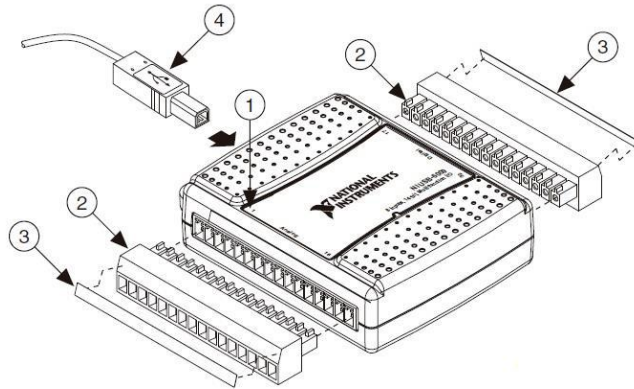
Montaje e implementación de la *TEC-RS485*

NI USB-6009



DAQ Multifunción de bajo costo de 14 bits, kS/s

- 8 entradas analógicas (14 bits , 48 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s)
- Energizado por bus para una mayor movilidad , conectividad de señal integrada
- Compatible con Labview, LabwindowsTM/CVI y Measurement Studio para Visual Studio.NET
- Rango de voltaje máximo, -10V, 10 V
- Máximo voltaje de entrada analógica, 5 V
- Resolución, 32 bits
- Velocidad de muestreo, 14 bits, kS/s



La tarjeta está compuesta de tres elementos, el elemento principal es la DAQ (la DAQ se refiere a la tarjeta NI USB-6009) y dos grupos de borneras, tal como se observa a continuación:

