REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN PARA VISUALIZAR LA CURVA CARACTERÍSTICA DE CELDAS Y PANELES SOLARES

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

JORGE ISMAEL GUACHIMBOZA DÁVALOS
whitertcm@yahoo.com

HUGO MAURICIO TAYO PAZMIÑO
mauriciotp_86@hotmail.com

DIRECTOR: PATRICIO IVÁN CHICO HIDALGO, M.Sc.
patricio.chico@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: MARCO VINICIO YÁNEZ SALCEDO, M.SC
marco.yanez@epn.edu.ec

Quito, julio 2011

DECLARACIÓN

Nosotros, Jorge Ismael Guachimboza Dávalos y Hugo Mauricio Tayo Pazmiño declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jorge Ismael Guachimboza Dávalos	Hugo Mauricio Tayo Pazmiño

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Ismael Guachimboza Dávalos y Hugo Mauricio Tayo Pazmiño, bajo nuestra supervisión.

Ing. Patricio Chico, M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Fís. Marco Yánez, M.Sc.
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí, a mis padres por el enorme sacrificio y el gran apoyo que me han brindado con toda su bondad y cariño. Mi agradecimiento eterno y sincero al Lcdo. Carlos Luis Miranda, ya que con su ayuda pude iniciar este largo camino.

A quienes con su ayuda permitieron la consecución de este proyecto; al Ing. Patricio Chico por su acertada dirección; y a todos quienes conforman el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica por darnos la oportunidad y las facilidades para el desarrollo del proyecto.

A todos mis amigos: los del cole, “los provincianos” del prepo, a los compas de la carrera y de la facultad, y en especial aquellos con quienes he llegado a establecer un sentimiento más allá de la amistad, a los amigos y compañeros de siempre, GRACIAS FACTOR I.

JORGE TCM

DEDICATORIA

Con mucho respeto y cariño dedico este trabajo a mi papi Jorge, mi mami Lola, mi ñaño Diego, a mis abuelitos, a todos mis tíos y tías, mis primos y primas; quienes con su cariño, apoyo y comprensión me impulsaron a llegar hasta aquí.

Jorge Ismael Guachimboza Dávalos

AGRADECIMIENTO

A Dios por todas las bendiciones que ha sabido traer a mi vida y por nunca desampararme en los momentos difíciles.

A toda mi familia en especial a mi madre Faviola y mi tío Mario por su constante apoyo, consejos y enseñanzas que me formaron como una persona responsable, correcta y con valores.

Al Ing. Patricio Chico por su acertada orientación y ayuda en el desarrollo del presente trabajo.

Al Fís. Marco Yánez y a todas las personas que forman parte del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica por facilitarnos sus instalaciones para la realización del proyecto y brindarnos los conocimientos relacionados con esta área.

A todos mis amigos, en especial con los que compartimos los últimos años de carrera, con los cuales día a día nos apoyamos para afrontar cualquier reto y que ya se han convertido en mi segunda familia.

HUGO

DEDICATORIA

A mi madre Faviola y a mi hermana Anita, por su todo su cariño, su apoyo y por siempre creer en mí. Ellas son la razón de todo mi esfuerzo y ganas de superación.

Hugo Mauricio Tayo Pazmiño

CONTENIDO

CONTENIDO ..... **i**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **viii**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **xvi**
RESUMEN ..... **xvii**
PRESENTACIÓN ..... **xviii**
CAPÍTULO 1 ..... **1**
MARCO TEÓRICO **1**
1.1. ENERGÍA 2
1.1.1. DEFINICIÓN DE ENERGÍA [2] 2
1.1.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA [2] 3
1.1.3. POTENCIA Y ENERGÍA 3
1.1.4. FUENTES DE ENERGÍA [2] 4
1.1.4.1. Fuentes de energía no renovable 4
1.1.4.2. Fuentes de energía renovable 4
1.1.4.2.1. Hidroelectricidad 5
1.1.4.2.2. Energía solar 5
1.1.4.2.3. Energía eólica 5
1.1.4.2.4. Biomasa 5
1.1.4.2.5. Energía geotérmica 6
1.1.4.2.6. Hidrógeno 6
1.1.4.2.7. Energía mareomotriz 7
1.2. ENERGÍA SOLAR 7
1.2.1. ESTRUCTURA Y DATOS DEL SOL [1] 8
1.2.2. RADIACIÓN SOLAR Y ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO [1][2][52] 9
1.2.3. INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA EN LA RADIACIÓN SOLAR [1] 11
1.2.4. CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA [2][54][55] 12
1.3. MOVIMIENTO DEL SOL EN LA ESFERA CELESTE 14
1.3.1. GENERALIDADES [1][14] 14
1.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL [1] 16
1.3.3. COORDENADAS ALTACIMUTALES [8] 17
1.4. ELECTRICIDAD OBTENIDA DEL SOL [2] 18
1.4.1. ESTRUCTURA ATÓMICA 18
1.4.2. EFECTO FOTOELÉCTRICO 20

1.4.3. FORMACIÓN DE MATERIALES TIPO N Y TIPO P 21
1.4.4. UNIÓN N-P 22
1.4.5. EFECTO DE LA LUZ EN LA UNIÓN N-P 23
1.4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA CELDA SOLAR [2][3] 23
1.4.7. CURVA CORRIENTE-VOLTAJE DE LA CELDA SOLAR 24
1.4.7.1. Corriente de cortocircuito (Icc o Isc) 25
1.4.7.2. Voltaje de circuito abierto (Vca o Voc) 25
1.4.7.3. Potencia máxima (Pmax) 25
1.4.8. EFICIENCIA DE LA CELDA SOLAR 26
1.4.9. FACTOR DE LLENADO (FILL FACTOR) 26
1.4.10. CARACTERÍSTICAS DE POLARIZACIÓN INVERSA 27
1.4.11. EFECTOS DE LA RADIACIÓN Y LA TEMPERATURA 27
1.4.12. TIPOS DE CELDAS SOLARES [9] 28
1.4.12.1. Tecnología de Silicio Cristalizado 28
1.4.12.1.1. Celda de Silicio Monocristalino 28
1.4.12.1.2. Celda de Silicio Policristalino 29
1.4.12.1.3. Celda de Silicio tipo "Ribbon" 29
1.4.12.2. Tecnología Thin Film 30
1.4.12.2.1. Celda de Silicio Amorfo 30
1.4.12.2.2. Celda de Cobre, Indio, Galio y Diselenuro (CIGS) 30
1.4.12.2.3. Celda de Teluro de Cadmio 31
1.4.13. CONEXIÓN DE CELDAS SOLARES 32
1.5. PÉRDIDAS EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA POR DESACOPLAMIENTO [6] 34
1.5.1. PÉRDIDAS ESTÁTICAS POR DESACOPLAMIENTO 34
1.5.2. PÉRDIDAS DINÁMICAS POR DESACOPLAMIENTO 34
1.5.2.1. Sin diodos bypass 35
1.5.2.2. Con Diodos Bypass 36
1.5.2.3. Sombreado homogéneo 37
1.5.2.4. Sombreado Parcial 38
1.5.3. DIFERENTES TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS POR DESACOPLAMIENTO 39
1.5.3.1. Bypass activo 39
1.5.3.2. Módulos AC 39
1.5.3.3. Optimizadores de Potencia 40
1.6. CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 41

1.6.1. MÉTODOS PARA CARACTERIZAR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 42
1.6.1.1. Método de carga capacitiva [4] 42
1.6.1.2. Método de carga resistiva 43
1.6.1.3. Método de carga electrónica [3] 44
1.6.1.3.1. Resistencia de entrada en un conversor DC/DC reductor 45
1.6.1.3.2. Resistencia de entrada en un conversor DC/DC elevador 46
1.6.1.3.3. Resistencia de entrada en un conversor DC/DC reductor-elevador 46
1.6.2. CARACTERIZADORES COMERCIALES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 47
1.7. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO 49
CAPÍTULO 2 51
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES 51
2.1. SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN 51
2.1.1. ELEMENTO DE CONTROL 54
2.1.1.1. Microcontrolador ATMEGA164P 54
2.1.1.2. Distribución de los recursos del microcontrolador ATMEGA164P 55
2.1.2. SISTEMA DE MEDICIÓN DE VOLTAJE 56
2.1.2.1. Diseño del divisor de voltaje para la medición de voltaje 57
2.1.3. SISTEMA DE MEDICIÓN DE CORRIENTE 58
2.1.3.1. Elección del sensor de corriente.....59
2.1.3.1.1. Sensor de corriente ACS712 59
2.1.3.1.2. Sensor de corriente ACS715 60
2.1.3.2. Diseño del sistema de medición de corriente 61
2.1.3.2.1. Acondicionamiento del sensor ACS712 63
2.1.3.2.2. Acondicionamiento del sensor ACS715 64
2.1.3.2.3. Diseño del circuito para comandar el relé de direccionamiento. 65
2.1.4. SISTEMA PARA LA EMULACIÓN DE RESISTENCIA VARIABLE.....66
2.1.4.1. Control lineal 67
2.1.4.2. Elección y dimensionamiento del interruptor electrónico 68
2.1.4.3. Dimensionamiento del disipador de potencia [10].....70
2.1.4.4. Acondicionamiento de la señal PWM del microcontrolador para realizar un control lineal 72
2.1.5. SISTEMA DE COMUNICACIÓN 74
2.1.5.1. Comunicación serial asíncrona [11].....75
2.1.5.2. Comunicación con el computador 79
2.1.5.3. Comunicación con el microcontrolador ATMEGA16 81

2.1.6. PROGRAMA DE CONTROL 83
2.1.6.1. Método de Control 83
2.1.6.1.1. Control de voltaje 86
2.1.6.1.2. Punto anterior de voltaje 88
2.1.6.1.3. Control de corriente 88
2.1.6.2. Resumen del procedimiento empleado en el sistema de caracterización 91
2.1.6.3. DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL 92
2.2. INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI) 100
2.2.1. VENTANA PARA CARACTERIZACIÓN 101
2.2.1.1. Parámetros de control para de la comunicación serial 101
2.2.1.2. Parámetros de control para la caracterización 101
2.2.1.3. Visualización de resultados 103
2.2.2. VENTANA DE ACCESO A LA BASE DE DATOS 103
2.2.2.1. Analizador gráfico 104
2.2.2.2. S.T.C. (Condiciones de Prueba Estándar) 105
2.2.2.3. Simulador 106
2.2.2.4. Datos de celda (1 y 2) 106
CAPÍTULO 3 108
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA 108
3.1. ELEMENTO DE CONTROL 109
3.1.1. MICROCONTROLADOR ATMEGA16 110
3.1.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA16: 111
3.2. ESTRUCTURA MECÁNICA PARA SEGUIMIENTO 112
3.2.1. SELECCIÓN DE ACTUADORES Y BASES CONCEPTUALES PARA LA CONSTRUCCIÓN 112
3.2.1.1. El servomotor Hitec HS-311 112
3.2.1.2. Lógica para la construcción del mecanismo de seguimiento 113
3.2.2. ENSAMBLAJE DEL MÓDULO SEGUIDOR DE SOL 115
3.3. SISTEMA DE MEDICIÓN DE ILUMINACIÓN Y SEGUIMIENTO 119
3.3.1. ELECCIÓN DEL SENSOR DE ILUMINACIÓN 119
3.3.2. ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR DE ILUMINACIÓN 121
3.3.3. DISEÑO DEL HARDWARE PARA EL CONTROL DE LOS SERVOMOTORES 122
3.3.3.1. Fuente de 5 voltios para los servomotores 123
3.3.3.2. Elección del optoacoplador 123

3.3.3.3. Diseño del hardware para optoacoplamiento....124
3.4. SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA 125
3.4.1. ELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA 126
3.4.2. ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR DE TEMPERATURA....126
3.5. PROGRAMA DE CONTROL..... 128
3.5.1. MÉTODO DE CONTROL....129
3.5.2. DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL....130
CAPÍTULO 4 138
PRUEBAS Y RESULTADOS 138
4.1. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL MÓDULO CARACTERIZADOR CON UN PANEL SOLAR DE 25W EXPUESTO A UNA RADIACIÓN ARTIFICIAL CONSTANTE..... 139
4.2. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL MÓDULO CARACTERIZADOR CON UN PANEL SOLAR DE 80W EXPUESTO A LA RADIACIÓN SOLAR..... 143
4.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL MÓDULO CARACTERIZADOR CON UN PANEL SOLAR DE 22W..... 145
4.3.1. COMPONENTES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS PARA EL PANEL FOTOVOLTAICO DE 22W....145
4.3.2. OBTENCIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS CON DISTINTO NÚMERO DE PUNTOS.....146
4.3.3. VARIACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS CON RESPECTO A LA VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE Y LA TEMPERATURA. 147
4.4. PRUEBAS REALIZADAS PARA CALIBRAR LOS ÁNGULOS ENTREGADOS POR EL MÓDULO DE SEGUIMIENTO SOLAR..... 149
CAPÍTULO 5 152
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 152
5.1. CONCLUSIONES 152
5.2. RECOMENDACIONES..... 154
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 156
ANEXOS 162
ANEXO A A-1
MANUAL DE USUARIO A-1
MANUAL DE USUARIO DE LA INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW PARA CARACTERIZAR PANELES SOLARES.....A-2

A.1 VENTANA PARA CARACTERIZACIÓN A-3
A.1.1 PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA COMUNICACIÓN SERIAL A-3
A.1.2 PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA CARACTERIZACIÓN A-3
A.1.3 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS A-5
A.1.4 PASOS PARA REALIZAR LA CARACTERIZACIÓN DE UN PANEL SOLAR A-6
A.2 VENTANA DE ACCESO A LA BASE DE DATOS A-7
A.2.1 ANALIZADOR GRÁFICO A-8
A.2.1.1 AÑADIR GRÁFICOS AL ANALIZADOR GRÁFICO A-9
A.2.2 S.T.C (STANDARD TEST CONDITIONS) A-10
A.2.2.1 USO DEL SISTEMA S.T.C A-11
A.2.3 SIMULADOR A-12
A.2.3.1 USO DEL SIMULADOR A-13
A.2.4 DATOS DE CELDA (1 Y 2) A-14
A.3 VENTANA DE SEGUIMIENTO SOLAR A-14
A.3.1 REGISTRO DE UNA TRAYECTORIA A-15
A.3.2 ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS A-16
ANEXO B B-1
ESQUEMÁTICOS, CIRCUITOS IMPRESOS Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL PROYECTO B-1
B.1 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DE LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN B-2
B.2 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES B-4
B.3 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL CIRCUITO PARA COMINUCACIÓN ENTRE EL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN Y EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR B-6
B.4 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR B-7
ANEXO C C-1
CONECTORES UTILIZADOS EN LOS MÓDULOS Y FUNCIÓN DE LOS PINES C-1
C.1. CONECTORES DEL MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN C-2
C.2. CONECTORES DEL SEGUIDOR SOLAR C-3
ANEXO D D-1

HOJAS TÉCNICAS DE INTEGRADOS UTILIZADOS D-1
D.1 ATMEGA164P (MICROPROCESADOR).....D-1
D.2 ACS712 (SENSOR DE CORRIENTE).....D-1
D.3 ACS715 (SENSOR DE CORRIENTE).....D-1
D.4 TLP2200 (FOTOACOPLADOR) D-1
D.5 AD620 (AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN).....D-1
D.6 IRF640 (MOSFET).....D-1
D.7 ATMEGA16 (MICROPROCESADOR).....D-1
D.8 LM35 (SENSOR DE TEMPERATURA) D-1
ANEXO E E-1
SERVOMOTORES.....E-1
E.1 SERVOMOTORES E-2
E.1.1 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR.....E-2
ANEXO F F-1
ECUACIONES PARA TRANSFORMAR A PRUEBAS DE CONDICIONES ESTÁNDAR (STC).....F-1

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1: Faro alimentado por energía solar, situado en la isla Montague, en la costa este de Australia. [12] 7
Figura 1.2: a) Imagen real del Sol, b) Estructura del Sol. [13] 8
Figura 1. 3: El espectro electromagnético. [12] 10
Figura 1. 4: Espectro solar en el exterior de la atmósfera y en la superficie de la Tierra comparado con la radiación de un cuerpo negro de T = 5780 K. [53] 12
Figura 1. 5: Variación anual y diaria de la masa de aire [2]. 13
Figura 1. 6: Dirección del ángulo de rotación de la Tierra. [14] 14
Figura 1. 7: Ángulo de declinación. [12] 15
Figura 1. 8: Zonas climáticas de la tierra. [15] 15
Figura 1. 9: Movimiento aparente del Sol en un punto medio de la Tierra. [1] 16
Figura 1. 10: Coordenadas Altacimutales. [8] 17
Figura 1. 11: Materiales conductores. [2] 19
Figura 1. 12: a) Materiales aislantes, b) Materiales semiconductores. [2] 20
Figura 1. 13: Efecto fotoeléctrico. [16] 20
Figura 1. 14: Estructura atómica del silicio intrínseco o puro y bandas de valencia y conducción. [2] 21
Figura 1. 15: Estructura atómica del silicio dopado con fósforo (semiconductor tipo n). [2] 21
Figura 1. 16: Estructura atómica del silicio dopado con boro (semiconductor tipo p). [2] 22
Figura 1. 17: Aplicación de voltaje externo y efecto en la corriente. [2] 22
Figura 1. 18: Circuito eléctrico equivalente de la celda solar. [2] 23
Figura 1. 19: Curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje de la celda solar. [2] . 25
Figura 1. 20: Característica inversa de una celda solar. [6] 27
Figura 1. 21: Efectos de la variación de la radiación (a) y la temperatura (b) en la curva I-V de la celda solar. [38] 28
Figura 1. 22: Celda monocristalina. [40] 29
Figura 1. 23: Celda policristalina. [40] 29
Figura 1. 24: Celda de silicio amorfo. [41] 30

Figura 1. 25: Celda GICS. [9] 31
Figura 1. 26: Celda de teluro de cadmio. [9]..... 31
Figura 1. 27: Conexión de celdas solares en un panel fotovoltaico. [2]..... 32
Figura 1. 28: Curva I-V para N celdas conectadas en serie y M celdas conectadas en paralelo. [12]..... 33
Figura 1. 29: Diodos bypass colocados en arreglos de celdas solares dentro de un módulo fotovoltaico y su funcionamiento. [12]..... 33
Figura 1. 30: Efecto en las curvas I-V sin usar diodo bypass: a) de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante. [6]..... 35
Figura 1. 31: Curva I-V combinada para una celda solar con diodo bypass. [12] 36
Figura 1. 32: Efecto en las curvas I-V con diodo bypass: a) de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante. [6]..... 37
Figura 1. 33: Sombreado homogéneo (diferente ángulo de inclinación). [6] 37
Figura 1. 34: Efecto del sombreado homogéneo en la característica de un arreglo fotovoltaico. [6] 38
Figura 1. 35: (a) Conexión en serie de 10 módulos; (b) Efecto del sombreado parcial. [6]..... 38
Figura 1. 36: Tecnología de bypass activo. [6] 39
Figura 1. 37: Módulos AC. [6]..... 40
Figura 1. 38: Unidades distribuidas para seguimiento del punto de máxima potencia. [6]..... 41
Figura 1. 39: Forma de conexión para el método de carga capacitiva. [4] 42
Figura 1. 40: Forma de conexión para el método de carga resistiva. [39]..... 43
Figura 1. 41: Conexión Panel Solar – Conversor DC/DC. [3]..... 44
Figura 1. 42: a) Conversor Reductor, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua. [3]..... 45
Figura 1. 43: a) Conversor Elevador, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua. [3]..... 46
Figura 1. 44: a) Conversor Reductor-Elevador, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua. [3]..... 46
Figura 1. 45: Estación para caracterización de ABET TECHNOLOGIES. [17].... 48

Figura 1. 46: Módulo para caracterización de VISION FACTORY AUTOMATION. [18] 48
Figura 1. 47: Diagrama de la estructura general del proyecto. 49
Figura 1. 48: Distribución del hardware para caracterización y seguimiento solar. 50
Figura 1. 49: Diagrama de bloques de las funciones que realiza el sistema de caracterización y seguimiento solar. 50

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1: Diagrama estructural del sistema de caracterización. 51
Figura 2. 2: Configuración utilizada para la alimentación del sistema de caracterización. 52
Figura 2. 3: Circuito completo del sistema de caracterización. 53
Figura 2. 4: Funciones ejecutadas por el microcontrolador ATMEGA164P. 54
Figura 2. 5: ATMEGA16 (a) imagen real [31] y (b) distribución de pines [47]. 55
Figura 2. 6: Circuito esquemático del microcontrolador ATMEGA164P. 55
Figura 2. 7: Circuito esquemático del sistema de medición de corriente. 56
Figura 2. 8: Diagrama de bloques de la estructura del sistema de medición de corriente. 59
Figura 2. 9: ACS712: a) Pines y forma de conexión [42], b) Imagen real [20]. 60
Figura 2. 10: ACS715: a) Pines y forma de conexión [43], b) Imagen real. [21] .. 61
Figura 2. 11: Circuito esquemático del sistema de medición de corriente. 62
Figura 2. 12: AD620: a) Distribución de pines [44], b) Imagen real [22]. 63
Figura 2.13: Relé NTE R53-5D20-12: a) imagen real, b) disposición de los contactos. [23] 65
Figura 2. 14: a) Transistor 2N3904 [24], b) Diodo 1N4148 [25]. 66
Figura 2. 15: Circuito esquemático del sistema para emulación de resistencia variable. 67
Figura 2. 16: Característica VGS - ID de un transistor NMOS [26]. 68
Figura 2. 17: Distribución de pines del IRF640. [45]. 69
Figura 2. 18: Característica VGS - ID del IRF640. [45] 70

Figura 2. 19: Circuito térmico representado como equivalencia de un eléctrico.. 70
Figura 2. 20: Circuito térmico representado como equivalencia de un eléctrico.. 72
Figura 2. 21: TLP2200: a) Imagen real [27], b) Distribución de pines [46]. 73
Figura 2. 22: Flujo de datos en las comunicaciones del sistema..... 75
Figura 2. 23: Formato de un caracter en la transmisión asíncrona en serie. [28] 76
Figura 2. 24: conectores DB9 hembra y macho respectivamente. [29] 77
Figura 2. 25: MAX 232: a) imagen real, b) distribución de pines. [30] 78
Figura 2. 26: Circuito del MAX-232 para comunicación con el computador. 79
Figura 2. 27: Formato de los paquetes de datos enviados desde el ATMEGA 164 hacia el computador vistos en el HyperTerminal. 80
Figura 2. 28: Esquemático del circuito utilizado para comunicar los dos microcontroladores. 82
Figura 2. 29: Diagrama estructural del sistema de control. 83
Figura 2. 30: Método de control para la obtención de la curva I-V. 84
Figura 2.31: Valores de voltaje establecidos en función del número de mediciones (N). 87
Figura 2.32: Relación asumida para la ley de control del controlador PI de voltaje. 87
Figura 2.33: Valores de corriente establecidos en función del número de mediciones (N). 89
Figura 2.34: Relación asumida para la ley de control del controlador PI de corriente. 90
Figura 2.35: Inicialización y Programa Principal. 92
Figura 2.36: Interrupciones por recepción serial. 93
Figura 2.37: Subrutina para obtención de la curva característica (Pasos iniciales). 94
Figura 2.38: Subrutina para obtención de la curva característica (Control por Voltaje). 95
Figura 2.39: Subrutina para obtención de la curva característica (Control por corriente). 96
Figura 2.40: Subrutina para obtención de la curva característica (Envío de datos). 97
Figura 2.41: Subproceso para el controlador PI de voltaje. 98

Figura 2.42: Controlador PI de corriente. 99
Figura 2.43: Pantalla principal del HMI para el caracterizador de paneles solares. 100
Figura 2. 44: Barra de control para de la comunicación serial..... 101
Figura 2. 45: Parámetros de control para la caracterización. 102
Figura 2. 46: Visualización de resultados. 103
Figura 2. 47: Ventana de acceso a la base de datos. 104
Figura 2. 48: Analizador gráfico para curvas características. 105
Figura 2. 49: STC. 105
Figura 2. 50: Simulador. 106
Figura 2. 51: Ventana de datos de los paneles probados. 107

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1: Arquitectura del sistema de seguimiento solar y medición de temperatura. 108
Figura 3. 2: Circuito completo del sistema de caracterización..... 109
Figura 3. 3: ATMEGA16: a) imagen real [37] y b) distribución de pines [51]. 110
Figura 3. 4: Circuito esquemático del microcontrolador ATMEGA16. 111
Figura 3. 5: Servomotor Hitec HS-311: a) figura real b) modo de operación a 4MHz. [32] 112
Figura 3.6: Comparación entre coordenadas altacimutales y disposición de los servomotores para emularlas. 113
Figura 3.7: Funcionamiento del servomotor acimutal. 114
Figura 3.8: Funcionamiento del servomotor de altura. 115
Figura 3.9: Piezas utilizadas en el ensamble del módulo seguidor de Sol. 116
Figura 3.10: Servomotores utilizados en el mecanismo de seguimiento. 116
Figura 3.11: Piezas en acrílico utilizadas en el mecanismo de seguimiento. 117
Figura 3.12: Ensamble parcial: a) para movimiento acimutal, b) para movimiento en altura. 117
Figura 3. 13: Ensamble completo del mecanismo de seguimiento..... 118
Figura 3. 14: Partes del mecanismo de seguimiento solar. 118

Figura 3. 15: Mecanismo de seguimiento en varias posiciones. 119
Figura 3. 16: LDR: a) símbolo [14], b) imagen real [33]. 120
Figura 3. 17: Sistema de obturación y sensores 120
Figura 3. 18: Acondicionamiento para fotoresistencia. 121
Figura 3. 19: Configuración utilizada para el acondicionamiento de cada par de fotoresistencias. 122
Figura 3. 20: Configuración utilizada para la alimentación de los servomotores. 123
Figura 3. 21: Fototransistor 4N25: a) Imagen real [34], b) Distribución de pines [48]. 124
Figura 3. 22: Configuración utilizada para el optoacoplamiento de los pulsos de control. 125
Figura 3. 23: Lm35: a) imagen real [35] y b) distribución de pines [49]. 126
Figura 3. 24: Lm358 (a) imagen real [36] y (b) distribución de pines [50]. 127
Figura 3. 25: Acondicionamiento del sensor de temperatura. 128
Figura 3. 26: Diagrama estructural del sistema de control. 128
Figura 3. 27: Diagrama de flujo general del algoritmo de seguimiento. 130
Figura 3. 28: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio sur. (Parte 1) 131
Figura 3. 29: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio sur. (Parte 2). 132
Figura 3. 30: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento rápido por el hemisferio sur. 133
Figura 3. 31: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio norte. (Parte 1) 134
Figura 3. 32: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio norte. (Parte 2) 135
Figura 3. 33: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento rápido por el hemisferio norte. 136
Figura 3. 34: Diagrama de flujo del algoritmo de conversión de los pulsos de los servomotores en ángulo para el hemisferio sur. 137
Figura 3. 35: Diagrama de flujo del algoritmo de conversión de los pulsos de los servomotores en ángulo para el hemisferio norte. 137

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1: Sistema de caracterización y seguimiento solar diseñados para obtener las curvas características de paneles solares. 138
Figura 4. 2: Panel solar de 25W (imagen real) y datos de placa. 139
Figura 4. 3: Panel solar expuesto a una lámpara halógena para conseguir radiación constante. 139
Figura 4. 4: Curva característica de un panel de 25W expuesto a una radiación constante (lámpara halógena) mostrada en la interfaz gráfica. 140
Figura 4. 5: Resultados de la caracterización de un panel de 25W expuesto a una radiación constante (lámpara halógena) mediante el método de carga resistiva. 141
Figura 4. 6: Comparación entre las curvas I-V y P-V de un panel de 25W obtenidas mediante carga electrónica y carga resistiva ante una radiación constante. 142
Figura 4. 7: Panel solar de 80W (imagen real) y datos de placa. 143
Figura 4. 8: Panel solar de 80W expuesto a la radiación solar y curva característica obtenida en la pantalla de caracterización del HMI. 144
Figura 4. 9: Variación de las curvas características para un panel de 80W expuesto a la radiación solar. 144
Figura 4. 10: Panel solar de 22W (imagen real) y datos de placa. 145
Figura 4. 11: Componentes utilizados para las pruebas del panel de 22W. 146
Figura 4. 12: Curvas características con distinto número de puntos. 146
Figura 4. 13: Variación de las curvas características para un panel de 22W expuesto a la radiación solar. 147
Figura 4. 14: Variación de las curvas características con la radiación incidente. 148
Figura 4. 15: Variación de las curvas características con la temperatura superficial. 148
Figura 4. 16: Módulo de seguimiento solar. 149
Figura 4. 17: Ángulo de la radiación solar incidente sobre la superficie. 150

Figura 4. 18: Comparación entre el ángulo de radiación solar y el ángulo medido por el módulo seguidor. 151
Figura 4. 19: Posición en azimut del módulo de seguimiento respecto de la radiación incidente. 151

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1. 1: Regiones del espectro electromagnético. [2] 11
Tabla 1. 2: Parámetros eléctricos medidos en condiciones de AM 1,5 a 25ºC [19]. 32
Tabla 1. 3: Valores de Ri para las configuraciones principales de conversores DC/DC. [3] 45

CAPÍTULO 2

Tabla 2. 1: Funciones de los pines del microcontrolador ATMEGA164P. 56
Tabla 2. 2: Analogía entre la temperatura y la ley de ohm. [10]..... 70
Tabla 2. 3: Distribución de Pines del conector DB9. [29] 77

CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1: Funciones de los pines del microcontrolador ATMEGA16. 111
Tabla 3. 2: Especificaciones técnicas del servomotor Hitec HS-311. 113

RESUMEN

En este proyecto se abordan temáticas relacionadas con la generación eléctrica fotovoltaica, que convergen en el desarrollo de un módulo didáctico para la caracterización de paneles solares de hasta 100W y 12V para el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica, el cual permitirá contrastar y complementar los conocimientos acerca de la energía solar fotovoltaica y en particular del funcionamiento de las celdas y paneles solares, continuando con el objetivo de formar a los estudiantes en el uso de energías limpias.

El correcto funcionamiento del caracterizador de paneles solares se basa en la utilización de una resistencia electrónica, lo cual se consigue mediante el control lineal de MOSFETs, cuyo nivel de apertura emula una resistencia determinada. Al exponer a un panel solar a una variación de resistencia controlada desde cero hasta infinito, se consiguen todos los valores necesarios tanto de voltaje como de corriente para graficar la curva característica I-V, a las condiciones ambientales en el instante de la caracterización.

Las variables ambientales a considerar para cada curva característica generada son la temperatura y el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el panel fotovoltaico, para lo cual se implementa un módulo con el acondicionamiento necesario para la medición de la temperatura del panel solar y un dispositivo de rastreo solar con dos grados de libertad, que permite el seguimiento del Sol durante el día y así la determinación del ángulo de la radiación emitida.

Los datos generados en el caracterizador son transferidos a un ordenador para el almacenamiento, visualización y análisis de las curvas características I-V, mediante una interfaz gráfica de tipo didáctica, desarrollada en el software LabVIEW de National Instruments, donde se tiene acceso sencillo a toda la base de datos generada para comparar las características de todos los módulos fotovoltaicos, caracterizados ante distintas condiciones ambientales.

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se abordan los procesos de diseño y construcción de un módulo para la caracterización de paneles fotovoltaicos de hasta 100W y 12V orientado a la obtención, almacenamiento y análisis de las curvas características I-V que se producen ante distintas condiciones de temperatura y ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie del panel.

En el Capítulo 1 se realiza un estudio sobre el marco teórico necesario para el desarrollo del proyecto. Se trata de una forma general los conceptos relacionados con energía, energía solar, movimientos del Sol, teoría de celdas solares y teoría relacionada a la caracterización de módulos fotovoltaicos.

En el Capítulo 2 se describe el proceso de diseño y construcción del sistema para la caracterización de paneles solares, que incluye los criterios para la elección de los componentes electrónicos y configuración de hardware necesarios para la caracterización, el método de control utilizado, así como el desarrollo de la interfaz gráfica para el computador, donde se muestran y almacenan las curvas características resultantes.

En el Capítulo 3 se explica el diseño y construcción del sistema de seguimiento solar y medición de temperatura, el cual permite la obtención del ángulo de incidencia de la radiación y la temperatura superficial sobre el panel solar, variables en función de las cuales se grafican las curvas características I-V.

En el Capítulo 4 se presentan las pruebas realizadas para evaluar el correcto funcionamiento del sistema y los resultados obtenidos para comprobar el cumplimiento de los objetivos planteados. Se evalua el funcionamiento de todo el sistema, en cuanto a la obtención de la curva característica I-V en función de la temperatura y el ángulo de incidencia de la radiación de paneles solares de distintas potencias.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido durante el desarrollo del presente proyecto.

CAPÍTULO 1
MARCO TEÓRICO

El consumo de energía es uno de los medidores del progreso y bienestar de una sociedad, sin embargo cuando las fuentes de energía se agotan debido a la creciente demanda, el concepto de crisis energética aparece. Puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son finitas, es inevitable que en un determinado momento la demanda no pueda ser abastecida, salvo que se desarrollen métodos nuevos para obtener energía: éstos son las energías alternativas.

Las fuentes renovables de energía se basan en los flujos y ciclos naturales del planeta, se regeneran y son tan abundantes que perdurarán por cientos de años y usadas con responsabilidad no destruyen el medio ambiente. Incrementar la participación de las energías renovables, asegura una generación de electricidad sostenible a largo plazo y una reducción en la emisión de dióxido de carbono.

Dentro de las energías alternativas el proyecto desarrollado, en general se enfoca en la generación eléctrica fotovoltaica y específicamente busca el diseño y construcción de un dispositivo, que grafique la curva característica I-V de un panel solar en función de la temperatura y el ángulo de incidencia de la radiación solar, para lo cual primero es necesario presentar la información pertinente, para llegar a entender cómo estos dispositivos convierten la luz solar en energía eléctrica, cuál es su comportamiento ante distintos niveles de radiación y temperatura, cómo maximizar la producción de energía con el conocimiento de los movimientos relativos del Sol, en general la teoría de la energía fotovoltaica.

Con el conocimiento de los conceptos básicos es necesario la explicación de lo que significa el proceso de caracterización de paneles solares, la utilidad que brindan, los métodos que existen para efectuar este proceso y que son utilizados en los caracterizadores comerciales fabricados por grandes empresas, finalmente la elección de un método apropiado para ser desarrollado en el presente proyecto.

1.1. ENERGÍA

Al mirar alrededor se observa que los seres vivos crecen, se trasladan, que las máquinas ejecutan las más variadas tareas, se observan diversos fenómenos naturales como rayos y erupciones volcánicas. Todas estas acciones tienen algo en común, la presencia de energía.

La energía es la fuerza vital de nuestra sociedad, de ella dependen la iluminación, el calentamiento y refrigeración de nuestras casas, el transporte de personas y mercancías, la obtención de alimento y su preparación, el funcionamiento de las fábricas, etc. La energía se considera como una propiedad que se manifiesta en los cambios, tanto físicos como químicos que se producen en la naturaleza.

1.1.1. DEFINICIÓN DE ENERGÍA [2]

El trabajo se define como la fuerza necesaria para mover algún objeto una distancia definida, simbólicamente:

$$\boldsymbol{W = F \times d}$$

Ec.1. 1

Donde:

W = Trabajo, que se mide en Joules [J]
F = Fuerza, que se mide en Newtons [N]
d = Distancia, que se mide en metros [m]

La energía por su parte se la define como la capacidad para realizar o producir un trabajo, y posee la misma unidad que la del trabajo, el Joule [J].

Mientras mayor es la fuerza que ejerce un cuerpo se requiere más energía, y de la misma manera si una misma fuerza se mantiene durante un mayor tiempo, esto igualmente demanda mayor energía, lo que se concluye es que para la realización de cualquier tipo de trabajo es necesario liberar una cierta cantidad de energía.

La energía se manifiesta de distintas formas, entre las que se tiene: térmica, radiante, mecánica, eléctrica, química, gravitacional, magnética y nuclear, cada una de las cuales tiene su origen, su forma de producción y sus usos específicos.

1.1.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA [2]

Una forma de energía puede transformarse en otra como consecuencia de un proceso, generalmente por la acción de una máquina, lo cual encamina el estudio hacia uno de los conceptos más importantes sobre energía, que se conoce como la Primera Ley de la Termodinámica o Ley de Conservación de Energía:

"La energía no se pierde ni se destruye, solo se transforma"

El balance energético de un proceso debe ser cero, es decir la energía que ingresa es igual a la energía que se produce. Un proceso energético es reversible cuando se puede ir de uno a otro lado del mismo sin modificar el total de energía involucrada en ese proceso. Es decir que, en este caso, la eficiencia es del 100%.

Sin embargo, se sabe que en la vida real esto no es factible, pues existen pérdidas de energía por varios factores. La eficiencia del proceso entonces nunca llega al 100%. En la realidad energética, todo proceso de transformación es irreversible y el grado de aprovechamiento de la energía introducida en el mismo viene determinado por su eficiencia:

$$\eta = \frac{W}{E}$$

Ec.1. 2

Donde:

η = Eficiencia (adimensional)

W = Trabajo resultante del proceso, se mide en Joules [J]

E = Energía introducida en el proceso, se mide en Joules [J]

1.1.3. POTENCIA Y ENERGÍA

La potencia es la energía generada en una unidad de tiempo.

$$P = \frac{E}{t}$$

Ec.1. 3

Donde:

P = Potencia que se mide en vatios [W]

E = Energía que se mide en Joules [J]

t = Tiempo que se mide en segundos [s]

1.1.4. FUENTES DE ENERGÍA [2]

Las fuentes de energía son elaboraciones naturales más o menos complejas de las que el ser humano puede extraer energía para realizar un determinado trabajo u obtener alguna utilidad. Se puede clasificar a la energía en base a la capacidad que tiene para reponerse, por lo que se la clasifica en dos grupos:

- Fuentes de energía no renovable y
- Fuentes de energía renovable.

1.1.4.1. Fuentes de energía no renovable

Las fuentes de energía no renovables las constituyen combustibles que se extraen de la Tierra y su disponibilidad es cada vez menor, ya que se agotan o su regeneración es muy lenta, se forman por la descomposición de material orgánico producida durante millones de años en el interior de la Tierra, entre éstos se tiene: el petróleo, el gas natural y el carbón. Otra fuente de energía de esta clase es la de tipo nuclear.

1.1.4.2. Fuentes de energía renovable

Son todas aquellas que se pueden regenerar de manera natural o artificial por lo que se las considera inagotables, ya que su disponibilidad no disminuye o lo hace de manera mínima en el tiempo. A este tipo de fuente de energía también se la conoce como Energías Alternativas, por su capacidad de reemplazo de las energías convencionales.

Entre las fuentes de energía renovables se tiene: hidroelectricidad, energía solar, energía eólica, biomasa, geotermia, energía con base en hidrógeno, energía mareomotriz, entre otras.

1.1.4.2.1. Hidroelectricidad

Es una fuente de energía que aprovecha la energía potencial del agua acumulada en represas, el agua cae y pasa por turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que se transforma en electricidad por medio de generadores, después de ser utilizada, el agua es devuelta río abajo.

1.1.4.2.2. Energía solar

Consiste en aprovechar la energía transmitida hacia la Tierra, proveniente de las radiaciones electromagnéticas del Sol para producir electricidad y calor. Para este efecto se utilizan elementos como paneles y colectores solares para obtener electricidad y calentamiento respectivamente.

1.1.4.2.3. Energía eólica

Esta fuente de energía utiliza el potencial del viento para producir electricidad, su funcionamiento es similar al de la hidroelectricidad, solo que en este caso el viento posee energía cinética que mueve los aerogeneradores, y éstos a su vez giran las turbinas eólicas dando como resultado una corriente eléctrica.

1.1.4.2.4. Biomasa

La biomasa es un recurso renovable de energía proveniente de los residuos de la materia orgánica de mar y tierra. Las fuentes de aprovechamiento de la biomasa para energía provienen de tres sitios principalmente:

- Desechos y basura industrial,
- Residuos de cultivos agropecuarios, y
- Cultivos y plantaciones con propósitos energéticos.

Cuando la materia orgánica libera su energía almacenada a través de un proceso natural o artificial, devuelve al ambiente la misma cantidad de CO_2 que consumió durante su crecimiento, por lo que se dice que este ciclo es CO_2 neutro, es decir que la biomasa no afecta a la contaminación del ambiente.

1.1.4.2.5. Energía geotérmica

Consiste en la producción de electricidad y calor utilizando la energía térmica que la Tierra guarda en su interior. Una planta geotérmica es una planta de vapor convencional donde el vapor se obtiene directamente de la Tierra y no mediante el calentamiento de agua con combustibles fósiles, para esto se perfora la superficie hasta encontrar una fuente de agua caliente o vapor y el fluido se dirige a una turbina. El agua o vapor condensado utilizado se vuelve a inyectar a la Tierra.

1.1.4.2.6. Hidrógeno

La aplicación del hidrógeno más que una fuente de energía, constituye una fuente de almacenamiento de energía. Sin embargo, por estar libre de contaminación y por ser el recurso más abundante de la naturaleza, se lo cataloga como una fuente renovable.

Con la invención de las celdas de combustible (celdas de hidrógeno) o pilas de combustible, el uso del hidrógeno se limita a una reacción química lenta en combinación con oxígeno para producir una corriente eléctrica, y cuyo residuo es agua.

1.1.4.2.7. Energía mareomotriz

Las mareas constituyen un fenómeno permanente, pues se deben a la fuerza gravitacional de la Luna y su interacción con la rotación de la Tierra. Una planta mareomotriz que aprovecha la energía de las mareas para producción eléctrica es muy similar a una central hidroeléctrica. El agua del mar en marea alta pasa a través de un ducto que tiene en su interior una turbina tipo bulbo, cuyas hélices se mueven al paso del agua. El agua llena un embalse y luego en marea baja el agua se devuelve al mar y mueve igualmente la turbina.

1.2. ENERGÍA SOLAR

La energía solar en una u otra forma es la fuente de casi toda la energía de la Tierra. Por ejemplo, los combustibles fósiles que se usan para transporte y generación de electricidad son esencialmente energía solar acumulada durante miles de años. De manera similar, la biomasa convierte la energía del Sol en un combustible, que después puede ser usado para calefacción, transporte o electricidad. La energía del viento, usa los flujos que son creados por aire calentado por el Sol y la rotación de la Tierra. La energía fotovoltaica es un simple y elegante método de tomar control de la energía solar.

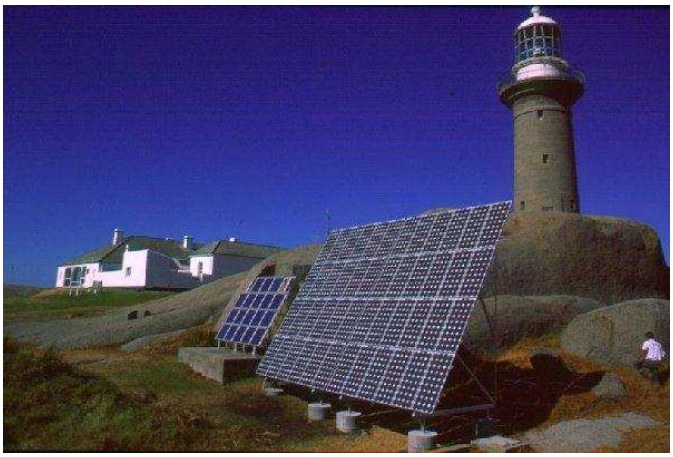
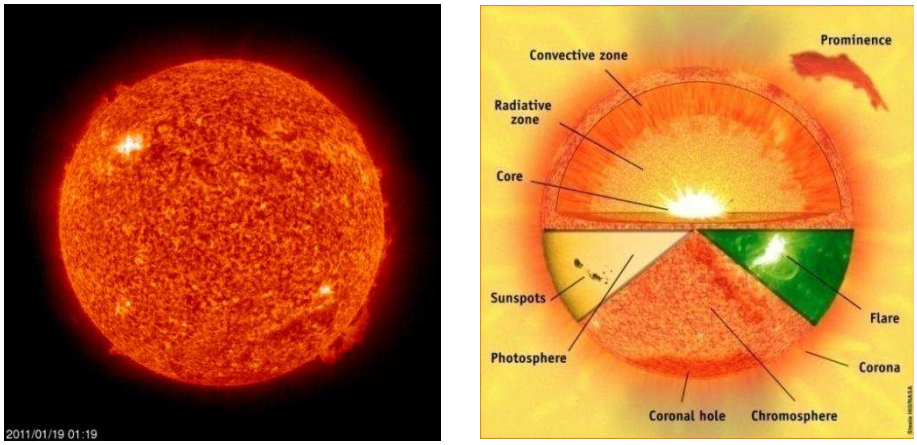


Figura 1. 1: Faro alimentado por energía solar, situado en la isla Montague, en la costa este de Australia. [12]

Los dispositivos fotovoltaicos (celdas solares) son únicos, ya que convierten directamente la radiación solar incidente en electricidad, sin ruido, sin contaminación y sin partes móviles, haciéndolos robustos, confiables y de larga duración.

1.2.1. ESTRUCTURA Y DATOS DEL SOL [1]

El Sol es una estrella más, de las millones de ellas, que iluminan el cielo nocturno. La diferencia radica en su distancia a la Tierra: unos 149 millones de kilómetros, que es enormemente inferior a los muchos años-luz que en promedio la separan del resto de estrellas. El Sol es un cuerpo esférico de naturaleza gaseosa de casi 700 mil kilómetros de radio, que genera energía debido a las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en su zona central.



a) b)

Figura 1.2: a) Imagen real del Sol, b) Estructura del Sol. [13]

La composición del Sol (figura 1.2), se supone que consiste en el **Núcleo Central** a una temperatura de 15 millones de grados centígrados y presiones enormes. Saliendo del núcleo, se atraviesa una zona intermedia donde disminuye la densidad y la temperatura. La capa exterior posee una densidad muy baja, es la llamada **Zona Convectiva** en la que el calor se transmite por convección (transferencia de calor por intermedio de un fluido como aire o agua que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas) hasta la superficie.

La superficie solar se llama **Fotósfera** y es lo que se puede ver desde la Tierra, su temperatura está estimada en unos 5.500ºC. Más hacia el exterior se encuentra la **Atmósfera Solar** y la **Corona**, que es la parte más externa de la atmósfera.

El Sol produce constantemente una energía de $3{,}78 \times 10^{26}$ W, que se irradia por el espacio con simetría esférica en todas las direcciones. La potencia que recibe una superficie de 1 m^2 de la Tierra fuera de la atmósfera si se halla perpendicular al Sol es de 1353 W/m^2, este valor es casi invariable durante todo el año y se lo llama **constante solar.** La constante solar es la máxima potencia que puede llegar del Sol por unidad de superficie y se usa en cálculos de radiación solar para sistemas fotovoltaicos y termo solares.

1.2.2. RADIACIÓN SOLAR Y ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO [1][2][52]

El Sol como cuerpo incandescente emite radiación, pero no toda la radiación que se recibe del Sol es luz visible.

La luz que llega del Sol es aparentemente blanca, sin embargo esto no es así ya que este tipo de luz es un conjunto de luces de diversos colores.

La radiación electromagnética se la puede describir como un flujo de fotones, los cuales son partículas sin masa que se desplazan en forma de onda a la velocidad de la luz (c = 300000 Km/s) y transportan energía de un punto a otro. Cada fotón contiene una cantidad fija de energía o paquete de energía; dependiendo de la energía del fotón se puede ir desde las ondas de radio, que tienen la menor energía hasta los rayos gamma.

Los fotones con mayor energía tienen una menor longitud de onda (λ) o una mayor frecuencia (v) ya que:

$$\boldsymbol{v = \frac{c}{\lambda}}$$

Ec.1. 4

La distribución de los distintos tipos de radiación constituye el llamado espectro electromagnético, que consiste en una gráfica en la que figuran las diferentes longitudes de onda (figura 1.3).

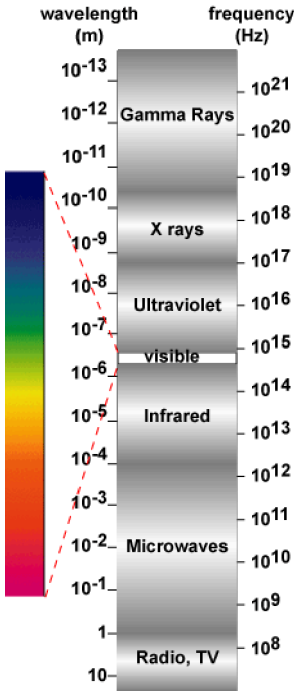


Figura 1. 3: El espectro electromagnético. [12]

Todas las radiaciones electromagnéticas se propagan a igual velocidad, pero se pueden distinguir por su longitud de onda, valor que se expresa generalmente en nanómetros (nm). La luz roja es la que tiene mayor longitud de onda entre las visibles, y la violeta la que tiene menos. Con longitudes de onda superiores a la del rojo, se tiene el infrarrojo, que produce una reacción de calor en la piel pero no es visible para el ojo humano. Para longitudes de onda superiores al violeta se tiene el ultravioleta, que tampoco es visible, pero cuyos efectos se dejan sentir en el fenómeno del bronceado de la piel.

La cantidad de energía que transporta un fotón se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{E = h \times v} \qquad \textbf{Ec.}1.\ 5$$

Donde:

E = Energía de un fotón [J]

h = Constante de Planck = $6{,}624 \times 10^{-34}$ [J/s]

v = Frecuencia [Hz]

La energía de un fotón se mide en electrón voltios [eV], 1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J.

A continuación se presentan las características de las distintas regiones del espectro electromagnético:

ONDA	LONG. DE ONDA [m]	FRECUENCIA [Hz]	ENERGÍA [J]
Radio	$> 1 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^{9}$	$< 2 \times 10^{-24}$
Microondas	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{9} - 3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
Infrarroja	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
Luz visible	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7{,}5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
Ultravioleta	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7{,}5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
Rayos X	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
Rayos Gamma	$< 1 \times 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 2 \times 10^{-14}$

Tabla 1. 1: Regiones del espectro electromagnético. [2]

1.2.3. INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA EN LA RADIACIÓN SOLAR [1]

La presencia de la atmósfera altera fuertemente el valor de la constante solar que se recibe en la superficie de la Tierra, y que es el valor realmente útil. La atmósfera actúa de la siguiente manera respecto a la radiación solar:

- Absorbiendo ciertas longitudes de onda de forma selectiva.
- Dispersando (cambio de dirección) la radiación que precede del Sol.
- Absorbiendo la radiación de forma general (nubes y polvo).

En la capa de ozono se absorbe la casi totalidad de radiación ultravioleta y la presencia del vapor de agua y del dióxido de carbono absorbe las longitudes de onda situadas preferentemente en el infrarrojo. Como consecuencia de estos hechos se estima que el valor de la constante solar en un día despejado tendrá un valor promedio de 1000 W/m^2.

La energía solar que llega a la atmósfera se representa con el espectro solar observado en la Tierra.

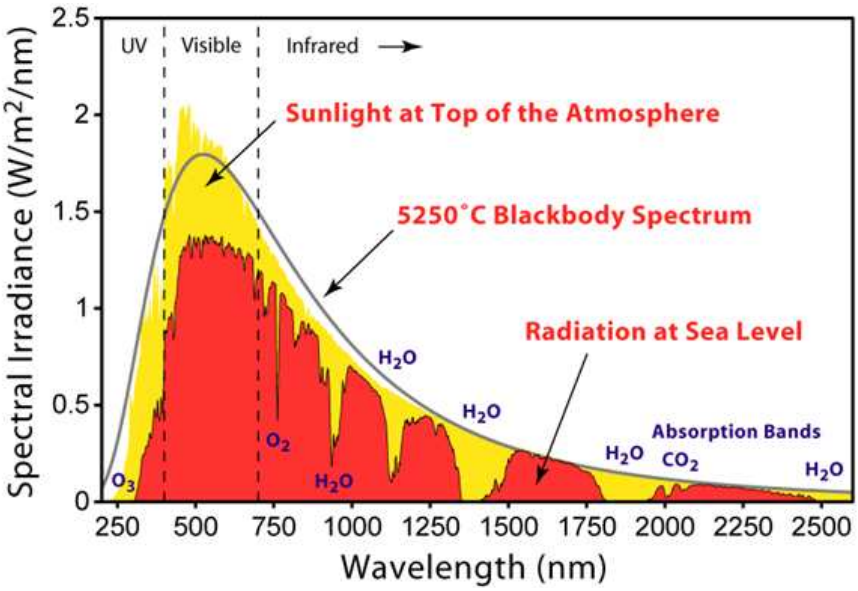


Figura 1. 4: Espectro solar en el exterior de la atmósfera y en la superficie de la Tierra comparado con la radiación de un cuerpo negro de T = 5780 K. [53]

Es importante anotar que se conoce como **radiación solar global o total** a la suma de los componentes de radiación directa, más la difusa y más la reflejada en el suelo.

La radiación que alcanza una superficie plana depende del ángulo de incidencia de la radiación respecto a esta superficie. Si la dirección de la radiación no es perpendicular a la superficie, entonces el valor real de la potencia que incide sobre aquella se multiplica por el coseno del ángulo que forman las direcciones de la radiación y la perpendicular a la superficie.

Como el coseno es una función que varía poco para ángulos pequeños, incluso una desviación de unos 15º es prácticamente inapreciable, pues origina una reducción de la potencia incidente del 3.5%.

1.2.4. CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA [2][54][55]

Las **Condiciones Estándar de Prueba** (STC o Standard Test Conditions) para equipos que utilizan la energía del Sol (por ejemplo, paneles fotovoltaicos y colectores solares) asumen una temperatura de 25ºC, una radiación de 1000 W/m^2, una velocidad del viento de 1 m/s y una masa de aire igual a 1,5.

La masa de aire (abreviada AM por sus siglas en inglés “air mass”) es la distancia entre el suelo (usualmente al nivel del mar) y la parte exterior de la atmósfera.
En el espacio exterior la masa de aire es cero (AM0). Un rayo de sol perpendicular al suelo tiene una AM1, es decir una atmósfera de distancia. Esto no es lo común, pues dependiendo de la posición del Sol durante el día o el año, esta masa se incrementa y la radiación debe recorrer una mayor distancia hasta el suelo.

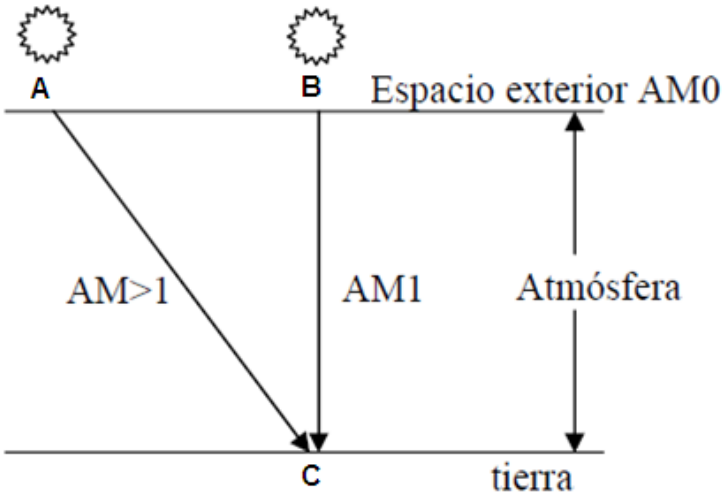


Figura 1. 5: Variación anual y diaria de la masa de aire [2].

La masa de aire puede calcularse usando la expresión:

$$\boldsymbol{AM = \frac{1}{\cos \alpha}}$$

Ec.1. 6

Donde α es el ángulo formado entre la posición de cénit (punto más alto del firmamento situado sobre el observador) y la posición del Sol en ese momento.
Valores para la masa de aire mayores que la unidad, indican que la radiación directa debe atravesar una distancia mayor dentro de la atmósfera. Se deduce así que una masa de aire de valor 1,5 corresponde a un ángulo α de unos 48° y cuando el Sol se oculta este ángulo se acerca a 90º y la masa de aire sería de 57 aproximadamente.
Algunos fabricantes definen las **Condiciones Normales de Operación** (NOCT o Normal Operating Cell Temperature ratings), más reales que las STC y son: masa de aire igual a 1,5, una radiación de 800 W/m^2, una temperatura de 20°C y velocidad del viento igual a 1 m/s.

1.3. MOVIMIENTO DEL SOL EN LA ESFERA CELESTE

La Tierra, como cualquier cuerpo celeste, no se encuentra en reposo sino que está sometida a movimientos de diversa índole, además del movimiento de rotación alrededor de su eje, se sabe que se encuentra en el espacio orbitando alrededor del Sol, y que completa cada una de sus órbitas en un período de un año. Sin embargo para determinar las estrategias de control, para un seguimiento solar, es necesario entender los movimientos de los astros que se hallan dentro la gran superficie esférica de radio arbitrario denominada esfera celeste, vistos desde un punto en nuestro planeta.

1.3.1. GENERALIDADES [1][14]

Figura 1. 6: Dirección del ángulo de rotación de la Tierra. [14]

El plano que contiene la órbita de la Tierra alrededor del sol se denomina eclíptica y el eje de rotación de la Tierra está inclinado respecto a dicho plano en un ángulo de 23º 27’ (figura 1.6).

Este hecho origina las estaciones y puede medirse mediante un ángulo llamado declinación, que es el ángulo con el que vería el Sol, un habitante de la Tierra situado en el Ecuador respecto al cénit.

La declinación coincide en los solsticios con el valor de los 23º 27’ y se anula en los equinoccios. Los solsticios son los momentos del año en los que el Sol alcanza una máxima declinación norte (+23º 27’) o declinación sur (-23º 27’) con respecto al ecuador terrestre, mientras que los equinoccios son los momentos donde los dos polos de la Tierra se encuentran a igual distancia del Sol y los días

tienen una duración igual a la de las noches en todos los lugares de la Tierra, excepto en los polos.

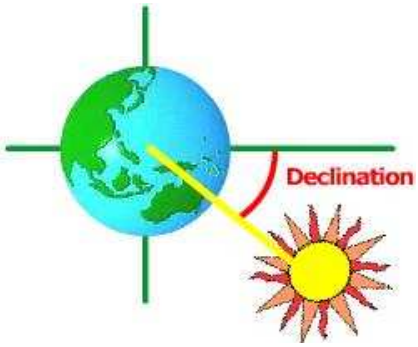


Figura 1. 7: Ángulo de declinación. [12]

Por esta razón, la Tierra queda dividida en 3 zonas principales, simétricas respecto al Ecuador: la zona tropical, la zona templada y la zona glacial (figura 1.8). En la zona tropical el Sol por lo menos está un día al año en el mediodía solar sobre el cénit de cualquier lugar situado en esta zona. En la zona templada el Sol nunca alcanza el cénit y todos los días del año el Sol sale de día. En la zona glacial hay días del año en que el Sol no sale y días en que no se pone (Sol de medianoche).

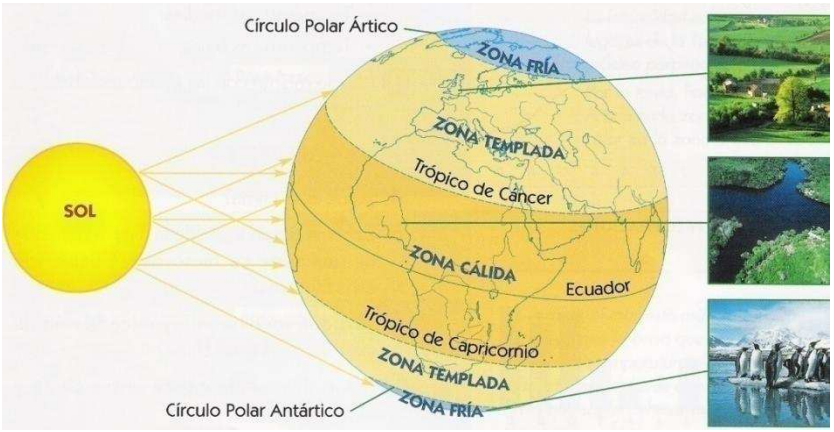


Figura 1. 8: Zonas climáticas de la tierra. [15]

Estos fenómenos dan lugar a que en la zona tropical los días y las noches tengan durante todo el año unas 12 horas cada uno, y que las variaciones de insolación a lo largo del año sean pequeñas.

En la zona templada y mientras más se acerca a los polos se observa una fuerte preponderancia de la radiación que incide en verano y una reducción de la

radiación invernal.

Finalmente, en la zona glacial, durante el verano el valor de la radiación puede ser relativamente alto por el hecho de actuar durante las 24 horas del día, pero en invierno es nulo. El ángulo de declinación se puede calcular fácilmente mediante la fórmula de Cooper:

$$\boldsymbol{d = 23.45 \times sen\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right)}$$

Ec.1. 7

Donde n es el día del año (n=1 para el primero de enero y n=365 para el 31 de diciembre). El valor de d se anula para el 22 de marzo y el 23 de septiembre, y alcanza el valor máximo positivo el 22 de junio y el valor máximo negativo el 22 de diciembre.

1.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL [1]

El movimiento aparente del Sol es motivado por la rotación de la Tierra, la cual gira sobre su eje en dirección oeste-este, provocando que parezca que es el Sol el que se mueve precisamente en la dirección contraria, de este a oeste.

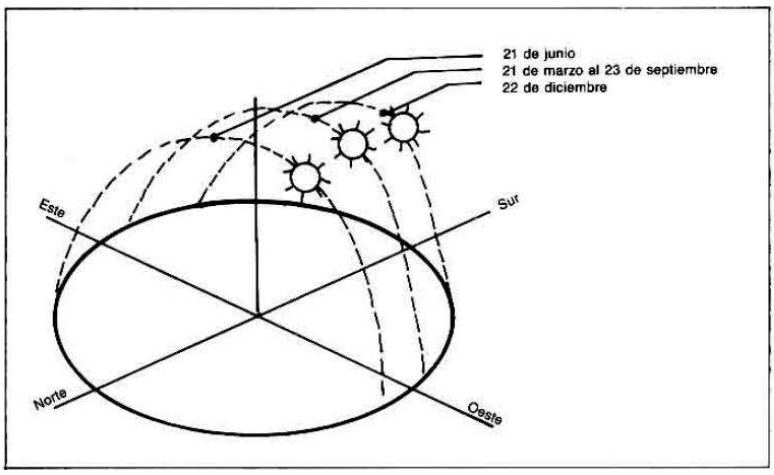


Figura 1. 9: Movimiento aparente del Sol en un punto medio de la Tierra. [1]

La Tierra gira sobre sí misma (movimiento de rotación) en un período de tiempo sumamente fijo y estable (24 horas) y gira alrededor del Sol en un período de 365

días, aproximadamente.

El día solar medio, que es el que interesa en los cálculos de Energía Solar, se compone de 24 horas y se lo define como el período de tiempo medio necesario para que el Sol ocupe la misma posición, respecto a una dirección fija.

El Sol no siempre sale o se pone por el mismo sitio, por ejemplo en un punto del hemisferio norte en invierno, el Sol sale por el sureste y se pone por el suroeste, en primavera y otoño sale por el este y se pone por el oeste, mientras que en verano sale por el noreste y se pone por el noroeste.

La trayectoria aparente que sigue el Sol sobre el firmamento también es la eclíptica, una circunferencia imaginaria de la cual solo se aprecia la mitad de ella ya que el horizonte impide apreciar el arco que se encuentra por debajo del plano terrestre del observador (figura 1.9).

1.3.3. COORDENADAS ALTACIMUTALES [8]

Las coordenadas altacimutales utilizan dos planos fundamentales: la **altura** y el **acimut**.

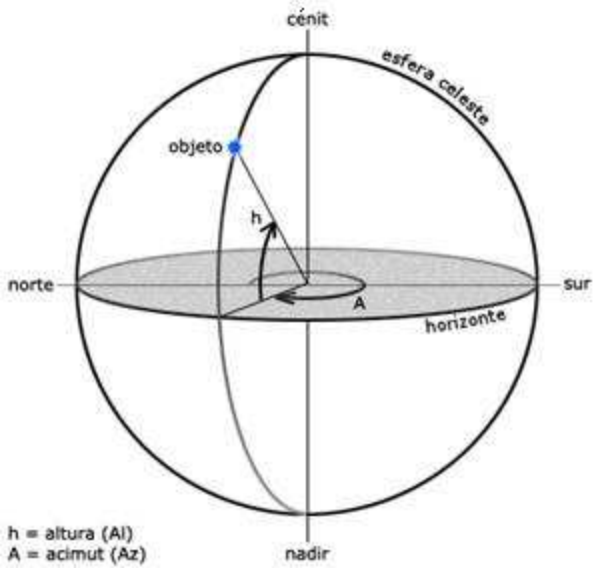


Figura 1. 10: Coordenadas Altacimutales. [8]

El acimut (Az), se mide desde el punto cardinal norte hacia el este, si el observador está ubicado en el hemisferio norte, caso contrario si se encuentra ubicado en el hemisferio sur, se mide al revés, desde el sur hacia el oeste. Pocas

referencias toman esto en cuenta, por tanto todos suelen utilizar el primer método: desde el Norte (0º) hacia el Este y completar 360º.
La altura (Al) se mide desde el horizonte (0º) hasta el cénit (90º), por tanto esta coordenada es el ángulo que forma el objeto observado con el horizonte. Se menciona una altura negativa cuando el objeto se encuentra por debajo del horizonte, el punto a 90º por debajo del horizonte se lo denomina nadir.

1.4. ELECTRICIDAD OBTENIDA DEL SOL [2]

El desarrollo tecnológico actual permite aprovechar la energía del Sol para los usos más diversos. Dentro de las aplicaciones de la energía solar se tiene la producción de calor y la producción directa de electricidad.
La producción de electricidad permite el abastecimiento eléctrico en forma sencilla en zonas alejadas de la red eléctrica y en naves espaciales mediante paneles fotovoltaicos, los cuales por ser estáticos tienen una vida útil muy prolongada.

1.4.1. ESTRUCTURA ATÓMICA

El átomo está constituido por un núcleo, con protones de carga positiva, neutrones de carga neutra y electrones con carga negativa que giran alrededor del núcleo, el número de electrones que ocupan las órbitas de un átomo es fijo y lo determina su número cuántico, siendo mayor en las órbitas más exteriores. Una tabla periódica de los elementos permite conocer los orbitales (o niveles de energía) de los átomos por su número cuántico. La energía del átomo, entonces, no es continua sino discreta, es decir que aumenta a saltos o en paquetes denominados “cuantos” de energía.
Para que un electrón se mueva de una órbita interna a otra más externa necesita recibir una cierta cantidad de energía. Si la energía es insuficiente, permanece en su orbital pero si es suficiente puede saltar al orbital siguiente o quedar libre.
Si la energía es excesiva puede liberarse más de un electrón o eliminarse como pérdidas en forma de calor. El caso contrario ocurre si un electrón de un orbital exterior salta a uno interior, en este caso libera energía.
Cada nivel energético del átomo, determinado por sus niveles orbitales tiene una

franja vacía (gap de energía, brecha de energía o zona prohibida), limitada en su parte superior por la llamada banda de conducción y en su parte inferior por la llamada banda de valencia. Cuando un electrón se encuentra en la banda de conducción es libre para movilizarse en el material. Al liberarse un electrón de un átomo, queda un hueco y el átomo se convierte en un ión de carga positiva, generándose un electrón-hueco.

Los materiales conductores tienen facilidad para liberar electrones, pues en la última órbita tienen un solo electrón (el electrón de valencia) y al estar más alejado del núcleo la fuerza de atracción es mínima. Los elementos conductores son los metales como el oro, la plata, el cobre o el aluminio. En éstos las bandas de conducción y de valencia están muy juntas, haciendo posible que fotones o alguna excitación de otro tipo como un campo eléctrico, un campo magnético o el calor, liberen electrones fácilmente. El gap o brecha de energía en estos materiales es cero o mucho menor que 1 eV (figura 1.11).

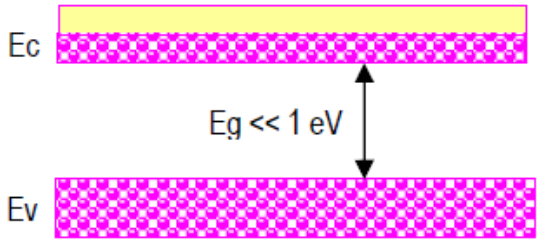


Figura 1. 11: Materiales conductores. [2]

Otros elementos se conocen como aislantes, es decir que no tienen electrones de valencia. En un material aislante la franja entre las bandas de conducción y de valencia es muy grande y no hay fotones con la suficiente energía para desprender un electrón para que salte. La brecha de energía en los aislantes está cercana a los 5eV (figura 1.12 a).

Hay elementos que permiten la circulación de corriente eléctrica en determinadas condiciones y se llaman semiconductores. Los elementos semiconductores son cristales como el Silicio, el Germanio, o el Arseniuro de Galio, que se utilizan en la fabricación de elementos electrónicos como los circuitos integrados, el transistor o

el diodo. La celda solar es un tipo de diodo fabricado con materiales semiconductores. En los semiconductores típicos como el Silicio, la brecha de energía es de 1,11 eV (figura 1.12 b).

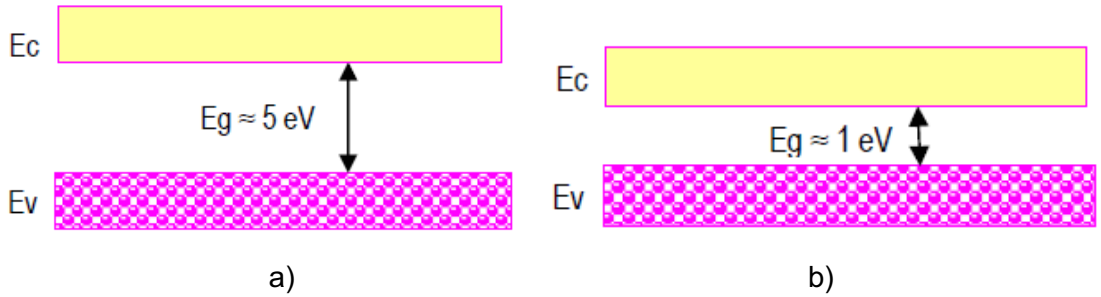


Figura 1. 12: a) Materiales aislantes, b) Materiales semiconductores. [2]

1.4.2. EFECTO FOTOELÉCTRICO

El efecto fotoeléctrico se origina al irradiar un tipo de luz en un material conductor. Con el impacto de los fotones, se liberan electrones y se genera una corriente eléctrica en un circuito.

Para remover al electrón de la superficie de una placa de metal u otro material sólido, se necesita una cierta cantidad mínima de energía, la cual depende del material. Si la energía de un fotón es mayor que este valor mínimo, el electrón es emitido de la superficie del metal.

La cantidad de electrones liberados es función de la frecuencia de los fotones que inciden, más que de la intensidad de la luz. Solo fotones de ciertas frecuencias tienen la cantidad de energía necesaria para liberar los electrones. Un mayor número de fotones (mayor intensidad de radiación) de esa frecuencia liberará más electrones. Este efecto constituye la base del funcionamiento de una celda solar.

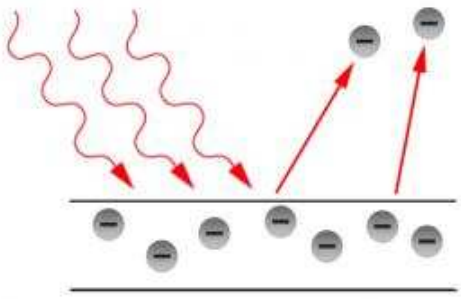


Figura 1. 13: Efecto fotoeléctrico. [16]

1.4.3. FORMACIÓN DE MATERIALES TIPO N Y TIPO P

En un cristal de silicio los átomos enlazan sus electrones con los huecos del átomo contiguo formando una unión muy sólida entre sí. Un cristal de silicio puro es un aislante pues no tiene electrones libres. Este se conoce como silicón intrínseco.

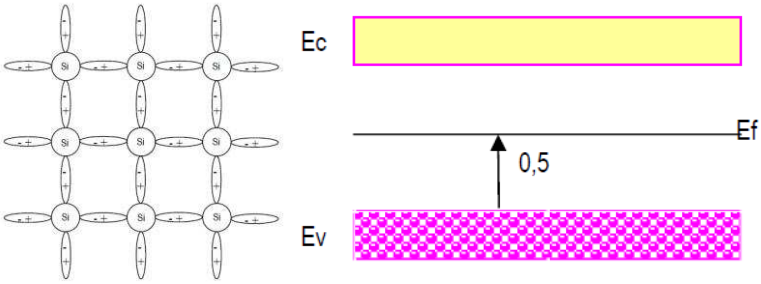


Figura 1. 14: Estructura atómica del silicio intrínseco o puro y bandas de valencia y conducción. [2]

Para el silicio puro el Nivel de Energía de Fermi (Ef), que es la energía del nivel más alto ocupado por un sistema cuántico a temperatura de 0 ºK, tiene un valor de 0,5 pues el elemento se encuentra en equilibrio. Si al silicón intrínseco se le introduce impurezas combinándolo con otro elemento, se puede cambiar las propiedades del material y favorecer la creación de electrones o huecos libres, esto se denomina dopar el material. Dos elementos son los preferidos para este propósito: el fósforo (P), que tiene 5 electrones de valencia y el boro (B) que tiene 3 electrones de valencia.

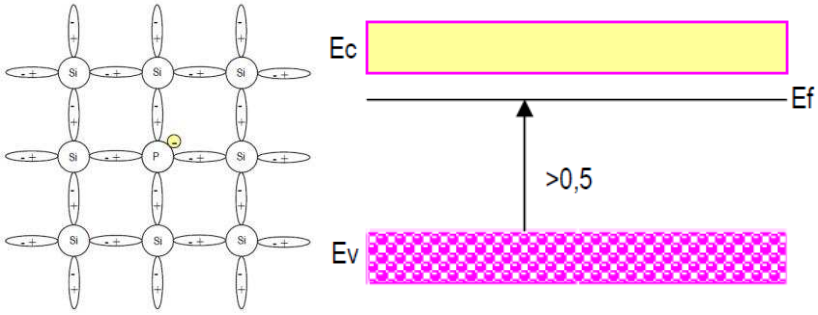


Figura 1. 15: Estructura atómica del silicio dopado con fósforo (semiconductor tipo n). [2]

El silicio así dopado se lo conoce como silicio extrínseco. Al introducir un átomo de fósforo se tiene un electrón adicional, el material es un donante de electrones y

se llama material tipo n (por ser negativo). El nivel de energía de Fermi se acerca a la banda de conducción (figura 1.15).

En el caso del boro queda un hueco libre, el material es un receptor de electrones y se lo conoce como material tipo p (por positivo). El nivel de energía de Fermi se acerca a la banda de valencia (figura 1.16).

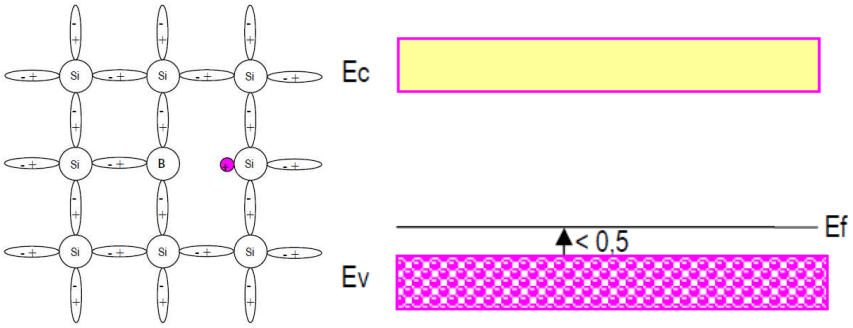
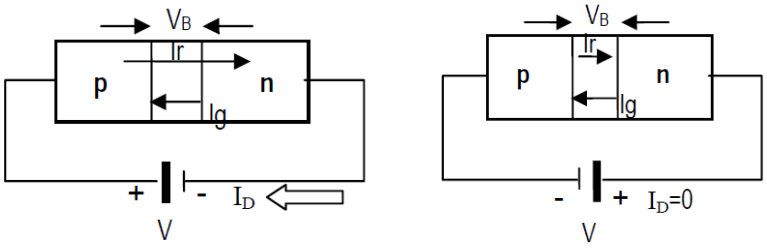


Figura 1. 16: Estructura atómica del silicio dopado con boro (semiconductor tipo p). [2]

1.4.4. UNIÓN N-P

Al unir material tipo N y tipo P, algunos electrones libres del lado N se recombinan con huecos del lado P en un fenómeno llamado difusión. Al producirse la difusión, aparecen cargas en la zona de la unión, dicha zona se llama barrera interna de potencial. A medida que la difusión aumenta la barrera de potencial se ensancha, y se genera un campo eléctrico que contrarresta el fenómeno de difusión hasta estabilizarlo. Este campo eléctrico es equivalente a decir que aparece una diferencia de potencial entre las zonas P y N, esta diferencia de potencial es de 0,7V en el caso del silicio y 0,3V si los cristales son de germanio.



Polarización Directa (b) Polarización inversa

Figura 1. 17: Aplicación de voltaje externo y efecto en la corriente. [2]

Al polarizar directamente la unión n-p, aumenta el voltaje positivo y aparece una

corriente de circulación. Al polarizar inversamente la unión n-p aumenta el voltaje negativo y la corriente de circulación se reduce hasta cero. Se forma entonces una especie de compuerta electrónica que solo permite el paso de la corriente en un sentido: es decir un diodo.

1.4.5. EFECTO DE LA LUZ EN LA UNIÓN N-P

La energía de los fotones puede hacer saltar los electrones hacia la banda de conducción. Como se ha creado un campo eléctrico que atrae a los electrones en la zona de intercambio, al impactar los fotones en los electrones de la zona de intercambio, los hace saltar hacia el lado p y se crea una corriente de generación por fotones que se suma a la corriente de generación. Se produce un efecto similar al del diodo con un voltaje externo hacia delante, pero en este caso el "voltaje externo" proviene del Sol, produciéndose una corriente en un semiconductor extrínseco.

1.4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA CELDA SOLAR [2][3]

La celda solar real puede ser representada por el siguiente circuito eléctrico equivalente:

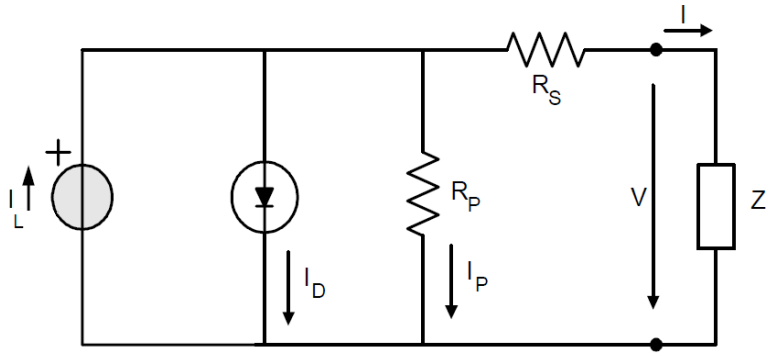


Figura 1. 18: Circuito eléctrico equivalente de la celda solar. [2]

La expresión exponencial simplificada propuesta por Gow y Manning [7], describe la relación entre la tensión (*V*) y la corriente (*I*) proporcionada por un módulo:

$$I = n_p \times \left[I_L - I_S \times \left[e^{\frac{q \times \left(\frac{V}{n_s} + \frac{I \times R_s}{n_p} \right)}{A \times K \times T}} - 1 \right] - \frac{\frac{V}{n_s} + \frac{I \times R_s}{n_p}}{R_p} \right]$$

Ec.1. 8

Donde np y ns indican el número de celdas solares conectadas en paralelo y en serie; Rp y Rs las resistencias intrínsecas paralelo y serie asociadas a la celda, K es la constante de Boltzman (1,3806x10^{-23} J/K) y q es la carga del electrón (1,6022x10^{-19} C). El factor A determina la desviación de las características de una unión p-n ideal e Is es la corriente inversa de saturación, que presenta una dependencia con la temperatura del panel. I_L representa la corriente (foto corriente) generada por la radiación solar. Dicha corriente exhibe una relación sensiblemente lineal respecto de la radiación y la temperatura. I_S es la corriente de saturación con voltaje externo.

La ecuación (considerando la dependencia de sus parámetros con la temperatura y la radiación), proporciona las denominadas curvas I-V teóricas de un panel fotovoltaico, y el producto de ambas magnitudes la potencia suministrada.

Una forma más simplificada de representar la expresión anterior para una celda solar es la siguiente:

$$I = I_L - I_D - \frac{(V - I \times Rs)}{Rp}$$

Ec.1. 9

1.4.7. CURVA CORRIENTE-VOLTAJE DE LA CELDA SOLAR

El funcionamiento de una celda solar se puede representar por una curva de corriente-voltaje (curva IV), como la mostrada en la figura 1.19.

Cuando la celda no está conectada se tiene un voltaje en circuito abierto Voc, y cuando la celda está en cortocircuito la corriente es Isc. Para un incremento en el voltaje desde 0 hasta Voc la corriente es casi constante hasta un voltaje máximo Vmax y de allí desciende rápidamente.

Como $P = V \times I$, también se puede graficar la curva potencia-voltaje (curva PV), donde se muestra la potencia que entrega el panel en cada estado de carga. El punto Pmax se conoce también como punto de máxima potencia (Maximum

Power Point o sus siglas MPP).

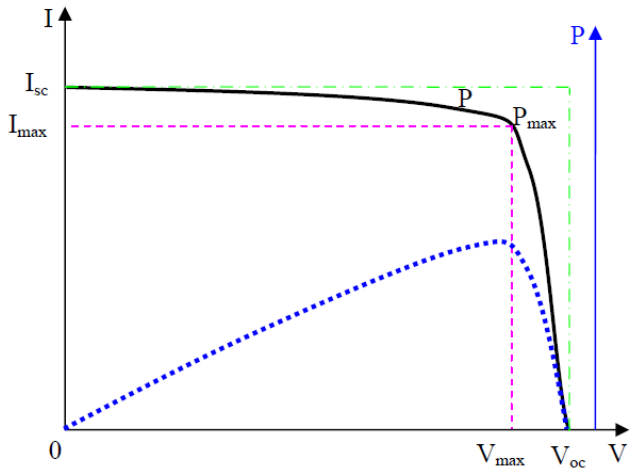


Figura 1. 19: Curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje de la celda solar. [2]

1.4.7.1. Corriente de cortocircuito (Icc o Isc)

Es la intensidad máxima de corriente que se puede obtener de un panel bajo unas determinadas condiciones (generalmente normalizadas). Correspondería a la medida, mediante un amperímetro (de resistencia prácticamente nula), de la corriente entre bornes del panel, sin ninguna otra resistencia adicional; esto es, provocando un cortocircuito. Al no existir resistencia alguna al paso de la corriente, la caída de potencial es cero.

1.4.7.2. Voltaje de circuito abierto (Vca o Voc)

Es el voltaje máximo que se podría medir con un voltímetro sin permitir que pase corriente alguna entre los bornes de un panel; es decir, en condiciones de circuito abierto (resistencia entre bornes infinita). Al no haber corriente circulante la potencia entregada es cero.

1.4.7.3. Potencia máxima (Pmax)

Bajo condiciones determinadas, la intensidad (I) tendrá un cierto valor comprendido entre 0 e Icc, correspondiéndole un voltaje V que tomará un valor entre 0 y Vca. Dado que la potencia es el producto del voltaje y la intensidad, ésta

será máxima únicamente para un cierto par de valores (I,V). Se dice que un panel trabaja en condiciones de potencia máxima, cuando la resistencia del circuito externo es tal que determina unos valores de I y V, tales que su producto sea máximo.

1.4.8. EFICIENCIA DE LA CELDA SOLAR

Es el cociente entre la potencia producida por el panel y la potencia de la radiación incidente sobre el mismo. La eficiencia se puede determinar para una celda o para el módulo fotovoltaico con las ecuaciones siguientes:

$$\eta_C = \frac{P_M}{G \times A_C \times N_c}$$

Ec.1. 10

$$\eta_M = \frac{P_M}{G \times A_M}$$

Ec.1. 11

Donde:

η_C = Eficiencia de una celda de un panel fotovoltaico.

P_M = Potencia nominal del panel fotovoltaico en Vatios pico [Wp].

G = Radiación solar en W/ m^2.

A_C = Área de la celda en $m^{2.}$

N_C = Número de celdas en el panel.

η_M = Eficiencia del panel fotovoltaico.

A_M = Área total del módulo en m^2.

La eficiencia es el parámetro más empleado para comparar el desempeño entre las celdas y paneles solares. La eficiencia se mide bajo condiciones de 25ºC de temperatura y masa de aire (AM) igual a 1,5. Para aplicaciones espaciales se miden bajo condiciones de masa de aire igual a 0.

1.4.9. FACTOR DE LLENADO (FILL FACTOR)

Es la relación entre el área del rectángulo $Voc \times Isc$ y el área del rectángulo $Vmax \times Imax$, determina la calidad de una celda solar. También se lo llama factor

de cuadratura.

$$FF = \frac{Imax \times Vmax}{Isc \times Voc}$$

Ec.1. 12

1.4.10. CARACTERÍSTICAS DE POLARIZACIÓN INVERSA

Ante determinadas condiciones una celda solar puede trabajar en la zona de polarización inversa. Una celda solar puede generar alrededor de 1 voltio cuando está polarizada directamente, pero el voltaje de polarización inversa puede ir tan alto como 20 voltios o más y puede disipar mucha más potencia de lo que produce, generando pérdidas significativas, por lo cual es necesario colocar protecciones adecuadas para este tipo de eventos.

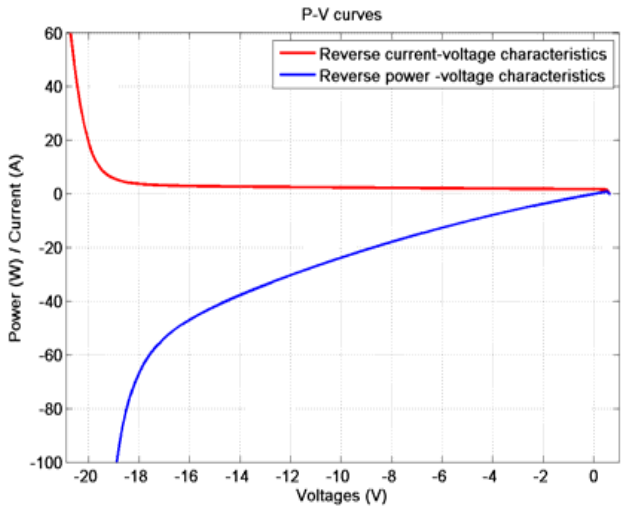


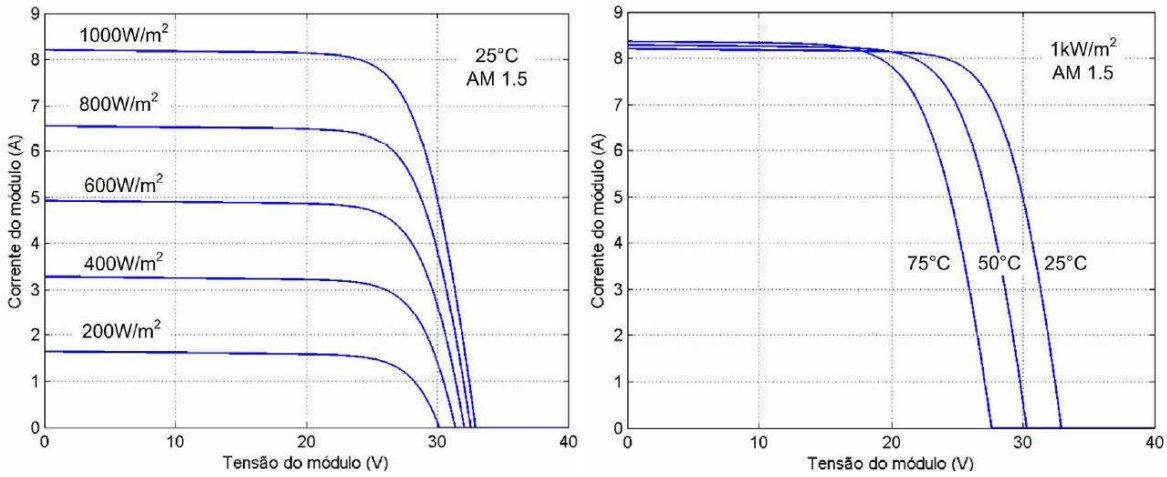
Figura 1. 20: Característica inversa de una celda solar. [6]

1.4.11. EFECTOS DE LA RADIACIÓN Y LA TEMPERATURA

La figura 1.21 muestra las curvas I-V para diferentes valores de radiación solar y temperatura en condiciones estándar de prueba (STC). El voltaje es inversamente proporcional a la temperatura y la corriente I es proporcional a la radiación solar, es decir que la potencia de este panel se reduce con el incremento de la temperatura y se incrementa con la radiación.

Los paneles pueden llegar a temperaturas superiores a los 75ºC, y la pérdida de potencia respecto de las STC (a 25ºC) puede llegar hasta un 25% de la potencia nominal. Este es un factor muy importante a tomar en cuenta en el diseño de

sistemas solares fotovoltaicos especialmente en zonas cálidas como el Ecuador.



a) b)

Figura 1. 21: Efectos de la variación de la radiación (a) y la temperatura (b) en la curva I-V de la celda solar. [38]

1.4.12. TIPOS DE CELDAS SOLARES [9]

Existen diferentes tecnologías para la fabricación de celdas solares y cada una de éstas posee sus características propias, entre las más utilizadas se encuentran las que se basan en el silicio cristalizado, sin embargo nuevas tecnologías son probadas cada día para alcanzar eficiencias mayores a un menor costo.

1.4.12.1. Tecnología de Silicio Cristalizado

Esta tecnología logra una eficiencia media a un costo mediano, tienen un grosor promedio de 200 μm, entre las celdas de este grupo se encuentran:

1.4.12.1.1. Celda de Silicio Monocristalino

La mayoría de las celdas solares actualmente en el mercado son monocristalinas. La fabricación consiste en purificar el silicio, fundirlo y éste se cristaliza en lingotes que son cortados en finas rodajas de 250 a 350 μm para hacer celdas individuales. Las celdas monocristalinas tienen un color uniforme, generalmente

azul o negro.

Figura 1. 22: Celda monocristalina. [40]

1.4.12.1.2. Celda de Silicio Policristalino

Las celdas policristalinas se fabrican de forma similar a las monocristalinas. La diferencia es que se utiliza un silicio muy económico (de bajo costo). Por lo general se tiene una reducción en la eficiencia. La superficie de las celdas policristalinas tiene un patrón irregular y más claro en la cristalización en lugar del color homogéneo de la monocristalina.

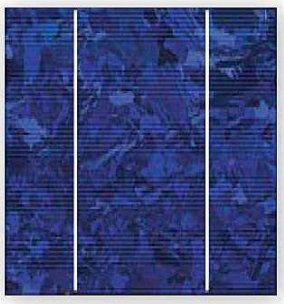


Figura 1. 23: Celda policristalina. [40]

1.4.12.1.3. Celda de Silicio tipo "Ribbon"

Esta celda fotovoltaica se fabrica estirando el silicio fundido en lugar de cristalizarlo en un lingote o bloque. El funcionamiento es el mismo que en el caso de las células monocristalinas y policristalinas. El recubrimiento anti-reflectivo utilizado en la mayoría de las células "ribbon" tiene una apariencia prismática multicolor.

1.4.12.2. Tecnología Thin Film

Este tipo de tecnología tiene una eficiencia menor a la de la tecnología convencional, pero es la más barata y ligera, razón por la cual se recomienda ampliamente su uso en tejados, tienen un grosor promedio de 5 μm, entre éstas se tiene:

1.4.12.2.1. Celda de Silicio Amorfo

Esta celda usa una nueva tecnología que consiste en una película delgada de cristal de silicio puro sobre un sustrato de vidrio o cerámica. Esta capa no supera los 20 μm. El espesor de toda la celda es de 300 a 800 μm. El substrato también puede ser plástico lo cual permite obtener un panel flexible. La ventaja de esta tecnología es que es mucho más barata que las celdas cristalinas. Una desventaja es que el silicio amorfo sufre una degradación debido a la luz al inicio de su operación.

Figura 1. 24: Celda de silicio amorfo. [41]

1.4.12.2.2. Celda de Cobre, Indio, Galio y Diselenuro (CIGS)

Es una de las celdas solares con mayor potencial debido a su alta eficiencia y bajo costo. Las celdas CIGS tienen el mayor coeficiente de absorción dentro de la tecnología thin-film, lo que permite que alrededor del 99% de los fotones sean absorbidos. La desventaja es que tiene un complicado método de fabricación lo

que implica una necesidad de inversión importante.

Figura 1. 25: Celda GICS. [9]

1.4.12.2.3. Celda de Teluro de Cadmio

Es una tecnología thin-film que está siendo investigada últimamente. Existen gran cantidad de técnicas para fabricar esta tecnología de thin-film, la mayoría de éstas tienen un gran potencial para producción a gran escala. Tiene un costo elevado de materia prima.

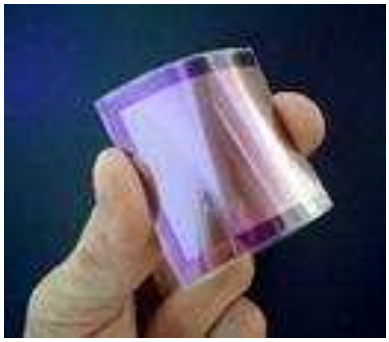


Figura 1. 26: Celda de teluro de cadmio. [9]

Se está investigando también celdas de micro silicio, celdas de dióxido de titanio y celdas orgánicas, que funcionan como un proceso reverso de fotosíntesis cuya eficiencia en laboratorios ha llegado a 1,5%.

En la Tabla 1.2 se aprecia los parámetros eléctricos de celdas solares de distintos materiales. Estas celdas son de la máxima eficiencia certificada hasta el momento a nivel de laboratorio:

TIPO DE CELDA	EFICIENCIA(%)	Voc	FF
Si cristalino	25	0,705	0,828
Si policristalino	20,4	0,664	0,809
Si amorfo	9,5	0,859	0,63
Si nanocristalino	10,1	0,539	0,766
GaAs cristalino	26,1	1,038	0,847
Orgánica	5,15	0,876	0,625
InGaP/GaAs/Ge	32	2,622	0,85
CdTe	16,7	0,845	0,755

Tabla 1. 2: Parámetros eléctricos medidos en condiciones de AM 1,5 a 25ºC [19].

1.4.13. CONEXIÓN DE CELDAS SOLARES

Un panel fotovoltaico está formado por la conexión de varias celdas solares en serie o paralelo. Cada una de estas celdas solares tiene un voltaje promedio de 0,5V, y generalmente se las conecta en serie hasta alcanzar valores estandarizados (6V, 12V, 24V, 36V o 48V).

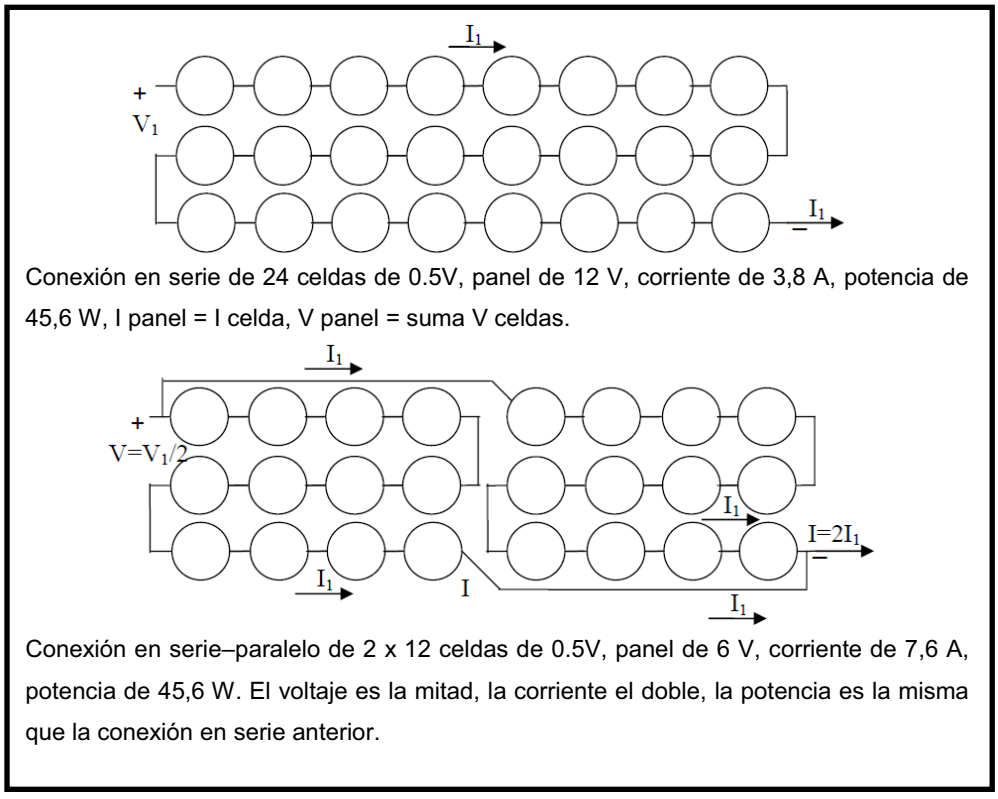


Figura 1. 27: Conexión de celdas solares en un panel fotovoltaico. [2]

Una conexión en serie de celdas o paneles solares permite incrementar el voltaje, considerando que cada uno debe producir la misma cantidad de corriente.

Una conexión en paralelo de celdas o paneles solares permite obtener corrientes mayores, siempre tomando en cuenta que cada uno de ellos debe producir el mismo voltaje.

La curva característica I-V de un grupo de celdas solares idénticas se muestra a continuación:

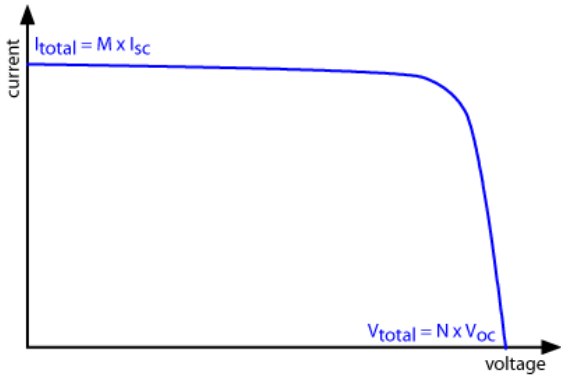


Figura 1. 28: Curva I-V para N celdas conectadas en serie y M celdas conectadas en paralelo. [12]

Si una celda se daña, o si no incide luz por efecto de una sombra, o si está cubierta, las demás celdas están activas se produce un voltaje negativo en los terminales de la celda afectada, lo que se conoce como corriente de fuga o avalancha que puede destruir la celda. Para evitar esto se utiliza diodos puente (diodo bypass) para juegos de algunas celdas y para permitir un paso alternativo de la corriente.

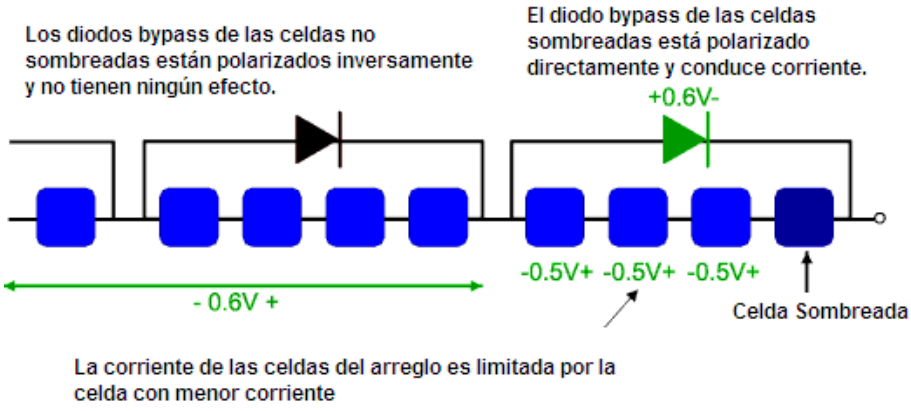


Figura 1. 29: Diodos bypass colocados en arreglos de celdas solares dentro de un módulo fotovoltaico y su funcionamiento. [12]

1.5. PÉRDIDAS EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA POR DESACOPLAMIENTO [6]

Las pérdidas por desacoplamiento son causadas por la conexión de celdas solares o módulos que no tienen propiedades idénticas o que experimentan diferentes condiciones la una de la otra. Este tipo de pérdidas son un serio problema, ya que bajo las peores condiciones de funcionamiento, la salida de todo el módulo fotovoltaico se determina por la celda con la salida más baja. Las principales razones son desacoplamientos, estrés medioambiental y problemas de sombras.

1.5.1. PÉRDIDAS ESTÁTICAS POR DESACOPLAMIENTO

Este tipo de desacoplamiento se debe a la tolerancia de los fabricantes y al efecto de la edad del módulo, sin embargo no representan una pérdida significativa, ya que pueden ser reducidas drásticamente por medio de un apropiado conexionado serie-paralelo y una preselección de los módulos.

1.5.2. PÉRDIDAS DINÁMICAS POR DESACOPLAMIENTO

Las pérdidas dinámicas por desacoplamiento ocurren cuando los módulos operan lejos de su punto de máxima potencia (MPP). Los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo o en serie no pueden operar en su punto de máxima potencia individual, porque al voltaje (en caso de conexión en paralelo) y a la corriente (en el caso de conexión en serie) se los fuerza a ser iguales en todos los módulos de la secuencia.

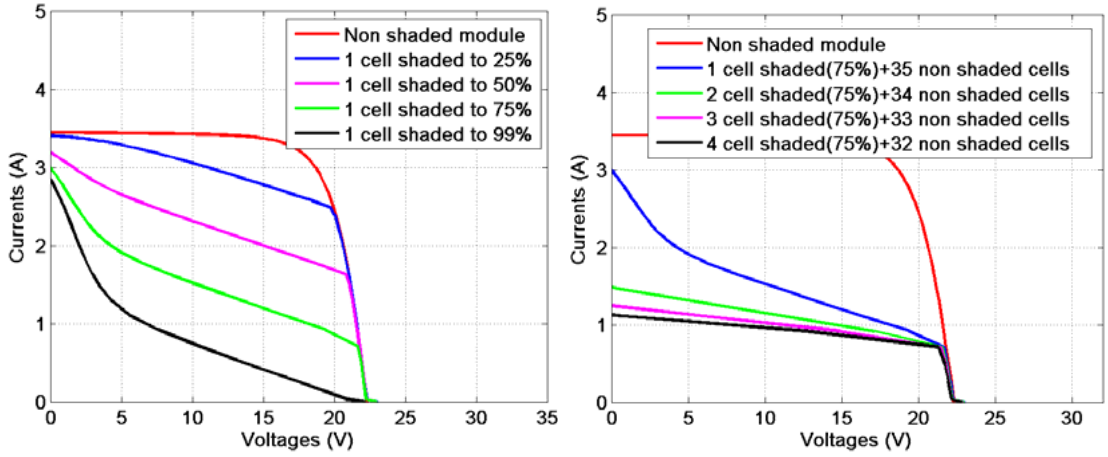
Los arreglos fotovoltaicos solares son susceptibles de tener grandes cantidades de pérdidas de energía, debido a sombreados parciales. Los sombreados parciales se producen por barreras de luz como árboles, chimeneas, techos, líneas de poder, escombros, polvo y desechos de aves. Además los desacoplamientos también pueden ocurrir si los módulos fotovoltaicos son instalados en diferentes orientaciones o inclinación.

Cuando parte del panel esta sombreado, las celdas sombreadas producirán

menos corriente que las celdas no sombreadas. Como todas las celdas están en serie, la misma cantidad de corriente debe circular por cada celda. Las celdas no sombreadas forzarán a las celdas sombreadas que pasen más corriente que su nueva corriente de corto circuito. La celda sombreada opera en la zona de polarización inversa para acoplarse a esta condición y causa una pérdida de potencia en el sistema. El producto de la corriente y el voltaje negativo da la potencia disipada por las celdas sombreadas. Esta potencia se disipa como calor y por esta razón, causa “puntos calientes”.

1.5.2.1. Sin diodos bypass

La curva I-V de los módulos fotovoltaicos se afecta en gran medida cuando las celdas solares son irradiadas a diferentes niveles y la energía entregada por el módulo disminuye drásticamente sin la utilización de diodos bypass. En la figura 1.30 se muestra el efecto de tener una celda sombreada a distintos niveles en módulos sin diodos bypass. Se observa como la celda solar sombreada disminuye significativamente el camino de corriente en el módulo.



a) b)

Figura 1. 30: Efecto en las curvas I-V sin usar diodo bypass: a) de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante. [6]

El sombreado parcial es muy peligroso para los módulos solares, como se ve una sola celda sombreada en el módulo utilizado, puede reducir la mayoría de la potencia de salida drásticamente. Las celdas sombreadas actúan como carga,

disipando potencia sobre si misma, lo que podría conducir a condiciones de puntos calientes y finalmente dañar las demás celdas. La pérdida de potencia por un sombreado parcial no es proporcional al área sombreada en el módulo como se suponía en el pasado. Como se ve en figura 1.30, con el incremento en el número de celdas sombreadas, el efecto en la característica I-V es casi constante.

1.5.2.2. Con Diodos Bypass

Para prevenir que las celdas sombreadas disminuyan el camino de la corriente en la serie y degrade el desempeño de otras celdas, los diodos bypass se colocan en antiparalelo (polarización inversa) a un pequeño grupo de celdas conectadas en serie (normalmente 18 o 24 celdas).

El diodo bypass afecta a la celda solar solamente en polarización inversa como se muestra en la figura 1.31, el diodo limita el voltaje inverso de la celda sombreada a -0.7 voltios aproximadamente.

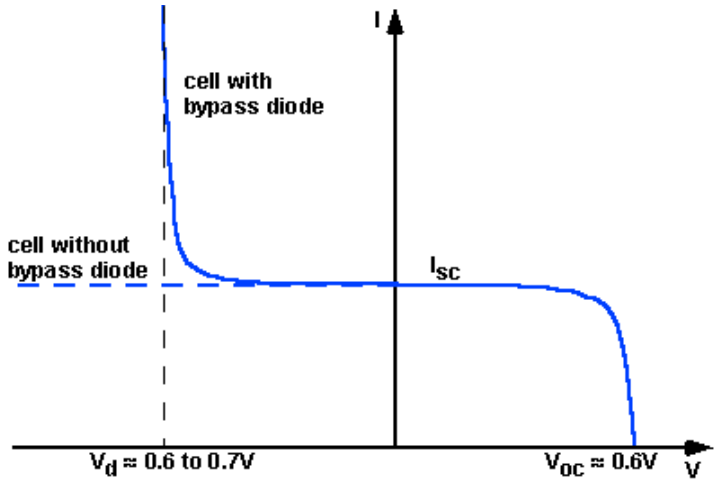
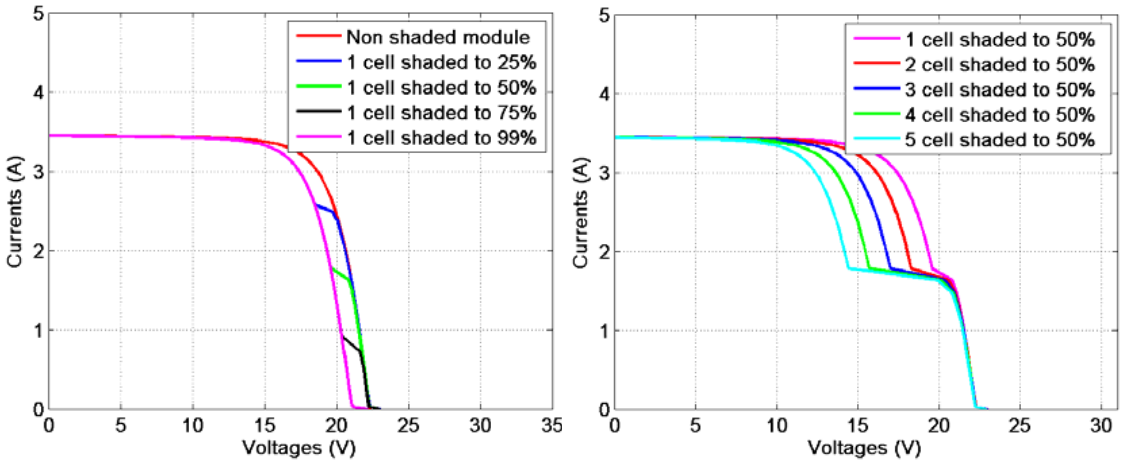


Figura 1. 31: Curva I-V combinada para una celda solar con diodo bypass. [12]

Los diodos bypass permiten a la corriente pasar por las celdas sombreadas y así reducir las pérdidas de potencia en el módulo. Cuando el módulo recibe alguna sombra, el diodo bypass se polariza directamente y empieza a conducir corriente. Toda corriente mayor que la nueva corriente de corto circuito de las celdas sombreadas es desviada por el diodo, así se reduce drásticamente la cantidad de calentamiento en el área sombreada. Para aplicaciones muy sofisticadas (ejemplo: aplicaciones espaciales), el diodo bypass se usan en cada celda. Sin

embargo en la práctica esto se evita debido al alto costo.



a) b)

Figura 1. 32: Efecto en las curvas I-V con diodo bypass: a) de una celda con distintos niveles de sombreado; b) de diferente número de celdas con sombreado constante. [6]

1.5.2.3. Sombreado homogéneo

Cuando todos los módulos en el arreglo no reciben la misma cantidad de radiación, el efecto puede ser definido como sombreado homogéneo. Este fenómeno puede ocurrir cuando diferentes módulos conectados en serie tienen distinto ángulo de inclinación por ejemplo aplicaciones fotovoltaicas integradas en edificios. En estas condiciones los diodos bypass podrían conducir, pues los módulos en la fila tienen distinta corriente. Además, la potencia y eficiencia del arreglo será reducida.

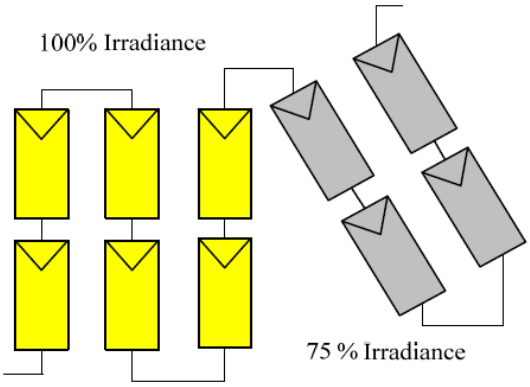


Figura 1. 33: Sombreado homogéneo (diferente ángulo de inclinación). [6]

Los efectos del sombreado homogéneo se muestran en la figura 1.34, el punto de máxima potencia de la fila sombreada es más bajo, debido a esto existe una pérdida en la curva resultante.

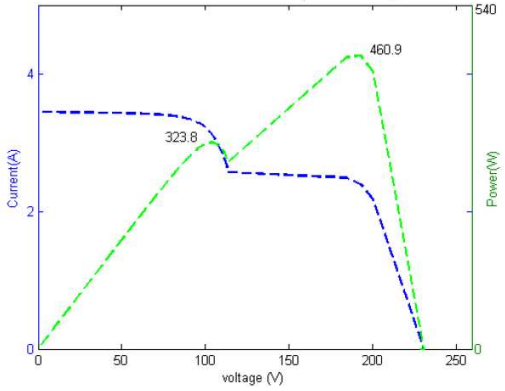
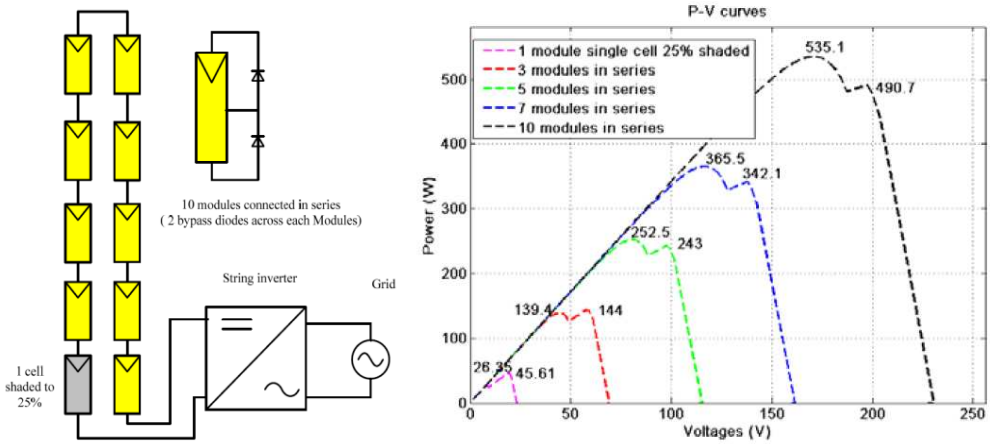


Figura 1. 34: Efecto del sombreado homogéneo en la característica de un arreglo fotovoltaico. [6]

1.5.2.4. Sombreado Parcial

Los diodos bypass pueden reducir el desempeño del sistema, degradándose cuando el sombreado parcial ocurre. En este caso el uso de diodos incrementa la producción de potencia de los arreglos fotovoltaicos pero introduce múltiples máximos locales en su característica potencia versus voltaje como se ve en la figura 1.34 y 1.35, lo que puede confundir el algoritmo de búsqueda de punto de máxima potencia (MPPT en inglés Maximum Power Point Tracking), lo cual podría llevar a bajos desempeños.



a) b)

Figura 1. 35: (a) Conexión en serie de 10 módulos; (b) Efecto del sombreado parcial. [6]

1.5.3. DIFERENTES TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS PÉRDIDAS POR DESACOPLAMIENTO

1.5.3.1. Bypass activo

Aunque los diodos bypass son una ventaja durante condiciones de sombreado parcial, aún tienen un número de desventajas. El voltaje directo de los diodos bypass está usualmente en el orden de 0.5 a 1 voltio y depende del tipo, temperatura de juntura y la corriente. Algunos de los problemas asociados con los diodos bypass son excesiva producción de calor debido a la caída de voltaje directo, fallas normales, pérdidas de energía en forma de corrientes de fuga y fallas debido a sobre voltajes tal como rayos, entre otras.

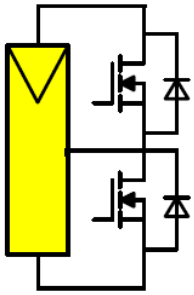


Figura 1. 36: Tecnología de bypass activo. [6]

La idea de reemplazar uno a uno de los diodos convencionales usando MOSFETs como elementos bypass se presenta en la figura 1.36. Baja potencia será disipada pues la caída de voltaje es baja (rango de mV). El bypass activo puede tener funcionalidades adicionales tal como monitoreo o cortocircuitado activo del módulo por seguridad. El monitoreo puede conducir a salidas de potencia óptimas ya que cada módulo es monitoreado. Con bypass activo las pérdidas por conducción en situaciones de desacoplamiento pueden ser mitigadas.

1.5.3.2. Módulos AC

Un sistema fotovoltaico llega a la salida más alta cuando cada módulo solar es operado continuamente en su punto de máxima potencia. Esto se puede lograr usando módulos con inversores integrados. En los módulos AC la salida de los

mismos es alterna. Como varios de estos módulos pueden ser conectados en paralelo, es un sistema modular.

Como el desacoplamiento de corriente tiene un impacto mayor en la producción de energía que el desacoplamiento de voltaje, se espera que los sistemas que consisten de módulos fotovoltaicos conectados en paralelo tengan una mayor producción de energía.

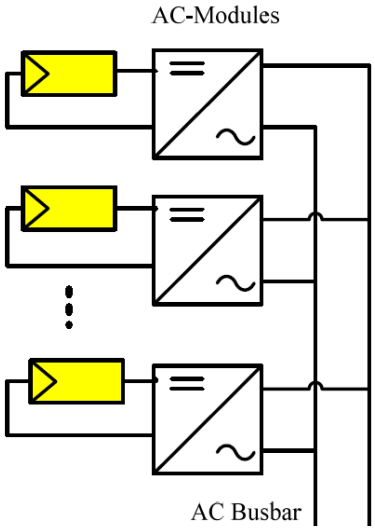


Figura 1. 37: Módulos AC. [6]

Los módulos AC conducen a mayores producciones especialmente con módulos solares que están parcialmente sombreados o alineados con diferentes ángulos. Otras ventajas son que el diseño del sistema fotovoltaico es más flexible y que puede fácilmente ser expandido; por lo que, los costos para cableado DC no aplican. Se debe considerar que los módulos AC no evitan el problema de sombras completamente.

1.5.3.3. Optimizadores de Potencia

En los sistemas optimizadores de potencia (también conocidos como sistemas distribuidos para seguimiento del punto de máxima potencia), el circuito electrónico de potencia se coloca para cada módulo de manera que entrada y salida de voltaje para cada módulo sea independiente y el voltaje de punto de máxima potencia pueda ser seteado individualmente para cada módulo. Consisten en conversores DC-DC y así la unidad de seguimiento de punto de

máxima potencia se asegura que la corriente de salida del módulo es igual a la del arreglo y todo el sistema es operado en el punto de máxima potencia. La figura 1.38 muestra el arreglo en cascada de varios seguidores de punto de máxima potencia, los cuales a su vez están conectados a la red mediante un inversor convencional. Los seguidores de máxima potencia pueden también trabajar en paralelo en un bus DC común.

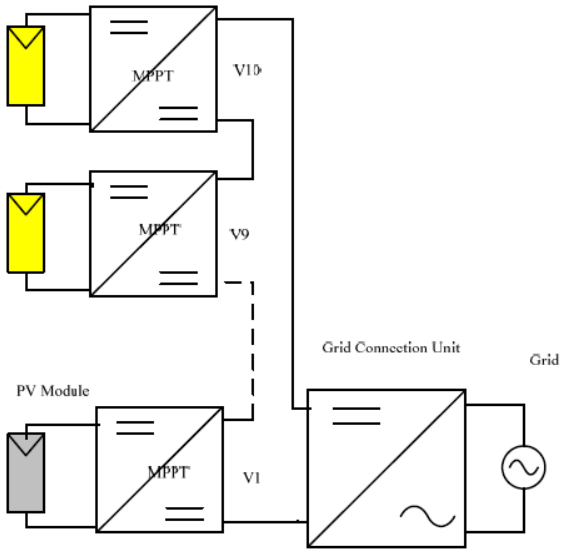


Figura 1. 38: Unidades distribuidas para seguimiento del punto de máxima potencia. [6]

1.6. CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

La caracterización de módulos fotovoltaicos es importante tanto para la investigación, como para el diseño y control de calidad de una instalación.

El funcionamiento básico de un caracterizador de celdas solares consiste en hacer que el módulo fotovoltaico, pase por todos los estados posibles de carga y en un tiempo relativamente corto (en caso de no poseer condiciones de radiación y temperatura controladas) para evitar cambios significativos en las condiciones externas a las que se encuentra sometido al momento de la caracterización.

A fin de obtener una curva V-I bien definida, se deben medir el voltaje y la corriente del módulo fotovoltaico, empezando desde el estado de mínimo voltaje y máxima corriente (corto circuito), pasando por varios estados de carga hasta alcanzar el estado de máximo voltaje y mínima corriente (circuito abierto).

1.6.1. MÉTODOS PARA CARACTERIZAR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para conseguir este fin se puede emplear varios métodos, entre los cuales se tiene:

- Método de carga capacitiva
- Método de carga resistiva
- Método de carga electrónica

1.6.1.1. Método de carga capacitiva [4]

Debido a que el comportamiento del módulo fotovoltaico es similar a una fuente de corriente continua, se puede conectar una carga capacitiva en paralelo al módulo, ya que en el proceso de carga le permite pasar por todos los estados, comenzando por la corriente de corto circuito, pasando por el punto de máxima potencia, hasta llegar al circuito abierto donde la corriente es cero.

Según la capacitancia usada se puede variar el tiempo de medida, de forma que las condiciones meteorológicas que rodean el módulo fotovoltaico no cambien sus valores (temperatura y radiación).

Ya en el proceso de carga es necesario tomar medidas de voltaje y corriente para poder determinar la curva característica del módulo fotovoltaico.

La forma básica de prueba para este método se muestra en la figura 1.39:

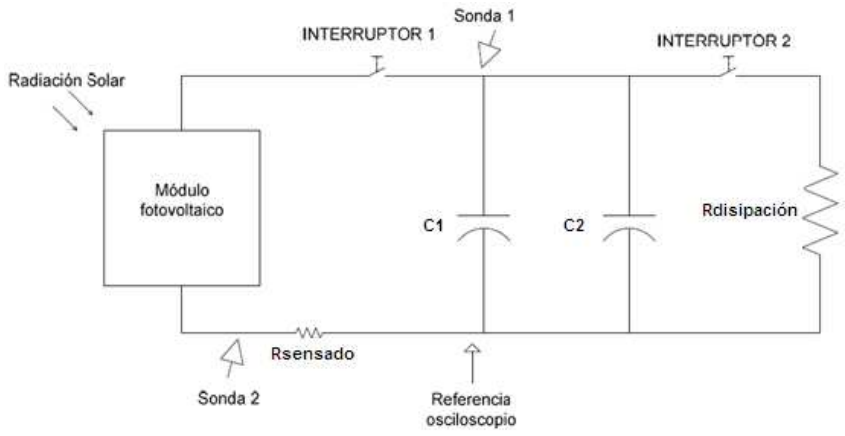


Figura 1. 39: Forma de conexión para el método de carga capacitiva. [4]

En este método se puede calcular la capacitancia a utilizar mediante la fórmula:

$$C = \frac{Ic \times t}{V}$$

Ec.1. 13

En donde:

V = Tensión del módulo fotovoltaico en circuito abierto.

Ic = Corriente de carga.

t = Tiempo de carga del condensador.

C = Capacitancia.

Una vez finalizado el ensayo, para descargar los condensadores y evitar posibles cortocircuitos o chispas peligrosas, se procede a la descarga de los mismos a través de una resistencia de potencia. Cuando el proceso de descarga termina se puede proceder a utilizar el módulo de nuevo.

1.6.1.2. Método de carga resistiva

El método de carga resistiva es bastante sencillo y se muestra en la figura 1.40, consiste en conectar en paralelo con el módulo fotovoltaico, un potenciómetro de potencia y de un valor alto de resistencia, y proceder a variar dicho potenciómetro desde el máximo valor de resistencia donde aparece el voltaje de circuito abierto, hasta que la resistencia sea 0 donde aparece la corriente de corto circuito.

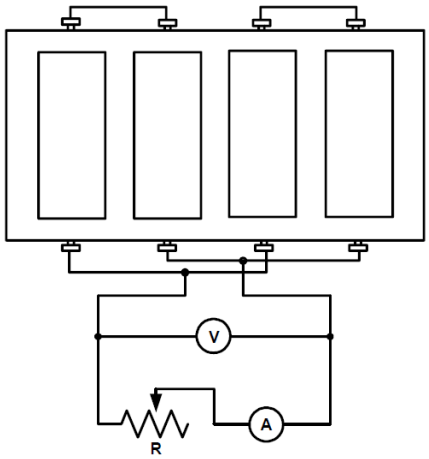


Figura 1. 40: Forma de conexión para el método de carga resistiva. [39]

De la misma manera es necesario tomar las medidas de voltaje y corriente durante la variación del potenciómetro, para formar la curva característica del módulo fotovoltaico.

1.6.1.3. Método de carga electrónica [3]

Este método consiste en la utilización de un conversor DC/DC como emulador de una resistencia variable.

Los convertidores DC/DC tienen muchas aplicaciones, donde se requiere obtener una tensión media de salida que puede ser mayor o menor que la aplicada a su entrada, gobernando los tiempos en que el interruptor principal del convertidor conduce o no conduce (técnica PWM), generalmente a frecuencia constante. A la relación entre el intervalo de tiempo en el que el interruptor está cerrado (Ton) y el periodo de conmutación (T), se le denomina ciclo de trabajo (δ). Tanto en el modo de funcionamiento con conducción continua (CCM, Continuous Conduction Mode), como en el modo de conducción discontinuo (DCM, Discontinuous Conduction Mode), las tres topologías básicas pueden ser asemejadas a un transformador de corriente continua, donde la relación de transformación puede ser controlada electrónicamente variando el ciclo de trabajo del convertidor.

La figura 1.41 muestra el diagrama de un panel solar conectado a un convertidor DC/DC, donde la resistencia reflejada a la entrada del convertidor viene representada por Ri (R es la resistencia de carga).

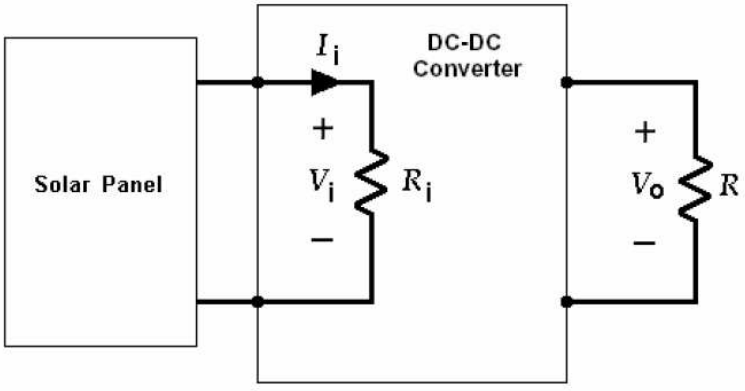


Figura 1. 41: Conexión Panel Solar – Conversor DC/DC. [3]

Suponiendo convertidores sin pérdidas, la relación entre la resistencia de entrada

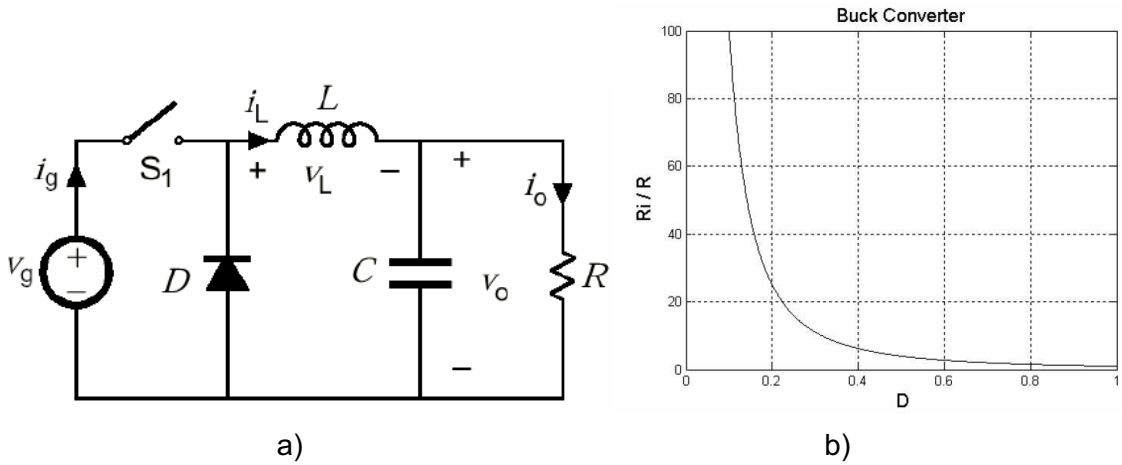
y la carga conectada a los convertidores se muestra en la Tabla 1.3, tanto para conducción continua como para conducción discontinua.

CONVERSOR	K crítico	Ri (CCM)	Ri (DCM)
Reductor	$1-\delta$	$\frac{R}{\delta^2}$	$\frac{R}{4}\times\left(1+\sqrt{1+\frac{4\times K}{\delta^2}}\right)^2$
Elevador	$\delta\times(1-\delta)^2$	$R\times(1-\delta)^2$	$\frac{4\times R}{\left(1+\sqrt{1+\frac{4\times\delta^2}{K}}\right)^2}$
Reductor-Elevador	$(1-\delta)^2$	$\frac{R\times(1-\delta)^2}{\delta^2}$	$\frac{K\times R}{\delta^2}$
Con $\mathrm{K}=\frac{2\times \mathrm{L}}{\mathrm{R}\times \mathrm{T}}$ el modo de conducción discontinuo ocurre para $K < Kcrítico$			

Tabla 1. 3: Valores de Ri para las configuraciones principales de conversores DC/DC. [3]

A continuación se muestran los tres convertidores básicos que proporcionan las diferentes relaciones de conversión dadas en la Tabla 1.3, junto con una representación gráfica de la resistencia de entrada reflejada en función del ciclo de trabajo δ para conducción continua.

1.6.1.3.1. Resistencia de entrada en un conversor DC/DC reductor



a) b)

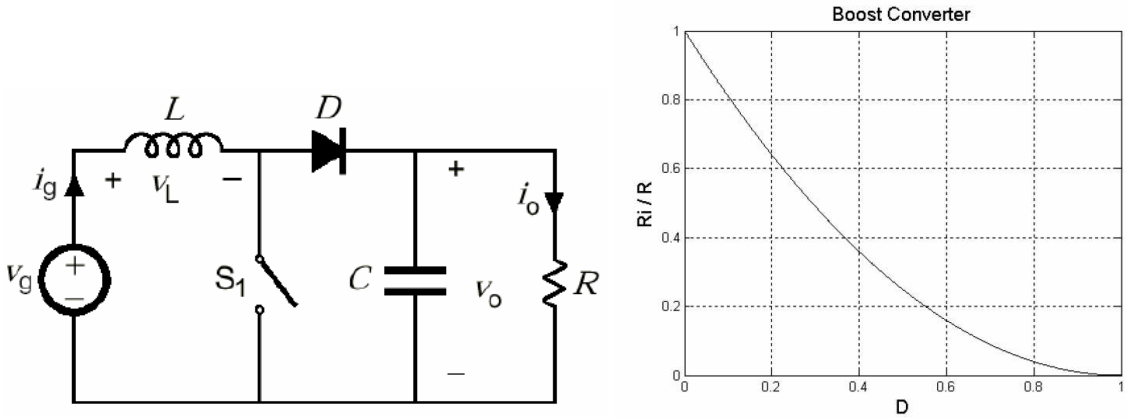
Figura 1. 42: a) Conversor Reductor, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua. [3]

Un conversor reductor presenta una incapacidad para reflejar a su entrada

impedancias menores que la de carga, y que por tanto no se alcanzan valores próximos a la corriente de cortocircuito del panel.

1.6.1.3.2. Resistencia de entrada en un conversor DC/DC elevador

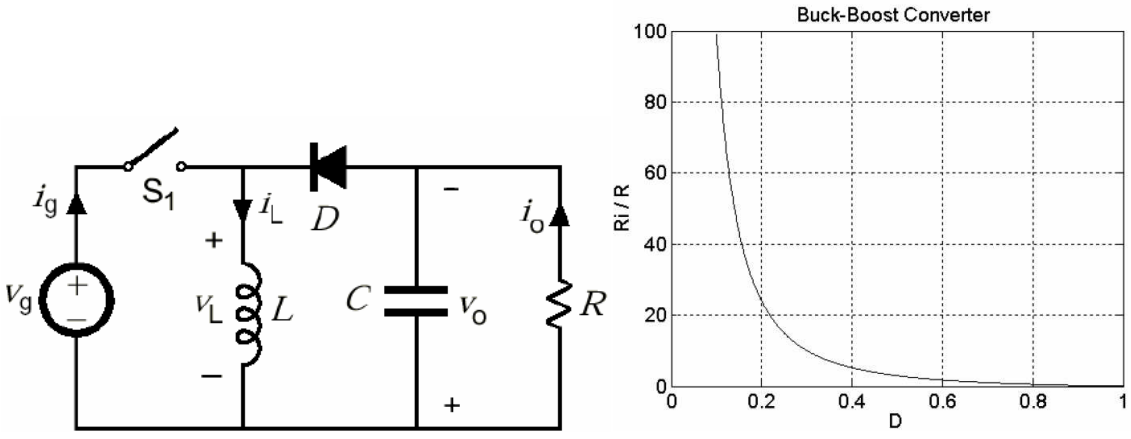
Un conversor elevador es incapaz de reflejar a su entrada impedancias mayores que la de carga, y que por tanto no se alcanzan valores próximos a la tensión de circuito abierto del panel.



a) b)

Figura 1. 43: a) Conversor Elevador, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua. [3]

1.6.1.3.3. Resistencia de entrada en un conversor DC/DC reductor-elevador



a) b)

Figura 1. 44: a) Conversor Reductor-Elevador, b) Resistencia de entrada vs. δ en conducción continua. [3]

Las topologías reductora-elevadoras Zeta, Cuk y Sepic proporcionan la misma resistencia de entrada mostrada en la Tabla 1.3, lo cual implica que estas estructuras son capaces de caracterizar toda la curva I-V de un módulo en conducción continua, desde la tensión a circuito abierto hasta la corriente de cortocircuito.

1.6.2. CARACTERIZADORES COMERCIALES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Existen gran cantidad de empresas a nivel mundial que se dedican al diseño y fabricación de herramientas para la investigación y producción fotovoltaica.
Por lo general son estaciones completas de pruebas, que tienen incorporado adicional al caracterizador, un simulador solar y la interfaz gráfica para visualizar las curvas características.
El simulador solar permite tener niveles controlados de radiación y temperatura, lo cual le da la facilidad al investigador de tener un amplio rango de posibilidades de prueba, y adquirir el comportamiento completo de un módulo fotovoltaico ante distintas condiciones ambientales que en este caso son controladas.
Entre las características más importantes que los caracterizadores comerciales poseen, se tiene:

- Bases de datos completa para todas las mediciones.
- Medición y análisis completo de todos los parámetros eléctricos.
- Corrección a condiciones estándar de prueba.
- Protección de sobrecorriente, sobrevoltaje y sobretemperatura.
- Tiempos de barrido cortos menores a 10 segundos.
- Mediciones en condiciones de oscuridad.
- Mediciones de coeficientes de temperatura.
- Mediciones basadas en normas especialmente:
    - ASTM E948-95(2005): Standard Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using.
    - IEC 60904-1 2006: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics.

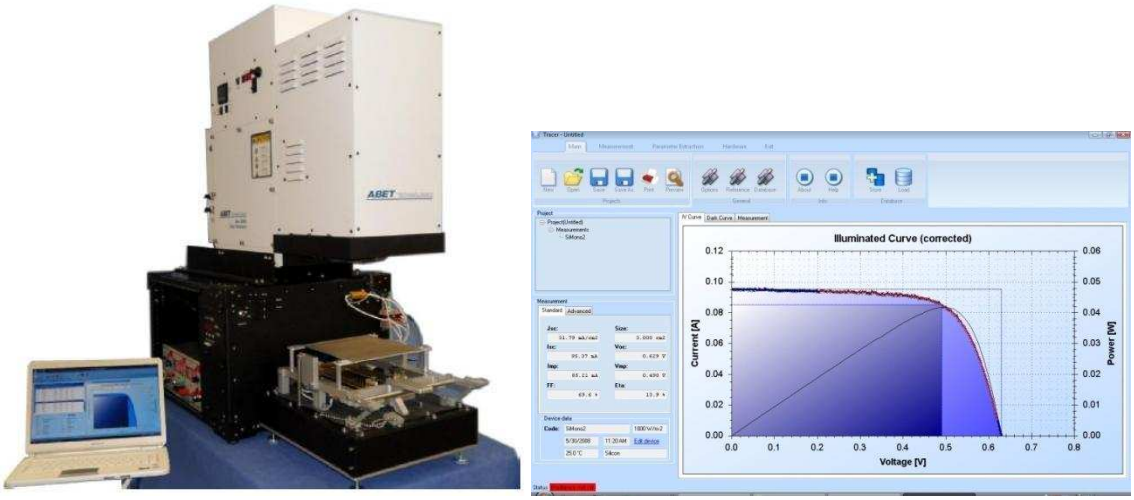


Figura 1. 45: Estación para caracterización de ABET TECHNOLOGIES. [17]

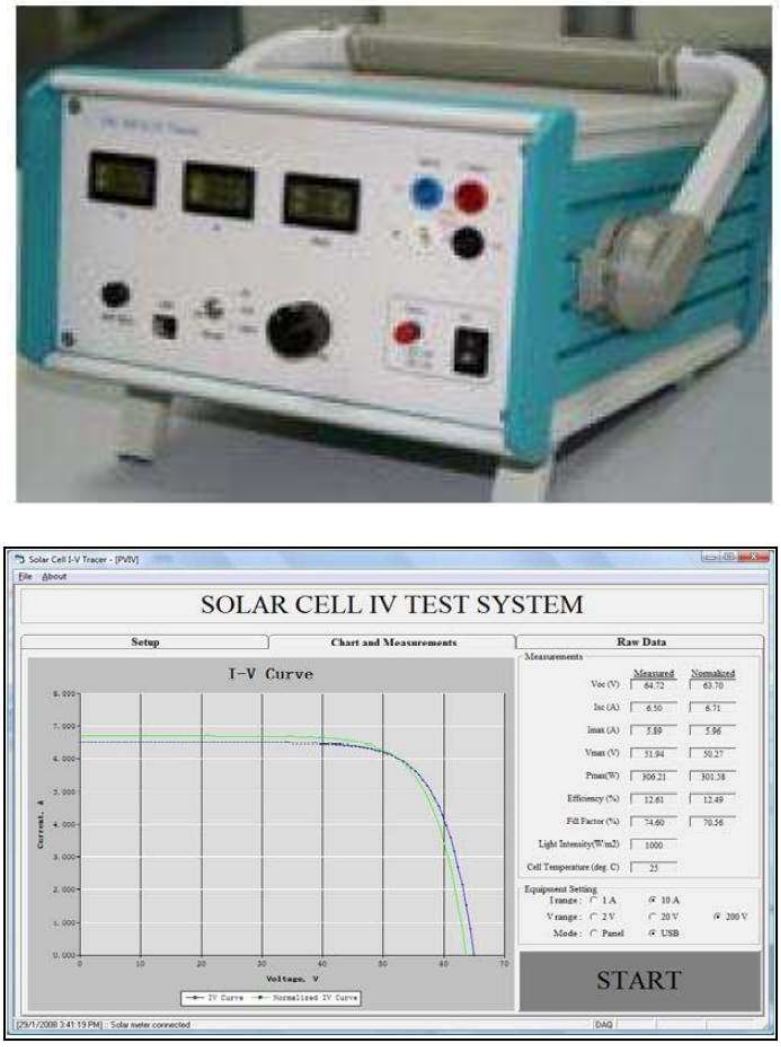


Figura 1. 46: Módulo para caracterización de VISION FACTORY AUTOMATION. [18]

1.7. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Después de haber expuesto toda la teoría necesaria referente al funcionamiento de dispositivos fotovoltaicos y la caracterización de los mismos, es necesario definir hacia donde se encamina el proyecto a ser realizado.

El tema del proyecto de titulación es: *"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN PARA VISUALIZAR LA CURVA CARACTERÍSTICA DE CELDAS Y PANELES SOLARES",* y se enfoca a la construcción de un módulo donde se conecten paneles fotovoltaicos de hasta 100W y 12V, que permita obtener la curva característica corriente-voltaje (I-V) tomando en consideración la temperatura superficial del panel y el ángulo de incidencia de la luz solar sobre éste y finalmente que todos estos datos sean almacenados en una interfaz gráfica, donde se pueda apreciar el comportamiento de dichos módulos con el cambio de las condiciones ambientales durante el día.
Para conseguir este fin se hace necesario la implementación de dos sistemas, el primero que esté orientado a la obtención de datos de corriente y voltaje necesarios para trazar la curva I-V, mediante el diseño de un circuito electrónico que emule una resistencia variable y un segundo sistema que permite seguir el punto de mayor luz en el cielo (movimiento del Sol), para así determinar el ángulo con que la radiación solar incide sobre la superficie del panel fotovoltaico, que se asume está posicionado en forma horizontal y a la vez medir la temperatura de esta superficie. Además todos estos datos deben ser procesados en un computador por medio de una Interfaz Hombre- Máquina (HMI), la cual permitirá visualizar, almacenar y simular las curvas características de los paneles.

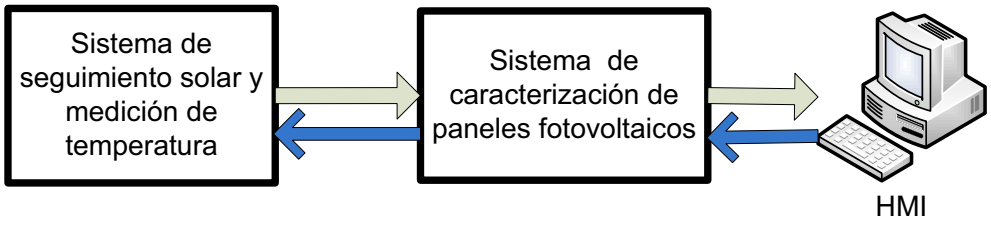


Figura 1. 47: Diagrama de la estructura general del proyecto.

De manera general el presente proyecto está formado por (figura 1.47):

- Sistema de caracterización de paneles fotovoltaicos.
- Interfaz hombre máquina (HMI).
- Sistema de seguimiento solar.

El diagrama de bloques de la distribución del hardware del proyecto se muestra en la figura 1.48, donde se pueden apreciar todos los elementos constitutivos del sistema (los esquemáticos y circuitos impresos completos diseñados para el proyecto se presenta en el ANEXO B):

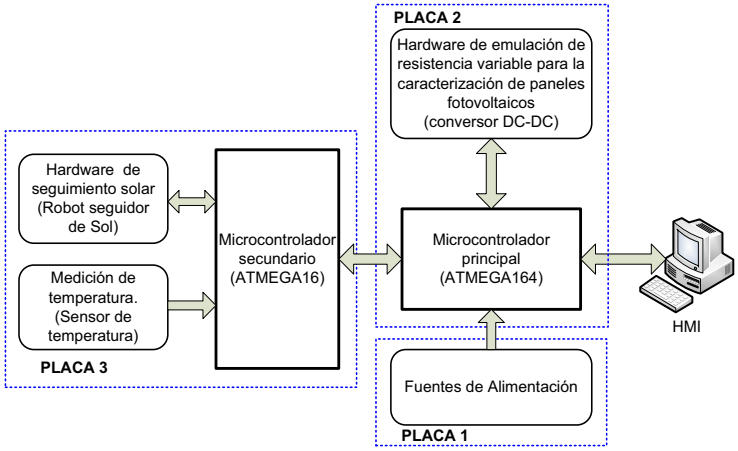


Figura 1. 48: Distribución del hardware para caracterización y seguimiento solar.

En la figura 1.49 se presenta un diagrama de bloques de las funciones principales a desarrollar por los elementos de la figura 1.48:

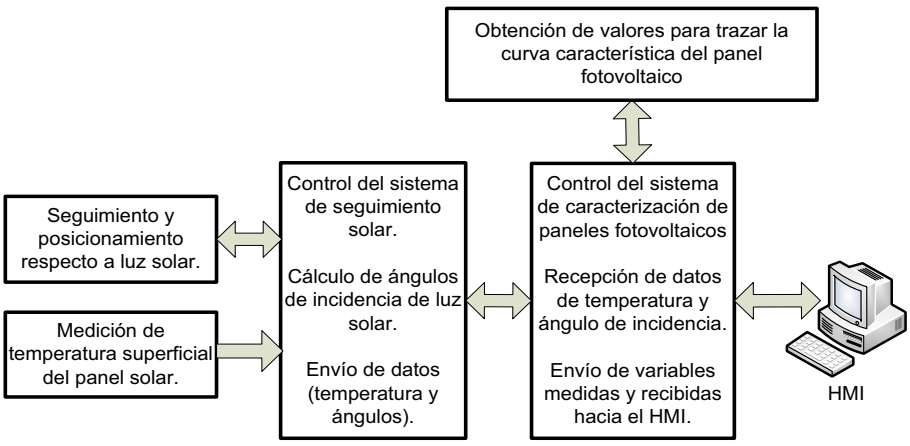


Figura 1. 49: Diagrama de bloques de las funciones que realiza el sistema de caracterización y seguimiento solar.

CAPÍTULO 2
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES

El presente capítulo se enfoca, como primer punto en el Sistema de Caracterización de Paneles Solares: las partes constitutivas, los elementos empleados, tipos de comunicación y las técnicas de control utilizadas, y como segundo punto, la Interfaz Hombre Máquina (HMI) que recibe los datos del sistema de caracterización, permite visualizar las curvas obtenidas y realizar un almacenamiento, a fin de establecer una comparación entre las mismas y definir los efectos que las diferentes condiciones ambientales causan sobre el comportamiento de un panel solar.

2.1. SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN

La estructura del sistema de caracterización se puede apreciar a continuación:

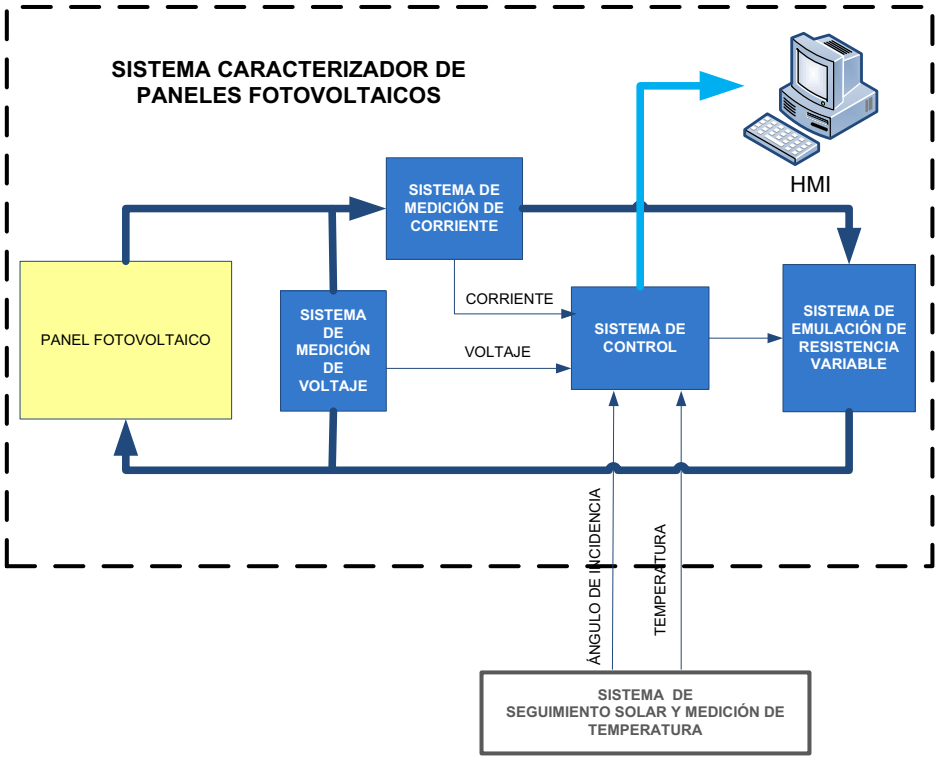


Figura 2. 1: Diagrama estructural del sistema de caracterización.

Este sistema es la base del proyecto, está encargado de la obtención de valores de voltaje y corriente, necesarios para trazar la curva característica del panel fotovoltaico a determinadas condiciones ambientales de temperatura y ángulo de incidencia de la luz solar. El sistema de caracterización consta de:

- Elemento de control
- Sistema de medición de voltaje
- Sistema de medición de corriente
- Sistema de emulación de resistencia variable
- Sistema de comunicación
- Programa de control

Para el funcionamiento del sistema de caracterización se contempla la necesidad de tener fuentes de 5V, 12V y -12V, para lo cual se utiliza la configuración de la figura 2.2, que permite tener las fuentes requeridas mediante la utilización de un sistema de rectificación, dos reguladores de voltaje positivo (7805 para 5V y el 7812 para 12V) y un regulador de voltaje negativo (7912 para -12V), también se usan capacitores a la entrada y a la salida de los reguladores para reducir al máximo el rizado.

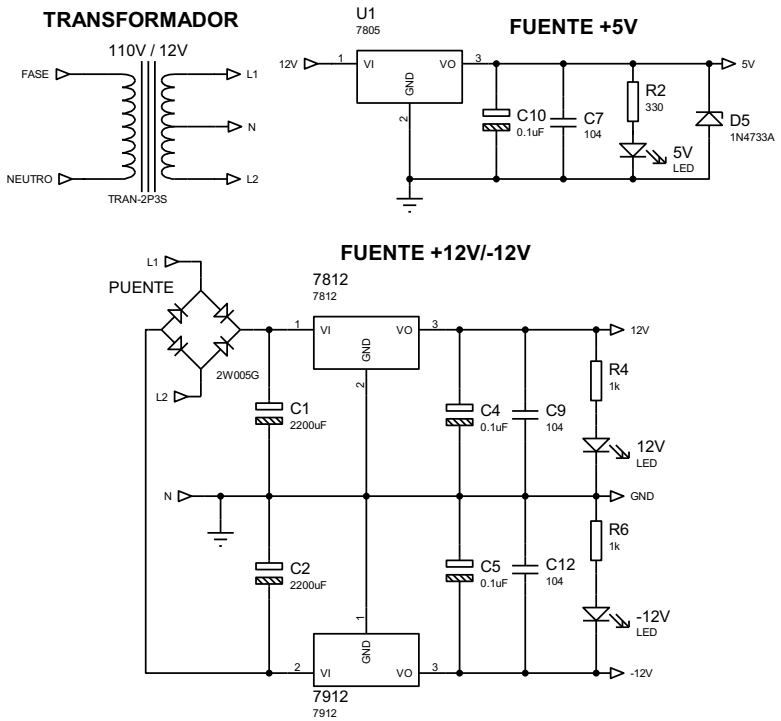


Figura 2. 2: Configuración utilizada para la alimentación del sistema de caracterización.

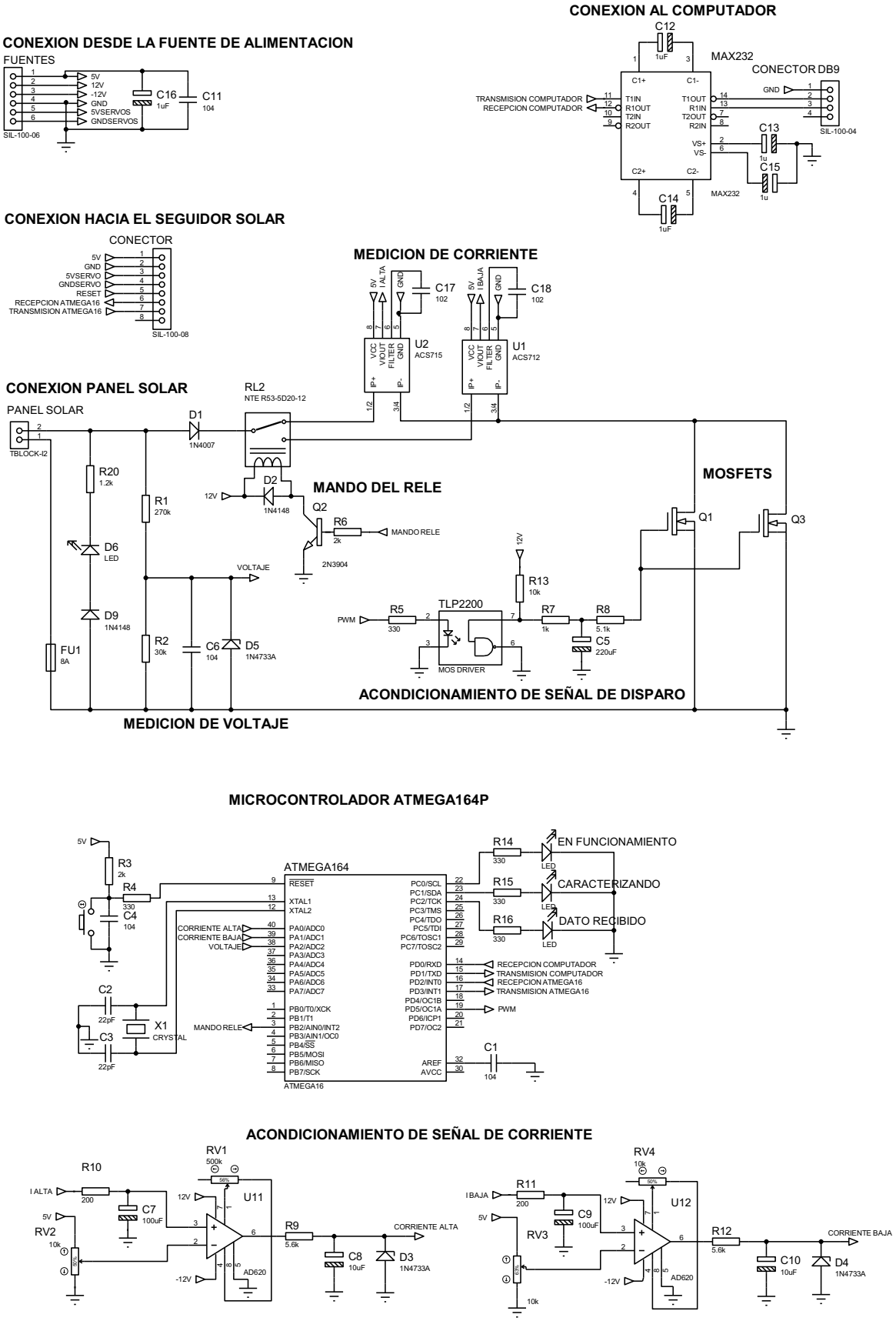


Figura 2. 3: Circuito completo del sistema de caracterización.

En la figura 2.3 se muestra el circuito diseñado para el sistema de caracterización, y a continuación se detalla cada una de las partes que lo conforman:

2.1.1. ELEMENTO DE CONTROL

Para implementar el programa de control, que permite el funcionamiento del sistema de caracterización se escoge el microcontrolador ATMEGA164P de la familia ATMEL, de manera específica por poseer 2 puertos de comunicación serial, ya que es necesario recibir datos desde el sistema de seguimiento solar y tener comunicación constante con el computador. También cuenta con la memoria suficiente para abarcar dicho programa de control.
Las funciones desarrolladas por el microcontrolador se muestran en el siguiente diagrama de bloques:

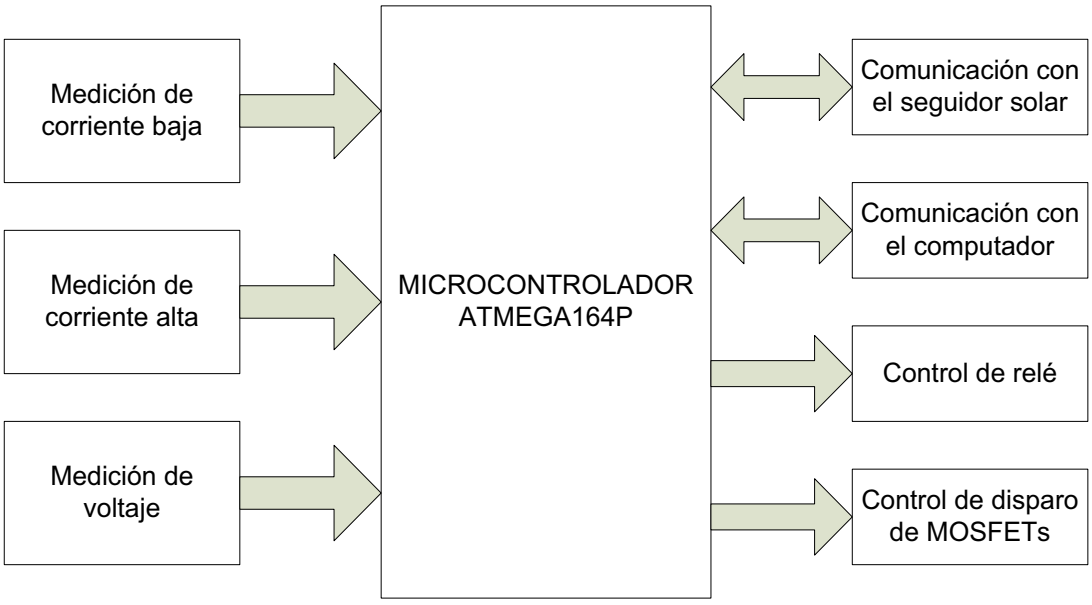


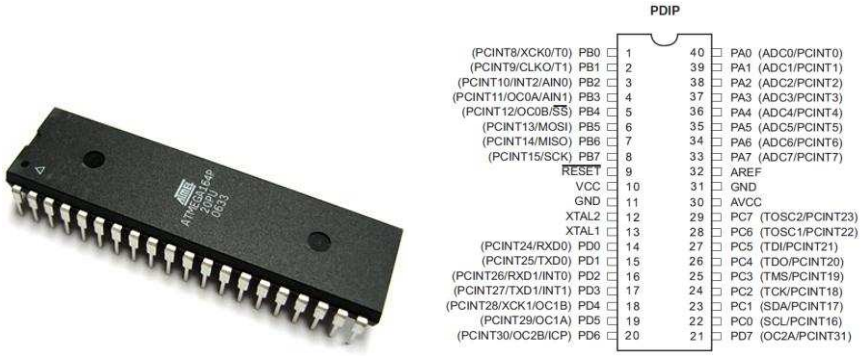
Figura 2. 4: Funciones ejecutadas por el microcontrolador ATMEGA164P.

2.1.1.1. Microcontrolador ATMEGA164P

El ATMEGA164P es un microcontrolador CMOS de 8 bits de baja potencia, basada en la arquitectura RISC mejorada de AVR. Permite la ejecución de poderosas instrucciones en un ciclo de reloj, permitiendo a un sistema optimizar el consumo de energía con una alta velocidad de procesamiento.

Entre las características principales se enumeran (características adicionales y configuración para programación del ATMEGA164P se exponen en el ANEXO D):

- Arquitectura RISC avanzada
- Segmento de memoria no volátil de alta duración.
- 16Kbytes de memoria flash
- Voltajes de operación de 2.7V a 5.5V
- 1 TIMER de 16 bits y 2 TIMER de 8 bits
- 8 canales de conversores D/A de 10 bits
- 2 puertos de comunicación serial
- 6 canales para PWM



a) b)

Figura 2. 5: ATMEGA16 (a) imagen real [31] y (b) distribución de pines [47].

2.1.1.2. Distribución de los recursos del microcontrolador ATMEGA164P

El siguiente esquemático es parte de la figura 2.3 y muestra los pines del microcontrolador utilizados para el sistema de caracterización:

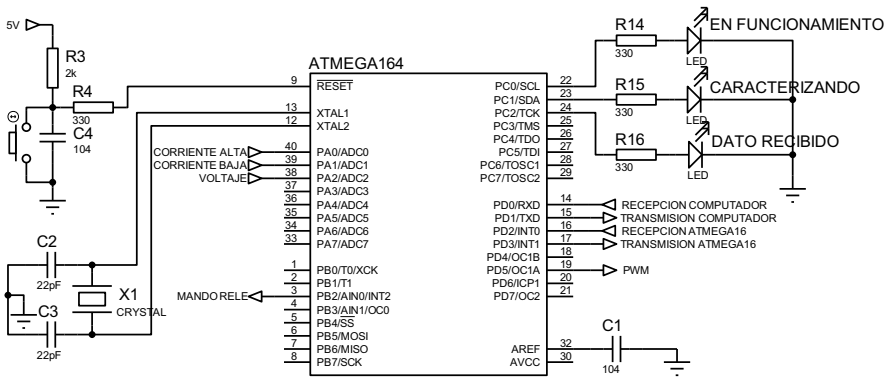


Figura 2. 6: Circuito esquemático del microcontrolador ATMEGA164P.

A continuación se detalla la función de cada pin del microcontrolador ATMEGA164P utilizado en el sistema de caracterización:

Pin	Descripción	Función
3	PB2 (PCINT10/INT2/AIN0)	Comandar el relé según la corriente circulante.
9	RESET	Reinicializar el programa del microcontrolador.
10	VCC	Alimentación del microcontrolador.
11	GND	Alimentación del microcontrolador.
12	XTAL2	Cristal de 16MHz.
13	XTAL1	Cristal de 16MHz.
14	PD0 (PCINT24/RXD0)	Recepción de datos desde el computador.
15	PD1 (PCINT25/TXD0)	Envío de datos hacia el computador.
16	PD2 (PCINT26/RXD1/INT0)	Recepción de datos desde el ATMEGA16.
17	PD3 (PCINT27/TXD1/INT1)	Envío de datos hacia el ATMEGA16.
19	PD5 (PCINT29/OC1A)	Generación del PWM para control de los MOSFETs.
22	PC0 (SCL/PCINT16)	Led indicador de caracterización en proceso.
23	PC1 (SDA/PCINT17)	Led indicador de funcionamiento.
24	PC2 (TCK/PCINT18)	Led indicador de recepción de datos desde el ATMEGA16.
31	GND	Alimentación del conversor análogo-digital.
38	PA2 (ADC2/PCINT2)	Medición de voltaje del módulo fotovoltaico.
39	PA1 (ADC1/PCINT1)	Medición de corriente menor a 1.3 Amperios.
40	PA0 (ADC0/PCINT0)	Medición de corriente mayor a 1.3 Amperios.

Tabla 2. 1: Funciones de los pines del microcontrolador ATMEGA164P.

2.1.2. SISTEMA DE MEDICIÓN DE VOLTAJE

El siguiente esquemático es parte de la figura 2.3 y muestra los elementos utilizados para el sistema de medición de voltaje:

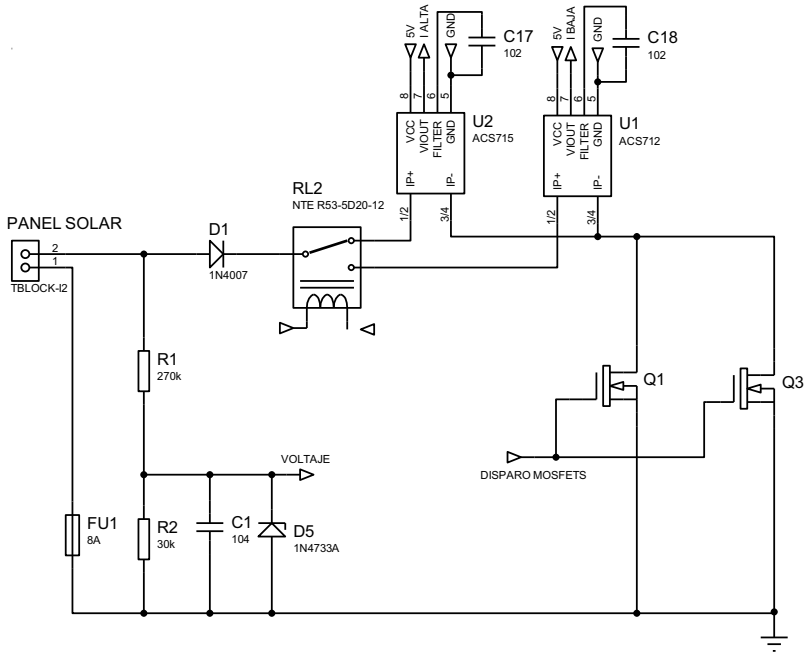


Figura 2. 7: Circuito esquemático del sistema de medición de corriente.

Para la medición del voltaje en los terminales del panel fotovoltaico, se utiliza un divisor de voltaje, el cual consta de dos resistencias que van conectadas directamente a los terminales del panel fotovoltaico para obtener un voltaje proporcional que es entendido por el microcontrolador.
La salida del divisor de voltaje se conecta al conversor análogo digital de un microcontrolador ATMEGA164P, al cual se configura para que trabaje con la referencia interna de 2,56V, esto para evitar errores debido a referencia de voltaje.

2.1.2.1. Diseño del divisor de voltaje para la medición de voltaje

Para el diseño de este divisor de voltaje, hay que considerar principalmente que éste debe consumir una corriente muy pequeña, de manera que no disminuya el flujo de corriente del módulo fotovoltaico. Además el divisor de voltaje debe entregar en su salida un valor máximo de 2,56V, que es el valor de la referencia interna del conversor A/D.
Dadas las condiciones establecidas y considerando que el sistema debe estar diseñado para paneles que entreguen un voltaje de circuito abierto de aproximadamente 20V en su salida, se establece 25V como valor máximo de medida del sensor. Es conveniente diseñar un divisor que reduzca el voltaje en 10 veces, con lo que se tendrá un voltaje máximo de 2,5 voltios en la salida en la peor condición. También, debido a la condición de corriente los valores de R1 y R2 deben ser altos. Entonces para el divisor de tensión de la figura 2.7:

$$V_{salida} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{panel}$$

Se asume que se debe tener una salida máxima de 2,5V cuando el panel entregue 25V, con lo se tiene:

$$2.5\ V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * 25\ V$$

Simplificando:

$$\frac{1}{10} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Lo cual implica que: $R_1 = 9 * R_2$

De donde asumiendo R_2= 30KΩ se tiene R_1= 270KΩ.
Adicionalmente, se debe calcular la corriente máxima que circulará a través del divisor de voltaje, por lo que:

$$I_{max-divisor} = \frac{25V}{30K + 270K} = 83{,}33\mu A$$

Lo cual se puede considerar despreciable, por lo tanto no afectará a la medición de corriente. Este dato también sirve para calcular la potencia de cada resistencia así:

$$P_R = (I_{max-divisor})^2 * R$$

De donde se tiene:

$$R1 = 270K\Omega \qquad P_{R1} = 0{,}20\ mW$$
$$R2 = 30K\Omega \qquad P_{R2} = 1{,}87\ mW$$

Además se coloca un capacitor en la salida del divisor de tensión para filtrar algún tipo de ruido que podría presentarse.

2.1.3. SISTEMA DE MEDICIÓN DE CORRIENTE

La medición de corriente para un sistema de caracterización es uno de los factores más importantes a tener en cuenta, ya que de sus valores dependen las curvas características del panel solar.
Debido a que el alcance del proyecto contempla la caracterización de módulos fotovoltaicos de hasta 100W y que el voltaje promedio en el punto de máxima potencia para un panel solar es de 17,5V a condiciones estándar de prueba (STC), se deduce que la corriente máxima que se espera obtener es de alrededor de 6A, sin embargo se pueden presentar radiaciones mayores especialmente a medio día, que generen corrientes un poco mayores a 6A.
Como la corriente máxima a medir es relativamente alta, y ante la posibilidad de condiciones de muy baja radiación o conexión de un panel de baja potencia que genere corrientes muy pequeñas, 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, el primero para medir corrientes altas y el segundo para corrientes bajas. La configuración general que se va a utilizar para la medición de corriente se muestra en el siguiente diagrama de bloques:

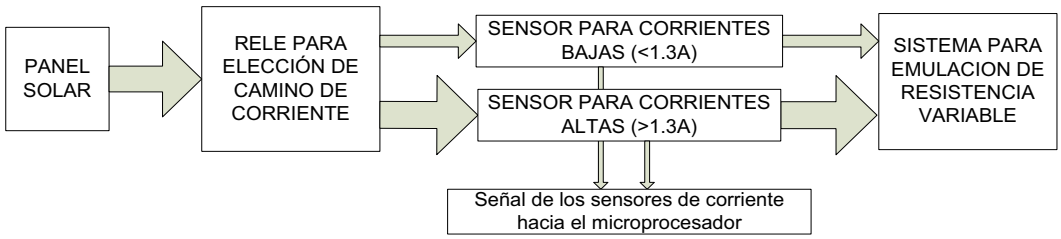


Figura 2. 8: Diagrama de bloques de la estructura del sistema de medición de corriente.

2.1.3.1. Elección del sensor de corriente

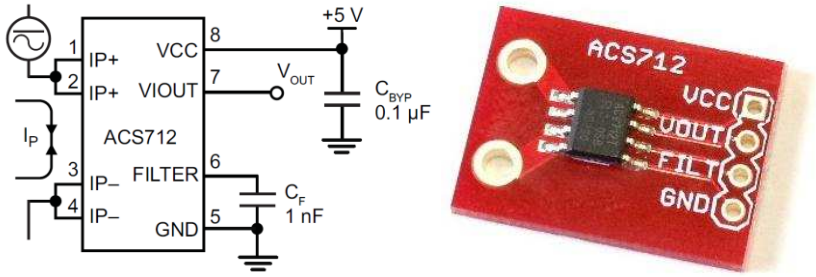
Se decide el uso de un sensor de efecto Hall, el cual mediante un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, y ante la circulación de corriente crea un voltaje de salida, la principal ventaja del uso de este tipo de sensor es que no tiene influencia en el camino de la corriente, ya que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

Se escoge el sensor de corriente de efecto Hall ACS712 que es acondicionado para medir corrientes bajas y el sensor de corriente de efecto Hall ACS715 que es acondicionado para medir corrientes altas.

2.1.3.1.1. Sensor de corriente ACS712

Este sensor se utiliza para medir corrientes bajas, es un integrado de montaje superficial, que se lo encuentra comercialmente en forma de placa (figura 2.9 b), es un sensor de efecto Hall que brinda medición precisa de corriente, tanto para señales alternas y continuas.

El ACS712 da una salida de voltaje que varía linealmente con la corriente sensada. Este dispositivo requiere 5Vcc para alimentación y un par de capacitores de filtrado.



a) b)

Figura 2. 9: ACS712: a) Pines y forma de conexión [42], b) Imagen real [20].

Sus características principales son (para mayor información sobre el ACS712 consultar el ANEXO D):

- Capacidad de escoger el ancho de banda mediante el filtro.
- Tiempo de subida de la salida de 5us.
- Ancho de banda de 80KHz.
- 1.5% de error en la salida a 25ºC.
- Resistencia interna de conductor de 1,2mΩ.
- Voltaje de alimentación de 5Vcc.
- Sensibilidad de 185 mV/A.

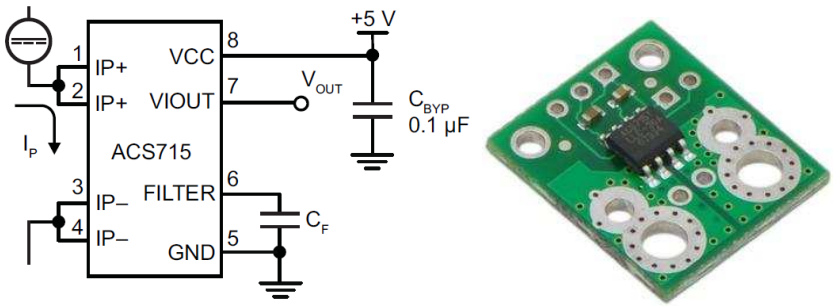
2.1.3.1.2. Sensor de corriente ACS715

Este sensor se utiliza para medir corrientes altas, es un integrado de montaje superficial, que se lo encuentra comercialmente en forma de placa (figura 2.10 b), es un sensor de efecto Hall que brinda medición precisa de corriente para señales continuas. El ACS715 da una salida de voltaje que varía linealmente con la corriente sensada.

Sus características principales son (para mayor información sobre el ACS715 consultar el ANEXO D):

- Capacidad de escoger el ancho de banda mediante el filtro.
- Tiempo de subida de la salida de 5us.
- Ancho de banda de 80KHz.

- 1,5% de error en la salida a 25ºC.
- Resistencia interna de conductor de 1,2mΩ.
- Voltaje de alimentación de 5Vcc.
- Sensibilidad de 133 mV/A.



a) b)

Figura 2. 10: ACS715: a) Pines y forma de conexión [43], b) Imagen real. [21]

2.1.3.2. Diseño del sistema de medición de corriente

El sistema propuesto consta de dos caminos de corriente para una misma fuente (módulo fotovoltaico), para tener la posibilidad de medir esta variable con el sensor más adecuado, de acuerdo a su magnitud y tener mediciones más precisas. Por lo cual se decide acondicionar los sensores de manera que puedan medir hasta 1,3A por el camino de menor corriente y hasta 13A por el camino de mayor corriente, esto es por conveniencia y debido a la capacidad de los sensores.

Además se necesita un medio por el cual el sistema elija por qué camino hacer circular la corriente, para lo cual se utiliza un relé.

Entonces el diseño de este sistema contempla:

- Acondicionamiento del sensor ACS712.
- Acondicionamiento del sensor ACS715.
- Diseño del circuito para comandar el relé de direccionamiento.

El siguiente esquemático es parte de la figura 2.3 y muestra los elementos utilizados para el sistema de medición de corriente:

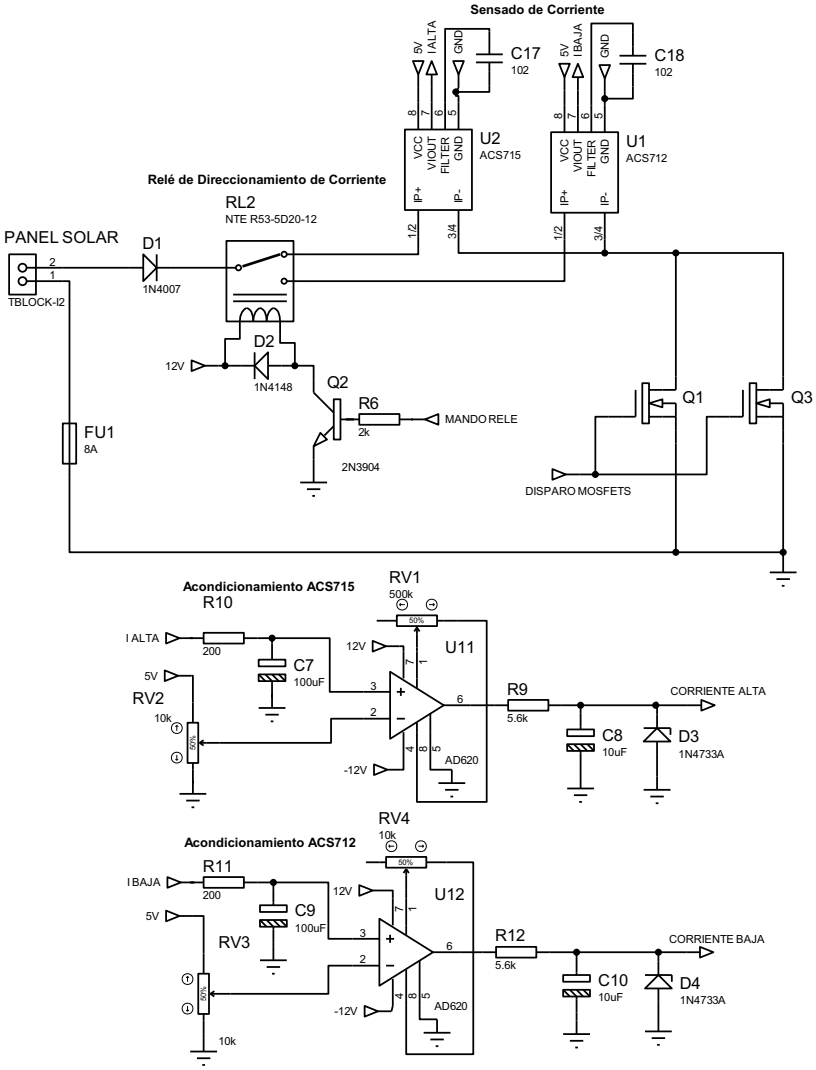


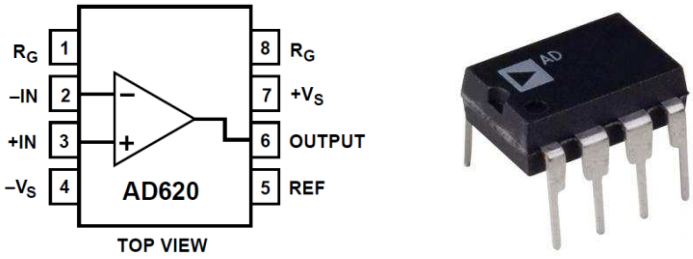
Figura 2. 11: Circuito esquemático del sistema de medición de corriente.

Para el acondicionamiento de los sensores de corriente es necesario el uso de un dispositivo amplificador, con ganancia variable, para ajustar el voltaje que entregan dichos elementos, y que el microcontrolador tenga la mayor sensibilidad en la medición de las corrientes que se asignan para cada sensor.

Se elige el amplificador de instrumentación AD620 (figura 2.12), el cual mediante la utilización de una sola resistencia externa puede tener ganancias desde 1 hasta 1000, y entre sus características más importantes se tiene (para mayor información sobre el AD620 consultar el ANEXO D):

- Amplio rango de voltaje de alimentación (2,3V hasta 18V)
- Excelente desempeño en el uso con corriente continua.
- Bajo nivel de ruido.

- Ancho de banda de 120KHz.
- Tiempo de establecimiento de 15ms



a) b)

Figura 2. 12: AD620: a) Distribución de pines [44], b) Imagen real [22].

Debido a la configuración interna del AD620, la ganancia requerida se puede obtener mediante una resistencia calculada con la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{R_G = \frac{49.4K\Omega}{G-1}}$$

Ec.2. 1

2.1.3.2.1. Acondicionamiento del sensor ACS712

Primero se debe considerar que se utiliza como referencia de voltaje para el conversor análogo digital del microprocesador su referencia interna de 2,56V, por lo tanto éste será el valor máximo de salida del acondicionamiento.
Entonces se tienen los siguientes datos:

- Voltaje de salida (Vout)= 2,56V
- Sensibilidad ACS712 = 185mV/A
- Corriente máxima a medir (Imax) = 1,3A

El voltaje de salida del sensor (Vs) será:

$$Vs = 185mV/A \times 1{,}3A$$

$$Vs = 0{,}24V$$

La ganancia (G) que debe tener el AD620 será:

$$G = \frac{2{,}56V}{0{,}24V}$$

$$G = 10{,}67$$

Basándose en Ec.2.1 se puede encontrar la resistencia para obtener la ganancia requerida:

$$R_G = \frac{49{,}4k\Omega}{10{,}67 - 1}$$

$$R_G = 5{,}1K\Omega$$

Se escoge un potenciómetro de precisión de 10KΩ para posibles calibraciones.
También se necesita colocar un potenciómetro en la entrada negativa del AD620, el cual sirve para poner en 0V la salida del amplificador cuando no existe corriente, ya que el ACS712 presenta un offset de voltaje que también es amplificado.
Para tener una señal más limpia y sin ruido de alta frecuencia se colocan dos filtros pasa bajos en el acondicionamiento de este sensor, uno a la entrada y otro en la salida del AD620, los filtros son diseñados para frecuencias de corte cercanas a 10Hz para eliminar cualquier ruido que pudiera presentarse. El circuito con el acondicionamiento del ACS712 se muestra en la figura 2.11.

2.1.3.2.2. Acondicionamiento del sensor ACS715

Para este acondicionamiento se toman las mismas pautas que en el ACS712, por lo tanto:

- Voltaje de salida (Vout)= 2,56V
- Sensibilidad ACS715 = 133mV/A
- Corriente máxima a medir (Imax) = 13A

El voltaje de salida del sensor (Vs) será:

$$Vs = 133mV/A \times 13A$$

$$Vs = 1{,}73V$$

La ganancia (G) que debe tener el AD620 será:

$$G = \frac{2{,}56V}{1{,}73V}$$

$$G = 1{,}48$$

Basándose en Ec.2.1 se puede encontrar la resistencia para obtener la ganancia requerida:

$$R_G = \frac{49{,}4k\Omega}{1{,}48 - 1}$$

$$R_G = 102{,}9K\Omega$$

Se escoge un potenciómetro de precisión de 500KΩ para posibles calibraciones.
También se necesita colocar un potenciómetro en la entrada negativa del AD620, el cual sirve para establecer en 0V la salida del amplificador cuando no existe corriente, ya que el ACS715 presenta un offset de voltaje que también es amplificado.
Para tener una señal más limpia y sin ruido de alta frecuencia se colocan dos filtros pasa bajos en el acondicionamiento de este sensor, uno a la entrada y otro en la salida del AD620, los filtros son diseñados para frecuencias de corte cercanas a 10Hz para eliminar cualquier ruido que pudiera presentarse. El circuito con el acondicionamiento del ACS715 se muestra en la figura 2.11.

2.1.3.2.3. Diseño del circuito para comandar el relé de direccionamiento.

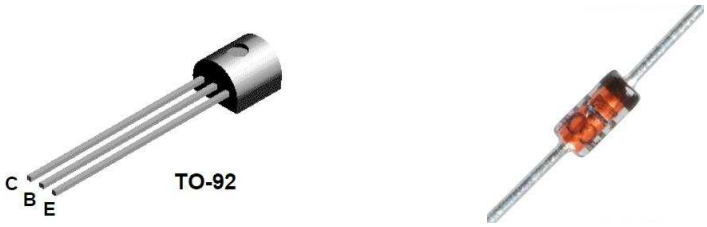
El relé utilizado es de la familia NTE, el R53-5D20-12 (figura 2.13), soporta una corriente de 30A, voltaje de bobina de 12V y finalmente posee 1 contacto normalmente abierto y 1 contacto normalmente cerrado, características que lo hacen ideal para el módulo a construir.

a) b)

Figura 2.13: Relé NTE R53-5D20-12: a) imagen real, b) disposición de los contactos. [23]

En la figura 2.11 se muestra el circuito para el control del relé, en el cual el transistor puede pasar de corte a saturación, mediante la señal de 0V o 5V que sale del microcontrolador y de esta manera controlar el flujo de corriente que pasa por la bobina del relé y poder comandarlo.

Se escoge el transistor de señal 2N3904 (figura 2.14 a), que entre las especificaciones se tiene un Vbe_{sat} máximo de 0,85V con condiciones de Ic=10mA y Ib=3mA.



a) b)

Figura 2. 14: a) Transistor 2N3904 [24], b) Diodo 1N4148 [25].

Asumiendo estos valores de corriente se puede calcular la resistencia para la base del transistor:

$$Rbase = \frac{5V - 0{,}85V}{3mA}$$

$$Rbase = 1{,}38\ K\mathbf{\Omega}$$

Se escoge: $$Rbase = 2\ K\mathbf{\Omega}$$

Finalmente para protección del circuito por falla del transistor o de la bobina del relé se coloca un diodo 1N4148 (figura 2.14 b) que es de alta velocidad, en antiparalelo con la bobina del relé.

2.1.4. SISTEMA PARA LA EMULACIÓN DE RESISTENCIA VARIABLE

Como se explicó en 1.6.1.3 los conversores DC/DC pueden ser utilizados para reflejar una resistencia variable en su entrada, mediante la variación del ancho de pulso en el control de los interruptores electrónicos de los mismos.

En este proyecto se opta por utilizar simplemente un interruptor electrónico en paralelo con el panel solar, lo cual únicamente es una variación del conversor DC/DC reductor (conversor DC/DC reductor sin carga).

Para el control de este sistema en vez de utilizar una señal PWM, ésta se ha filtrado convirtiéndola en un nivel de voltaje continuo (conversión digital-análoga) para obtener un control lineal del interruptor electrónico.

El uso del control lineal permite que la corriente del panel solar que pasa por el interruptor electrónico sea constante, lo cual es beneficioso para obtener una medición confiable con los sensores de corriente de efecto Hall.

El siguiente esquemático es parte de la figura 2.3 y muestra los elementos utilizados para el sistema de resistencia variable:

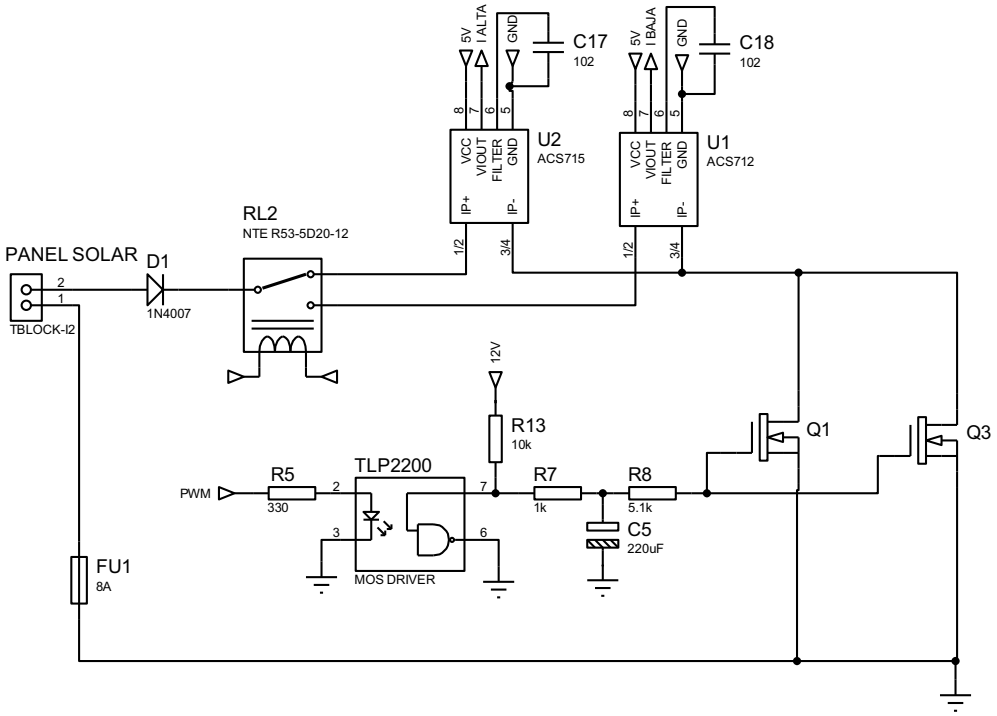


Figura 2. 15: Circuito esquemático del sistema para emulación de resistencia variable.

2.1.4.1. Control lineal

Se va a controlar el nivel de corriente que puede circular por el interruptor electrónico con la variación del voltaje DC en la base o compuerta dependiendo del elemento a utilizar. A diferencia del control PWM que produce una corriente pulsante, el control lineal produce circulación de corriente constante.

Como ejemplo en la figura 2.16 se muestra la característica V_{GS} - I_D de un transistor NMOS, en donde se pone de manifiesto cómo la intensidad I_D aumenta bruscamente cuando se supera la tensión umbral V_{TH} (Threshold Voltage),

entonces se concluye que se puede definir un rango de voltaje con el que se dispara el interruptor dentro del cual es posible controlar el flujo de corriente.

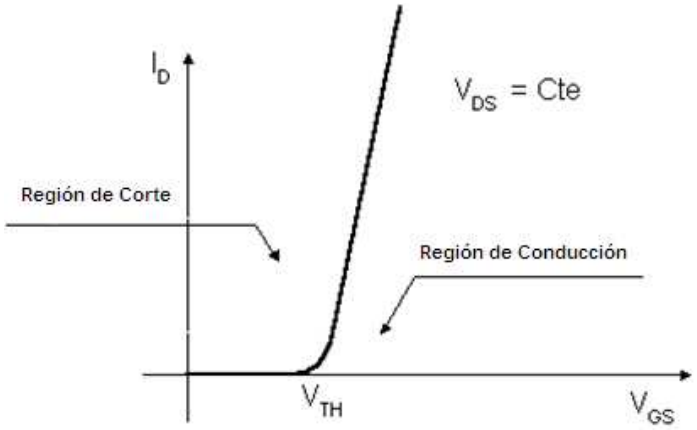


Figura 2. 16: Característica VGS - ID de un transistor NMOS [26].

El sistema de control debe barrer este rango de voltaje para controlar el flujo de corriente del panel solar y hacerlo pasar por todos los estados de carga.

2.1.4.2. Elección y dimensionamiento del interruptor electrónico

Para el control lineal se puede utilizar cualquier interruptor electrónico, sin embargo para esta aplicación se decide utilizar un MOSFET, las principales características que influyeron en esta decisión son:

- Resistencia interna pequeña, lo cual permite que la corriente que circula con la mayor activación del MOSFET sea lo más cercana a la corriente de cortocircuito del panel solar.
- Gobernado por voltaje, lo cual facilita su control.
- Capacidad de poner MOSFETs en paralelo, lo cual permite distribuir la corriente del panel solar entre varios interruptores y dimensionarlos de menor potencia, lo cual abarata los costos del proyecto.

Para el dimensionamiento del MOSFET se necesita conocer la máxima corriente que va a circular a través del mismo y el máximo voltaje que debe soportar en los terminales Drain(D) y Source(S).

El sistema propuesto debe ser dimensionado para módulos fotovoltaicos de 100W-12V, el voltaje de máxima potencia en este tipo de dispositivos es

generalmente 17,5V, por lo tanto es predecible que la corriente a soportar para la máxima potencia entregada es de aproximadamente 6A. El voltaje de circuito abierto típico es de alrededor de 22V y la corriente de corto circuito es aproximadamente 10% mayor a la de máxima potencia (unos 6,6A), sin embargo estos valores tienen una producción de potencia nula según la curva característica revisada en 1.4.7.

Cabe resaltar que estos datos corresponden a un comportamiento de laboratorio ante condiciones de prueba estándar (STC), y pueden presentarse radiaciones mayores que generarán una mayor cantidad de potencia.

El MOSFET escogido es el IRF640 (figura 2.17), que soporta una corriente de hasta 18A, un voltaje de 200V y posee una resistencia interna de 150mΩ. Estas características lo hacen ideal para este proyecto, sin embargo para una mayor seguridad se utilizan dos interruptores IRF640 en paralelo para distribuir la potencia a disipar (figura 2.15).

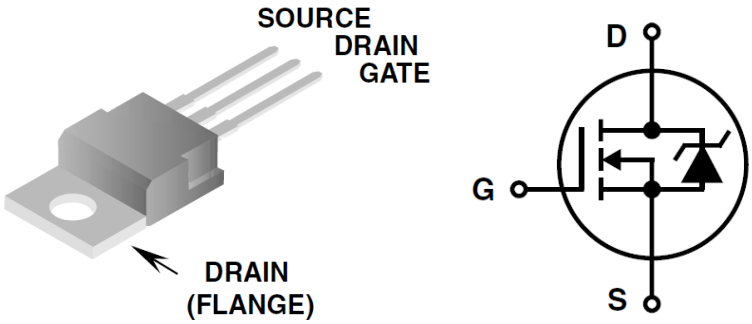


Figura 2. 17: Distribución de pines del IRF640. [45]

En la figura 2.18 se muestra la característica V_{GS} - I_D del IRF640, donde se puede apreciar que para una temperatura de 25ºC, el flujo de corriente puede variar desde 0A hasta 15A, variando el voltaje V_{GS} desde el voltaje umbral que es 3V hasta 4,2V aproximadamente, éste es el rango de voltaje dentro del cual el sistema de control debe variar para realizar el proceso de caracterización.

(Para características adicionales de IRF640 consultar ANEXO D).

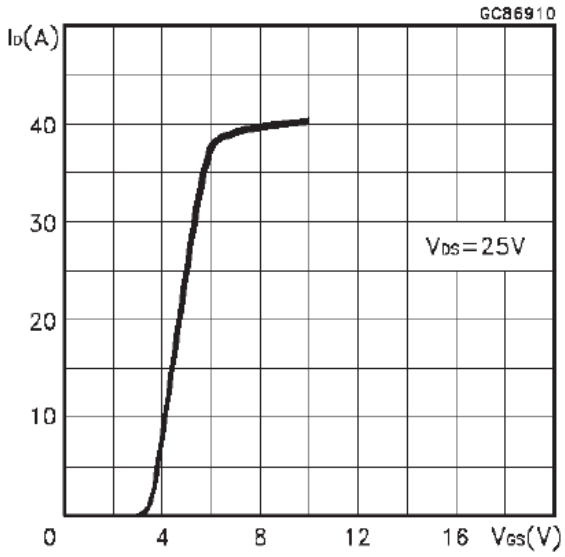


Figura 2. 18: Característica VGS - ID del IRF640. [45]

2.1.4.3. Dimensionamiento del disipador de potencia [10]

Para el diseño, conviene primero establecer una correspondencia entre la Ley de Ohm y la propagación térmica mediante la siguiente tabla de equivalencias:

ANALOGÍA TÉRMICA - LEY DE OHM	
Intensidad (I)	Potencia disipada (P)
Tensión (V)	Temperatura (T)
Resistencia (R)	Resistencia Térmica (R)
V = IR	T = PR

Tabla 2. 2: Analogía entre la temperatura y la ley de ohm. [10]

Para el diseño de disipadores de calor se parte del circuito mostrado en la siguiente figura:

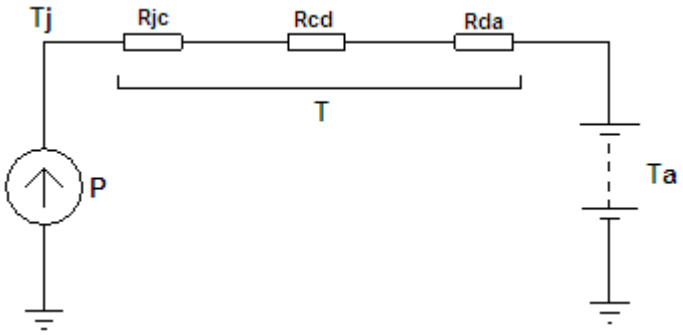


Figura 2. 19: Circuito térmico representado como equivalencia de un eléctrico.

De la figura anterior se obtiene que:

$$\boldsymbol{T = P\,(Rjc + Rcd + Rda)}$$

Ec.2. 2

$$\boldsymbol{Tj = P\,(Rjc + Rcd + Rda) + Ta}$$

Ec.2. 3

Donde:

Tj = Temperatura de la unión.

Ta = Temperatura ambiente.

Rjc = Resistencia térmica unión-cápsula.

Rcd = Resistencia térmica cápsula-disipador.

Rda = Resistencia térmica disipador-ambiente.

Como se selecciona al MOSFET IRF640 como actuador, con encapsulado TO-220, del manual del fabricante se obtienen los siguientes parámetros térmicos:

Tj = 150°C

Rja=62,5ºC/W

Rjc = 1°C/W

Rcd = 0,8 °C/W (este valor es obtenido a partir de la tabla de resistencias térmicas en [10] para un encapsulado TO.220 con contacto directo con el disipador sin mica).

Además dado que el sistema trabajará en condiciones con radiación solar alta y que el módulo se encontrará dentro de una caja, asume una temperatura ambiental de 30°C. Se establece que el sistema de caracterización debe soportar un máximo de 100W, el sistema cuenta con dos actuadores (MOSFETs) en paralelo y comparten un solo disipador, cada uno debe disipar el 50% de la potencia total, es decir 50W.

.

En estas condiciones y con los datos presentados se forma el circuito que se presenta a continuación:

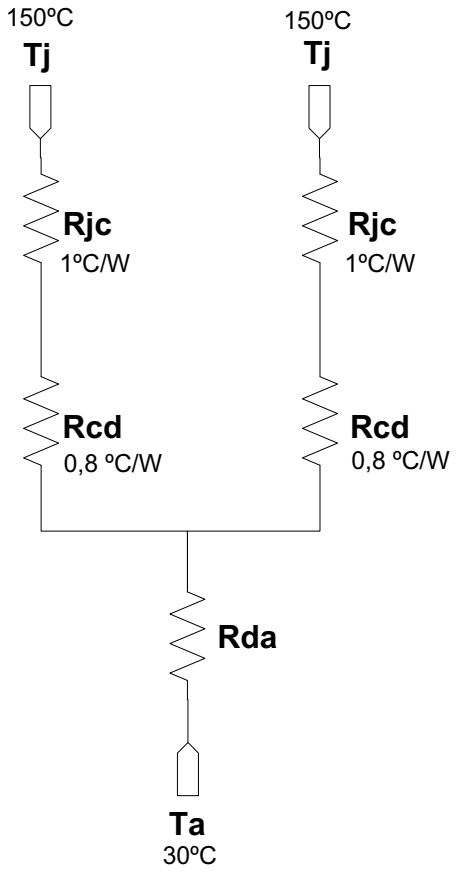


Figura 2. 20: Circuito térmico representado como equivalencia de un eléctrico.

En base a la figura anterior y la Ec.2.3, se tiene:

$$Tj = P\,(Req + Rda) + Ta$$

$$150°C = 100W\,(0{,}9°C/W + Rda) + 30°C$$

De donde $$Rda = 0.3\ °C/W$$

Entonces se debe colocar un disipador de aluminio con valor de Rda = 0.3°C/W.

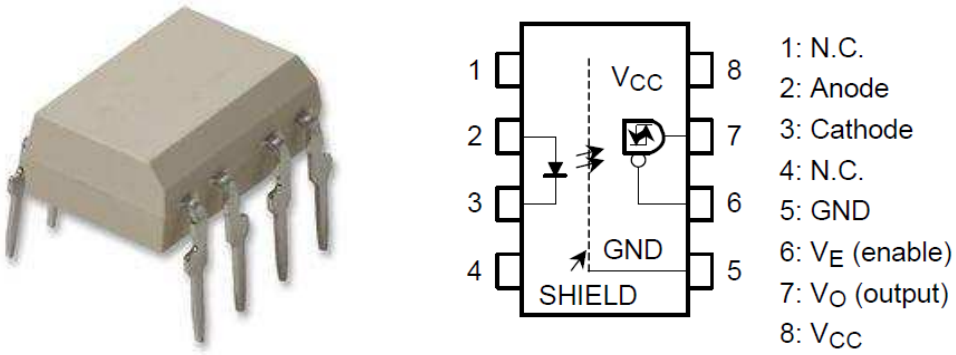
2.1.4.4. Acondicionamiento de la señal PWM del microcontrolador para realizar un control lineal

Para llevar a cabo el control lineal del MOSFET, es necesario el diseño de un conversor digital análogo (D/A), para tener una señal de voltaje constante proporcional a la señal PWM que sale del microcontrolador, esto se logra con un

filtro pasabajos, finalmente para aislar al pin microcontrolador completamente del MOSFET y aumentar el voltaje de disparo se necesita la utilización de un optoacoplador. Se ha optado la utilización del integrado TLP2200 debido a que el PWM que genera el microcontrolador es de 4KHz y este integrado tiene las características que se explican a continuación:

El TLP2200 (figura 2.21 a) es un fotoacoplador, que está especializado en el disparo de MOSFETS (Gate Driver), posee un fotodetector de alta velocidad que le permite trabajar a altas frecuencias. No tiene necesidad de una resistencia de pull-up en su salida a diferencia de los optoacopladores regulares.
Entre las características principales se tiene (para mayor información sobre este integrado consultar el ANEXO D):

- Voltaje de alimentación: 4.5V-20V
- Velocidad de funcionamiento: 2.5MBd garantizados
- Voltaje de aislamiento: 2500Vrms
- Máxima temperatura de óptimo funcionamiento: 85ºC



a) b)

Figura 2. 21: TLP2200: a) Imagen real [27], b) Distribución de pines [46].

Según la figura 2.21 b para el ingreso de los pulsos hacia el TLP2200 se necesita dimensionar la resistencia para el emisor, se especifica que el led debe tener una corriente de 10mA, por lo cual:

$$R_{led} = \frac{5V}{10mA}$$

$$R_{led} = 500\Omega$$

Se escoge $R_{led} = 330\Omega$.

A la salida del TLP2200 se obtiene una señal PWM de 10Vpico aproximadamente y con una frecuencia de 4KHz, por lo cual es necesario el diseño de un filtro con una frecuencia de corte baja para obtener una señal constante de voltaje.
Se escoge una frecuencia de corte (Fc) de 1Hz, y para un filtro pasabajos RC mostrado en la figura 2.15, se tiene la siguiente ecuación:

$$Fc = \frac{1}{2\pi \times R7 \times C5}$$

$$1Hz = \frac{1}{2\pi \times R7 \times C5}$$

Asumiendo C5 = 220uF.

$$R7 = \frac{1}{2\pi \times 1Hz \times 220uF}$$

$$R7 = 796\Omega$$

Se escoge $R7 = 1K\Omega$

Se necesita una resistencia de valor alto a la salida del filtro para evitar el exceso de circulación de corriente hacia los MOSFET, entonces se escoge R8=5,1KΩ.

2.1.5. SISTEMA DE COMUNICACIÓN

El sistema de caracterización cuyo núcleo principal lo constituye el microcontrolador ATMEGA164P, posee comunicación con un computador, de manera de enviar los datos necesarios para visualizar las curvas características y también posee comunicación con un segundo microcontrolador (el ATMEGA16), el cual envía los valores de temperatura del panel y ángulo de posición de la mayor radiación.
Los dos tipos de comunicación se muestran de manera general en el siguiente diagrama de bloques:

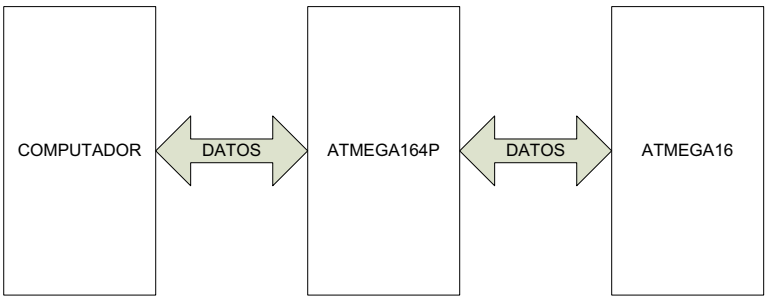


Figura 2. 22: Flujo de datos en las comunicaciones del sistema.

Para realizar la transferencia de datos entre en el computador y el microcontrolador principal se opta por la comunicación serial asincrónica basado en el estándar RS-232-C. A continuación se detallan ciertas características de este tipo de comunicación.

2.1.5.1. Comunicación serial asíncrona [11]

La comunicación realizada con el puerto serial es una comunicación asíncrona. Para la sincronización de una comunicación se precisa siempre de un bit adicional a través del cual el emisor y el receptor intercambian la señal del pulso. Pero en la transmisión serial a través de un cable de dos líneas, esto no es posible, ya que ambas están ocupadas por los datos y la tierra. Por este motivo se intercalan antes y después de los datos de información de estado según el protocolo RS-232. Esta información es determinada por el emisor y el receptor al estructurar la conexión mediante la correspondiente programación de sus puertos seriales.

Esta información puede ser la siguiente:

- **Bit de inicio.-** cuando el receptor detecta el bit de inicio sabe que la transmisión ha comenzado y es a partir de entonces que debe leer la transmisión y entonces debe leer las señales de la línea a distancias concretas de tiempo, en función de la velocidad determinada.
- **Bit de parada.-** indica la finalización de la transmisión de una palabra de datos. El protocolo de transmisión de datos permite 1, 1.5 y 2 bits de parada.

- **Bit de paridad.-** con este bit se pueden descubrir errores en la transmisión.

Se puede dar paridad par o impar. En la paridad par, por ejemplo, la palabra de datos a transmitir se completa con el bit de paridad de manera que el número de bits 1 enviados es par.

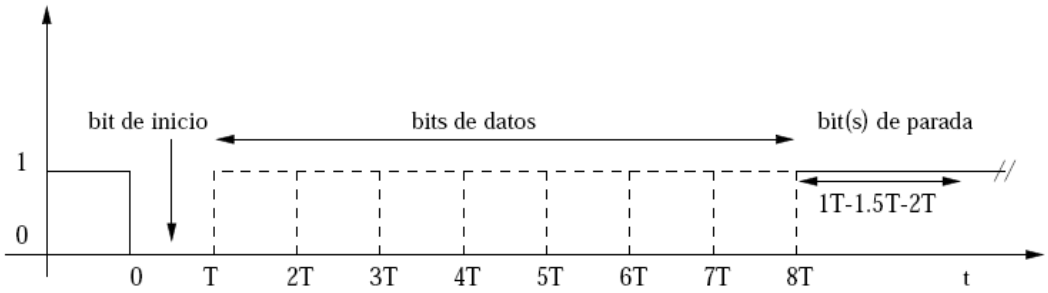


Figura 2. 23: Formato de un caracter en la transmisión asíncrona en serie. [28]

Ante la gran variedad de equipos, sistemas y protocolos que existen surge la necesidad de un acuerdo que permita a los equipos de varios fabricantes comunicarse entre sí. La **EIA (Electronics Industry Association)** elaboró la norma RS-232, la cual define la interface mecánica, los pines, las señales y los protocolos que debe cumplir la comunicación serial.

Todas las normas RS-232 cumplen con los siguientes niveles de voltaje:

- Un “1” lógico es un voltaje comprendido entre –5v y –15v en el transmisor y entre -3v y –25v en el receptor.
- Un “0” lógico es un voltaje comprendido entre +5v y +15 v en el trasmisor y entre +3v y +25 v en el receptor.

Este protocolo normalmente utiliza un conector tipo DB-25 de 25 pines, aunque es normal encontrar la versión de 9 pines DB-9, más barato e incluso más extendido para cierto tipo de periféricos (como el ratón serie del PC). En cualquier caso, los PCs no suelen emplear más de 9 pines en el conector DB-25. Las señales con las que trabaja este puerto serial son digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos, y a la inversa en las señales de control. El estado de reposo en la entrada y salida de datos es -12V. Dependiendo de la

velocidad de transmisión empleada, es posible tener cables de hasta 15 metros. Cada pin puede ser de entrada o de salida, teniendo una función específica cada uno de ellos. Las más importantes se observan en la siguiente tabla:

#	Pin	E/S	Función	Conector DB9
1			Tierra de Chasis	
2	RXD	E	Recibir datos	
3	TXD	S	Transmitir datos	
4	DTR	S	Terminal de datos Listo	
5	GND		Tierra de señal	
6	DSR	E	Equipo de Datos listo	
7	RTS	S	Solicitud de envío	
8	CTS	E	Libre para envío	
9	RI	S	Timbre telefónico	

Figura 2. 24: conectores DB9 hembra y macho respectivamente. [29]

Tabla 2. 3: Distribución de Pines del conector DB9. [29]

Las señales TXD, DTR y RTS son de salida, mientras que RXD, DSR, CTS son de entrada. La tierra de referencia para todas las señales es SG (Tierra de Señal). Finalmente, existen otras señales como RI (Timbre Telefónico).

La velocidad a la que se envían datos en forma serial a través de una línea de comunicación, se denomina velocidad en baudios. La velocidad de baudios es expresada en unidades de bits por segundo. Una conexión RS-232 con velocidad de 1200 baudios tiene la capacidad de enviar 1200 bits de datos en 1 segundo.

El RS-232 puede transmitir los datos en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, a unas velocidades determinadas (normalmente, 9600 bits por segundo o más). Después de la transmisión de los datos, le sigue un bit opcional de paridad (indica si el número de bits transmitidos es par o impar, para detectar fallos), y después 1 o 2 bits de Stop. Normalmente, el protocolo utilizado es 8N1 (que significa, 8 bits de datos, sin paridad y con 1 bit de Stop).

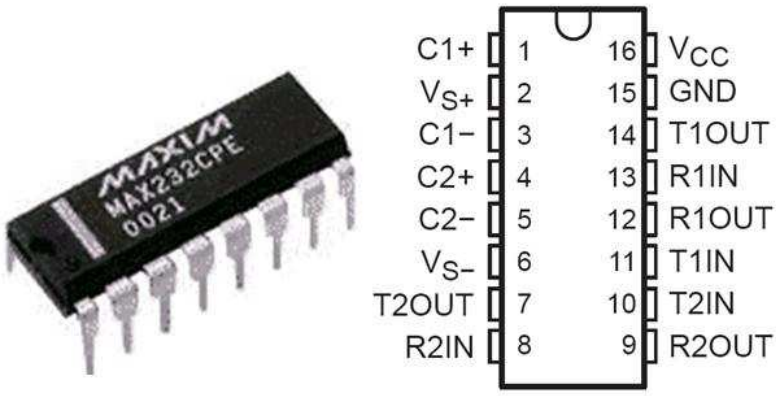
Una vez que ha comenzado la transmisión de un dato, los bits tienen que llegar uno detrás de otro a una velocidad constante y en determinados instantes de tiempo, por eso se dice que el RS-232 es asíncrono. Los pines que portan los

datos son RXD y TXD. Las demás se encargan de otros trabajos: DTR indica que el ordenador esta encendido, DSR que el aparato conectado a dicho puerto está encendido, RTS que el ordenador puede recibir datos (porque no está ocupado), CTS que el aparato conectado puede recibir datos, y DCD detecta que existe una comunicación, presencia de datos.

Tanto el aparato a conectar como el ordenador (o el programa terminal) tienen que usar el mismo protocolo serial para comunicarse entre sí. Puesto que el estándar RS-232 no permite indicar en qué modo se está trabajando, es el usuario quien tiene que decidirlo y configurar ambas partes.

El circuito integrado MAX232 lleva internamente 2 conversores de nivel de TTL a RS-232 y otros 2 de RS-232 a TTL con lo que en total se pueden manejar 4 señales del puerto serie del PC.

Por lo general las más usadas son; TXD, RXD, RTS y CTS. Para que el MAX232 funcione correctamente se debe poner unos condensadores externos. En los circuitos que emplean el MAX232 todos los condensadores deben ser de 1 microfaradio, para llegar hasta 120 Kbps o de 100 nano faradios para llegar hasta 64 Kbps. La siguiente figura muestra la función de cada uno de los pines de este circuito integrado:



a) b)

Figura 2. 25: MAX 232: a) imagen real, b) distribución de pines. [30]

Estas son las principales características de este circuito integrado:

- Alimentación de 4,5v a 5,5v.
- Consumo: 4mA (15mA con carga a la salida de 3KΩ).

- Entradas compatibles TTL y CMOS.
- Tensión de entrada máxima RS232: +/- 30v.
- Tensión de Salida RS232: +/- 15v.
- La tensión de salida típica es de +/-8v con carga nominal de 5KΩ en RS-232.
- Resistencia entrada RS232: 5KΩ (a tierra).
- Resistencia entrada TTL/CMOS: 400KΩ (a positivo).
- Las entradas se pueden dejar al aire.

2.1.5.2. Comunicación con el computador

Es una comunicación serial asíncrona con estándar RS232, está configurada a 38400 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin paridad.
El circuito utilizado se muestra en la siguiente figura:

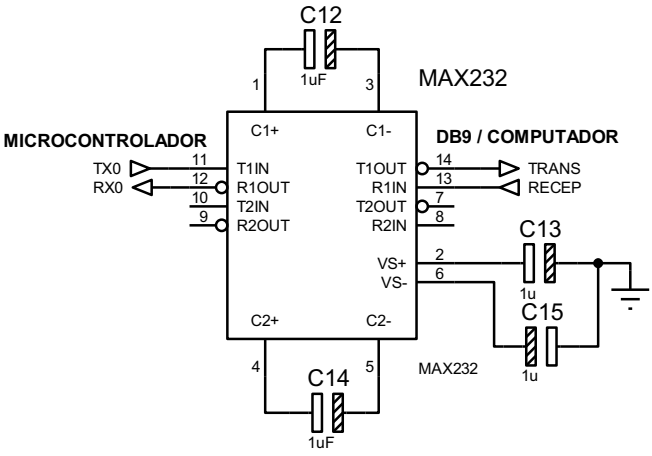


Figura 2. 26: Circuito del MAX-232 para comunicación con el computador.

Esta función está encargada de enviar por comunicación serial un paquete de datos que es utilizado por una HMI para visualizar o monitorear los valores en tiempo real del ángulo de incidencia de la luz solar, y para la visualización de las curvas I-V del panel solar.
Para enviar los datos hacia la PC y para que puedan ser interpretados por el HMI se establece un formato para empaquetar los datos, de esta manera se asegura que el dato no sufra alteraciones por ruido además que permite enviarlos en solo paquete.

El formato escogido es de la forma:

VS *valor de voltaje* ***I*** *valor de corriente* ***T*** *valor de temperatura* ***AZ*** *valor ángulo de acimut* ***ELV*** *valor ángulo de acimut* ***F***

Hay que recordar que tanto el ángulo de acimut como el ángulo de altura sirven para identificar al ángulo de incidencia de la luz solar.

Por ejemplo cuando se tiene una celda de 18,2 voltios, con corriente de 1,56 amperios a una temperatura de 25,6 grados centígrados y con un ángulo de incidencia de 120 grados en acimut y 60 grados de elevación el paquete enviado sería:

V*18.20****I****1.56****T****25.6****AZ****120.00****ELV****60.00****F***

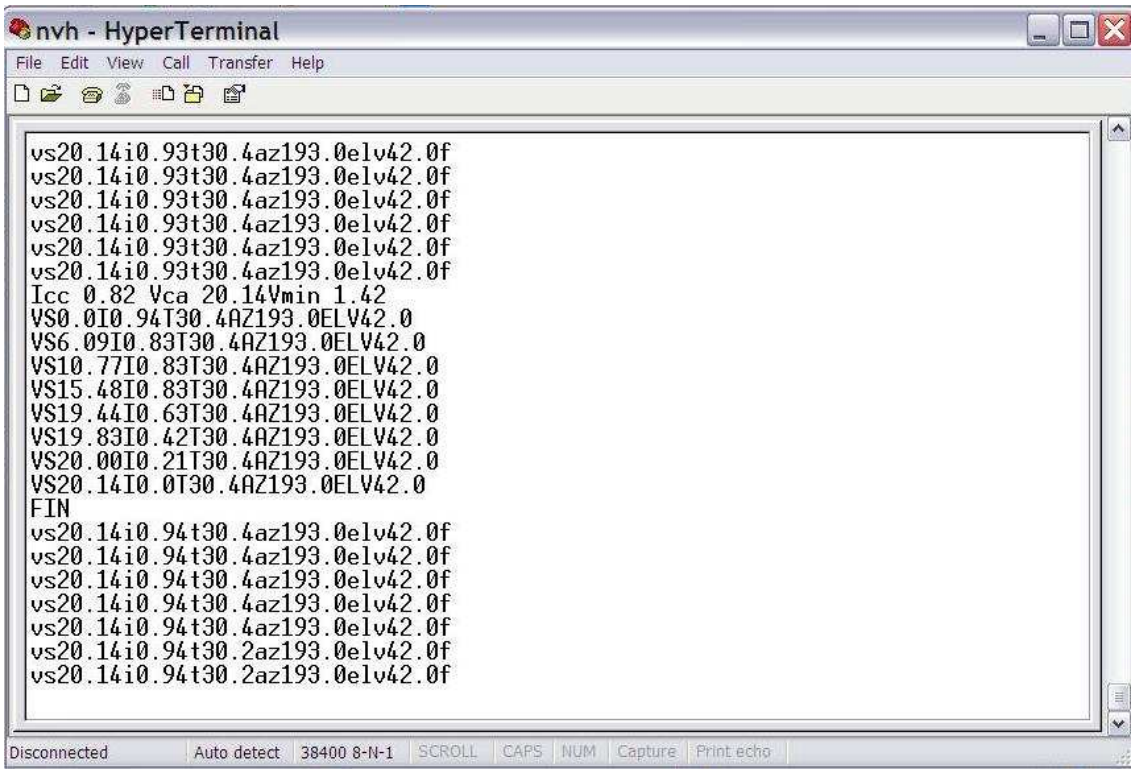


Figura 2. 27: Formato de los paquetes de datos enviados desde el ATMEGA 164 hacia el computador vistos en el HyperTerminal.

Este formato permite una fácil interpretación o decodificación para el HMI a la vez que es una buena forma de proteger a los datos del ruido, ya que en el peor de

los casos cuando se altera el dato, éste llega de la forma:

&%? >ª<?--V18.20I1.56T25.6AZ120.00ELV60.00F&%?$"#

Esta función se puede llevar a cabo de manera sencilla mediante el uso de la función **"PRINT"** del paquete BASCOM-AVR. Para enviar los datos hacia la PC se usa el primer puerto de comunicaciones del microcontrolador ATmega164, es decir, RX0 y TX0.

Otra función importante es recibir la orden de inicio para el proceso de caracterización de paneles fotovoltaicos junto con el número de puntos (N) que deberá contener dicha curva característica. Esta función se desarrolla a través de una subrutina de interrupción por recepción de dato serial a través de RX0. De la misma manera esta función es desarrollada gracias a la utilización de la función "**INPUTBIN"** del paquete BASCOM-AVR.

2.1.5.3. Comunicación con el microcontrolador ATMEGA16

Para la comunicación entre microcontroladores se opta por la comunicación serial asíncrona, configurada a 38400 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin paridad. Para esta comunicación se utiliza el segundo puerto de comunicaciones del microcontrolador principal ATMEGA164P y tiene una característica especial ya que los dos microcontroladores se encuentran separados una distancia relativamente grande (cable de aproximadamente de 5 metros), por esta razón se utilizan 2 integrados MAX232, uno en el seguidor solar y otro en el caracterizador con la configuración mostrada en la figura 2.28. Esta configuración permite elevar el voltaje de nivel TTL (5V) a nivel RS232 (12V), lo cual permite tener comunicaciones de mayor distancia (generalmente hasta 15m) sin pérdida de datos.

Esta comunicación se la realiza mediante una subrutina de interrupción por recepción de dato serial (URXC1), a través del segundo puerto de comunicaciones del microcontrolador ATMEGA164, en la que se recibe un paquete datos provenientes del microcontrolador ATMEGA16, el cual contiene los valores de temperatura y ángulo de incidencia de la luz solar, dichos valores

sirven de referencia para dar a conocer las condiciones bajo las cuales se realiza la caracterización de un panel fotovoltaico.

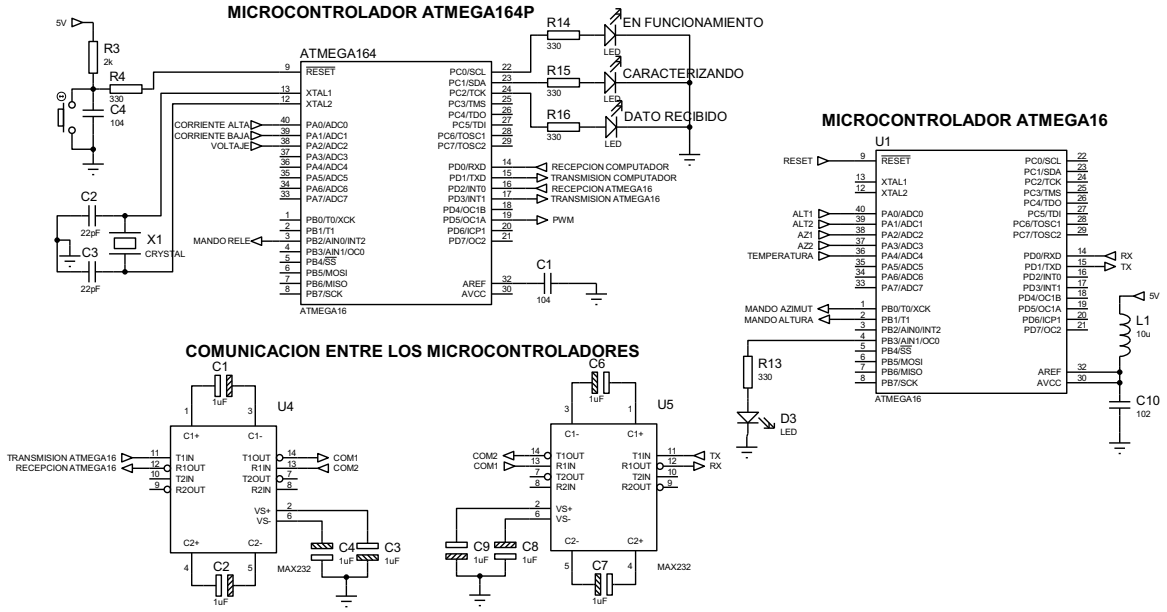


Figura 2. 28: Esquemático del circuito utilizado para comunicar los dos microcontroladores.

El paquete enviado por el microcontrolador secundario tiene el siguiente formato:

X *valor de temperatura* ***X*** *valor de ángulo en acimut* ***X*** *valor de ángulo de elevación* ***X***

Así por ejemplo para una temperatura de 25.6º centígrados y con un ángulo de incidencia de 120º en acimut y 60º de elevación el paquete enviado por el microcontrolador secundario sería:

X*25.60****X****120.00****X****60.00****X***

Para la recepción del dato se hace mediante una subrutina de interrupción y el uso de la función “INPUT” y para la decodificación, o separación en variables individuales, se usa la función “SPLIT” del paquete BASCOM-AVR.

Estos datos posteriormente se añaden a los de voltaje y corriente para formar un nuevo paquete el cual se envía hacia la PC a través del primer puerto de comunicaciones.

2.1.6. PROGRAMA DE CONTROL

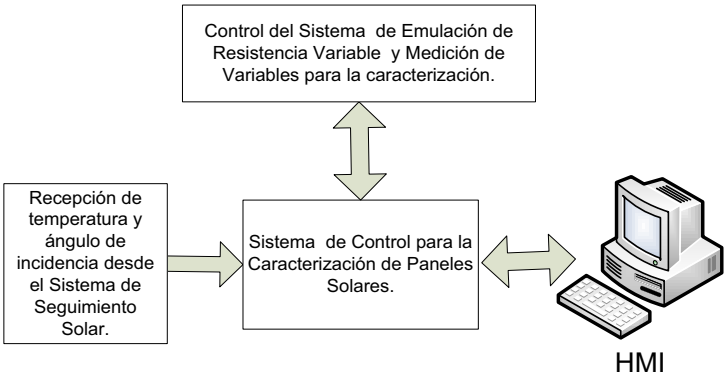


Figura 2. 29: Diagrama estructural del sistema de control.

El programa de control es el encargado de llevar a cabo las funciones de emulación de resistencia variable, comunicaciones, y adquisición de datos, junto con el hardware diseñado y de esta manera realizar la caracterización de módulos fotovoltaicos.

2.1.6.1. Método de Control

El objetivo principal del sistema es obtener curvas características con los puntos que se elijan y que estos puntos sean equidistantes entre sí, para ello se cuenta con un sistema que emula una resistencia variable y permite variar la corriente desde cero hasta el valor máximo que pueda entregar el panel solar, por lo tanto la función del controlador es generar la señal de control adecuada para que el actuador de dicho sistema genere los puntos deseados.

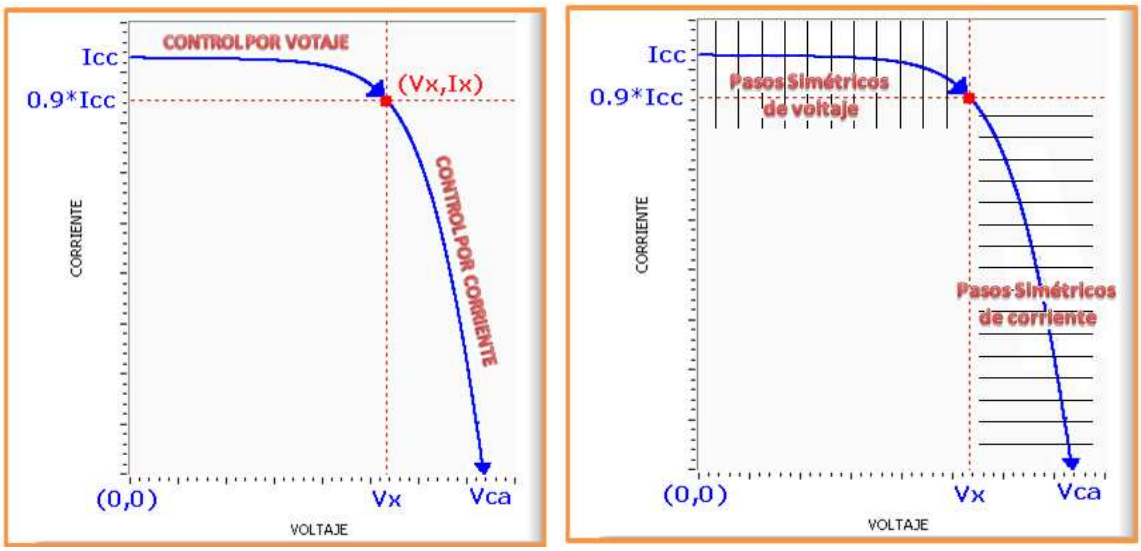
El actuador esta controlado por una señal PWM filtrada para obtener un voltaje DC variable a la salida del filtro, esta variación de voltaje DC, de acuerdo a la variación de la relación de trabajo de la señal PWM, permite controlar la apertura del interruptor electrónico. Esta señal es la encargada de llevar al actuador desde la zona de corte (circuito abierto, con corriente cero y voltaje máximo) hasta la zona de saturación (cortocircuito, con corriente máxima y voltaje cero), a través de la variación de la relación de trabajo de dicha señal PWM.

En la curva característica de un panel fotovoltaico, se observan zonas bien

definidas. En un extremo se tiene una gran variación de voltaje con pequeña variación de corriente y de igual manera, al otro extremo se tiene una gran variación de corriente con pequeña variación de voltaje.

Esta característica particular de la curva I-V es la base para el método de control empleado, que consiste en la implementación de dos controladores digitales tipo proporcional-integral (controlador PI), que se encargan de obtener valores definidos tanto de voltaje como de corriente.

Entonces, para trazar la curva característica corriente-voltaje (I-V), de tal manera que se tenga una distribución de puntos medidos lo más equidistante posible, es necesario establecer dos etapas de control básica: la primera en la que los puntos se obtienen con un control de voltaje y la segunda donde los puntos se obtienen por un control de corriente, como se muestra en la siguiente figura:



a) b)

Figura 2. 30: Método de control para la obtención de la curva I-V.

Para llevar a cabo este proceso de control se debe cumplir con 3 etapas, que se realizan en orden secuencial, para obtener las N mediciones necesarias para armar el conjunto de datos:

- Control de voltaje
- Punto anterior de voltaje
- Control de corriente

Debido a la necesidad de implementar un controlador proporcional integral en un microcontrolador, se necesita determinar una ecuación en diferencias mediante la discretización de la ecuación de control análogo.

La ecuación en diferencias para un controlador PID es la siguiente [5]:

$$\boldsymbol{u(k) = b0 \times e(k) + b1 \times e(k-1) + b2 \times e(k-2) + u(k-1)}$$

Ec.2. 4

Donde:

$$\boldsymbol{b0 = kp + \frac{kd}{T} + \frac{ki \times T}{2}}$$

Ec.2. 5

$$\boldsymbol{b1 = -kp - \frac{2 \times kd}{T} + \frac{ki \times T}{2}}$$

Ec.2. 6

$$\boldsymbol{b2 = \frac{kd}{T}}$$

Ec.2. 7

Siendo:

u(k) = Salida de controlador.
e(k) = Error.
e(k-1) = Error anterior.
e(k-2) = Error ante-anterior.
u(k-1) = Salida anterior del controlador.
kp = Constante proporcional.
ki = Constante integral.
kd = Constante derivativa.
T = Período de muestreo.

Para encontrar la ecuación en diferencias de un controlador PI, se elimina la función derivativa (kd=0), por lo tanto:

$$\boldsymbol{b0 = kp + \frac{ki \times T}{2}}$$

Ec.2. 8

$$\boldsymbol{b1 = -kp + \frac{ki \times T}{2}}$$

Ec.2. 9

$$\boldsymbol{b2 = 0}$$

Y finalmente la ecuación en diferencias para un controlador PI es:

$$\boldsymbol{u(k) = b0 \times e(k) + b1 \times e(k-1) + u(k-1)}$$

Ec.2. 10

Esta ecuación será la que rija el sistema de control en cada una de las etapas de medición.

2.1.6.1.1. Control de voltaje

Esta etapa inicia con voltaje cero y corriente de cortocircuito (interruptor completamente saturado). Se trata de ir subiendo el voltaje de acuerdo a pasos simétricos establecidos. Para ello se usa un primer controlador PI que se encarga de obtener en la salida del panel fotovoltaico el valor de voltaje deseado.

El proceso del controlador inicia mediante la medición del valor de voltaje (Vm) a través del conversor A/D, luego se compara con el valor deseado (SP_V) y se obtiene el error (error_vm); a partir de este error, el error anterior y la salida anterior, el controlador PI calcula la salida adecuada para el actuador y así alcanzar un voltaje que entregue un error de 0,1 Voltios con respecto al valor deseado de voltaje, en ese instante se mide la corriente y ambos datos son almacenados en memoria.

Esta operación se la realiza un número de veces igual a la mitad de N para que así en el conjunto global de N datos obtenidos se tenga la mitad controlados por voltaje y la otra mitad controlados por corriente.

Para obtener los valores deseados de voltaje se establece una función lineal entre el voltaje y el n-ésimo punto del total de mediciones a realizarse; considerando que se deben tener la mitad de puntos obtenidos por pasos de voltaje y la otra mitad por pasos de corriente (figura 2.31).

Vmín es el voltaje mínimo que aparece en los terminales del actuador cuando éste se encuentra saturado, en condiciones ideales este voltaje es igual a cero; mientras que j es el n-ésimo punto del total de mediciones y varía desde 1 hasta N', que es la mitad de N.

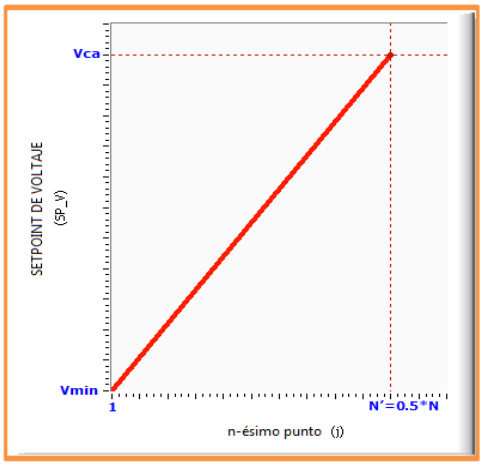


Figura 2.31: Valores de voltaje establecidos en función del número de mediciones (N).

De la figura anterior se deduce la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{SP_V\ (j) = \frac{V_{ca} - V_{min}}{N^{'} - 1} * (j - 1) + V_{min}}$$

Ec.2. 11

Esta ecuación es ingresada al microcontrolador para establecer cada uno de los valores deseados de voltaje (set-point) correspondientes al n-ésimo punto del total de N puntos que formarán parte de la curva característica corriente-voltaje (I-V).

Para este sistema de control se puede establecer una relación inversa entre la relación de trabajo y el voltaje en la salida del panel, es decir a mayor relación de trabajo menor será el voltaje entregado por el panel, esta relación se asume lineal (figura 2.32) para establecer la ley de control entre la salida del control PI de voltaje y la señal hacia el actuador.

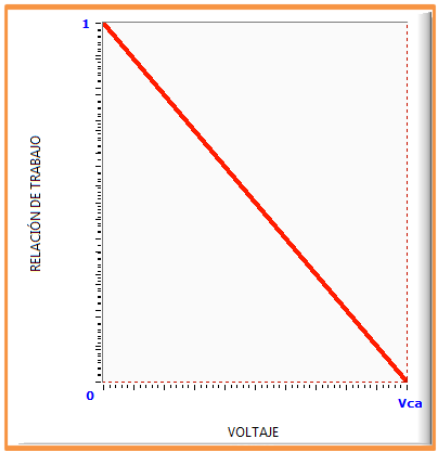


Figura 2.32: Relación asumida para la ley de control del controlador PI de voltaje.

La ley de control que deberá seguir el PI de voltaje tiene la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{\delta_{\mathrm{v}} = 1 - \frac{V}{V_{ca}}}$$

Ec.2. 12

Esta ecuación es ingresada al microcontrolador para calcular la relación de trabajo (δ) adecuada de la señal PWM para alcanzar cada uno de los valores deseados de voltaje (set-point).

2.1.6.1.2. Punto anterior de voltaje

El control por voltaje continúa normalmente, incrementando el voltaje en pasos simétricos y disminuyendo la corriente de manera muy pequeña, cuando el controlador detecta que la corriente ha disminuido hasta alcanzar alrededor del 90% de la corriente de cortocircuito, se inicia la etapa de "punto anterior de voltaje", se elige este punto, ya que a partir de este valor, la corriente cambia de manera significativa con el aumento de la resistencia reflejada y es necesario establecer un control de corriente.

Por lo tanto antes de iniciar el control de corriente, el controlador debe regresar al punto anterior de voltaje y corriente. Esta operación es desarrollada por un segundo controlador PI de voltaje que alcanza dicho punto de voltaje y corriente de manera idéntica que en la etapa anterior. Es necesario regresar al punto anterior de voltaje y corriente, ya que de esta manera se consigue trazar de mejor forma la curva característica, si no se hace se podrían perder los puntos que conforman la parte redondeada de la curva característica, lo cual no es conveniente ya que ahí se ubican los puntos de máxima potencia del panel fotovoltaico, lo cual es prioridad en los análisis de los paneles.

2.1.6.1.3. Control de corriente

Una vez alcanzado un valor de corriente aproximadamente igual al 90% de Icc, se inicia la variación de corriente, es decir, se trata de ir bajando la corriente desde este valor hasta cero.

Se usa un tercer controlador PI que se encarga de obtener en la salida del panel

fotovoltaico valores de corriente preestablecidos, para lo cual el sistema mide el valor de corriente máxima. El valor medido se compara con el valor deseado (SP_I) y se obtiene el error (Error_im); a partir de este error, el error anterior y la salida anterior, el controlador PI calcula la salida adecuada para el actuador y así alcanzar un valor muy cercano al valor deseado de voltaje, en ese instante se mide el voltaje y ambos datos son almacenados en memoria.

Dado que en esta etapa se debe controlar la corriente, desde el valor Ix hasta cero, y considerando que ya se han tomado la mitad de puntos por control de voltaje, se establece que los valores deseados de corriente deben variar desde Ix para el punto correspondiente a N', hasta corriente cero para el punto correspondiente a N; lo cual se indica en la siguiente figura:

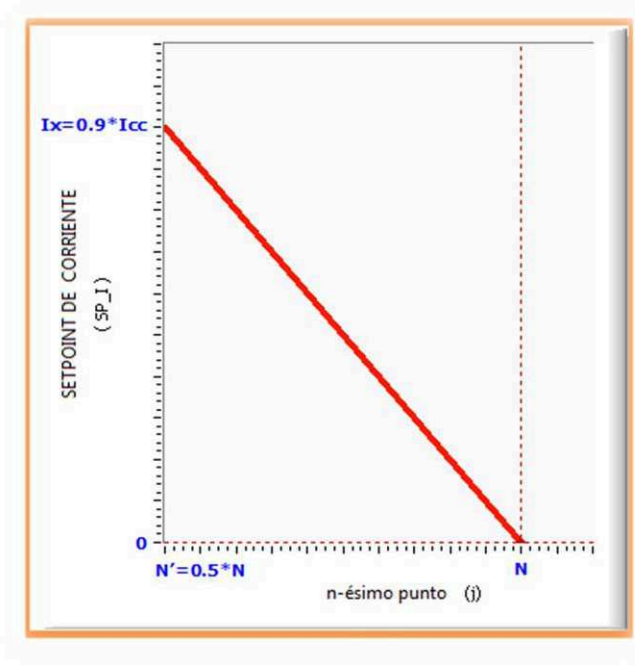


Figura 2.33: Valores de corriente establecidos en función del número de mediciones (N).

De la figura anterior se deduce la siguiente ecuación:

$$SP_I\,(j) = \frac{-I_X}{N - N'} * (j - N') + I_X$$

Ec.2. 13

Esta ecuación es ingresada al microcontrolador para establecer cada uno de los valores deseados de corriente (set-point de corriente) correspondientes al n-ésimo punto del total de N puntos que formarán parte de la curva característica corriente-voltaje (I-V).

Para este sistema de control se puede establecer una relación directa, entre la relación de trabajo y la corriente en la salida del panel, es decir a mayor relación de trabajo mayor será la corriente entregada por el panel, esta relación se asume lineal (figura 2.34) para establecer la ley de control entre la salida del control PI de corriente y la señal hacia el actuador.

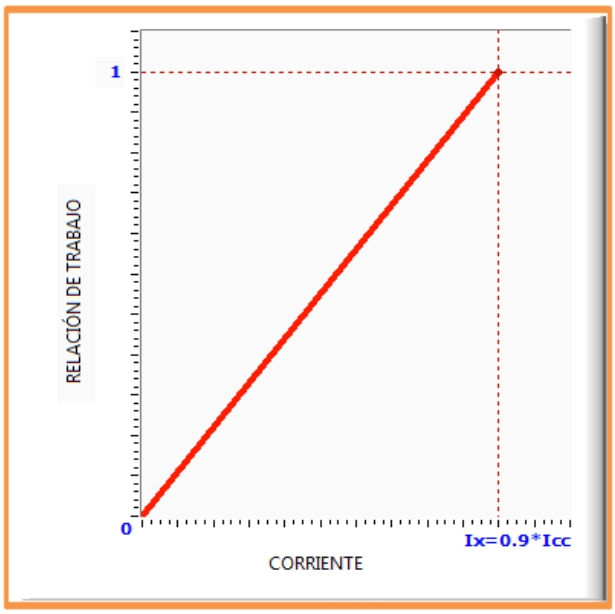


Figura 2.34: Relación asumida para la ley de control del controlador PI de corriente.

La ley de control que deberá seguir el PI de corriente tiene la siguiente ecuación:

$$\delta_{\mathrm{I}} = \frac{I}{I_x}$$

Ec.2. 14

Esta ecuación es ingresada al microcontrolador para calcular la relación de trabajo adecuada para alcanzar cada uno de los valores deseados de corriente (set-point).

Una vez terminadas las mediciones y con el conjunto de datos armado, se procede a recuperar cada pareja de datos (voltaje y corriente), se arma un nuevo paquete de datos añadiendo el valor de temperatura y ángulo de incidencia, y este paquete de datos se envía hacia el computador, este procedimiento se realiza N veces.

2.1.6.2. Resumen del procedimiento empleado en el sistema de caracterización

- Recepción de orden de inicio y número de puntos para la caracterización.
- Medición de voltaje en circuito abierto (Vca), corriente igual a cero.
- Medición de corriente de cortocircuito (Icc), voltaje igual a cero.
- Selección de sensor corriente a utilizarse para las mediciones. Conmutación del relé para corrientes menores a 1.3A (sensor ACS712), caso contrario el relé no conmuta y se usa el sensor ACS715 para corrientes mayores a 1.3A.
- A partir de voltaje igual a cero y corriente de cortocircuito (Icc), se inicia la variación por control de voltaje en pasos simétricos (PRIMER CONTROLADOR PI) establecidos en función del número de mediciones a realizarse (N). Se controla voltaje y se mide corriente en cada punto.
- Continúa la variación por control de voltaje hasta cuando se detecte que la corriente ha bajado más allá del 90% de Icc.
- Una vez detectada esta disminución de corriente se inicia una segunda variación por control de voltaje hasta alcanzar el valor de voltaje anterior junto con la corriente anterior (SEGUNDO CONTROLADOR PI).
- Cuando se ha regresado al punto anterior de voltaje y una corriente aproximadamente igual al 90% de Icc, se inicia una tercera variación por control de corriente (TERCER CONTROLADOR PI) en pasos simétricos establecidos en función del número de mediciones a realizarse (N), con esta etapa se completan las N mediciones solicitadas. Se controla corriente y se mide voltaje en el punto establecido.
- Durante la primera y tercera etapa se van formando dos vectores con los datos válidos de voltaje y corriente, al finalizar las mediciones, este vector debe ser de dimensión igual a N.
- Cuando se terminan las mediciones, se procede a recuperar cada pareja datos de voltaje y corriente, a los cuales se añaden los datos de temperatura y ángulos, para crear un paquete de datos total, el cual es enviado hacia el computador a través del puerto serial del microcontrolador. De la misma manera se envían un número N de paquetes de datos.

2.1.6.3. DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL

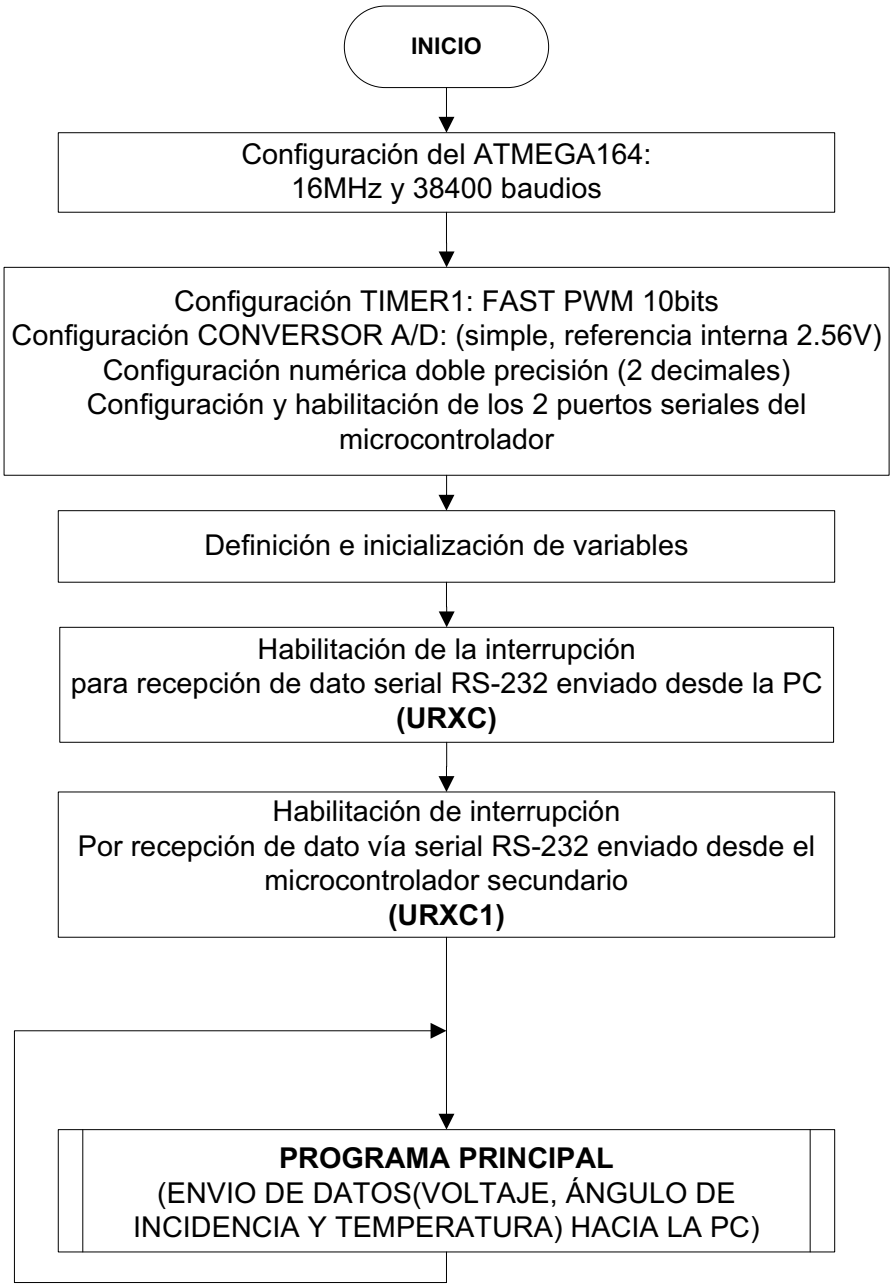


Figura 2.35: Inicialización y Programa Principal.

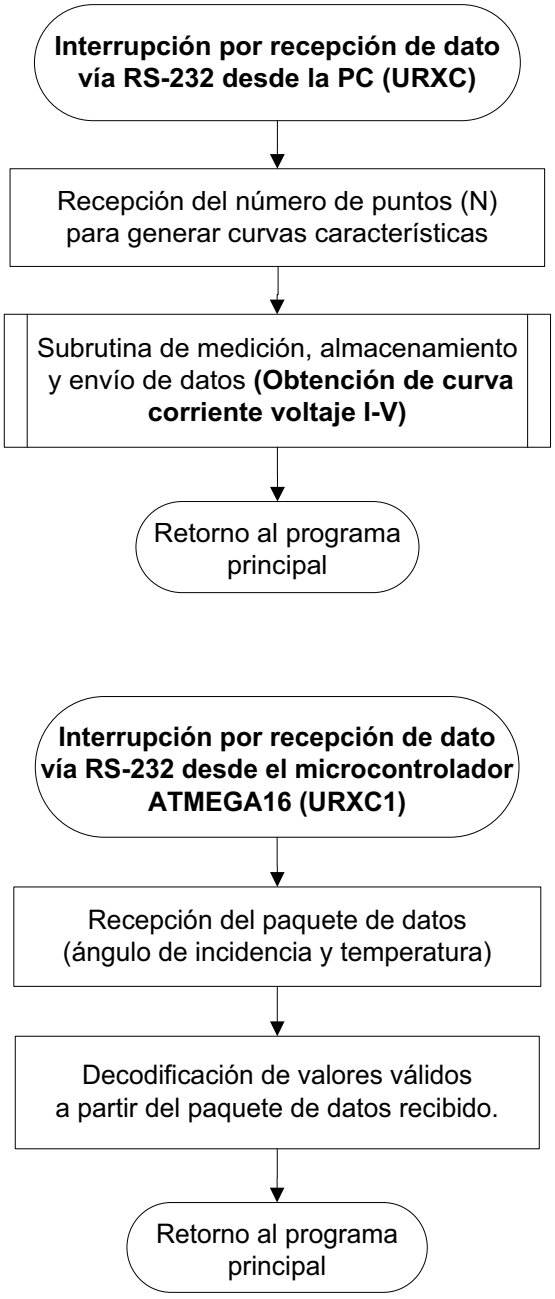


Figura 2.36: Interrupciones por recepción serial.

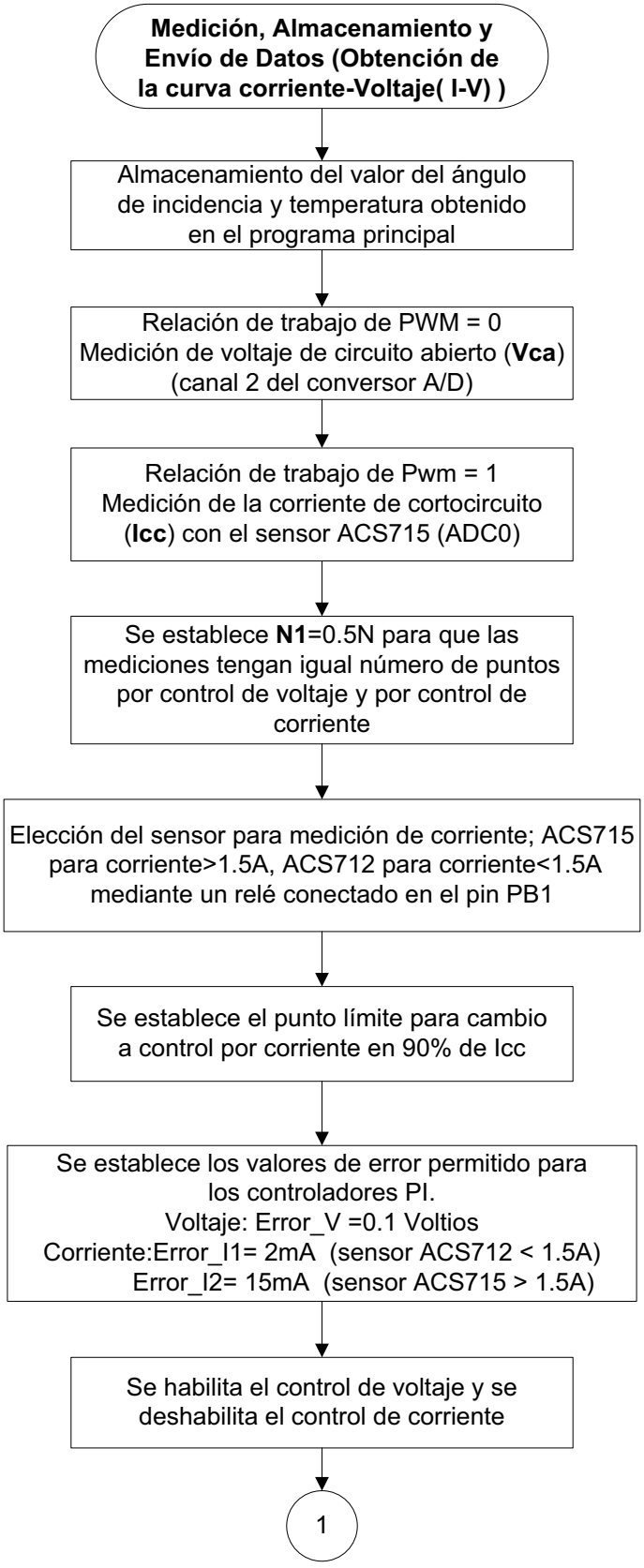


Figura 2.37: Subrutina para obtención de la curva característica (Pasos iniciales).

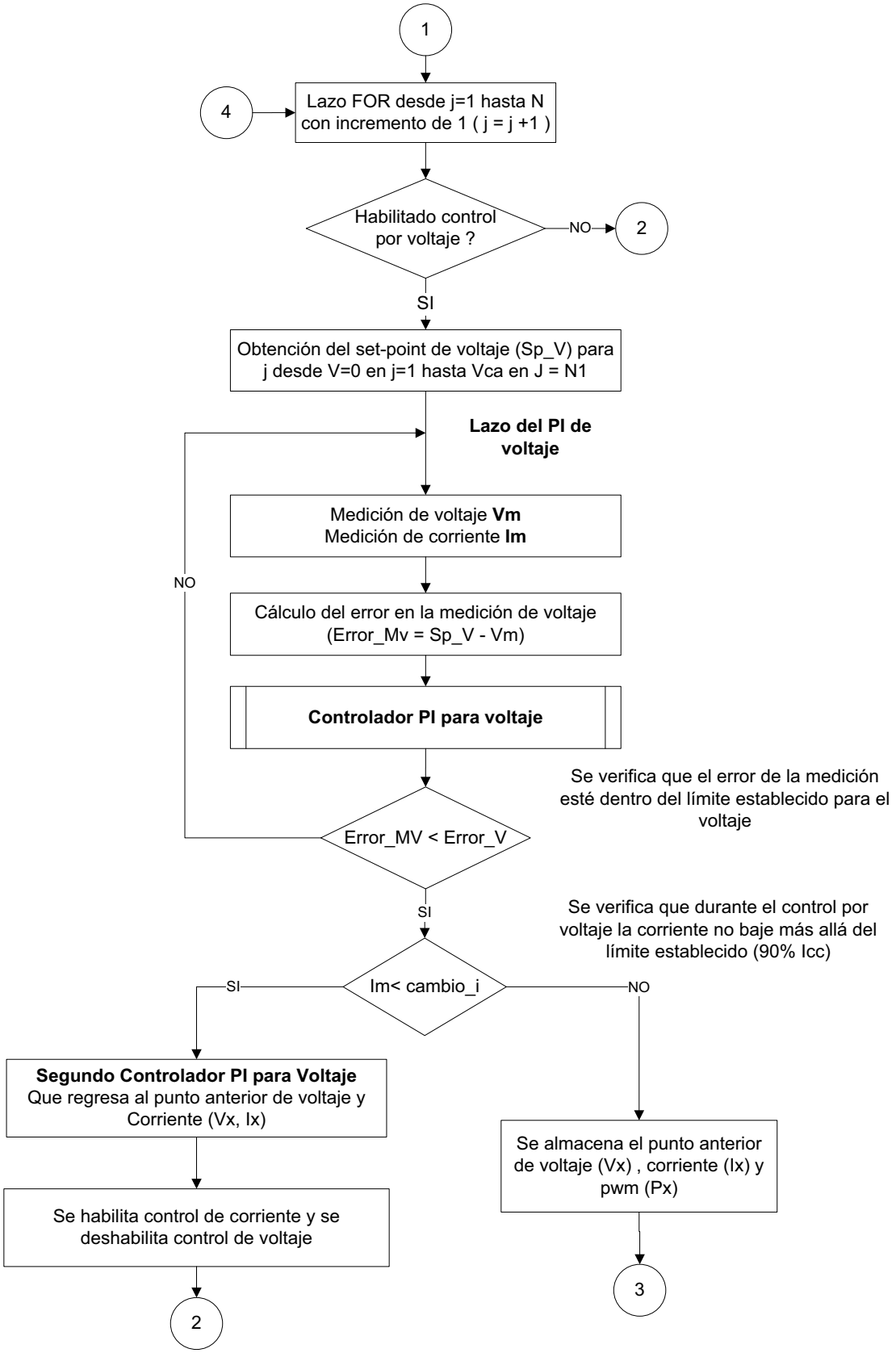


Figura 2.38: Subrutina para obtención de la curva característica (Control por Voltaje).

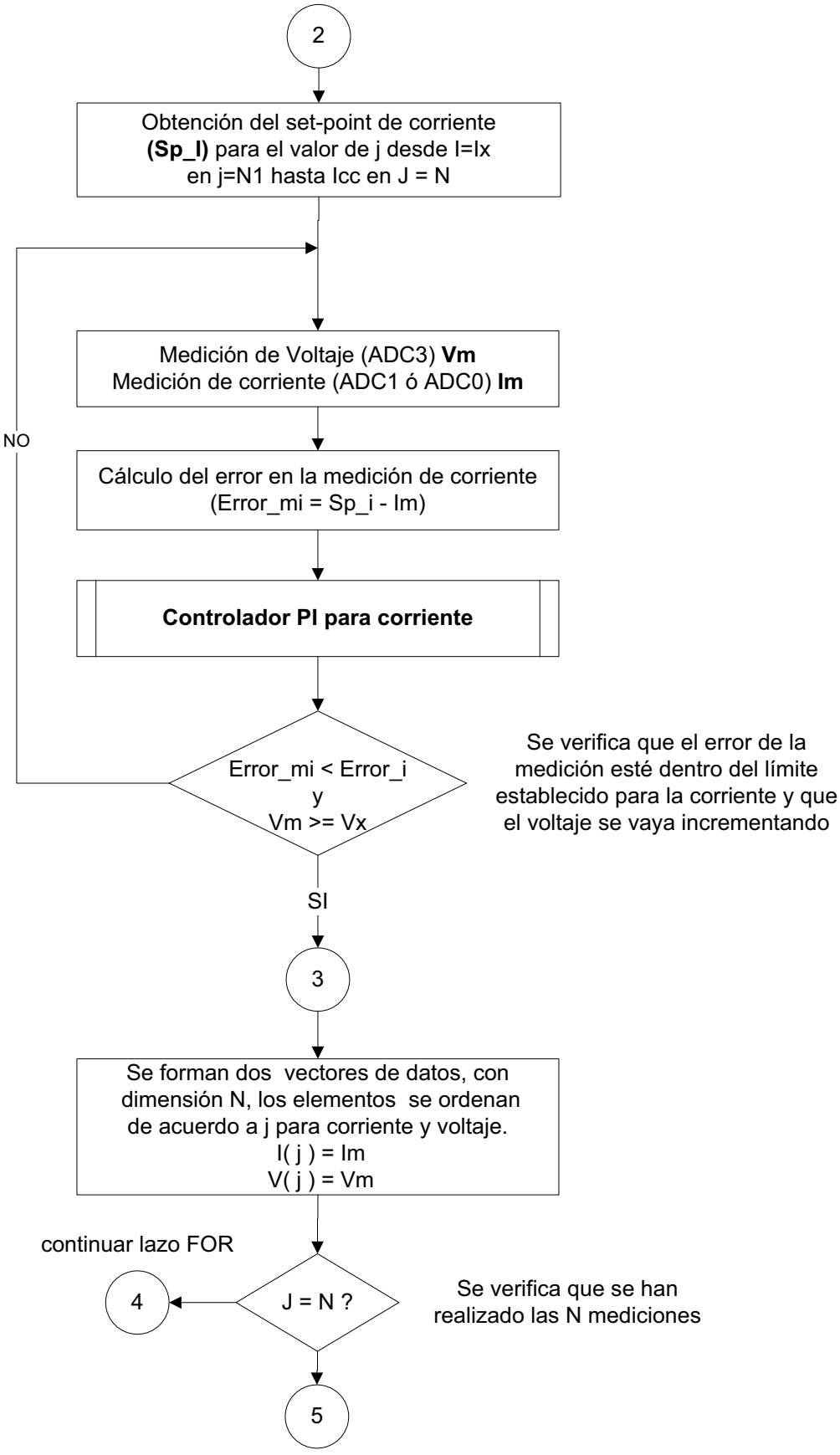


Figura 2.39: Subrutina para obtención de la curva característica (Control por corriente).

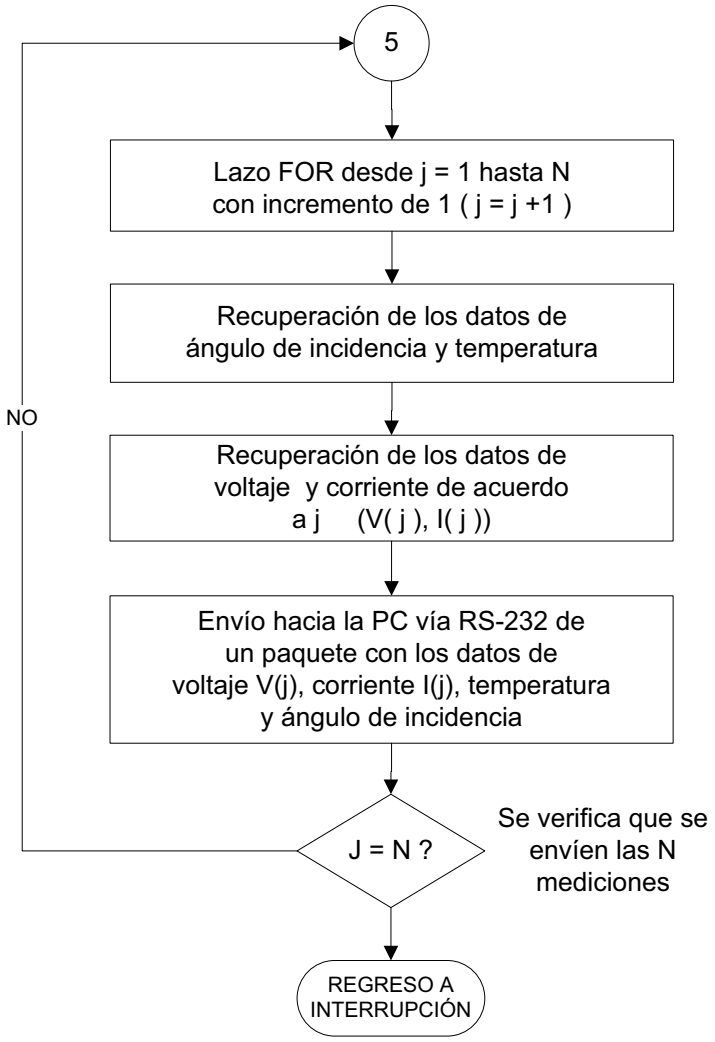


Figura 2.40: Subrutina para obtención de la curva característica (Envío de datos).

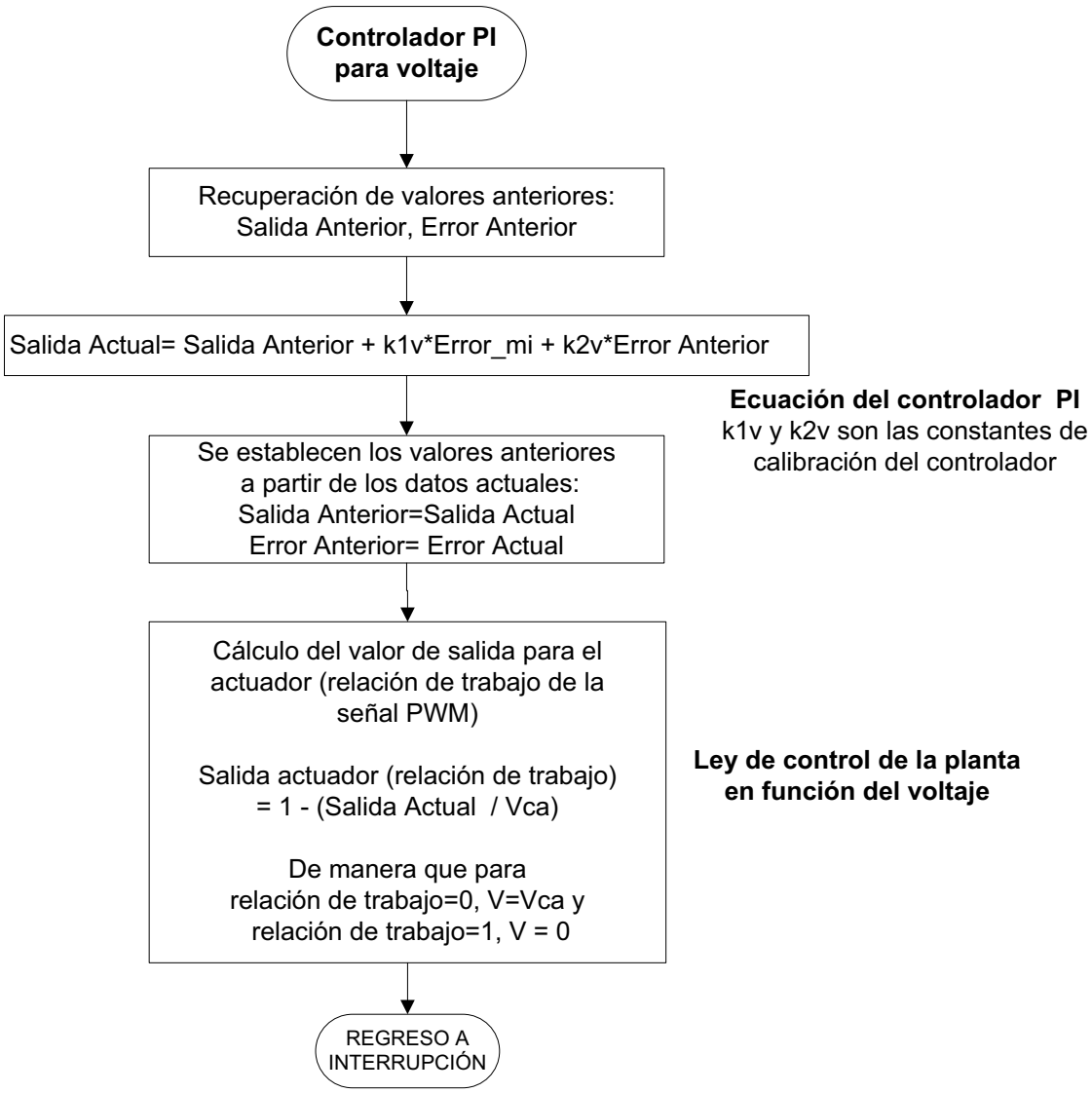


Figura 2.41: Subproceso para el controlador PI de voltaje.

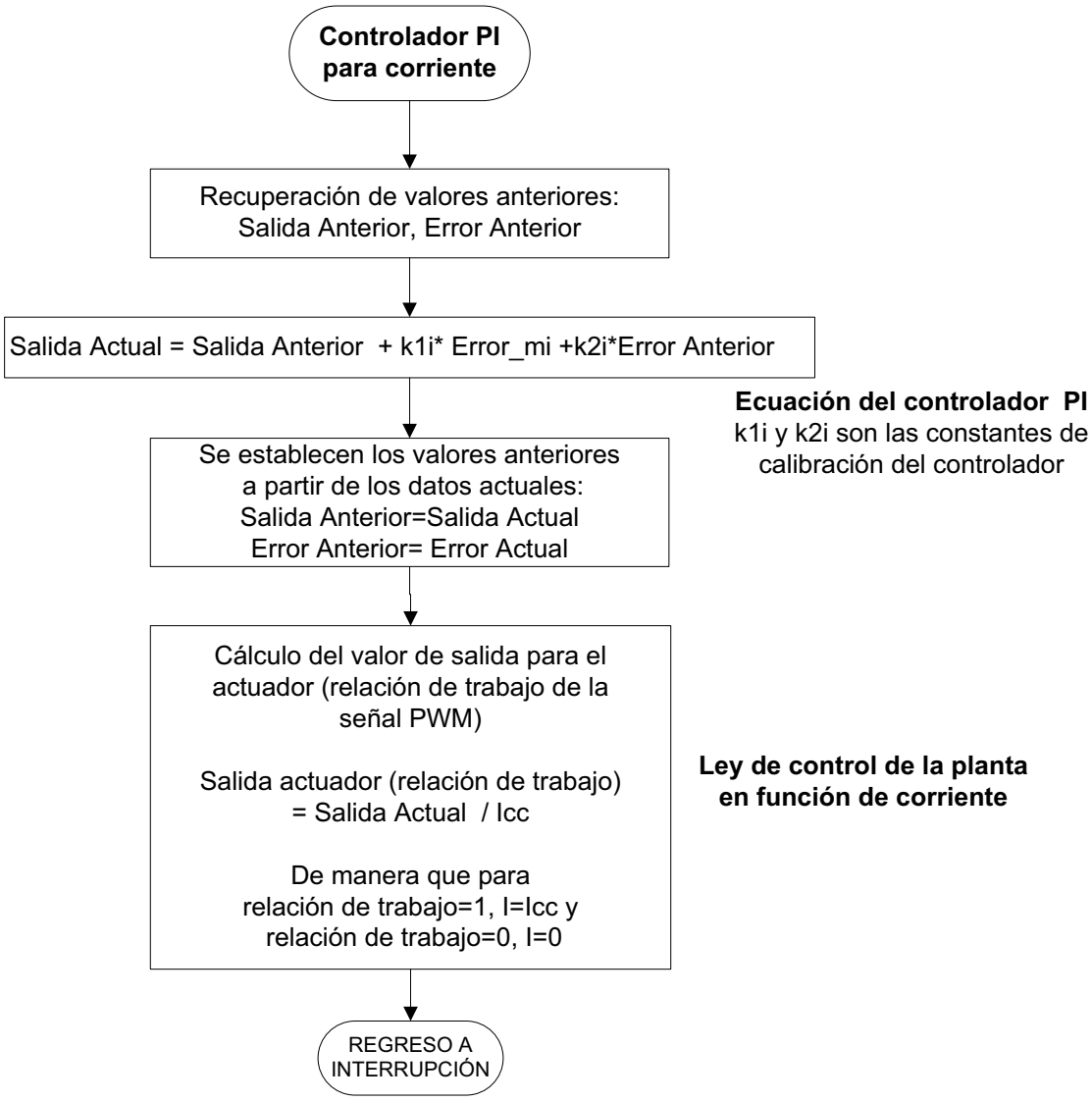


Figura 2.42: Controlador PI de corriente.

2.2. INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)

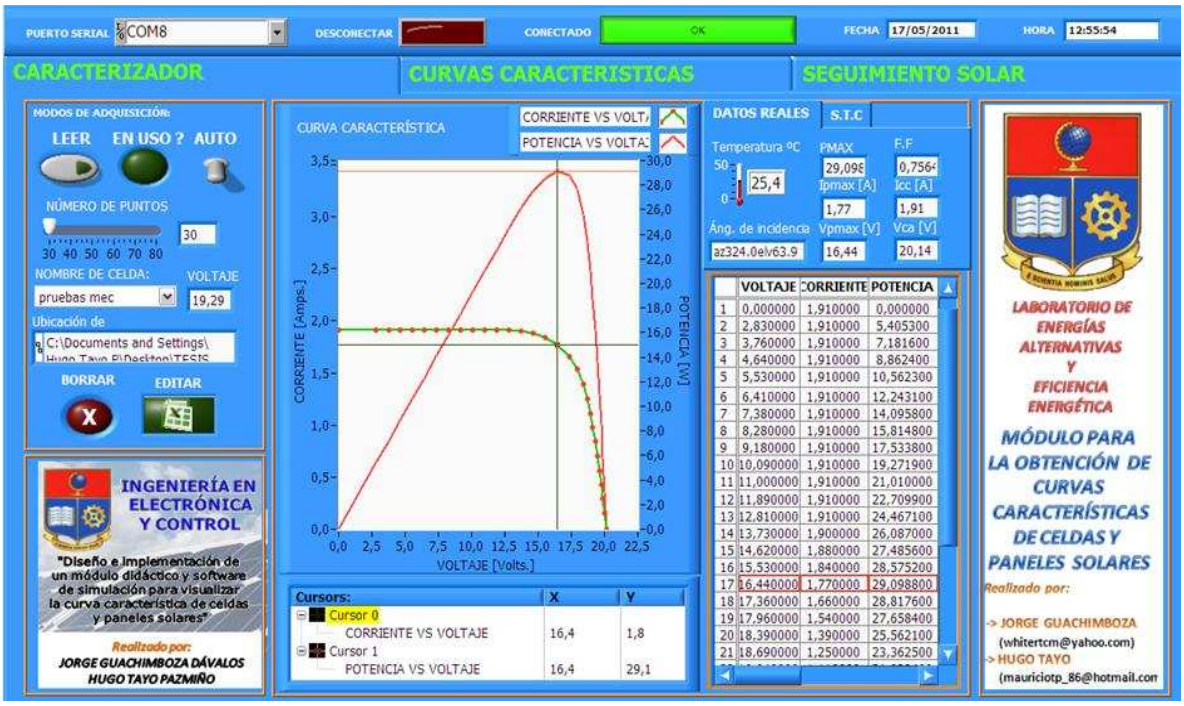


Figura 2.43: Pantalla principal del HMI para el caracterizador de paneles solares.

Para el diseño del Interfaz Hombre-Máquina (HMI) se tiene como objetivo tener un software que permita visualizar, almacenar y simular las curvas características de los módulos fotovoltaicos probados.

Sobre esta base, se diseña la interfaz en el entorno LABVIEW 8.6 cuya pantalla principal se muestra en la figura 2.43.

La pantalla principal de la interfaz consta de las siguientes partes:

- Una ventana destinada a la caracterización del módulo fotovoltaico conectado, donde se realiza la adquisición y visualización de curvas características, sea de modo manual o automático.
- Una segunda ventana destinada al acceso a la base de datos de curvas características de todos los paneles probados, con estos datos se puede comparar las curvas de un panel a distintas condiciones ambientales para observar su comportamiento, y también comparar dos paneles distintos.
- Una subventana permite la simulación del panel que se elija, para observar

el comportamiento que tendría en función de la variación de los parámetros de construcción (Rs y Rp) o los parámetros ambientales (temperatura y radiación global incidente).

- Finalmente posee una subventana que calcula los parámetros del panel solar a condiciones estándar de prueba (STC), estos datos son importantes para comprobar la calidad del panel al comparar estos valores con los datos de placa del mismo.

2.2.1. VENTANA PARA CARACTERIZACIÓN

Esta ventana que se muestra en la figura 2.43, consta básicamente de tres partes: una para el control de la comunicación, una de control para la caracterización y otra de visualización de resultados.

2.2.1.1. Parámetros de control para de la comunicación serial

Esta es una sección con forma de barra (figura 2.44), donde se puede seleccionar el nombre del puerto serial con el que se llevará a cabo la comunicación, además hay indicadores visuales que informan el estado de la comunicación (conectado/desconectado) y parámetros adicionales como la fecha y la hora.

Figura 2. 44: Barra de control para de la comunicación serial.

2.2.1.2. Parámetros de control para la caracterización

Esta sección mostrada en la figura 2.45 contiene las opciones para el sistema de control realice la caracterización. Estos controles son:

LEER: Envía la orden para realizar la caracterización y la adquisición de datos para la posterior visualización de la curva característica del panel conectado. Los datos de la lectura son almacenados en un archivo de texto, nombrado de acuerdo a la fecha y hora de lectura.

Figura 2. 45: Parámetros de control para la caracterización.

AUTO: Habilita la configuración de los parámetros para que el sistema adquiera automáticamente datos de voltaje y corriente, trace la curva característica y almacene los datos de cada panel solar probado en un archivo de texto, nombrado de acuerdo a la fecha y hora de lectura, de acuerdo al intervalo de tiempo configurado y las horas de inicio y final configurados para esta adquisición.

NÚMERO DE PUNTOS: Indica al sistema de caracterización la cantidad de mediciones (N) que se deben realizar para trazar una curva que tendrá la misma cantidad de puntos.

NOMBRE DE CELDA: Indica el nombre con que se identifica al panel procesado.

BORRAR: Borra el archivo de texto generado en la última caracterización.

EDITAR: Abre el archivo de texto y permite editar los datos con Microsoft Excel.

2.2.1.3. Visualización de resultados

Esta sección que se muestra en la figura 2.46 visualiza los resultados de la adquisición realizada consta principalmente de:

- La gráfica con las curvas características (P-V e I-V).
- Los parámetros principales del panel solar probado (Vca, Icc, Pmax, FF).
- Los valores de las condiciones bajo las que se lleva a cabo la medición (temperatura y ángulo de incidencia de la radiación).
- Una tabla en la que se muestran todas las mediciones que se han tomado para trazar la curva característica.

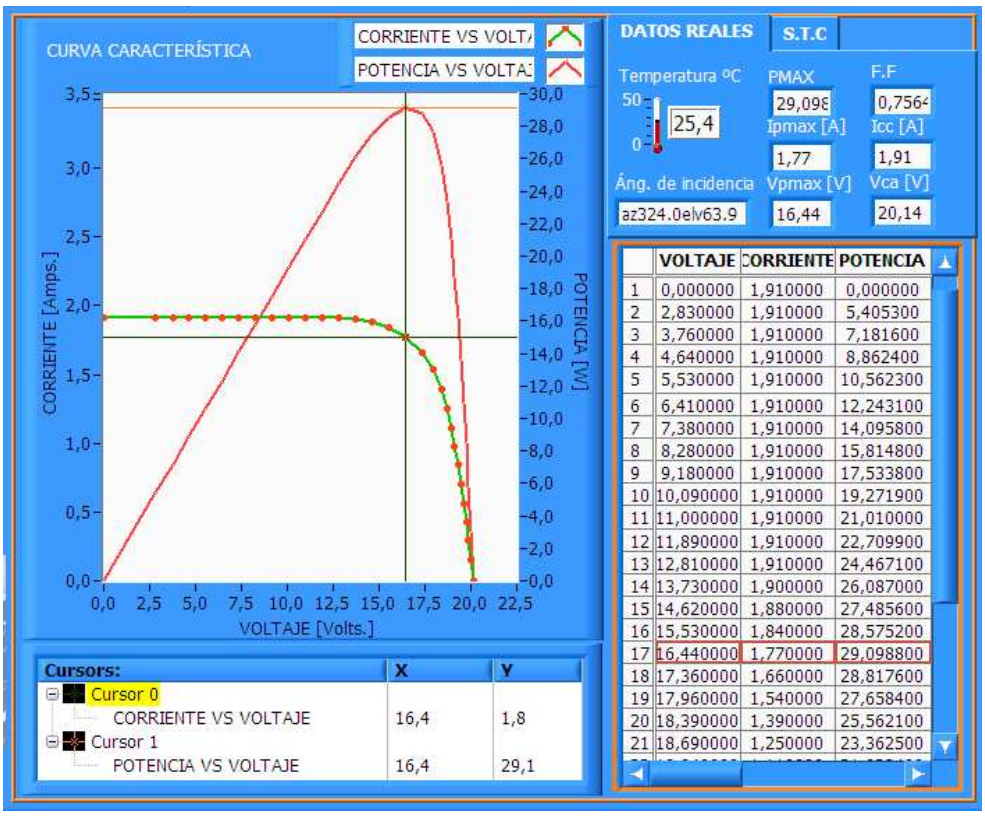


Figura 2. 46: Visualización de resultados.

2.2.2. VENTANA DE ACCESO A LA BASE DE DATOS

A través de esta ventana se pueden acceder a los archivos almacenados para cada curva característica de un panel específico. Se pueden acceder simultáneamente a dos bases de datos, para poder comparar el comportamiento

de dos paneles solares a la vez como se muestra en la figura 2.47.

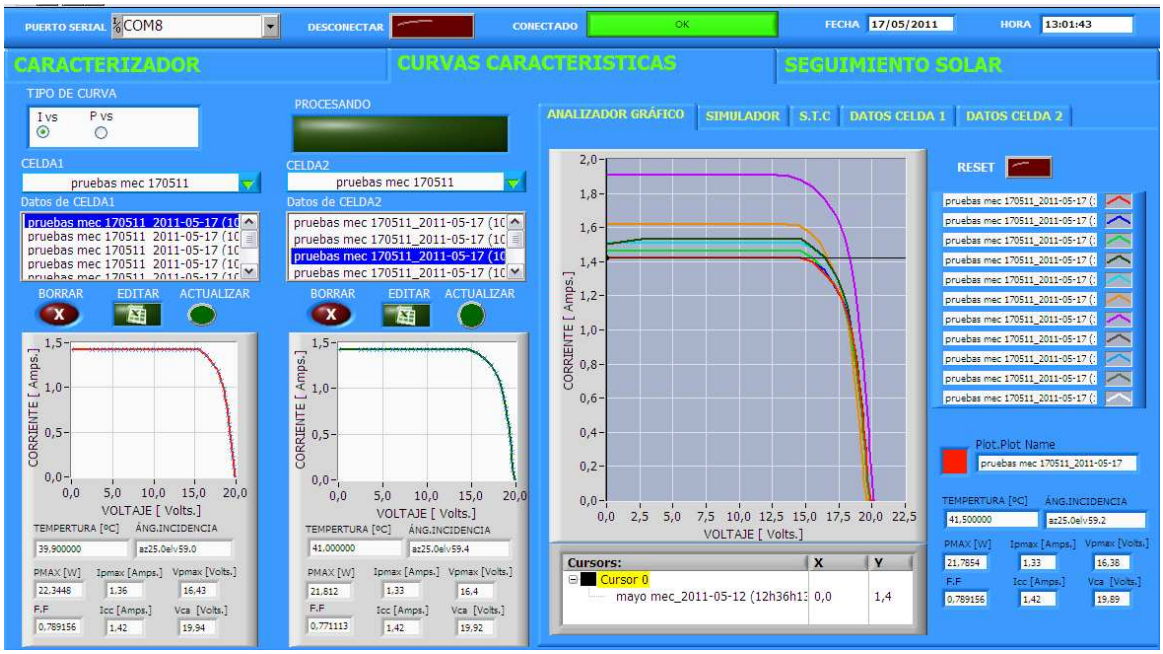


Figura 2. 47: Ventana de acceso a la base de datos.

Esta ventana a su vez tiene cuatro subventanas, que son:

- Analizador gráfico
- Simulador
- Datos de celda 1
- Datos de celda 2.

2.2.2.1. Analizador gráfico

Esta parte del sistema permite acumular varias curvas, de uno o varios paneles, en un solo gráfico, de esta manera se puede apreciar la variación de la curva característica debido a las condiciones de radiación en las que fue tomada cada curva. A través del cursor del gráfico acumulador es posible desplazarse por todos los puntos de cualquier curva, a la vez que se muestra la temperatura y el ángulo de incidencia con que fue tomada la curva característica seleccionada.

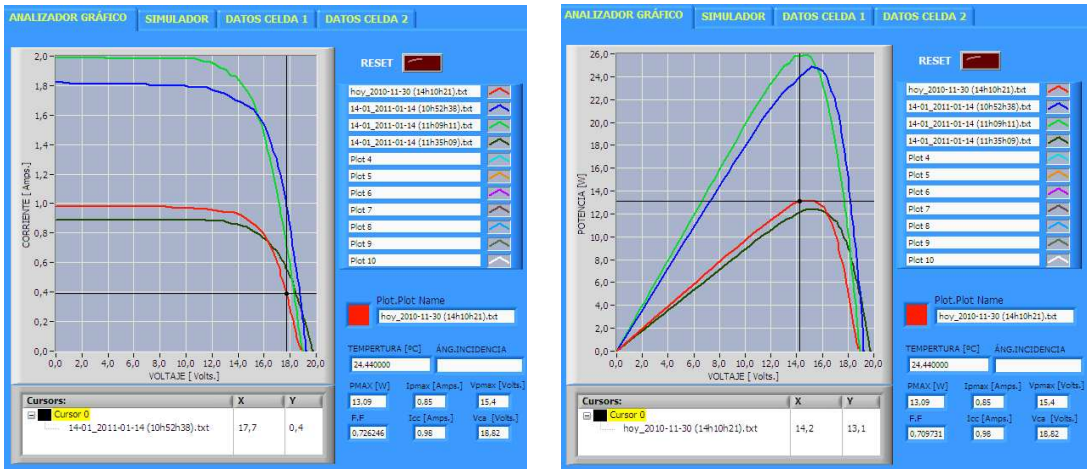


Figura 2. 48: Analizador gráfico para curvas características.

2.2.2.2. S.T.C. (Condiciones de Prueba Estándar)

Tomando como base la curva de un panel ("*celda1*" o "*celda2*"), y a partir de las condiciones de radiación y temperatura en las que fue realizada esa curva característica, se recalculan todos los valores para tener una curva característica adaptada a las CONDIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA o S.T.C. (STANDARD TEST CONDITIONS). Estas condiciones de prueba estándar corresponden a mediciones realizadas con radiación igual a 1000 [W/m^2] y temperatura de 25 °C.
El método para el cálculo de los valores para las condiciones de prueba estándar está detallado en el ANEXO F.

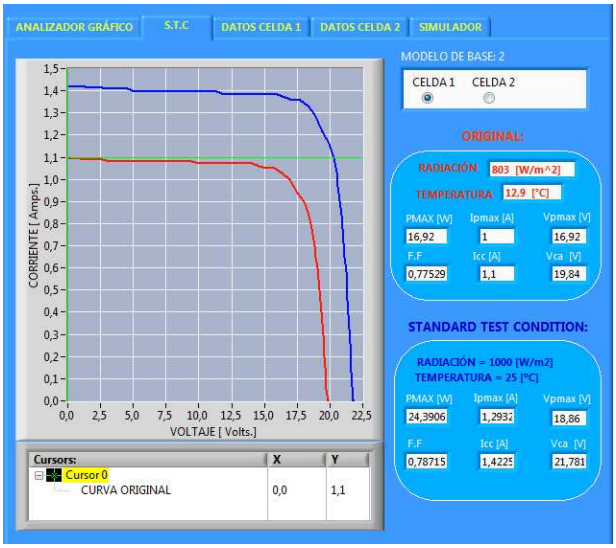


Figura 2. 49: STC.

2.2.2.3. Simulador

Es una sección que, tomando como base la curva de un panel ("*celda1*" o "*celda2*"), permite simular la curva en diferentes condiciones, variando los parámetros de construcción (Rs, Rp), o los parámetros ambientales (radiación, temperatura). Estos parámetros pueden ser manipulados a través de un control individual tipo "slider" para cada parámetro. Este simulador también calcula los nuevos parámetros de la curva simulada (Vca, Icc, Pmax, FF, Ipmax, Vpmax), y los muestra para que el usuario pueda compararlos con los de la curva original.

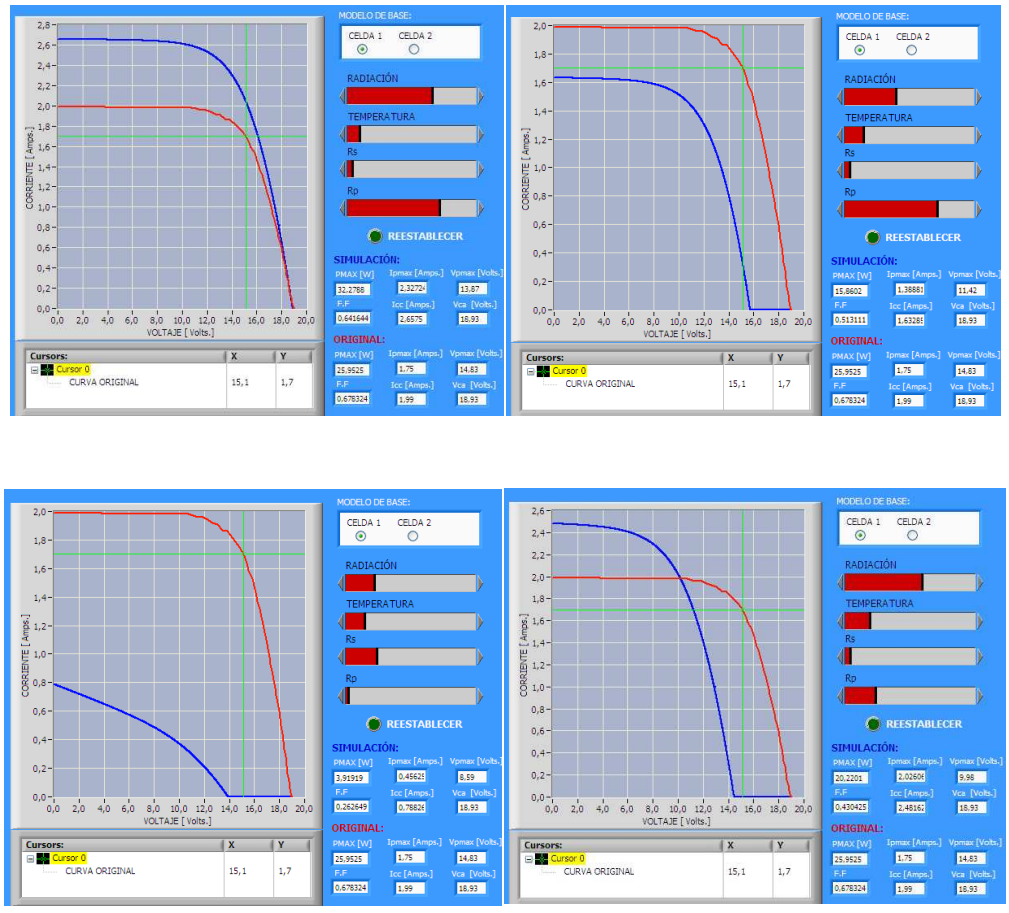


Figura 2. 50: Simulador.

2.2.2.4. Datos de celda (1 y 2)

Cada una de estas secciones muestra una tabla con los datos originales de la celda correspondiente, estos datos son leídos desde un archivo de texto. Esta

tabla muestra datos de: voltaje, corriente, potencia, temperatura, ángulo de incidencia y fecha de lectura.

FECHA	VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA	TEMPERATURA	RADIA
14/01/2011 13:18:29	0,000000	0,340000	0,000000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	1,370000	0,340000	0,465800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	1,600000	0,340000	0,544000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	1,930000	0,340000	0,656200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	2,260000	0,340000	0,768400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	2,590000	0,340000	0,880600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	2,930000	0,340000	0,996200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	3,240000	0,340000	1,101600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	3,560000	0,340000	1,210400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	3,900000	0,340000	1,326000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	4,230000	0,340000	1,438200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	4,550000	0,340000	1,547000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	4,870000	0,340000	1,655800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	5,180000	0,340000	1,761200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	5,520000	0,340000	1,876800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	5,840000	0,340000	1,985600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	6,180000	0,340000	2,101200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	6,510000	0,340000	2,213400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	6,830000	0,340000	2,322200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	7,170000	0,340000	2,437800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	7,460000	0,340000	2,536400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	7,830000	0,340000	2,662200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	8,130000	0,340000	2,764200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	8,440000	0,340000	2,869600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	8,790000	0,340000	2,988600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	9,090000	0,340000	3,090600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	9,450000	0,340000	3,213000	0,000000	0,000

Figura 2. 51: Ventana de datos de los paneles probados.

(Para mayor detalle consultar ANEXO A).

CAPÍTULO 3
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Para cumplir con el objetivo de proporcionar el ángulo de la mayor radiación incidente sobre el panel solar colocado en forma horizontal, se ha optado por la construcción de un dispositivo seguidor de Sol cuyo diseño y construcción se exponen en este capítulo. Cabe recalcar que el sistema tendrá un seguimiento solar con un cielo despejado, ante la obstrucción de la luz solar por nubes el sistema apuntará en la dirección de la mayor iluminación. Además aprovechando la cercanía que tendrá el módulo al panel solar que se estará probando se decidió incorporar en éste el sistema de medición de temperatura del módulo fotovoltaico. La estructura general del sistema de seguimiento solar y medición de temperatura se resume en el siguiente diagrama de bloques:

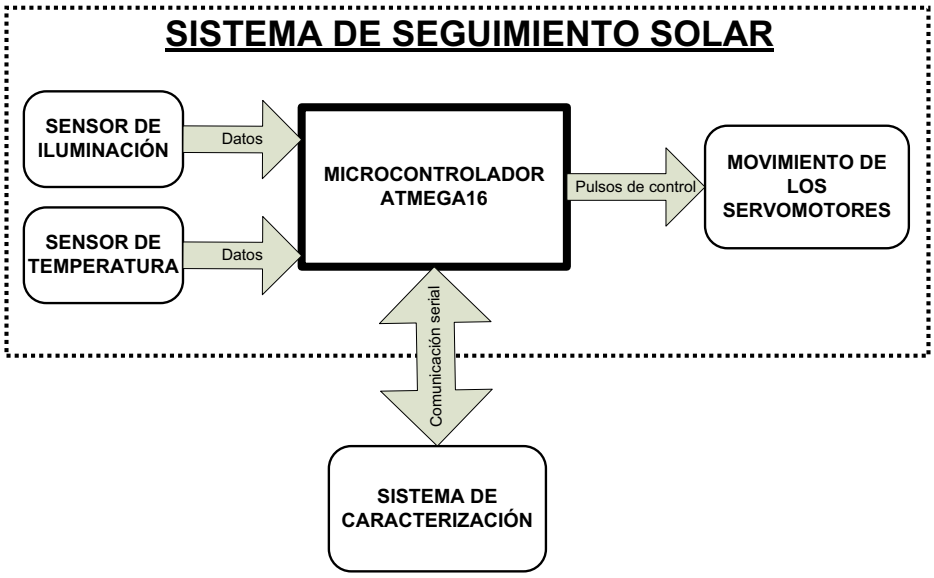


Figura 3. 1: Arquitectura del sistema de seguimiento solar y medición de temperatura.

El módulo en forma general está formado por:

- Elemento de control
- Estructura mecánica para seguimiento
- Sistema de medición de iluminación y seguimiento

- Sistema de medición de temperatura
- Programa de control

En la figura 3.2 se muestra el circuito diseñado para el sistema de seguimiento solar y medición de temperatura. Posteriormente se detalla cada una de las partes que lo conforman:

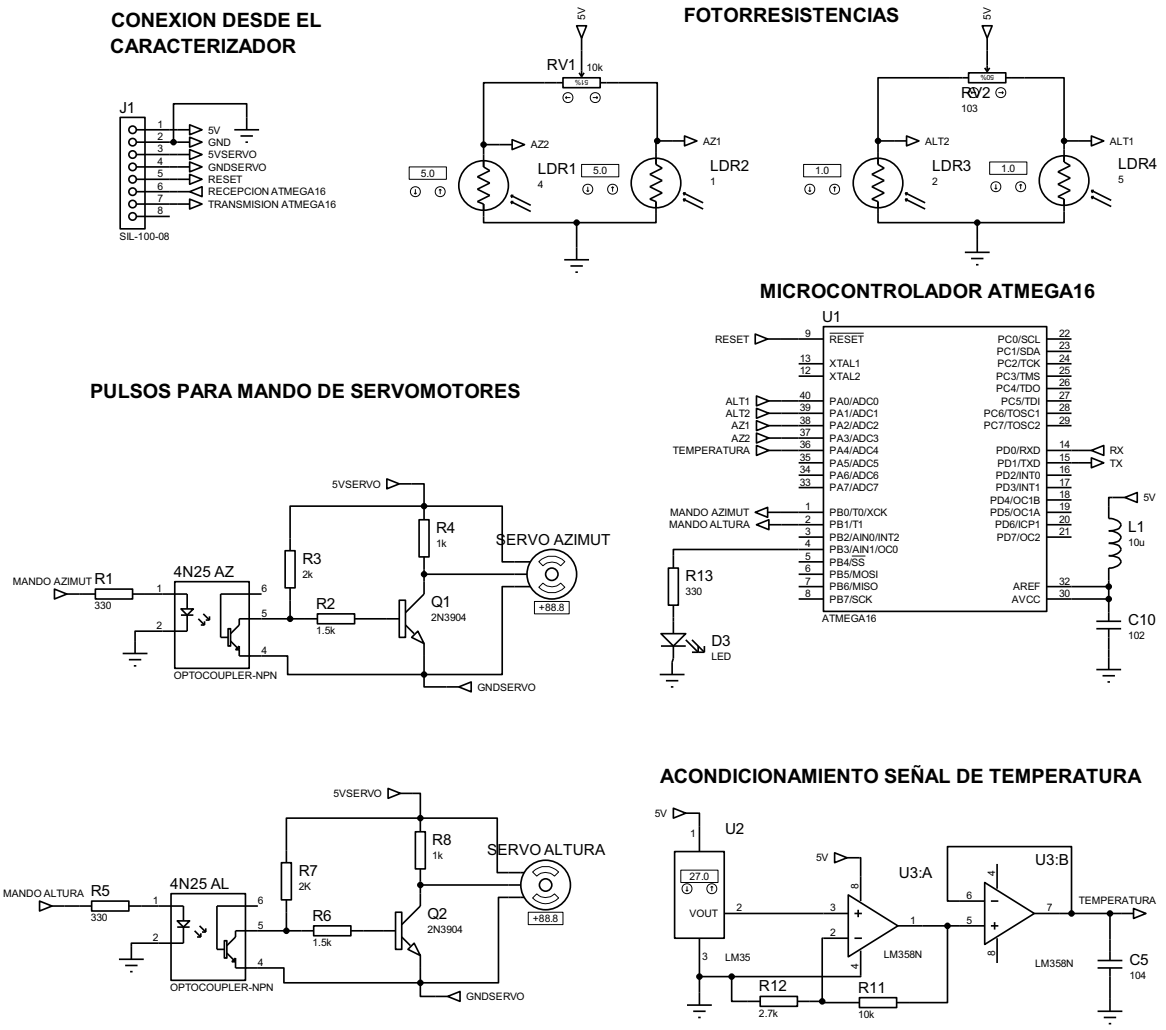


Figura 3. 2: Circuito completo del sistema de caracterización.

3.1. ELEMENTO DE CONTROL

Para implementar el programa de control, que controla el movimiento de los servomotores siguiendo la mayor radiación del Sol, se escoge el microcontrolador ATMEGA16 de la familia ATMEL, ya que posee las

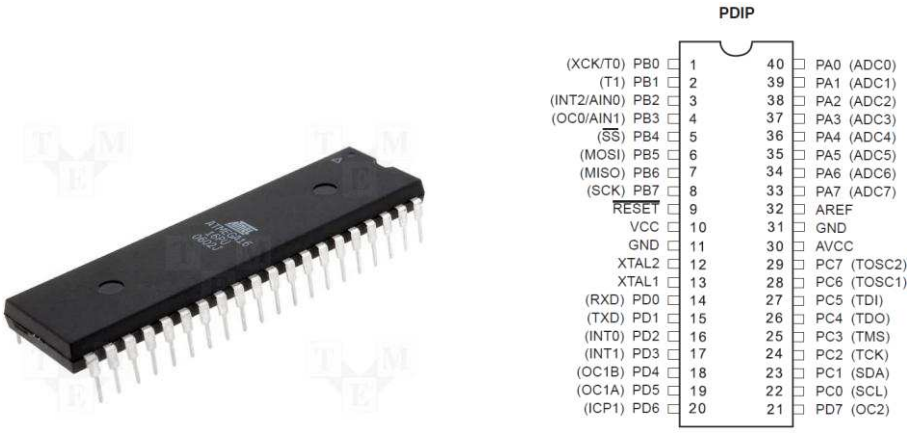
características para abarcar este proceso y en especial tiene una memoria suficiente para abarcar el programa de control.

3.1.1. MICROCONTROLADOR ATMEGA16

El ATMEGA16 es un microcontrolador CMOS de 8 bits de baja potencia basada en la arquitectura RISC de AVR. Permite la ejecución de poderosas instrucciones en un ciclo de reloj, permitiendo a un sistema optimizar el consumo de energía con una alta velocidad de procesamiento.

Entre las características principales se enumeran (características adicionales y configuración para programación del ATMEGA16 se exponen en el ANEXO D):

- Arquitectura RISC avanzada
- Memoria de datos y programa no volátiles
- 16Kbytes de memoria flash
- Voltajes de operación de 4,5V a 5,5V
- 1 TIMER de 16 bits y 2 TIMER de 8 bits
- 8 canales de conversores D/A de 10 bits
- Puerto de comunicación serial
- 4 canales para PWM



a) b)

Figura 3. 3: ATMEGA16: a) imagen real [37] y b) distribución de pines [51].

3.1.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA16:

El siguiente esquemático es parte de la figura 3.2 y muestra los pines del microcontrolador utilizados para el sistema de seguimiento solar y medición de temperatura.

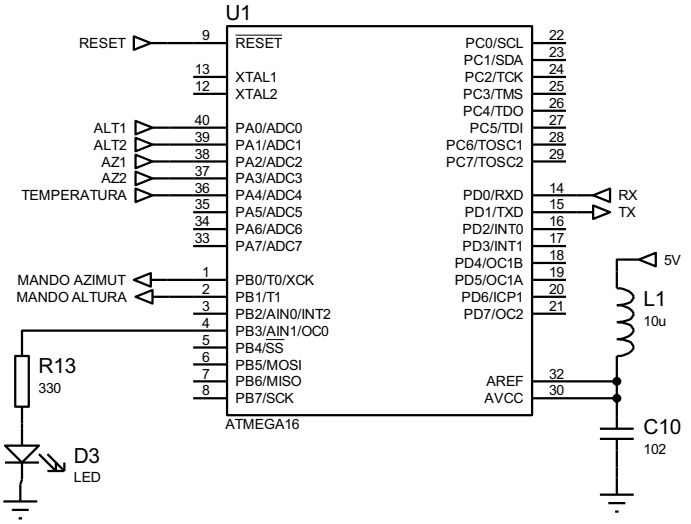


Figura 3. 4: Circuito esquemático del microcontrolador ATMEGA16.

A continuación se detallan los pines del microcontrolador ATMEGA16 que se utilizan para controlar el módulo seguidor de Sol y la función que desempeñan:

Pin	Descripción	Función
1	PB0 (XCK/T0)	Control del servomotor de movimiento acimutal.
2	PB1 (T1)	Control del servomotor de altura.
4	PB3 (OC0/AIN1)	Led indicador de transmisión.
9	RESET	Reinicializar el programa del microcontrolador.
10	VCC	Alimentación del microcontrolador.
11	GND	Alimentación del microcontrolador.
14	PD0 (RXD)	Recepción de datos del ATMEGA164P.
15	PD1 (TXD)	Envío de datos hacia el ATMEGA164P.
30	AVCC	Alimentación del conversor análogo-digital.
31	GND	Alimentación del conversor análogo-digital.
32	AREF	Voltaje de referencia para el conversor A/D.
36	PA4 (ADC4)	Medición de temperatura del módulo fotovoltaico.
37	PA3 (ADC3)	Medición del voltaje de la fotoresistencia AZ2.
38	PA2 (ADC2)	Medición del voltaje de la fotoresistencia AZ1.
39	PA1 (ADC1)	Medición del voltaje de la fotoresistencia ALT2.
40	PA0 (ADC0)	Medición del voltaje de la fotoresistencia ALT1.

Tabla 3. 1: Funciones de los pines del microcontrolador ATMEGA16.

3.2. ESTRUCTURA MECÁNICA PARA SEGUIMIENTO

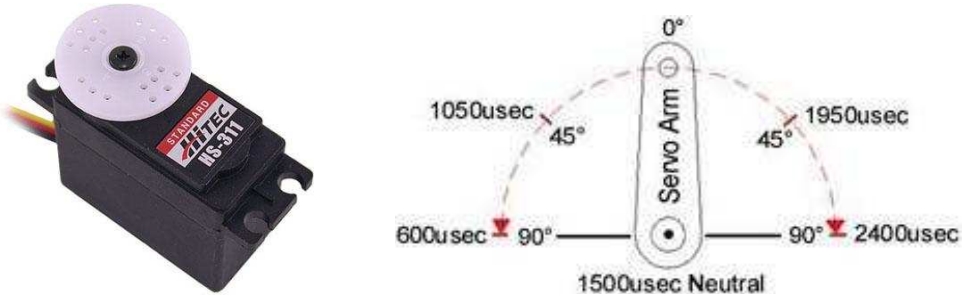
3.2.1. SELECCIÓN DE ACTUADORES Y BASES CONCEPTUALES PARA LA CONSTRUCCIÓN

Con base en la teoría de coordenadas altacimutales expuesta en 1.3.3, se concluye que para conseguir un seguimiento solar es necesario disponer de un dispositivo con dos grados de libertad, en este caso se opta por un mecanismo formado por dos servomotores de pequeña potencia. Los servomotores utilizados son de modelo Hitec HS-311.

3.2.1.1. El servomotor Hitec HS-311

Debido a que la carga que manejarán los servomotores es pequeña, este modelo de servomotor se acopla perfectamente a las necesidades del sistema de seguimiento, las características se presentan a continuación.

El servomotor Hitec HS-311 puede operar en un rango de 180º con una señal de ancho de pulso desde 600us hasta 2400us a una frecuencia de 4MHz.



a) b)

Figura 3. 5: Servomotor Hitec HS-311: a) figura real b) modo de operación a 4MHz. [32]

En la Tabla 3.2 se muestra las especificaciones técnicas del servomotor Hitec HS-311.

SERVOMOTOR Hitec HS-311	
Sistema de Control	Control PWM (valor neutral 1500 us)
Pulso Requerido	Onda cuadrada de 3 a 5Vdc pico-pico
Rango de operación a 4MHz	600us a 2400us
Voltaje de operación	4,8Vdc a 6.0Vdc
Velocidad de operación (4,8Vdc)	0,19s/60º sin carga
Velocidad de operación (6,0Vdc)	0,15s/60º sin carga
Torque (4,8Vdc)	42 oz/in (3 Kg/cm)
Torque (6Vdc)	49 oz/in (4.5 Kg/cm)
Dimensiones	52,8mm x 19,82mm x 39 mm
Peso	1,52oz (43g)

Tabla 3. 2: Especificaciones técnicas del servomotor Hitec HS-311.

3.2.1.2. Lógica para la construcción del mecanismo de seguimiento

Como se indicó anteriormente el mecanismo está formado por dos servomotores, el primero que se encarga del movimiento acimutal y el segundo que está acoplado a la rotación primero y se encarga del movimiento en altura, todo basado en conseguir directamente los ángulos para las coordenadas altacimutales del movimiento del Sol.

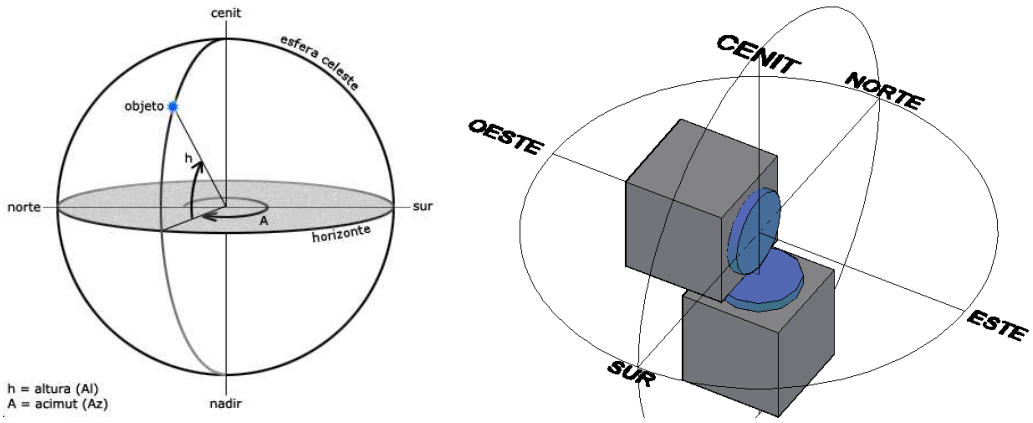


Figura 3.6: Comparación entre coordenadas altacimutales y disposición de los servomotores para emularlas.

Debido a que los servomotores escogidos poseen una libertad de movimiento de 180º, se puede deducir que el servomotor de seguimiento en altura no tiene ningún problema, ya que el ángulo de altura en coordenadas altacimutales tiene un rango de 0 hasta 90º. Sin embargo el servomotor de posicionamiento acimutal necesita 360º de libertad, esto sería un gran problema si el objeto que se desea seguir no tuviera trayectorias definidas.

Sin embargo el objeto a seguir es el Sol y como se expuso en la teoría de movimiento aparente del Sol detallada en 1.3.2, dicho astro tiene trayectorias sumamente definidas en cada época del año, y es así que considerando la línea ecuatorial, la proyección que tendría el Sol sobre la superficie terrestre durante el día siempre se encuentra bien en el hemisferio norte, en el hemisferio sur o en determinada temporada justo sobre la línea ecuatorial.

En conclusión la proyección del Sol nunca se cruza de hemisferio durante el transcurso del día en ninguna época del año.

Partiendo de esta realidad es necesario que el eje 0º-180º del servomotor de movimiento acimutal sea posicionado en paralelo con la línea ecuatorial con lo cual el servomotor tiene la posibilidad de moverse de 0º a 180º cuando el Sol se mueve en el hemisferio sur y de 180º a 0º cuando se mueve en el hemisferio norte.

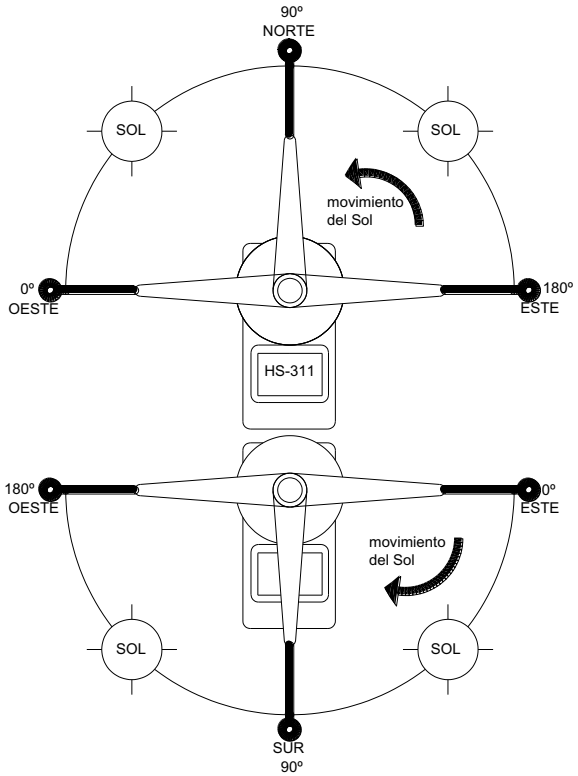


Figura 3.7: Funcionamiento del servomotor acimutal.

Para contrastar con la lógica expuesta anteriormente y ya que está acoplado al eje de rotación acimutal, el servomotor de movimiento en altura necesita ser posicionado con su eje de 90º perpendicular al plano, de esta manera este servomotor tiene la posibilidad de moverse en el rango de 0º a 90º cuando el Sol

se mueve en el hemisferio sur y en el rango de 90º a 180º cuando se mueve en el hemisferio norte.

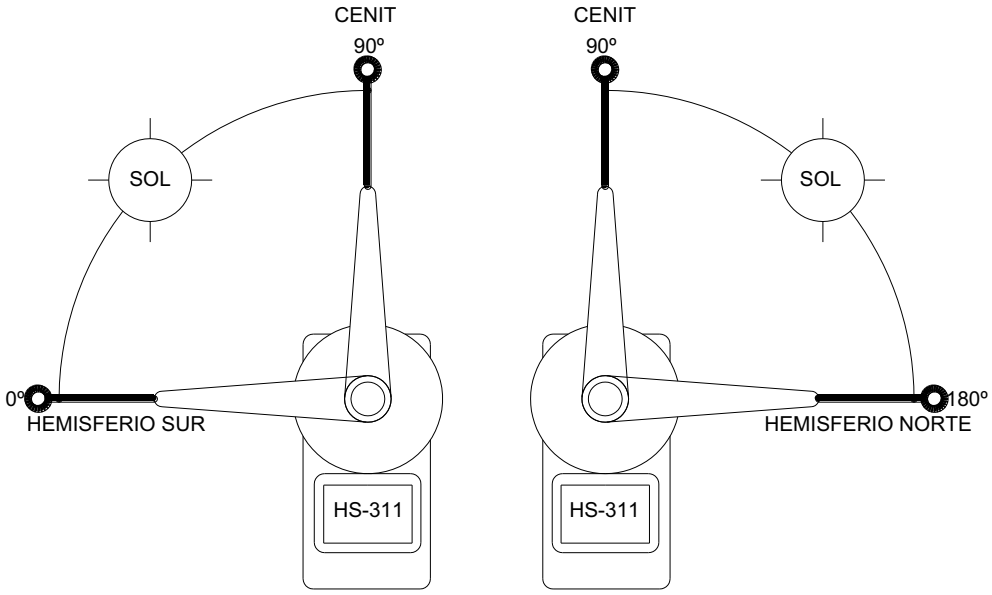


Figura 3.8: Funcionamiento del servomotor de altura.

Para que el eje 0º-180º del servomotor de posicionamiento acimutal esté paralelo a la línea ecuatorial se incorporará una brújula para que el módulo sea colocado de forma correcta manualmente antes de su funcionamiento, para completar el movimiento y posicionamiento automático de los servomotores se necesitan sensores de luz y un obturador, elementos que serán explicados más adelante.

3.2.2. ENSAMBLAJE DEL MÓDULO SEGUIDOR DE SOL

Para el ensamblaje y acoplamiento de los servomotores para formar el módulo seguidor de Sol, se utiliza acrílico, material de fácil manipulación y sobre todo ligero para elaborar las bases sobre las cuales se montarían los dos servomotores y el obturador con los sensores.

Aprovechando los agujeros de sujeción y algunos accesorios que incluye la compra de los servomotores, se realiza un ensamblaje bastante sencillo que se ajusta a los requerimientos necesarios y se expone de manera breve a continuación.

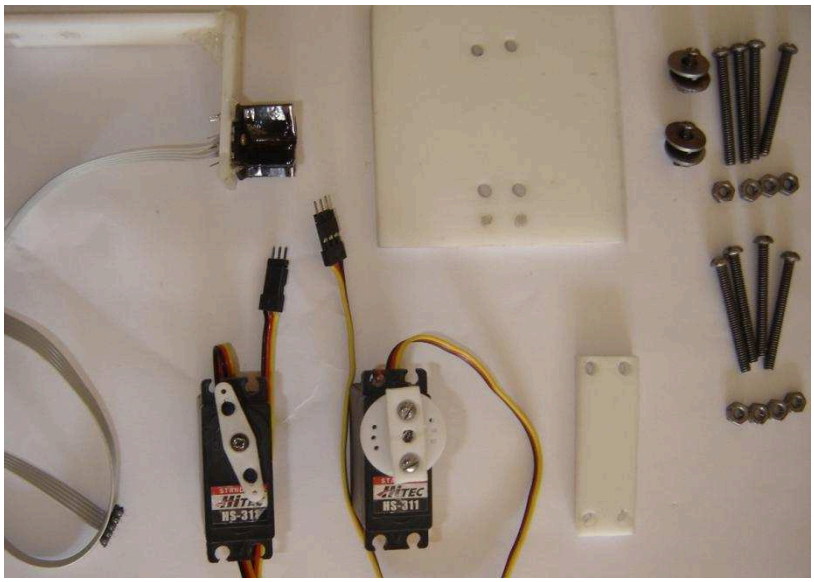


Figura 3.9: Piezas utilizadas en el ensamble del módulo seguidor de Sol.

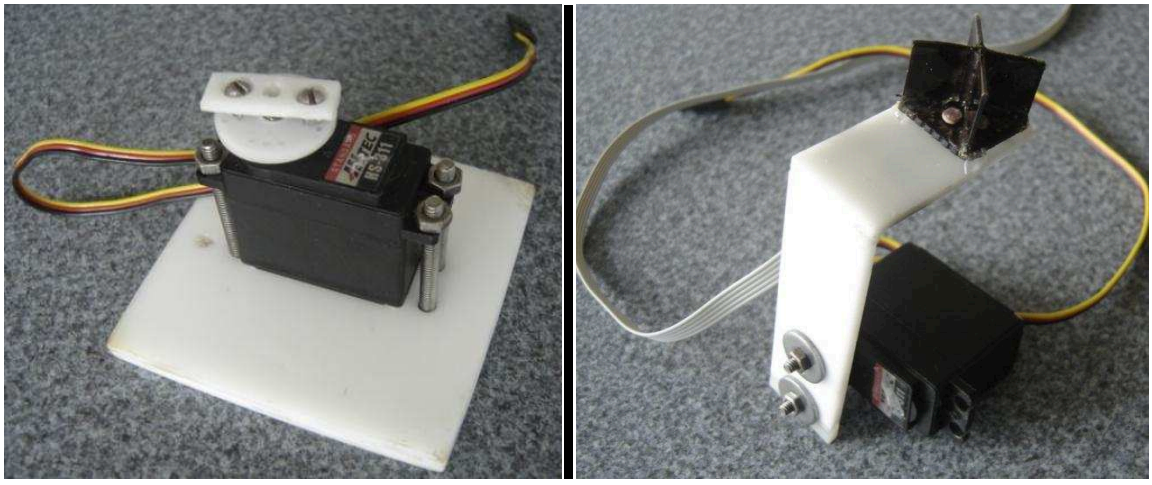
En la figura 3.10 se muestran los servomotores utilizados para cada movimiento, y los ejes utilizados para acoplar la base del obturador al servomotor de movimiento en altura y para acoplar los dos servomotores entre sí.

Figura 3.10: Servomotores utilizados en el mecanismo de seguimiento.

Con las medidas de los agujeros de sujeción de los servomotores se procede a construir las bases para el ensamblaje, recortadas de una lámina de acrílico para que el módulo sea ligero y no sea necesario emplear servomotores de mayor potencia.

Figura 3.11: Piezas en acrílico utilizadas en el mecanismo de seguimiento.

Ya con las bases construidas y con la ayuda de tuercas y tornillos se procede al ensamblaje parcial de cada servomotor como se muestra en la figura 3.12.



a) b)

Figura 3.12: Ensamble parcial: a) para movimiento acimutal, b) para movimiento en altura.

Como paso final se realiza el acoplamiento entre los dos servomotores, tomando en cuenta los requerimientos expuestos anteriormente para que el servomotor de movimiento acimutal pueda recorrer los 180º de cada hemisferio y el servomotor de movimiento en altura se posicione perpendicular al plano cuando tenga un pulso para 90º.

Figura 3. 13: Ensamble completo del mecanismo de seguimiento.

En la figura 3.14 se muestran los elementos que conforman el mecanismo de seguimiento solar totalmente ensamblado, mientras que en la figura 3.15 se observa los grados de libertad que posee dicho módulo.

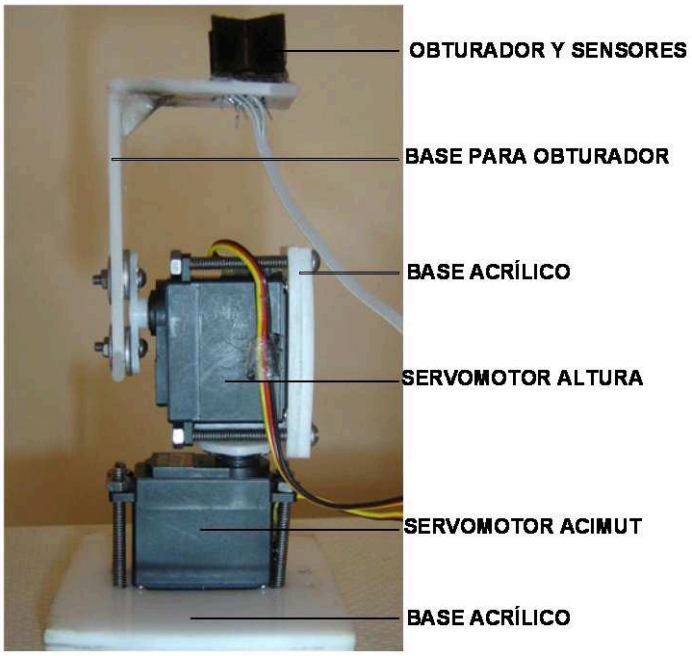


Figura 3. 14: Partes del mecanismo de seguimiento solar.

Figura 3. 15: Mecanismo de seguimiento en varias posiciones.

3.3. SISTEMA DE MEDICIÓN DE ILUMINACIÓN Y SEGUIMIENTO

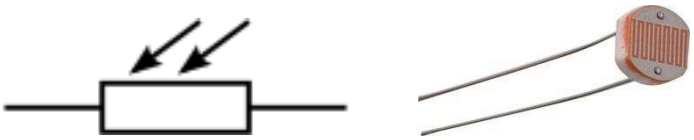
El sistema de medición de iluminación y seguimiento complementa la estructura mecánica, está formado por el hardware que controla el movimiento de los 2 servomotores y un sensor de iluminación correctamente posicionado que le indica al programa de control los movimientos que dichos servomotores deben realizar.

3.3.1. ELECCIÓN DEL SENSOR DE ILUMINACIÓN

Para el funcionamiento del sistema lo que se necesita es poder comparar niveles de iluminación, por lo tanto basta con convertir la iluminación del Sol en un nivel de voltaje que pueda ser entendido por el microcontrolador, para este propósito se necesita un elemento que tenga una característica propia que varíe de acuerdo a la iluminación a la que está expuesto, entonces se ha escogido una fotoresistencia o LDR.

Una fotoresistencia o LDR (Light Dependent Resistor, o Resistor Dependiente de la Luz) es un componente electrónico cuya resistencia disminuye al aumentar la intensidad de la iluminación incidente.

Las fotoresistencias tienen una resistencia interna que varía generalmente desde los 50Ω con luz incidente hasta varios megaohmios a oscuras.



a) b)

Figura 3. 16: LDR: a) símbolo [14], b) imagen real [33].

Sin embargo una fotoresistencia no es suficiente para controlar los movimientos de un sistema con 2 grados de libertad. Este sistema debe tener 4 fotoresistencias para sensar la luz del Sol que varíe tanto en el movimiento acimutal como en el movimiento en altura. Esta detección la hace por pares, en donde cada fotoresistencia perteneciente a su respectivo par, se encuentra ubicado en sentido opuesto el uno del otro, separados por un sistema de obturación.

El sistema de obturación permite que por cada par de fotoresistencias, únicamente cuando se esté apuntando directamente a la fuente de luz, la iluminación en las 2 fotoresistencias es la misma, obligando a que los servomotores se muevan hasta que se igualen dichas iluminaciones y de esta manera lograr un seguimiento bastante preciso.

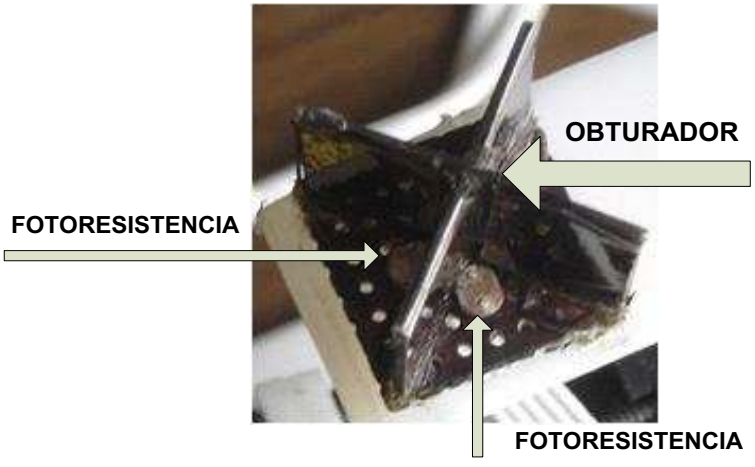


Figura 3. 17: Sistema de obturación y sensores

En conclusión las 4 fotoresistencias y el sistema de obturación funcionan en conjunto como un solo sensor de iluminación, cuya información gobernará los movimientos del mecanismo de seguimiento.

3.3.2. ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR DE ILUMINACIÓN

Para obtener una señal de voltaje variable de acuerdo al nivel de iluminación se ha optado por un divisor de voltaje en la alimentación principal conformado por la fotoresistencia y una resistencia a dimensionar para obtener una sensibilidad aceptable.

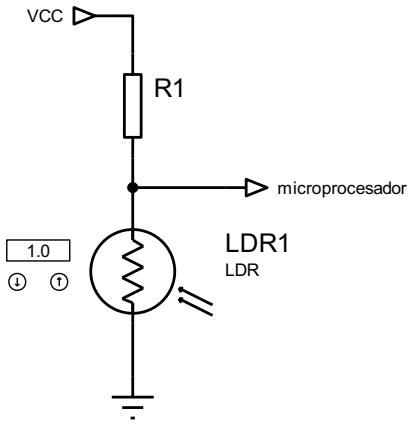


Figura 3. 18: Acondicionamiento para fotoresistencia.

Como primer paso se procede a medir la resistencia de las fotoresistencias que se utilizaron con una iluminación a medio día y en un día totalmente sombreado (no en completa oscuridad), teniendo medidas aproximadamente iguales para los 4 sensores:

$R_{luz} = 100\Omega$
$R_{sombra} = 10K\Omega$

Para obtener una buena sensibilidad es necesario que para la variación de resistencia que posee la fotoresistencia, a la entrada del microcontrolador, se obtenga la mayor variación posible de voltaje.
Mediante cálculos manuales hechos en el divisor de tensión que funciona de acondicionamiento, se determina que para la variación presentada en las fotoresistencias, el valor de resistencia necesario para tener una sensibilidad aceptable a la entrada del microprocesador está entre 1KΩ y 5KΩ.
Se escoge 5KΩ como valor de la resistencia con lo cual se tiene los siguientes voltajes de salida:

$$Vout = 5V \times \frac{R_{LDR}}{R_{LDR} + 5K\Omega}$$

Para $R_{luz} = 100\Omega$, $Vout = 0.1V$

Para $R_{sombra} = 10K\Omega$, $out = 3.3V$

Finalmente para compensar las pequeñas diferencias de resistencia ante una determinada iluminación de cada par de fotoresistencias, se optó por utilizar un potenciómetro de precisión de 10 KΩ, para cada par y de esta manera tener un medio de calibración, la configuración final se muestra a continuación (la figura 3.19 es parte del circuito completo de seguimiento mostrado en la figura 3.2):

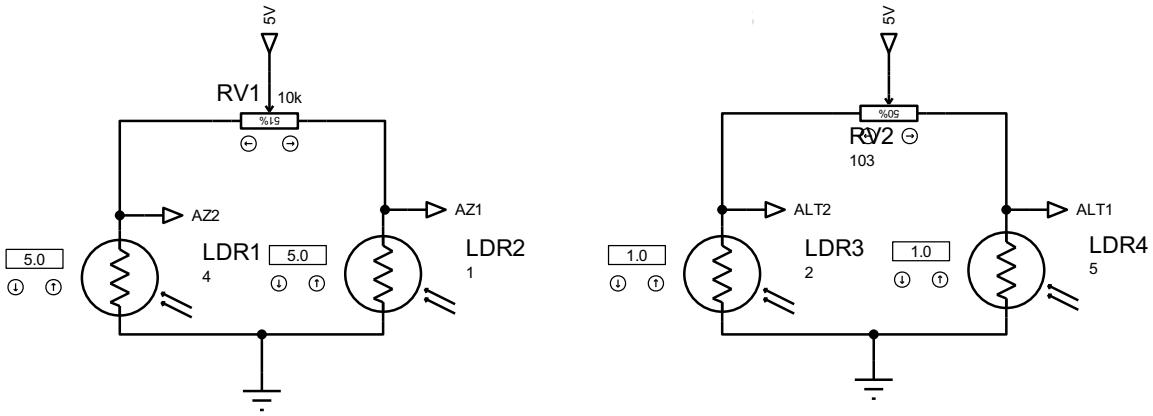


Figura 3. 19: Configuración utilizada para el acondicionamiento de cada par de fotoresistencias.

Finalmente para eliminar posible rizado que se presente a la salida del acondicionamiento se colocan capacitores cerámicos para filtrar la señal.

3.3.3. DISEÑO DEL HARDWARE PARA EL CONTROL DE LOS SERVOMOTORES

Para el uso de los servomotores se requiere que éstos se alimenten de una fuente propia, ya que pueden inducir ruido en la fuente del sistema microprocesado y se podrían presentar problemas de funcionamiento en el módulo en general.

Entonces es necesaria la construcción de una fuente independiente de 5V para la alimentación de los dos servomotores y producir un aislamiento con el sistema

microprocesado mediante el optoacoplamiento de los pulsos de control hacia los servomotores.

3.3.3.1. Fuente de 5 voltios para los servomotores

Debido a la necesidad de tener una fuente independiente para el funcionamiento de los servomotores, se utiliza la configuración de la figura 3.20, de tal manera de no utilizar un transformador extra. Para esto, se utilizan dos reguladores de voltaje fijos, el LM7815 y el LM7805, debido a que el voltaje rectificado en el puente de diodos es demasiado alto para usar un solo regulador, también se usan capacitores a la entrada y a la salida de los reguladores para corregir el rizado.

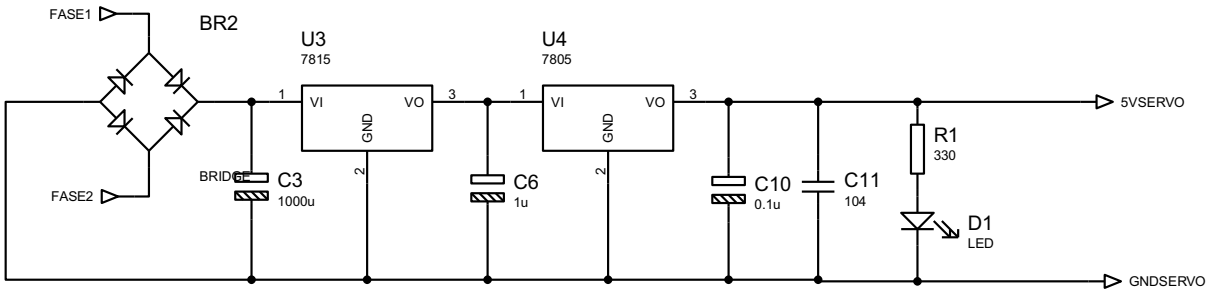
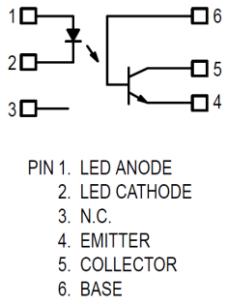


Figura 3. 20: Configuración utilizada para la alimentación de los servomotores.

3.3.3.2. Elección del optoacoplador

En el ANEXO E se muestra información sobre el manejo de servomotores, y se detalla que los pulsos de control tienen un período de aproximadamente 20ms, mientras que el ancho de pulso para el servomotor Hitec HS-311 debe tener un valor mínimo de 600us para su control.

Por lo tanto con base en estas características se escoge el fototransistor 4N25, éste tiene la particularidad de ser de fácil adquisición y posee tiempos de subida y de caída de alrededor de 2us, que lo hace sumamente rápido y suficiente para manejar los pulsos de control de los servomotores.



a) b)

Figura 3. 21: Fototransistor 4N25: a) Imagen real [34], b) Distribución de pines [48].

3.3.3.3. Diseño del hardware para optoacoplamiento

Según la hoja de datos para el 4N25 los datos importantes para el diseño son:

- Corriente de led máxima=60mA
- Tasa de transferencia de corriente (CTR)=20%

Asumiendo una resistencia de R1=330Ω para la entrada del led en la figura:

$$I_{led} = \frac{5\ V}{330\Omega}$$

$$I_{led} = 15mA$$

Para calcular la resistencia de colector:

$$CTR = \frac{Ic}{I_{led}}$$

Ec.3. 1

$$Ic = 0{,}2 \times 15mA$$

$$Ic = 3mA$$

$$R3 = \frac{5V}{3mA}$$

$$R3 = 1{,}7\ K\Omega$$

Se escoge: $R3 = 2K\Omega$

El uso del 4N25 produce que los pulsos en el colector sean invertidos, por lo cual es necesario añadir una etapa para invertir nuevamente dicha señal, como se observa en la figura 3.22 se utiliza una configuración con el transistor de señal

2N3904 que es suficientemente rápido para ajustarse a los pulsos de control.

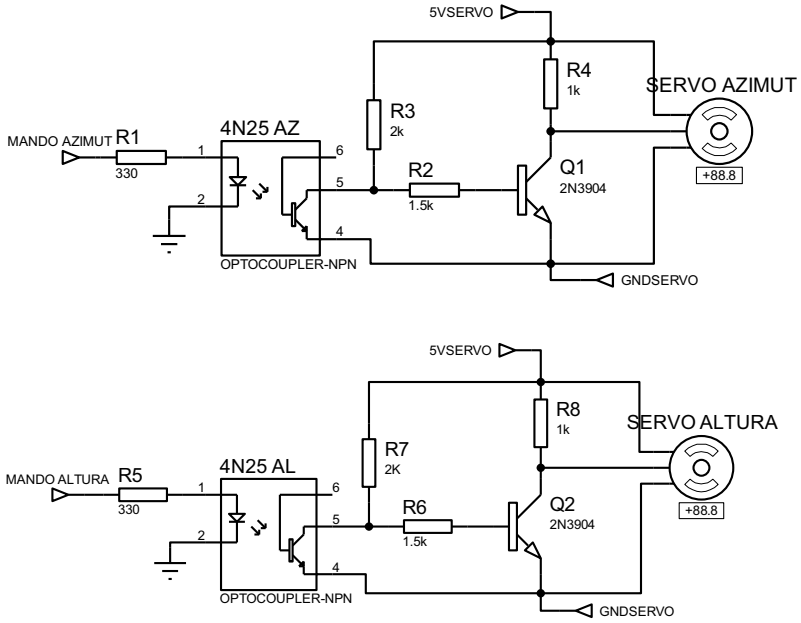


Figura 3. 22: Configuración utilizada para el optoacoplamiento de los pulsos de control.

Se especifica que se tiene un Vbe_{sat} máximo de 0,85V y Vce_{sat} máximo de 0,2V con condiciones de Ic=10mA y Ib=3mA.

Asumiendo estos valores de corriente:

$$R2 = \frac{5V - 0.85V}{3mA}$$

$$R2 = 1.38\ K\Omega$$

Se escoge**:** $$R2 = 1.5\ K\Omega$$

$$R4 = \frac{5V - 0.2V}{10mA}$$

$$\mathrm{R4} = 480\ \Omega$$

Se escoge: $$R4 = 1\ K\Omega$$

3.4. SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Para apreciar el cambio de la curva característica I-V con la variación de la temperatura, es necesario tener la medida de esta variable en la superficie del panel al momento de realizar la caracterización, por lo tanto es necesario utilizar

un sensor adecuado.

3.4.1. ELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA

Se opta por utilizar el sensor de temperatura LM35 ya que la medición a realizarse es al aire libre, es decir no existe ningún ambiente nocivo que pueda afectar el sensor, y debido a que las características que posee se acoplan a las necesidades requeridas y permite facilidad en el acondicionamiento posterior.
Las principales características del sensor de temperatura LM35 son (características adicionales se pueden consultar en el ANEXO D):

- Calibrado directamente en grados centígrados
- Factor de escala lineal de +10mV/°C
- Precisión de 0.5°C garantizada (a +25°C)
- Rango de temperatura: -55°C a 150°C
- Operación desde 4 hasta 30V
- Consumo de corriente menor a 60µA

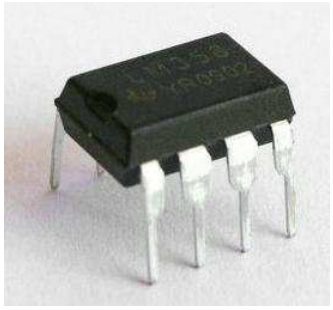
a) b)

Figura 3. 23: Lm35: a) imagen real [35] y b) distribución de pines [49].

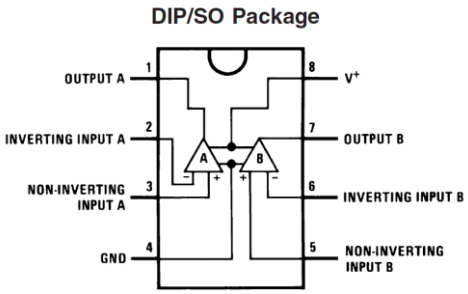
3.4.2. ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR DE TEMPERATURA

Debido a que los paneles solares están situados al aire libre, en épocas cálidas pueden alcanzar temperaturas relativamente altas, por lo cual se acondiciona el sensor de tal manera que a una temperatura aproximada de 100ºC el microcontrolador reciba 5V.

Para el acondicionamiento de las señales del sensor se necesita el uso de amplificadores operacionales, y ya que en el módulo de seguimiento se dispone únicamente de una fuente de 5V, entonces se requiere utilizar el integrado LM358 (figura 3.24), cuyo funcionamiento es posible con una sola fuente de alimentación. También se opta por una configuración de amplificación no inversora precisamente por el tipo de alimentación del LM358, y a continuación una etapa de seguimiento de voltaje y un capacitor para filtrar la señal de entrada al microprocesador.



a)



b)

Figura 3. 24: Lm358 (a) imagen real [36] y (b) distribución de pines [50].

Para diseñar el amplificador inversor se tienen los siguientes datos:

- Temperatura máxima (Tmax) = 100ºC
- Sensibilidad LM35 (s) = 10mV/ºC
- Voltaje de salida del amplificador (Vout) = 5V

En base a estos datos se tiene que el voltaje de entrada al amplificador es:

$$Vin = Tmax \times s$$

$$Vin = 100 \times 10m\,V$$

$$Vin = 1V$$

La ganancia del amplificador no inversor está dada por:

$$G = \frac{Vout}{Vin}$$

$$G = \frac{5\,V}{1V}$$

$$G = 5$$

Y finalmente la fórmula para el amplificador no inversor de la figura 3.25 es:

$$G = 1 + \frac{R11}{R12}$$

$$R11 = 4 \times R12$$

Asumiendo: $R12 = 2.7\ K\Omega$

Entonces: $R11 = 10.8\ K\Omega$

Por lo tanto: $R11 = 10\ K\Omega$

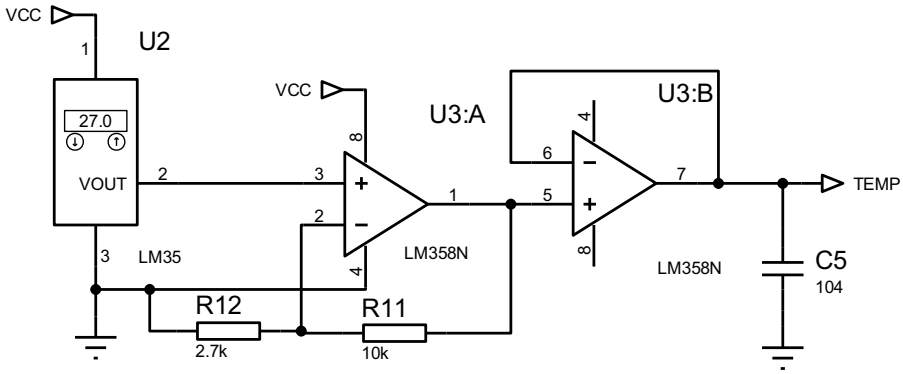


Figura 3. 25: Acondicionamiento del sensor de temperatura.

3.5. PROGRAMA DE CONTROL

En la figura 3.26 se muestra el diagrama principal del programa de control para el seguimiento del Sol y determinación del ángulo de incidencia de la radiación sobre el módulo fotovoltaico, el cual se asume está en posición horizontal.

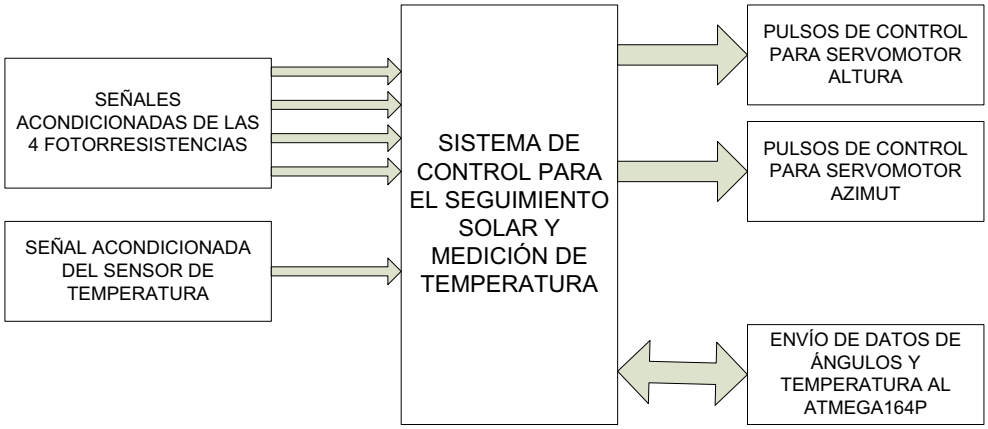


Figura 3. 26: Diagrama estructural del sistema de control.

Dicho programa de control se rige al diseño mecánico previo del módulo seguidor de Sol, que como se explicó anteriormente es necesario posicionarlo de manera adecuada, con la ayuda de la brújula que se encuentra en el módulo, para que el seguimiento y los ángulos que determina sean los correctos.

3.5.1. MÉTODO DE CONTROL

- Antes de iniciar el seguimiento del Sol como proceso principal, es necesario determinar en qué hemisferio se encuentra el Sol realizando su movimiento relativo (hemisferio norte o hemisferio sur), ya que durante todo el día el Sol no cambiará de hemisferio y el módulo de seguimiento se rige a esta condición. Para determinar el hemisferio se ordena posicionar el servomotor de altura a 90º y el servomotor acimutal en 0º, con lo cual las fotoresistencias que comandan el movimiento acimutal quedan posicionadas de tal forma que cada una apunta a un hemisferio, de esta manera se puede determinar el hemisferio que posee la mayor iluminación y por lo tanto el hemisferio donde se encuentra el Sol.
- Después de determinar el hemisferio, el microcontrolador ordena que se lleve a cabo una de las dos rutinas de seguimiento: seguimiento por el hemisferio norte o seguimiento por el hemisferio sur.
- El algoritmo de seguimiento para cualquiera de los dos hemisferios consiste en la comparación de los voltajes entregados por las fotoresistencias del obturador, de las cuales dos fotoresistencias controlan el servomotor de movimiento acimutal y las otras dos controlan el servomotor de altura. Mediante la comparación de estos voltajes se determina el movimiento en un sentido u otro, dependiendo si la diferencia de voltajes es mayor o menor que cero (en este caso se utiliza un nivel de voltaje ya que resulta complicado llegar una diferencia de voltaje cero). Cuando el obturador llega a apuntar directamente al Sol, se tiene la misma iluminación en las cuatro fotoresistencias, con esto se logra que la diferencia de voltajes sea cercana a cero, en ese instante los pulsos hacia los servomotores se mantienen constantes y se consigue el seguimiento deseado.

- Para obtener los ángulos tanto de acimut como de altura, simplemente se necesita convertir el pulso que se le está aplicando a cada servomotor en un ángulo, mediante la aplicación de algoritmos que se muestran en la figura 3.34 y figura 3.35. Esto se debe a que el diseño mecánico del módulo seguidor asegura que con un determinado pulso se obtiene un determinado ángulo.
- Finalmente la subrutina de interrupción de TIMER permite enviar el dato del ángulo de altura y el ángulo de acimut hacia el microcontrolador principal (ATMEGA 164) cada cierto tiempo.

3.5.2. DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL

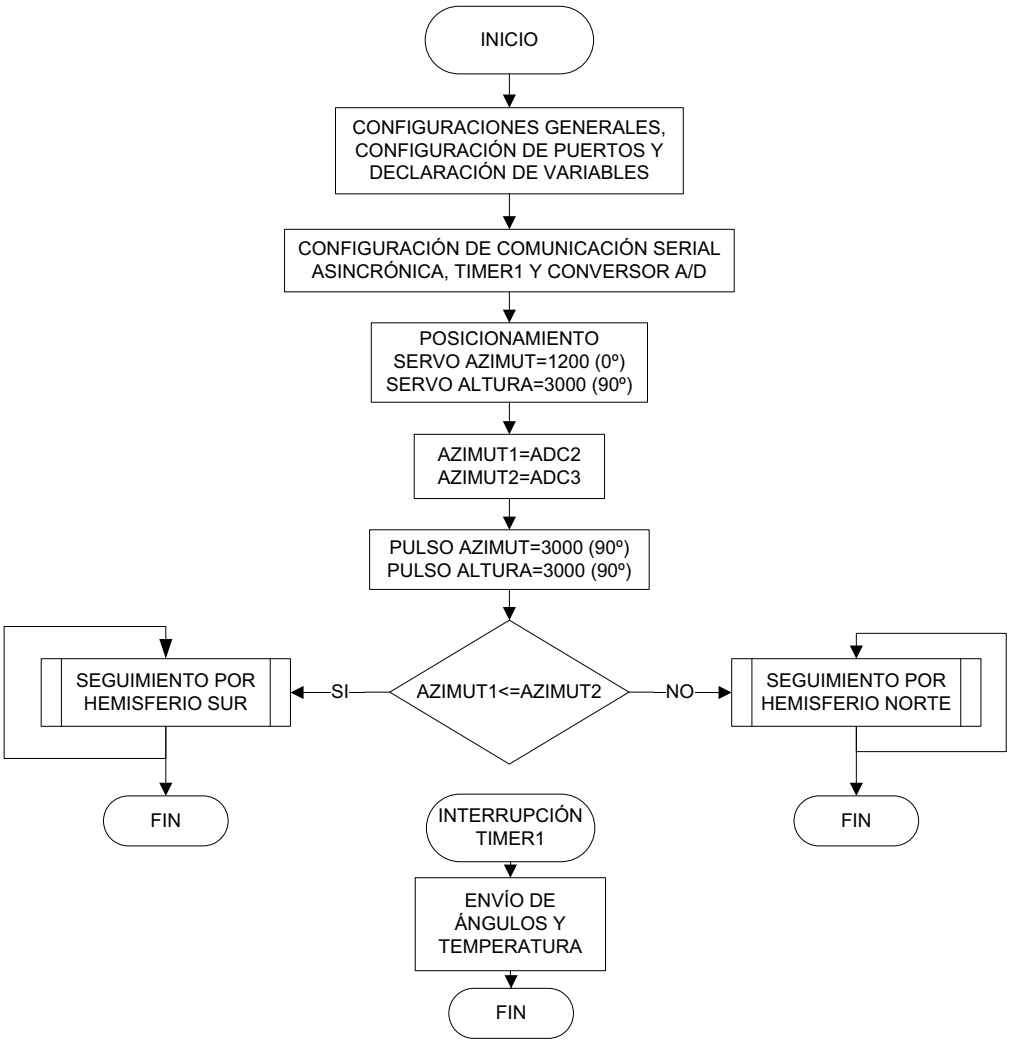


Figura 3. 27: Diagrama de flujo general del algoritmo de seguimiento.

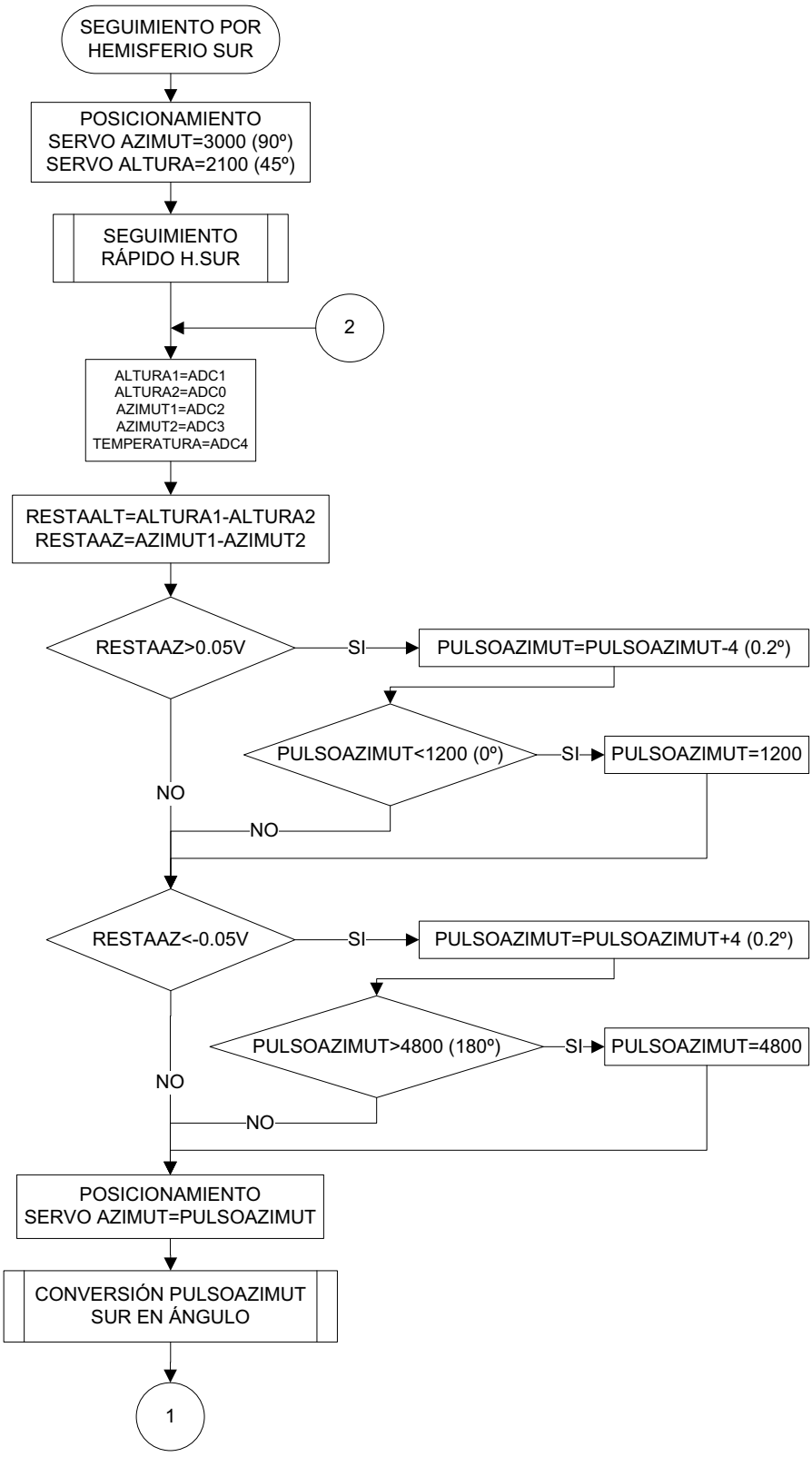


Figura 3. 28: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio sur. (Parte 1)

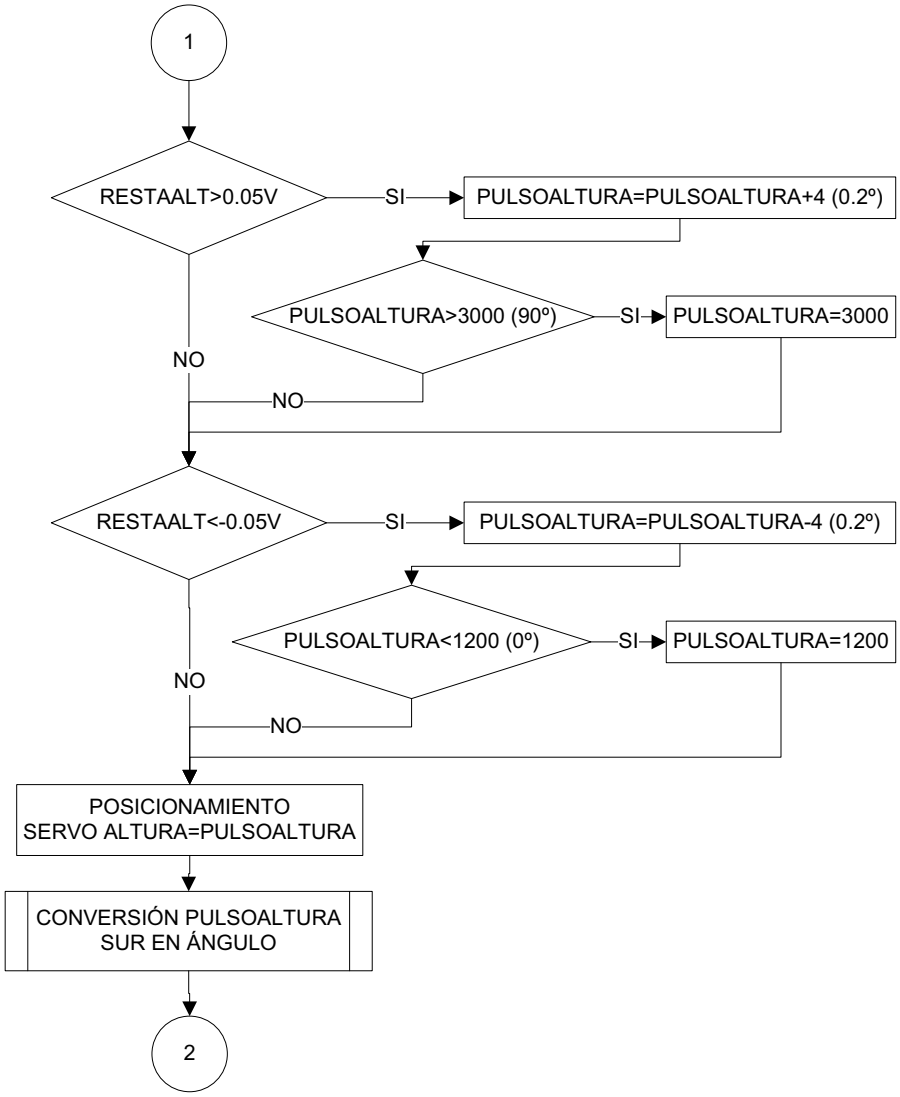


Figura 3. 29: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio sur. (Parte 2).

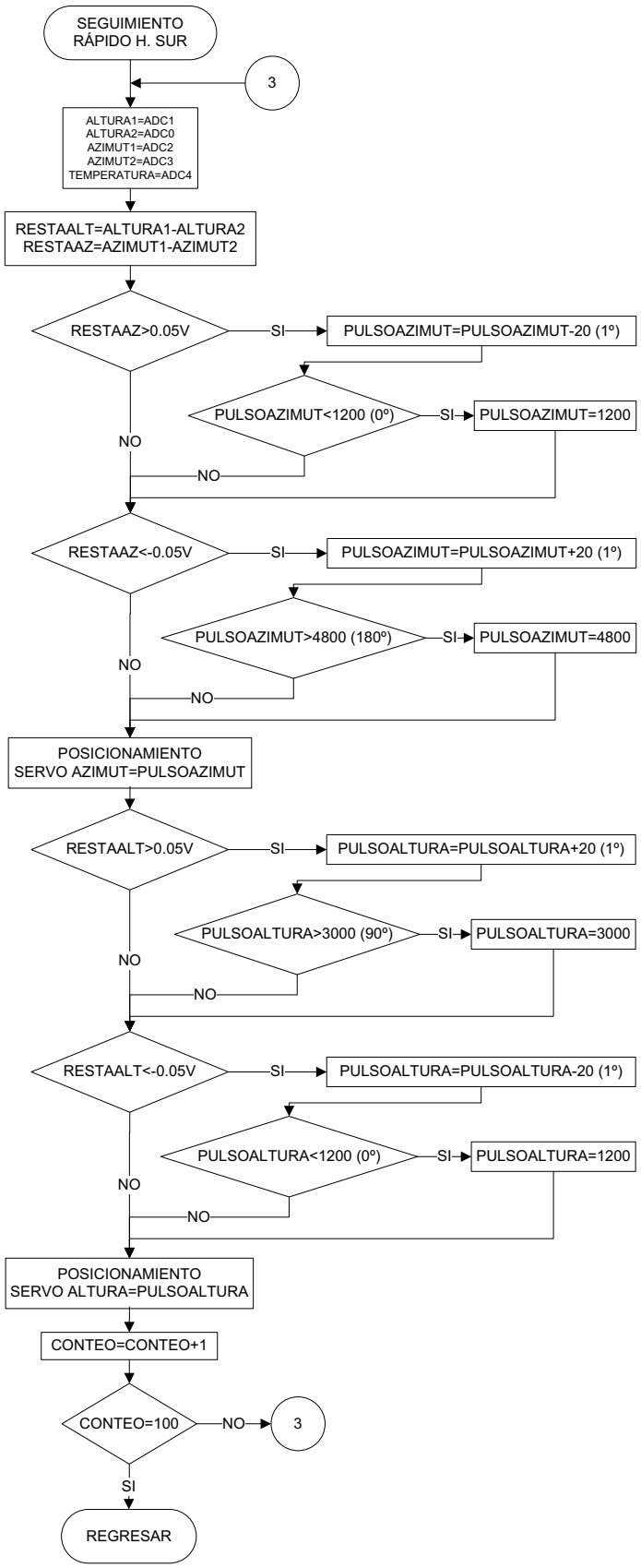


Figura 3. 30: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento rápido por el hemisferio sur.

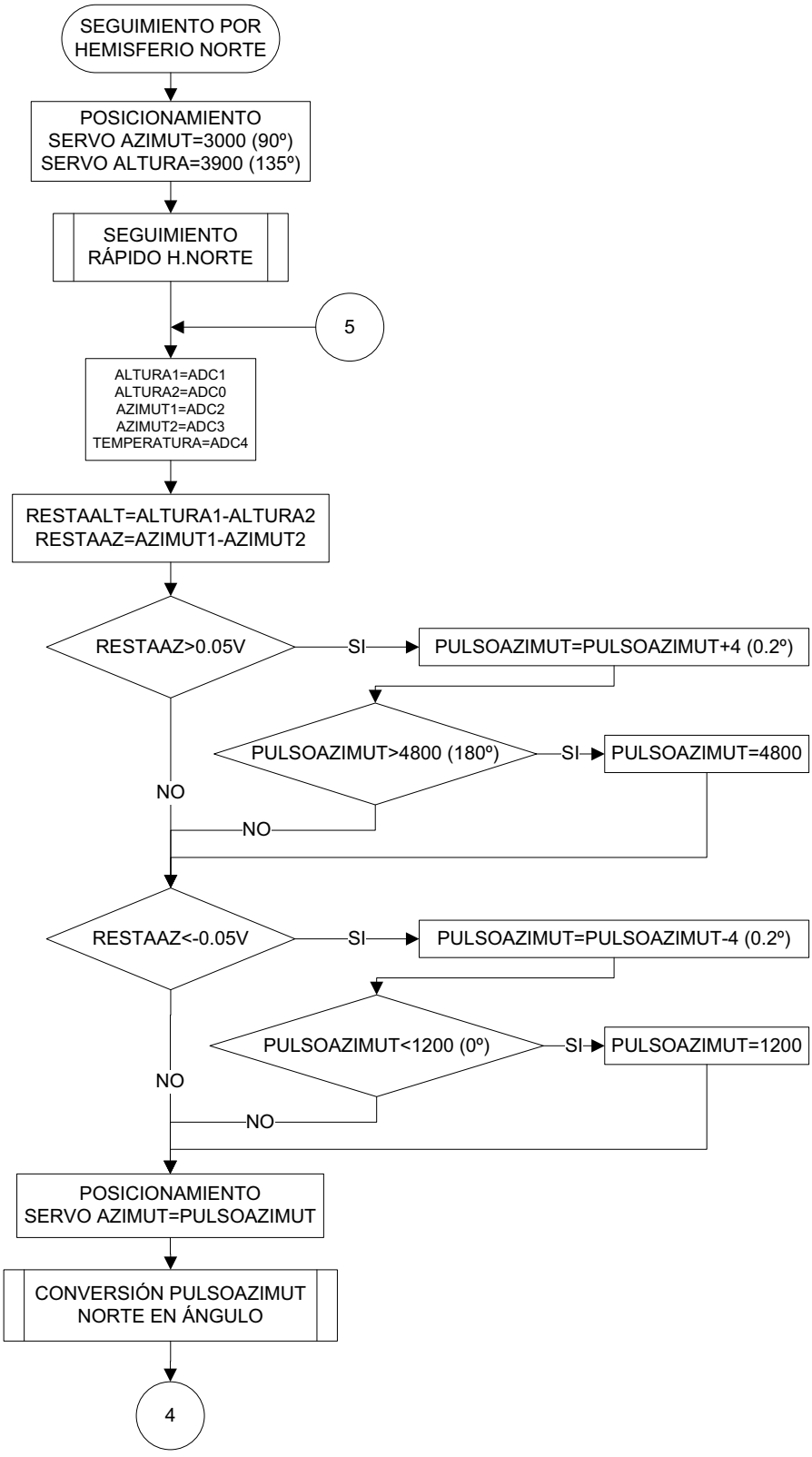


Figura 3. 31: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio norte. (Parte 1)

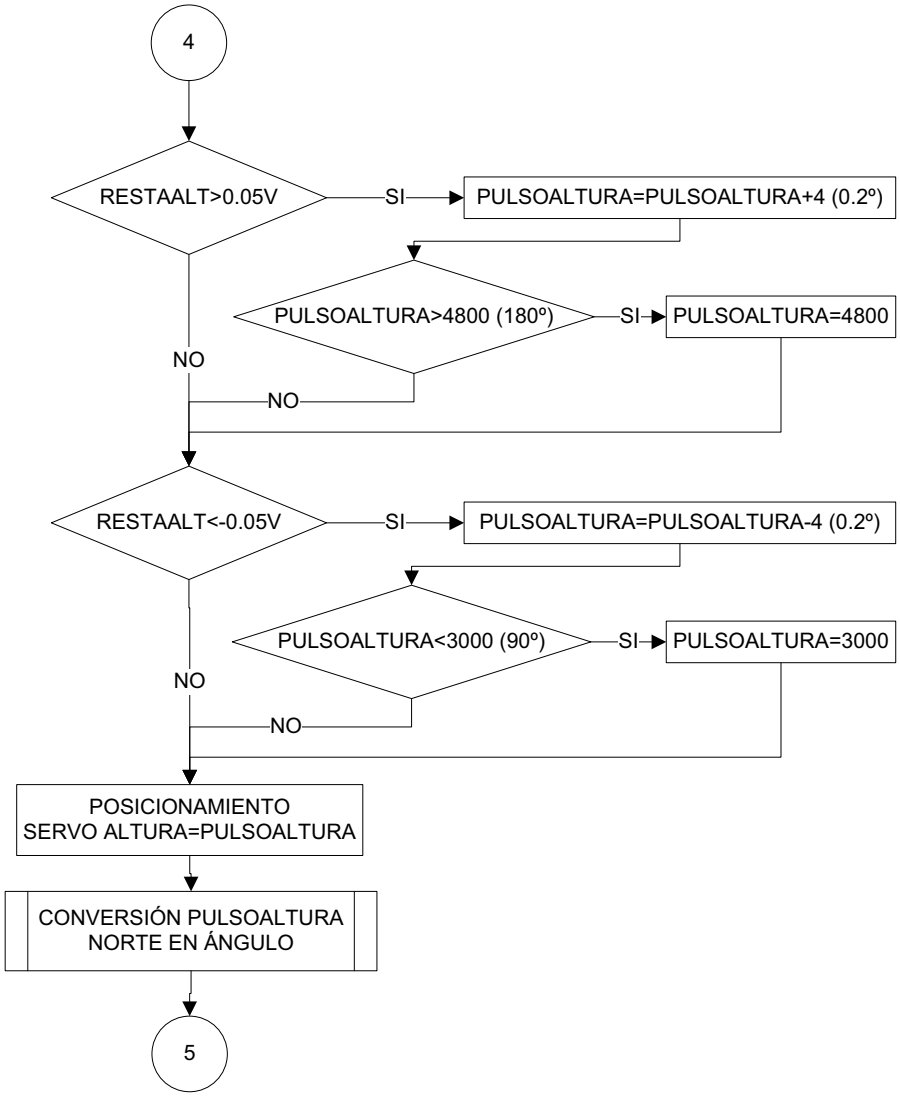


Figura 3. 32: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento por el hemisferio norte. (Parte 2)

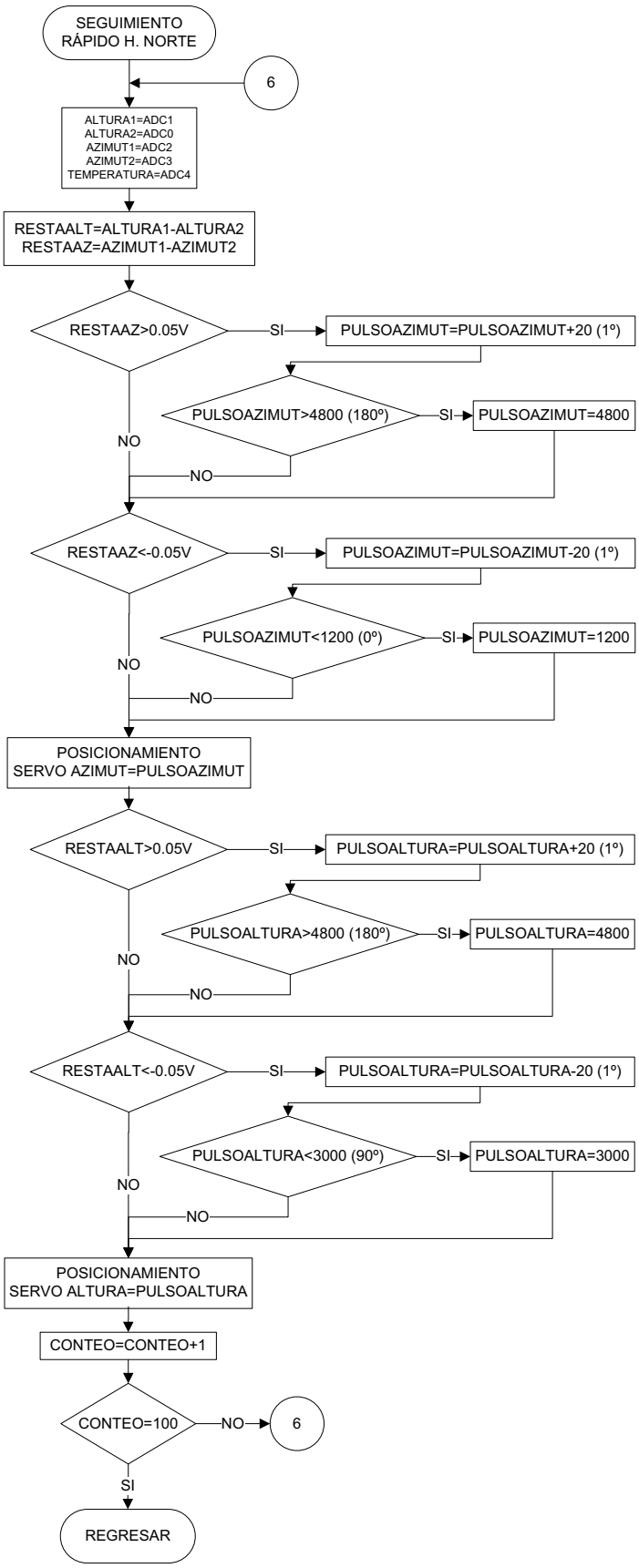


Figura 3. 33: Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento rápido por el hemisferio norte.

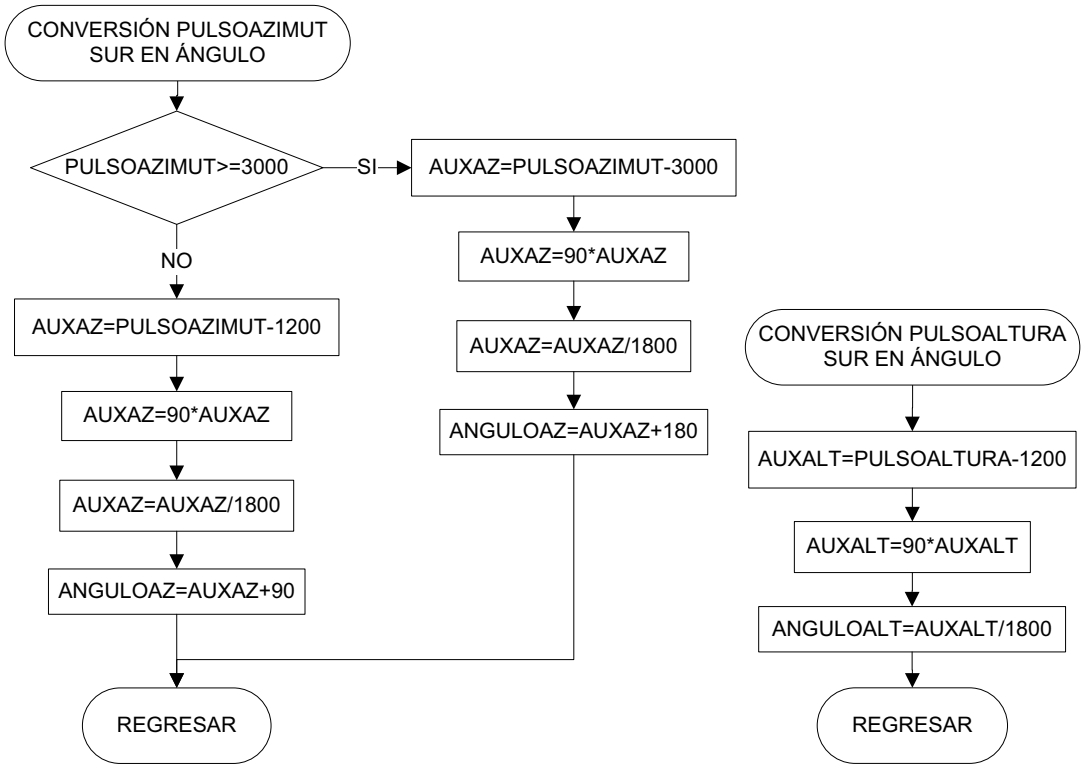


Figura 3. 34: Diagrama de flujo del algoritmo de conversión de los pulsos de los servomotores en ángulo para el hemisferio sur.

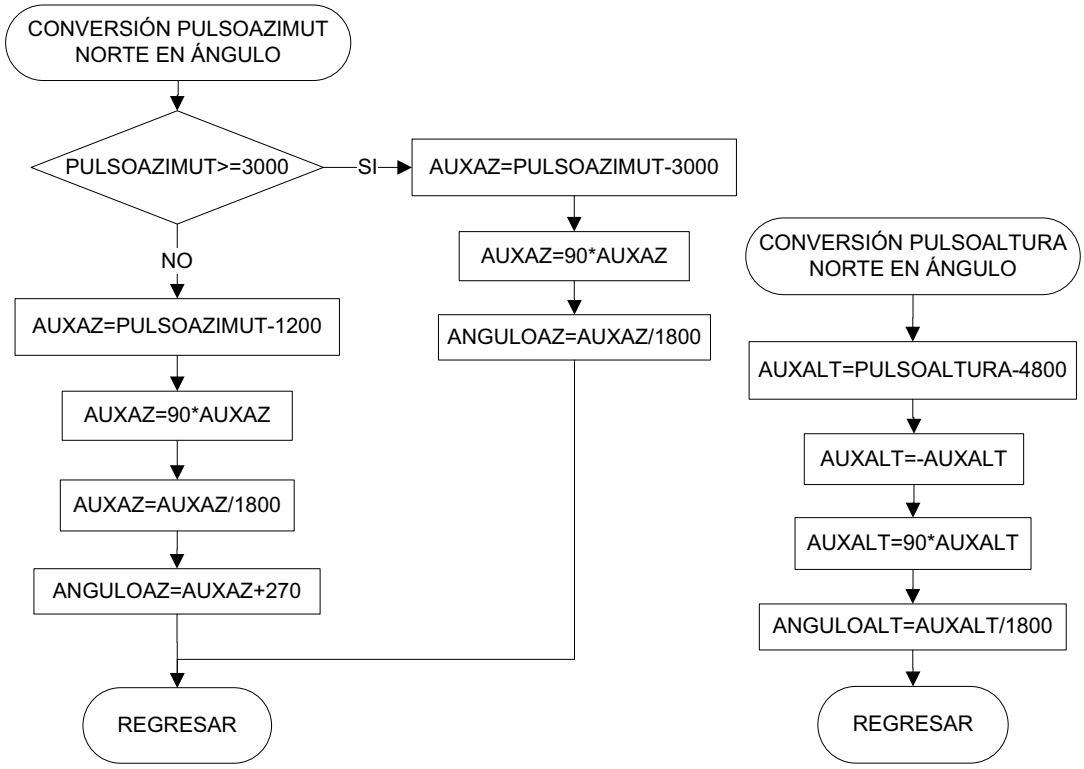


Figura 3. 35: Diagrama de flujo del algoritmo de conversión de los pulsos de los servomotores en ángulo para el hemisferio norte.

CAPÍTULO 4
PRUEBAS Y RESULTADOS

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se realizan pruebas con varios paneles solares que permitan acondicionar y calibrar las diferentes variables y parámetros que forman parte del sistema de caracterización y del sistema para determinar el ángulo de la mayor radiación incidente sobre el panel.

Resultado del correcto funcionamiento de los sistemas antes mencionados, se producen un grupo de datos correspondientes a los puntos de la curva característica I-V del panel solar probado, junto con la temperatura y el ángulo de incidencia de la radiación sobre el mismo al momento de la caracterización, éstos datos son transferidos a la interfaz gráfica, donde es necesario comprobar que los resultados sean los esperados, al contrastarlos con el comportamiento teórico ya estudiado en el CAPÍTULO 1.

Figura 4. 1: Sistema de caracterización y seguimiento solar diseñados para obtener las curvas características de paneles solares.

4.1. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL MÓDULO CARACTERIZADOR CON UN PANEL SOLAR DE 25W EXPUESTO A UNA RADIACIÓN ARTIFICIAL CONSTANTE

Para comprobar la efectividad del módulo de caracterización, se decide probar su funcionamiento en el laboratorio de Electrónica de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, el cual posee el panel solar de la figura 4.2 con las características mostradas.

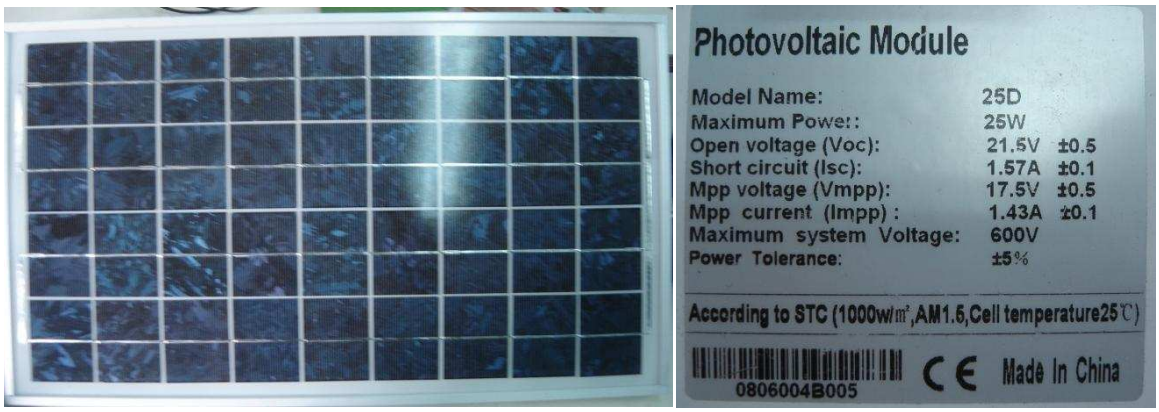


Figura 4. 2: Panel solar de 25W (imagen real) y datos de placa.

Las pruebas hechas a este panel consisten en exponerlo a una radiación constante, en este caso a una lámpara halógena (figura 4.3) mediante la cual no existirá mayor variación de intensidad luminosa.

Figura 4. 3: Panel solar expuesto a una lámpara halógena para conseguir radiación constante.

La utilidad de esta prueba radica en que ante una radiación constante, se espera obtener la misma forma de curva característica en todas las caracterizaciones que se realicen, lo cual permite verificar el funcionamiento tanto del módulo, el programa de control y de la interfaz gráfica.

La forma de la curva obtenida en cada caracterización y los datos de voltaje-corriente que la forman se muestra en la figura 4.4.

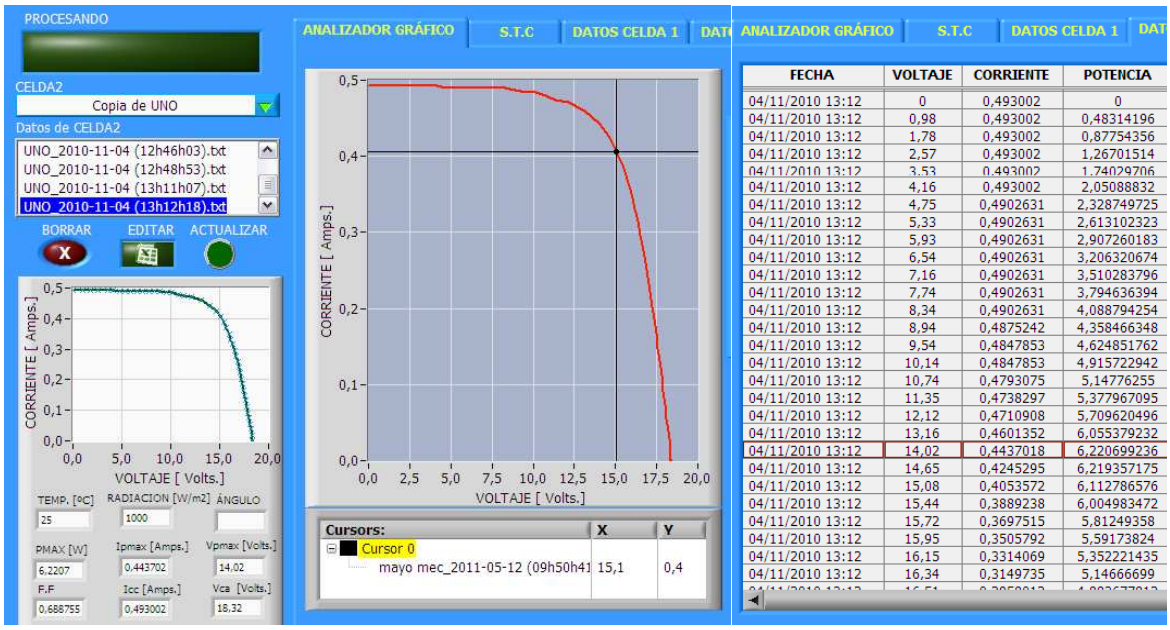


Figura 4. 4: Curva característica de un panel de 25W expuesto a una radiación constante (lámpara halógena) mostrada en la interfaz gráfica.

Con el objetivo de comprobar los resultados obtenidos en cuanto a valores de voltaje, corriente y forma de la curva característica, se procede a realizar la caracterización del panel de 25W expuesto a radiación constante, mediante el método de carga resistiva expuesto en 1.6.1.2, es decir se varía la carga del panel manualmente mediante un potenciómetro y los datos de voltaje-corriente son obtenidos mediante la lectura simultánea de un voltímetro y un amperímetro conectados en paralelo y serie al panel solar respectivamente. El esquema utilizado para esta prueba se muestra en la figura 1.40.

Los valores generados mediante esta prueba se presentan a continuación:

#	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (mA)	#	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (mA)
1	18,10	0,00	**13**	16,90	261,00
2	18,10	1,87	**14**	16,80	273,70
3	18,00	2,27	**15**	16,70	287,00
4	18,00	5,15	**16**	16,50	318,00
5	18,00	10,90	**17**	16,40	337,00
6	17,90	21,24	**18**	16,10	380,00
7	17,80	39,80	**19**	15,40	413,40
8	17,80	50,20	**20**	13,10	468,00
9	17,70	74,00	**21**	10,60	473,00
10	17,60	105,10	**22**	6,50	481,00
11	17,40	161,00	**23**	5,00	483,00
12	17,20	204,70	**24**	0,00	493,00

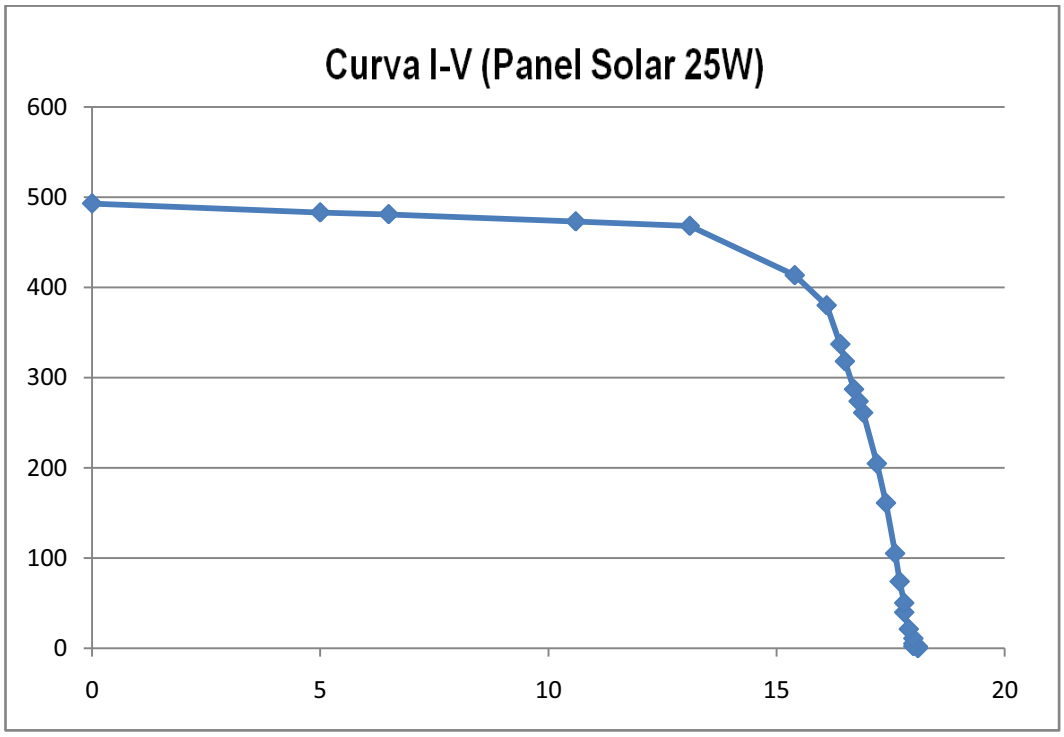


Figura 4. 5: Resultados de la caracterización de un panel de 25W expuesto a una radiación constante (lámpara halógena) mediante el método de carga resistiva.

Para comparar los resultados de las dos pruebas se exportan los datos de caracterización obtenidos con el módulo diseñado a una hoja de Excel y se grafican a una misma escala. La comparación se muestra en las siguientes gráficas:

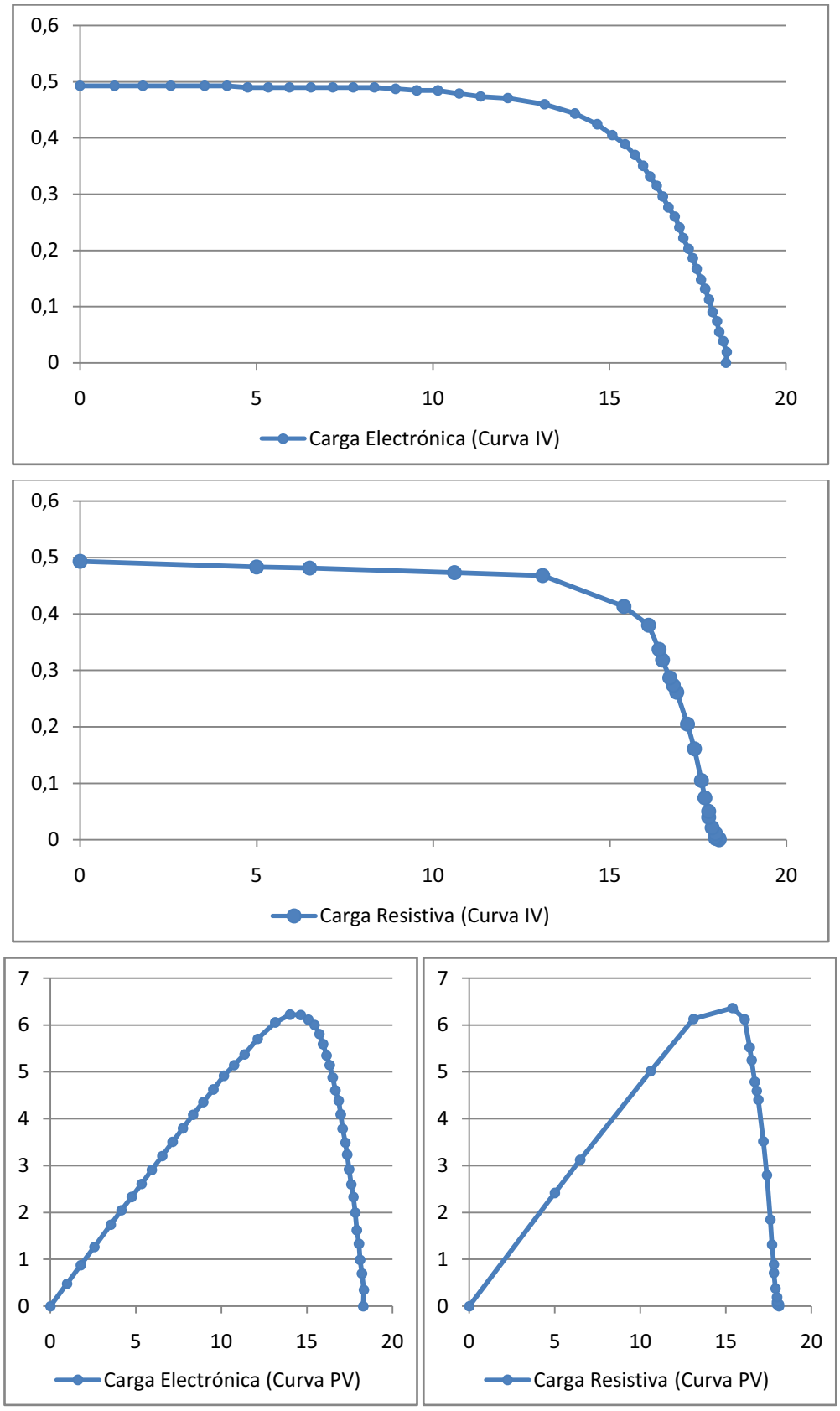


Figura 4. 6: Comparación entre las curvas I-V y P-V de un panel de 25W obtenidas mediante carga electrónica y carga resistiva ante una radiación constante.

Con esta comparación se verifica que las curvas obtenidas mediante el módulo de caracterización tienen la misma forma que las obtenidas con la variación de un potenciómetro. Sin embargo se nota la uniformidad de los puntos obtenidos mediante la caracterización electrónica, gracias a la acción de los controladores PI implementados.

4.2. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL MÓDULO CARACTERIZADOR CON UN PANEL SOLAR DE 80W EXPUESTO A LA RADIACIÓN SOLAR

Debido a que se comprueba que las curvas obtenidas con el módulo de caracterización tienen la forma correcta, es necesario chequear que soporte la potencia para la que fue diseñado, el panel de mayor potencia que se pudo conseguir es el mostrado en la figura 4.7 en la facultad de Ingeniería Eléctrica. El diseño es para 100W, sin embargo el panel de 80W expuesto a radiación de medio día, con cielo despejado, produce corrientes bastante altas suficientes para comprobar la efectividad del diseño. El objetivo de estas pruebas es simplemente comprobar que el módulo trabaje correctamente ante condiciones de alta radiación y con paneles de alta potencia.

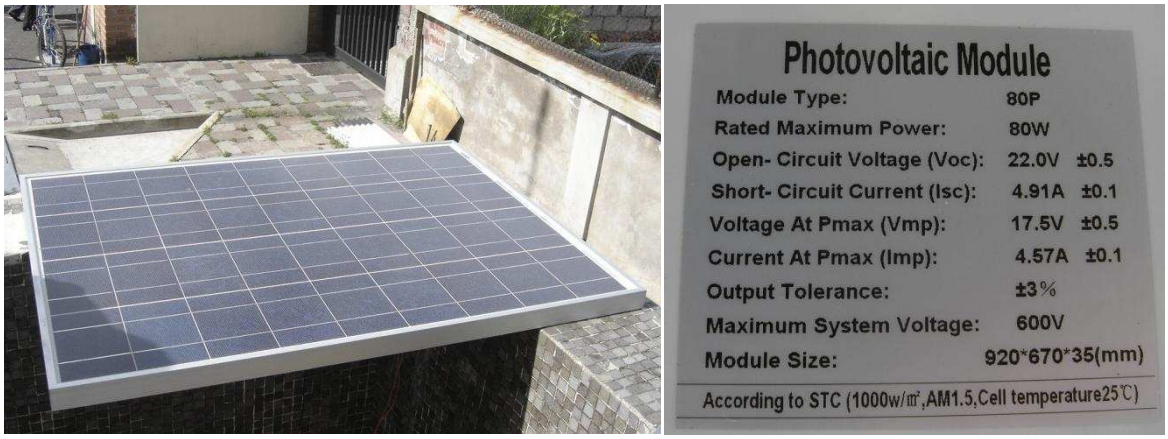


Figura 4. 7: Panel solar de 80W (imagen real) y datos de placa.

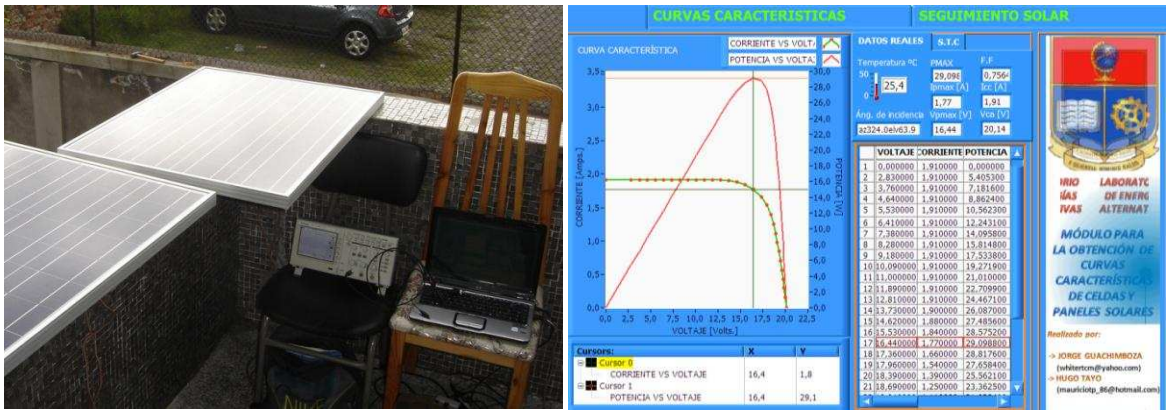


Figura 4. 8: Panel solar de 80W expuesto a la radiación solar y curva característica obtenida en la pantalla de caracterización del HMI.

En la figura 4.8 se muestra la forma en la que se prueba el panel de 80W, mientras en la figura 4.9 se muestra como la variación de la radiación incidente (luz solar) afecta el comportamiento de la curva característica del panel, se aprecia que el panel solar puede generar desde potencias muy bajas hasta potencias muy altas según la radiación incidente.

Lo más importante a resaltar es que el módulo trabaja correctamente durante estas pruebas, soportando potencias cercanas a 80W sin ningún problema.

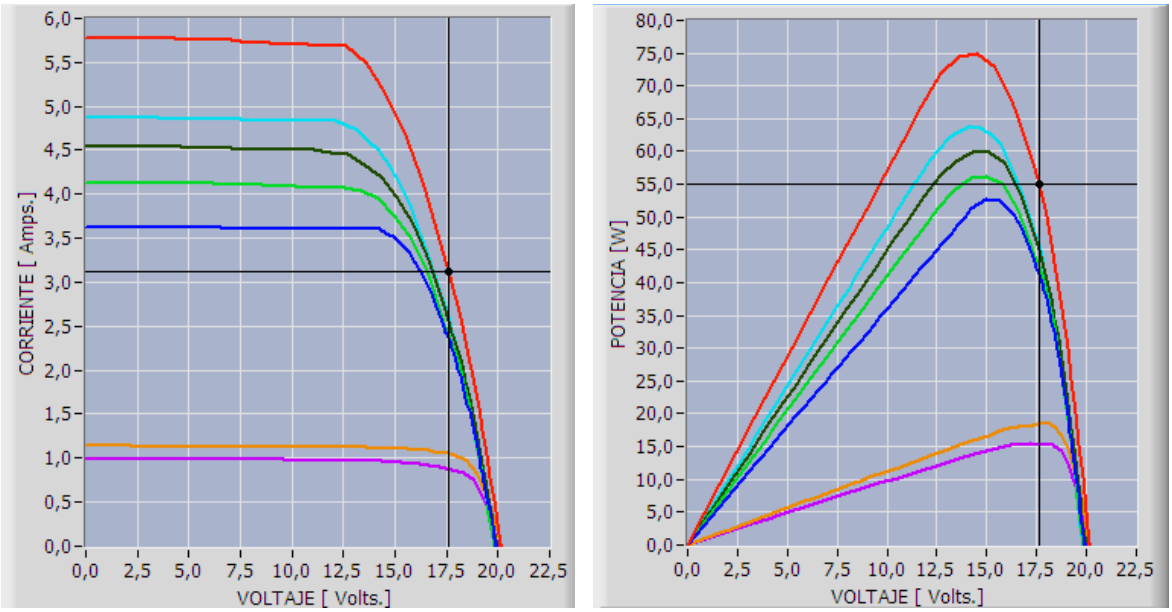


Figura 4. 9: Variación de las curvas características para un panel de 80W expuesto a la radiación solar.

4.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL MÓDULO CARACTERIZADOR CON UN PANEL SOLAR DE 22W

El Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica, es el lugar donde, el módulo de caracterización y de seguimiento solar serán utilizados para realizar pruebas y para impartir conocimientos didácticos a los estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional.
Este laboratorio posee un panel fotovoltaico de 22W y es el lugar donde se pudieron realizar la mayor cantidad de pruebas a distintas horas del día.
El panel solar y las características del mismo se muestran en la figura 4.10.

Figura 4. 10: Panel solar de 22W (imagen real) y datos de placa.

4.3.1. COMPONENTES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS PARA EL PANEL FOTOVOLTAICO DE 22W

Como ya se explicó, con este panel se realizan pruebas más detalladas, y se pudo comprobar el funcionamiento tanto del módulo caracterizador, del módulo de seguimiento solar y de las distintas ventanas que componen el HMI.
Entre las características que se pudieron comprobar se tiene:

- Obtención de curvas características con distinto número de puntos.
- Variación de las curvas características con respecto a la variación de la radiación incidente y la temperatura.
- Funcionamiento de los controladores PI diseñados para voltaje y corriente.

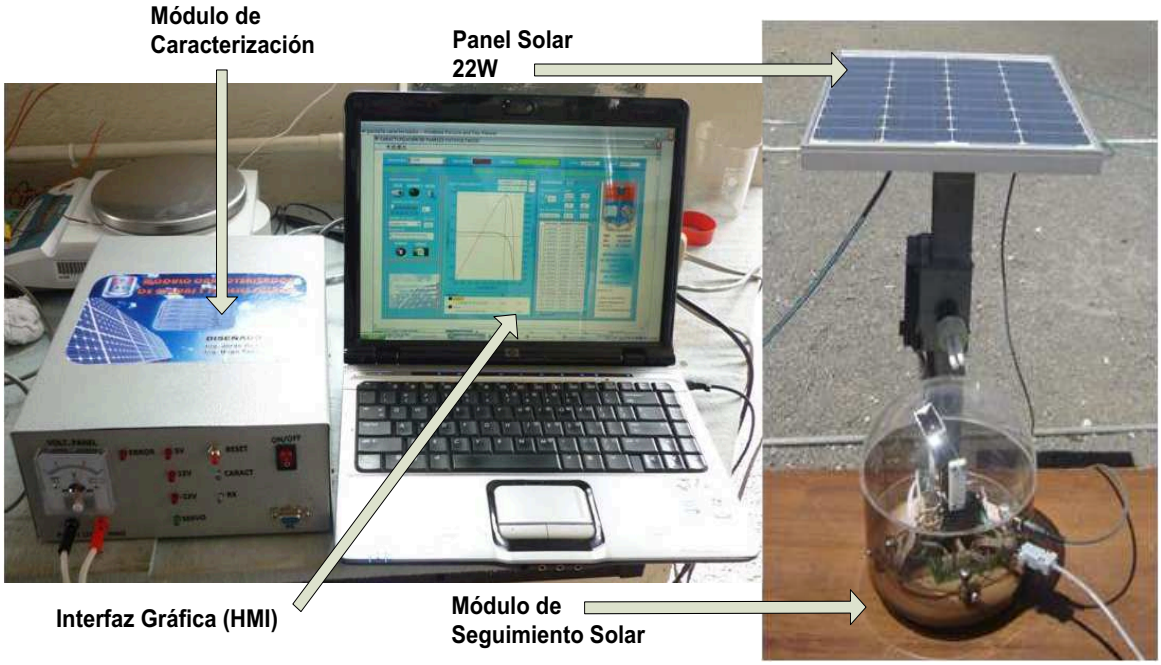


Figura 4. 11: Componentes utilizados para las pruebas del panel de 22W.

4.3.2. OBTENCIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS CON DISTINTO NÚMERO DE PUNTOS.

El software de caracterización permite elegir el número de puntos con los que se obtiene la curva característica, en la figura 4.12 se puede apreciar dos curvas características obtenidas a las mismas condiciones de prueba pero con distinto número de puntos.

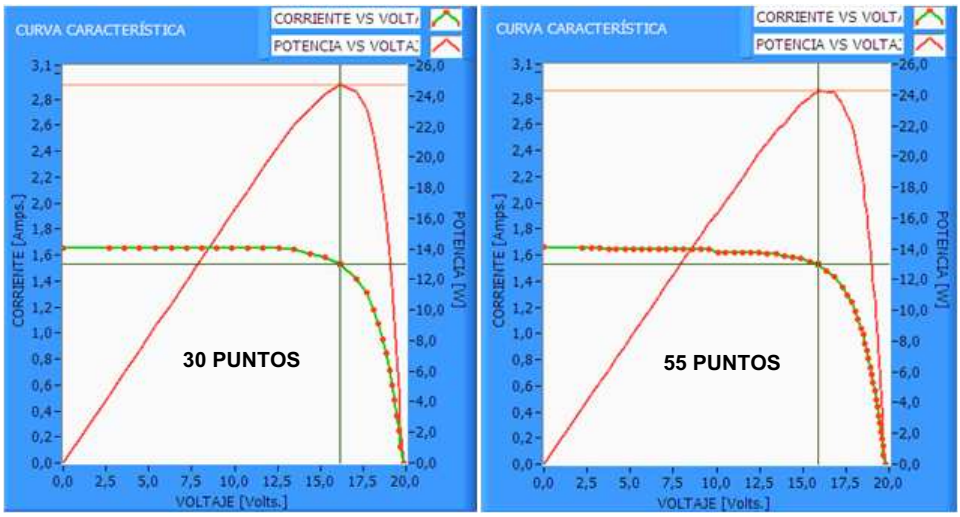


Figura 4. 12: Curvas características con distinto número de puntos.

Se puede ver que las dos curvas tienen la misma forma y los mismos valores en cuanto a puntos de máxima y mínima potencia y lo principal las dos curvas mantienen uniformidad respecto de su número propio de puntos.

4.3.3. VARIACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS CON RESPECTO A LA VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE Y LA TEMPERATURA.

Después de realizar varias pruebas de caracterización, se pueden poner en una misma gráfica varias de las curvas características almacenadas en la base de datos. En la figura 4.13 se puede apreciar un conjunto de curvas características I-V y P-V del panel de 22W para distintas condiciones ambientales.

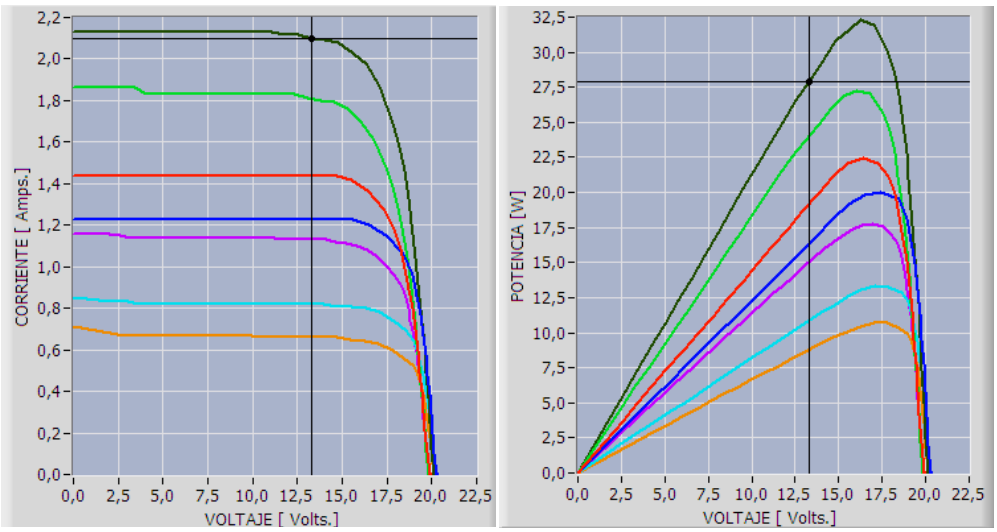


Figura 4. 13: Variación de las curvas características para un panel de 22W expuesto a la radiación solar.

Para entender el comportamiento del panel ante las condiciones de radiación incidente y temperatura superficial, se toman pocas curvas que reflejen el funcionamiento real del panel solar, obtenido gracias al módulo de caracterización diseñado.

En la figura 4.14 se observa cómo influye la radiación incidente en las curvas características del panel solar de 22W, el aumento de radiación provoca un incremento en la corriente máxima, produciendo a su vez un aumento en la potencia entregada.

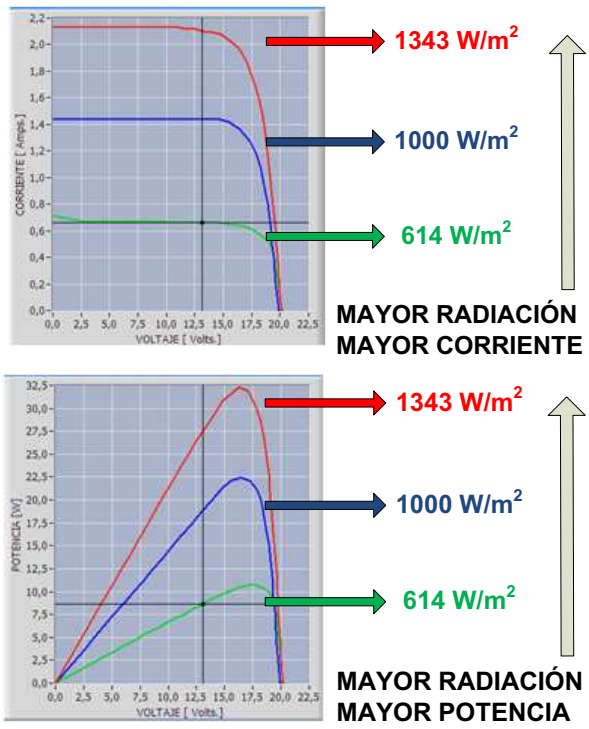


Figura 4. 14: Variación de las curvas características con la radiación incidente.

En la figura 4.15 se observa cómo influye la temperatura superficial en las curvas características del panel solar de 22W, el aumento de temperatura produce una disminución en el voltaje de circuito abierto (desde 20,3V hasta 19,9V), produciendo a su vez una pequeña pérdida en la potencia entregada.

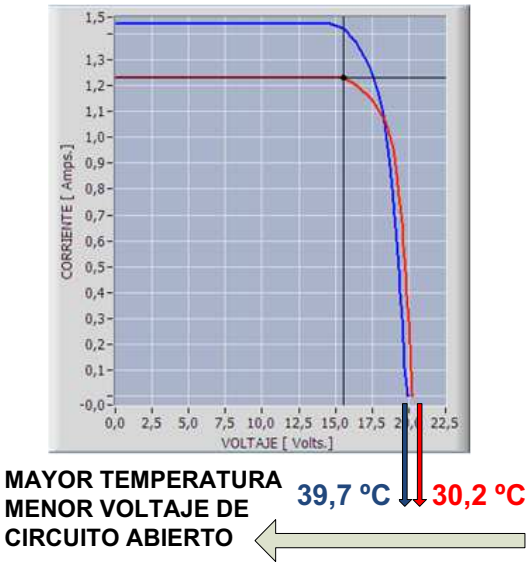


Figura 4. 15: Variación de las curvas características con la temperatura superficial.

4.4. PRUEBAS REALIZADAS PARA CALIBRAR LOS ÁNGULOS ENTREGADOS POR EL MÓDULO DE SEGUIMIENTO SOLAR

Como se explicó en el CAPÍTULO 3, debido a la lógica de construcción del módulo de seguimiento solar, es necesario posicionarlo de manera que la flecha dibujada junto a los servomotores (figura 4.16) apunte hacia el norte y así conseguir que el ángulo en azimut sea el correcto, para esto se utiliza una brújula para colocar el módulo de manera correcta antes de empezar las pruebas de caracterización.

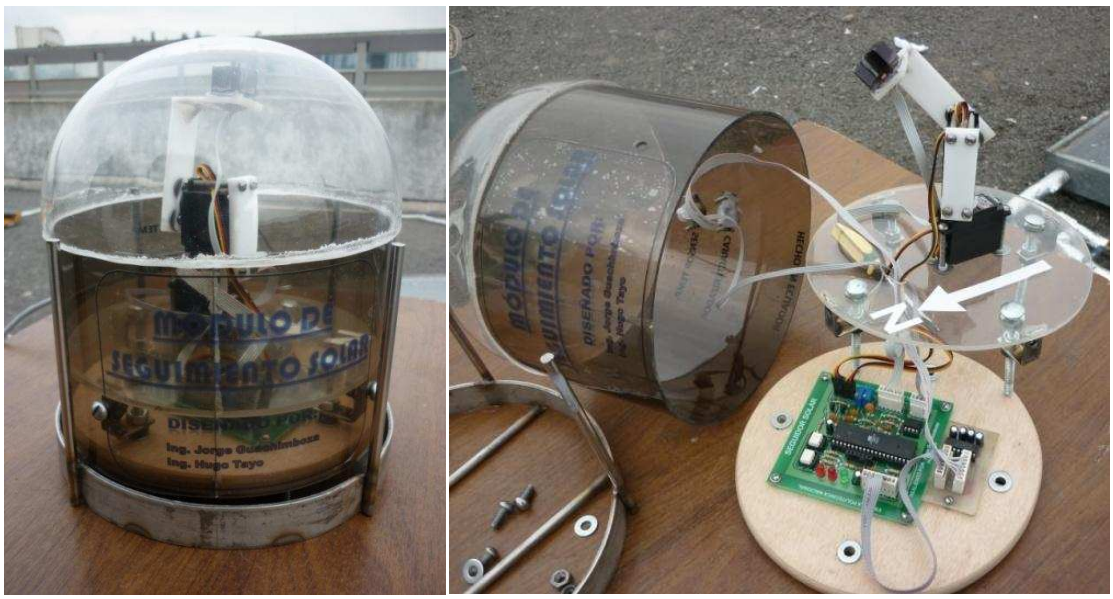


Figura 4. 16: Módulo de seguimiento solar.

El módulo de seguimiento tal como se diseñó, cumple su función de seguir el punto de máxima radiación, sin embargo para poder comprobar que está proporcionando el ángulo correcto en altura, se recurre a un principio básico en este caso la trigonometría, ya que se utiliza el triángulo rectángulo formado por una barra colocada perpendicular a la superficie y su sombra (figura 4.17), mediante el análisis de este triángulo se determina si el ángulo en altura de la radiación incidente, que se está mostrando en la pantalla de la interfaz gráfica, es el correcto.

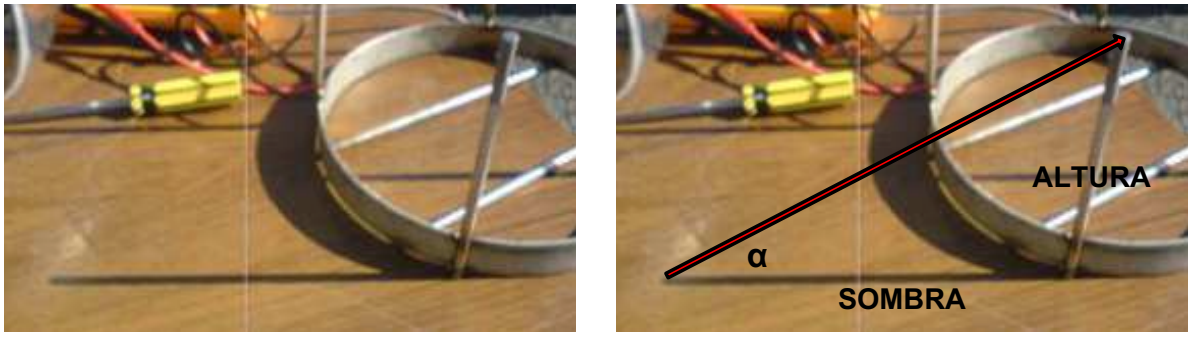


Figura 4. 17: Ángulo de la radiación solar incidente sobre la superficie.

En la figura 4.18 se muestra que el seguidor solar tiene la misma inclinación que la hipotenusa del triángulo formado por la barra perpendicular a la superficie y su sombra. Por lo cual para comprobar si el módulo de seguimiento está proporcionando el ángulo en altura correcto, simplemente hay que medir la longitud de la barra, medir la longitud de la sombra proyectada y aplicar la siguiente ecuación:

$$\tan \propto = \frac{\boldsymbol{ALTURA}}{\boldsymbol{SOMBRA}} = \frac{\boldsymbol{Y}}{\boldsymbol{X}} \qquad \textbf{Ec.}4.\ 1$$

De donde:

$$\propto = \tan^{-1} \frac{\boldsymbol{ALTURA}}{\boldsymbol{SOMBRA}} = \tan^{-1} \frac{\boldsymbol{Y}}{\boldsymbol{X}} \qquad \textbf{Ec.}4.\ 2$$

Después de calcular el ángulo en altura mediante la ecuación anterior, se procede a comparar el ángulo proporcionado por el módulo de seguimiento solar en el computador y realizar las calibraciones necesarias para corregir errores que pudieran presentarse.

Figura 4. 18: Comparación entre el ángulo de radiación solar y el ángulo medido por el módulo seguidor.

Finalmente para comprobar que el módulo de seguimiento este correctamente posicionado, respecto de la radiación incidente, basta con observar que el brazo del seguidor sea paralelo a la sobra proyectada por la barra perpendicular a la superficie, como se muestra en la figura 4.19.

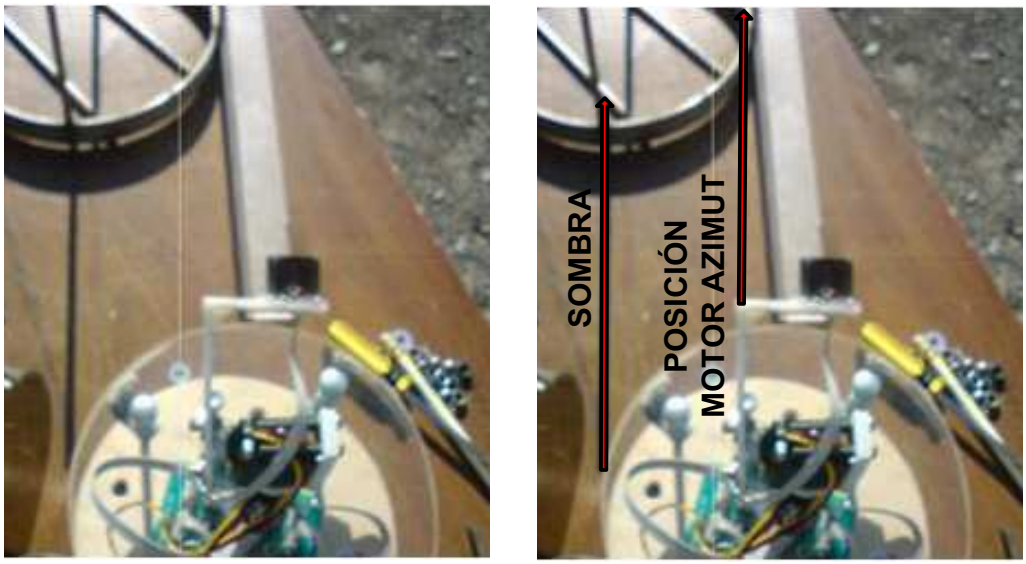


Figura 4. 19: Posición en azimut del módulo de seguimiento respecto de la radiación incidente.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego del proceso de diseño y construcción de un sistema de caracterización de paneles solares de hasta 100W-12V, para obtener las curvas características en base a la variación de la temperatura y al ángulo de incidencia de la radiación, se pueden citar las siguientes conclusiones y recomendaciones.

5.1. CONCLUSIONES

- El presente proyecto cumple con el objetivo propuesto, el cual consiste en obtener las curvas características de cualquier panel fotovoltaico de hasta 100W-12V a las condiciones ambientales presentes al momento de la caracterización, midiendo el ángulo de inclinación de la máxima radiación incidente sobre el panel y la temperatura superficial del mismo. Esto lo demuestran las distintas pruebas presentadas en el CAPÍTULO 4, donde se realizan experimentaciones con tres paneles de distintas potencias.

- Se concluye que el método de caracterización, basado en la variación electrónica de la carga observada por el panel solar, mediante el control lineal de los MOSFETs funciona correctamente, permitiendo medir desde el voltaje de circuito abierto hasta la corriente de corto circuito.

- El control lineal de un interruptor electrónico produce una corriente circulante constante desde el panel solar, a diferencia de un control PWM que produce una corriente pulsatoria, esto evita el uso de un filtro de entrada para obtener una corriente constante, para el correcto funcionamiento de los sensores de corriente.

- Los sensores de corriente efecto hall son los más indicados para la medición de corriente en el caso de un circuito de caracterización, ya que

no tienen la necesidad de colocar resistencias extras para la medición de esta variable (sensores tipo espejo de corriente), permitiendo que la corriente de corto circuito medida sea más exacta.

- La utilización de un control proporcional-integral de voltaje y otro de corriente para la variación de la carga vista por el panel solar, es considerado debido al comportamiento de la curva característica, la cual mantiene la corriente de corto circuito casi constante, mientras el voltaje varía desde 0 hasta un voltaje cercano al de circuito abierto. A partir de este punto el voltaje permanece casi constante y la corriente disminuye hasta 0. Con la utilización de los dos controladores se consigue medir tanto el voltaje y la corriente en puntos equidistantes.

- El uso de LabVIEW para el desarrollo del software, para graficar y almacenar curvas características, permite implementar un programa de altas prestaciones, con una interfaz de usuario amigable y funcional. Dicho HMI es capaz de comparar las curvas obtenidas durante un largo período de tiempo y de distintos paneles solares, convirtiéndolo en una herramienta adecuada para facilitar el aprendizaje de los estudiantes en este campo de las energías alternativas.

- El seguimiento del punto de máxima radiación solar efectuado por el módulo de seguimiento es muy importante, ya que al tener este ángulo y el valor de radiación solar global, dada por un instrumento como un piranómetro, permite encontrar la verdadera radiación que incide en el plano del panel solar.

- Con base en la teoría del comportamiento de la curva característica de un panel solar y los resultados obtenidos, gracias al módulo de caracterización, se determina que uno de los factores más adversos para los módulos son las elevadas temperaturas de operación, ya que el voltaje decrece y el efecto neto es una disminución de la potencia. Por otra parte la corriente es función lineal de la radiación solar, es decir a mayor

radiación, el panel entrega una mayor corriente y el efecto neto es un aumento de la potencia que puede entregar el panel solar.

- Con respecto al funcionamiento de los paneles solares, los datos de placa dados por el fabricante son valores a condiciones estándar (STC), en especial hay que considerar que son pruebas a una radiación de 1000 W/m^2 y en nuestro país ante un cielo despejado a medio día fácilmente se sobrepasa este nivel de radiación, por lo cual un panel solar expuesto a una radiación mayor a los 1000 W/m^2 produce una potencia superior a la que está en su placa.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para obtener datos más precisos, en cuanto a las curvas I-V de un panel solar, se puede construir un sistema que permita emitir una iluminación controlada y de esta manera tener varios niveles de radiación previamente determinados para cada curva característica.

- Se puede realizar la construcción de un proyecto similar basado en otro tipo de conversor DC/DC y con un control PWM de los interruptores electrónicos, de esta manera poder comparar los resultados obtenidos y determinar la mejor manera de implementación de un módulo de caracterización con fines comerciales.

- Todos los fabricantes de celdas y paneles solares deben incorporar información sobre las curvas I-V para diferentes temperaturas de trabajo, así como para distintos niveles de radiación, para lo cual si en el país existe una compañía dedicada a la fabricación de los mismos se recomienda el uso del módulo diseñado.

- Para la construcción de un sistema mecánico como el robot seguidor de Sol es conveniente realizar primero un diseño completo mediante un software CAD, de tal forma que se obtenga un diseño virtual, para realizar

pruebas de esfuerzo, movimiento, etc. que permitan dimensionar actuadores y corregir errores en la etapa de diseño, en lugar de tener que hacerlo cuando se tiene la máquina ya construida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **RIBOT I MARTÍN, Jaume.** *"CURSO DE ENERGÍA SOLAR, C.T.E.".* Cuarta Edición. Centro de Tecnología Educativa, S.A. España. Enero 2001.

[2] **SÁNCHEZ MIÑO, Santiago.** *"ENERGÍAS RENOVABLES: Conceptos y Aplicaciones".* WWF - Fundación Natura. Quito. Junio 2003.

[3] **ANDÚJAR MÁRQUEZ, José; ENRIQUE GÓMEZ, Juan; DURÁN ARANDA, Eladio; MARTÍNEZ BOHÓRQUEZ, Miguel.** *"SISTEMA PARA LA GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE CURVAS I-V, P-V Y MONITORIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS".* Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automatización. Universidad de Huelva. España. Septiembre 2004.

[4] **FERNÁNDEZ FERICHOLA, Julio. "***CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON DISPOSITIVO PORTÁTIL"*. Universidad Carlos III de Madrid. España.

[5] **PERRASO BASANTES, Luis G.** *"ADQUISICIÓN DE DATOS, SUPERVISIÓN Y CONTROL PID UTILIZANDO CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES"*. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Noviembre 1995.

[6] **PRASAD KOIRALA, Binod; SAHAN, Benjamin; HENZE, Norbert. "***STUDY ON MPP MISMATCH LOSSES IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS".*

[7] **GOW, J.; MANNING, C.** *"DEVELOPMENT OF A PHOTOVOLTAIC ARRAY MODEL FOR USE IN POWERELECTRONICS SIMULATION STUDIES"*. March 1999.

[8] **ASTROSURF** [En línea]
http://www.astrosurf.com/astronosur/coordenadas.htm

[9] **ABENGOA SOLAR** [En línea]
http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/tecnologias/fotovoltaica/que_es/index.html

[10] **LCARDABA** [En línea]
http://www.lcardaba.com/articles/heatsinks/heatsinks.htm#ejemplo

[11] **BEYOND LOGIC** [En línea]
http://www.beyondlogic.org/serial/serial.pdf

[12] **PV EDUCATION** [En línea]
http://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/solar-energy
http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/properties-of-light
http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle
http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/module-circuit-design
http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/bypass-diodes

[13] **SOLAR AND HELIOSPHERIC OBSERVATORY** [En línea]
http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/eit_304/1024/latest.html
http://sohowww.nascom.nasa.gov/classroom/images/layers.gif

[14] **WIKIPEDIA** [En línea]
http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ecl%C3%ADptica-plano-lateral-ES.png
http://es.wikipedia.org/wiki/Fotorresistencia
http://es.wikipedia.org/wiki/Solsticio
http://es.wikipedia.org/wiki/Equinoccio

[15] **BEADIVERSIFICACION.BLOGSPOT** [En línea]
http://beadiversificacion.blogspot.com/2007/09/ejercicios-3-zonas-climticas.html

[16] **DFORCESOLAR** [En línea]
http://www.dforcesolar.com/energia-solar/efecto-fotoelectrico/

[17] **ABET TECHNOLOGIES** [En línea]
http://www.abet-technologies.com/test-solutions/pv-iv-solutions

[18] **VISION TECHNOLOGY** [En línea]
http://www.visiontec.com.sg/images/VS6810.pdf

[19] **GLEMBOCKI, O.; TAKARABE, Kemichi**. *"ALUMINUM GALLIUM ARSENIDE (AlxGa1-xAs)"*, en "*HANDBOOK OF OPTICAL CONSTANTS OF SOLIDS II*", editado por E. Palik, Academic Press, (1991).

[20] **ELEKI-JACK** [En línea]
http://www.eleki-jack.com/arm/2010/11/mbedmbed5.html

[21] **LET'S MAKE ROBOTS** [En línea]
http://letsmakerobots.com/node/7303

[22] **BIOMED** [En línea]
http://www.biomed.engsoc.org/node/36

[23] **MRO ELECTRONICS** [En línea]
http://www.mroelectronics.com/mro/products.asp?PN=R53-1D30-6

[24] **ELECTRONICA MAGNABIT** [En línea]
http://www.electronicamagnabit.com/tienda/transistores/23-transistor-npn-2n3904.html

[25] **LED-DEPOT** [En línea]
http://www.led-depot.co.uk/1N4148-Switching-Diodes

[26] **ECURED** [En línea]
http://www.ecured.cu/index.php/Archivo:Figura_5_Rafa2.JPG

[27] **FARNELL** [En línea]
http://it.farnell.com/toshiba/tlp2200/opto-accoppiatore-trigger-di-schmitt/dp/1225845

[28] **UNIVERSIDAD DE VIGO** [En línea]
http://www-gris.det.uvigo.es/wiki/pub/Main/PracticasFT/puerto-serie.pdf

[29] **CENTRALTREASURE** [En línea]
http://interface.centraltreasure.com/rs485.html

[30] **SMART SYSTEMS ELECTRONICS** [En línea]

http://www.smartsystemselectronics.com.mx/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=2&vmcchk=1&option=com_virtuemart&Itemid=56

[31] **DIGIKEY** [En línea]
http://parts.digikey.co.uk/1/1/822557-ic-mcu-avr-16k-flash-40-dip-atmega164p-20pu.html

[32] **SERVOCITY** [En línea]
http://www.servocity.com/html/hs-311_standard.html

[33] **ROBOTJUANYDAVID.BLOGSPOT** [En línea]
http://robotjuanydavid.blogspot.com/

[34] **MERCADO LIBRE** [En línea]
http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-56391742-4n25-optoacoplador-transistor-5pzas-pic-atmel-avr-atmega-_JM

[35] **RS ONLINE** [En línea]
https://thailand.rs-online.com/web/search/search/BrowseAction.html

[36] **CABEZACUADRADA** [En línea]
http://www.cabezacuadrada.cl/product.php?id_product=39

[37] **RCS COMPONENTS** [En línea]
http://www.rcscomponents.kiev.ua/modules.php?name=Asers_Shop&s_op=viewproductdetails&lid=-22561

[38] **MENDES CASARO, Marcio; CRUZ MARTINS, Denizar**. *"MODELO DE ARRANJO FOTOVOLTAICO DESTINADO A ANÁLISES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA VIA SIMULAÇÃO".* Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Monteiro Lobato, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

[39] **MOTA, Nuno; VILARINHO, Vita; CLÁUDIO, Nuno; MARGATO, E.; RODRIGUES, Sales.** *"VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS".* Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

[40] **ELECTRICIDAD GRATUITA** [En línea]
http://www.electricidad-gratuita.com/energia%20fotovoltaica.html

[41] **DELTA ENERGIE** [En línea]
http://www.deltaenergie.it/solare-fotovoltaico/pannelli-fotovoltaici

[42] **Manual ACS712**
HALL EFFECT-BASED LINEAR CURRENT SENSOR IC.
Allegro MicroSystems, Inc. (www.allegromicro.com)

[43] **Manual ACS715**
HALL EFFECT-BASED LINEAR CURRENT SENSOR IC.
Allegro MicroSystems, Inc. (www.allegromicro.com)

[44] **Manual AD620**
LOW POWER INSTRUMENTATION AMPLIFIER
Analog Devices, Inc. (http://www.analog.com)

[45] **Manual IRF640**
N-CHANNEL, MOSFET
Fairchild Semiconductor Corporation. (www.fairchildsemi.com)

[46] **Manual TLP2200**
PHOTOCOUPLER (MOSFET GATE DRIVER)
TOSHIBA

[47] **Manual ATMEGA164P**
8-BIT AVR MICROCONTROLLER
Atmel Corporation (www.atmel.com)

[48] **Manual 4N25**
6-PIN OPTOISOLATORS TRANSISTOR OUTPUT
Fairchild Semiconductor Corporation. (www.fairchildsemi.com)

[49] **Manual LM35**
PRECISION CENTIGRADE TEMPERATURE SENSORS
National Semiconductor Corporation. (www.national.com)

[50] **Manual LM358**
LOW POWER DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS
National Semiconductor Corporation. (www.national.com)

[51] **Manual ATMEGA16**
8-BIT AVR MICROCONTROLLER
Atmel Corporation (www.atmel.com)

[52] **LFN PHOTOVOLTAICS** [En línea]
http://www.lfnphotovoltaics.com/?p=energia-fotovoltaica/energia-solar

[53] **BLOGSPOT** [En línea]
http://clima-virtual-vs-real.blogspot.com/

[54] **AMSOLAR** [En línea]
http://www.amsolar.com/home/amr/page_164

[55] **GASQUET, Héctor.** *"CONVERSIÓN DE LA LUZ SOLAR EN ENERGÍA ELÉCTRICA. MANUAL TEÓRICO Y PRÁCTICO SOBRE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS".* Solartronic, S.A. Morelos, México. Octubre 2004.

ANEXOS

ANEXO A
MANUAL DE USUARIO

MANUAL DE USUARIO DE LA INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW PARA CARACTERIZAR PANELES SOLARES

Para el diseño del Interfaz Hombre-Máquina (HMI) se tiene como objetivo considerar un software que permita visualizar, almacenar y simular las curvas características de los módulos fotovoltaicos probados, además de permitir visualizar en tiempo real, la trayectoria solar y de igual manera almacenarla para llevar un registro de trayectorias del Sol, esto permite determinar cuan alejado está el Sol de la línea ecuatorial en las diferentes épocas del año.
Sobre esta base, se diseña la interfaz en el entorno LABVIEW 8.6.

La pantalla principal de la interfaz consta de las siguientes partes:

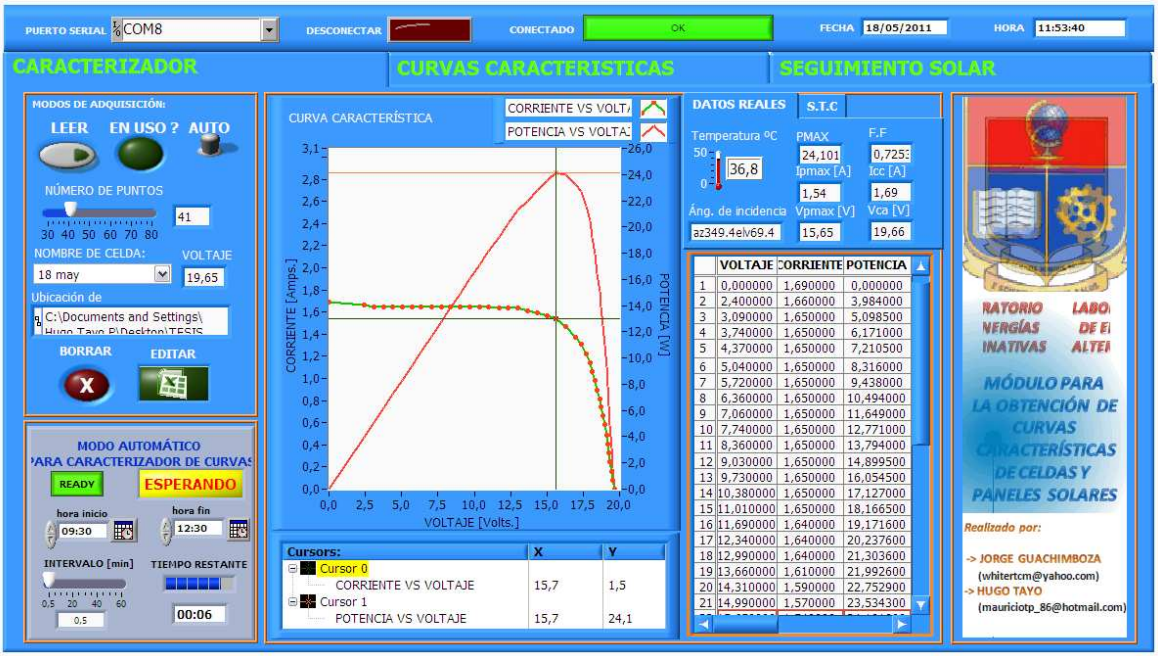
- Una ventana destinada a la caracterización del módulo fotovoltaico conectado, donde se realiza la adquisición y visualización de curvas características, sea de modo manual o automático.

- Una segunda ventana destinada al acceso a la base de datos de curvas características de todos los paneles probados, con estos datos se puede comparar las curvas de un panel a distintas condiciones ambientales para observar su comportamiento, y también comparar dos paneles distintos. Una subventana permite la simulación del panel que se elija, para observar el comportamiento que tendría en función de la variación de los parámetros de construcción (Rs y Rp) o los parámetros ambientales (temperatura y radiación global incidente).

- Finalmente posee una tercera ventana que permite visualizar y almacenar la trayectoria que actualmente está siguiendo el Sol, así como las trayectorias almacenadas anteriormente y poder comparar los movimientos del Sol en las distintas épocas del año.

A.1 VENTANA PARA CARACTERIZACIÓN

Esta ventana que se muestra en la figura, consta básicamente de tres partes: una para el control de la comunicación, una de control para la caracterización y otra de visualización de resultados.



A.1.1 PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA COMUNICACIÓN SERIAL

Esta es una sección con forma de barra, donde se puede seleccionar el nombre del puerto serial con el que se llevará a cabo la comunicación, además hay indicadores visuales que informan el estado de la comunicación (conectado/desconectado) y parámetros adicionales como la fecha y la hora. Adicionalmente el usuario puede deshabilitar el uso del puerto serial activando el botón “DESCONECTAR”.

A.1.2 PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA CARACTERIZACIÓN

Esta sección contiene las opciones para el sistema de control realice la caracterización. Estos controles son:

LEER: Envía la orden para realizar la caracterización y la adquisición de datos para la posterior visualización de la curva característica del panel conectado. Los datos de la lectura son almacenados en un archivo de texto, nombrado de acuerdo a la fecha y hora de lectura.

AUTO: Habilita la configuración de los parámetros para que el sistema adquiera automáticamente datos de voltaje y corriente, trace la curva característica y almacene los datos de cada panel solar probado en un archivo de texto, nombrado de acuerdo a la fecha y hora de lectura, de acuerdo al intervalo de tiempo configurado y las horas de inicio y final configurados para esta adquisición.

NÚMERO DE PUNTOS: Indica al sistema de caracterización la cantidad de mediciones (N) que se deben realizar para trazar una curva que tendrá la misma cantidad de puntos.

NOMBRE DE CELDA: Indica el nombre con que se identifica al panel procesado.

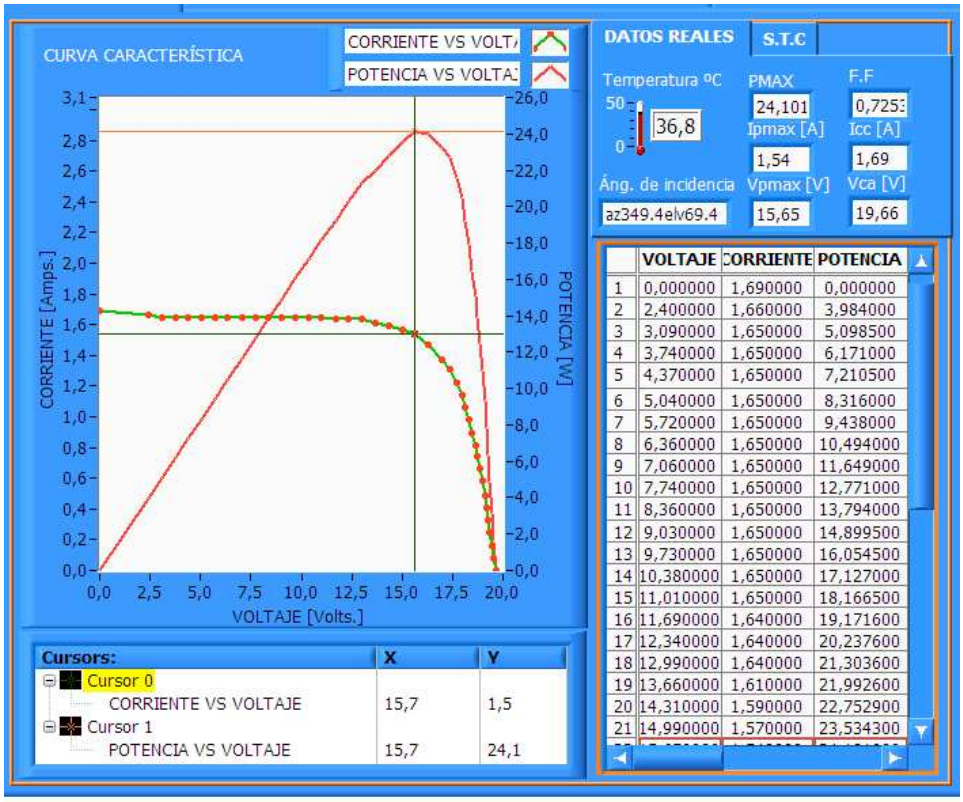
BORRAR: Borra el archivo de texto generado en la última caracterización.

EDITAR: Abre el archivo de texto y permite editar los datos con Microsoft Excel.

A.1.3 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

Esta sección visualiza los resultados de la adquisición realizada consta principalmente de:

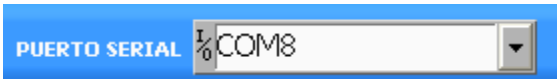
- La gráfica con las curvas características (P-V e I-V).
- Los parámetros principales del panel solar probado (Vca, Icc, Pmax, FF).
- Los valores de las condiciones bajo las que se llevó a cabo la medición (temperatura y ángulo de incidencia de la radiación).
- Una tabla en la que se muestran todas las mediciones que se han tomado para trazar la curva característica.
- Además existe una pestaña en la que el usuario puede observar la proyección de los resultados a las condiciones de prueba estándar, es decir, se muestra los resultados que se obtendrían si las mediciones fueran realizadas de acuerdo a las S.T.C osea radiación de 1000W/m2 y 25°C de temperatura.



	VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA
1	0,000000	1,690000	0,000000
2	2,400000	1,660000	3,984000
3	3,090000	1,650000	5,098500
4	3,740000	1,650000	6,171000
5	4,370000	1,650000	7,210500
6	5,040000	1,650000	8,316000
7	5,720000	1,650000	9,438000
8	6,360000	1,650000	10,494000
9	7,060000	1,650000	11,649000
10	7,740000	1,650000	12,771000
11	8,360000	1,650000	13,794000
12	9,030000	1,650000	14,899500
13	9,730000	1,650000	16,054500
14	10,380000	1,650000	17,127000
15	11,010000	1,650000	18,166500
16	11,690000	1,640000	19,171600
17	12,340000	1,640000	20,237600
18	12,990000	1,640000	21,303600
19	13,660000	1,610000	21,992600
20	14,310000	1,590000	22,752900
21	14,990000	1,570000	23,534300

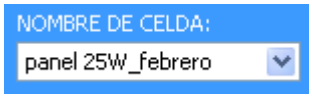
A.1.4 PASOS PARA REALIZAR LA CARACTERIZACIÓN DE UN PANEL SOLAR

Seleccionar el puerto serial con qué se va a realizar la comunicación.



Verificar que se tenga comunicación. El indicador de la barra de control se pone de color verde cuando el sistema está listo para trabajar, caso contrario este indicador titila y es de color amarillo, cuando esto sucede se sugiere verificar el uso del puerto de comunicaciones, es decir, cerrar los programas que usen el mismo puerto serial o bien seleccionar otro puerto.

Seleccionar un nombre de celda o designar un nuevo nombre para la celda que va a ser procesada.



Verificar el valor de voltaje de circuito abierto presente en la celda o panel. Si este valor está muy por debajo del nominal, se recomienda revisar la conexión en los terminales del panel.

MODO MANUAL: Si se desea hacer una lectura instantánea el usuario deberá dar clic en el botón LEER

, e inmediatamente se encenderá el indicador

, el cual se apagará cuando se termine el proceso de caracterización. Los resultados gráficos y numéricos son mostrados en la zona de visualización correspondiente.

MODO AUTOMÁTICO: El usuario debe habilitar el MODO AUTO

y configurar los parámetros de la pantalla para modo automático.

Para configurar la pantalla del modo automático hay que considerar que se debe establecer la hora de inicio, hora de fin y el intervalo (minutos) entre lecturas. El sistema muestra un error cuando la hora de inicio es mayor que la hora de fin. Finalmente cuando el sistema está correctamente configurado muestra un indicador titilante de espera y se muestra el tiempo restante para la siguiente lectura.

NOTA: En este modo el usuario también puede hacer uso de la lectura instantánea, siempre que el sistema no esté en uso.

A.2 VENTANA DE ACCESO A LA BASE DE DATOS

A través de esta ventana se pueden acceder a los archivos almacenados para cada curva característica de un panel específico. Se pueden acceder simultáneamente a dos bases de datos, para poder comparar el comportamiento de dos paneles solares a la vez como se muestra en la figura:

Esta ventana a su vez tiene cuatro subventanas, que son:

- Analizador gráfico
- S.T.C.
- Datos de celda 1
- Datos de celda 2
- Simulador

A.2.1 ANALIZADOR GRÁFICO

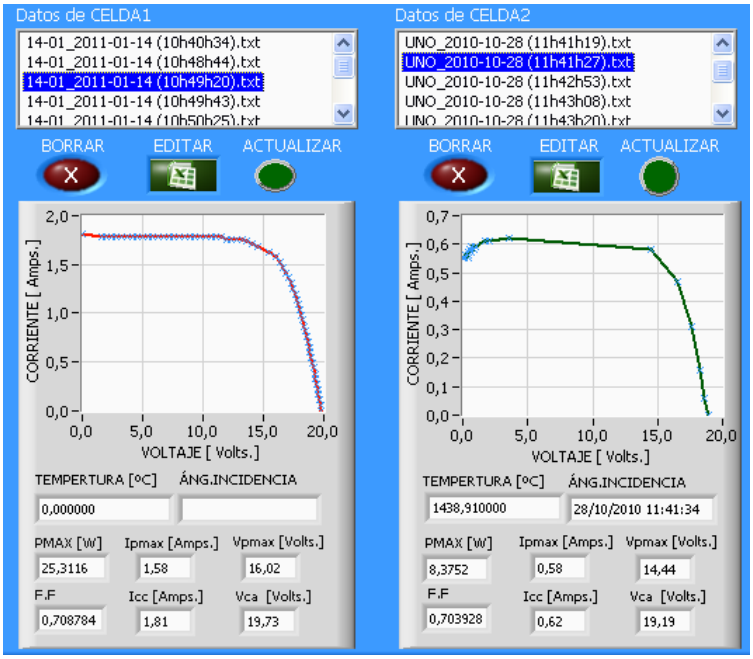
Esta parte del sistema permite acumular varias curvas, de uno varios paneles, en un solo gráfico de esta manera se puede apreciar la variación de la curva característica debido a las condiciones de radiación en las que fue tomada cada curva. A través del cursor del gráfico acumulador es posible desplazarse por todos los puntos de cualquier curva a la vez que se muestra la temperatura y el ángulo de incidencia con que fue tomada la curva característica seleccionada.

A.2.1.1 AÑADIR GRÁFICOS AL ANALIZADOR GRÁFICO

Seleccionar el tipo de curva que se desea analizar.

Cargar los archivos para cada celda, esto se hace seleccionando las celdas que se desean comparar. El usuario puede realizar esta operación cuantas veces desee y con cualquier celda incluso el mismo nombre en ambos controles.

El usuario puede ir observando una pequeña previa de la gráfica de cada celda, seleccionando un ítem del listado desplegado para cada celda, el cual contiene todas las curvas generadas para esa celda. De la misma manera existen 3 botones adicionales con los cuales se puede **BORRAR** el registro ítem seleccionado, **EDITAR** con Excel el archivo de dicho registro o **ACTUALIZAR** los datos (agregar datos de radiación al archivo de registro). Para estas funciones el usuario debe dar clic en cada ítem o navegar en cada lista con las flechas de teclado.

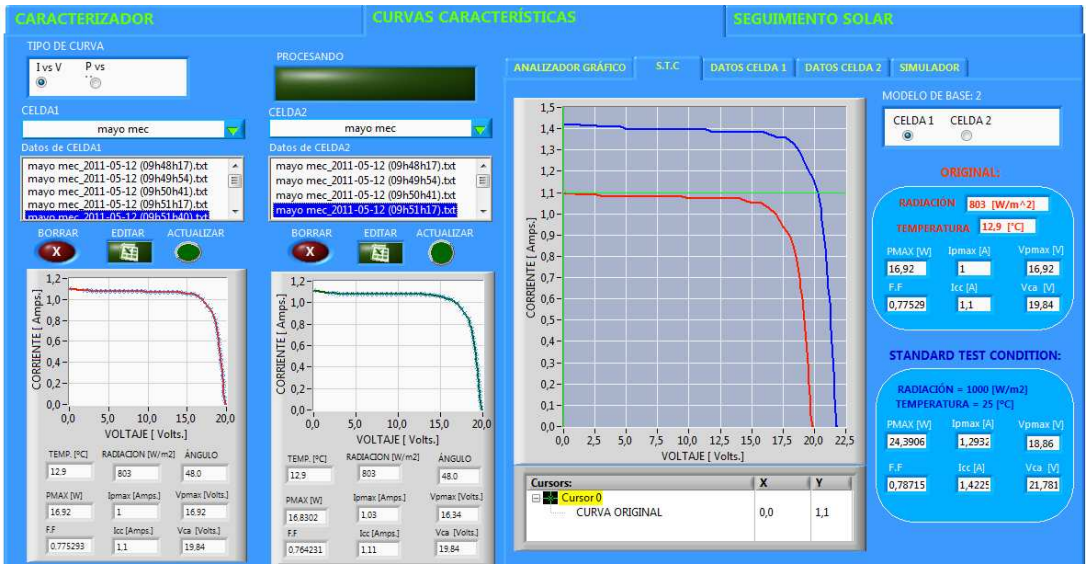


Finalmente para agregar una curva al analizador gráfico el usuario deberá dar doble clic en el ítem correspondiente.

En la zona del analizador gráfico el usuario encontrará un listado con todos los nombres de las gráficas acumuladas. Además hay un botón de RESET con el cual se borran TODOS los datos del analizador y el gráfico acumulador queda en blanco.

Para analizar los gráficos existe un cursor el cual el usuario puede arrastrar y llevarlo entre puntos de una misma curva ó entre puntos de distintas curva. Conforme el usuario cambia de curva el sistema irá mostrando el nombre y los datos numéricos más relevantes correspondientes a dicha gráfica, de esta manera el usuario podrá identificar la curva en la que esta navegando.

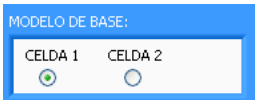
A.2.2 S.T.C (STANDARD TEST CONDITIONS)



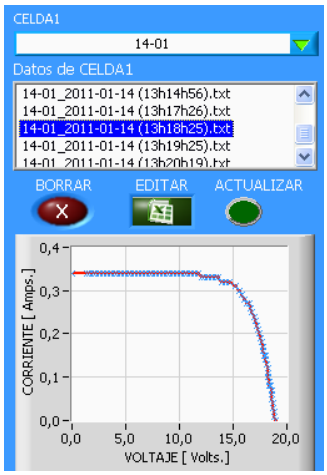
Tomando como base la curva de un panel (“celda1” o “celda2”), y a partir de las condiciones de radiación y temperatura en las que fue realizada esa curva característica, se recalculan todos los valores para tener una curva característica adaptada a las CONDIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA o S.T.C. (STANDARD TEST CONDITIONS). Estas condiciones de prueba estándar corresponden a mediciones realizadas con radiación igual a 1000 [W/m^2] y temperatura de 25 °C.

A.2.2.1 USO DEL SISTEMA S.T.C

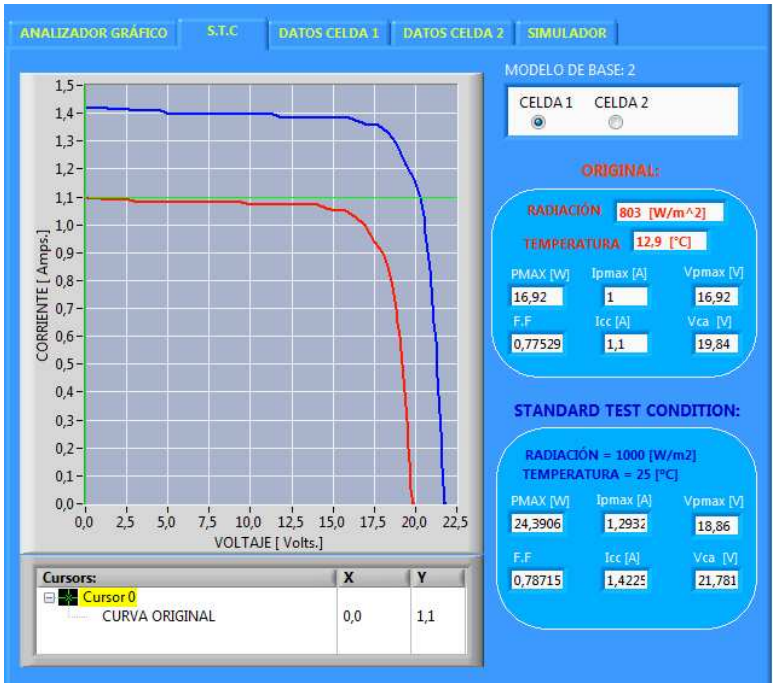
Seleccionar la celda que se va a utilizar como base para la simulación.



Seleccionar un ítem del listado de la celda seleccionado. Con esto se establece la curva que servirá de base para la simulación.



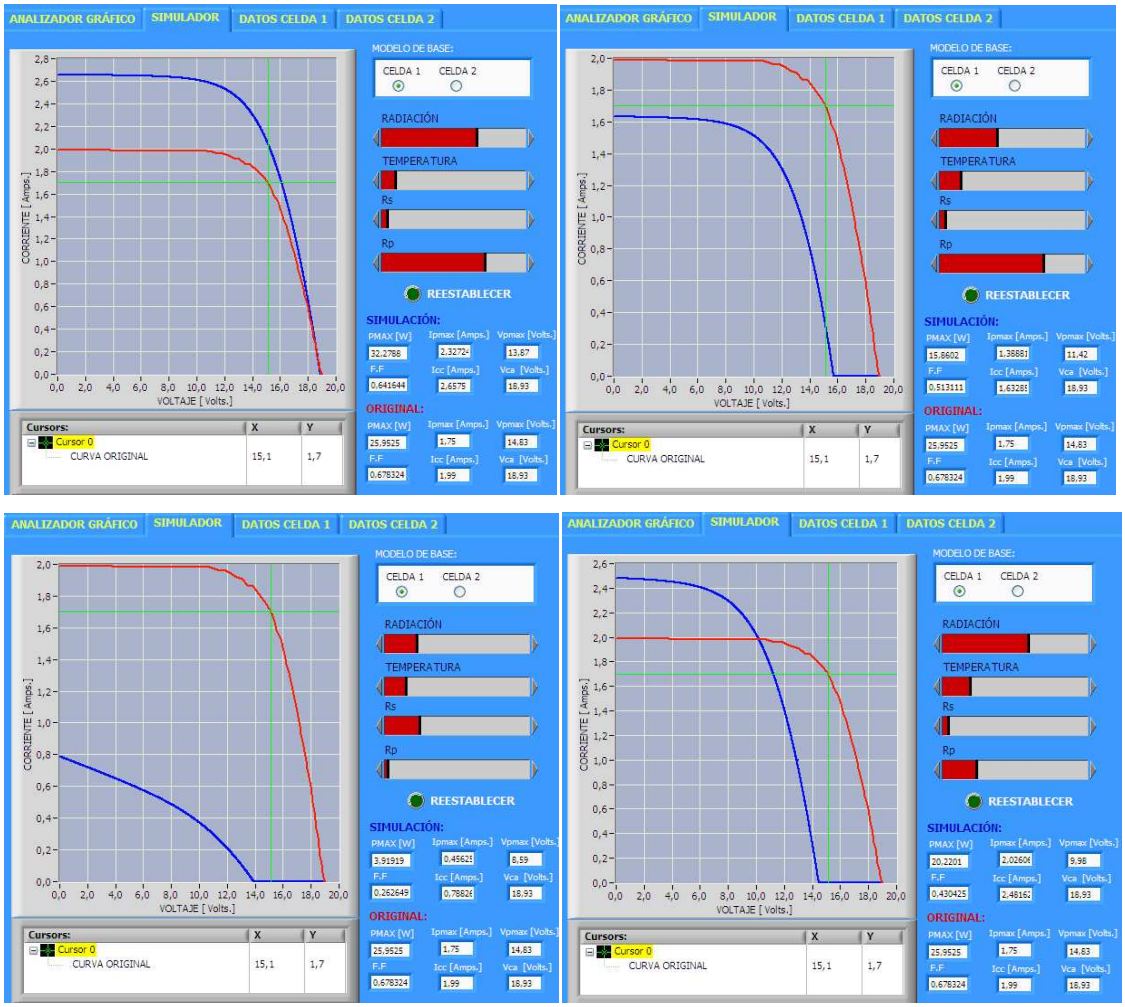
Una vez seleccionado el ítem se cargan dos curvas una es la curva real y otra es la curva a condiciones de S.T.C, en donde el usuario puede observar y comparar los diferentes valores correspondientes al panel solar, esto ayudará al usuario a tener una estimación del posible funcionamiento del panel bajo condiciones de prueba estándar o S.T.C.



A.2.3 SIMULADOR

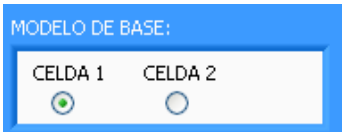
Es una sección que, tomando como base la curva de un panel (“celda1” o “celda2”), permite simular la curva en diferentes condiciones, variando los parámetros de construcción (Rs, Rp), o los parámetros ambientales (radiación, temperatura). Estos parámetros pueden ser manipulados a través de un control individual tipo “slider” para cada parámetro.

Este simulador también calcula los nuevos parámetros de la curva simulada (Vca, Icc, Pmax, FF, Ipmax, Vpmax), y los muestra para que el usuario pueda compararlos con los de la curva original.

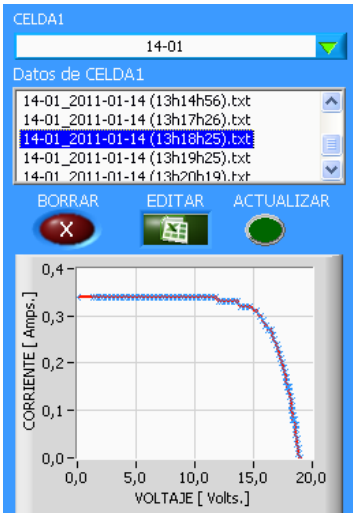


A.2.3.1 USO DEL SIMULADOR

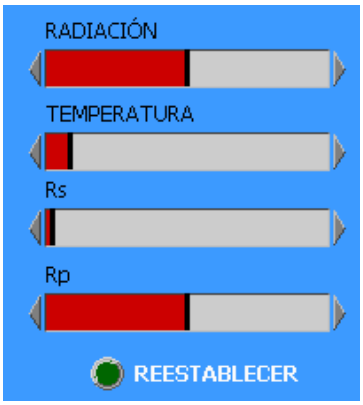
Seleccionar la celda que se va a utilizar como base para la simulación.



Seleccionar un ítem del listado de la celda seleccionado. Con esto se establece la curva que servirá de base para la simulación.



Una vez seleccionado el ítem se cargan dos curvas una es la curva real y otra es la simulación, en este instante el usuario puede variar cualquiera de los controles de simulación (Rs, Rp, Temperatura, Radiación) y observar instantáneamente la variación gráfica y numérica de los datos de celda. Asimismo el usuario dispone de un cursor con el cual puede desplazarse a través de los datos reales y simulados, lo cual sirve para evaluación cualitativa y cuantitativa de cada variación. Adicionalmente el usuario puede regresar la simulación a los parámetros original a través del botón **REESTABLECER**.



A.2.4 DATOS DE CELDA (1 Y 2)

Cada una de estas secciones muestra una tabla con los datos originales de la celda correspondiente, estos datos son leídos desde un archivo de texto. Esta tabla muestra datos de: voltaje, corriente, potencia, temperatura, ángulo de incidencia y fecha de lectura.

FECHA	VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA	TEMPERATURA	RADIA
14/01/2011 13:18:29	0,000000	0,340000	0,000000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	1,370000	0,340000	0,465800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	1,600000	0,340000	0,544000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	1,930000	0,340000	0,656200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	2,260000	0,340000	0,768400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	2,590000	0,340000	0,880600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	2,930000	0,340000	0,996200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	3,240000	0,340000	1,101600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	3,560000	0,340000	1,210400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	3,900000	0,340000	1,326000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	4,230000	0,340000	1,438200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	4,550000	0,340000	1,547000	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	4,870000	0,340000	1,655800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	5,180000	0,340000	1,761200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	5,520000	0,340000	1,876800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	5,840000	0,340000	1,985600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	6,180000	0,340000	2,101200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	6,510000	0,340000	2,213400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	6,830000	0,340000	2,322200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	7,170000	0,340000	2,437800	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:30	7,460000	0,340000	2,536400	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	7,830000	0,340000	2,662200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	8,130000	0,340000	2,764200	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	8,440000	0,340000	2,869600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	8,790000	0,340000	2,988600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	9,090000	0,340000	3,090600	0,000000	0,000
14/01/2011 13:18:31	9,450000	0,340000	3,213000	0,000000	0,000

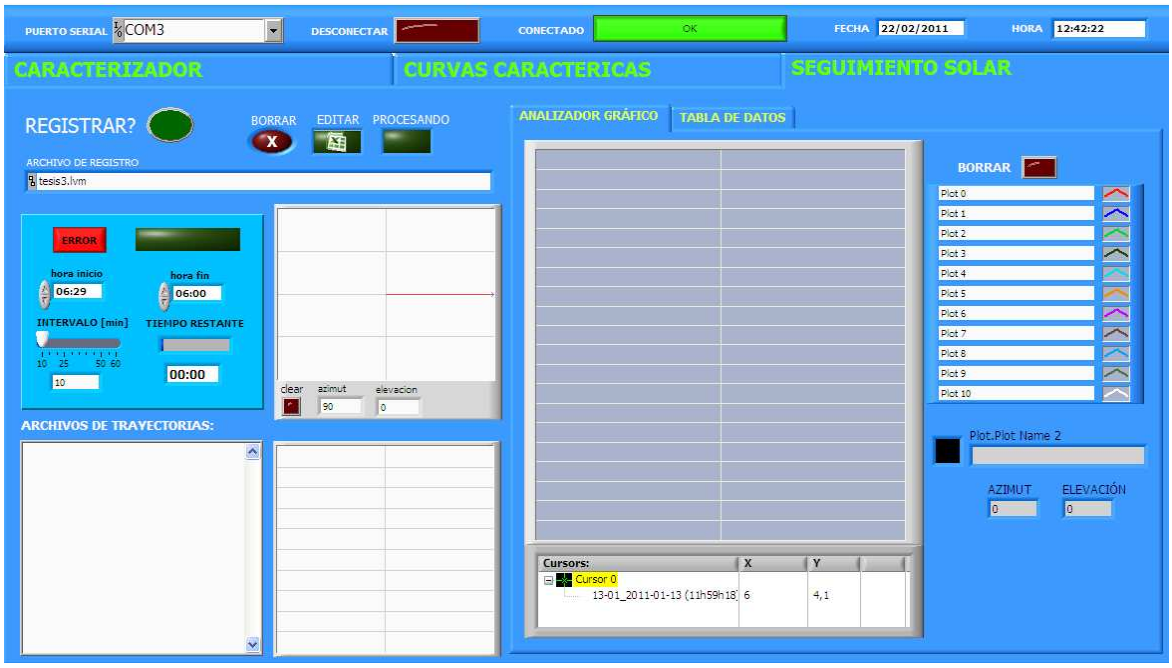
A.3 VENTANA DE SEGUIMIENTO SOLAR

Esta pantalla permite visualizar las coordenadas altacimutales de la posición actual del Sol y la trayectoria que está siguiendo el Sol durante el día. Además a través de una mini pantalla de control se puede configurar los parámetros para que el sistema vaya almacenando los datos de trayectoria. Estos datos se almacenan en un archivo de texto nombrado de acuerdo a la fecha del día en que se realiza esa adquisición, es decir, se puede tener un solo archivo por día.

Contiene también una sección en la que se puede visualizar las trayectorias almacenadas seleccionándolas de una base de datos, las misma que pueden ser añadidas a un analizador gráfico para comparar las trayectorias de diferentes

días. Los datos de trayectorias, tanto en de tiempo real como de los históricos, son mostrados en base a coordenadas de acimut y elevación.

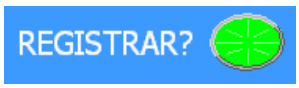
Los controles presentes en esta pantalla permiten registrar o almacenar la trayectoria del día actual, borrar o editar el archivo de la trayectoria seleccionado de la base de datos. Además hay una pestaña en la que se muestra una tabla con todos los datos de coordenadas en acimut y elevación que conforman una trayectoria de un día.



A.3.1 REGISTRO DE UNA TRAYECTORIA

Configurar los parámetros de comunicación en la barra de control de comunicación, es decir, seleccionar el puerto serial, verificar la conexión y comprobar que estén llegando datos de trayectorias para esto existen indicadores gráficos y numéricos que muestran los valores en azimut y elevación recibidos desde el hardware de seguimiento solar.

Habilitar el botón para registrar.



Configurar los parámetros para la adquisición de datos.

El sistema generará un archivo de trayectoria por día. El usuario puede realizar uno o varios intervalos para la adquisición de trayectorias. Todos los datos adquiridos en un mismo día se añaden a un solo archivo de trayectoria.

A.3.2 ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

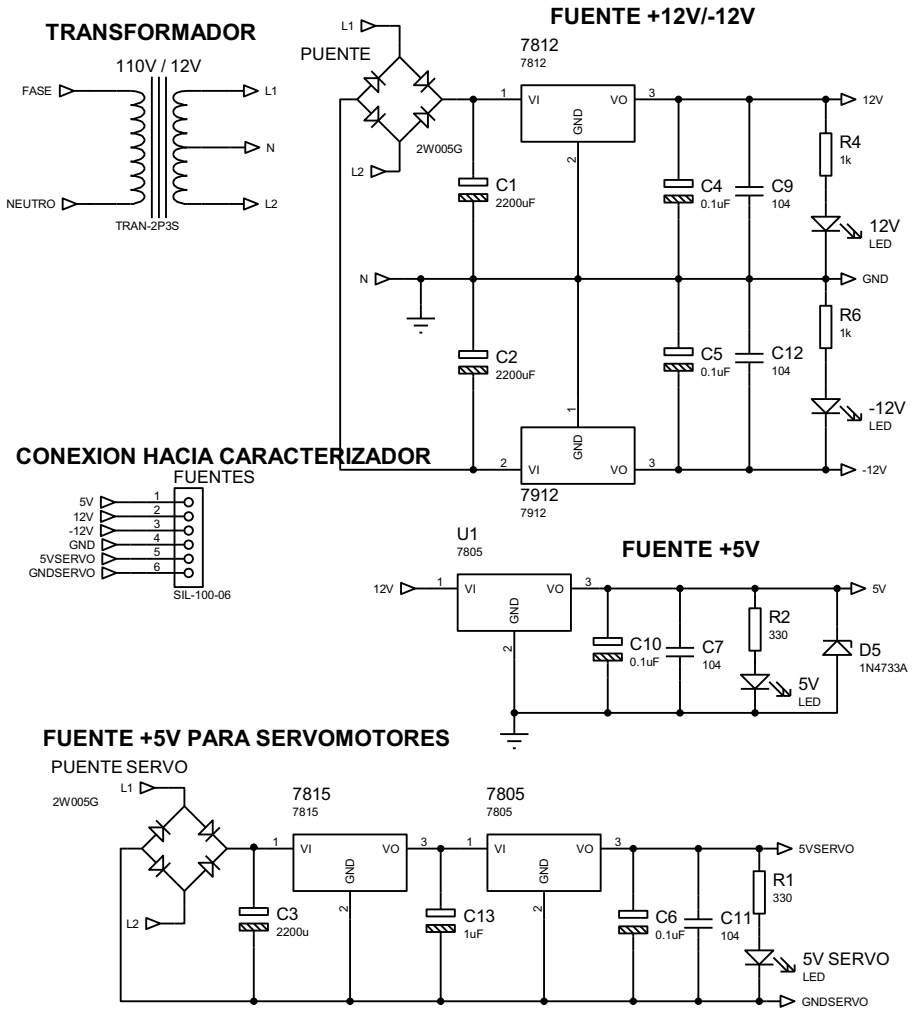
En el listado de trayectorias, el usuario puede ir observando cada una de las trayectorias almacenadas. El usuario puede añadir la trayectoria actual a un acumulador gráfico dando doble clic sobre la trayectoria deseada.

En el analizador gráfico, el usuario dispone de un cursor con el que podrá desplazarse por cada uno de los puntos de trayectoria y las diferentes curvas de trayectorias añadidas.

Este sistema sirve para comparar la trayectoria del sol en diferentes épocas del año.

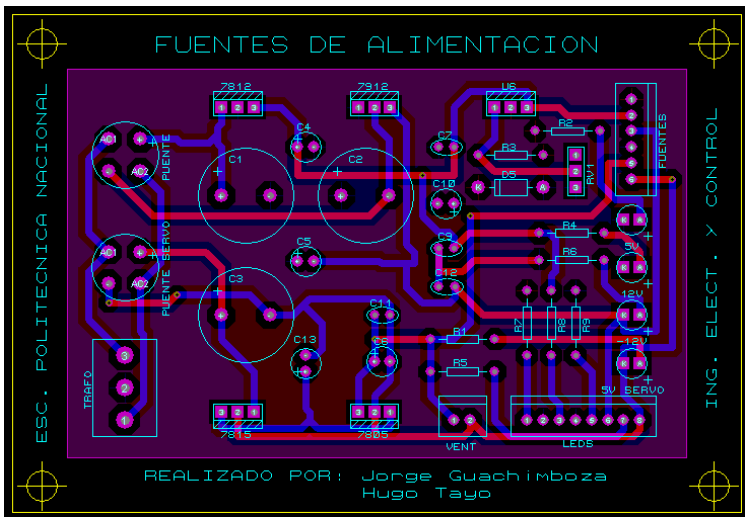
ANEXO B
ESQUEMÁTICOS, CIRCUITOS IMPRESOS Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL PROYECTO

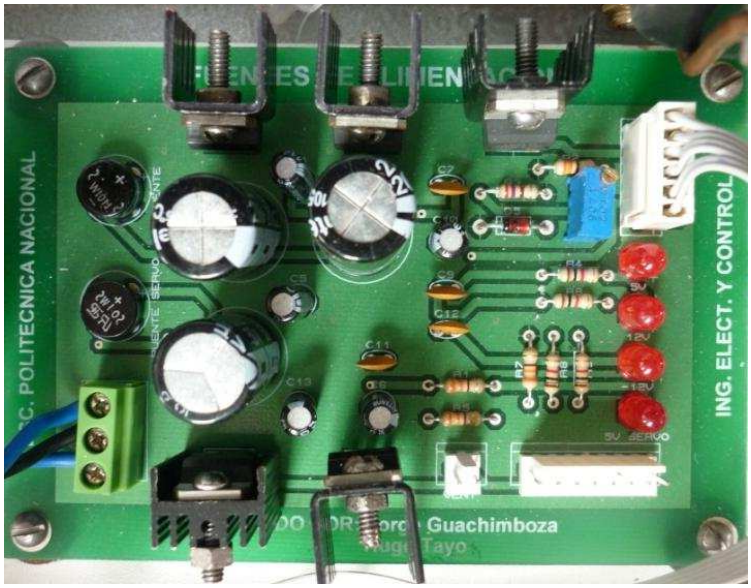
B.1 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DE LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN



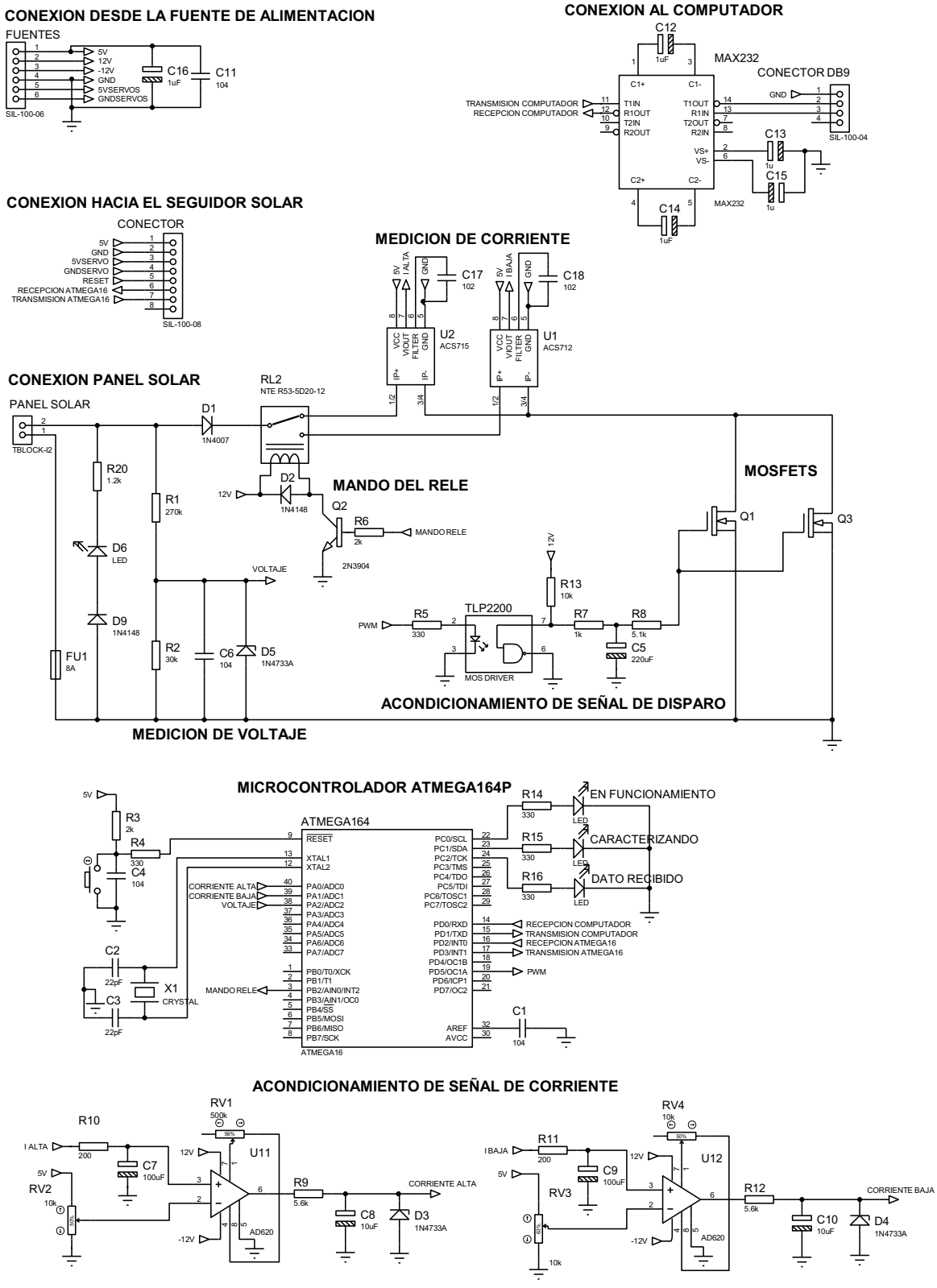
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	PRECIO UNIT. ($)
1	CAPACITOR 0,1uF	4	0,10
2	CAPACITOR 1uF	1	0,10
3	CAPACITOR 2200uF	3	0,70
4	CAPACITOR CERAMICO 104	4	0,10
5	DIODO LED	4	0,10
6	PUENTE DE DIODOS (RECTIFICADOR)	2	0,35
7	REGULADOR DE VOLTAJE 7805 (+5V)	2	0,50
8	REGULADOR DE VOLTAJE 7812 (+12V)	1	0,50
9	REGULADOR DE VOLTAJE 7815 (+15V)	1	0,50

10	REGULADOR DE VOLTAJE 7912 (-12V)	1	0,50
11	RESISTOR 1Kohm	2	0,02
12	RESISTOR 330 ohm	2	0,02
13	TRANSFORMADOR 110V/12V-2A	1	7,50
14	DIODO ZENER 1N4733A	1	0,15

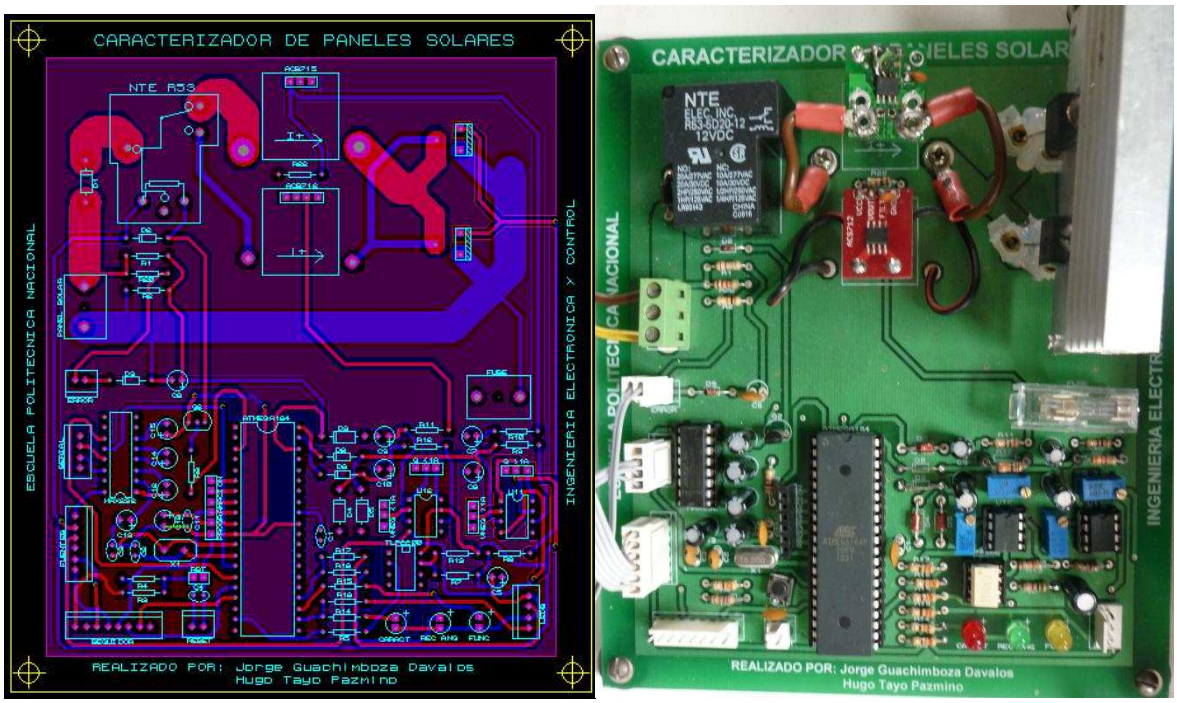




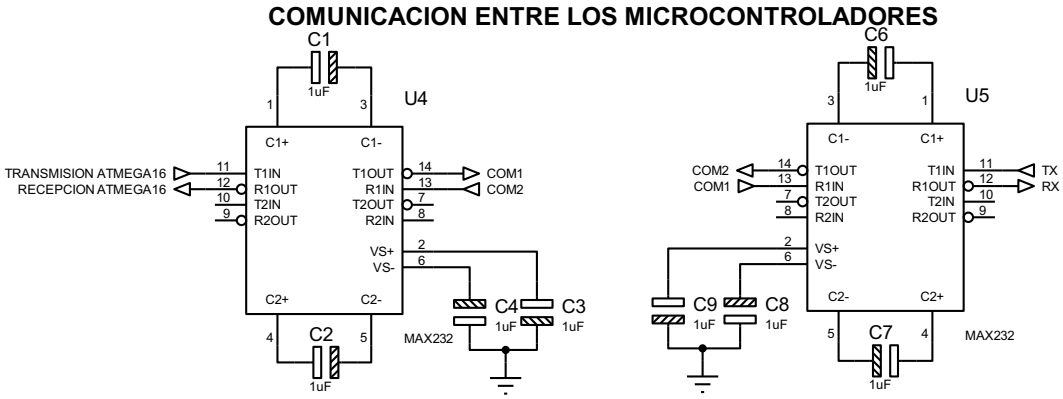
B.2 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES



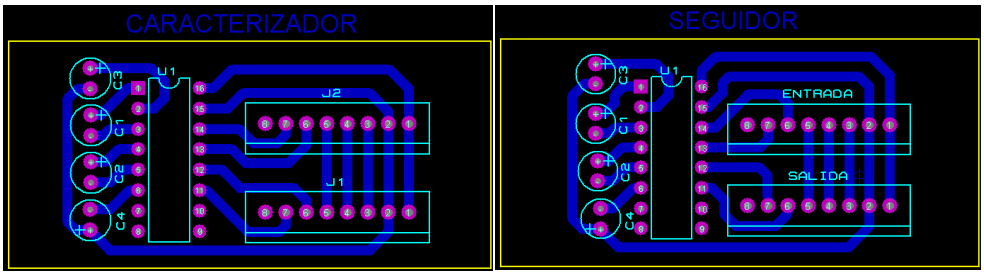
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	PRECIO UNIT. ($)
1	AMPLIFICADOR DE INSTRUMENT. AD620	2	10,00
2	CAPACITOR 100uF	2	0,10
3	CAPACITOR 10uF	2	0,10
4	CAPACITOR 1uF	5	0,10
5	CAPACITOR 220uF	1	0,15
6	CAPACITOR CERÁMICO 22pF	2	0,10
7	CAPACITOR CERÁMICO 102	2	0,10
8	CAPACITOR CERÁMICO 104	4	0,10
9	CRISTAL 16MHz	1	0,50
10	DIODO 1N4007	1	0,10
11	DIODO 1N4148	2	0,05
12	DIODO LED	4	0,10
13	DIODO ZENER 1N4733A	3	0,15
14	FUSIBLE 5A	1	0,10
15	MAX232	1	1,80
16	MICROCONTROLADOR ATMEGA164	1	7,80
17	MOSFETs IRF640	2	1,10
18	OPTOACOPLADOR TLP2200	1	1,00
19	POTENCIOMETRO PRECISIÓN 10K	3	0,50
20	POTENCIOMETRO PRECISIÓN 500K	1	0,50
21	PULSANTE	1	0,15
22	RELE 12V / 30A	1	13,50
23	RESISTOR 1,2K	1	0,02
24	RESISTOR 10K	1	0,02
25	RESISTOR 1K	1	0,02
26	RESISTOR 200	2	0,02
27	RESISTOR 2K	2	0,02
28	RESISTOR 30K	1	0,02
29	RESISTOR 330	4	0,02
30	RESISTOR 5,1K	1	0,02
31	RESISTOR 5,6K	2	0,02
32	RESISTROR 270K	1	0,02
33	SENSOR DE CORRRIENTE AC712	1	15,00
34	SENSOR DE CORRRIENTE AC715	1	15,00
35	TRANSISTOR 2N3904	1	0,10



B.3 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL CIRCUITO PARA COMINUCACIÓN ENTRE EL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN Y EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

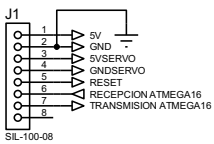


ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	PRECIO UNIT. ($)
1	MAX232	2	1,80
2	CAPACITOR 10uF	8	0,10

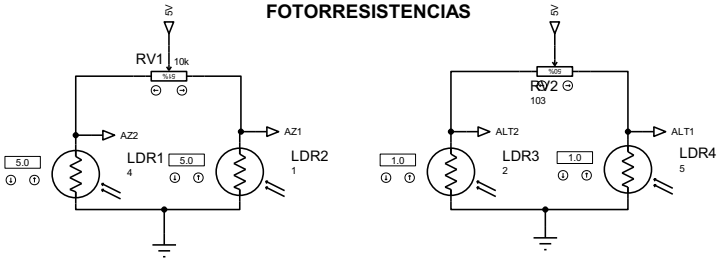


B.4 ESQUEMÁTICO, CIRCUITO IMPRESO Y PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

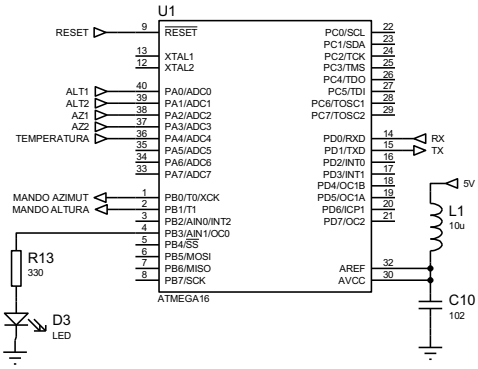
CONEXION DESDE EL CARACTERIZADOR



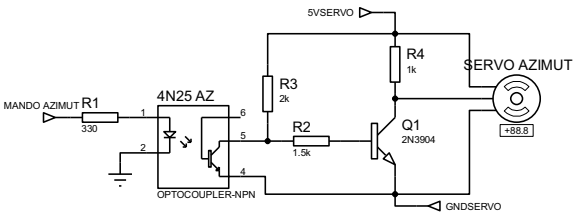
FOTORRESISTENCIAS

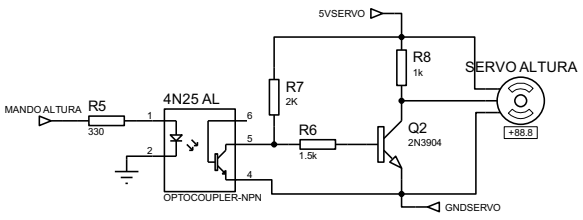


MICROCONTROLADOR ATMEGA16

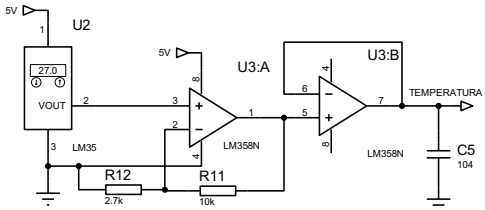


PULSOS PARA MANDO DE SERVOMOTORES

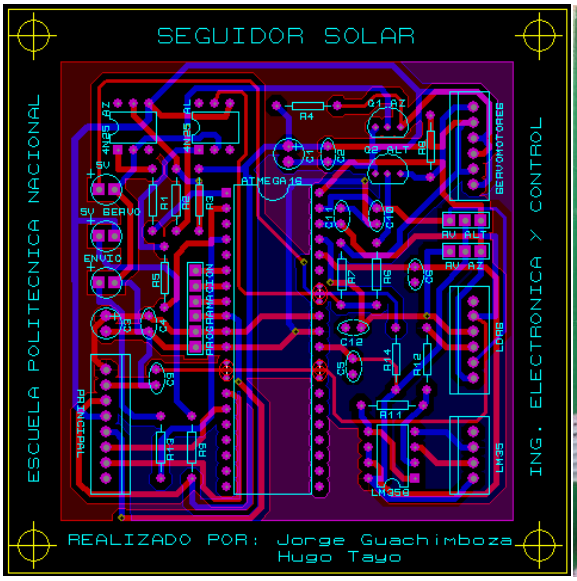




ACONDICIONAMIENTO SEÑAL DE TEMPERATURA

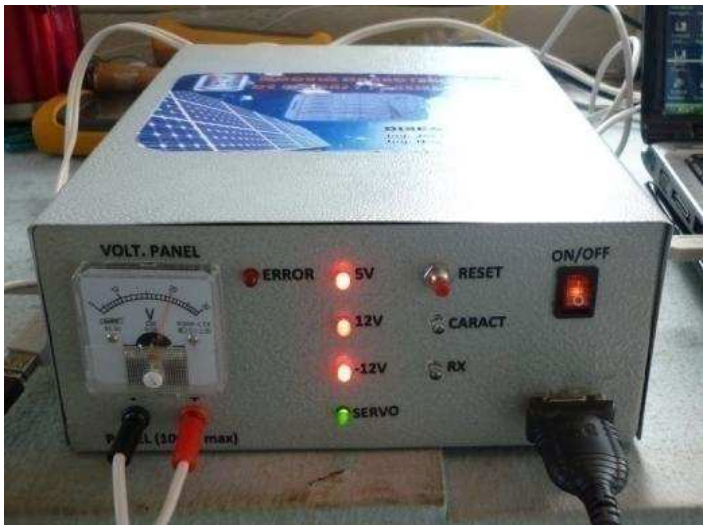


ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	PRECIO UNIT. ($)
1	AMPLIFICADOR LM358	1	0,50
2	CAPACITOR CERÁMICO 102	1	0,10
3	CAPACITOR CERÁMICO 104	1	0,10
4	DIODO LED	1	0,10
5	FOTORESISTENCIA (LDR)	4	0,35
6	MICROCONTROLADOR ATMEGA16	1	6,05
7	OPTOACOPLADOR 4N25	2	0,50
8	POTENCIOMETRO PRECISIÓN 10K	2	0,50
9	RESISTOR 1,2K	1	0,02
10	RESISTOR 1,5K	2	0,02
11	RESISTOR 10K	1	0,02
12	RESISTOR 1K	2	0,02
13	RESISTOR 2,7K	1	0,02
14	RESISTOR 2K	2	0,02
15	RESISTOR 330	3	0,02
16	SENSOR DE TEMPERATURA LM35DT	1	2,30
17	SERVOMOTOR	2	16,95
18	TRANSISTOR DE SEÑAL 2N3904	2	0,10



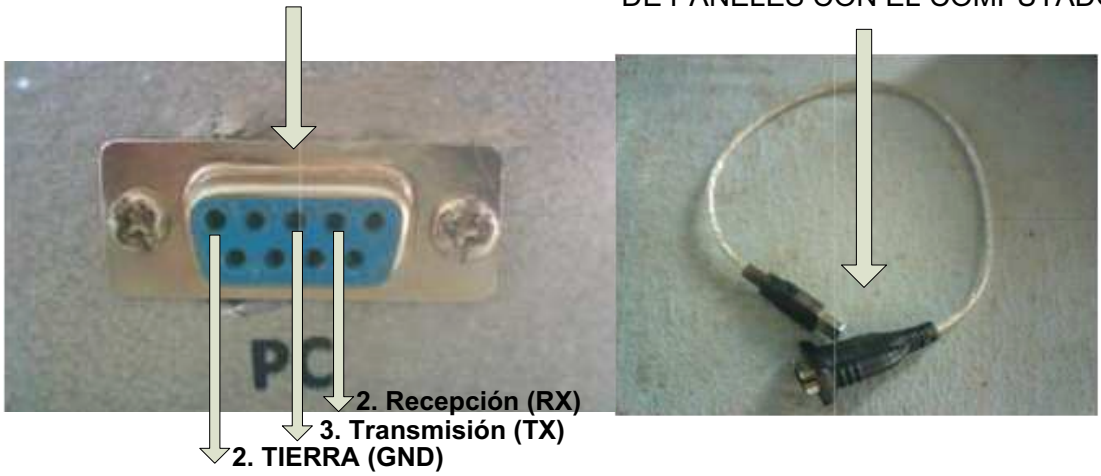
ANEXO C
CONECTORES UTILIZADOS EN LOS MÓDULOS Y FUNCIÓN DE LOS PINES

C.1. CONECTORES DEL MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN

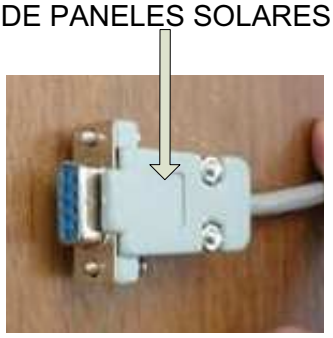


CONECTOR TIPO DB9 HEMBRA PARA COMUNICACIÓN CON EL COMPUTADOR

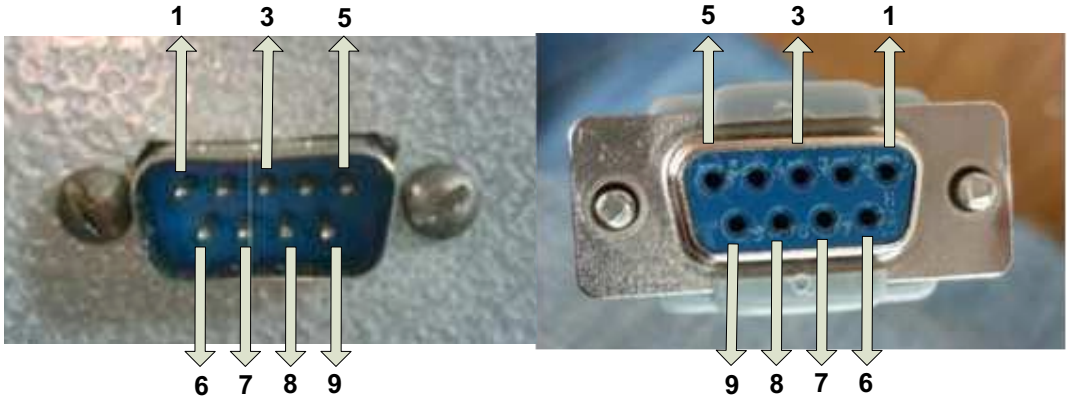
CONVERSOR USB A SERIAL PARA COMUNICAR EL CARACTERIZADOR DE PANELES CON EL COMPUTADOR



CONECTOR TIPO DB9 PARA COMUNICAR EL CARACTERIZADOR DE PANELES SOLARES CON EL SEGUIDOR SOLAR



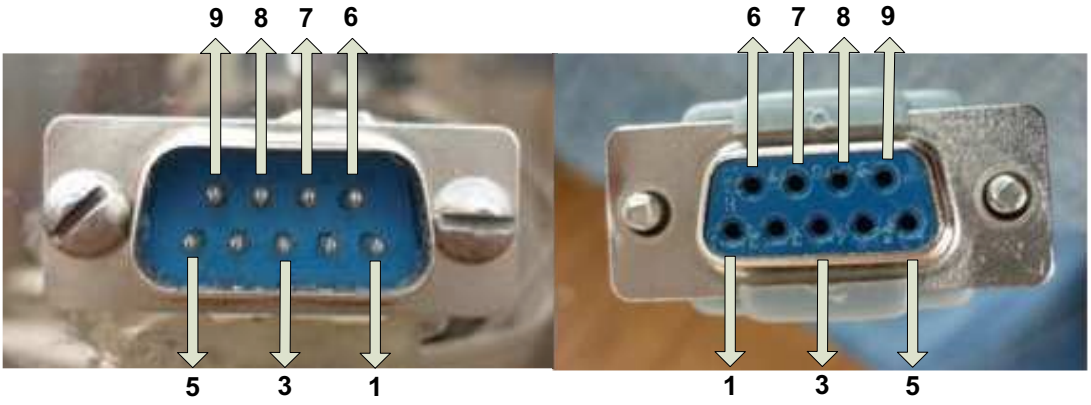
PINES:
1. Orden
3. Tierra Servomotores
5. Tierra (GND)
6. Ángulo
7. Reset
8. Alimentación Servomotores
9. Alimentación (VCC)



C.2. CONECTORES DEL SEGUIDOR SOLAR

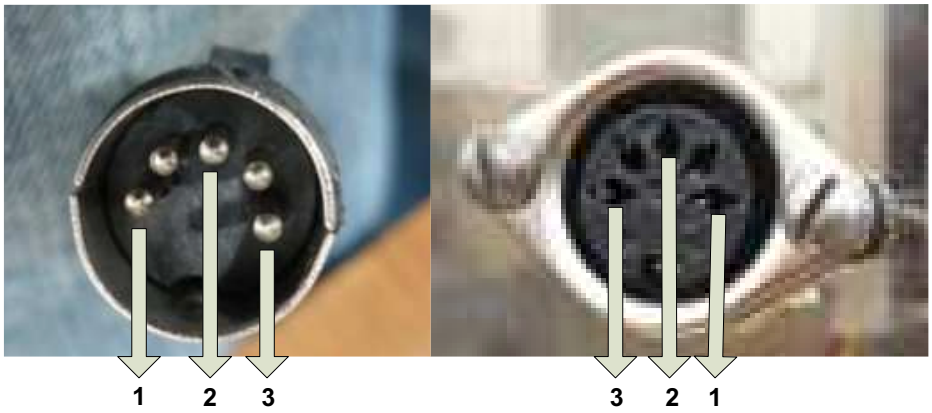
CONECTOR TIPO DB9 PARA COMUNICAR EL SEGUIDOR SOLAR CON EL CARACTERIZADOR DE PANELES SOLARES

PINES:
1. Orden
3. Tierra Servomotores
5. Tierra (GND)
6. Ángulo
7. Reset
8. Alimentación Servomotores
9. Alimentación (VCC)



CONECTOR TIPO DIN DE 5 PINES USADO PARA LLEVAR LA SEÑAL DE TEMPERATURA HACIA EL SEGUIDOR SOLAR

PINES:
1. Alimentación (VCC)
2. Señal de Temperatura
3. Tierra (GND)



ANEXO D
HOJAS TÉCNICAS DE INTEGRADOS UTILIZADOS

D.1 ATMEGA164P (MICROPROCESADOR)
D.2 ACS712 (SENSOR DE CORRIENTE)
D.3 ACS715 (SENSOR DE CORRIENTE)
D.4 TLP2200 (FOTOACOPLADOR)
D.5 AD620 (AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN)
D.6 IRF640 (MOSFET)
D.7 ATMEGA16 (MICROPROCESADOR)
D.8 LM35 (SENSOR DE TEMPERATURA)

ANEXO E
SERVOMOTORES

E.1 SERVOMOTORES

Para llevar a cabo los movimientos del seguidor solar y determinar el ángulo de inclinación del Sol se utilizaran servomotores, los cuales poseen un sistema de control de posición muy preciso. Los servomotores generalmente tienen una variación de ángulo que está entre 0º a 180º. En la práctica, se usan servos para posicionar superficies de control como el movimiento de palancas, pequeños ascensores y timones. Ellos también se usan en radio control, aeromodelismo y en robots ya que son pequeños pero de una gran versatilidad.

Existen servomotores de diverso tamaño, torque y velocidad, sin embargo su control se realiza de la misma manera.

E.1.1 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR

A todos los servomotores se los controla de la misma manera, para esto se utiliza la técnica de control de modulación de ancho de pulso (PWM). Lo cual consiste en enviar una señal del mismo periodo pero cuyo tiempo en alto es variable ya que éste tiempo en alto determinará el ángulo de posicionamiento del motor.

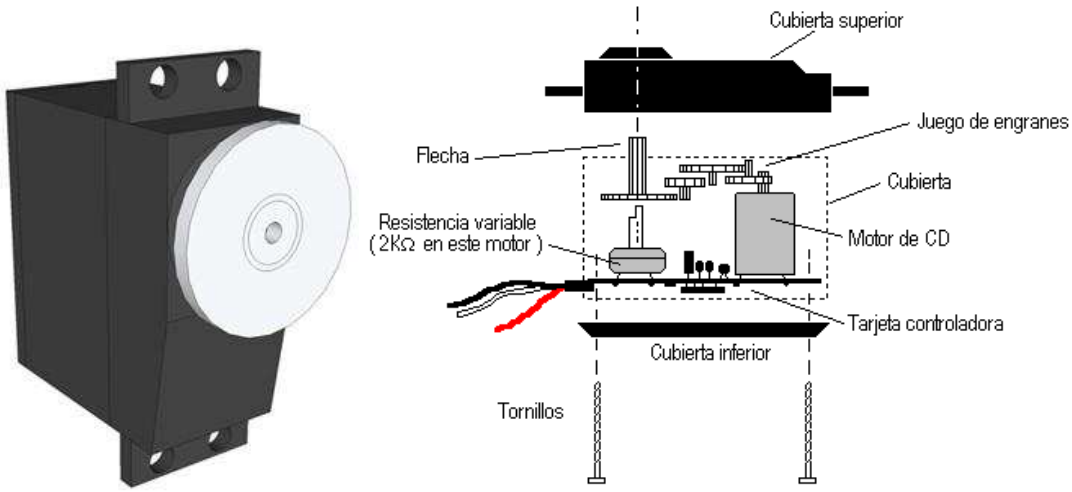


Figura: Estructura interna de un servomotor.

Cada fabricante de servomotores especifica los anchos de pulso mínimo y máximo en los que su servomotor tiene una variación de 0º hasta 180º respectivamente. Generalmente la operación del ancho de pulso es de unidades

de milisegundo y se opta por un periodo entre 10ms hasta 30ms. Los ángulos intermedios se los pueden alcanzar mediante una relación lineal sencilla y dependiendo de la frecuencia de trabajo se pueden obtener pasos de ángulo sumamente pequeños. Si se sobrepasa el ancho de pulso especificado el servomotor emitirá zumbido, además, cuenta con un limitante dado por el tope del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

En la figura 1.42 se muestra la señal de control PWM y la posición del eje del servomotor para los valores máximo, mínimo y central de operación del mismo.

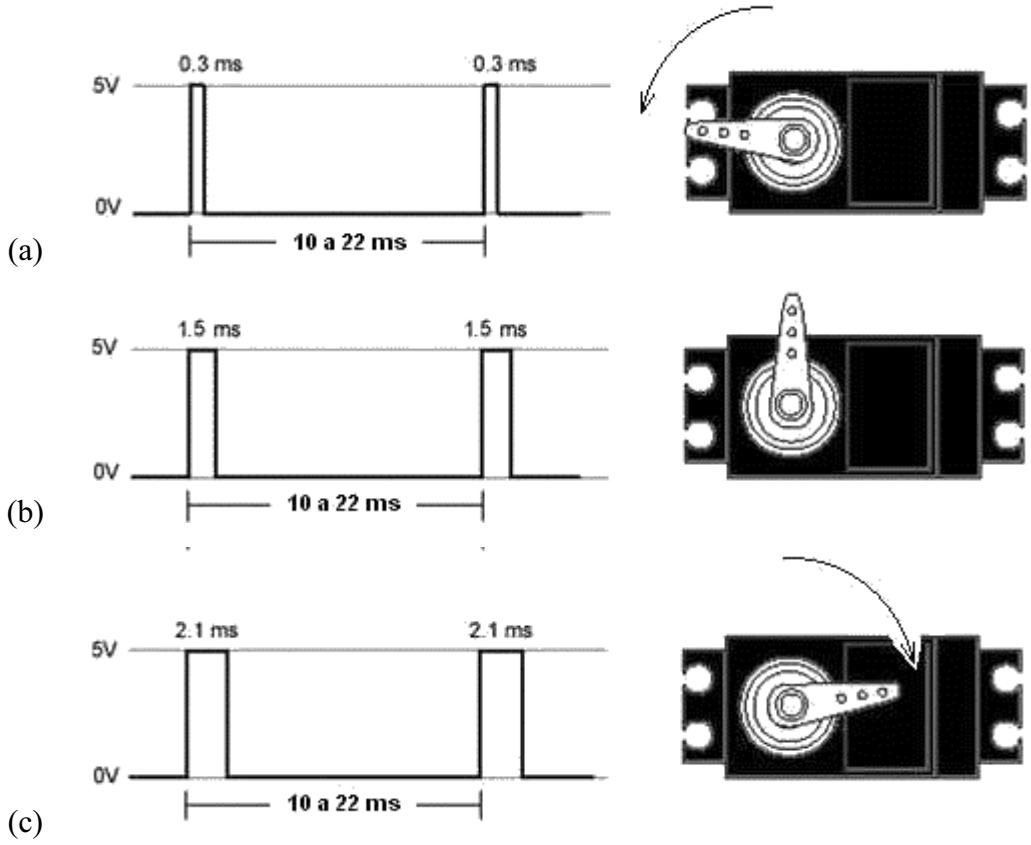


Figura: Posicionamiento de un servomotor con la variación del ancho de pulso: (a) y (c) extremos, (b) posición central.

El servomotor posee tres cables para su funcionamiento, el cable rojo es la alimentación (por lo general 5V), el cable negro tierra y el cable amarillo es el de control, al cual se le aplica la técnica PWM.

ANEXO F

ECUACIONES PARA TRANSFORMAR A PRUEBAS DE CONDICIONES ESTÁNDAR (STC)