



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES COMO PARTE DE UNA  
FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE UN DRON**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A**

**ERIC ABEL ULISES PACHECO MARTÍNEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. PABLO ROBERTO PÉREZ ALCÁZAR**



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	9
AGRADECIMIENTOS.....	10
RESUMEN.....	12
INTRODUCCION.....	14
ENERGÍA COMO EL MOTOR DEL AVANCE TECNOLÓGICO Y EL BIENESTAR DEL HOMBRE. ....	15
ENERGÍA SOLAR.....	16
LA TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. ....	17
EFECTO FOTOVOLTAICO .....	19
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA Y SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS. ....	22
APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR EN MÉXICO. ....	23
DRONES Y SUS APLICACIONES .....	27
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
ESTADO DEL ARTE .....	30
SEGUIDORES SOLARES. ....	30
DEFINICIÓN DE SEGUIDOR SOLAR.....	30
TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES Y SU CLASIFICACIÓN: .....	30
JUTIFICACIÓN .....	36
HIPÓTESIS .....	37
OBJETIVO DE LA PROPUESTA .....	37
DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO .....	37
CAPÍTULO I. CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS RELACIONADOS CON EL MOVIMIENTO SOLAR. ....	39
1.1 EL SOL .....	39
1.2 RADIACIÓN.....	39
1.3 RADIACIÓN SOLAR.....	39
1.4 IRRADIACIÓN. ....	40
1.5 RADIACIÓN DIFUSA. ....	40
1.6 RADIACIÓN DIRECTA. ....	40
1.7 RADIACIÓN REFLEJADA. ....	40
1.8 RADIACIÓN GLOBAL. ....	40
1.9 RADIACIÓN TERRESTRE. ....	40
1.10 RADIACIÓN TOTAL. ....	41
1.11 EL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN.....	42
1.12 EL MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN. ....	42

1.13 EL EJE DE ROTACIÓN DE LA TIERRA.....	43
1.14 LA LATITUD ( $\phi$ ).....	44
1.15 LA LONGITUD.....	44
1.16 LA ALTITUD.....	44
1.17 COORDENADAS CELESTES.....	45
1.18. RECORRIDO SOLAR DURANTE LOS EQUINOCIOS.....	46
1.19. RECORRIDO SOLAR DURANTE LOS SOLSTICIOS.....	46
1.20. ELEMENTOS GEOMÉTRICOS RELACIONADOS CON LA POSICIÓN SOLAR.....	47
1.20.1 ALTURA SOLAR.....	47
1.20.2 ALTURA HORARIO.....	49
1.20.3 ACIMUT SOLAR.....	51
1.20.4 ECUACION DE TIEMPO.....	52
1.20.5. GRÁFICAS SOLARES.....	55
CAPITULO II. ELEMENTOS ELECTRÓNICOS Y MECÁNICOS DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES.....	57
2.1 MICROCONTROLADORES.....	57
2.2 HISTORIA DE LOS MICROCONTROLADORES PIC.....	58
2.3 ELEMENTOS GENERALES Y ESTRUCTURA INTERNA DE LOS MICROCONTROLADORES.....	59
2.4 ARQUITECTURA BÁSICA.....	60
2.5 CPU (UNIDAD CENTRAL DE PROCESO).....	61
2.6 ARQUITECTURA RISC, CISC Y SISC.....	62
2.6.1 RISC (REDUCED INSTRUCTION SET COMPUTER).....	62
2.6.2 CISC (COMPLEX INSTRUCTION SET COMPUTER).....	62
2.6.3 SISC.....	63
2.7 MEMORIA.....	63
2.8 FABRICANTES.....	66
2.9 LAS GAMAS DE LOS MICROCONTROLADORES PIC.....	67
2.10 VENTAJAS DE LOS MICROCONTROLADORES PIC DE MICROCHIP:.....	67
2.11 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PIC18F4550.....	68
2.11.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PIC28F4550.....	69
2.11.2 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	70
2.11.3 MEMORIA RAM DE DATOS.....	71
2.11.4 MEMORIA EEPROM DE DATOS.....	72
2.11.5 PILA.....	72
2.11.6 MEMORIA DE CONFIGURACIÓN.....	73
2.11.7 SISTEMA DE INTERRUPCIONES DEL PIC 18F4550.....	74

2.11.8 UNIDADES FUNCIONALES DEL MICROCONTROLADOR .....	74
2.11.9 PUERTOS DE ENTRADA/SALIDA .....	75
2.12 COMPILADOR MIKROC PRO .....	76
2.12.1 NUEVO PROYECTO .....	80
2.12.2 PROCESO DE COMPILACIÓN. ....	84
2.12.3 FICHEROS DE SALIDA.....	85
2.12.4 COMO VISUALIZAR EL CÓDIGO ENSAMBLADOR.....	86
2.13 MOTORES PASO A PASO. ....	86
2.13.1 COMPORTAMIENTO PROPIO DE LOS MOTORES PASO A PASO.....	87
2.13.2 CARACTERÍSTICAS COMUNES DE LOS MOTORES PASO A PASO:.....	88
2.13.3. MOTORES PASO A PASO DE IMÁN PERMANENTE: .....	89
2.13.4 MOTORES PASO A PASO UNIPOLARES:.....	90
2.13.5 MOTORES PASO A PASO BIPOLARES .....	92
2.13.6 MOTORES PASO A PASO DE RELUCTANCIA VARIABLE: .....	93
2.13.7 CONTROL DE LOS MOTORES DE PASO A PASO, POR MEDIO DE SECUENCIAS.....	94
2.13.8 CONTROL DE UN MOTOR PASOS A PASO UNIPOLAR.....	95
2.14 FOTORRESISTENCIAS O RESISTORES DEPENDIENTES DE LUZ (LDR LIGHT-DEPENDENT RESISTOR).....	96
CAPÍTULO III. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES UTILIZANDO PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN DEL ÁREA ELECTRÓNICA. ....	100
3. DISEÑO Y SIMULACIÓN. ....	100
3.1 BARRA DE TÍTULO.....	102
3.2 MENÚ DE ARCHIVOS. ....	102
3.3 HERRAMIENTAS.....	103
3.4 LIBRERÍAS DE DISPOSITIVOS CONTENIDOS EN EL PROGRAMA PROTEUS.....	104
3.5 ELEMENTOS BÁSICOS DEL PROGRAMADOR PICKIT 2. ....	111
3.6 APLICACIÓN DE PROGRAMACIÓN: .....	113
3.7 COMANDOS BÁSICOS DEL PROGRAMADOR PICKIT2: .....	114
3.8 HERRAMIENTAS:.....	115
3.9 DIAGRAMA DE FLUJO .....	117
CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES.....	119
4.1 IMPLEMENTACIÓN.....	119
4.2 A CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL MOTOR 28BYJ-48:.....	122
4.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CIRCUITO INTEGRADO ULN2003A:.....	124
4.4 DIAGRAMA PCB DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	129
CAPÍTULO 5. PRUEBAS RESULTADOS Y AJUSTES DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	132

5.1 RESULTADOS .....	132
CAPITULO 6. ACOPLAMIENTO DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES A UN DRON. ....	141
6.1 COMPONENTES MECÁNICOS DE UN CUADRICOPTERO .....	142
6.2 MOTORES. ....	143
6.3 HÉLICES .....	144
6.4 CONTROL ELECTRÓNICO DE VELOCIDAD (ESC; ELECTRONIC SPEED CONTROLLER) .....	145
6.5 BATERÍA. ....	145
6.6 UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL (IMU) .....	146
6.7 GIRÓSCOPO.....	146
6.8 ACELERÓMETRO .....	147
6.9 MAGNETÓMETRO .....	147
6.10 CONTROLADOR .....	147
6.11 COMUNICACIÓN PILOTO A DISTANCIA-CUADRICOPTERO. ....	148
6.12 ZIGBEE. ....	148
6.13 BLUETOOTH.....	149
6.14 TRANSMISORES DE RADIO CONTROL.....	149
6.15. SENSORES ULTRASÓNICOS.....	149
6.16. SENSOR INFRARROJO.....	150
6.17. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL CUADRICOPTERO.....	150
6.18. CARGADOR SOLAR.....	152
6.19 ¿PARA QUÉ SIRVEN LOS CARGADORES SOLARES? .....	152
ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES.....	158
CONCLUSIONES.....	159
APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	160
BIBLIOGRAFIA Y MESOGRAFIA.....	161
FIGURA 1. IMPUREZA DE ANTIMONIO EN UN MATERIAL TIPO N. ....	18
FIGURA 2. IMPUREZA DE BORO EN UN MATERIAL TIPO P. ....	19
FIGURA 3. CELDA SOLAR (CONSTITUIDA POR UNA UNIÓN PN) CONECTADA A UNA CARGA. ....	20
FIGURA 4. ELEMENTOS DE UN PANEL Y CONJUNTO FOTOVOLTAICO. ....	21
FIGURA 5. MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR POR DÍA EN EL TERRITORIO NACIONAL (KWH/ M <sup>2</sup> ). [] .....	25
FIGURA 6. SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES.....	31
FIGURA 7. ÁNGULOS DE INCIDENCIA EN INVIERNO Y VERANO.....	34
FIGURA 8. ENERGÍA PRODUCIDA EN UN DÍA EN UN PANEL FIJO Y EN UNO CON SEGUIDOR SOLAR. ....	35
FIGURA 9. RADIACIÓN DIRECTA, RADIACIÓN DIFUSA Y RADIACIÓN REFLEJADA. ....	41
FIGURA 10. MOVIMIENTO DE ROTACIÓN. ....	42
FIGURA 11. MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN. ....	42

FIGURA 12. INCLINACIÓN DEL EJE TERRESTRE. ....	43
FIGURA 13. LATITUD DE UN PUNTO P. ....	44
FIGURA 14. LONGITUD DE UN PUNTO P. ....	44
FIGURA 15. ALTITUD. ....	44
FIGURA 16. REPRESENTACIÓN DE LA BÓVEDA CELESTE DE UN DETERMINADO LUGAR DE OBSERVACIÓN EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD Y LATITUD DEL OBSERVADOR. ....	45
FIGURA 17. CENIT, NADIR, ALTURA SOLAR Y AZIMUT. ....	45
FIGURA 18. RECORRIDO SOLAR DURANTE LOS EQUINOCIOS. ....	46
FIGURA 19. RECORRIDO SOLAR DURANTE LOS SOLSTICIOS. ....	46
FIGURA 20. ALTURA SOLAR H. ....	47
FIGURA 21. POSICIÓN RELATIVA DEL PLANO DEL ECUADOR Y DE LA ECLÍPTICA QUE DEFINE LA DECLINACIÓN SOLAR. ....	48
FIGURA 22. ESQUEMA QUE ILUSTRRA EL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL ÁNGULO HORARIO. ....	49
FIGURA 23. ACIMUT SOLAR (A). ....	51
FIGURA 24. ESQUEMA QUE ILUSTRRA LA SEGUNDA LEY DE KEPLER. ....	52
FIGURA 25. COORDENADAS ANGULARES PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DEL SOL Y LA FORMA DE MEDIRLAS. ....	54
FIGURA 26. GRÁFICA SOLAR PARA LA LATITUD 19° N Y SUS COMPONENTES BÁSICOS. ....	56
FIGURA 27. CONFIGURACIÓN INTERNA DE UN MICROPROCESADOR. IMAGEN PROPIEDAD DE MIKROCHIP. ....	59
FIGURA 28. ARQUITECTURA HARVARD. ....	61
FIGURA 29. ARQUITECTURAS RISC Y CISC. ....	62
FIGURA 30. PATILLAJE DEL MICROCONTROLADOR. ....	68
FIGURA 31. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PIC18F4550. ....	69
FIGURA 32. DISTRIBUCIÓN DE LA MEMORIA RAM DE PIC 18F4550. ....	71
FIGURA 33. MANIPULACIÓN DE MEMORIA DE PILA. ....	73
FIGURA 34. APARIENCIA DEL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	78
FIGURA 35. APARIENCIA DEL ENTORNO DE DESARROLLO DEL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	79
FIGURA 36. SELECCIÓN DE UN NUEVO PROYECTO EN EL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	80
FIGURA 37. APARIENCIA DE LA VENTANA NEW PROJECT WIZARD DEL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	80
FIGURA 38. APARIENCIA LA VENTANA DE SELECCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE UN PROYECTO DEL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	81
FIGURA 39. APARIENCIA DE LA VENTANA DE ADICIÓN DE UN ARCHIVO EXISTENTE EN UN PROYECTO DEL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	82
FIGURA 40. APARIENCIA DE LA VENTANA DE ADICIÓN DE LIBRERÍAS, EN UN PROYECTO DEL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	83
FIGURA 41. CÓDIGO DE UN PROGRAMA EN EL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	84
FIGURA 42. ETIQUETA BUILD, PARA LA COMPILACIÓN EN EL SOFTWARE MIKROC PRO FOR PIC. ....	85
FIGURA 43. FICHEROS DE SALIDA DEL COMPILADOR MIKROC PRO FOR PIC. ....	85
FIGURA 44. VISUALIZACIÓN DEL CÓDIGO ENSAMBLADOR DEL COMPILADOR MIKROC PRO FOR PIC. ....	86
FIGURA 45. MODELOS DE MOTORES PASO A PASO. ....	87
FIGURA 46. DIFERENTES TIPOS DE CABLEADO DE LAS BOBINAS. ....	90
FIGURA 47. DISTRIBUCIÓN DEL BOBINADO DE UN MOTOR UNIPOLAR. ....	91
FIGURA 48. CIRCUITO Y SECUENCIA PARA CONTROLAR UN MOTOR UNIPOLAR. ....	91
FIGURA 49. SECUENCIA PARA LOGRAR MÁS FUERZA. FIGURA 50. SECUENCIA PARA LOGRAR MEDIO-PASO. ....	91
FIGURA 51. CONTROL DE AVANCE CON UN ÚNICO INTEGRADO CD 4017. ....	92
FIGURA 52. DISTRIBUCIÓN DEL BOBINADO DE UN MOTOR BIPOLAR. ....	92

FIGURA 53. SECUENCIA DE PULSOS PARA UN MOTOR BIPOLAR.....	93
FIGURA 54. CIRCUITO DE MANEJO PARA UN MOTOR DE RELUCTANCIA VARIABLE.....	93
FIGURA 55. PASO SIMPLE.....	94
FIGURA 56. PASO DOBLE.....	94
FIGURA 57. MEDIO PASO.....	95
FIGURA 58. ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL CI ULN2003.....	95
FIGURA 59. DIBUJO, VISTA SUPERIOR Y SÍMBOLO DE UNA FOTORRESISTENCIA (LDR).....	96
FIGURA 60. RELACIÓN RESISTENCIA-ILUMINACIÓN PARA UN LDR.....	98
FIGURA 61. FOTO GENERACIÓN DE PORTADORES.....	99
FIGURA 62. DISMINUCIÓN DE PORTADORES AL DEJAR DE ILUMINAR LA LDR.....	99
FIGURA 63. ÁREA O ZONA DE TRABAJO DEL MÓDULO ISIS.....	101
FIGURA 64. BARRA DE TÍTULO.....	102
FIGURA 65. MENÚS DE ARCHIVOS.....	102
FIGURA 66. HERRAMIENTAS MÚLTIPLES DE PROTEUS.....	103
FIGURA 67. SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	104
FIGURA 68. SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	105
FIGURA 69. DESPLIEGUE DE LAS LIBRERÍAS DE DISPOSITIVOS DE ISIS PROTEUS.....	105
FIGURA 70. ELECCIÓN DE COMPONENTE O DISPOSITIVO DESEADO.....	106
FIGURA 71. SELECCIÓN DE RESISTOR.....	107
FIGURA 72. BOTÓN DE ARRANQUE DE SIMULACIÓN.....	107
FIGURA 73. SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES MICROCONTROLADO Y SU SIMULACIÓN.....	108
FIGURA 74. MICROCONTROLADOR PIC18F4550.....	109
FIGURA 75. MOTOR 1.....	109
FIGURA 76. MOTOR 2.....	109
FIGURA 77. CONTROLADOR 1.....	110
FIGURA 78. CONTROLADOR 2.....	110
FIGURA 79. FOTORRESISTENCIA 1.....	110
FIGURA 80. FOTORRESISTENCIA 2.....	110
FIGURA 81. ARREGLO DE LEDS.....	111
FIGURA 82. CONTINUIDAD DE ARREGLO DE LED.....	111
FIGURA 83. PROGRAMADOR PICKIT2.....	111
FIGURA 84. PINES DE SALIDA DEL PROGRAMADOR PICKIT2.....	112
FIGURA 85. INTERFACE DE PROGRAMACIÓN.....	113
FIGURA 86. COMANDOS DE GRABACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	115
FIGURA 87. PROGRAMADOR DE PIC A LA IZQUIERDA Y TARJETA DE DESARROLLO A LA DERECHA.....	116
FIGURA 88. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL DEL PIC18F4550, QUE ORQUESTA EL MANEJO DE NUESTRO SEGUIDOR SOLAR.....	117
FIGURA 89. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL COMPORTAMIENTO DEL SEGUIDOR SOLAR.....	118
FIGURA 90. MICROCONTROLADOR PIC 18F4550.....	119
FIGURA 91. MEDIDAS DEL PIC 18F4550.....	120
FIGURA 92. PERSPECTIVAS DEL MOTOR 28BYJ-48 VISTAS DESDE DIFERENTES ÁNGULOS.....	121
FIGURA 93. ESQUEMA QUE MUESTRA LAS MEDIDAS REALES DEL MOTOR 28BYJ-48.....	121
FIGURA 94. DRIVER DEL MOTOR 28BYJ-48.....	123
FIGURA 95. MOTOR COLOCADO SOBRE EL EJE VERTICAL.....	123
FIGURA 96. MOTOR COLOCADO SOBRE EL EJE HORIZONTAL.....	123
FIGURA 97. VISTA FRONTAL Y TRASERA DE LA PLACA FENÓLICA QUE PORTA AL CIRCUITO ULN2003.....	124
FIGURA 98. VISTA FRONTAL Y TRASERA DEL CIRCUITO ULN2003A MONTADO EN PLACA FENÓLICA PERFORADA.....	125
FIGURA 99. DIAGRAMA DE UN CANAL, ESQUEMA INTERNO Y EXTERNO DEL CIRCUITO ULN2003A.....	126
FIGURA 100. FOTORRESISTORES DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES.....	126

FIGURA 101. HOJA TÉCNICA DE FOTORRESISTORES LDR 4.3 MM X DIÁMETRO DE 5.1 MM. ....	127
FIGURA 102. VISTAS DEL DIAGRAMA DE PISTAS UTILIZADO PARA GENERAR EL CIRCUITO IMPRESO DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES IMPLEMENTADO EN LA PRESENTE TESIS. ....	129
FIGURA 103. VISTA SUPERIOR DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	130
FIGURA 104. VISTA LATERAL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	130
FIGURA 105. VISTA FRONTAL DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	131
FIGURA 106. MÓDULO SOLAR FIJO CUYO SOPORTE ESTÁ COLOCADO A 30° CON RESPECTO AL PLANO HORIZONTAL. LA HORA DE REGISTRO DE DATOS PARA ESTA POSICIÓN ES 12:00 PM (MEDIO DÍA).....	133
FIGURA 107. SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES EN FUNCIONAMIENTO, CUYO SOPORTE ESTÁ COLOCADO EN UN ÁNGULO DONDE CAPTA LA MAYOR RADIACIÓN SOLAR POSIBLE. LA HORA DE REGISTRO DE DATOS PARA ESTA POSICIÓN ES 12:02 PM (DOS MINUTOS PASANDO MEDIO DÍA). ....	133
FIGURA 108. GRÁFICA POTENCIA-TIEMPO DE LA CELDA MONTADA EN EL MÓDULO SOLAR FIJO. ....	136
FIGURA 109. GRÁFICA POTENCIA-TIEMPO DE LA CELDA MONTADA EN EL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	137
FIGURA 110. GRÁFICA POTENCIA-TIEMPO DE LA CELDA MONTADA EN EL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	137
FIGURA 111. SUMINISTRO DE ENERGÍA DE LA CELDA DURANTE EL INTERVALO DE TIEMPO DE 6AM A 6PM PARA LA CONFIGURACIÓN FIJA Y PARA LA DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	138
FIGURA 112. CUADRICÓPTERO MODELO QR X350 PRO. ....	141
FIGURA 113. DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES EN EL ARMAZÓN DEL CUADRICÓPTERO. ....	143
FIGURA 114. MOTOR BRUSHLESS OUTRUNNER EMAX CF2822 - 1200KV. ....	143
FIGURA 115. HÉLICES Y PORTA HÉLICES DEL CUADRICÓPTERO. ....	145
FIGURA 116. ESC EMAX DE 25 A. ....	145
FIGURA 117. BATERÍA TCB 2200MAH 3S (11,1V,) 25C. ....	146
FIGURA 118. IMU ALTÍMU-10. ....	147
FIGURA 119. ATMEGA 2560 DE ARDUINO. ....	148
FIGURA 120. ELEMENTOS DEL CUADRICÓPTERO, ....	151
FIGURA 121. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL CARGADOR SOLAR. ....	153
FIGURA 122. CIRCUITO BASE PARA EL DISEÑO DE UN CARGADOR SOLAR. ....	153
FIGURA 123. ELEMENTOS DEL CUADRICÓPTERO INCLUYENDO EL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES Y CARGADOR SOLAR EN LA ESTRUCTURA DEL MISMO. ....	155
FIGURA 124. DIAGRAMA DE INTEGRACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES AL CUADRICÓPTERO. ....	156

TABLA 1. CATEGORÍA DE DRONES. ....	28
TABLA 2. RELACIÓN ENTRE LA HORA Y EL ÁNGULO HORARIO W. ....	50
TABLA 3. PUERTOS DEL PIC18F4550. ....	75
TABLA 4. TABLA QUE REGISTRA TIPO, CANTIDADES Y COSTOS DE LOS ELEMENTOS EMPLEADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	128
TABLA 5. VALORES REGISTRADOS PARA EL MÓDULO SOLAR FIJO A 30° DEL PLANO HORIZONTAL. ....	134
TABLA 6. VALORES REGISTRADOS PARA EL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES EN FUNCIONAMIENTO. ....	134
TABLA 7. VALORES DE CORRIENTE, VOLTAJE Y POTENCIA GENERADAS POR LA CELDA CUANDO ESTÁ MONTADA EN EL MÓDULO SOLAR FIJO, DE LAS 6 A LAS 18:00 HRS. ....	135
TABLA 8. VALORES DE CORRIENTE, CORRIENTE Y POTENCIA. ....	136
TABLA 9. RESISTENCIAS OFRECIDAS POR LOS SENSORES S1 Y S2. ....	139
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR EMAX CF2822 - 1200KV. ....	144
TABLA 11. ESPECIFICACIONES DEL DISPOSITIVO DE CARGA. ....	154

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo al creador del universo que me dio la vida y con ello me dio la oportunidad de adquirir el conocimiento necesario para ser un hombre digno y útil este mundo.

Con todo mi amor y respeto a mi familia quienes con su ejemplo de vida me forjaron con amor y disciplina para ser un buen profesionalista y hombre de bien.

Y con amor a Diana por caminar siempre a mi lado.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco al altísimo Dios por haberme dado la vida en este tiempo y en este espacio, porque gracias a este hecho, crecí con la mejor familia que un hijo y hermano podría desear.

A mi madre Ofelia. mujer de incalculable valor y el amor más grande de mi vida, quien me enseñó a amar y respetar a todo ser en este universo y que incansable con la fuerza de un roble me dio un gran ejemplo de vida, enseñándome con ello a jamás rendirme ante ninguna circunstancia.

A mi hermano Filiberto hombre de inconmensurables cualidades y vasta sabiduría, quien, con paso firme, honestidad, amor y sus siempre acertados consejos me enseñó a ser un hombre completo y a luchar cada día por ser un hombre en constante evolución.

A mis grandes maestros y maestras, mis hermanos y hermanas, quienes con amor, gran sabiduría y perfecta maestría me enseñaron a ser un hombre que sirve de manera honrada y honesta a la sociedad.

A Diana quien con amor e inteligencia me enseñó lo hermoso e importante que es una relación de respeto entre dos seres y que los sueños más grandes, se alcanzan y se comparten con los que amas.

A Laura Vanesa con gran respeto y cariño, por ser una persona que cambio mi vida y me enseñó que la mayor de las riquezas de este mundo es el amor.

A mis sobrinos y sobrinas por recordarme lo importante que es recibir cada momento de la vida con una sonrisa.

Al honorable Doctor Pablo Perez Alcazar por compartir conmigo de su tiempo y vasto conocimiento y guiarme con excelente maestría e inteligencia en la elaboración de esta tesis.

A los Ilustres y respetados maestros: Doctora Celia Angelina Sánchez Pérez, Ingeniero Eduardo Carranza Torres, Maestro Juan Ricardo Damian Zamacona y al Ingeniero Ruben Monroy Diaz. porque con gran sapiencia y generosidad, me transmitieron su gran conocimiento y me enseñaron con su ejemplo, que un profesionalista de ser honesto, disciplinado perseverante, generoso y sobre todo a siempre estar a la vanguardia de nuevos descubrimientos y metodologías de estudio.

A todas aquellas personas que, con sus valiosos consejos y buenos deseos, ayudaron en mi formación académica.

A la majestuosa Universidad Nacional Autónoma de México y a la honorable Facultad de ingeniería por forjarme con altos valores y conocimientos de alto nivel.

## RESUMEN

El aprovechamiento eficiente de la energía solar mediante celdas o paneles fotovoltaicas, para abastecer de energía a sistemas eléctricos y electrónicos que hacen más cómoda la vida del hombre, requiere de herramientas sofisticadas y específicas que permitan la máxima captación de energía solar. Es por ello que el presente trabajo de tesis, se centra en el diseño y construcción de un seguidor solar de dos ejes, el cual está constituido por un microcontrolador, sensores (fotoceldas), circuitos y motores de paso; todos ellos interconectados entre si y controlados mediante el microcontrolador PIC18F4550, el cual se rige por el algoritmo que se programó en su interior. Dicho microcontrolador será el cerebro electrónico que controle y coordine las instrucciones necesarias, para que el seguidor busque colocar los sensores y a la celda o panel solar en una posición en la que los rayos solares incidentes sean perpendiculares a la superficie de dicha celda, garantizándose con eso, la mayor captación de energía. Se propone que dicho seguidor, en combinación con la celda o panel solar, funcione como parte de una fuente de alimentación de un dron.

**Palabras Clave:** energía solar, celda fotovoltaica, microcontrolador y seguidor solar de dos ejes.

La presente tesis, se desarrollará en 6 capítulos, los cuales se describirán en los párrafos siguientes. El trabajo culmina con la presentación de los resultados sus alcances de aplicación.

**Capítulo 1.** En este capítulo abordaremos los aspectos matemáticos y conceptos necesarios, que describen y explican los movimientos del sol con respecto a nuestro planeta.

**Capítulo 2.** Este capítulo incluye la descripción de las características de los elementos electrónicos y mecánicos que conforman el seguidor solar. De todos o del analizado

**Capítulo 3.** Explica los elementos básicos de los programas utilizados para diseñar y simular el seguidor solar de dos ejes.

**Capítulo 4.** Describe la implementación física del seguidor solar y la estructura global del mismo.

**Capítulo 5.** Presenta las pruebas realizadas al seguidor solar con el objetivo de asegurar que sea un sistema eficiente y funcional, garantizando con esto que sirva de manera adecuada en la tarea para la cual se diseñó.

**Capítulo 6.** Menciona los fundamentos y bases que se necesitan para poder acoplar el seguidor solar a un dron.

## INTRODUCCION

El hombre, en su actual estilo de vida, demanda un amplio abastecimiento y consumo de energía para poder efectuar sus actividades laborales, intelectuales, sociales y en general para una amplia gama de tareas de las que depende su salud, bienestar y comodidad.

A través del tiempo se ha observado que los avances de la ciencia y la tecnología de cada época, determinan el tipo de proceso de explotación y obtención de energía que el hombre necesita. Estos avances tecnológicos hacen más cómodo y funcional el estilo de vida del hombre. Como ejemplo se puede mencionar el manejo de los drones, los cuales en la actualidad ayudan en diversas actividades y facilitan la realización de tareas que en otros tiempos eran impensables de llevar a cabo con tanta comodidad, pero hoy en día son realizables con el uso de estos sistemas de vuelo no tripulados.

Regresando al tema de la energía, es necesario hablar de la gama de fuentes de energías a disposición del hombre, entre las cuales se pueden mencionar: la eólica, la geotérmica, la hidráulica, la nuclear, la solar fotovoltaica y la termoeléctrica; sin embargo, para los fines que este proyecto persigue, se elegirá la que nos brinde más ventajas.

Es conveniente mencionar que la obtención de cada una de ellas genera un impacto ambiental cuyo grado depende del tipo de energía. Podemos recurrir a la historia de la humanidad en lo concerniente al tema de explotación de energía y encontrarnos con el riesgo y daño que ha causado el mal manejo de la producción de energía nuclear, o bien observar que la producción de algunas energías que, aunque no genera un riesgo potencial a la humanidad, sí impacta bastante en los entornos naturales y en la salud del hombre. Hay tipos de producción de energía que, si bien no se eximen de causar un impacto ambiental, lo hacen en un grado muy pobre y con grandes beneficios para el hombre y su entorno, como sucede con la producción y uso de la energía eólica y la solar fotovoltaica.

Es importante mencionar que la energía solar se puede obtener en casi cualquier lugar del planeta ya sea en mucha o poca cantidad, pero presente al fin. Es un recurso que está allí de manera regular y es necesario aprovechar, ya que, si se generan las herramientas necesarias para su aprovechamiento, la humanidad se beneficiará en gran medida con su explotación.

Una de esas herramientas para el aprovechamiento de la energía solar, es el llamado seguidor solar. Un seguidor solar es un dispositivo electrónico y mecánico capaz de orientar los paneles o celdas solares de forma que éstos permanezcan cercanos a la perpendicular de los rayos solares, siguiendo al sol desde la alborada hasta la puesta.

En la presente tesis, se diseñará e implementará un seguidor solar de dos ejes del tipo electro óptico y microcontrolado, mediante el cual se pretende seguir la posición del sol en toda dirección donde este se posicione, con la finalidad de alcanzar la mayor eficiencia en la captación de rayos solares incidentes sobre una celda solar que alimentará de energía a un dron.

### **Energía como el motor del avance tecnológico y el bienestar del hombre.**

Desde sus orígenes, el hombre ha empleado la energía para realizar sus actividades cotidianas, satisfacer sus necesidades básicas y hacer más cómodo su estilo de vida. En la actualidad, la creciente demanda y producción de energía, se ha vuelto un factor decisivo para el desarrollo de las diferentes actividades diarias del hombre y el progreso de la sociedad. Por lo antes expuesto, se infiere que la energía es un recurso imprescindible para el progreso de nuestro país y de cualquier otro. Así como también se infiere, que los pueblos requieren un abastecimiento basto, continuo y eficiente de energía; para así poder alcanzar un gradual crecimiento económico y una constante evolución de su sociedad.

Hoy en día, el petróleo y sus derivados son los combustibles que los pueblos del mundo consumen, ya sea porque estos se hayan en el suelo de estos pueblos o por la influencia económica que ejercen las potencias mundiales al consumir este combustible. El petróleo se usa para impulsar el desarrollo de su industria y para la modernización del estilo de vida de sus sociedades.

Sin embargo, con el paso de los años, el hombre se ha percatado de que el petróleo es un recurso que puede en cualquier momento terminarse y, con él, toda la industria que depende de este combustible. Ya se han vivido malos tiempos en el sector petrolero, como cuando se presentó la crisis petrolera en

octubre de 1973 [1], que dejó como experiencia que el hombre no puede, ni debe depender de los combustibles fósiles para satisfacer la demanda de energía que se requiere consumir.

Por lo expuesto antes y por los graves daños que causa el manejo irresponsable del petróleo a nuestro planeta y a los seres que en el vivimos, el hombre busca fuentes alternativas de energía, que no impacten gravemente el equilibrio y naturaleza de nuestro planeta.

En la búsqueda de fuentes de energía alternativas nos encontramos con las llamadas energías renovables.

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuenta con: la hidroeléctrica; la eólica; la radiante solar, que puede llegar a la tierra de manera directa o indirecta; la geotérmica; la mareomotriz; la biomasa y los biocombustibles. De las formas de energías antes mencionadas centraremos nuestra atención en la energía solar [2].

## **Energía solar.**

La energía solar que recibe nuestro planeta es resultado de un proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el interior del Sol. De toda la energía que produce ese proceso, nuestro planeta recibe menos de una milmillonésima parte. Esa energía recorre en ocho minutos 145 millones de kilómetros, que es la distancia que separa al Sol de la Tierra.

La energía solar se manifiesta en un espectro que se compone de radiación ultravioleta, visible e infrarroja. Al llegar a la Tierra, pierde primero su parte ultravioleta, absorbida por una capa de ozono que se presenta en el límite superior de la atmósfera. Ya en la atmósfera, la parte infrarroja se pierde ya sea

---

1 [Miguel García Reyes](#). *Estados Unidos, petróleo y geopolítica: las estrategias petroleras como un instrumento de reconfiguración geopolítica*. 2005. México, D.F: Plaza y Valdés, S.A. de C.V. ISBN:970-722-351-0.

2 [Erminia Silvas](#). *Energías Renovables: definición y principales tipos*. 2012. web <http://www.capitaldelabiodiversidad.es/2012/02/energias-renovables-definicion-y.html>.

por dispersión al reflejarse en las partículas que en ella se presentan o al llegar a las nubes, que son capaces de reflejar hasta un 80% de la radiación solar que a ellas llega. El resto llega a la superficie, ya sea de manera directa o indirecta como reflejo de las nubes y partículas en la atmósfera.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre se puede transformar directamente en electricidad o calor. El calor, a su vez, puede ser utilizado directamente como calor o para producir vapor y generar electricidad.

Es precisamente la energía radiante solar, la que se hace presente en casi cualquier parte del planeta, en poca o mucha cantidad. Por lo tanto, es necesario aprovechar esta fuente universal de energía, utilizándola para el bienestar del hombre y como la fuente de abastecimiento de los diferentes sistemas electrónicos que hacen más eficientes las tareas de la humanidad, tal como podría ser el abastecer un dron mediante el uso de los seguidores solares que hacen más eficiente su captación.

### **La tecnología solar fotovoltaica.**

Como se mencionó anteriormente, se puede convertir la energía luminosa que irradia el sol en electricidad de manera directa. Esto se logra mediante un proceso que convierte la luz solar en electricidad, usando las llamadas celdas fotovoltaicas. A continuación, se explicará, brevemente, en que consiste la tecnología solar fotovoltaica y las celdas fotovoltaicas.

Las tecnologías fotovoltaicas se basan en el efecto fotovoltaico, que es un proceso que ocurre a nivel atómico o molecular en ciertos materiales llamados semiconductores.

Los semiconductores son una clase especial de elementos cuya conductividad se encuentra entre la de un buen conductor y la de un aislante.

Los tres semiconductores utilizados con mayor frecuencia en la construcción de dispositivos electrónicos son Ge (Germanio), Si (Silicio) y GaAs (Arseniuro de Galio).

Un material semiconductor que ha sido sometido al proceso de dopado (adicionado con átomos de otro elemento) se conoce como material extrínseco.

Hay dos materiales extrínsecos de gran importancia en la fabricación de dispositivos semiconductores: materiales tipo *n* y tipo *p*.

Tanto los materiales tipo *n* como los tipos *p* se forman agregando un número predeterminado de átomos de impurezas a una base de silicio o germanio.

Un material tipo *n* se crea introduciendo elementos de impurezas que contienen cinco electrones de valencia (pentavalentes), como el antimonio, el arsénico y el fósforo. Si recordamos que el silicio y el germanio tienen cuatro electrones de valencia, al efectuarse la unión de enlaces covalentes entre los átomos de silicio y antimonio observamos que el silicio comparte sus cuatro electrones de valencia, para que estos sean enlazados, con cuatro electrones de valencia del antimonio, y queda sin compartir el quinto electrón de valencia de este átomo pentavalente, el cual se encuentra libre en la estructura. Este quinto electrón queda sujeto solo por la fuerza de atracción de su átomo padre. A este tipo de átomos pentavalentes se les llama átomos donadores. Lo anterior se ilustra en la Figura 1.

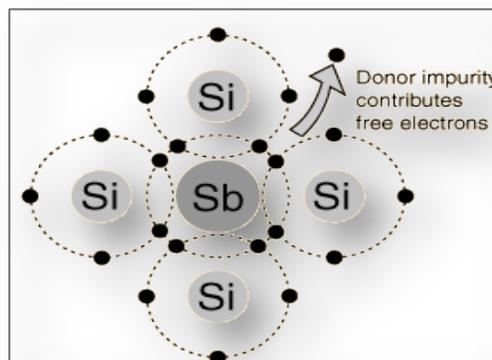


FIGURA 1. Impureza de antimonio en un material tipo *n*.

El material tipo *p* se forma dopando un cristal de germanio o silicio puro con átomos de impurezas que tienen tres electrones de valencia (trivalentes). Los elementos más usados para este propósito son el boro, galio e indio. Cuando se efectúa el dopado de silicio puro con átomos de boro, el silicio comparte tres de sus electrones de valencia con los tres únicos electrones de valencia del boro, pero hay un enlace que deja un hueco en la estructura, ya que el cuarto electrón del silicio no se enlaza con ningún electrón

del boro. A los átomos de impurezas de este tipo se les llama átomos aceptores [3]. Lo anterior se ve ilustrado por la Figura 2.

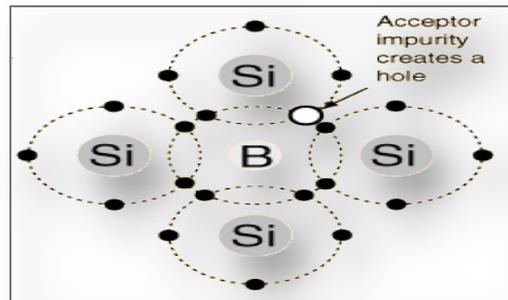


FIGURA 2. Impureza de boro en un material tipo p.

## Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es la propiedad que presentan algunos materiales de producir energía eléctrica al ser irradiados por energía solar, como es el caso de las celdas fotovoltaicas o solares. Este efecto se lleva a cabo en el interior de la celda como se explica a continuación.

Una celda solar es un dispositivo conformado por una unión **pn** sin voltaje aplicado directamente a través de sus terminales. La unión **pn**, que convierte la energía solar en energía eléctrica, está conectada a una carga como se indica en la Figura 3.

Cuando la luz golpea la región de empobrecimiento, se generan electrones y huecos, los cuales son rápidamente separados y expulsados de dicha región, por el campo eléctrico generado, creando así una fotocorriente. La fotocorriente generada producirá un voltaje a través de la carga, lo que significa, que la celda solar suministrará potencia. Las celdas solares son generalmente fabricadas con silicio, pero pueden ser hechas de GaAs u otros semiconductores compuestos III-V. Las celdas solares son utilizadas para alimentar la electrónica en satélites y vehículos espaciales, también como la fuente de alimentación para algunas calculadoras y en general se usan para alimentar diversos tipos de dispositivos que

---

3 [Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky](#), *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos Electrónicos y dispositivos electrónicos*. Décima edición. México. Estado de México: Pearson, 2009. Traducción de Rodolfo Navarro Salas. ISBN:978-607-442-292-4

necesitan energía eléctrica para poder operar. En la Figura 3 se muestra una imagen del efecto fotovoltaico [4].

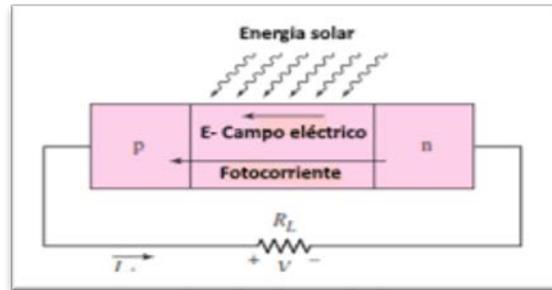


FIGURA 3. Celda solar (constituida por una unión pn) conectada a una carga.

Hoy, este fenómeno se aprovecha mediante la fabricación de pequeñas placas, denominadas celdas fotovoltaicas. Un arreglo formado por varias de estas celdas, las cuales se conectan unas con otras de forma secuencial y en paralelo, son encapsuladas para formar un dispositivo denominado módulo o panel fotovoltaico. Unos conjuntos de estos paneles se montan generalmente en soportes o estructuras, aunque hoy pueden quedar integrados como elementos de sombra, o incluso, como parte de las fachadas de algunos edificios. En la figura 4 se puede observar el ensamble de un módulo fotovoltaico:

---

4 [Donald A. Neamen](#). *Microelectronics: Circuit Analysis and Design, fourth edition*. McGraw-Hill, 4th ed 2010. ISBN 978-0-07-338064-3—ISBN 0-07-338064-4.

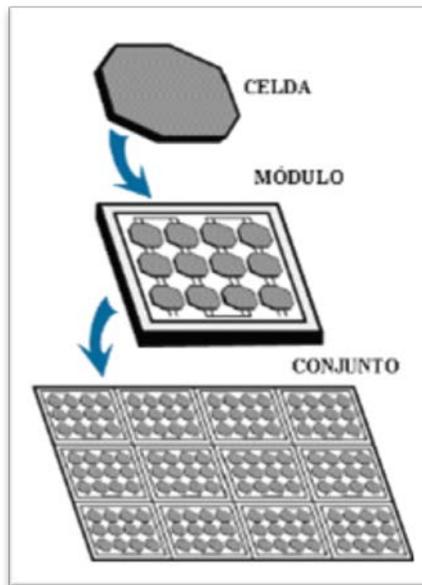


FIGURA 4. Elementos de un panel y conjunto fotovoltaico.

Una particularidad de la energía fotovoltaica es que la electricidad es entregada como corriente directa (o continua), por lo que en su conexión a la red eléctrica todavía es necesario transformarla en corriente alterna (la forma como la CFE (Comisión Federal de Electricidad) entrega la electricidad en nuestros hogares). Es por esta razón que, para poder aprovechar la energía solar, en la mayoría de los casos, se requiere de un inversor de corriente, el cual, junto con los demás componentes eléctricos, forma lo que se denomina un sistema fotovoltaico.

Una de las principales ventajas de los sistemas fotovoltaicos es que prácticamente no requieren mantenimiento a lo largo de su vida útil (aproximadamente 20 años); sin embargo, sus costos de inversión inicial todavía son altos comparados con los de otras tecnologías. Los costos de operación y mantenimiento son prácticamente nulos, dado que no se requiere emplear ningún combustible para la generación de electricidad. Se espera que tanto sus costos de inversión como de generación sigan disminuyendo significativamente en el transcurso de los próximos años.

Existen dos mercados en los cuales se puede aprovechar la energía solar para la generación de electricidad: los sistemas interconectados a la red eléctrica y los sistemas aislados (o autónomos).

## Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica y sistemas fotovoltaicos aislados.

### Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red.

Se encuentran principalmente en zonas urbanas o rurales, las cuales están interconectadas al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Estos sistemas están formados por los siguientes componentes:

- Panel o conjunto fotovoltaico
- Inversor de corriente
- Dispositivos de interconexión, protección y medición (interruptores, sistema de protección y medidor bidireccional)

### Sistemas aislados

Son característicos de comunidades rurales o zonas aisladas, en las cuales no es económicamente viable construir una red eléctrica para su interconexión con el SEN. Estos sistemas están formados por los siguientes componentes:

- Panel o conjunto fotovoltaico
- Banco y cargador de baterías
- Dispositivos de interconexión y protección
- Inversor de corriente (opcional, para cargas en corriente alterna)

En la actualidad, todas las tecnologías fotovoltaicas comerciales hacen uso de algún material semiconductor para generar el efecto fotovoltaico. Los materiales semiconductores son también la base de los componentes electrónicos como discos duros, chips, memorias, etc., por lo que la industria fotovoltaica se ha beneficiado de manera importante de los volúmenes de producción y técnicas de fabricación de la mucho más grande y experimentada industria del semiconductor, de otros materiales como compuestos orgánicos, de los avances en las tecnologías de las celdas Perovskit, y la nanotecnología, que son tecnologías emergentes que aun requieren un periodo importante de investigación y desarrollo antes de convertirse en productos comerciales [5].

El conjunto de tecnologías fotovoltaicas que actualmente existen como productos comerciales se enlista a continuación:

---

5 [SENER/GIZ](#). Programa de Fomento de Sistemas Fotovoltaicos en México (ProSolar), México, D.F., Julio de 2012

- Silicio mono-cristalino y poli-cristalino (m-Si o p-Si)
- Telurio de Cadmio (CdTe) – Pelicula Delgada
- CIGS o CIS (Cobre-Indio-Galio-Selenio) – Pelicula Delgada
- Silicio amorfo y Silicio micro-cristalino (aSi o  $\mu$ Si) – Pelicula Delgada
- Celdas multi-capa (GaAs, InGaP, Ge, etc)

Hasta la fecha, la tecnología dominante es el Silicio cristalino (poli y mono), con aproximadamente 90% del mercado global total. Las tecnologías de película delgada 9%, especialmente CdTe y su prácticamente único fabricante con 4%; CIGS con 2%; Silicio amorfo con 2%; y finalmente las celdas multicapa con el restante 1%.

### **Aprovechamiento de la energía solar en México.**

México es un país rico en recursos energéticos renovables cuyo desarrollo permitirá al país contar con una mayor diversificación de fuentes de energía; ampliar la base industrial en un área que puede tener valor estratégico en el futuro; y atenuar los impactos ambientales ocasionados por la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales.

Nuestro país es sumamente rico en materia de energías renovables. Su potencial de recursos abarca:

- Altos niveles de insolación;
- Recursos hidráulicos para la instalación de plantas mini hidráulicas;
- Vapor y agua para el desarrollo de campos geotérmicos;
- Zonas con intensos y constantes vientos prevalecientes;
- Grandes volúmenes de esquilmos agrícolas, e importantes cantidades de desperdicios orgánicos en las ciudades y en el campo, cuyo destino final debe manejarse de forma sustentable.

En México, existen actividades tendientes al aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones desde hace varias décadas, aunque es particularmente significativo el avance e interés de instituciones e industrias en las últimas tres décadas; periodo en el que se han desarrollado investigaciones y diversos proyectos, prototipos, equipos y sistemas para el mejor aprovechamiento de las energías renovables.

De manera general, resalta la investigación y desarrollo en energías renovables que arranca en la mitad de la década de los setentas y que continúa hasta la fecha. En este sentido, son importantes las actividades de universidades e institutos, nacionales y regionales, a lo largo y ancho del país. Igualmente, importante ha sido el trabajo de difusión y promoción de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), la cual ha unificado a esta comunidad, particularmente a través de sus reuniones nacionales celebradas anualmente desde 1977.

Con base en estudios sobre radiación solar en México, realizados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), se da a conocer que nuestro país es una de las naciones del mundo con mayor promedio de radiación solar anual, con índices que van del 4.7 o 5.5 kWh/m<sup>2</sup> a 6.3kWh/m<sup>2</sup> por día (ver Mapa de la Figura 5), dependiendo de la zona.

Si tomamos el valor de 5.5 kWh/m<sup>2</sup> como promedio de radiación solar, esto significaría, que, para un dispositivo de colección y transformación de energía solar a energía eléctrica, que tuviera una eficiencia de 100%, bastaría un metro cuadrado para proporcionar energía eléctrica a un hogar mexicano promedio que consume 150 kWh por mes. De manera más precisa, considerando eficiencias de 10% para los dispositivos en el mercado, se puede decir que con 200 millones de m<sup>2</sup> de área de colección de radiación solar (un área de 14.2 Km por lado) podríamos dar electricidad a todos los hogares mexicanos.

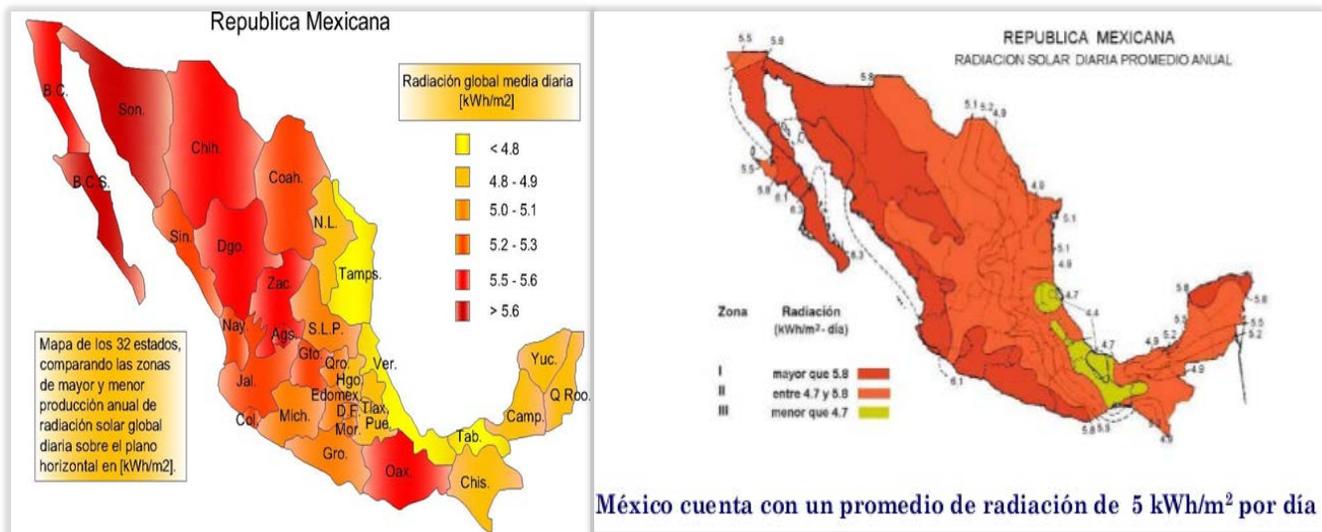


FIGURA 5. Mapas de radiación solar por día en el territorio nacional (kwh/ m<sup>2</sup>). [6].

La energía solar tiene, fundamentalmente, dos usos energéticos que son la generación de electricidad y aplicaciones térmicas.

La generación de electricidad se puede conseguir a través de dos tecnologías: la fotovoltaica y la concentración solar. Ambas tecnologías en México se encuentran en una fase incipiente y apenas existen medidas que promueven su utilización. Debido al elevado coste de la tecnología, que supone una elevada inversión inicial, no se han extendido tanto como otras energías renovables.

Sin embargo, el año 2015 significó para el sector solar fotovoltaico un crecimiento del ciento por ciento en cuanto a potencial instalado, considerando parques solares y generación distribuida. Se instalaron 100 MW en diversos proyectos en toda la República y para 2016 las proyecciones son aún mayores.

De acuerdo con cifras de la propia ANES, el mercado mexicano de energía solar fotovoltaica superó por primera vez en su historia los 100 MW instalados en un solo año. Con ello, la capacidad total acumulada asciende a más de 260 MW. Esta cifra resulta de la combinación de proyectos desarrollados en el año, tanto en lo que respecta a parques solares como al sector de generación distribuida, conformado por usuarios de pequeña escala, domésticos y comerciales.

México puede recuperar el liderazgo en la utilización de energía solar en Latinoamérica, pues se estima que unos 900 millones de dólares se invertirán en proyectos de energía solar en 2016, con lo que el mercado llegaría a los 600 MW, así lo da a conocer el vocero de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), Carlos Flores Macías.

El financiamiento para las instalaciones con paneles solares crece y lo proporcionan tanto organismos nacionales, incluyendo el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), como compañías extranjeras.

La industria también se verá favorecida por la entrada en operación de los certificados de energías limpias, donde quedaron descartadas las plantas de ciclo combinado.

El representante del gremio estimó que a lo largo de 2015 se instalaron en el país: entre 39 y 49 MW en parques solares, entre 18 y 20 MW en instalaciones comerciales de mediana escala, de 28 a 30 en instalaciones residenciales pequeñas, un [MW] en luminaria y tres [MW] en electrificación rural y bombeo de agua.

La capacidad de fabricación de paneles solares en México es ahora mayor a 1 Gigawatt (1000 MW), excediendo por mucho la demanda del mercado nacional. Por ello, parte de la producción de paneles solares se destina al mercado estadounidense.

Sobre las perspectivas para 2016, Flores Macías consideró que el mercado está a punto de entrar en una etapa de crecimiento exponencial, una vez que las reglas del mercado eléctrico han quedado definidas [7].

Lo anterior sirve de soporte y justificación, para la realización de la presente tesis, en donde se diseñará un seguidor solar microcontrolado para que un panel fotovoltaico pequeño, perteneciente a éste, reciba con mayor eficiencia rayos incidentes en su superficie y pueda fungir como parte de una fuente de alimentación de un dron.

---

<sup>7</sup> [SENER/GIZ](#). Programa de Fomento de Sistemas Fotovoltaicos en México (ProSolar), México, D.F., Julio de 2012

## Drones y sus aplicaciones

Después de presentar las herramientas necesarias de aprovechamiento de la energía solar como son las fotoceldas y los paneles solares, es necesario señalar que el seguidor solar diseñado en la presente tesis se usará como parte de una fuente de energía que logre poner en funcionamiento a un dron. Así que ahora mencionaremos diversos aspectos que permitan conocer acerca de estos Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS, Unmanned Aerial Systems o VANT, Vehículo Aéreo no Tripulado, por sus siglas en español) llamados drones.

Los “drones” se pueden definir coloquialmente como ojos en el cielo, ya que son poderosas herramientas de vigilancia que se pueden usar para diversos propósitos: monitorear ductos de hidrocarburos y volcanes activos; evaluar los daños provocados por incendios e inundaciones; localizar excursionistas perdidos; tomar fotografías con ángulos abiertos de eventos deportivos y más.

Los Vehículos No Tripulados se pueden utilizar en el aire (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), en tierra (UGV, unmanned ground vehicle) o mar, ya sea en la superficie (USV, Unmanned Surface Vehicle) o bajo el agua (UUV, Unmanned underwater vehicles ).

Sin importar dónde se utilicen, los Vehículos No Tripulados funcionan como parte de un sistema que requiere una estación de control y un enlace de datos que permita el control del vehículo. Así, los Vehículos No Tripulados también son conocidos como Vehículos Remotamente Pilotados (RPV), porque a fin de cuentas hay una persona que maneja la máquina.

Usualmente, a una estación de Control Terrestre (GCS) están ligados uno o más vehículos aéreos no tripulados. El enlace puede ser en línea de visibilidad (LOS) o utilizado con un satélite de comunicaciones (SATCOM). El SATCOM permite a un vehículo aéreo no tripulado volar más lejos y su alcance depende principalmente del combustible [8].

Dependiendo de sus características y alcances, los Sistemas Aéreos No Tripulados se dividen en: micro UAS, mini UAS, UAS Tácticos (TUAS), Altitud Media Largo Alcance (MALE) o Gran Altitud y Largo Alcance (HALE). La figura 7 señala el alcance posible en cada categoría.

---

8 [José Luis Esteban Herreros](#). *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Madrid, 2015  
Depósito Legal: M. 4519-2015

CATEGORÍAS DE LOS SISTEMAS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAS)	
TIPO	ALCANCE
Micro-UAS	1-5 km
Mini-UAS	10-30 km
Tactical (TUAS)	80-200 km
Altitud Media Largo Alcance(MALE)	200-500 km
Gran Altitud Largo Alcance(HALE)	500 o más km

TABLA 1. Categoría de drones.

En los últimos años, gracias a que los precios de fabricación descendieron, se amplió el uso de estos vehículos no tripulados y podemos disponer de esta tecnología para otras funciones más nobles como la investigación científica o el entretenimiento. Tengamos en cuenta que comprar un dron es extremadamente más barato que comprar un helicóptero y los costos operativos son muchísimos más bajos.

Los drones se manejan con control remoto (tipo joystick) o a través de aplicaciones para Smartphone o Tablet. Actualmente hay diferentes apps (aplicaciones) desarrolladas para iOS (iOS es un sistema operativo móvil de la compañía multinacional Apple), Android y hasta Linux para pilotear un dron que saque fotos y filme. Las empresas que se dedican al desarrollo de este producto tienen como objetivo hacerlo cada vez más intuitivo y fácil de usar para todos los públicos.

Al momento ya tienen varias funciones ganadas dentro de la sociedad y otras tantas que están en plena fase de experimentación.

Aquí las tareas que hasta el momento han sido probadas con drones:

- En eventos sociales y culturales
- Para entregas de productos
- En situaciones de emergencia
- En búsqueda de personas
- Para control fiscal
- Vigilancia fronteriza

- Para dimensionar Zonas rurales
- Control de incendios forestales
- Investigaciones arqueológicas
- Fines geológicos
- Investigaciones Biológicas y Manipulación de material nocivo
- Como satélites y para recreación.

Los drones llegaron para quedarse y sus usos parecen aumentar cada día de la mano de la población civil y científica. Estamos viviendo el auge de la creatividad en funciones y aplicaciones de este aparato, las cuales parecen realmente infinitas. Probablemente, algún día con el avance de la tecnología, estas fascinantes naves nos permitan explorar zonas fuera del planeta y hasta donde la imaginación dé.

#### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Siguiendo con el tema de energía y de sistemas diseñados con elementos electrónicos, como los drones, se sabe que los sistemas y dispositivos electrónicos y electromecánicos, solo pueden iniciar su operación o arranque cuando a estos se les suministra energía. En esencia existen dos maneras tradicionales para realizar ese suministro: una de ellas es mediante la conexión de dichos sistemas a una toma de corriente, ya sea directamente o con un regulador de voltaje mediante un cable físico, y la otra mediante una batería.

Los drones de nuestra era funcionan mediante baterías, que pueden ser o no recargables. La limitante de las baterías es que su carga no es permanente y tiende a terminarse después de determinado lapso de tiempo.

El que un determinado dron haya cumplido alguna tarea asignada en el tiempo en el que la batería aún tiene carga es excelente, pero si no logra realizarla a tiempo y se queda sin energía, esto se vuelve un gran problema, sobre todo si la tarea asignada al dron tiene que ver con situaciones en la que la vida o la integridad de las personas depende de que se completen las tareas de dicho dron. Imaginemos, por ejemplo, que un dron de rescate busca a gente que quedó atrapada por algún sismo o que se ha perdido en alguna zona inhóspita, o bien es secuestrada por delincuentes, es ahí donde se valora que el dron cumpla su tarea en el tiempo adecuado. Por lo anteriormente planteado, en la presente tesis se propone

un método alternativo para suministrar energía al dron o bien efectuar la recarga de su batería. Lo anterior se llevará a cabo mediante celdas solares que son dirigidas por un seguidor solar de dos ejes controlado electrónicamente.

## **Estado del arte**

### **Seguidores Solares.**

Ya hemos visto que el aprovechamiento de la energía solar proporciona enormes ventajas frente a otras fuentes de energías, en particular la captación de ésta por medio de células o paneles fotovoltaicos, cuya tecnología se va haciendo con el paso del tiempo más eficiente; sin embargo, como se mencionó, la mayor captación de las células y paneles solares se presenta cuando los rayos solares inciden de manera perpendicular a la superficie de dichas celdas o paneles. Para garantizar el ángulo adecuado para esa mayor captación, en esta tesis se diseñará un seguidor solar de dos ejes, microcontrolado, que siga al sol y ajuste la posición del panel o celda solar de manera que los rayos incidan siempre perpendiculares a la superficie de captación, garantizando con esto el mayor aprovechamiento de la energía solar. Considerando lo anterior, es necesario abordar algunos aspectos básicos indispensables en relación a los seguidores solares de tal manera que se tenga una idea de qué son estos sistemas y cómo funcionan.

### **Definición de seguidor solar**

Un seguidor solar es un dispositivo electro-mecánico capaz de orientar los paneles o celdas solares de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol, desde el este, en la alborada, hasta el oeste, en la puesta [9].

### **Tipos de seguidores solares y su clasificación:**

Existe una gran variedad de seguidores solares en el mercado, los cuales se pueden clasificar atendiendo a varios factores, que se describen a continuación.

---

<sup>9</sup> [Meca solar](#). *Seguidores Solares de alta tecnología*. MS-2E TRACKER

Atendiendo a la capacidad de movimiento, los seguidores se pueden clasificar en:

- **Dispositivos fijos.** Son aquellos en los que los paneles solares permanecen fijos, sin tener en cuenta la orientación solar. Este tipo de dispositivos no son viables para paneles solares de concentración ya que no son efectivos.
- **Dispositivos de un eje.** Estos dispositivos solo disponen de un eje de giro, por lo que no permiten alcanzar todas las posiciones angulares. Este tipo de seguidores se clasifican en función de la configuración del eje de giro.
- **Dispositivos de dos ejes.** Éstos disponen de dos ejes de giro y permiten alcanzar cualquier Orientación. La Figura 6 muestra este tipo de seguidor.



FIGURA 6. Seguidor solar de dos ejes.

**Seguidores con programación astronómica:** Se trata de seguidores que mediante un programa de computadora y modelos matemáticos que describen la localización del sol respecto a la tierra, conocen en qué punto debería estar el sol en cada instante y apuntan hacia dicha posición.

La diferencia principal entre los seguidores descritos anteriormente estriba en la capacidad de conseguir la orientación adecuada que maximice la generación de energía eléctrica. Los primeros, evidentemente, están limitados, ya que no tienen capacidad de movimiento y su orientación es fija. Los seguidores de un

solo eje, permiten acercarse a la orientación óptima, pero no alcanzan generalmente una orientación precisa, ya que su capacidad de movimiento está limitada a un solo eje. Finalmente, los seguidores de dos ejes permiten alcanzar cualquier orientación, por lo que la generación de energía eléctrica es máxima.

**Atendiendo a la unidad de control, los seguidores se pueden clasificar también en varios tipos:**

- **Pasivos.** El seguidor solar pasivo es un seguidor de un eje polar que carece de un control electrónico para su funcionamiento, su diseño se basa en el cambio de densidad de un líquido de bajo punto de ebullición, regularmente freón. El líquido se encuentra en dos tanques alineados de este a oeste e interconectados entre sí. Cuando recibe los rayos solares el líquido contenido se evapora y la diferencia de pesos provoca el movimiento. Los paneles se colocan de manera tal que se encuentra balanceado el peso y adicionalmente se colocan amortiguadores hidráulicos para contrarrestar la fuerza del viento.

El seguidor comienza el día orientado al oeste. Con los primeros rayos solares el freón contenido en el depósito del lado oeste se evapora y circula hacia el contenedor del lado este, al llegar ahí se vuelve a condensar y la diferencia de pesos provoca que el seguidor gire y quede orientado hacia el este.

- **Microprocesados o Microcontrolados.** Estos seguidores no necesitan sensores para la detección de la incidencia solar, sino que utilizan algoritmos matemáticos que calculan la trayectoria solar en función de la ubicación del dispositivo y la hora y fecha en la que se realiza el cálculo.
- **Electro-Ópticos o seguidores por punto luminoso.** Estos utilizan algún tipo de sensor para determinar la posición angular real del sol. El sensor indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que los seguidores deben apuntar.

Normalmente, los seguidores solares forman parte de la estructura de los paneles solares, por lo que ambos tienen el mismo movimiento.

**Los parámetros más importantes para comparar los seguidores solares son:**

- Incremento de producción de energía
- Coste del equipo e instalación del mismo
- Resistencia al viento
- Disponibilidad
- Mantenibilidad en su movimiento.

En el caso abordado en la presente tesis, se diseñará e implementará un seguidor solar de dos ejes que combina la tecnología de los seguidores Electro Ópticos y los Microcontrolados. Se ha optado por la selección de este tipo de seguidor, porque al ser de dos ejes, se puede cubrir casi cualquier orientación del sol y aprovechar al máximo la incidencia de rayos sobre el panel solar de captación.

**Usos y Ventajas de los seguidores solares en la industria energética.**

El uso de los seguidores solares es cada vez más frecuente en las plantas fotovoltaicas, ya que la industria ha podido comprobar las grandes ventajas que éstos presentan. Los seguidores solares permiten aumentar notablemente la producción de energía y por tanto mejoran la rentabilidad de los proyectos y el retorno de inversión.

Para comprender un poco como operan los sistemas de seguimiento solar hay que mencionar acerca de los movimientos de la tierra. Los movimientos de rotación y de traslación son los responsables de las estaciones del año, la sucesión de los días y noches y de las diferencias de temperatura entre distintos puntos del planeta. La radiación solar depende de estos movimientos y variará en función de la latitud y del momento del año.

La posición del sol, que afecta directamente al ángulo de incidencia de los rayos del sol, viene determinada por el ángulo de altura y el azimutal.

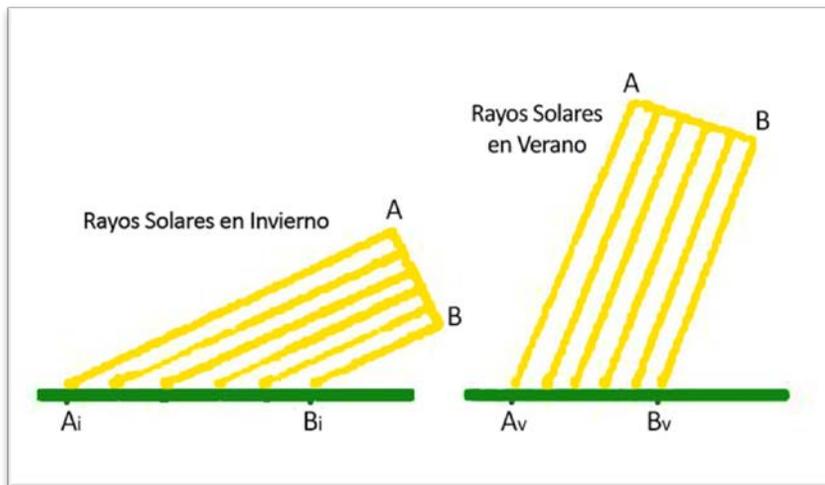


FIGURA 7. Ángulos de incidencia en invierno y verano.

En la Figura 7, se muestra el ángulo de incidencia de los rayos del sol en las estaciones de invierno y de verano, ambas al medio día y sobre una superficie horizontal. Como vemos, en invierno la inclinación es máxima y el poder energético de los rayos de sol es mínimo. Además, debido al movimiento de rotación, el sol permanece en un punto muy bajo del horizonte y está visible muy pocas horas al día.

Contrariamente, en verano, el sol sigue una órbita que lo posiciona en un punto muy alto del cielo y lo hace visible durante más horas del día. Así, los rayos de sol inciden con una trayectoria cercana a la perpendicular produciendo con esto, un rendimiento energético mucho mayor.

Este efecto se acentúa a medida que nos alejamos de la línea del Ecuador. Es decir, en regiones cercanas a los círculos polares, los días son muy largos en verano y muy cortos en invierno; mientras que, en zonas más cercanas al Ecuador, hay mucha menos variación entre la noche y el día.

Así pues, las trayectorias solares diarias y anuales de una ubicación varían en función de la latitud y afectan directamente al ángulo de incidencia de radiación, el cual es un punto clave a la hora de producir energía solar: a mayor ángulo, mayor producción. Por ello, es fundamental saber cuál es la orientación e inclinación exacta de nuestra ubicación, para poder orientar los paneles de nuestra instalación de forma que nos permita aprovechar al máximo la energía solar.

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) es una herramienta muy útil, que permite calcular la inclinación necesaria para la instalación fotovoltaica en función de la geolocalización. La aplicación también permite comparar la producción que se puede llegar a obtener según el tipo de instalación que se realice (fija, con seguidores de un eje o con seguidores de dos ejes).

Gracias al ajuste de los movimientos de los seguidores solares, se puede aumentar la producción de electricidad, con respecto a instalaciones fijas; hasta un 30% con seguidores de un eje y hasta un 40% con seguidores de dos ejes

### Ganancia en la captación de radiación solar

Llegados a este punto, queda claro que gracias al movimiento de los seguidores solares se incrementa notablemente la cantidad de radiación recibida por el panel y consecuentemente la energía producida. En la Figura 8, podemos verlo mejor.

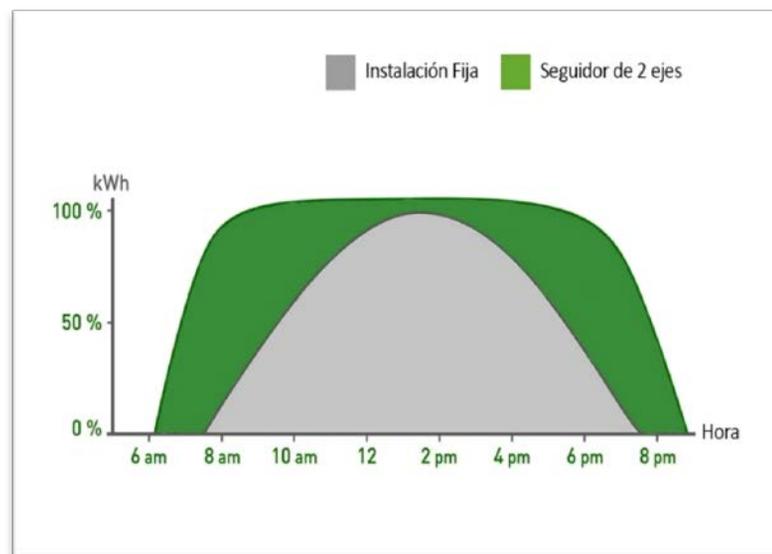


FIGURA 8. Energía producida en un día en un panel fijo y en uno con seguidor solar.

La imagen anterior muestra la energía producida a lo largo de un día con una instalación fotovoltaica fija y con una instalación con seguidores solares, en este caso de 2 ejes. La curva gris es el resultado obtenido en la instalación estática y la curva verde el resultado de la instalación con seguidores. Ambas instalaciones usan los mismos paneles.

Como podemos observar, los paneles instalados con seguidores solares, han recibido más radiación solar, por tanto, han producido más energía a lo largo del día. El rendimiento ha aumentado alrededor de un 40% respecto a la instalación fija.

### **Potencia de salida con mejor respuesta.**

Otro aspecto importante a destacar es que, gracias al seguimiento solar, no sólo se incrementa la producción de energía de las plantas fotovoltaicas, sino que, además, se mejora la forma en que se entrega la potencia de salida producida. Con el seguimiento solar se consigue alargar el tiempo de máxima potencia y producir así a mayor capacidad durante más horas al día.

Volvamos a la imagen de la Figura 8 para comprender este concepto. En la curva gris podemos ver que hay una evolución de la potencia de salida a lo largo del día; incrementándose paulatinamente hasta alcanzar su punto máximo al mediodía, para después volver a disminuir progresivamente. En cambio, en la curva verde vemos que nos acercamos a la máxima potencia desde primera hora de la mañana y que la producción se mantiene hasta última hora de la tarde.

Supongamos, por ejemplo, que se tiene instalado un sistema de bombeo a base de energía solar, que para su funcionamiento necesita que los paneles trabajen al 75% de su capacidad; con una instalación fija, el sistema tan sólo podrá bombear unas 4 horas diarias (en las horas de más alta radiación solar) mientras que, con una instalación de seguimiento, podrá bombear hasta 10 horas diarias.

## **JUTIFICACIÓN**

Se han mencionado ya algunas características y conceptos importantes sobre la energía solar y se ha dado a conocer la importancia de este poderoso recurso a disposición del hombre, Por lo anterior, si se diseña un seguidor solar de dos ejes microcontrolado con las mejores características físicas, de los que hay en el mercado actual y lo empleamos para abastecer un dron, de manera que éste efectúe tareas de vital importancia para el beneficio de la humanidad, se justificaría de manera inmediata el por qué realizar una tesis sobre un seguidor de dicha clase, ya que a través de dicho seguidor se proporcionaría energía

de manera más eficiente al dron en comparación con la energía que le pueda proporcionar una batería ordinaria, que tiende a agotar su carga después de un cierto tiempo. Además, a un seguidor con estas características, se le pueden efectuar ciertas modificaciones y adaptarlo también para abastecer de energía a: hogares, escuelas, edificios y una gran cantidad de dispositivos que requieran energía eléctrica como medio para funcionar; es por ello, que este tipo de herramientas se debe emplear e impulsar como medio para aprovechar la inmensurable fuente de energía llamada Sol, ya que son bastantes los beneficios que brindaría a la humanidad la explotación inteligente, eficiente y bien planeada de la energía de dicha fuente.

## **HIPÓTESIS**

El actual sistema de abastecimiento de energía a los drones y el problema de que la energía de su batería se agote en un tiempo no calculado, se puede mejorar, resolver y también revolucionar, con la inserción de un seguidor solar de dos ejes que en combinación con una celda solar provean de energía al dron, ya sea recargando su batería o bien como una segunda fuente de abastecimiento del mismo. Lo anterior se logrará con la ayuda del seguidor solar, el cual aprovechará al máximo la energía solar; brindando a la celda el mayor ángulo de incidencia de rayos, para que de esta manera la celda solar abastezca de energía al dron.

## **OBJETIVO DE LA PROPUESTA**

Diseñar e implementar un seguidor solar de dos ejes como parte de una fuente de alimentación de un dron.

## **DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO**

Con la ayuda de una cierta cantidad de sensores ópticos, motores, circuitos integrados, resistores y otros elementos electrónicos activos y pasivos, incluyendo un microcontrolador del tipo PIC18F4550 que pertenece a la gama alta de la familia de microcontroladores PIC, se busca que los sensores ópticos

conectados al microcontrolador sigan el punto de mayor incidencia de luz, lo cual se logra cuando los rayos solares inciden perpendicularmente sobre los sensores ópticos y, como consecuencia, sobre el panel solar. Una vez que los rayos incidan en alguno de los sensores estos buscarán el ángulo de mayor incidencia. Este ángulo se ajustará y alcanzará con el movimiento continuo de dos motores, bajo la instrucción recibida desde un microcontrolador, con el fin de alcanzar la mayor incidencia de luz sobre los sensores.

Dichos sensores mantienen una comunicación continua con el microcontrolador, con el fin de alcanzar el ángulo de incidencia adecuado de la radiación solar sobre estos. Como punto final se buscará adecuar el sistema, cuya aplicación es amplia, al posible abastecimiento principal o secundario de los sistemas llamados drones.

## **CAPÍTULO I. Conceptos teóricos básicos relacionados con el movimiento solar.**

En páginas anteriores se revisaron aspectos generales de las áreas relacionadas con la presente tesis, tales como: energía solar, paneles fotovoltaicos, seguidores solares y drones, con el fin de dar a conocer conceptos que se necesitan para entender el comportamiento del seguidor solar de dos ejes, que se diseñará en la presente tesis.

Ahora, en este capítulo, se proporcionará la información esencial que permite describir propiedades y movimientos del sol, necesarios para diseñar y entender la operación del seguidor solar de dos ejes, que se aborda en el presente trabajo.

### **1.1 El Sol.**

Es la fuente vital de energía que hace posible la vida en nuestro sistema solar. Su energía se transmite por medio de radiación electromagnética a diferentes partes de la tierra y a otros planetas; permitiendo con esto que se efectúen una gran cantidad de procesos y fenómenos que hacen posible la vida como hoy se conoce. Dado que la energía solar se trasmite mediante radiación, es conveniente definir su significado, así como el significado de otros conceptos relacionados con el sol.

### **1.2 Radiación.**

La radiación es un proceso físico que consiste en la transmisión de energía, de naturaleza corpuscular, que fluye en forma de ondas electromagnéticas en una amplia gama de longitudes de onda. La transmisión de energía por el proceso de radiación se produce desde un cuerpo más caliente a uno más frío, sin la participación de materia transmisora intermedia como portadora de la misma.

### **1.3 Radiación Solar.**

La radiación solar la podemos definir como el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas, que permite la transferencia de energía solar a la superficie terrestre. Estas ondas electromagnéticas son de diferentes frecuencias y aproximadamente la mitad de las que recibimos están

en el rango de longitudes de onda de 0.4 [μm] a 0.7 [μm], y pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta.

#### **1.4 Irradiación.**

Es la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie o zona. Sus unidades son Joules/m<sup>2</sup> o cal/cm<sup>2</sup> (llamado también Langley y se abrevia ly) o kWatt-hora/m<sup>2</sup> día, que es una forma muy común de expresar este parámetro.

#### **1.5 Radiación difusa.**

Es la que se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión atmosférica a través de las nubes, así como la que proviene del cielo.

#### **1.6 Radiación directa.**

Es la parte que se recibe directamente del Sol sin sufrir ninguna dispersión atmosférica, por lo tanto, la radiación extraterrestre es radiación directa.

#### **1.7 Radiación reflejada.**

La radiación reflejada es, como su propio nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo. Por otra parte, las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no "ven" superficie terrestre, mientras que las superficies verticales son las que más reciben.

#### **1.8 Radiación global.**

Es la suma de la radiación directa más la difusa

#### **1.9 Radiación terrestre.**

Es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que emite una pared, un charco, un lago, etcétera.

La Figura 9, ilustra los tres tipos de radiación: la directa, la difusa y la reflejada

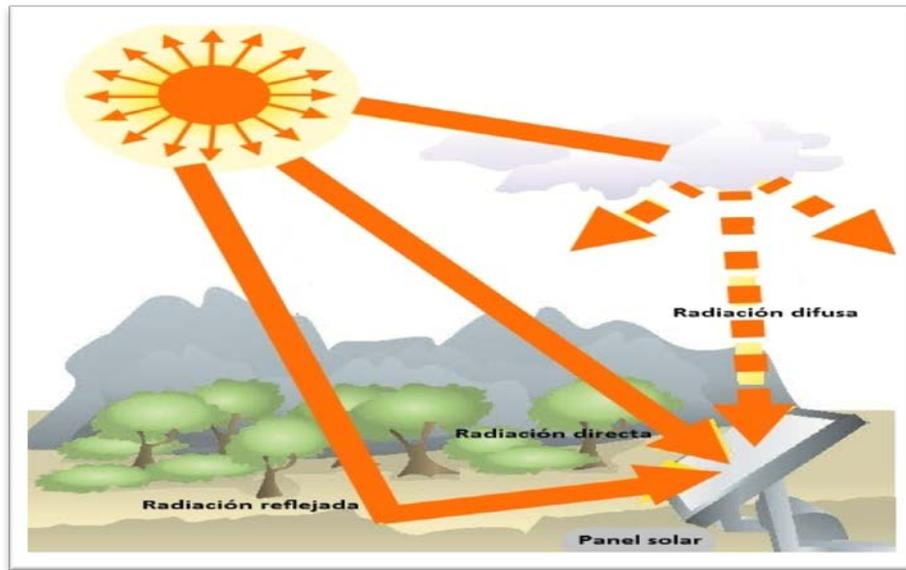


FIGURA 9. Radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada.

### 1.10 Radiación total.

Es la suma de la radiación global más la terrestre.

Cabe mencionar que la cantidad de energía y magnitud de la intensidad de radiación solar, que incide sobre algún punto o zona en nuestro planeta, dependen de varios factores, como son: los diversos procesos que ocurren en el interior del sol y las distancias y movimientos entre el sol y la tierra; pero son básicamente los movimientos de traslación y rotación terrestres y la inclinación del eje de rotación de la tierra con respecto al plano de la órbita elíptica, los que definen esa cantidad de energía y la magnitud de la intensidad de radiación que le llegan a los diversos lugares en la tierra.

### 1.11 El movimiento de rotación.

Cada 24 horas (cada 23 h 56 minutos), la Tierra da una vuelta completa alrededor de un eje ideal que pasa por los polos. Gira en dirección Oeste-Este, en sentido directo (contrario al de las agujas del reloj), produciendo la impresión de que es el cielo el que gira alrededor de nuestro planeta.

A este movimiento, denominado rotación, se debe la sucesión de días y noches, siendo de día el tiempo en que nuestro horizonte aparece iluminado por el Sol, y de noche cuando el horizonte permanece oculto a los rayos solares. La mitad del globo terrestre quedará iluminada y en dicha mitad es de día, mientras que en el lado oscuro es de noche. La Figura 10 ilustra el movimiento de rotación.



FIGURA 10. Movimiento de rotación.

### 1.12 El movimiento de traslación.

El movimiento de traslación es el que realiza la Tierra alrededor del Sol describiendo una trayectoria elíptica. El tiempo que emplea nuestro planeta en dar una vuelta completa es de 365 días, 5 horas y 57 minutos, equivalente a 365,2422 días que es la duración del año.

Nuestro planeta describe una trayectoria elíptica de 930 millones de kilómetros, a una distancia media del Sol de 150 millones de kilómetros. El Sol se encuentra en uno de los focos de la elipse. La distancia media Sol-Tierra es 1 U.A. (Unidad Astronómica), que equivale a 149.675.000 km. La Figura 11 ilustra el movimiento de translación.

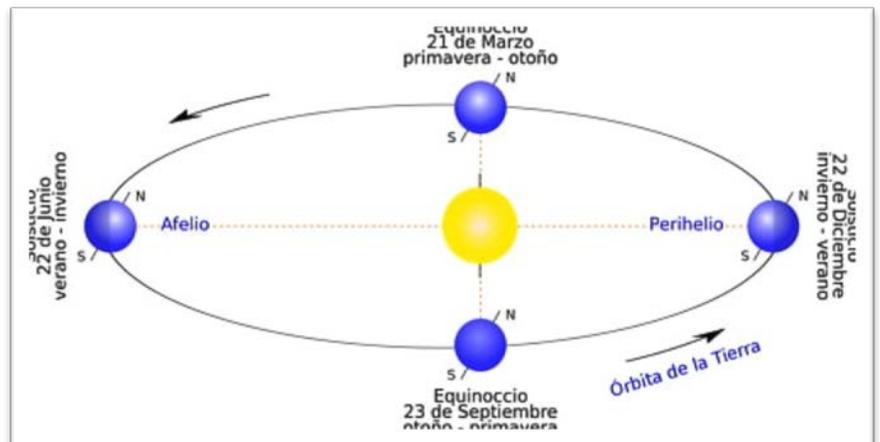


FIGURA 11. Movimiento de traslación.

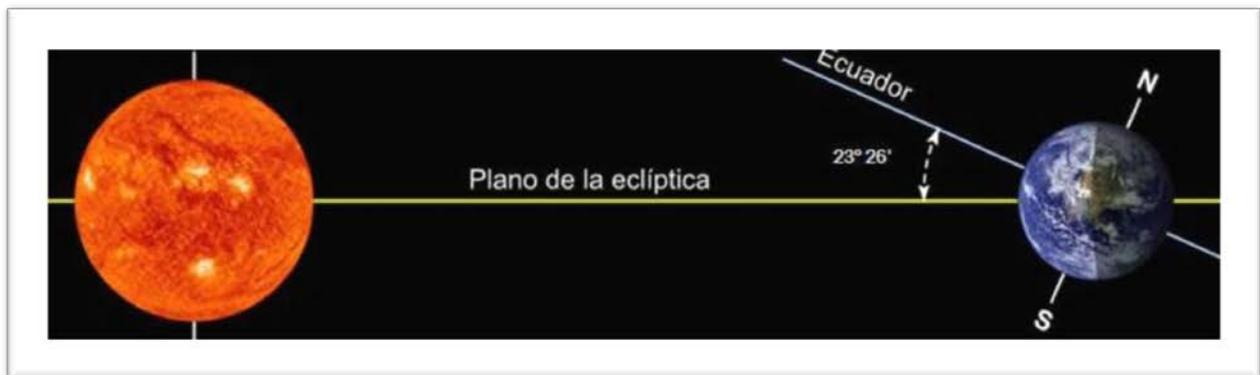
Como resultado de ese larguísimo camino, la Tierra viaja a una velocidad de 29,5 kilómetros por segundo, recorriendo en una hora 106.000 kilómetros, o 2.544.000 kilómetros al día.

La excentricidad de la órbita terrestre hace variar la distancia entre la Tierra y el Sol en el transcurso de un año. A primeros días de enero, la Tierra alcanza su máxima proximidad al Sol y se dice que pasa por el **perihelio**. A principios de julio llega a su máxima lejanía y está en **afelio**. La distancia entre la Tierra y el Sol en el perihelio es de 142.700.000 kilómetros y la distancia Tierra-Sol en el afelio es de 151.800.000 kilómetros.

### 1.13 El eje de rotación de la tierra.

El eje del mundo es la línea imaginaria alrededor de la cual gira la Tierra en su movimiento de rotación. Los extremos de este eje son los polos geográficos Norte y Sur. Este eje está inclinado respecto del plano de la órbita elíptica terrestre y dicha inclinación es la responsable de las estaciones en la Tierra.

La Figura 12 muestra la inclinación del eje de la Tierra sobre el plano de su órbita, también llamada



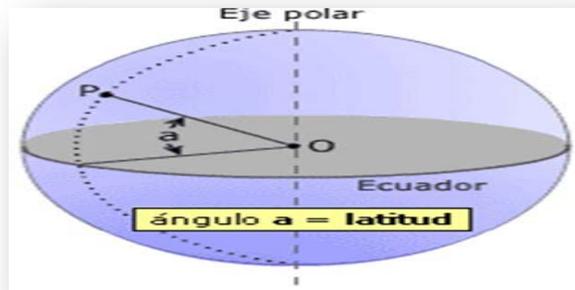
oblicuidad de la eclíptica es de unos  $23,4^\circ$  a  $23,5^\circ$ , siendo su valor actual de  $23,43^\circ$ <sup>10</sup>.

FIGURA 12. Inclinación del eje terrestre.

<sup>10</sup> <http://fadisel.com/docs/C-2795.pdf> hoja de datos de fotorresistores empresa CEBEK

### 1.14 La Latitud ( $\varphi$ ).

Es la distancia angular que existe desde cualquier punto de la Tierra con respecto al ecuador. Todos los puntos ubicados sobre el mismo paralelo tienen la misma latitud. La Figura 13 representa la latitud de un punto.



F  
FIGURA 13. Latitud de un punto P.

### 1.15 La Longitud.

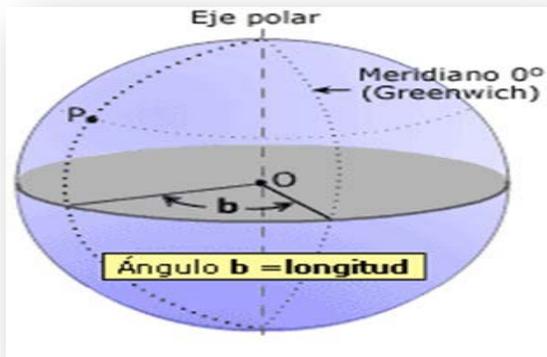
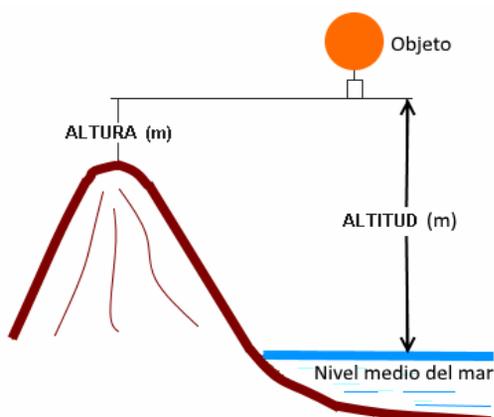


FIGURA 14. Longitud de un punto P.

Es la distancia angular que existe desde cualquier punto de la Tierra con respecto al meridiano de Greenwich. Todos los puntos ubicados sobre el mismo meridiano tienen la misma longitud. Los polos Norte y Sur no tienen longitud. La Figura 14 esquematiza la longitud de un punto.



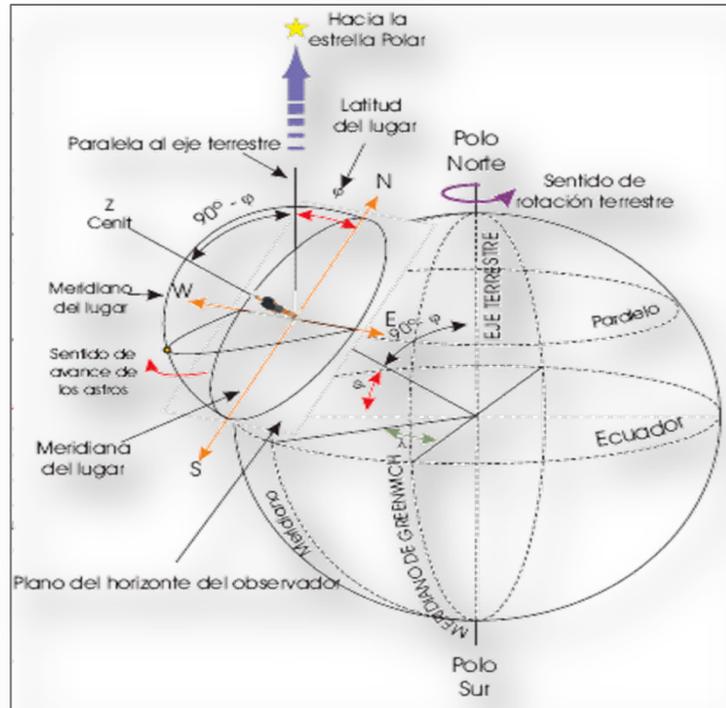
### 1.16 La altitud.

Es la distancia vertical que se mide desde un origen dado, considerado como nivel cero, para el que suele tomarse el nivel medio del mar, a un objeto o lugar de la tierra. Esto se ilustra en la Figura 15.

FIGURA 15. Altitud.

Para el estudio de la radiación solar sobre la tierra, se considera que el Sol realiza su recorrido por una bóveda celeste, de la cual somos el centro.

Este planteamiento recupera el concepto antropocéntrico que propuso Ptolomeo sobre el Universo. La Figura 16 representa la bóveda celeste de un determinado lugar de observación en función de la longitud y latitud del observador.



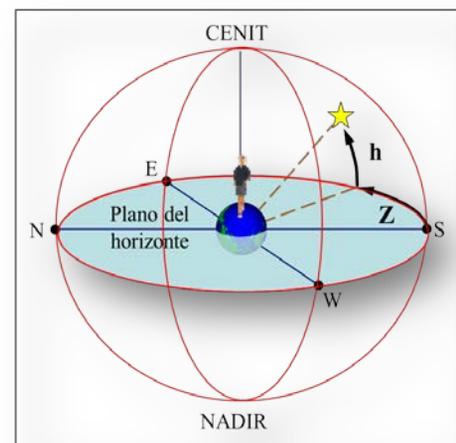
F  
I

FIGURA 16. Representación de la bóveda celeste de un determinado lugar de observación en función de la longitud y latitud del observador.

### 1.17 Coordenadas celestes.

Los puntos singulares de la bóveda o hemisferio celeste serían el punto más alto o Cenit (Nadir sería el punto opuesto), y el plano del horizonte con las orientaciones principales (N, S, E y W).

Las coordenadas celestes permiten localizar cualquier punto del hemisferio por su altura solar  $h$ , sobre el horizonte, y su



Azimet  $Z$ , o desviación al Este u Oeste del Sur. Esto lo ilustra la Figura 17.

azimet.

FIGURA 17. Cenit, Nadir, altura solar y

### 1.18. Recorrido Solar durante los Equinoccios.

El recorrido solar durante los Equinoccios (*21 de marzo y 23 septiembre*) se caracteriza porque el Orto (Amanecer) coincide con el Este, a las 6:00 horas, y el Ocaso (puesta de sol) con el Oeste, a las 18:00 horas, con una duración total de 12 horas (la duración de la noche es igual a la del día). En el Ecuador, el Sol se situaría en el Cenit a mediodía.

Otro dato fundamental es que al mediodía (12:00 hora solar) el sol se halla sobre el Sur, con Azimet  $Z = 0^\circ$ , y formando con el Cenit un ángulo igual a la Latitud,  $\phi$ , de manera que se puede calcular la altura solar,  $h$ , como:  $h = 90^\circ - \phi$ . Esto lo ilustra la Figura 18.

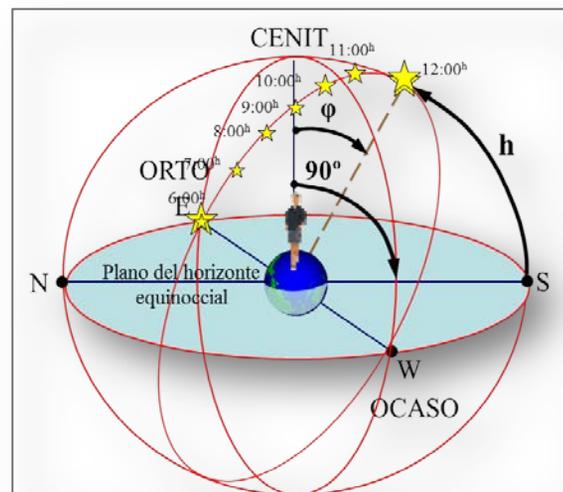
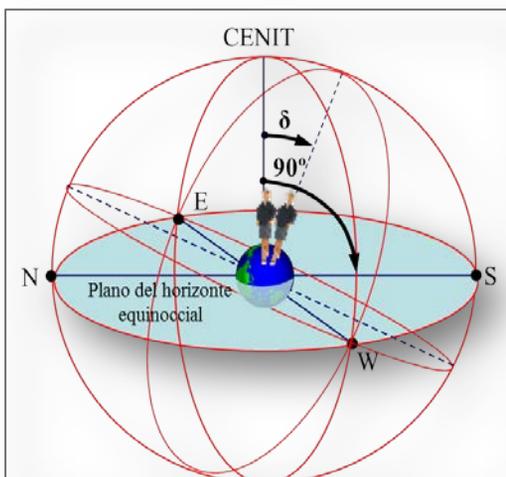


FIGURA 18. Recorrido solar durante los equinoccios.

### 1.19 Recorrido Solar durante los Solsticios.

En los Solsticios (*21 de junio y 22 diciembre*) el plano del horizonte se encuentra inclinado respecto al plano del horizonte equinoccial, debido al ángulo



de inclinación del eje de la Tierra ( $23,5^\circ$ ) respecto al plano de la eclíptica (declinación  $\delta$ ).

En esta situación, en el Ecuador, el Sol no alcanzaría el Cenit sobre el Sur a mediodía:  $h = 90^\circ - \delta = 90^\circ - 23,5^\circ = 66,5^\circ$ . Esto se esquematiza en la Figura 19.

FIGURA 19. Recorrido solar durante los solsticios.

## 1.20 Elementos geométricos relacionados con la posición solar.

**1.20.1. Altura solar (h).** La altura solar, conocida también como elevación solar, es el ángulo formado por el rayo solar y el plano horizontal del sitio. Varía desde  $0^\circ$  cuando el Sol está en el horizonte, hasta  $90^\circ$  cuando éste está en el cenit [11]. La Figura 20 ilustra la altura solar.

El valor de la altura solar se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\text{sen } h = \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi + \text{cos } \delta \text{ cos } \varphi \text{ cos } \omega \quad \dots\dots\dots (1)$$

donde:

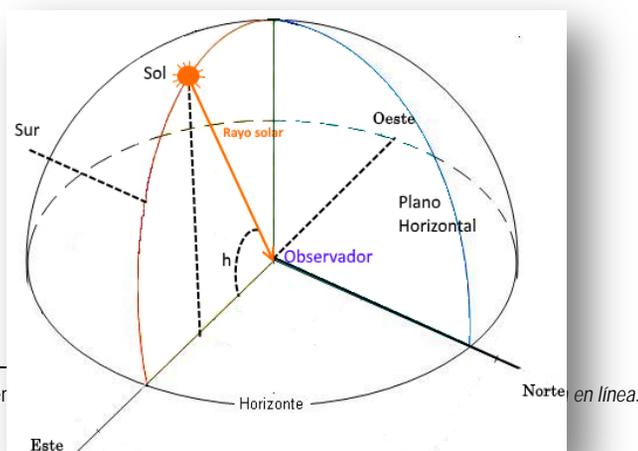
$h$ = altura solar,  $\varphi$ = latitud del sitio.

$\delta$ = declinación solar para el día en cuestión,

$\omega$ = ángulo horario instantáneo, en grados, a la hora en que se calcula la altura solar.

Las variables aquí definirán en las

expresadas ( $\delta$ ,  $\omega$ ) se páginas siguientes.

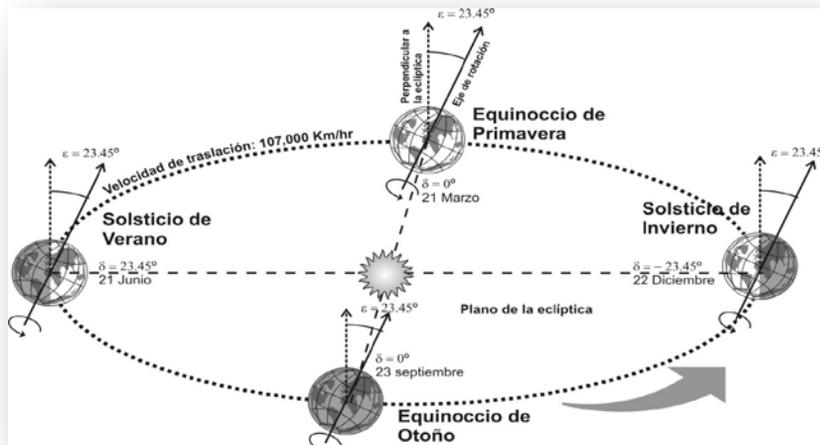


11 [Rodríguez Israel](#). (2015, 14 de diciembre)

FIGURA 20. Altura solar h.

Declinación solar ( $\delta$ ). Ángulo formado por el plano que contiene al eje de rotación terrestre y el plano perpendicular a la eclíptica. Si bien la diferencia absoluta entre el eje de rotación y la perpendicular a la eclíptica siempre es de  $23.45^\circ$ , el ángulo que se forma entre los planos que los contienen varía día a día porque dichos planos están siempre frontales al sol. Los valores extremos de la declinación solar ocurren cuando ambos planos se encuentran uno frente a otro con un ángulo igual a la oblicuidad absoluta. Esto corresponde a las fechas de los solsticios, el de invierno (21 de diciembre) con valor de declinación solar igual a  $-23.45^\circ$ , y el de verano (21 de junio) con valor de declinación solar igual a  $23.45^\circ$ . El valor intermedio ocurre cuando ambos planos ocupan el mismo lugar, por lo que el ángulo entre ellos es igual a  $0^\circ$ . Eso corresponde a las fechas de los equinoccios, el de primavera (21 de marzo) y el de otoño (23 de septiembre) <sup>12</sup>, como

se muestra en la Figura 21.



<sup>12</sup> Adalberto Tejeda Martínez, Gabriel Gómez-Azpeitia, Compila *Prontuario solar de México* Dirección General de Publicaciones © Universidad de Colima, 2015 © Universidad Veracruzana, Abril de 2015. ISBN: 978-607-8356-45-4.

FIGURA 21. Posición relativa del plano del ecuador y de la eclíptica que define la declinación solar.

Existen diversas formas de obtener el valor del ángulo de declinación solar. El procedimiento simplificado se expresa mediante la siguiente ecuación [13]:

$$\delta = \varepsilon_{ob} \operatorname{sen}\left[\frac{360(284 + n_j)}{365}\right] \dots\dots\dots (2)$$

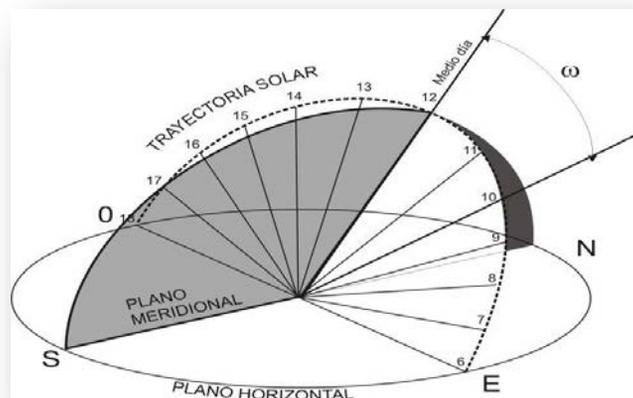
donde:

$\delta$ = ángulo de declinación solar, en grados.

$\varepsilon_{ob}$  = ángulo de oblicuidad de la eclíptica considerado como constante =23.45°.

$n_j$ = día juliano del año:  $n_j=1$  el 1 de enero,  $n_j=365$  el 31 de diciembre.

**1.20.2 Ángulo horario ( $\omega$ ).** Es el ángulo formado por el rayo solar y el plano meridional del sitio, medido en el plano que contiene a la trayectoria solar. La medición se hace a partir del plano meridional, por lo que la posición del Sol a las 12:00 horas tiene un  $\omega = 0^\circ$ . Hacia el oriente la cuenta es positiva y hacia el poniente la cuenta es negativa. Así, la posición del Sol a las 6:00 horas, tiene un  $\omega = 90^\circ$ , y a las 18:00 horas un  $\omega = - 90^\circ$ , como se muestra en la Figura 22.



13 [John A. Duffie \(Deceased\), William A. Beckman](#). Solar Engineering of Thermal Processes. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada. Fourth Edition. ISBN 978-0-470-87366-3 (cloth); ISBN 978-1-118-41541-2 (ebk); ISBN 978-1-118-41812-3 (ebk); ISBN 978-1-118-43348-5 (ebk); ISBN 978-1-118-67160-3 (ebk).

FIGURA 22. Esquema que ilustra el procedimiento para determinar el ángulo horario.

El ángulo horario se puede obtener mediante un procedimiento analítico o bien mediante la consulta de tablas.

La ecuación correspondiente es:  $\omega = \frac{360(12-t)}{4}$  .....(3)

donde:

t= tiempo en horas, en formato decimal: 10:15 horas = 10.25; 17:30 horas = 17.50; etcétera [9].

Como puede observarse en la Tabla 2, cada hora equivale a un ángulo horario de 15°. Esto es así porque el período de rotación terrestre, en el que se describe un arco de 360°, es de 24 horas y por lo tanto  $360^\circ/24 = 15^\circ$ .

Hora	Ángulo horario ( $\omega$ )
6:00	90°
7:00	75°
8:00	60°
9:00	45°
10:00	30°
11:00	15°
12:00	0°

13:00	-15°
14:00	-30°
15:00	-45°
16:00	-60°
17:00	-75°
18:00	-90°

TABLA 2. Relación entre la hora y el ángulo horario  $w$ .

**1.20.3 Acimut solar (a).** Es el ángulo formado por la proyección del rayo solar en el plano horizontal del sitio y la intersección de éste con el plano meridional o línea norte-sur, medido a partir de esta última, indistintamente desde el sur o desde el norte, de acuerdo al cuadrante en que se encuentre el Sol. En los cuadrantes al oeste el valor es negativo y al este positivo [14]. (véase Figura 23).

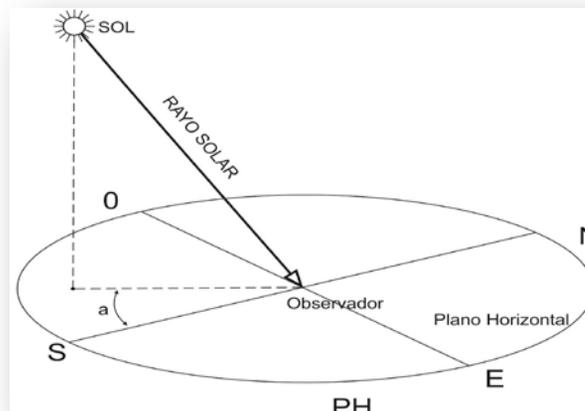


FIGURA 23. Acimut solar (a).

14 [Rodríguez Israel](#). *Aspira México a ser líder en energía solar en AL*. La jornada en línea. 2015,

El valor del acimut solar se puede determinar mediante la siguiente ecuación [15].

$$\text{sena} = \frac{\cos\delta\text{sen}\omega}{\text{cosh}} \quad (4)$$

donde:

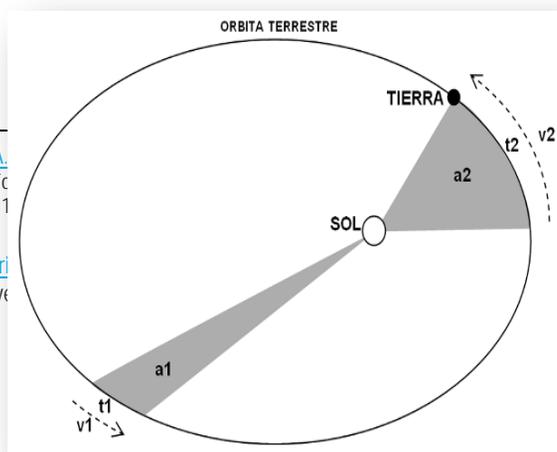
$\delta$ = declinación solar para el día en cuestión

$\omega$ = ángulo horario

$h$ = altura solar

**1.20.4 Ecuación del tiempo (ET).** Los valores de altura solar ( $h$ ) y acimut solar ( $a$ ), que se obtienen de los procedimientos de geometría solar anteriormente descritos, están expresados en términos del tiempo solar o astronómico, que no necesariamente coincide con el tiempo civil con que se ajustan nuestros relojes. Para corregir tales valores hay que considerar las diferencias de velocidad en el movimiento de traslación terrestre, que hace que algunos días sean más cortos que otros. Así, la ET representa los minutos (y fracción) que deben sumarse o restarse a la hora solar verdadera para obtener la hora del tiempo medio. En astronomía esto se conoce como el intervalo de tiempo que separa el paso por el meridiano local del Sol verdadero (que en su movimiento aparente recorre la eclíptica con velocidad variable), del paso del Sol medio (Sol ficticio que recorre la eclíptica con velocidad uniforme).

Estas diferencias se explican con la Segunda Ley de Kepler (Figura 24), la cual establece que la Tierra en su recorrido de traslación barre áreas iguales en tiempos iguales. Como la órbita de la Tierra es elíptica y el Sol está en uno de sus focos, depende de la posición del planeta para definir el área de barrido [16].



15 John A. Duffie (Deceased), William A. Published simultaneously in Canada. FC 978-1-118-43348-5 (ebk); ISBN 978-1-118-

16 Adalberto Tejeda Martínez, Gabri Universidad de Colima, 2015© Unive

Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (ebk); ISBN 978-1-118-41812-3 (ebk); ISBN

n General de Publicaciones ©

FIGURA 24. Esquema que ilustra la Segunda Ley de Kepler.

De tal suerte que cuando la Tierra está más alejada del Sol, los radios se alargan y la distancia entre los dos puntos de la órbita se acorta, entonces el movimiento de traslación es más lento. Por el contrario, cuando la Tierra está más cerca del Sol, los radios se acortan y la distancia entre los dos puntos de la órbita se alarga, por lo que el movimiento de traslación es más rápido. El valor de la ecuación del tiempo se obtiene de los anuarios astronómicos, pero también puede estimarse de forma analítica.

El procedimiento simplificado se realiza mediante la siguiente ecuación [17].

$$ET = 9.87 \text{ sen } 2f - 7.53 \text{ cos } f - 1.5 \text{ sen } f \text{ ..... (5)}$$

donde:

$$f = 360 (n_j - 81) / 364 \text{ (en grados).}$$

$n_j$  = día juliano del año: el 1 de enero  $n_j = 1$ ; el 31 de diciembre  $n_j = 365$ .

---

17 [John A. Duffie \(Deceased\), William A. Beckman](#). *Solar Engineering. of Thermal Processes*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey  
Published simultaneously in Canada. Fourth Edition. ISBN 978-0-470-87366-3 (cloth); ISBN 978-1-118-41541-2 (ebk); ISBN 978-1-118-41812-3 (ebk); ISBN  
978-1-118-43348-5 (ebk); ISBN 978-1-118-67160-3 (ebk).

Otro procedimiento para el cálculo de ET, es el propuesto por la siguiente ecuación:

$$ET = 0.0072 \cos j - 0.0528 \cos 2j - 0.0012 \cos 3j + \\ - 0.1229 \sin j - 0.1565 \sin 2j - 0.0041 \sin 3j \quad (1.9) \quad \dots\dots\dots (6)$$

donde:

$$j = 0.984 n_j$$

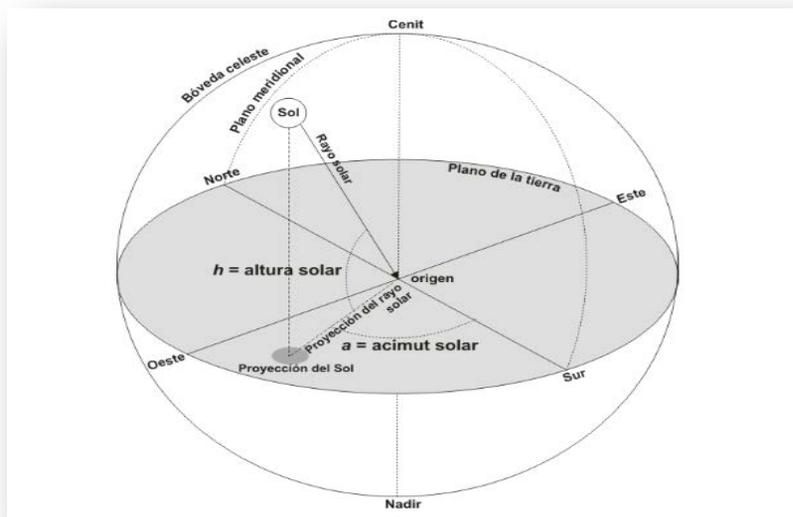
$n_j$  = día juliano del año: el 1 de enero  $n_j = 1$ ; el 31 de diciembre  $n_j = 365$

La dinámica con la que interactúan los movimientos del Sol y la Tierra determina una geometría particular, la cual debe tomarse en cuenta para comprender cómo, cuándo y con qué magnitud llegan los rayos solares a la superficie terrestre. Con esto se busca aprovechar la captación de dichos rayos mediante paneles y seguidores solares, posicionando dichos paneles y seguidores, donde mejor convenga.

Se trata de una geometría esférica cuyos componentes deben ser ubicados mediante medidas angulares, a través de la cual se busca conocer la posición relativa del Sol respecto al plano del horizonte de cada punto de la superficie terrestre al que llamaremos plano de tierra.

Esencialmente son dos ecuaciones las cuales permiten predecir la posición relativa del Sol, respecto del plano de tierra, mediante dos coordenadas angulares: la *altura solar* ( $h$ ), ángulo formado por el rayo solar y el plano de tierra, y la *acimut solar* ( $a$ ), ángulo formado por la proyección horizontal del rayo solar y el plano meridional del sitio —plano imaginario que divide en dos partes iguales la trayectoria aparente del Sol en un

sitio; de tal forma que el Sol cruza dicho plano exactamente a medio día (Figura



el Sol plano a medio día).

**FIGURA 25.** Coordenadas angulares para determinar la posición del Sol y la forma de medirlas.

Para obtener el valor de la altura solar  $h$ , se debe despejar esa variable de la ecuación (1) y después se sustituyen en la expresión resultante, los valores correspondientes de la latitud del sitio ( $\varphi$ ), la declinación correspondiente a la fecha ( $\delta$ ) y el ángulo correspondiente a la hora ( $\omega$ ).

Para obtener el valor del acimut  $a$ , se debe despejar dicha variable de la ecuación (4). y después sustituir en la expresión resultante los valores de la altura solar  $h$ , la declinación correspondiente a la fecha ( $\delta$ ) y el ángulo correspondiente a la hora ( $\omega$ ).

### 1.20.5 Gráficas solares

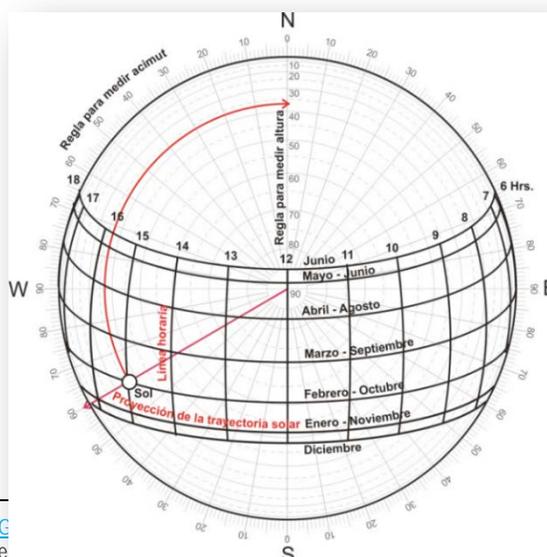
La gráfica solar es una representación bidimensional plana de la bóveda celeste, en la que se proyectan las trayectorias solares para determinar la posición del Sol en un determinado momento del día. Así, cada línea de tales gráficos representa la proyección de la trayectoria aparente que seguirá el Sol en un día en particular sobre el plano terrestre local. Como a cada día le correspondería una línea, se dibuja una por mes para evitar confusiones en su lectura; pero como las trayectorias de algunos meses coinciden en su posición, estas suelen proyectarse sobre la misma línea, por lo que es común que las gráficas solares solo muestren siete trayectorias mensuales, en vez de doce. Así, el sistema completo representa todas

las trayectorias que sigue el Sol en su movimiento aparente, sobre nuestro plano de referencia durante el ciclo anual.

A lo largo de cada una de esas trayectorias se marcan puntos que representan las horas del día. Al unirse los puntos que representan una misma hora en las diferentes trayectorias del año, aparecen las llamadas líneas horarias. Cabe aclarar que las líneas horarias corresponden al tiempo del sol verdadero (TSV), que no necesariamente corresponde al tiempo civil (TC) que marcan nuestros relojes [18].

Las gráficas también suelen contener elementos que funcionan como reglas graduadas y sirven para medir las dos coordenadas angulares necesarias para ubicar la posición del Sol en un momento cualquiera: la altura solar, a través de círculos concéntricos, y el acimut solar, por medio de rectas radiales.

La gráfica solar se traza en función de la latitud del sitio, independientemente del sistema geométrico empleado, por lo que para cada emplazamiento con latitud diferente debe contarse con una gráfica diferente. Esta situación, que durante años resultó una dificultad, hoy en día no plantea ninguna complicación dada su disponibilidad en medios virtuales, gratuitos o de paga. Los ejemplos de gráfica solar que se presentan en este capítulo corresponden a la latitud  $19^\circ$  N, cercana a ciudades como Veracruz, Puebla, Colima y sur del Distrito Federal. Ver Figura 26.



18 Adalberto Tejeda Martínez, Gabriel C. 2015© Universidad Veracruzana, Abril de

FIGURA 26. Gráfica solar para la latitud 19° N y sus componentes básicos.

## Capítulo II. Elementos electrónicos y mecánicos del seguidor solar de dos ejes.

### 2.1 Microcontroladores

#### ¿Qué es un microcontrolador?

El término microcomputadora se utiliza para describir un sistema que incluye como mínimo un microprocesador, una unidad central de procesamiento, memoria física donde almacenar programas y datos y dispositivos de entrada y salida (I/O). Algunos sistemas de microcomputadoras incluyen componentes adicionales tales como temporizadores, contadores y convertidores analógico-digital.

Existen algunos tipos de microcomputadoras que están embebidas en un solo chip de silicio, conteniendo en su interior diversos dispositivos a controlar. Tales sistemas de microcomputadoras se denominan también microcontroladores y son utilizados en diversos productos electrodomésticos.

Entonces, un microcontrolador es un sistema conformado por un microprocesador que está en coordinación con la memoria de programa, la memoria de datos, los dispositivos de entrada y salida (dispuestos en serie y o paralelo), un CPU, temporizadores, interrupciones externas e internas, convertidores analógicos digitales. Todos estos elementos están integrados en un solo chip, que puede adquirirse por tan sólo unos 70 o 120 pesos.

Se usa el nombre de microcontrolador debido a que el calificativo micro sugiere que el dispositivo es pequeño y el termino controlador indica que se utiliza en aplicaciones de control. Otro término para definir microcontrolador es el de controlador embebido, ya que la mayoría de los dispositivos que los microcontroladores controlan están embebidos o integrados dentro del mismo encapsulado [19].

## 2.2 Historia de los microcontroladores PIC

Tres empresas son las líderes en el mercado de microcontroladores: Atmel, Motorola y Microchip. Hay también otras como Intel, Texas Instruments o Renesas Technology.

La empresa que fabrica los microcontroladores PIC es Microchip. Todos sus microcontroladores tomaron como base el PIC1650.

En un principio, el PIC se diseñó para combinarse con el procesador de 16 bits CP16000 de ahí que el nombre original fuese Programmable Interface Controller (Controlador de Interface Programable). El CP16000, a pesar de ser un buen microprocesador, carecía de una adecuada entrada y salida (E/S) y, por ello, en 1975, surgió el PIC de 8 bits, pensado para mejorar el rendimiento del sistema conjunto

---

19 [Ibrahim, Dogan: Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F series/Dogan Ibrahim](#). British Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN: 978-0-7506-8611-2

mediante la descarga de operaciones de E/S del CP16000. El PIC original empleaba un microcódigo simple almacenado en ROM para ejecutar su tarea y, a pesar de que el término no existía en aquella época, poseía características típicas de los diseños RISC.

Cuando la división de microelectrónica de General Instruments se separó del resto de la empresa, en 1985, el nuevo propietario canceló casi todos los desarrollos, que para esa época estaban obsoletos. Sin embargo, el PIC se mejoró con la aportación de una EPROM, convirtiéndose en un controlador programable de E/S.

En la actualidad existe una gran cantidad de modelos de PIC que incorporan varios puertos de comunicación con el exterior (puertos serie, controladores de motores o convertidores analógico-a-digital) y con memorias de programa de hasta 32.000 palabras [20].

### 2.3 Elementos generales y estructura interna de los microcontroladores.

A continuación, se muestra la configuración básica interna de un microcontrolador. La cual se ilustra en la Figura 27.

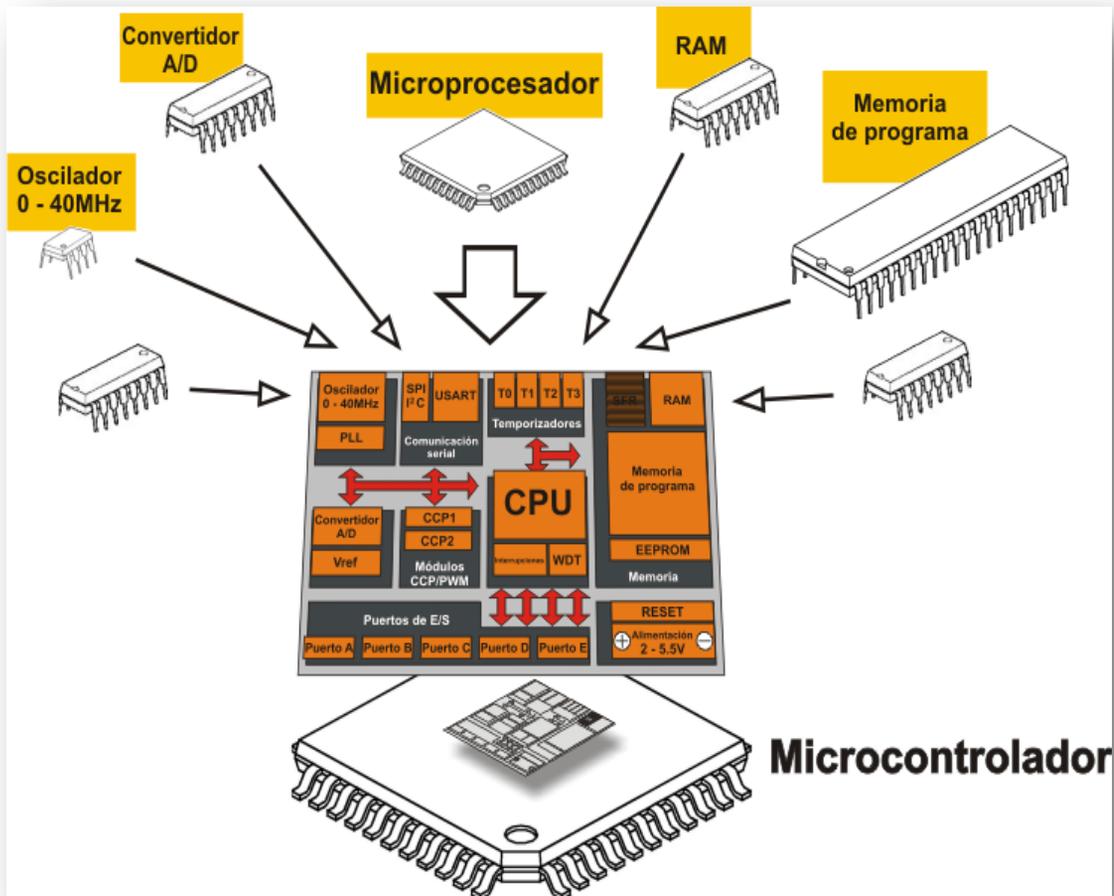


FIGURA 27. Configuración interna de un microprocesador. Imagen propiedad de Mikrochip.

Existe una estructura fundamental en todos los microcontroladores y sus características son muy semejantes. Todos deben disponer de los bloques esenciales: procesador, memoria de datos e instrucciones, líneas de entrada y salida, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos. Sin embargo, cada fabricante dota de los recursos idóneos a cada uno de sus modelos, para que estos provean la mayor eficiencia en las diversas áreas donde estos dispositivos se aplican.

## 2.4 Arquitectura básica

Aunque inicialmente todos los microcontroladores adoptaron la arquitectura clásica Von Neumann, en la actualidad impera para estos dispositivos la arquitectura Harvard.

La arquitectura tradicional de computadoras y microcontroladores se basa en el esquema propuesto por **John Von Neumann**, en el cual la unidad central de proceso, o CPU, está conectada a una memoria única que contiene las instrucciones del programa y los datos. El tamaño de la unidad de datos o instrucciones está fijado por el ancho del bus de la memoria. Las dos principales limitaciones de esta arquitectura tradicional son:

- a) Que la longitud de palabra de las instrucciones está limitada por la longitud de palabra de los datos, por lo tanto, el microprocesador debe hacer varios accesos a memoria para buscar instrucciones complejas.
- b) La velocidad de operación (o ancho de banda de operación) está limitada por el efecto de cuello de botella que significa un bus único para datos e instrucciones, lo cual impide superponer ambos tiempos de acceso.

La arquitectura conocida como **Harvard**, consiste simplemente en un esquema en el que el CPU está conectado a dos memorias por medio de dos buses separados. Una de las memorias contiene solamente las instrucciones del programa y es llamada Memoria de Programa. La otra memoria solo almacena los datos y es llamada Memoria de Datos. Ambos buses son totalmente independientes y pueden ser de distintos anchos. Las principales ventajas de esta arquitectura son:

- a) El tamaño de palabra de las instrucciones no está relacionado con el de los datos y por lo tanto puede ser optimizado para que cualquier instrucción ocupe una sola posición de memoria de programa, logrando así mayor velocidad y menor longitud de programa.
- b) El tiempo de acceso a las instrucciones puede superponerse con el de los datos, logrando una mayor velocidad de operación.

Una pequeña desventaja de los procesadores con arquitectura Harvard es que deben poseer instrucciones especiales para acceder a tablas de valores constantes que pueda ser necesario incluir en los programas, ya que estas tablas se encontrarán físicamente en la memoria de programa (por ejemplo, en la EPROM de un microprocesador). La muestra el esquema de la Harvard.

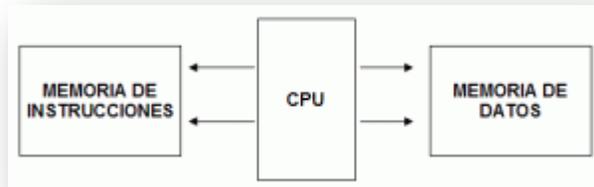


Figura 28 estructura

FIGURA 28. Arquitectura Harvard.

## 2.5 CPU (unidad central de proceso)

Es el elemento más importante del microcontrolador y determina sus principales características, tanto a nivel hardware como a nivel de software.

Podemos decir que la CPU es el núcleo del microcontrolador, ya que se encarga de ejecutar las instrucciones almacenadas en la memoria, siendo lo que habitualmente llamamos procesador o microprocesador, término que a menudo se confunde con el de microcontrolador. En esta línea cabe aclarar que, tal y como estamos viendo, ambos términos no son lo mismo: el microprocesador es una parte de un microcontrolador y sin él no sería útil; un microcontrolador, en cambio, es un sistema completo que puede llevar a cabo de forma autónoma una labor.

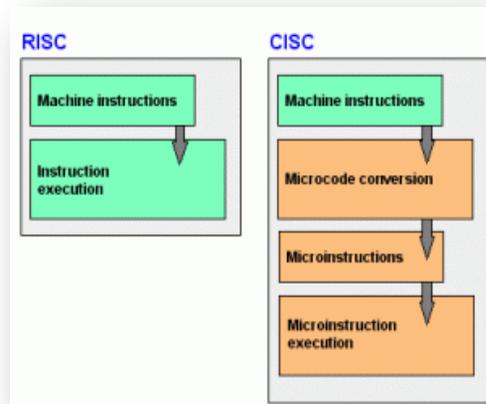


FIGURA 29. Arquitecturas RISC y CISC.

### 2.6.1 RISC (Reduced Instruction Set Computer).

Computadora con un conjunto de Instrucciones Reducidas. Tanto la industria de los computadores comerciales como la de los microcontroladores están inclinándose hacia la filosofía RISC. En estos procesadores el repertorio de instrucciones de máquina es muy reducido y las instrucciones son simples, ejecutándose generalmente en un ciclo. La sencillez y rapidez de las instrucciones permiten optimizar el hardware y el software del procesador.

En este caso, la idea es que el microcontrolador reconozca y ejecute sólo operaciones básicas (sumar, restar, copiar, etc.). Las operaciones más complicadas se realizan al combinar éstas (por ejemplo, la multiplicación se lleva a cabo realizando adiciones sucesivas).

### 2.6.2 CISC (Complex Instruction Set Computer).

El CISC dispone de más de 80 instrucciones máquina en su repertorio, algunas de las cuales son muy sofisticadas y potentes, requiriendo muchos ciclos para su ejecución. La Figura 29 muestra las arquitecturas RISC y CISC.

### 2.6.3 SISC.

En los microcontroladores, destinados a aplicaciones muy concretas, el juego de instrucciones, además de ser reducido, es “específico”, o sea, las instrucciones se adaptan a las necesidades de la aplicación prevista. Esta filosofía se ha bautizado con el nombre de SISC (Computadores de Juego de Instrucciones Específico).

## 2.7 Memoria

En los microcontroladores, la memoria de instrucciones y datos está integrada en el propio chip. Una parte debe ser no volátil, tipo ROM, y se destina a contener el programa de instrucciones que gobierna la aplicación. Otra parte de la memoria será tipo RAM, volátil, y se destina a guardar las variables y los datos.

La RAM en estos dispositivos es de poca capacidad pues sólo debe contener las variables y los cambios de información que se produzcan en el transcurso del programa.

Por otra parte, como sólo existe un programa activo, no se requiere guardar una copia

del mismo en la RAM, pues se ejecuta directamente desde la ROM. Según el tipo de memoria ROM que dispongan los microcontroladores, la aplicación y utilización de los mismos es diferente. Se describen las cinco versiones de memoria no volátil que se pueden encontrar en los microcontroladores del mercado.

### 1º. ROM con máscara.

Es una memoria no volátil de sólo lectura cuyo contenido se graba durante la fabricación del chip. El elevado coste del diseño de la máscara sólo hace aconsejable el empleo de los microcontroladores con este tipo de memoria cuando se precisan cantidades superiores a varios miles de unidades.

### 2ª. OTP

El microcontrolador contiene una memoria no volátil de sólo lectura “programable una sola vez” por el usuario, OTP (One Time Programmable). La versión OTP es recomendable cuando es muy corto el ciclo de diseño del producto, o bien, en la construcción de prototipos y series muy pequeñas.

### 3ª EPROM

Los microcontroladores que disponen de memoria EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) pueden borrarse y grabarse muchas veces. La grabación se realiza, como en el caso de los OTP, con un grabador gobernado desde un PC. Si, posteriormente se desea borrar el contenido, disponen de una ventana de cristal en su superficie por la que se somete a la EPROM a rayos ultravioleta durante varios minutos. Las cápsulas son de material cerámico por lo que son más caras que los microcontroladores con memoria OTP que están hechos con material plástico.

### 4ª EEPROM

Se trata de memorias de sólo lectura, programables y borrables eléctricamente EEPROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory). Tanto la programación como el borrado, se realizan eléctricamente desde el propio grabador y bajo el control programado de un PC. Es muy cómoda y rápida la operación de grabado y la de borrado. Los microcontroladores dotados de memoria EEPROM, una vez instalados en el circuito, pueden grabarse y borrarse cuantas veces se quiera sin ser retirados de dicho circuito. Para ello se usan "grabadores en circuito" que confieren una gran flexibilidad y rapidez a la hora de realizar modificaciones en el programa de trabajo.

Se va extendiendo en los fabricantes la tendencia a incluir una pequeña zona de memoria EEPROM en los circuitos programables para guardar y modificar cómodamente una serie de parámetros que adecuan el dispositivo a las condiciones del entorno.

### 5ª FLASH

Se trata de una memoria no volátil, de bajo consumo, que se puede escribir y borrar. Funciona como una ROM y una RAM pero consume menos y es más pequeña. A diferencia de la ROM, la memoria FLASH es programable en el circuito. Además, es más rápida y de mayor densidad que la EEPROM. La alternativa FLASH está recomendada frente a la EEPROM cuando se precisa gran cantidad de memoria de programa no volátil. Es más veloz y tolera más ciclos de escritura/borrado.

Las memorias EEPROM y FLASH son muy útiles al permitir que los microcontroladores que las incorporan puedan ser reprogramados "en circuito", es decir, sin tener que sacar el circuito integrado de la tarjeta. Así, un dispositivo con este tipo de memoria incorporado al control del motor de un automóvil

permite que pueda modificarse el programa durante la rutina de mantenimiento periódico, compensando los desgastes y otros factores tales como la compresión, la instalación de nuevas piezas, etc. La reprogramación del microcontrolador puede convertirse en una labor rutinaria dentro de la puesta a punto

### **Puertas de Entrada y Salida (E/S)**

La principal utilidad de las patitas que posee la cápsula que contiene un microcontrolador es soportar las líneas de E/S que comunican al computador interno con los periféricos exteriores.

### **Reloj principal**

Todos los microcontroladores disponen de un circuito oscilador que genera una onda cuadrada de alta frecuencia, la cual configura los impulsos de reloj usados en la sincronización de todas las operaciones del sistema. Generalmente, el circuito de reloj está incorporado en el microcontrolador y sólo se necesitan unos pocos componentes exteriores para seleccionar y estabilizar la frecuencia de trabajo. Dichos componentes suelen consistir en un cristal de cuarzo junto a elementos pasivos o bien un resonador

cerámico o una red R-C. Aumentar la frecuencia de reloj supone disminuir el tiempo en que se ejecutan las instrucciones, pero lleva aparejado un incremento del consumo de energía.

Cada fabricante oferta numerosas versiones de una arquitectura básica de microcontrolador. En algunas, se amplía las capacidades de las memorias, en otras incorpora nuevos recursos, en otras reduce las prestaciones al mínimo para aplicaciones muy simples, etc. La labor del diseñador es encontrar el modelo mínimo que satisfaga todos los requerimientos de su aplicación. De esta forma, minimizará el coste, el hardware y el software. Los principales recursos específicos que incorporan los microcontroladores son:

- Temporizadores o "Timers": Se emplean para controlar periodos de tiempo y para llevar la cuenta de acontecimientos que suceden en el interior.
- Perro guardián o "Watchdog": Es un temporizador que cuando se desborda y pasa por cero provoca un reset automáticamente en el sistema.
- Estado de reposo o de bajo consumo: Es un estado del sistema donde se detiene el reloj principal y sus circuitos asociados con el objetivo de ahorrar energía en periodos de tiempo donde el microcontrolador se mantiene en espera de instrucciones.
- Conversor A/D: Procesa señales analógicas convirtiéndolas en señales digitales.

- Comparador analógico: Algunos modelos de microcontroladores disponen internamente de un amplificador operacional que actúa como comparador entre una señal fija de referencia y otra variable que se aplica por una de las patitas de la cápsula. La salida del comparador proporciona un nivel lógico 1 ó 0 según una señal sea mayor o menor que la otra
- Modulador de anchura de impulsos o PWM: Son circuitos que proporcionan en su salida impulsos de anchura variable, que se envían al exterior a través de las patitas del encapsulado.
- Puertas de comunicación: brindan al microcontrolador la posibilidad de comunicarse con otros dispositivos externos, otros buses de microprocesadores, buses de sistemas, buses de redes y poder adaptarlos con otros elementos bajo otras normas y protocolos. Algunos modelos disponen de recursos que permiten directamente esta tarea, entre los que destacan:
  - UART, adaptador de comunicación serie asíncrona.
  - USART, adaptador de comunicación serie síncrona y asíncrona.
  - Puerta paralela esclava para poder conectarse con los buses de otros microprocesadores.
  - USB (Universal Serial Bus), bus serie moderno para los PC.
  - Bus I2C, interfaz serie de dos hilos desarrollado por Philips.
  - CAN (Controller Area Network) es un protocolo de comunicaciones desarrollado por la firma alemana Robert Bosch GmbH, basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en ambientes distribuidos, además ofrece una solución a la gestión de la comunicación entre múltiples CPUs (unidades centrales de proceso) [21].

## 2.8 Fabricantes

En la actualidad, gran parte de los fabricantes de circuitos integrados disponen de su propia línea de microcontroladores. Entre ellos se tiene a Intel, que ha ido siempre por delante presentando nuevos productos; así, por ejemplo, dicha empresa introdujo el 8048 que se considera el primer microcontrolador de 8 bits de la década de los 70.

Otras de las principales empresas del mundo de dispositivos programables son: Motorola y la empresa americana Microchip con sus famosos microcontroladores PIC, los cuales han ido dominando el mercado

---

21 [Ibrahim, Dogan](#): *Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F series/Dogan Ibrahim*. British Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN: 978-0-7506-8611-2

en los últimos años. Su popularidad avanza día a día, ya que estos son incluidos en la mayoría de los proyectos debido a su bajo costo, consumo reducido, tamaño pequeño, facilidad de programación y abundancia de herramientas de soporte económicas.

Otras empresas como Hitachi, Texas, Toshiba y Zilog abarcan pequeñas partes del mercado.

Todos los microcontroladores que se fabrican en el presente son buenos y el mejor no siempre es el mismo. Cambian el modelo y fabricante según la aplicación y las circunstancias que lo envuelven.

## **2.9 Las Gamas de los Microcontroladores PIC.**

Las diversas gamas de PIC están dadas en función del tamaño de instrucción que emplean. Microchip estructura sus microcontroladores para su comercialización en 4 gamas.

- La gama baja la componen la serie PIC10 y una parte de las series PIC12 y PIC16. Utilizan palabras de instrucción de 12 bits, su tamaño es reducido y su costo es muy bajo.
- La gama media está compuesta por casi toda la serie PIC16 y una porción de los PIC12. Utilizan un ancho de palabra de instrucción de 14 bits. Ésta es la gama más popular por su buena relación calidad/precio. Además, programarlos en lenguaje ensamblador resulta bastante sencillo, dentro de la complejidad del lenguaje, y es por ello que son una buena opción de cara al aprendizaje.
- La gama alta o de alto rendimiento la forma la serie de microcontroladores PIC18. Emplean palabras de instrucción de 16 bits y están basados en los PIC de gama media, pero con mejoras sustanciales: más puertos de E/S y más conversores A/D o interfaces USB.
- La gama de 24 bits la componen las series PIC30 y PIC24. Utilizan 24 bits como palabra de instrucción, usan palabras de memoria de datos de 16 bits (y no 8 bits) y son los que ofrecen más memoria y mayor rendimiento.

## **2.10 Ventajas de los microcontroladores PIC de Microchip:**

- Eficiencia del código: permiten una gran compactación de los programas.
- Rapidez de ejecución: a frecuencia de 20MHz->5 millones de instrucciones /segundo.

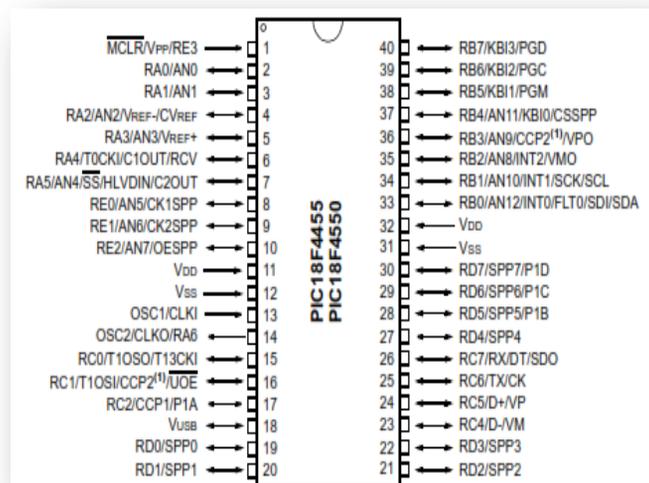
- Seguridad en acceso por la separación de memoria de datos y de programa.
- Conjunto reducido de instrucciones y de fácil aprendizaje.
- Compatibilidad de pines y código entre dispositivos de la misma familia o sin pérdida significativa de recursos básicos internos. (muy versátiles).
- Gran variedad de versiones en distintos encapsulados (desde 8 hasta 84 pines) sin reducción de las prestaciones internas (muy versátiles).
- Posibilidad de protección del código muy fiable.
- Herramientas de desarrollo de software y hardware abundantes y de bajo coste.

En la presente tesis, se decidió elegir el robusto y eficiente microcontrolador pic18f4550 que proviene de la familia PIC18 del fabricante Microchip. Entre las ventajas que presenta este microcontrolador destacan: permite trabajar con USB, SPI e I2C y cuenta con una memoria suficiente para aplicaciones complejas. Sus características de memoria de programa, memoria RAM, número de entradas/salidas, número de canales analógicos y tipos de puertos de comunicación, han hecho de este PIC uno de los más utilizados para aplicaciones diversas.

## 2.11 Características Generales del PIC18F4550

La Figura 30 presenta el diagrama que da a conocer lo que hay presente en cada uno de los 40 pines de este microcontrolador; éste diagrama nos ayudara a hacer uso de los recursos que brinda este PIC a través de sus terminales y para energizar correctamente el mismo.

FIGURA 30. Patillaje del microcontrolador pic18f4550.



## 2.11.1 Diagrama de bloques del PIC28F4550

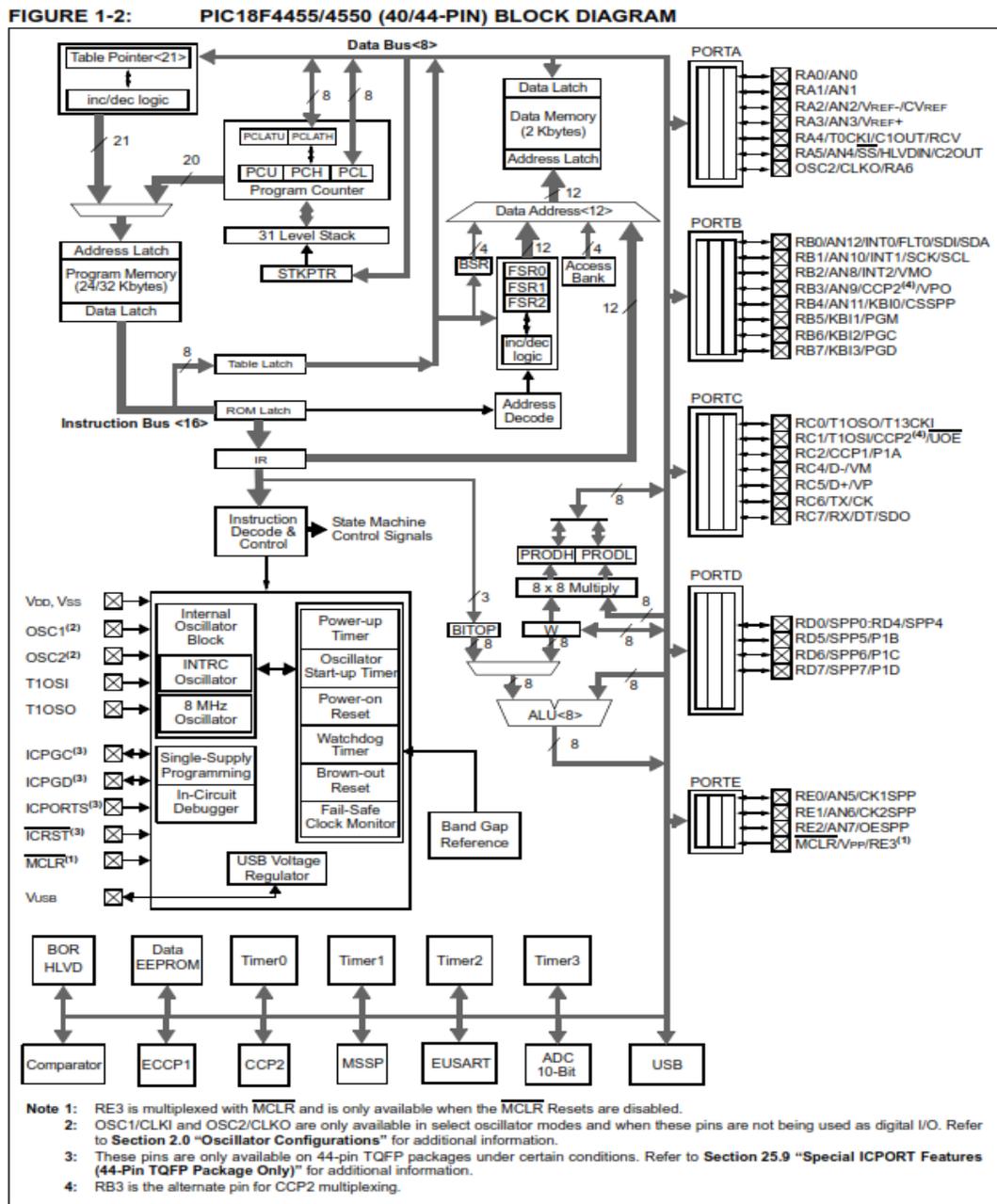


FIGURA 31.  
Diagrama de bloques del PIC18F4550.

La Figura 31 muestra el diagrama de bloques interno del microcontrolador PIC 18F4550. En él se muestran los elementos internos de este PIC, como son: La ALU (unidad aritmético lógica), los timers, el

modulo comparador, convertidores analógicos digitales, los puertos de entrada y salida y algunos otros elementos que se encuentran en el interior de este microcontrolador.

El microcontrolador PIC 18F4550 dispone de diferentes buses para el acceso a Memoria de Programa y Memoria de Datos (arquitectura Harvard):

- Bus de Memoria de programa o de instrucciones:

21 líneas de dirección;

16/8 líneas de datos (16 líneas para instrucciones / 8 líneas para datos).

- Bus de Memoria de Datos:

12 líneas de dirección;

8 líneas de datos.

Esto permite acceder simultáneamente a la memoria de programa y a la memoria de datos, es decir, se puede ejecutar una instrucción (lo que por lo general requiere acceso a memoria de datos) mientras se lee de la memoria de programa la siguiente instrucción.

### 2.11.2 Organización de la memoria

El microcontrolador PIC 18F4550 dispone de las siguientes memorias:

- *Memoria de programa:* memoria Flash interna de 32.768 bytes, la cual almacena instrucciones, constantes y datos. Puede ser escrita/leída mediante un programador externo o durante la ejecución de un programa mediante punteros.
- *Memoria RAM de datos:* memoria SRAM interna de 2048 bytes en la que están incluidos los registros de función especial. Almacena datos de forma temporal durante la ejecución del programa y puede ser escrita / leída en tiempo de ejecución mediante diversas instrucciones.
- *Memoria EEPROM de datos:* memoria no volátil de 256 bytes, en la que se almacenan datos que se deben conservar aun en ausencia de tensión de alimentación, la cual puede ser escrita/leída en tiempo de ejecución a través de registros.

- *Pila*: bloque de 31 palabras de 21 bits, en la que se almacena la dirección de la instrucción que debe ser ejecutada después de una interrupción o subrutina;
- *Memoria de configuración*: memoria en la que se incluyen los bits de configuración (12 bytes de memoria Flash) y los registros de identificación (2 bytes de memoria de solo lectura).

### 2.11.3 Memoria RAM de datos

El microcontrolador dispone de una memoria RAM de datos de 2.048 bytes (8 bancos de 256 bytes). Además, dispone de 160 bytes dedicados a los registros de funciones especiales (SFR's), situados en la parte alta del banco 15. Ver Figura 32.

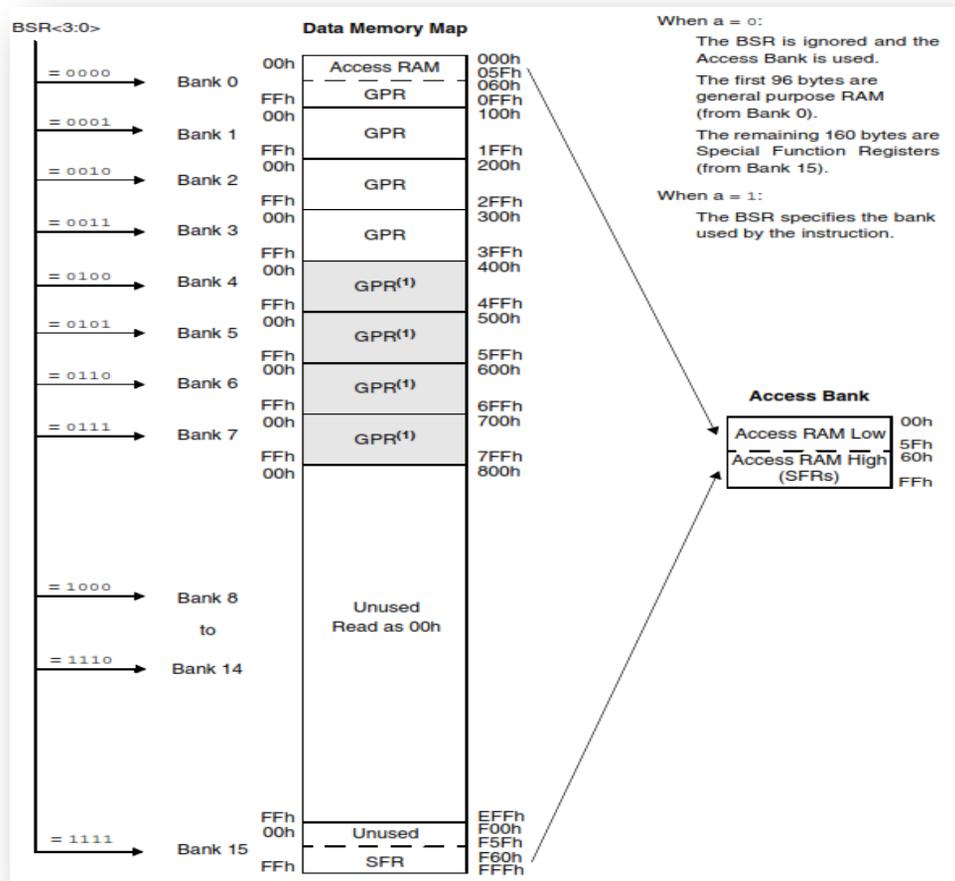


FIGURA 32. Distribución de la memoria RAM de PIC 18F4550.

Para acceder a un byte de la memoria RAM de datos primero debe seleccionarse el banco al que pertenece el byte mediante el registro de selección de banco (BRS) y a continuación direccionar el byte dentro del banco. Además, existe una modalidad de acceso rápido a las 96 posiciones de la parte baja del banco de memoria 0 a los 160 bytes de SFR's (banco de acceso rápido). Los bancos 4, 5, 6 y 7 se utilizan para el USB.

#### 2.11.4 Memoria EEPROM de datos

El microcontrolador PIC 18F4550 dispone de una memoria EEPROM de datos de 256 bytes. Al ser una memoria no volátil, los datos almacenados en ella se mantienen aún en ausencia de tensión de alimentación.

El acceso a esta memoria se realiza mediante los SFR (EECON1, EECON2, EEDATA, EEADR). Esta memoria permite hasta 1.000.000 de ciclos de borrado/escritura y se puede leer y escribir de forma individual en cada una de las 256 posiciones de memoria.

Cuando se realiza una operación de escritura, la circuitería interna del microcontrolador se encarga de borrar previamente la posición en la que se desea escribir. La duración de un ciclo completo de borrado/escritura de un byte en la memoria EEPROM suele ser de unos 4 [ms].

Un problema bastante común en las memorias EEPROM es la alteración de los datos almacenados debido a operaciones de escritura indeseadas. Para evitar este tipo de situaciones, durante la inicialización del microcontrolador (Power up, Reset), la operación de escritura queda deshabilitada.

#### 2.11.5 Pila

La Pila es un bloque de memoria RAM de 31 palabras de 21 bits, que sirve para almacenar temporalmente el valor a procesar cuando se produce una llamada a subrutina o una interrupción. Ver Figura 33.

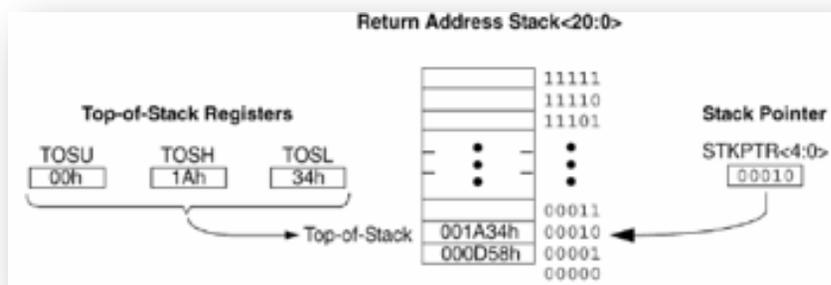


FIGURA 33. Manipulación de memoria de Pila.

El puntero de Pila, contenido en el registro STKPTR, es un contador de 5 bits que indica la posición actual del final de la pila. El contenedor del final de pila es accesible mediante los registros TOSU, TOSH, TOSL. Cuando se procesa una interrupción o se ejecutan las instrucciones CALL o RCALL (el PC está apuntando a la siguiente instrucción) se incrementa el STKPTR y se almacena en el final de la pila el valor del PC. Cuando se ejecutan las instrucciones RETURN, RETLW o RETFIE se copia el valor almacenado en la cima de la pila en el PC y se decrementa el STKPTR.

#### 2.11.6 Memoria de configuración.

Se trata de un bloque de memoria situado a partir de la posición 30000H de memoria de programa (más allá de la zona de memoria de programa de usuario).

En esta memoria se incluyen los bits de configuración que están contenidos en 12 bytes de memoria Flash, los cuales permiten la configuración de algunas opciones del microcontrolador, como son:

- Opciones del oscilador;
- Opciones del Reset;
- Opciones del Watchdog;
- Opciones de la circuitería de depuración y programación;
- Opciones de protección contra escritura de memoria de programa y memoria EEPROM de datos.

#### 2.11.7 Sistema de interrupciones del PIC 18F4550

Dispone de 21 fuentes de interrupciones (INTCON). Se distinguen dos grupos de interrupciones: generales de periféricos. Se dispones de niveles de prioridad:

- Nivel alto, vectorizado en la dirección 0008H;
- Nivel bajo, vectorizado en la dirección 0018H.

Todas las interrupciones pueden ser programadas con cualquiera de las dos prioridades, salvo la interrupción externa 0 (que siempre tiene alta prioridad). Además, las interrupciones disponen de 3 bits de configuración, excepto la interrupción externa 0, que tiene dos:

- *Bit de habilitación de interrupción:* permite habilitar a nivel individual la interrupción;
- *Flag de interrupción:* se pone a "1" cuando se produce la condición de interrupción, independientemente de si la interrupción está habilitada o no. Este Flag debe ponerse a "0" por software cuando se procesa la interrupción;
- *Bit de prioridad de interrupción:* establece si la interrupción es de alta o de baja prioridad y no está disponible para la interrupción externa 0.

#### 2.11.8 Unidades funcionales del microcontrolador

El microcontrolador PIC 18F4550 dispone de una serie de unidades funcionales que le permiten realizar tareas específicas y especializadas (conversión ADC, Transmisión / Recepción de datos y generación de señales digitales con temporización programable). Además, estas unidades permiten optimizar el rendimiento del microcontrolador ya que trabajan en paralelo a la CPU, con lo cual se logra que ésta se centre en otras tareas como procesado de datos, cálculos, movimiento de datos, etc.

Las unidades funcionales más importantes del PIC 18F4550 son:

- Puertos de entrada y salida (E/S);
- Temporizadores (0 al 3);
- Convertidores ADC;
- Unidades de Comparación / Captura / PWM (Pulse Width Modulation) / CCP (Capture-Compare-PWM).
- Unidades de Comparación / Captura / PWM mejorada ECCP (Enhanced Capture/Compare/PWM):

- Canal de comunicación serie EUSART; es también conocida como la “Interfaz de Comunicación Serial” (Serial Communications Interface – SCI).
- Canal de comunicación serie MSSP (Master Synchronous Serial Port);
- Canal de comunicaciones serie USB (Universal Serial Bus);
- Módulo analógico de comparación;
- Canal de transmisión de datos en paralelo SPP (Standart Parallel Port);
- Canal de comunicación I2C.

### 2.11.9 Puertos de Entrada/Salida

El microcontrolador dispone de cinco puertos de Entrada y Salida (E/S) que incluyen un total de 35 líneas digitales.

Listado de puertos del microcontrolador PIC 18F4550	
Puerto	Líneas de Entrada/Salida
PUERTO A	7 líneas de Entrada/Salida
PUERTO B	8 líneas de Entrada/Salida
PUERTO C	6 líneas de Entrada/Salida + 2 líneas de entrada
PUERTO D	8 líneas de Entrada/Salida
PUERTO E	3 Líneas de Entrada/Salida+ 1 línea de entrada

TABLA 3. Puertos del PIC18F4550.

Todas las líneas digitales de E/S disponen de al menos una función alternativa asociada a alguna circuitería específica del microcontrolador. Cuando una línea trabaja en el modo alternativo no puede ser usada como línea digital de E/S estándar.

Cada puerto de E/S tiene asociado tres registros:

- *Registro TRIS*: mediante este registro se configura cada una de las líneas de E/S del puerto como Entrada (bit correspondiente a “1”) y como Salida (bit correspondiente a “0”);

- *Registro PORT*: mediante este registro se puede leer el valor presente en el pin de E/S y se puede establecer el valor del Latch de salida;
- *Registro LAT*: mediante este registro se puede leer o establecer el valor del Latch de salida [22, 23].

## 2.12 Compilador MikroC PRO

Existen varios compiladores en el mercado, basados en lenguaje de alto nivel C, destinados a programar la serie de microcontroladores PIC18. Estos compiladores tienen muchas características similares.

Los compiladores más usados en aplicaciones educativas, industriales y comerciales para los microcontroladores PIC18 son:

- C18
- CCS
- PICC18
- mikroC

**C18** es un producto de Microchip Inc. Una versión demo de este compilador, limitada para su uso por un periodo de tiempo, así como una funcionalidad limitada de la versión del C18 sin límite de tiempo, están disponibles en el sitio web de Microchip. C18 incluye un simulador y admite el hardware y las herramientas de desarrollo de software como emuladores en circuito (p. ej., ICE2000) y depuradores en circuito (p. ej., ICD2).

**CCS** ha sido desarrollado por el equipo personalizado Systems Inc. La compañía ofrece un período limitado de tiempo en la versión de demostración de su compilador. CCS proporciona un gran número de funciones y admite un depurador en circuito (p. ej., la ICD-U40) que son muy útiles en el desarrollo de sistemas basados en los microcontroladores de la familia PIC18.

---

22 [Jose Luis Esteban Herreros](#). *Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Madrid, 2015  
Depósito Legal: M. 4519-2015

23 [Ibrahim, Dogan](#): *Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F series/Dogan Ibrahim*. British Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN: 978-0-7506-8611-2

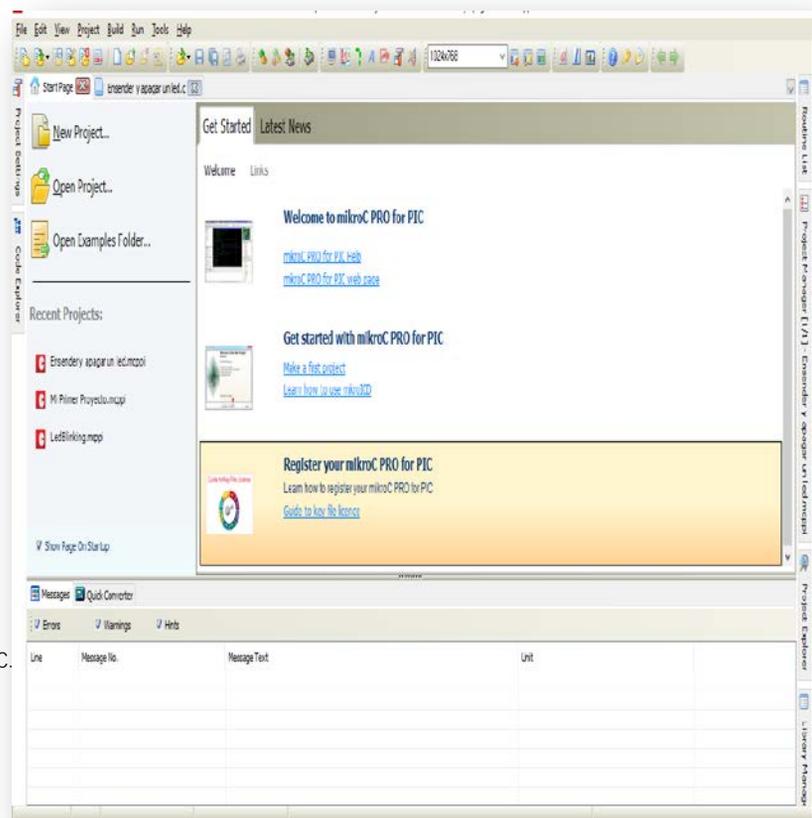
**PICC18** es otro compilador popular basado en lenguaje C, que fue desarrollado por Hi-Tech Software y está disponible en dos versiones: Standard y Professional. Un potente simulador y un entorno de desarrollo integrado (Hi-Tide) son proporcionados por la empresa. PICC18 está apoyado por el simulador PROTEUS, que puede utilizarse para simular sistemas basados en microcontroladores PIC. Un período limitado de tiempo en la versión de demostración de este compilador está disponible en el sitio web del desarrollador.

El bien conocido y potente compilador **mikroC**, desarrollado por MikroElektronika es fácil de aprender y viene con bastos recursos, tales como un gran número de funciones de biblioteca y un entorno de desarrollo integrado, el cual tiene un simulador integrado y un depurador en circuito (p. ej., mikroICD). Una versión demo del compilador, con un límite de memoria de 2K del programa, está disponible en MikroElektronika.

La programación en el compilador mikroC PRO se basa en PROYECTOS. Cada proyecto está conformado por un conjunto de archivos interrelacionados entre sí. Para crear un programa, primero se debe crear un Proyecto (básicamente se debe seleccionar el microcontrolador, la frecuencia de operación y establecer los bits de configuración); a continuación, se procede a escribir las instrucciones del programa en lenguaje C (código fuente); y por último se genera el código de máquina HEX (código ejecutable), que será almacenado en la memoria de programa del microcontrolador [24].

En la Figura 34, se muestra la apariencia de la ventana de inicio del programa MicroC PRO for PIC, donde se muestran una serie de herramientas que servirán para crear y modificar

24 Creación del primer proyecto en mikroC PRO for PIC.



los programas que se cargaran en los microcontroladores para controlar los recursos de los mismos.

FIGURA 34 . Apariencia del software MikroC PRO for PIC.

El compilador del lenguaje de alto nivel C utiliza estructuras que facilitan la programación; optimiza las operaciones matemáticas y los procesos, por medio del uso de funciones predefinidas y las no predefinidas, que el desarrollador pueda crear; así como, el uso de un conjunto de variables de tipo carácter, entero y punto decimal. El compilador crea automáticamente el código ensamblador y a su vez un código similar consignado en un archivo con extensión \*.hex; este archivo es el resultado primordial del compilador, dado que con éste se programa eléctricamente el microcontrolador o con el mismo se puede realizar una simulación computacional.

*mikroC PRO for PIC* organiza aplicaciones en los proyectos que consisten en un solo fichero de proyecto (fichero con extensión. mcppi) o en uno o más ficheros fuente (ficheros con extensión .c). Los ficheros fuentes son denominados cabeceras en el lenguaje de programación *mikroC*. El compilador *mikroC PRO for PIC* permite manejar varios proyectos a la vez. Los ficheros fuente se pueden compilar sólo si forman parte del proyecto.

Un fichero de proyecto contiene lo siguiente:

- Nombre del proyecto y la descripción opcional;
- Dispositivo destino (tipo de microcontrolador) utilizado;
- Frecuencia de reloj del microcontrolador;
- Lista de ficheros fuente de proyecto;
- Ficheros binarios (\*.mcl); y
- Otros ficheros.

En la Figura 35 se puede apreciar la apariencia visual del entorno de desarrollo MikroC PRO for PIC. El entorno presenta una pantalla que es la que usamos para la edición de los programas que necesitamos para controlar los microcontroladores PIC que se usarán en nuestros diferentes proyectos.

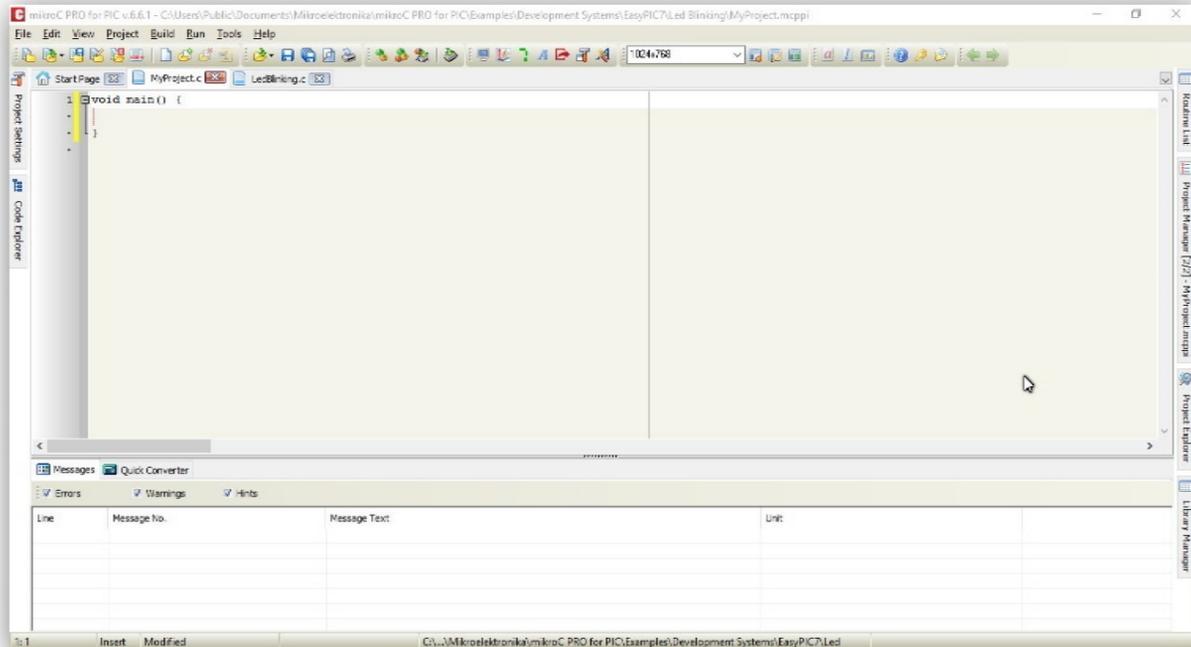


FIGURA 35. Apariencia del entorno de desarrollo del software MikroC PRO for PIC.

### 2.12.1 Nuevo proyecto

El proceso de crear un nuevo proyecto es muy simple. Se selecciona la opción *New Project* del menú *File* o *Project* como se muestra en la Figura 36.

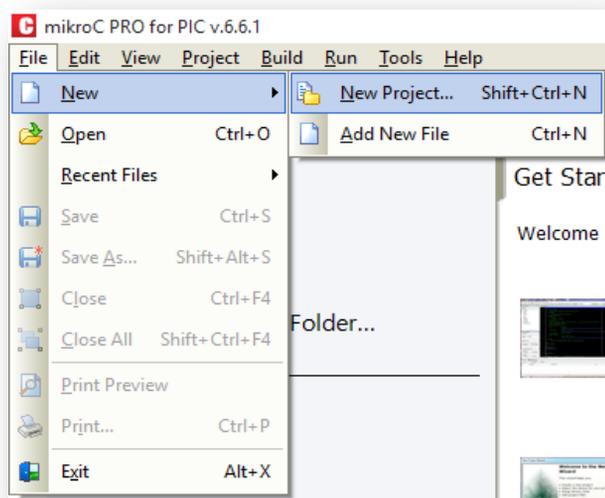


FIGURA 36. Selección de un nuevo proyecto en el software MikroC PRO for PIC.

Aparecerá una ventana denominada *New Project Wizard*, Figura 37, que le guiará a través del proceso de creación de un nuevo proyecto. La ventana de entrada de esta aplicación contiene una lista de

acci

one

S

que

se

real

izar

án

dur

ant

e la

cre

ación de un nuevo proyecto. Haga click en *Next*.

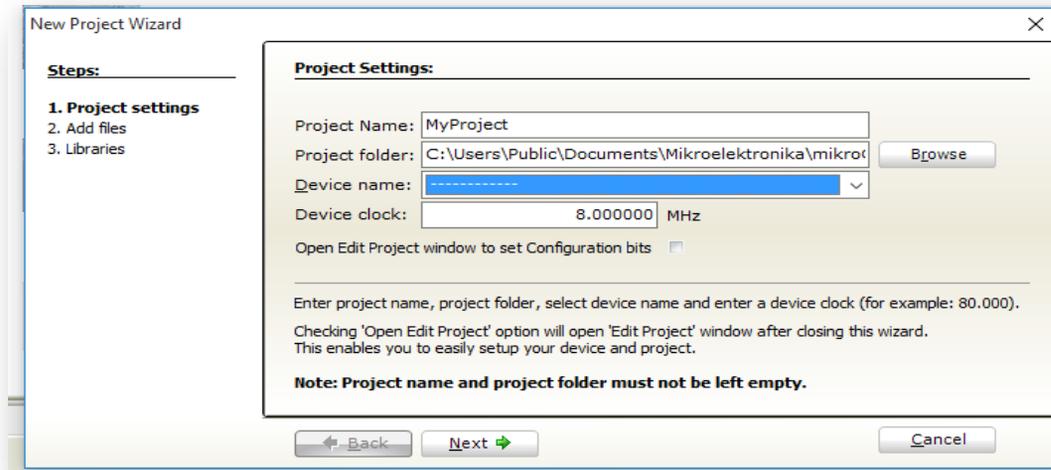
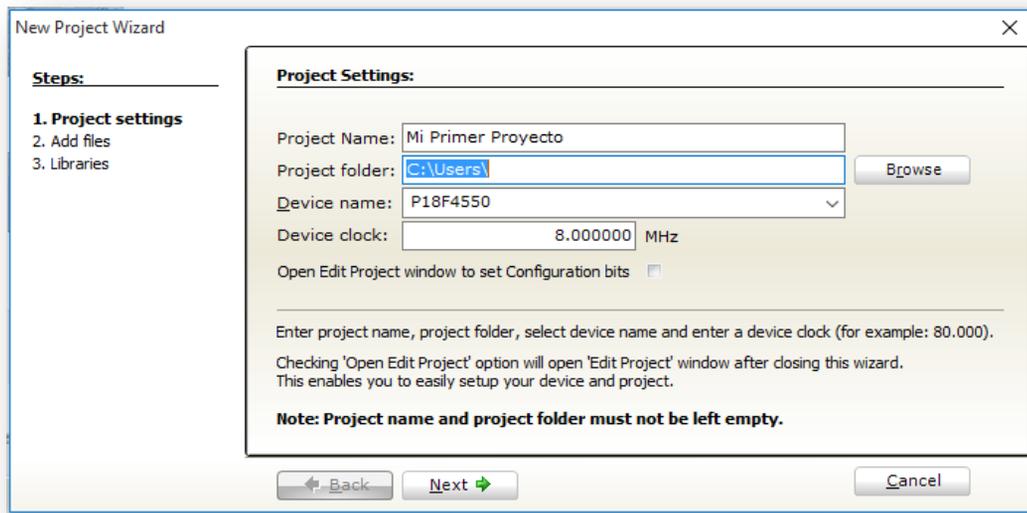


Figura 37. Apariencia de la ventana New Project Wizard del software MikroC PRO for PIC.

El proceso de creación de un nuevo proyecto consiste de cinco pasos en total:

1. Seleccionar el nombre del proyecto.
2. Seleccionar la carpeta donde se va a guardar el archivo.
3. Seleccionar el tipo de microcontrolador para que el que se va a escribir el programa. En nuestro caso se trata del PIC18F4550.
4. Seleccionar la frecuencia de reloj del microcontrolador.

- 5.El nombre en este caso es Mi primer proyecto.
6. La ruta de acceso del mismo es C:\Users\
- 7.El tipo de PIC que usaremos es el PIC18F4550
- 8.La frecuencia de reloj del microcontrolador se fijará a 8 MHz.



Después de realizar estos pasos, se debe ver en la pantalla lo que se muestra en la Figura 38.

FIGURA 38. Apariencia la ventana de selección de características de un proyecto del software MikroC PRO for PIC.

Al oprimir Next, aparecerá la ventana mostrada en la Figura 39, donde se presenta la opción que nos informa si queremos adicionar al proyecto un archivo ya existente.

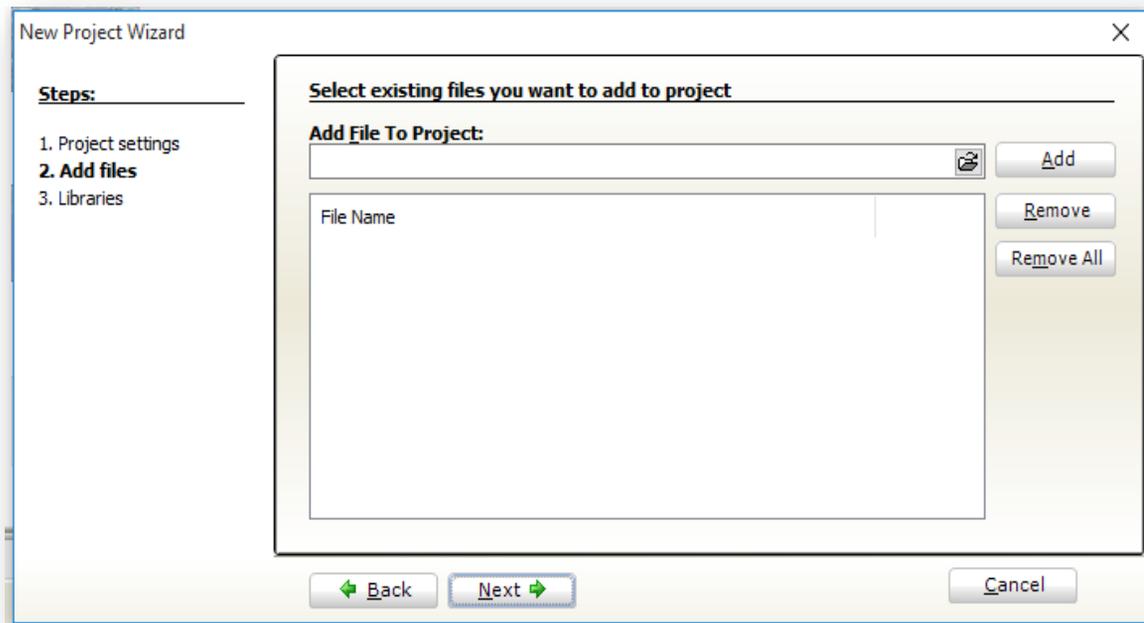
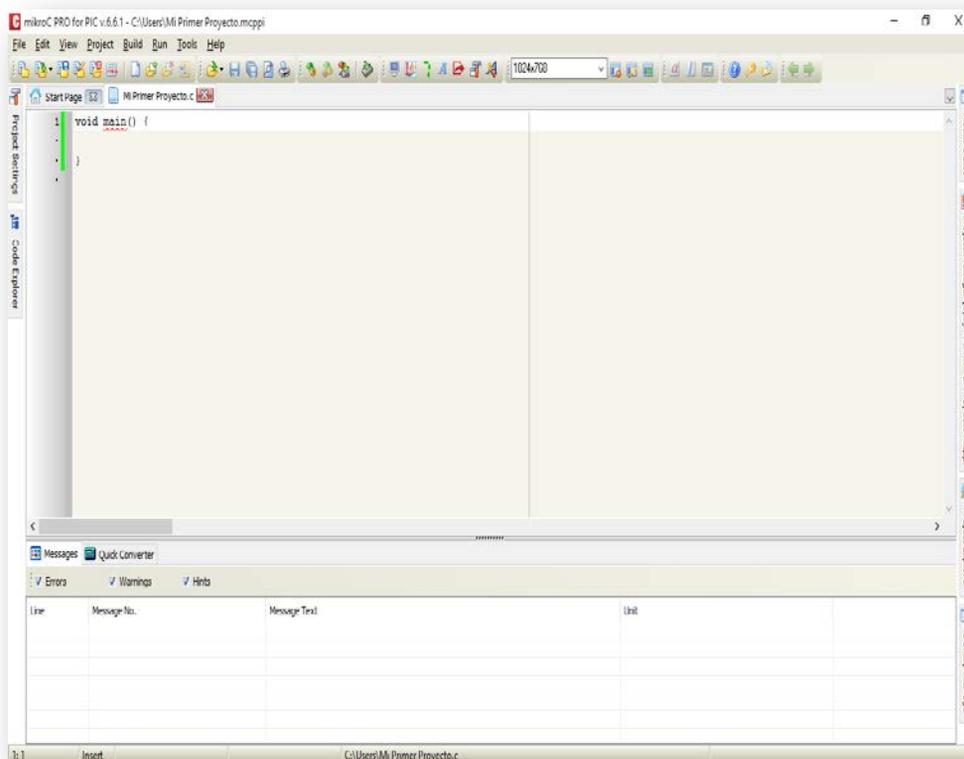


FIGURA 39. Apariencia de la ventana de adición de un archivo existente en un proyecto del software MikroC PRO for PIC.

Para continuar se da la opción Next y aparecerá una pantalla donde se indica si se quiere agregar alguna librería al proyecto. Una vez que se toma la decisión de si se quiere o no adicionar alguna librería, se procede a pulsar la tecla Finish. Como paso siguiente, se creará automáticamente el proyecto que deseamos, al cual se le asignará automáticamente la extensión mcppi (Mi Primer Proyecto.mcppi). Es en esta nueva ventana donde se creará y escribirá el programa que se grabará en el microcontrolador y se encargará de indicar las acciones y tareas que debe realizar el microcontrolador. Esto se aprecia en la Figura 40.



**FIGURA 40.**  
**APARIENCIA DE LA**  
**VENTANA DE ADICIÓN**  
**DE LIBRERÍAS, EN UN**  
**PROYECTO DEL**  
**SOFTWARE MIKROC**  
**PRO FOR PIC.**

La Figura 41 muestra el código de un programa escrito en mikroC, el cual enciende y apaga un led cada determinado tiempo. El programa inicia escribiendo: El nombre del diseñador, el nombre del archivo, fecha y el tipo de PIC que se seleccionó. Después se crea el cuerpo del programa que inicia con la función main, dentro de esta función se usó un ciclo de repetición for y un cierto tiempo de retraso de 1000ms entre el encendido y apagado del led.

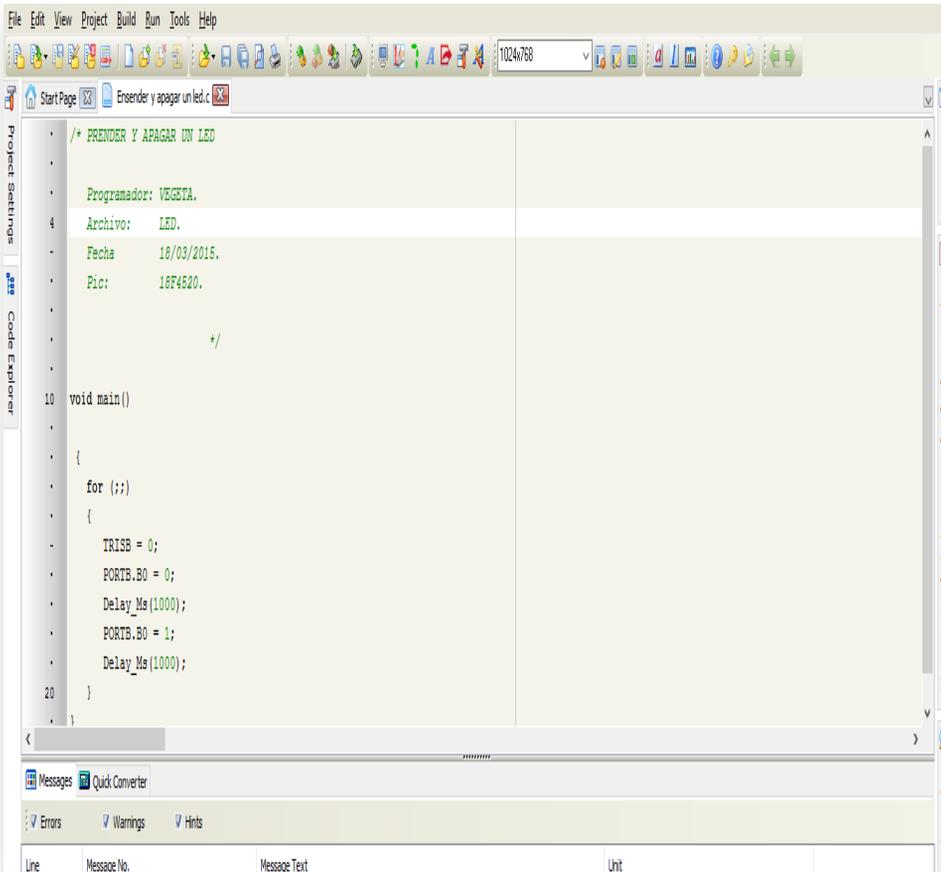


FIGURA 41.  
Código de un programa en el software MikroC PRO for PIC.

### 2.12.2 Proceso de compilación.

Una vez que se ha creado el programa es necesario compilarlo en un código de programa (.hex). Seleccione una de las opciones para compilación del menú **Project**:

Para crear un fichero HEX seleccione la opción **Build** (Ctrl+F9) del menú **Project** o haga click en el icono **Build** de la barra de herramientas **Project**.

La opción **Build All Projects** (Shift+F9) compila todos los ficheros del proyecto, librerías (si hay código fuente para ellas) y los ficheros **def** para el chip utilizado. La opción **Build + Program** (Ctrl+F11) es importante puesto que permite al compilador *mikroC PRO for PIC* cargar automáticamente el programa en el microcontrolador después de la compilación. El proceso de programación se realiza por medio del programador *PICFlash*. En la Figura 42 se puede apreciar la ventana grafica que contiene la etiqueta **Build**, la cual, al seleccionarla, genera el fichero .hex, que es el que se carga en el microcontrolador.

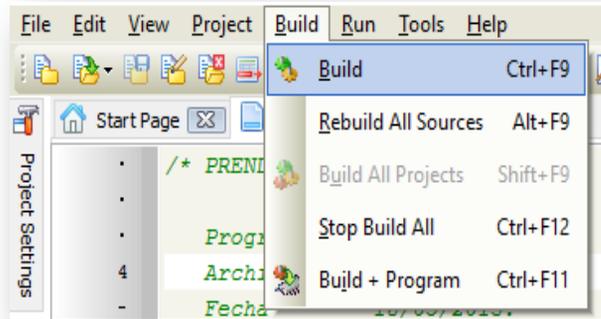


FIGURA 42. Etiqueta Build, para la compilación en el software MikroC PRO for PIC.

Todos los errores detectados durante la compilación aparecerán en la ventana *Message*. Si no hay errores, *mikroC PRO for PIC* generará ficheros de salida.

### 2.12.3 Ficheros de salida

El compilador *mikroC PRO for PIC* generará los ficheros de salida en la carpeta del proyecto que contiene el fichero de proyecto. Los ficheros de salida se muestran en la Figura 43.

Formato	Descripción	Tipo de fichero
Intel HEX	Registros del formato Intel hex. Este fichero se utiliza para la programación de los microcontroladores PIC.	.hex
Fichero Binario	Librería compilada que se puede incluir en otros proyectos.	.mcl
Fichero Ensamblador	Fichero ensamblador con los nombres simbólicos	.asm
Fichero List	Visión general de uso de la memoria de los microcontroladores PIC. El fichero List representa una versión extendida del código ensamblador, es decir, contiene las direcciones de instrucciones, registros, rutinas y etiquetas.	.lst

FIGURA 43. Ficheros de salida del compilador MikroC PRO for PIC.

#### 2.12.4 COMO VISUALIZAR EL CÓDIGO ENSAMBLADOR.

Después de compilar, haga click en el menú **View** y después en **Assembly** o seleccione la opción **View Assembly** del menú **Project** para revisar el código ensamblador generado en la nueva ventana. Para visualizar Fichero *List* completo seleccione la opción **View Listing** del mismo menú. Se puede apreciar la etiqueta *Assembly* en la Figura 44.

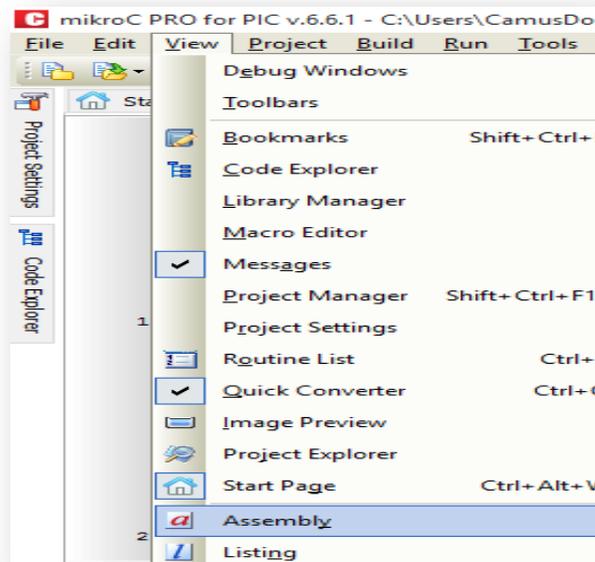


FIGURA 44 . Visualización del código ensamblador del compilador MikroC PRO for PIC.

#### 2.13 Motores paso a paso.

Los motores paso a paso se pueden ver como motores eléctricos sin escobillas. Es típico que todos los embobinados del motor sean parte del estator y el rotor puede ser un imán permanente o, en el caso de los motores de reluctancia variable (que más adelante describiremos), un cilindro sólido con un mecanismo en forma de dientes (similar a un engranaje), construido con un material magnéticamente "blando" (como el hierro dulce). Ver Figura 45.



FIGURA 45. Modelos de motores paso a paso.

La mayoría de los motores paso a paso conocidos se pueden hacer avanzar a frecuencias de audio, lo que les permite girar muy velozmente. Con un controlador apropiado, se les puede hacer arrancar y detenerse en un instante en posiciones controladas.

### 2.13.1 Comportamiento propio de los motores paso a paso

Los motores paso a paso tienen un comportamiento del todo diferente al de los motores de corriente continua (cc). En primer lugar, no giran libremente por sí mismos. Los motores paso a paso, como lo indica su nombre, avanzan girando por pequeños pasos. También difieren de los motores de CC en la relación entre velocidad y torque (un parámetro que también es llamado "par motor" y "par de giro"). Los motores de CC no son buenos para ofrecer un buen torque a baja velocidad sin la ayuda de un mecanismo de reducción. Los motores paso a paso, en cambio, trabajan de manera opuesta: su mayor capacidad de torque se produce a baja velocidad.

Los motores paso a paso tienen una característica adicional: el torque de detención (que se puede ver mencionado también como "par de detención", e incluso par/torque "de mantenimiento"), el cual no existe en los motores de CC. El torque de detención hace que un motor paso a paso se mantenga firmemente en su posición cuando no está girando. Esta característica es muy útil cuando el motor deja de moverse y, mientras está detenido, la fuerza de carga permanece aplicada a su eje. Se elimina así la necesidad de un mecanismo de freno.

Si bien es cierto que los motores paso a paso funcionan controlados por un pulso de avance, el control de un motor paso a paso no se realiza aplicando en directo este pulso eléctrico que lo hace avanzar. Estos motores tienen varios embobinados que, para producir el avance de ese paso, deben ser alimentados en una secuencia adecuada. Si se invierte el orden de esta secuencia, se logra que el motor gire en sentido opuesto. Si los pulsos de alimentación no se proveen en el orden correcto, el motor no se moverá apropiadamente. Puede ser que zumbe y no se mueva, o puede ser que gire, pero de una manera tosca e irregular.

Esto significa que hacer girar un motor paso a paso no es tan simple como hacerlo con un motor de corriente continua, al que se le entrega una corriente y listo. Se requiere un circuito de control, que será el responsable de convertir las señales de avance de un paso y sentido de giro en la secuencia de energización necesaria de los embobinados.

### 2.13.2 Características comunes de los motores paso a paso:

Un motor paso a paso se define por estos parámetros básicos:

**Voltaje.** Los motores paso a paso tienen una tensión eléctrica de trabajo. Este valor viene impreso en su carcasa o por lo menos se especifica en su hoja de datos. Algunas veces puede ser necesario aplicar un voltaje superior para lograr que un determinado motor cumpla con el torque deseado, pero esto producirá un calentamiento excesivo y/o acortará la vida útil del motor.

**Resistencia eléctrica.** Otra característica de un motor paso a paso es la resistencia de los embobinados. Esta resistencia determinará la corriente que consumirá el motor y su valor afecta la curva de torque del motor y su velocidad máxima de operación.

**Grados por paso.** Generalmente, éste es el factor más importante al elegir un motor paso a paso para un uso determinado. Este factor define la cantidad de grados que rotará el eje para cada paso completo. Una operación de medio-paso o semi-paso (half step) del motor duplicará la cantidad de pasos por revolución al reducir la cantidad de grados por paso. Cuando el valor de grados por paso no está indicado en el motor, es posible contar a mano la cantidad de pasos por vuelta, haciendo girar el motor y sintiendo por el tacto cada "diente" magnético. Los grados por paso se calculan dividiendo 360 (una vuelta completa) por

la cantidad de pasos que se contaron. Las cantidades más comunes de grados por paso son:  $0,72^\circ$ ,  $1,8^\circ$ ,  $3,6^\circ$ ,  $7,5^\circ$ ,  $15^\circ$  y hasta  $90^\circ$ . A este valor de grados por paso usualmente se le llama la resolución del motor. En el caso de que un motor no indique los grados por paso en su carcasa, pero sí la cantidad de pasos por revolución, al dividir 360 por ese valor se obtiene la cantidad de grados por paso. Un motor de 200 pasos por vuelta, por ejemplo, tendrá una resolución de  $1,8^\circ$  por paso.

### **Tipos de motores paso a paso:**

Los motores paso a paso se dividen en dos categorías principales: de **imán permanente** y de **reluctancia variable**. También existe una combinación de ambos, a los que se les llama **híbridos**.

Los de **imán permanente** son los que más conocemos, utilizados, por ejemplo, en el avance de papel y del cabezal de impresión de las impresoras, en el movimiento del cabezal de las disketteras, etc. Como su nombre indica, poseen un imán que aporta el campo magnético para la operación.

Los motores del tipo de **reluctancia variable**, en cambio, poseen un rotor de hierro dulce que, en condiciones de excitación del estator, y bajo la acción de su campo magnético, ofrece menor resistencia a ser atravesado por su flujo en la posición de equilibrio. Su tecnología mecánica es similar a los de imán permanente y su principal inconveniente radica en que en condiciones de reposo (sin excitación) el rotor queda en libertad de girar y, por lo tanto, su posicionamiento de régimen de carga dependerá de su inercia y no será posible predecir el punto exacto de reposo. El tipo de motor de reluctancia variable consiste en un rotor y un estator cada uno con un número diferente de dientes. Ya que el rotor no dispone de un imán permanente, gira libremente si no tiene corriente alimentándolo, o sea que no tiene torque de detención.

Los motores **híbridos** combinan las mejores características de los de reluctancia variable y de imán permanente. Se construyen con estatores multidentados y un rotor de imán permanente. Los motores híbridos estándar tienen 200 dientes en el rotor y giran en pasos de  $1,8$  grados. Existen motores híbridos con configuraciones de  $0,9^\circ$  y  $3,6^\circ$ . Dado que poseen alto torque estático y dinámico y se mueven a muy altas velocidades de pulso, se los utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales.

### **2.13.3 Motores paso a paso de imán permanente:**

Los motores paso a paso de imán permanente se dividen a su vez en distintos tipos, diferenciados por el tipo de embobinado. Existen entonces motores paso a paso de imán permanente **unipolares** (también llamados "unifilares"), **bipolares** (también llamados "bifilares") y **multifase**. Cada uno de estos tipos requerirá un circuito de control diferente para ser operados. Algunos esquemas de diversos motores de este tipo se pueden ver en la Figura 46.

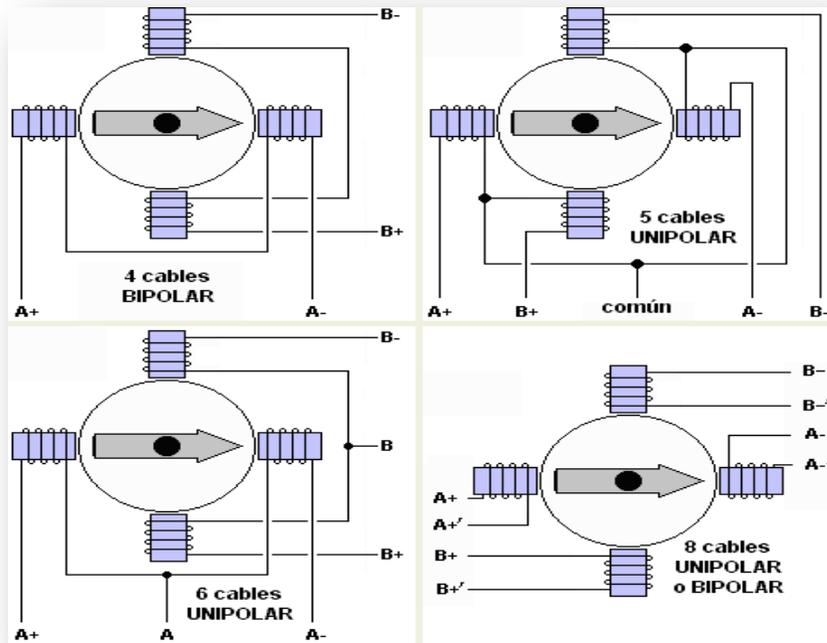


FIGURA 46. Diferentes tipos de cableado de las bobinas.

#### 2.13.4 Motores paso a paso unipolares:

Los motores unipolares son relativamente fáciles de controlar, gracias a que poseen devanados duplicados. Aunque para facilitar el esquema se dibuja este devanado como una bobina con punto medio, en realidad tienen **dos bobinas** en cada eje del estator, que están unidas por extremos opuestos, de tal modo que al ser alimentada una u otra, generan cada una un campo magnético inverso al de la otra.

Nunca se energizan juntas: por eso lo correcto es decir que **tienen una doble bobina**, en lugar de decir (como se hace habitualmente) que es **una bobina con punto medio**. Esta duplicación se hace para facilitar el diseño del circuito de manejo, ya que permite el uso, en la parte de potencia, de un transistor único por cada uno de los bobinados.

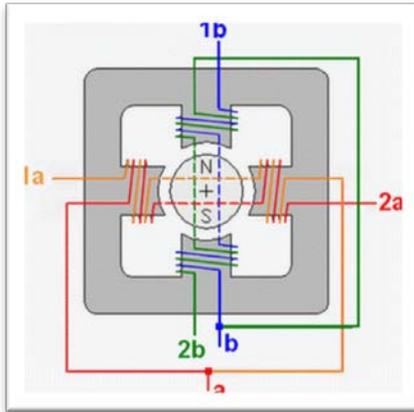


FIGURA 47. Distribución del bobinado de un motor unipolar.

En el esquema más común de conexión se unen los "puntos medios" de ambos ejes (a y b en el dibujo) y se les conecta al positivo de la alimentación del motor. El circuito de control de potencia, entonces, se limita a poner a tierra los bobinados de manera secuencial. Lo anterior se puede ver en la Figura 47.

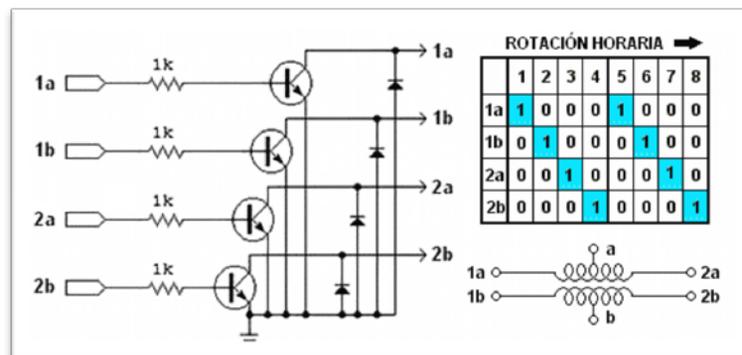


FIGURA 48. Circuito y secuencia para controlar un motor unipolar.

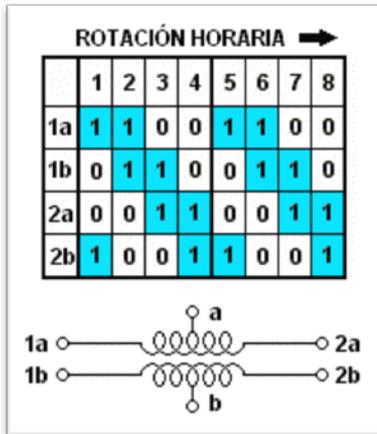


FIGURA 49 . Secuencia para lograr más fuerza.

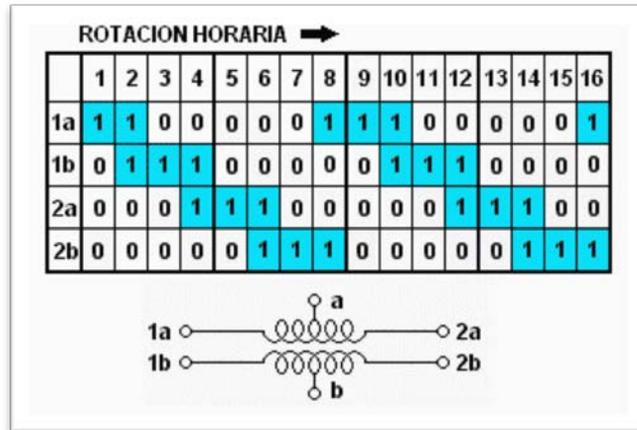


FIGURA 50. Secuencia para lograr medio-paso.

La secuencia de pulsos de un motor unipolar se puede generar con un contador binario de dos bits y un decodificador, como por ejemplo el integrado CD 4017. La parte de potencia puede ser implementada con un único transistor en cada bobinado. En las Figuras 48,49 y 50 se pueden ver las secuencias de alimentación para los motores paso a paso, y en la Figura 51 un circuito de control para la misma clase de motores.

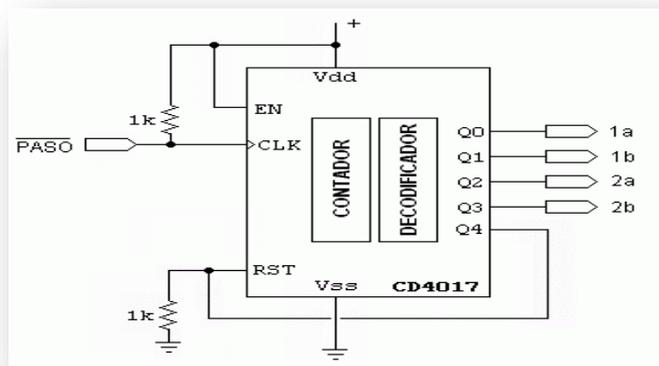
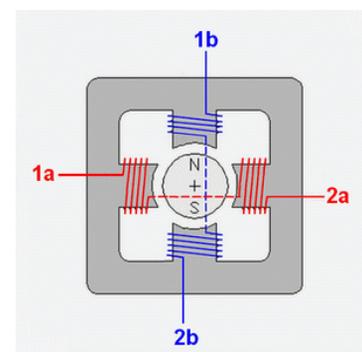


FIGURA 51. Control de avance con un único integrado CD 4017.

### 2.13.5 Motores paso a paso bipolares

Los motores bipolares requieren circuitos de control y de potencia más complejos. Pero en la actualidad esto no es problema, ya que estos



circuitos se suelen implementar en un circuito integrado, que soluciona esta complejidad en un solo componente. En algunos casos se deben agregar algunos componentes de potencia, como transistores y diodos para las contracorrientes, aunque esto no es necesario en motores pequeños y medianos.

Como no tienen el doble bobinado de los unipolares (recordemos que en éstos todo el tiempo se está utilizando sólo una de las bobinas duplicadas, mientras la otra queda desactivada y sin ninguna utilidad), los motores bipolares ofrecen una mejor relación entre torque y tamaño/peso. La Figura 52 muestra un esquema interno de lo que podría ser un motor bipolar.

FIGURA 52. Distribución del bobinado de un motor bipolar.

La configuración de los motores bipolares requiere que las bobinas reciban corriente en uno y otro sentido, y no solamente un encendido-apagado como en los unipolares. Esto hace necesario el uso de un Puente H (un circuito compuesto por al menos seis transistores) sobre cada uno de los bobinados. La Figura 53 muestra la secuencia de pulsos para alimentar un motor bipolar.

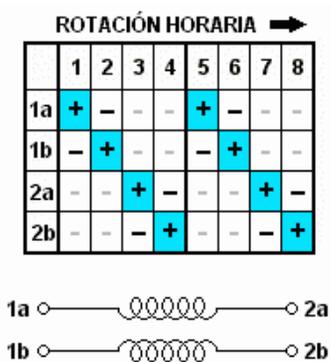
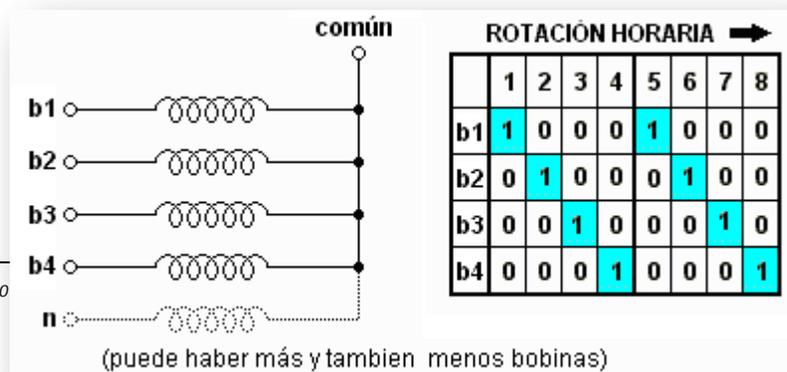


FIGURA 53. Secuencia de pulsos para un motor bipolar.

### 2.13.6 Motores paso a paso de reluctancia variable:

Los motores de reluctancia variable son los motores paso a paso más simples de manejar. Su secuencia se limita a activar cada bobinado en orden, como lo indica la Figura 53. Es común que estos motores tengan un cable común que une todas las bobinas. Estos motores, si se los mueven a mano, no tienen la sensación "dentada" de los otros motores paso a paso, sino que se mueven libres, como los motores de corriente continua. La Figura 54 muestra el esquema para el manejo de un motor de reluctancia variable<sup>25</sup>.



<sup>25</sup> Eduardo J. Carletti, *Motores paso*

FIGURA 54. Circuito de manejo para un motor de reluctancia variable.

### 2.13.7. Control de los motores de Paso a Paso, por medio de secuencias.

Existen tres formas para el control del movimiento de este tipo de motores, según las secuencias de encendido de las bobinas, y son las siguientes:

**Paso simple:** Esta secuencia de pasos es la más simple de todas y consiste en activar cada bobina una a una y por separado. Con esta secuencia de encendido de bobinas no se obtiene mucha fuerza ya que solo es una bobina cada vez la que arrastra y sujeta el rotor del eje del motor. Esta secuencia se puede observar en la Figura 55.

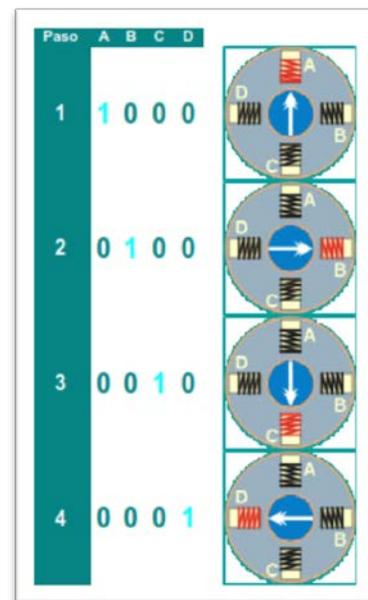
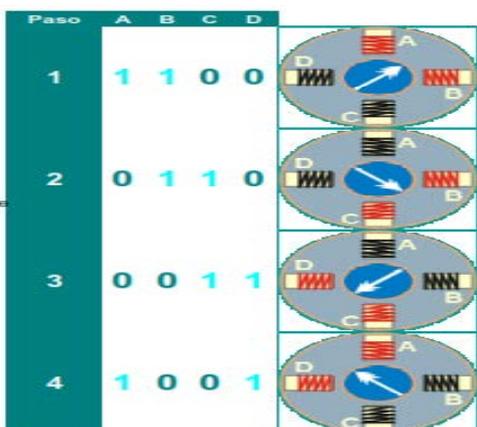


FIGURA 55. Paso simple.



**Paso doble:** Con el paso doble activamos las bobinas de dos en dos con lo que hacemos un campo magnético más potente que atraerá con más fuerza y retendrá el rotor del motor en el sitio.

Los pasos también serán algo más bruscos debidos a que la acción del campo magnético es más poderosa que en la secuencia anterior. Lo anterior se puede observar en la Figura 56.

FIGURA 56. Paso Doble.

**Medio Paso:** Combinando los dos tipos de secuencias anteriores podemos hacer moverse al motor en pasos más pequeños y precisos y, así pues, tener el doble de pasos de movimiento para el recorrido total de 360° del motor. Lo anterior se puede observar en la Figura 57.

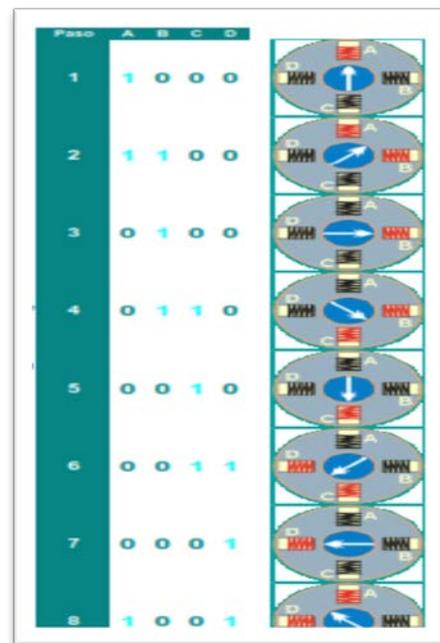
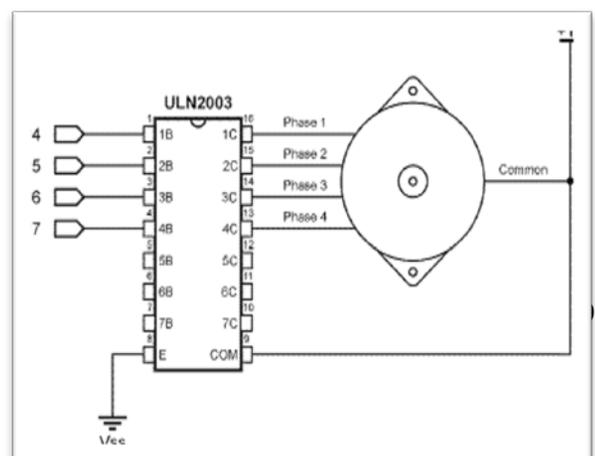


FIGURA 57. Medio Paso.

### 2.13.8 Control de un Motor Pasos a Paso Unipolar.

Para controlar un motor paso a paso unipolar, se debe alimentar el común del motor con Vcc y conmutar a tierra los cables del devanado correspondiente, con lo que se hace pasar la corriente por la bobina del motor adecuada y ésta generará un campo electromagnético que atraerá el polo magnetizado del rotor y el eje del mismo girará. Para hacer esto se pueden usar transistores montados en



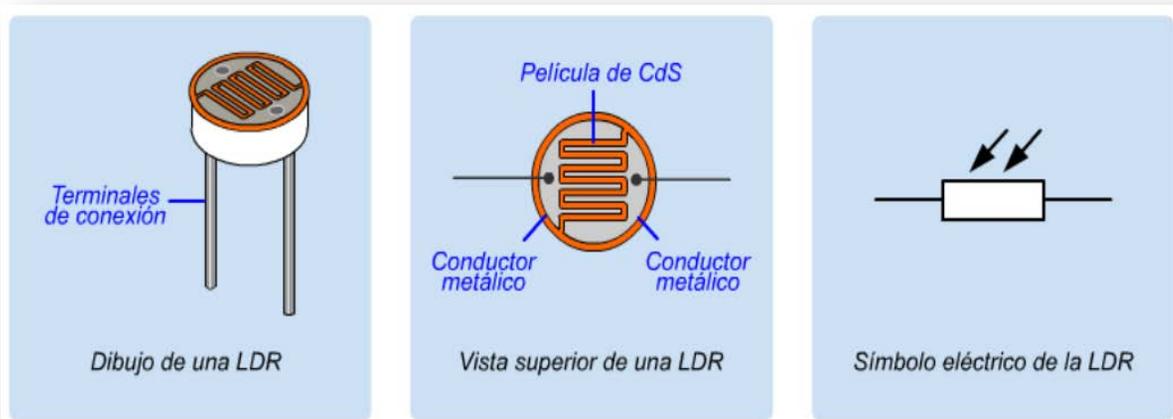
configuración Darlington o usar un circuito integrado como el ULN2003 que ya los lleva integrados en su interior, aunque la corriente que aguanta este integrado es baja y si se quiere controlar motores más potentes deberemos montar nosotros mismos el circuito de control a base de transistores de potencia. La Figura 58 muestra el diagrama de uso del circuito de control ULN2003 para un motor unipolar.

FIGURA 58. Esquema de conexión del CI ULN2003 para el control de un motor paso a paso unipolar.

Las entradas del circuito son TTL y se activan a nivel alto, pero también disponen de resistencias de polarización internas con lo que no debe uno preocuparse de esto y puede dejar "al aire" las entradas no utilizadas. Las salidas son en colector abierto<sup>26</sup>.

#### 2.14 Fotorresistencias o resistores dependientes de luz (LDR light-dependent resistor)

La fotorresistencia, como su nombre lo indica, es un elemento que basa su funcionamiento en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir energía luminosa sobre él. Específicamente, son resistencias cuyo valor de resistividad disminuye a medida que aumenta la energía luminosa incidente sobre ella y viceversa. Es por ello por lo que también se le llama resistor dependiente de luz (light dependent resistor), fotoconductor o célula fotoconductora (cds). La Figura 59 muestra tres imágenes



<sup>26</sup> [Takashi Kenjo](#). *Stepping motors and their microprocessor controls*. Oxford Science Publications

relacionadas con la fotorresistencia.

FIGURA 59. Dibujo, vista superior y símbolo de una fotorresistencia (LDR).

La conductividad eléctrica de un material depende del número de portadores en la banda de conducción. En un semiconductor, a baja temperatura, la mayor parte de los electrones están en la banda de valencia y se comporta casi como un aislante; sin embargo, al aumentar la temperatura, y con ella la agitación de los electrones, dado que las bandas de valencia y de conducción están próximas, (a diferencia de lo que sucede en un aislante), cada vez hay más electrones que saltan de la banda de valencia a la de conducción, aumentando así la conductividad

La energía necesaria para producir el salto puede venir de otras fuentes externas además del calor, como puede ser una radiación luminosa. En este caso, su energía "E", y frecuencia, "f", están relacionadas mediante la ecuación 7:

$$E = h \cdot f \quad \dots\dots\dots (7)$$

Donde  $h = 6.62606957(29) \times 10^{-34} \text{ J s}$ , es la constante de Planck. Entonces, si la radiación tiene energía suficiente para permitir el salto de los electrones de una a otra banda, pero sin exceder el umbral necesario para que se desprendan del material, se tendrá efecto fotoeléctrico interno o fotoconductor, y a mayor iluminación mayor será la conductividad. Si se excediera dicho umbral, se tendrá un efecto fotoeléctrico externo.

La relación entre la energía de los fotones y la longitud de onda de la radiación  $\lambda$ , está dada por la ecuación 8:

$$\lambda = \frac{c \cdot h}{E} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Donde "c" es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Si "E" se expresa en electrón-volt ( $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ), la ecuación 8 se podría re expresar como lo muestra la ecuación 9.

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E(ev)} \dots\dots\dots (9)$$

La relación entre la resistencia R de un fotoconductor y la iluminación, "E" (densidad superficial de energía recibida expresada en lux), es fuertemente no lineal. Un modelo simple está expresado en la ecuación 10:

$$R = AE^{-\alpha} \dots\dots\dots 10)$$

Donde A y  $\alpha$  dependen del material y las condiciones de fabricación. Para el CdS, por ejemplo,  $0.7 < \alpha < 0.9$ . En la Figura 60 se presenta gráficamente esta relación para un modelo concreto de CdS. Puede observarse, además de la no linealidad, que la resistencia en presencia de luz es mucho menor y la resistencia en la oscuridad es del orden de  $10^4$ .

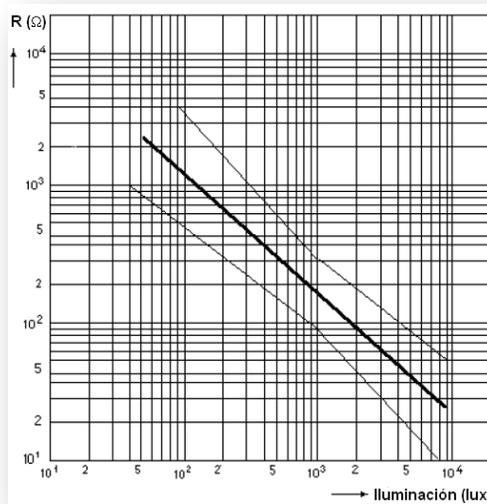


FIGURA 60. Relación resistencia-iluminación para un LDR.

Los materiales comúnmente utilizados en su construcción son Sulfuro de Cadmio, elemento sensible a las radiaciones visibles, y el sulfuro de plomo que se emplea en las LDR que trabajan en el margen de las

radiaciones infrarrojas. Estos materiales se colocan en encapsulados de vidrio o resina. La Figura 61 muestra el proceso de generación de portadores al iluminar la LDR [27,28].

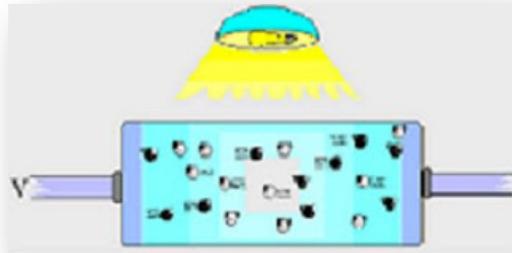


FIGURA 61. Foto generación de Portadores.

Si dejamos de iluminar, los portadores fotogenerados se recombinarán hasta volver hasta a sus valores iniciales, como lo muestra la Figura 62. Por lo tanto, el número de portadores disminuirá y el valor de la resistencia será mayor. Por supuesto, el material de la fotorresistencia responderá a unas longitudes de onda determinadas.

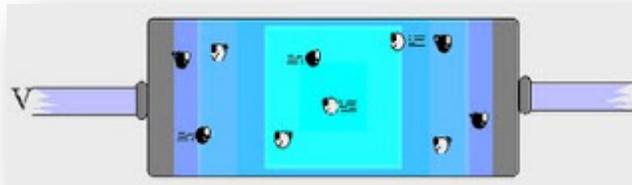


FIGURA 62. Disminución de portadores al dejar de iluminar la LDR.

---

27 [Ibrahim, Dogan](#). *Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F series*/Dogan Ibrahim. British Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN: 978-0-7506-8611-2

28 [Glenis Moreno y Fernando Martínez](#). Mediciones industriales. Disponible en web: [http://martinezmorenomedicionesind.blogspot.mx/2007/06/fotorresistencia-ldr\\_16.html](http://martinezmorenomedicionesind.blogspot.mx/2007/06/fotorresistencia-ldr_16.html).

### Capítulo III. Diseño y simulación del seguidor solar de dos ejes utilizando programas de computación del área electrónica.

#### 3. Diseño y Simulación.

El diseño y la simulación de circuitos y sistemas electrónicos, mediante el uso de programas de computación del área electrónica, son etapas necesarias e indispensables, que brindan enormes ventajas en cuanto a la calidad del diseño y en cuanto a el abatimiento de costos, en lo que se refiere a la construcción real del sistema electrónico.

En el capítulo anterior se presentó, la arquitectura básica del PIC18F4550 y el manejo del compilador MikroC PRO for PIC, con el cual se desarrolló el programa que controla dicho microcontrolador. En el presente capítulo se mostrará el diagrama eléctrico del seguidor solar de dos ejes que se diseñó en esta tesis, se brindará una explicación del programa que controla el microcontrolador del seguidor mediante un diagrama de flujo, se abordarán las características básicas del programa de simulación electrónica Proteus y se describirá el modelo de el programador PicKit2 que sirve como medio para programar los PICS. Se mostrará el programador físico que se usó para programar el PIC18F4550 de esta tesis y por último se mostrará un diagrama de bloques del seguidor solar.

El programa PROTEUS VSM, de ©Labcenter Electronics, es una herramienta para la verificación vía software que permite comprobar, prácticamente en cualquier diseño, la eficacia del programa desarrollado. Su combinación de simulación de código de programación y simulación mixta SPICE,

permite verificaciones analógico-digitales de sistemas basados en microcontroladores. Su potencia de trabajo es magnífica.

El programa PROTEUS es una aplicación que se compone de tres módulos básicos.

**ISIS**(" *Intelligent Schematic Input System* ") que es el módulo de captura de esquemas.

**VSM**(" *Virtual System Modelling* ") es el módulo de simulación, incluyendo PROSPICE.

**ARES**(" *Advanced Routing Modelling* ") es el módulo para realización de circuitos impresos (PCB).

El modulo ISIS permite la simulación de las familias de los PICMicro más populares tales como las 12F, 16F y 18F. Permite también simular una gran variedad de dispositivos digitales y analógicos, entre ellos displays de siete segmentos, de caracteres y gráficos. ISIS puede simular sensores de temperatura, humedad, presión y luminosidad, entre otros. El simulador permite incluir actuadores como: motores dc, servo motor, motores a pasos y luces incandescentes entre otros. Es posible simular periféricos de entrada y salida como teclados, y puertos físicos del ordenador como RS232, y USB. Este simulador cuenta con una amplia variedad de instrumentos de medición como voltímetros, amperímetros, osciloscopios, y analizadores de señal. En conclusión, éstas y otras características hacen del ISIS de Proteus, una herramienta ideal para el diseño y estudio de los PICMicro.

El módulo ISIS permite dibujar, sobre un área de trabajo, el circuito que posteriormente podremos simular. En la Figura 63 podemos ver el área de trabajo que nos presenta ISIS.

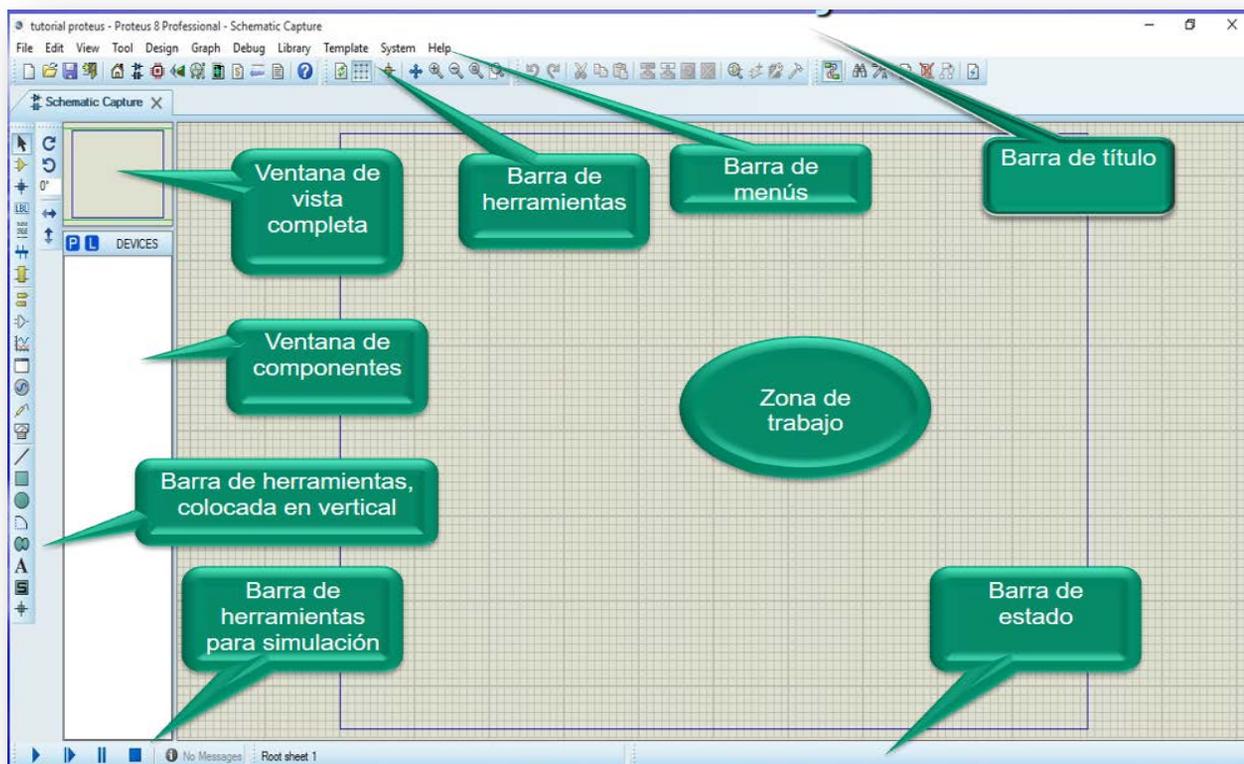
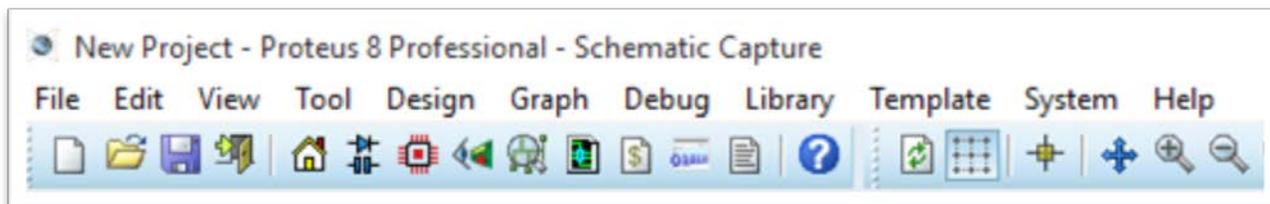


FIGURA 63. Área o Zona de trabajo del módulo ISIS.

### 3.1 Barra de título.

Situada en la parte superior de la pantalla, en ella se muestra el icono del programa, el nombre del fichero abierto, la versión del programa que se está usando y en ocasiones, mensajes de que el programa ha entrado en un modo particular de funcionamiento (por ejemplo, *Animating*, cuando se simula). La barra de



título se muestra en la Figura 64.

FIGURA 64. Barra de título.

### 3.2 Menús de archivos.

Permite el acceso a la mayor parte de las opciones del programa; sin embargo, algunas sólo están disponibles en los iconos de las barras de herramientas. En la Figura 65 se puede apreciar lo explicado anteriormente.

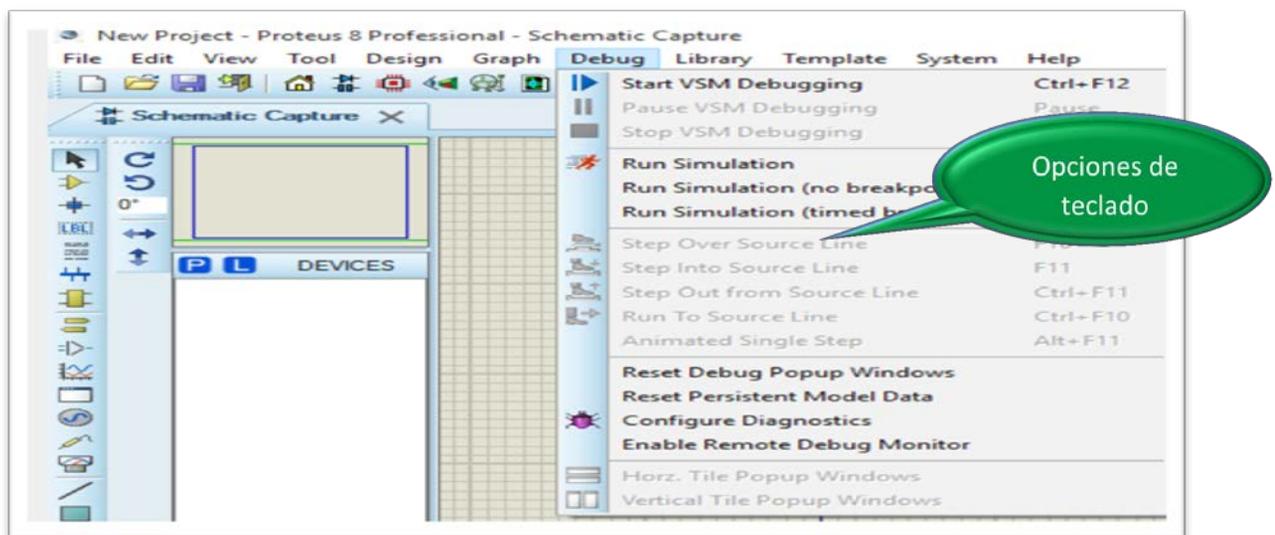


FIGURA 65. Menús de archivos.

### 3.3 Herramientas.

Son muchas y se les puede posicionar en casi cualquier parte del área de trabajo del programa. En la Figura 66 se presentan dichas herramientas.

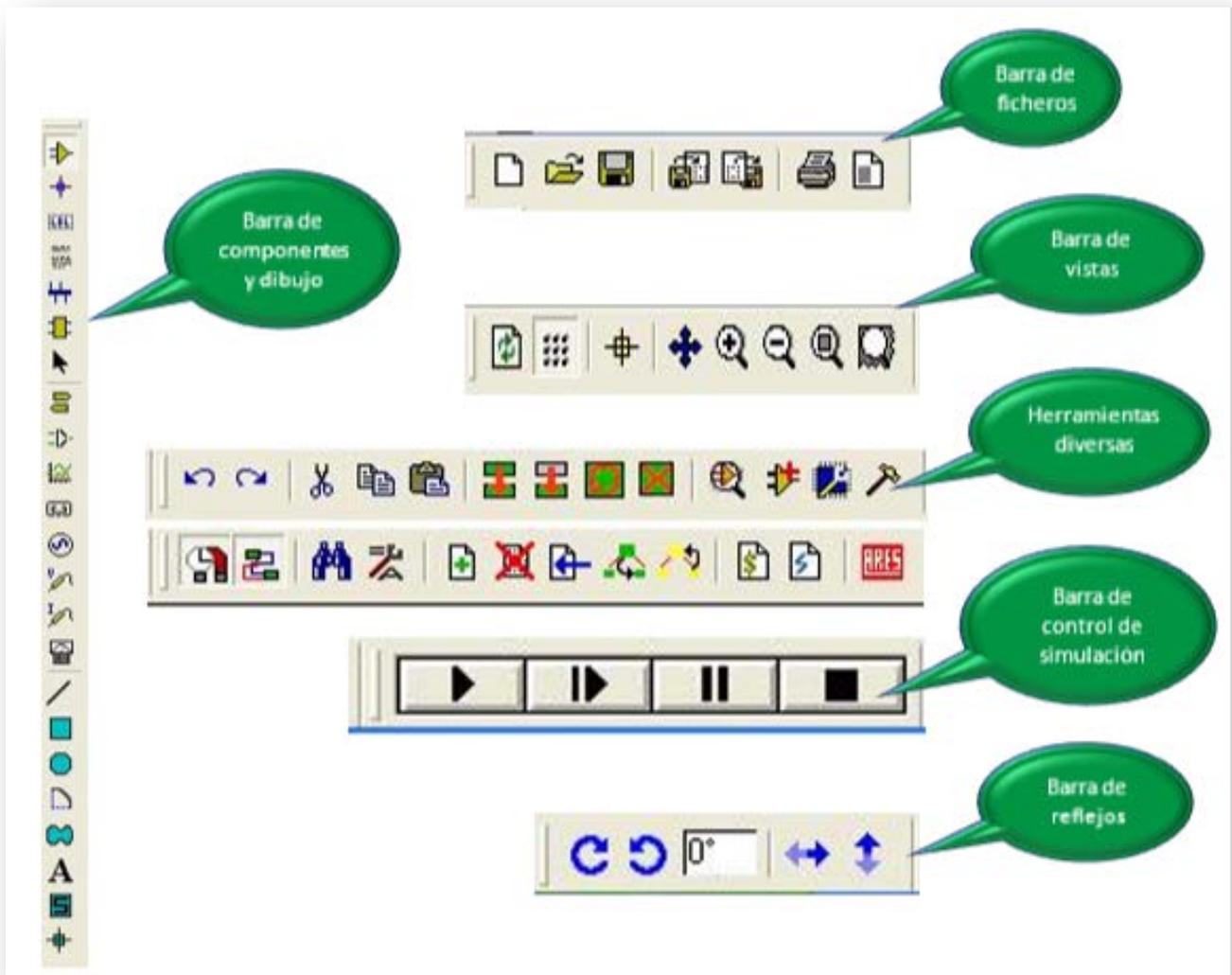


FIGURA 66. Herramientas múltiples de proteus.

Antes de construir el diagrama eléctrico del proyecto, conviene fijar la resolución de la pantalla, siendo uno de los valores recomendados 1024 x 768 pixeles. Resoluciones menores hacen que algunas ventanas no se vean ampliamente.

Una vez de creado un archivo nuevo en PROTEUS, lo primero que necesitamos es extraer los componentes que se van a utilizar en el circuito, para lo que cual debemos utilizar la barra de herramientas de componentes. Esto se ilustra en la Figura 67.

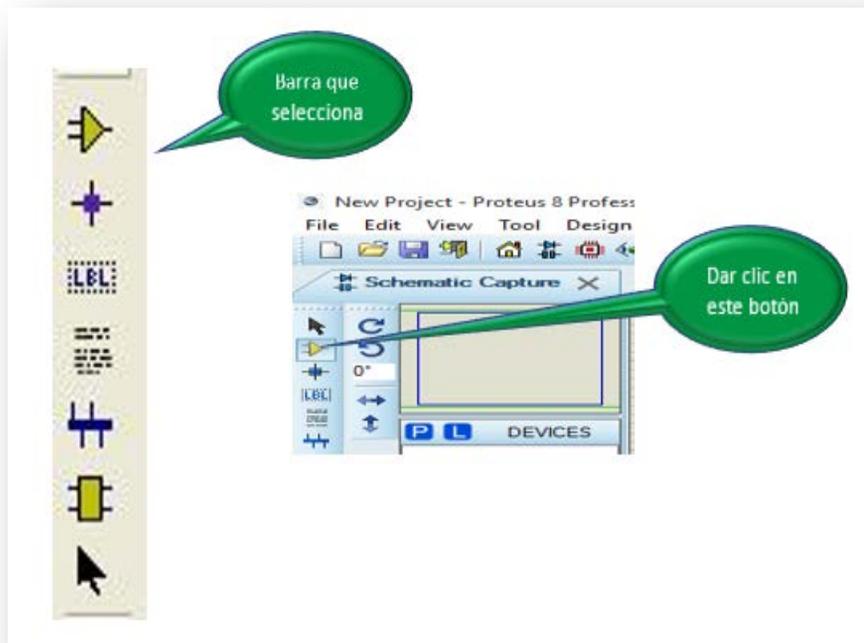


FIGURA 67. Selección de componentes.

### 3.4 Librerías de dispositivos contenidos en el programa proteus.

Para acceder a las librerías de dispositivos hay que *pulsar P*. (También pinchando en el botón P de la ventana de dispositivos). Esto se puede apreciar en la Figura 68.

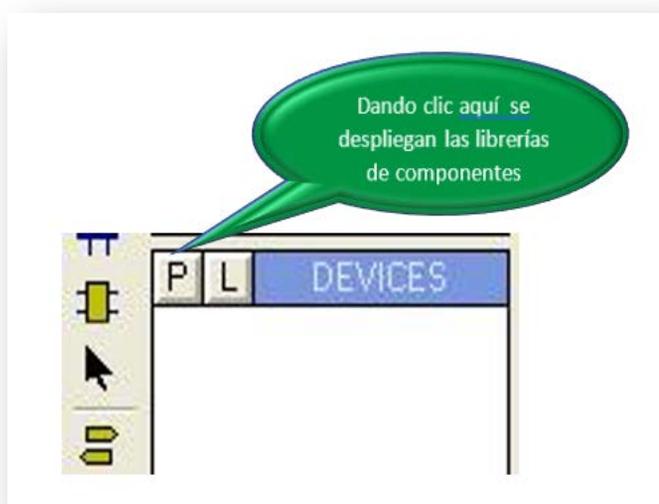


FIGURA 68. Selección de componentes.

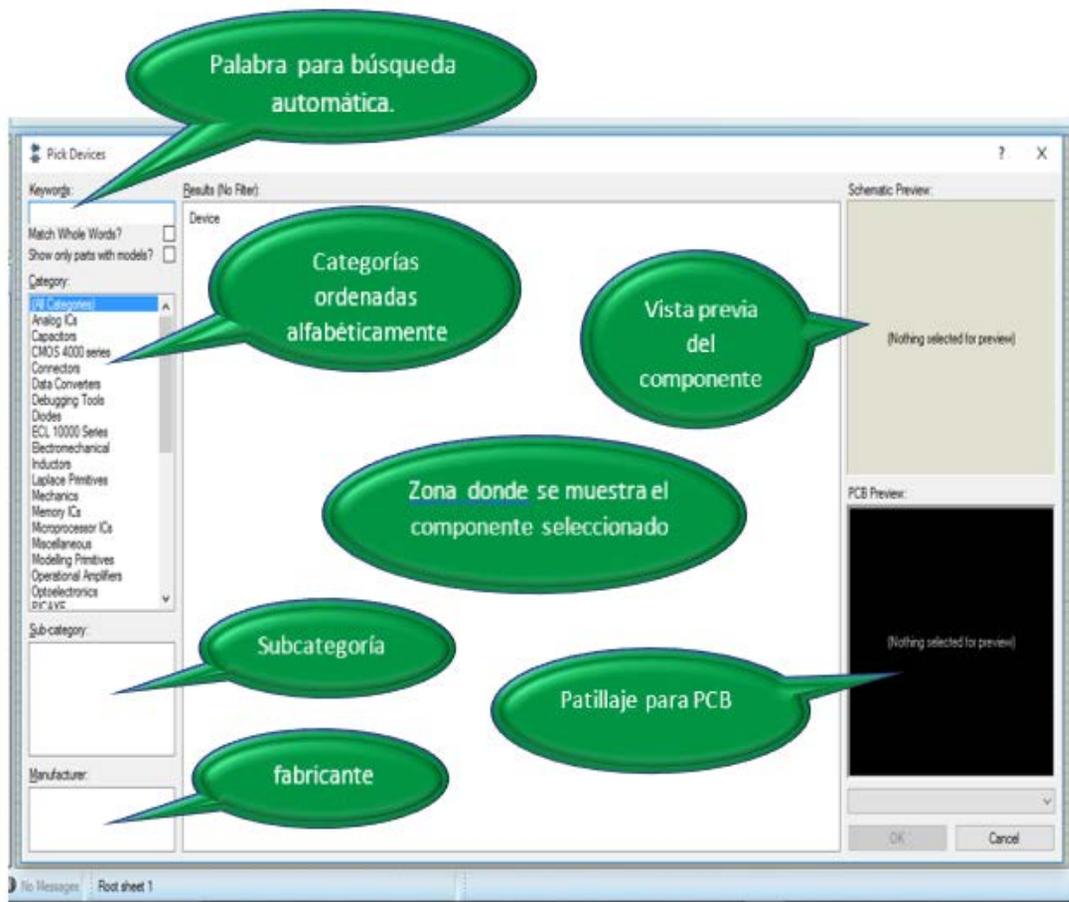


FIGURA 69. Despliegue de las librerías de dispositivos de isis proteus.

Para seleccionar un resistor genérico, en la ventana para búsqueda automática escribimos la palabra **resistor** y como resultado aparece a la derecha el diagrama eléctrico del componente, en este caso el resistor. Además, en la zona inferior derecha aparece el patillaje del mismo componente. Esto se ilustra en

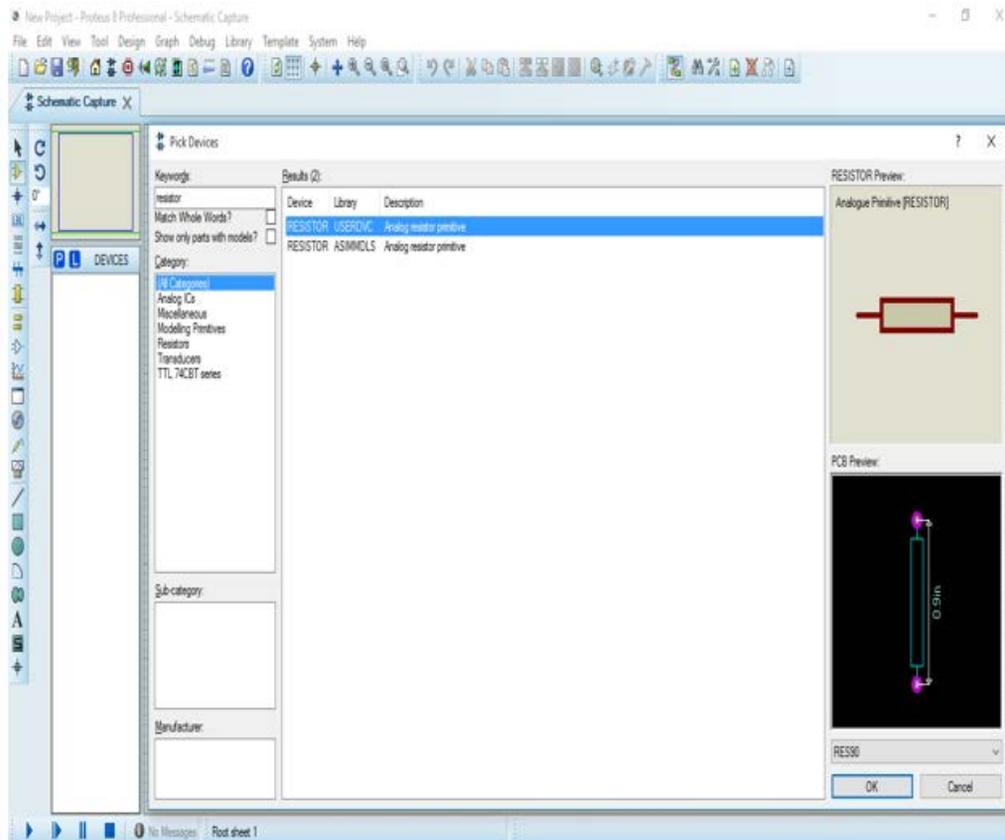
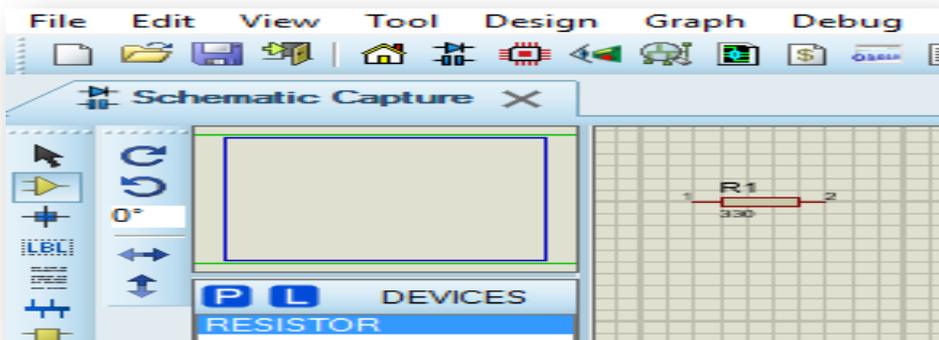


Figura 70.

**FIGURA 70.** Elección de componente o dispositivo deseado.

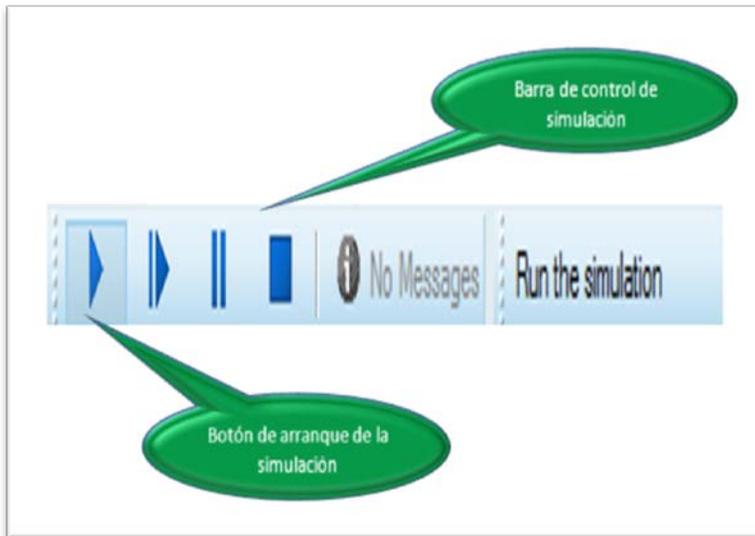
Si damos en ok, se colocará el componente seleccionado, es decir, para este caso, el resistor, aparece en la zona de trabajo como se muestra en la Figura 71



**FIGURA 71.** Selección de resistor.

De manera similar a como se seleccionó el resistor, se seleccionan todos los elementos que se necesitan en los diversos proyectos a diseñar. Después de seleccionar todos los componentes necesarios para el diseño de un proyecto en proteus isis, se procede a unir todos estos elementos mediante pistas o buses virtuales, con el fin de intercomunicar los mismo.

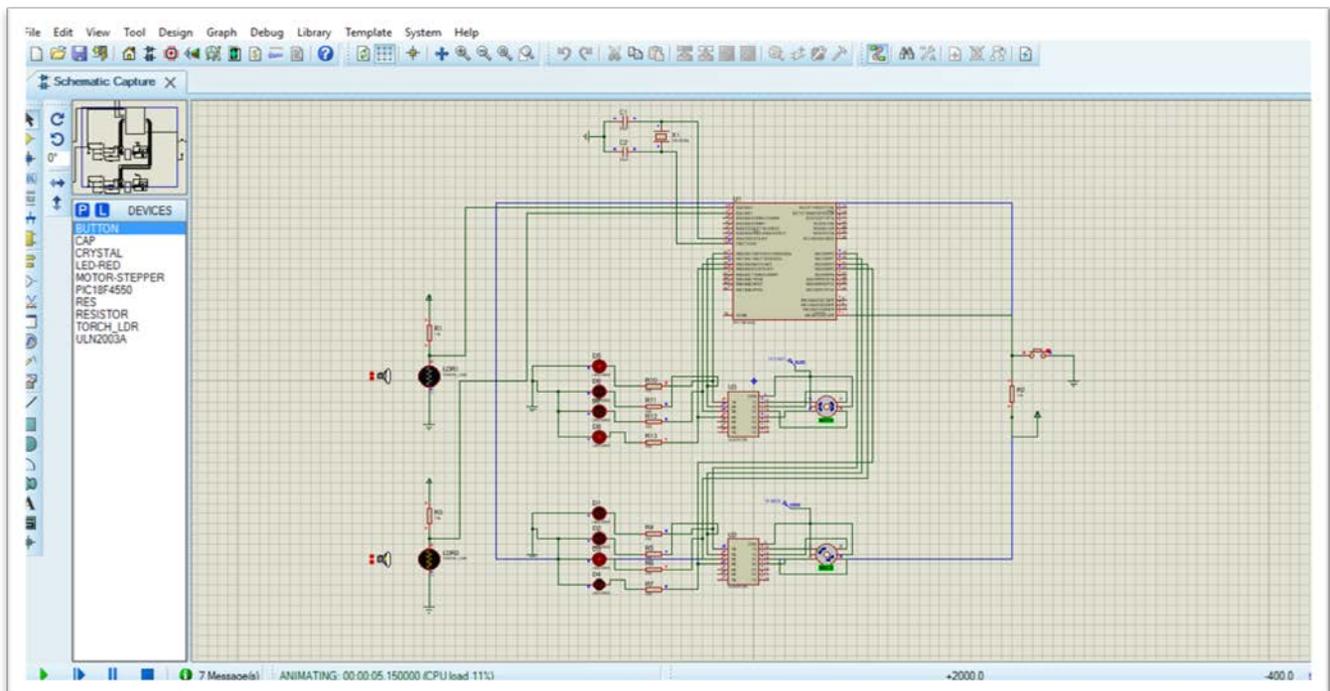
Es importante mencionar, que se necesita energizar los elementos del proyecto, para lo que cual se adicionan fuentes de voltaje o corriente que proporciona el mismo programa. Estas fuentes se ajustan con el valor de voltaje o corriente que convenga. Una vez efectuado lo anterior se procede a la simulación del proyecto con la finalidad de observar su comportamiento.



Para arrancar la simulación es necesario dar clic en el botón de arranque de simulación, que se encuentra en la barra de control de simulación posicionada en la esquina inferior izquierda de la zona de trabajo de isis proteus. Esto lo ilustra la Figura 72.

FIGURA 72. Botón de arranque de simulación.

A continuación, en la Figura 73, se muestra el diagrama eléctrico del seguidor solar de dos ejes diseñado



en la presente tesis y su correspondiente simulación en proteus.

FIGURA 73. Seguidor solar de dos ejes microcontrolado y su simulación.

Se puede apreciar en la Figura 73 como se ven prendidos algunos leds rojos que indican la secuencia de movimiento actual del seguidor solar, una vez que se corre la simulación del proyecto. Dicho seguidor se compone del microcontrolador PIC18F4550, mostrado en la Figura 74.

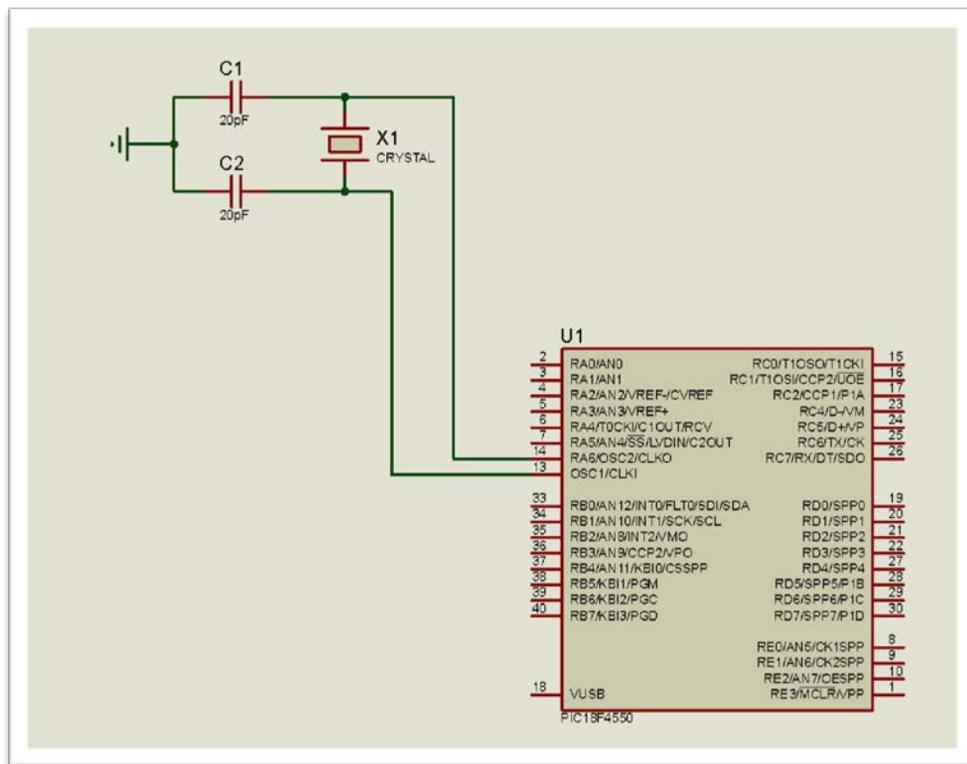


FIGURA 74. Microcontrolador PIC18F4550.

Dos motores paso a paso, cada uno controlando un eje del seguidor solar. Estos se muestran en las Figuras

75 y



FIGURA 75. Motor 1.



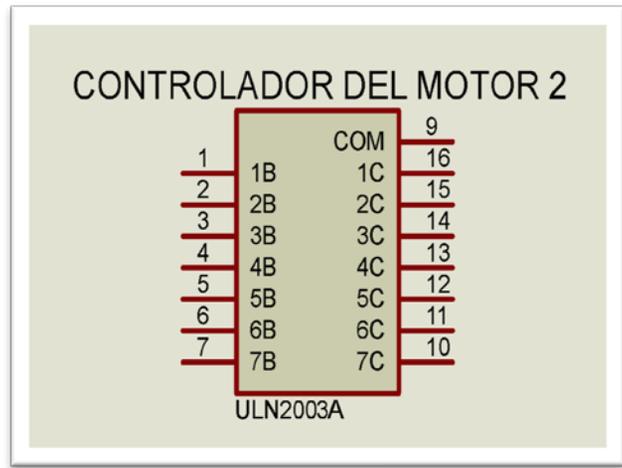
76.

FIGURA 76. Motor 2.

Dos controladores ULN2003A, para los dos motores paso a paso, los cuales se muestran en las Figuras



FIGURA 77. Controlador 1



77 y 78.

FIGURA 78. Controlador 2.

Dos fotorresistencias que son los sensores de control del seguidor solar, mostradas en las Figuras 79 y 80.

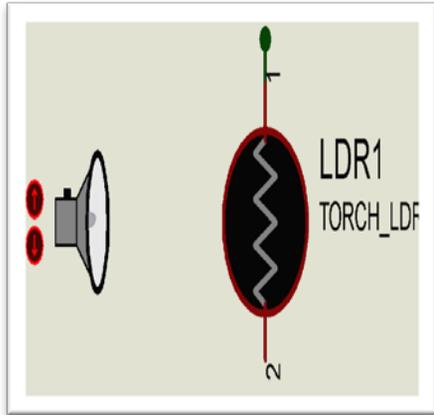


FIGURA 79. Fotorresistencia 1.

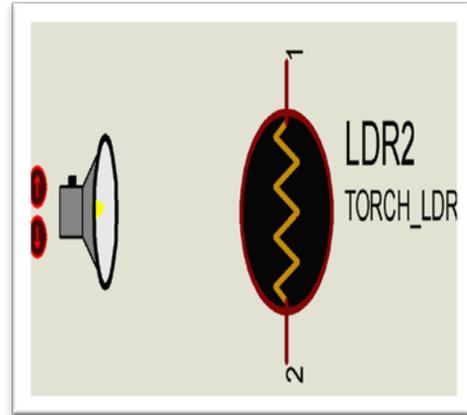


FIGURA 80. Fotorresistencia 2.

Contiene 8 leds ultra brillantes con sus resistores, que en arreglos de cuatro leds muestran visualmente la secuencia actual de movimiento de los motores 1 y 2. Lo anterior se muestra en las Figuras 81 y 82.

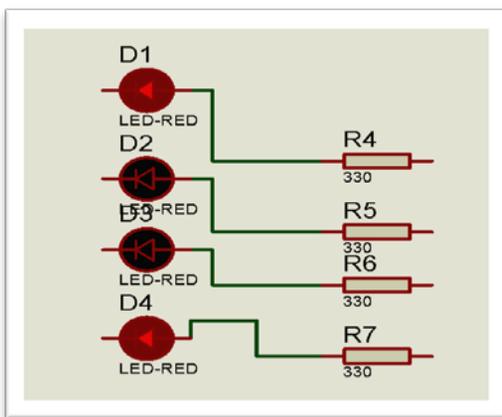


FIGURA 81. Arreglo de Leds

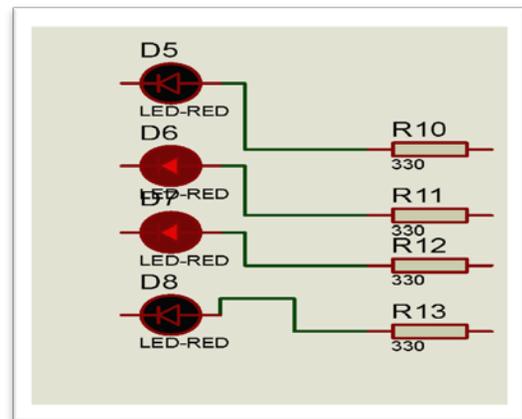


FIGURA 82. Continuidad de arreglo de Led

Además de lo anterior, tiene un soporte para la celda solar y cables para las diferentes conexiones.

3.5 Se mencionarán ahora los elementos básicos del programador pickit 2.

El programador PicKit2 es una herramienta de programación, para desarrollo de bajo costo, capaz de programar la mayoría de los microcontroladores y memorias seriales EEPROM de Microchip.

El soporte para nuevos dispositivos puede ser añadido actualizando el software de programación. La última versión del software está disponible en la página de Microchip para el PicKit2: [www.microchip.com/pickit2](http://www.microchip.com/pickit2). La unidad del PicKit2 se muestra en la Figura 83.



FIGURA 83. Programador picKit2.

### Conexión del puerto USB:

El puerto de conexión USB es un conector del tipo mini-B el cual permite comunicar al PicKit2 con la PC usando el cable suministrado.

### LEDs de estado:

Los leds de estado indican el estado del PicKit2.

- 1 - Power (Verde) - La alimentación es aplicada al PicKit2 vía USB.
- 2 - Target (Amarillo) - El PicKit2 está alimentando un dispositivo.
- 3 - Busy (Rojo) - El PicKit2 está ocupado con una función en progreso, tal como la programación.

**Pulsador:** El pulsador puede ser usado para iniciar la programación de un dispositivo cuando la función *Programmer>Write on PICKIT Button* es seleccionada del menú del programa de aplicación del PicKit2

(Ver figura 84). El botón también puede ser utilizado para poner al sistema operativo del Pickit2 en modo gestor de arranque

**Conector de programación:** El conector de programación es de 6 pines con un espacio entre pines de .1" o .25mm que se conecta al dispositivo a programar. Ver las especificaciones de los pines de salida en la Figura 84.

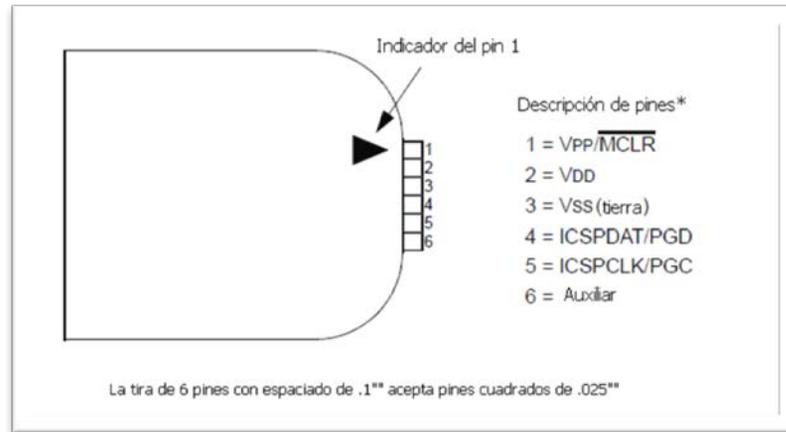


FIGURA 84. Pines de salida del programador Pickit2.

### 3.6 Aplicación de programación:

La aplicación de programación permite programar todos los dispositivos soportados en el archivo léeme del PicKit2. La interface de programación aparece como se muestra en la Figura 85. Los controles se describen

en las líneas siguientes.

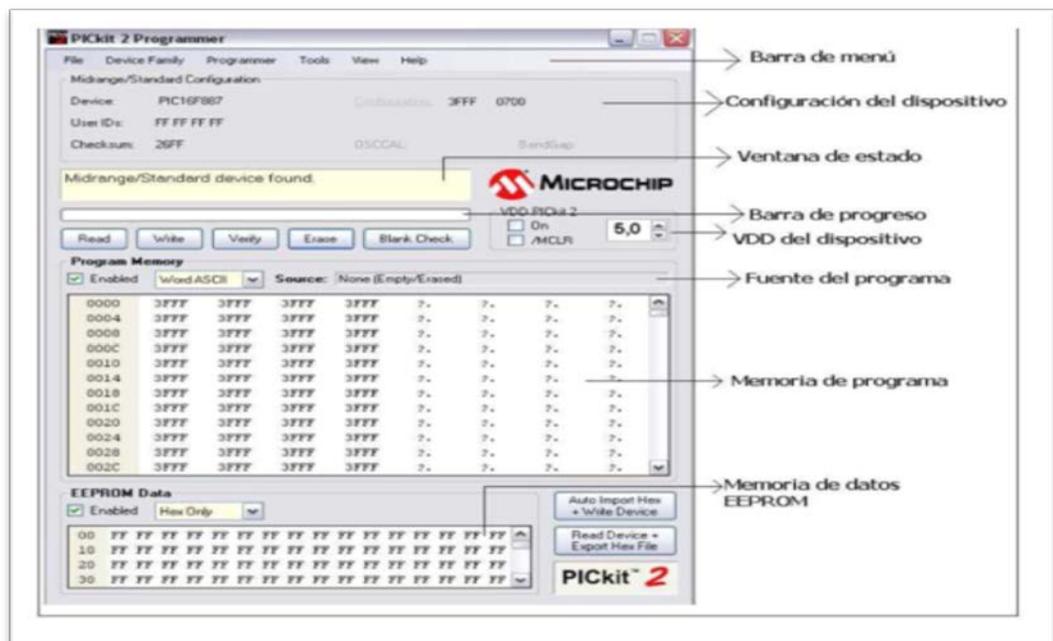


FIGURA 85. Interface de Programación.

### Barra de menú:

En la barra de menú seleccionamos varias de las funciones de la aplicación de programación del PicKit2.

Un sumario de esas funciones es:

### Archivo (File)

**Importar HEX – (Import HEX):** Importa un archivo HEX para programar. El formato de archivo HEX, INHX32 está soportado.

**Exportar HEX – (Export HEX):** Exporta un archivo HEX leído desde el dispositivo. El archivo HEX es creado en el formato INHX32.

**Historial de archivo – (File History):** Los últimos 4 archivos HEX abiertos son mostrados con la dirección de donde se encuentran. Estos archivos recién abiertos son seleccionados para una rápida importación. Note que el historial de archivo se va a iniciar en blanco en una nueva instalación hasta que un archivo HEX sea importado.

**Exit:** Sale del programa.

### 3.7 Comandos básicos del programador Pickit2:

**Leer dispositivo (*Read device*):** Lee la memoria de programa, la memoria eeprom de datos, las locaciones ID y los bits de configuración.

**Programar dispositivo (*Write device*):** Escribe la memoria de programa, la memoria eeprom de datos, las locaciones ID y los bits de configuración.

**Verificar (*Verify*):** Verifica los datos en la memoria de programa, la memoria eeprom de datos, locaciones ID y los bits de configuración leídos desde el MCU comparándolos con los códigos guardados en el programa de aplicación.

**Borrar (*Erase*):** Realiza un borrado general del microcontrolador seleccionado.

**Verificador de estado en blanco (*Blank check*):** Realizamos un chequeo para ver si la memoria de programa, la memoria eeprom, los bits de configuración y las locaciones de ID están en blanco.

**Verificación en la escritura (*Verify on write*):** Si seleccionamos esta opción, el dispositivo es verificado después de que es programado. En cambio, si no seleccionamos la opción, el dispositivo es programado, pero no se verifica después de la programación.

**Mantener el dispositivo en reset (*Hold device in reset*):** Cuando seleccionamos esta opción, el PIN /MCLR es mantenido a nivel bajo. Cuando no seleccionamos esta opción, el pin es liberado (modo tri – estado), permitiendo que una resistencia externa de pull – up saque el dispositivo del estado de reset.

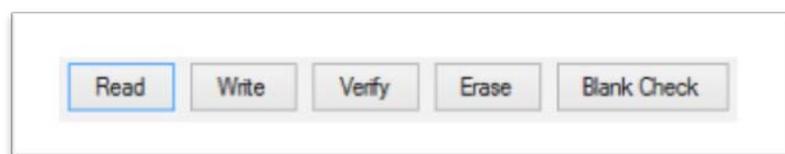
**Escribir (opción) – Botón del Pickit2 (*Write on – Pickit2 button*):** Cuando esta opción es seleccionada, una operación de escritura deberá ser iniciada presionando el botón del pickit2.

### 3.8 Herramientas:

**Habilitar protección de código (*Enable code Protect*):** Habilita las características de protección de código del microcontrolador en futuras operaciones de escritura.

**Grabación del dispositivo.** Una vez insertado el PIC en el zocalo ZIF, seleccionados la familia y el modelo del mismo e importado el fichero HEX, se procede a grabarlo. Las tareas básicas están disponibles

la Figura



en los botones de 86:

FIGURA 86. Comandos de grabación del dispositivo

**Read:** Permite leer la memoria del PIC y el contenido lo copia sobre los buffers de memoria del software PICKit-2.

**Write:** Lee el contenido de los buffers de memoria del software PICKit-2 y lo graba sobre la memoria física del PIC.

**Verify:** Verifica que el contenido de los buffers sea el mismo que el contenido del PIC.

Para la presente tesis se utilizó un programador para pics compatible con las herramientas del software PicKit2, así como también una tarjeta de desarrollo con múltiples circuitos que en coordinación con el pic programado, controlan diversos elementos electrónicos y de robótica, como son motores, comunicación con otros microcontroladores, etc. La figura 87 muestra el programador y la tarjeta de desarrollo antes mencionados.

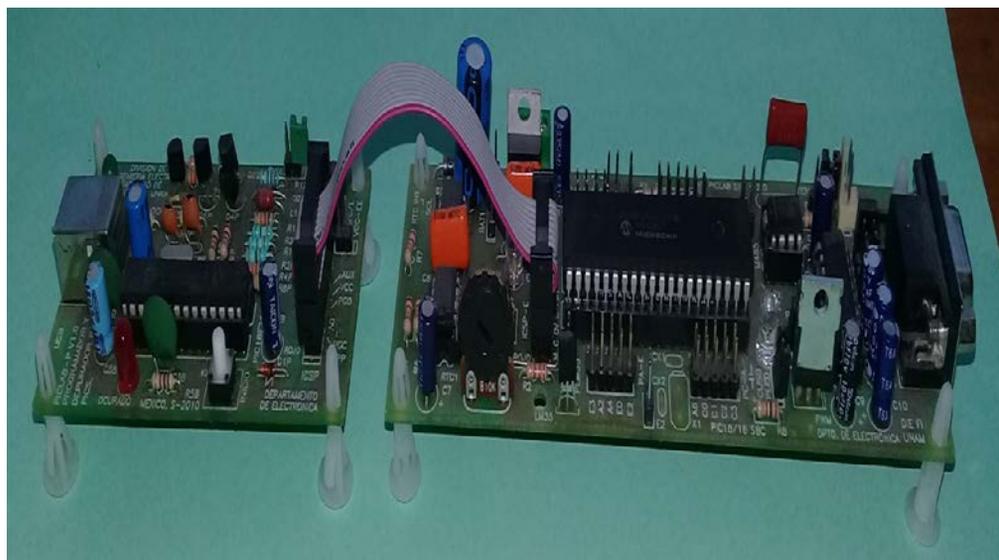


FIGURA 87. Programador de pic a la izquierda y tarjeta de desarrollo ala derecha.

### 3.9 Diagrama de flujo

El cual describe la operación del seguidor solar de dos ejes diseñado en la presente tesis. El cual se muestra en la Figura 88. En dicho diagrama: M1 representa al motor 1, M2 representa al motor 2, S1 es el sensor 1, S2 es el sensor 2, X1 y X2 son los valores que registran los sensores 1 y 2 (fotorresistencias) cuando reciben la mayor cantidad de radiación luminosa. Cuando estos valores son registrados por el microcontrolador, el seguidor solar posiciona a la celda solar en la zona donde ésta capture la mayor incidencia de los rayos solares.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL DEL PIC8F4550 DEL SEGUIDOR SOLAR.

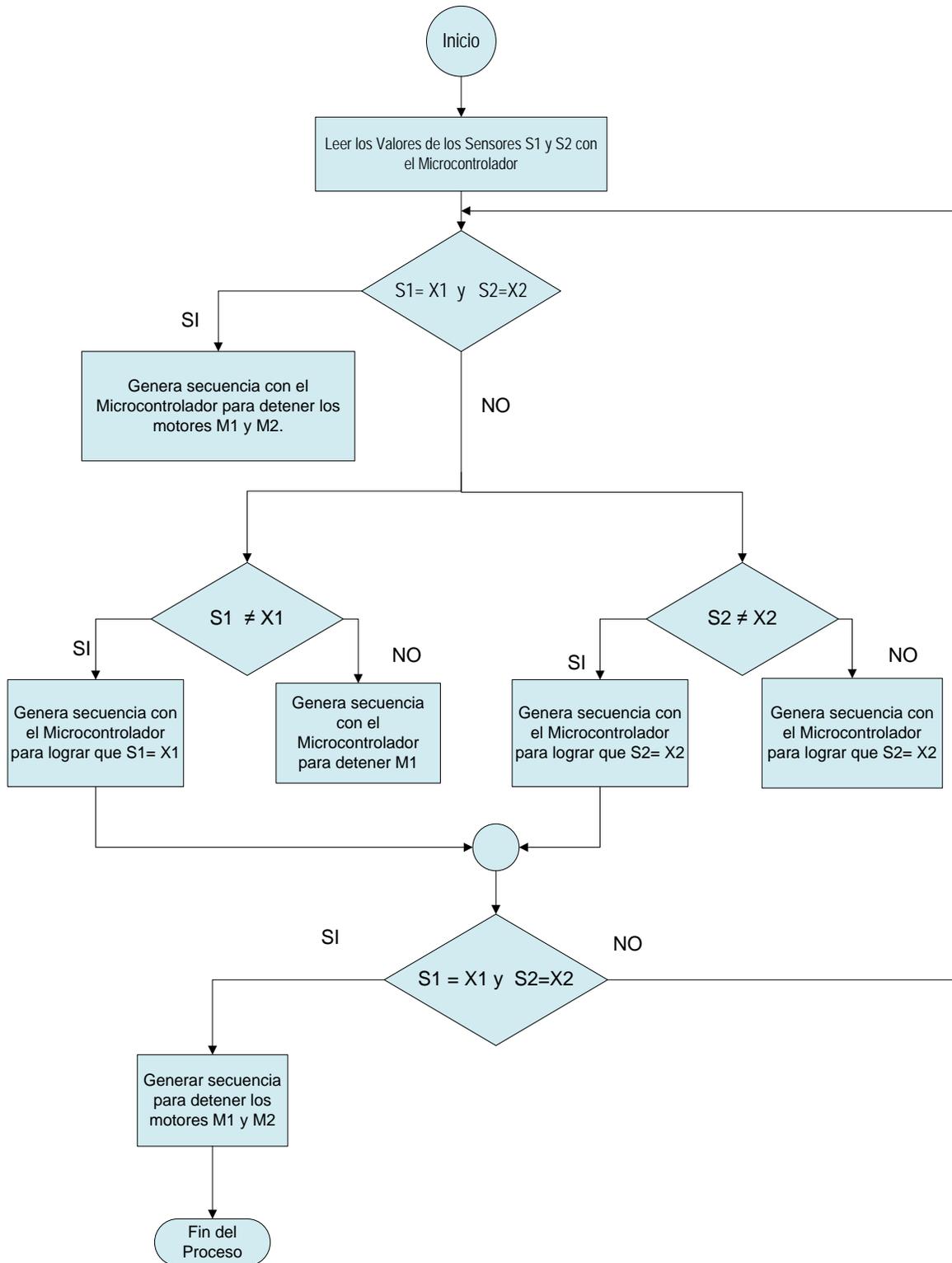


FIGURA 88. Diagrama de flujo del programa de control del PIC18F4550, que orquesta el manejo de nuestro seguidor solar.

El programa que controla al microcontrolador PIC18F4550 de nuestro seguidor solar se explica en esencia con el diagrama de flujo mostrado en la Figura 89. Podemos agregar que los sensores S1 y S2 (fotorresistencias) registran un valor particular el cual depende de la cantidad de luz solar que reciben; esos valores son capturados por el microcontrolador, el cual los procesa y hace que los motores se detengan, si estos valores coinciden con los valores X1 Y X2 respectivamente. Por otro lado, si los valores recibidos por el microcontrolador no coinciden con X1 y X2, entonces el PIC hace que los motores se ajusten hasta conseguir que los valores registrados por los sensores sean X1 y X2.

Como último punto de este capítulo, en la Figura 91 se presenta un diagrama de bloques donde visualmente se puede ver cómo opera nuestro seguidor solar.

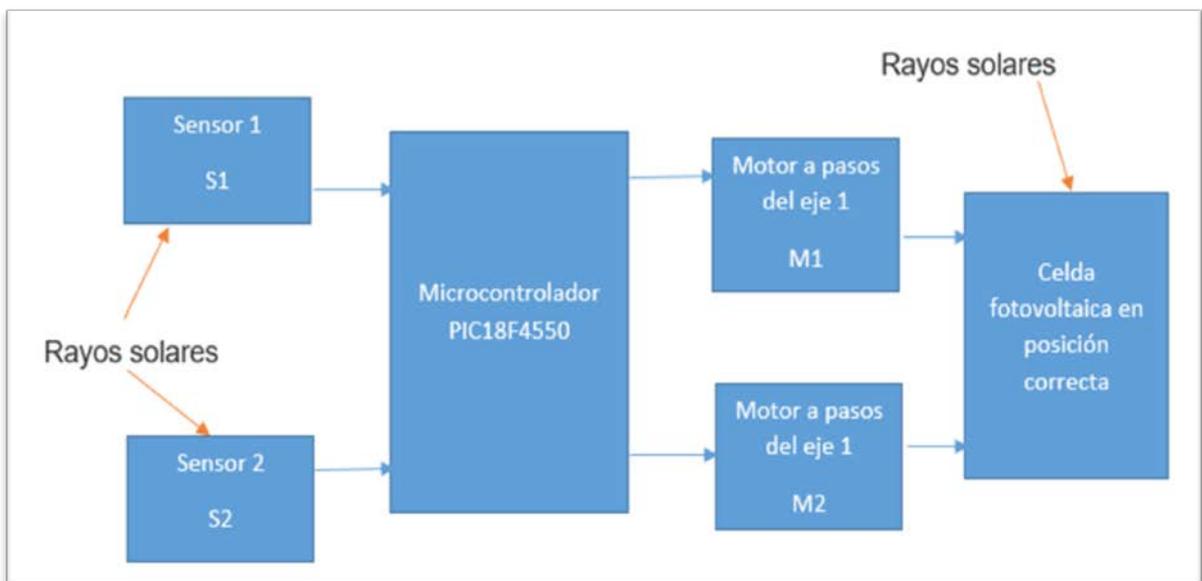


FIGURA 89. Diagrama de bloques del comportamiento del seguidor solar.

De este diagrama se puede decir que el PIC18F4550 registrara en cada momento los valores de S1 y S2 y buscará continuamente que dichos valores sean los mismos que X1 y X2, lo cual se traduce en el ajuste correcto de M1 y M2 con el fin de conseguir la posición correcta, para que la celda fotovoltaica reciba la mayor cantidad de radiación solar en su superficie.

## Capítulo 4 Implementación física del seguidor solar de dos ejes.

### 4.1 Implementación.

Una vez diseñado el seguidor solar de dos ejes propuesto en esta tesis, continuaremos con la siguiente etapa, la cual consiste en la implementación física del mismo.

Primero se mencionarán las características generales de cada una de las partes que conforman el seguidor solar de dos ejes y después se presentará una lista de los componentes electrónicos y demás elementos que se necesitaron para efectuar la implementación. Se proporcionará el diagrama para generar el circuito impreso o tarjeta de circuito impreso PCB (del inglés: *Printed Circuit Board*,) y como último punto de este capítulo, se mostrarán las fotos del seguidor solar en proceso de operación

A continuación, en la Figura 90, se presenta el microcontrolador PIC 18F4550 que se usó para la implementación del seguidor solar de dos ejes diseñado en la presente tesis.



FIGURA 90. Microcontrolador PIC 18F4550.

La información sobre de este microcontrolador se dio con detalle en el capítulo 2.

La Figura 91 presenta un diagrama donde se indican las medidas físicas del PIC 18F4550.

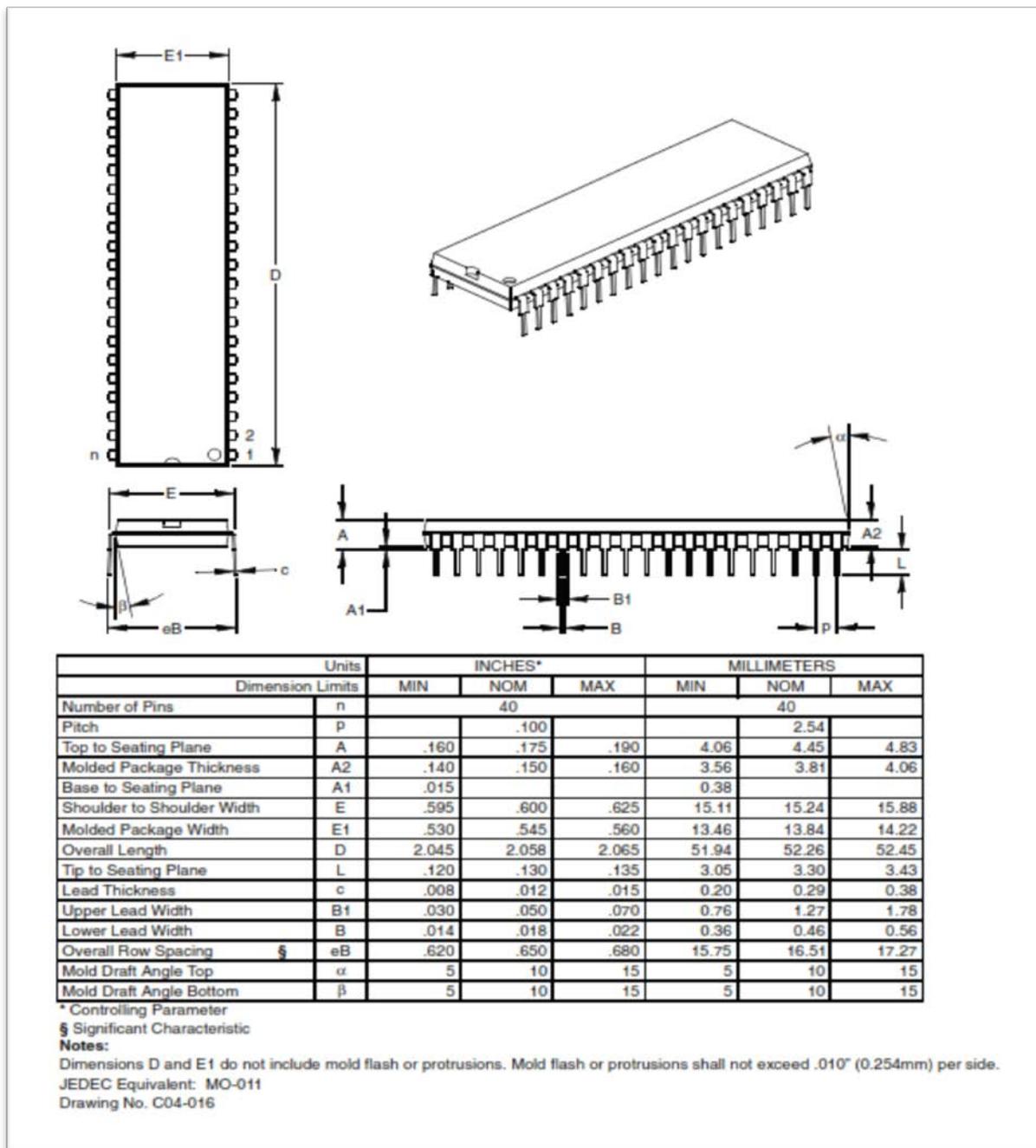


FIGURA 91. Medidas del PIC 18f4550.

En el seguidor solar de dos ejes se emplearon dos motores a pasos modelo 28BYJ-48. En la Figura 92 se pueden apreciar tres perspectivas de este motor vistas desde diferentes ángulos. La perspectiva de la izquierda muestra una vista lateral, la central una vista superior. La perspectiva de la derecha muestra el

código de colores y el conector que usa

dicho motor.

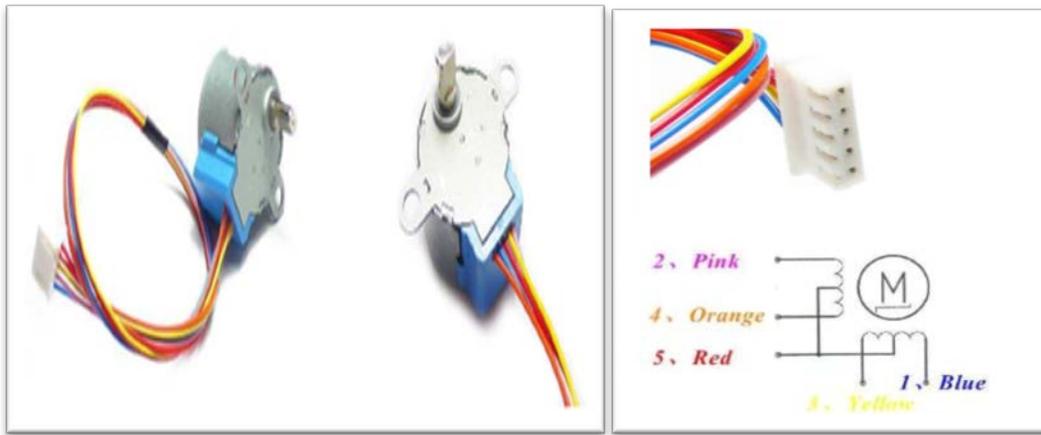


FIGURA 92. Perspectivas del motor 28BYJ-48 vistas desde diferentes ángulos.

A continuación, en la figura 95, se presenta un diagrama que muestra las medidas reales del motor

28BYJ-48.

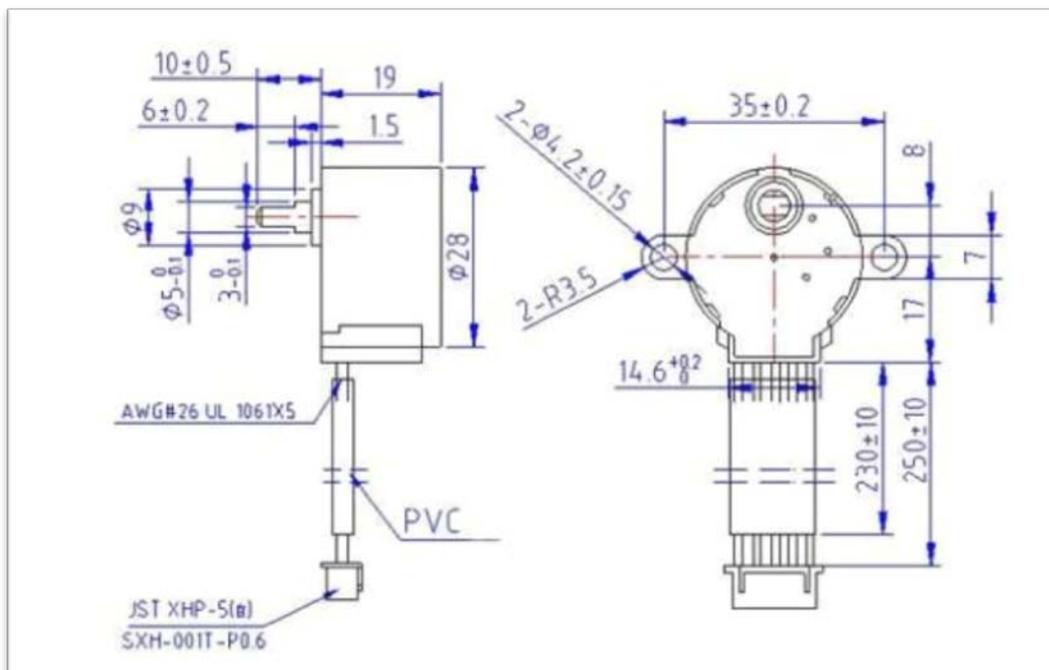


FIGURA 93. Esquema que muestra las medidas reales del motor 28BYJ-48.

#### 4.2 A continuación, se mencionan las características esenciales del motor 28BYJ-48:

- Voltaje de funcionamiento 5v o 12v.
- Motor paso a paso unipolar con caja reductora 1:64. Ref: 28BYJ-48-5V
- Número de fases: 4 (cuatro bobinas)
- Número de cables de conexión: 5
- Grados por paso:  $5.625^\circ/64 = 0,087890625^\circ$
- Pasos por revolución ( $360^\circ$ ): 4096
- Frecuencia de respuesta: > 900 pps (pulsos por segundo)
- Frecuencia de arranque: > 500 pps
- Frecuencia máxima 100Hz que equivale a un delay de 10ms
- Voltaje de operación nominal: 5 V
- Torque en tracción: 34.3 mN·m (349.8 gf·cm)
- Resistencia típica de cada bobina: 50  $\Omega$
- Diámetro aprox.: 2.8 cm
- Altura aprox. incluyendo el eje: 2.9 cm
- Diámetro del eje: 5 mm con lados planos de 3 mm
- Largo aprox. de los cables: 23 cm
- Placa de soporte frontal

Este tipo de motor se puede usar con un driver (controlador) que ya viene incluido en la compra de este motor o bien dicho driver se puede comprar aparte. El driver consta del circuito ULN2003A y algunos otros componentes que se usan para el control del motor 28BYJ-48. Sin embargo, no es indispensable usar ese driver, ya que se puede usar solo el circuito ULN2003 y ayudarse de él para controlar este motor.

#### Características esenciales del driver:

- Basado en el arreglo de transistores Darlington ULN2003A
- 4 entradas
- 4 salidas con capacidad hasta 500 mA c/u
- Protección de diodos en las salidas para cargas inductivas

- 4 LED's indicadores para cada salida
- Jumper para apagar o encender el motor
- Entrada de alimentación que puede ser de 5 V a 12 V
- Dimensiones: 3 cm x 3.7 cm aprox.

En la Figura 94 se muestra la imagen del driver para el motor 28BYJ-48

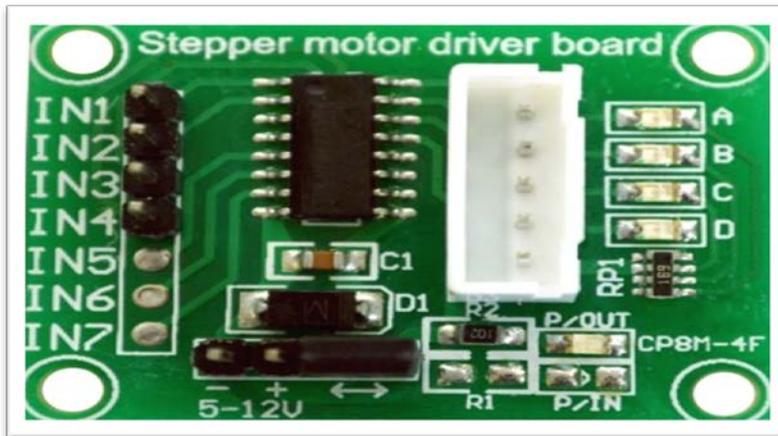


Figura 94. Driver del motor 28BYJ-48.

En las Figuras 95 y 96, se presentan dos fotografías de los motores modelo 28BYJ-48 usados en el seguidor solar de dos ejes implementado en esta tesis. La figura 95 muestra el motor que se encarga del movimiento de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  sobre el plano horizontal, este motor se encuentra empotrado en el eje vertical del seguidor. Por otro lado, la figura 98 muestra el motor que se encarga del movimiento de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  o  $360^\circ$  sobre el plano vertical y

está  
colocad  
o sobre  
el eje  
horizon  
tal.



Figura 96. Motor colocado sobre el eje horizontal.



Figura 95. Moto  
r colocad  
o sobre  
el eje  
vertical

Para la implementación del seguidor solar de dos ejes, se usaron dos circuitos integrados ULN2003A. A continuación, se brindará información general sobre este circuito:

Debido a la pequeña potencia que suministran los microcontroladores en sus salidas de control, sólo podemos hacer funcionar directamente unos LEDs y algunos otros elementos electrónicos que requieren bajo voltaje y poca corriente. Por este motivo es necesario amplificar las salidas del mismo, en función de las cargas que se vayan a controlar. Un método sencillo y económico es emplear el circuito integrado ULN2003A, que es un arreglo de transistores Darlington (Darlington array), montados en un chip con el que podemos controlar cargas de hasta medio Amper. El chip lleva diodos de protección contra las sobretensiones producidas por cargas inductivas. Esto lo hace ideal para controlar relés y motores.

#### 4.3 Características generales del circuito integrado ULN2003A:

- 7 transistores NPN Darlington, en emisor común.
- 7 diodos de supresión de voltajes inversos para manejar cargas inductivas, con conexiones de cátodo común
- Salidas de 0.5 A (500 mA) max.
- Los transistores pueden ser conectados en paralelo para mayor capacidad de corriente
- Voltaje de sostenimiento a la salida: -0.5 V a 50 V
- Resistencia de entrada a la base: 2.7 k $\Omega$
- Voltaje de entrada: -0.5 V a 30 V
- Entradas compatibles TTL y CMOS de 5 V
- Encapsulado: DIP 16 pines

En la Figura 97 se muestra la cara frontal y trasera de la placa fenólica que porta al circuito integrado

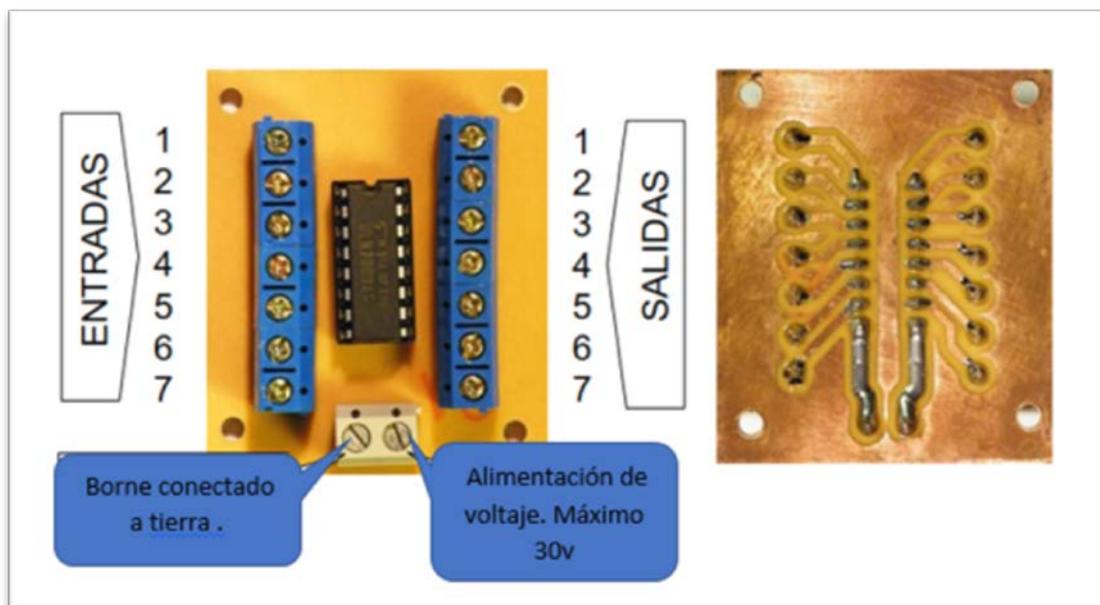


Figura 97. Vista frontal y trasera de la placa fenólica que porta al circuito ULN2003.

También se puede montar este circuito en una placa perforada; Basta con cortar la placa fenólica perforada a la medida deseada y soldar cables de las terminales del circuito integrado a una serie de bornes a los cuales se conectarán las entradas del microcontrolador y las salidas hacia el motor a pasos, o lo que se quiera manejar con este integrado. Esto se ilustra en la Figura 98

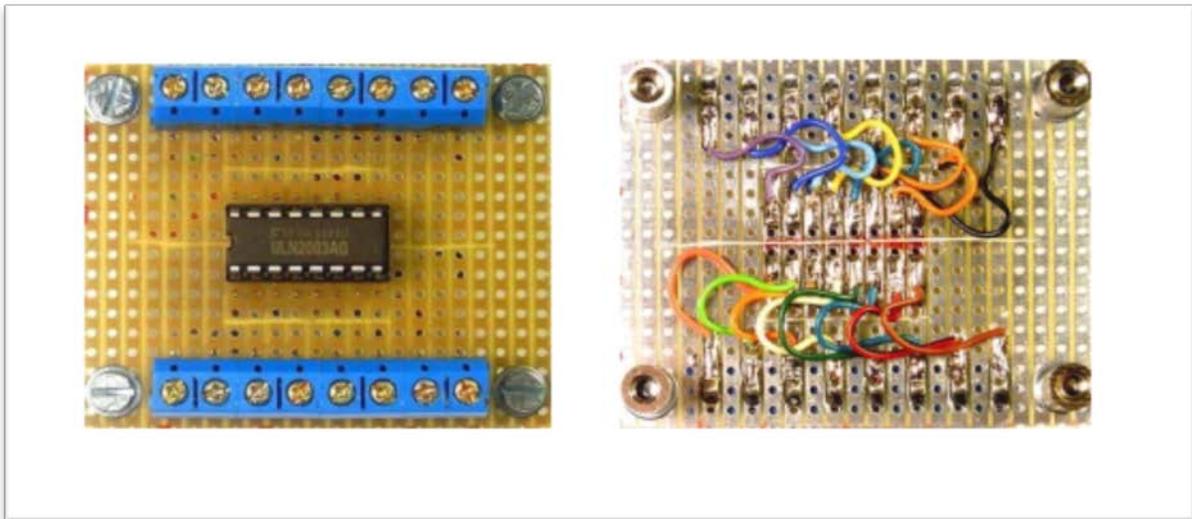


Figura 98. Vista frontal y trasera del circuito ULN2003A montado en placa fenólica perforada.

En la Figura 99 se presentan tres diagramas: el primero, a la izquierda, muestra cómo están conectados un par de transistores Darlington del CI ULN2003A (diagrama de un canal); el de en medio muestra el patigrama interno del circuito; y el de la derecha muestra una vista exterior del circuito y el orden en que se distribuyen sus terminales (pines).

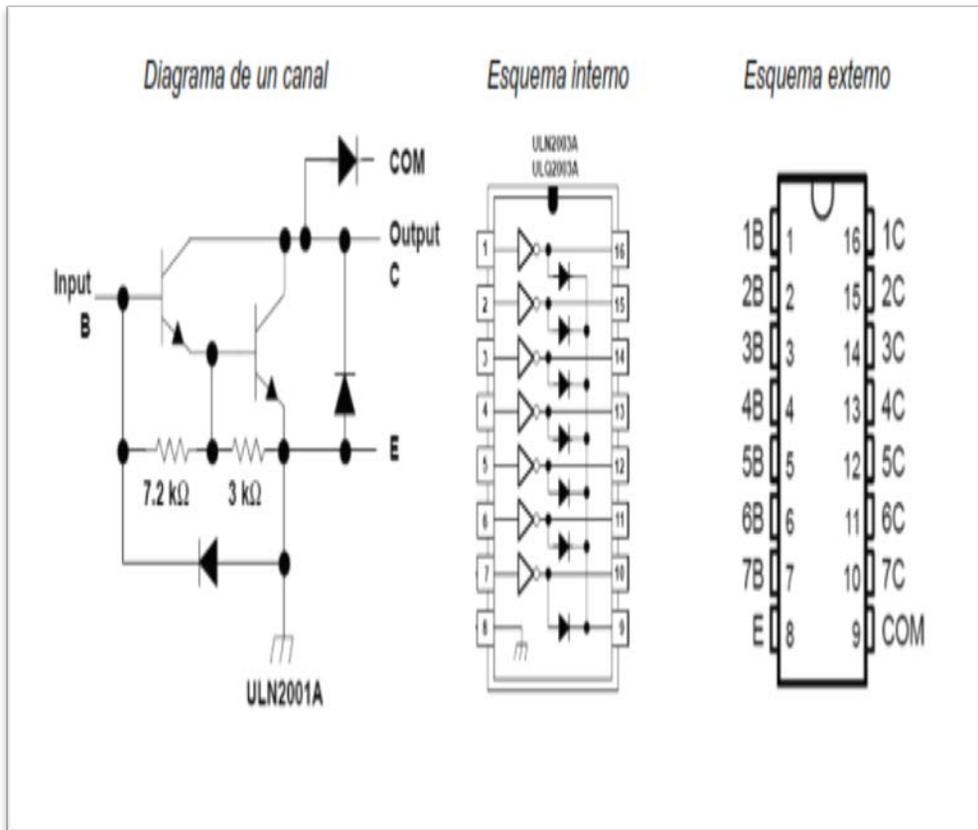


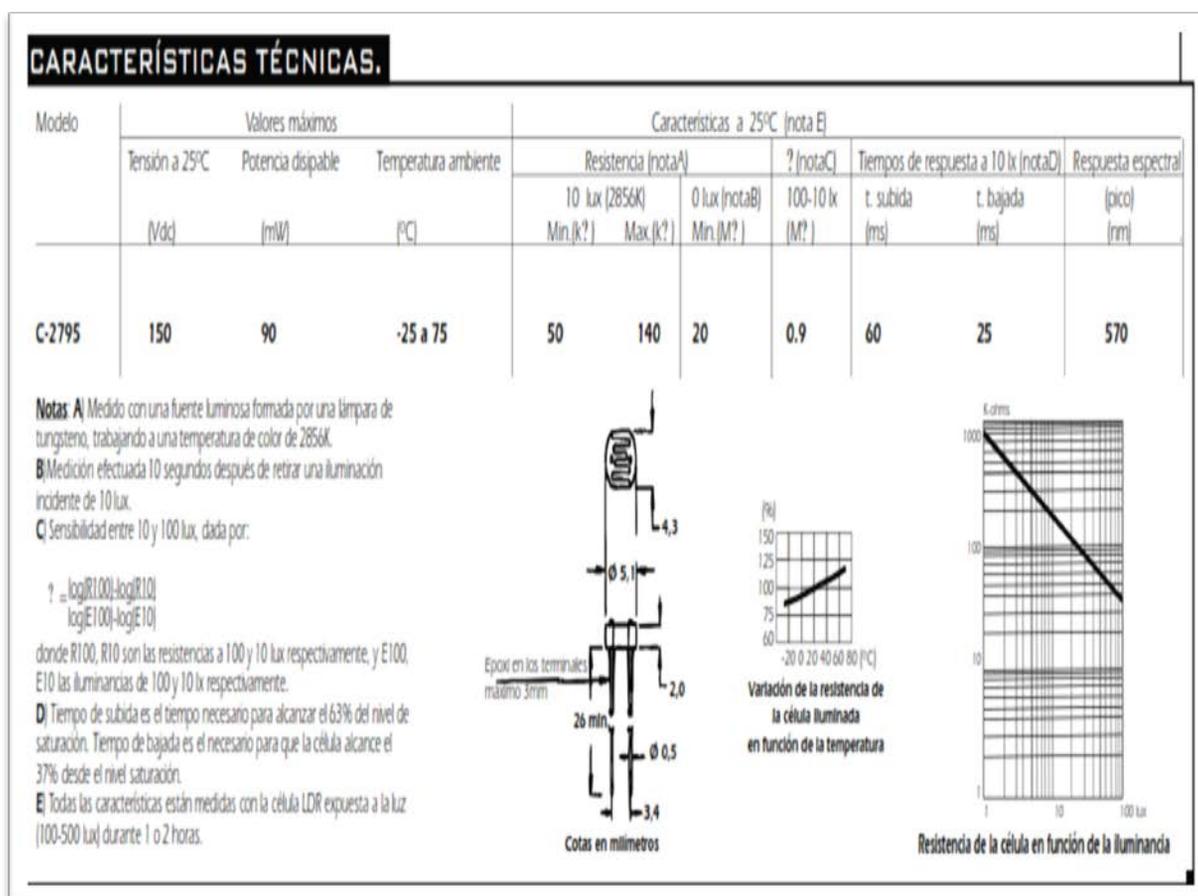
Figura 99. Diagrama de un canal, esquema interno y externo del circuito ULN2003A.

Se usaron dos fotorresistores en la implementación del seguidor solar de dos ejes y se muestran en la Figura 100. Es importante mencionar que dichos elementos son parte esencial del seguidor, ya que funcionan como sensores que indican si el seguidor está en la posición adecuada o no lo está.



Figura 100. Fotorresistores del seguidor solar de dos ejes.

Hay que recordar que la fotorresistencia o resistencia dependiente de la luz, consiste en una célula de Sulfuro de Cadmio, altamente estable, encapsulada con una resina epoxi transparente, resistente a la humedad. Su principio de operación es similar a la del ojo humano. Es decir, ambos son sensible y responden al cambio de intensidad luminosa. Su nivel de resistencia aumenta cuando el nivel de luz disminuye. Estas fotorresistencias se aplican en: Control de contraste en televisores y monitores; control automático de la iluminación en habitaciones, juguetes y juegos electrónicos, controles industriales; interruptores crepusculares; boyas y lámparas de encendido automático; auto-flash, etc. [29]. En la figura 101 se muestra la hoja técnica de los fotorresistores LDR de 4.3 mm x diámetro de 5.1 mm.



29 <http://fadisel.com/docs/C-2795.pdf> hoja de datos de fotorresistores empresa CEBEK

Figura 101. Hoja técnica de fotorresistores LDR 4.3 mm x diámetro de 5.1 mm.

La Tabla presentada en la Figura 101 indica el nombre, tipo y costo de los componentes usados en el seguidor solar de dos ejes implementado para esta tesis.

Elementos del seguidor solar de dos ejes	Número de piezas	Costo unitario
PIC 18F4550	1	\$121.552
Motor a paso y tarjeta controladora (Dirver)	2	\$160.00
Circuito integrado ULN2003A	2	\$12.069
Cristal de cuarzo de 4 Mhz		\$12.931
Resistores de 330 $\Omega$ ¼ W	8	\$0.25
Capacitor cerámico de 0.1UF	2	\$1.50
Resistor de 10k $\Omega$ ¼ W	4	\$0.25
8 led ultra brillantes	8	\$2.50
Cable calibre 22	1 metro de cable (diferentes colores)	\$2.50
Juego de cables Dupont macho y hembra	40 cables	\$22.00
Tornillos de acero de cuerda fina	8	\$2.00
Tuercas para tornillo de cuerda fina	8	\$0.50
Perfil de aluminio en blanco de una pulgada	1 trozo	\$70.00
Remaches de alumion	4	\$1.50
Placa fenólica para circuito impreso 15x15 cm.	2	\$25.00
Micro switch	1	\$1.50
postes de plástico	4	\$2.50
Pasta para soldar		
Soldadura Steren para caútín	1 tubo	\$28
Soporte de acrílico	1	\$70
Celda solar	1	Variable

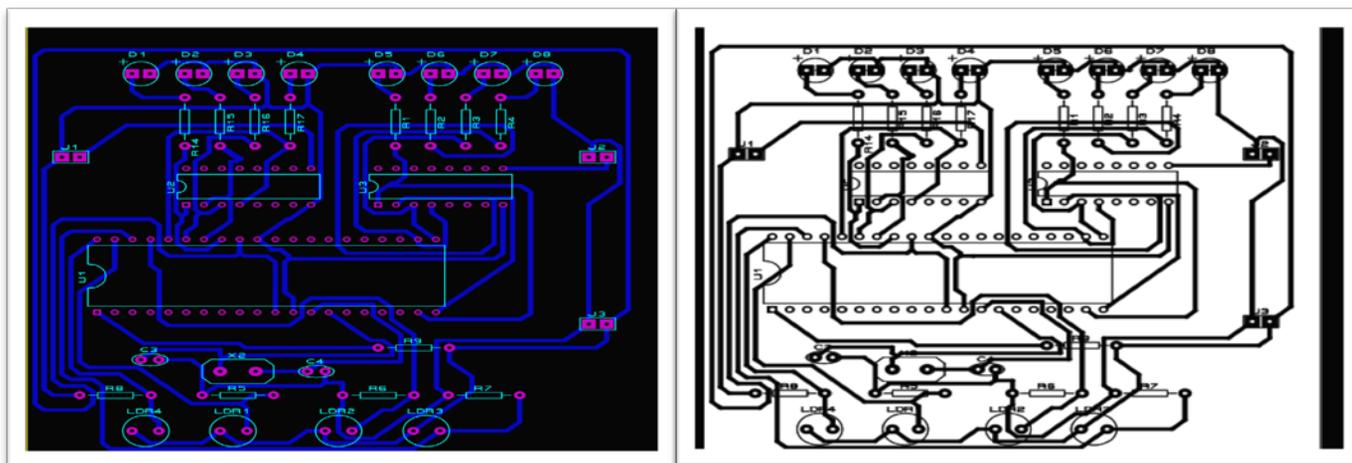
Tabla 4. Tabla que registra tipo, cantidades y costos de los elementos empleados en la implementación del seguidor solar de dos ejes.

#### 4.4 Diagrama PCB del seguidor solar de dos ejes.

En la figura 102, se muestra el diagrama de pistas en color, blanco y negro, efectuado en el programa Proteus, que se diseñó para generar el circuito impreso o PCB del seguidor solar de dos ejes presentado en esta tesis.

En el área electrónica, la tarjeta de circuito impreso (*Printed Circuit Board*, PCB), es la superficie constituida por caminos, pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener mecánicamente, por medio de la base, un conjunto de componentes electrónicos. Las pistas son generalmente de cobre, mientras que la base se fabrica generalmente de resinas de fibra de vidrio reforzada, Pertinax, cerámica, plástico, teflón o polímeros como la baquelita.

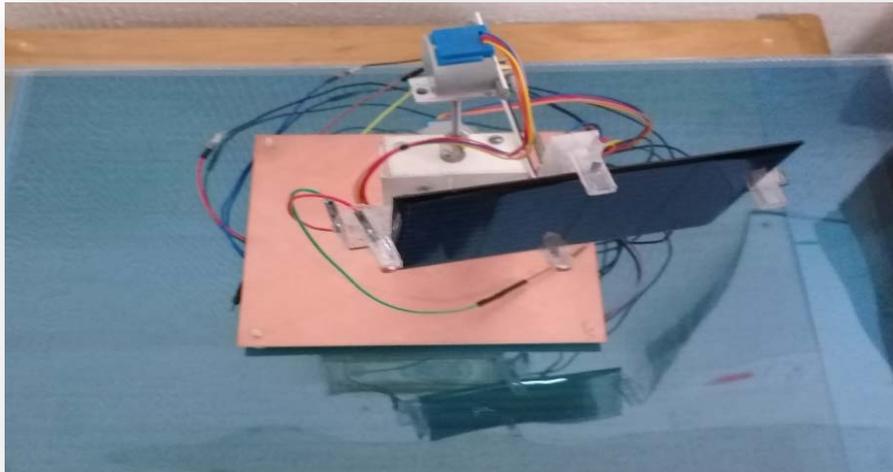
Los circuitos impresos más sencillos corresponden a los que contienen pistas de cobre solamente por una de las superficies o caras de la placa fenólica. A estas placas se les conoce como circuitos impresos de una capa. Los más comunes hoy en día son los de 2 capas. Sin embargo, dependiendo de la complejidad del diseño físico del circuito, pueden llegar a fabricarse hasta de 8 o más capas si es necesario [30].



30 [Gallardo Puertas Omar](#). *Fabricación de placas de circuito impreso con Proteus*. Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales Valladolid, septiembre 2015.

Figura 102. Vistas del diagrama de pistas utilizado para generar el circuito impreso del seguidor solar de dos ejes implementado en la presente tesis.

Como parte final de este capítulo mostraremos tres fotografías del seguidor solar de dos ejes, que se implementó en el presente trabajo de tesis. En las Figuras 103 y 104 se pueden apreciar dos vistas



superiores del seguidor solar.

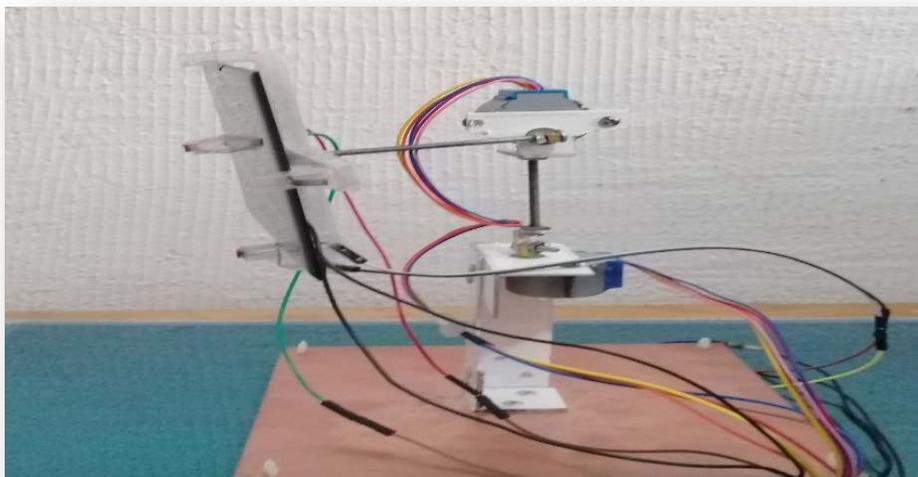
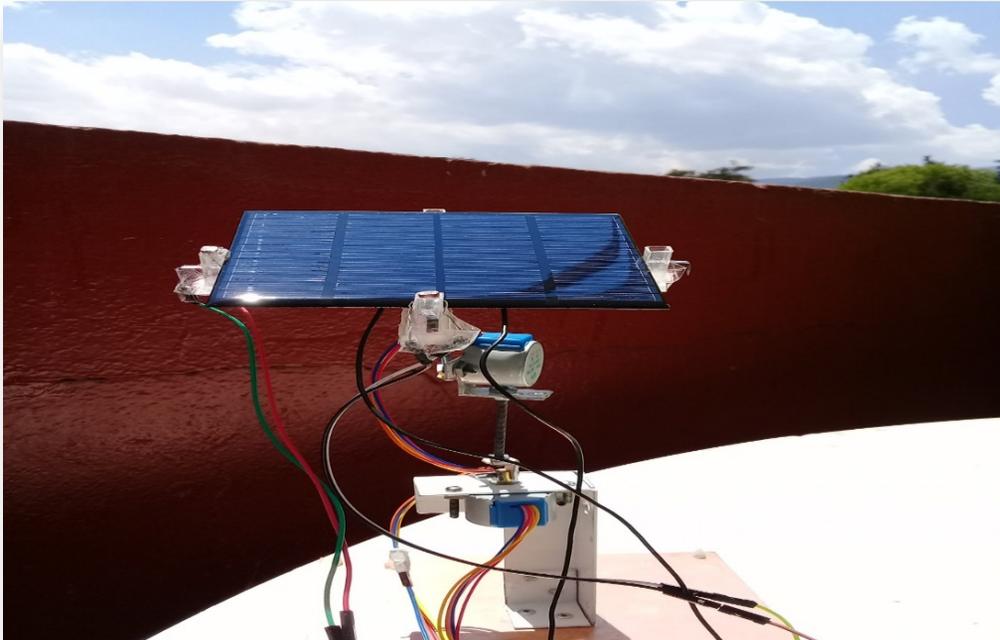


Figura  
Vista

103.

superior del seguidor solar de dos ejes.

Figura 104. Vista lateral seguidor solar de dos ejes.



En la Figura 105 se puede apreciar a detalle, la parte frontal del seguidor solar de dos ejes.

**Figura 105. Vista frontal del seguidor solar de dos ejes.**

Es importante mencionar que el seguidor solar para su funcionamiento, responde a la luz generada por el sol y también a la luz generada de manera artificial, como es el caso de: la luz de un foco incandescente o una lámpara ahorradora.

## **Capítulo 5. Pruebas resultados y ajustes del seguidor solar de dos ejes.**

En este capítulo se presenta como se efectuará la prueba de funcionamiento y eficiencia al seguidor solar de dos ejes diseñado e implementado en esta tesis.

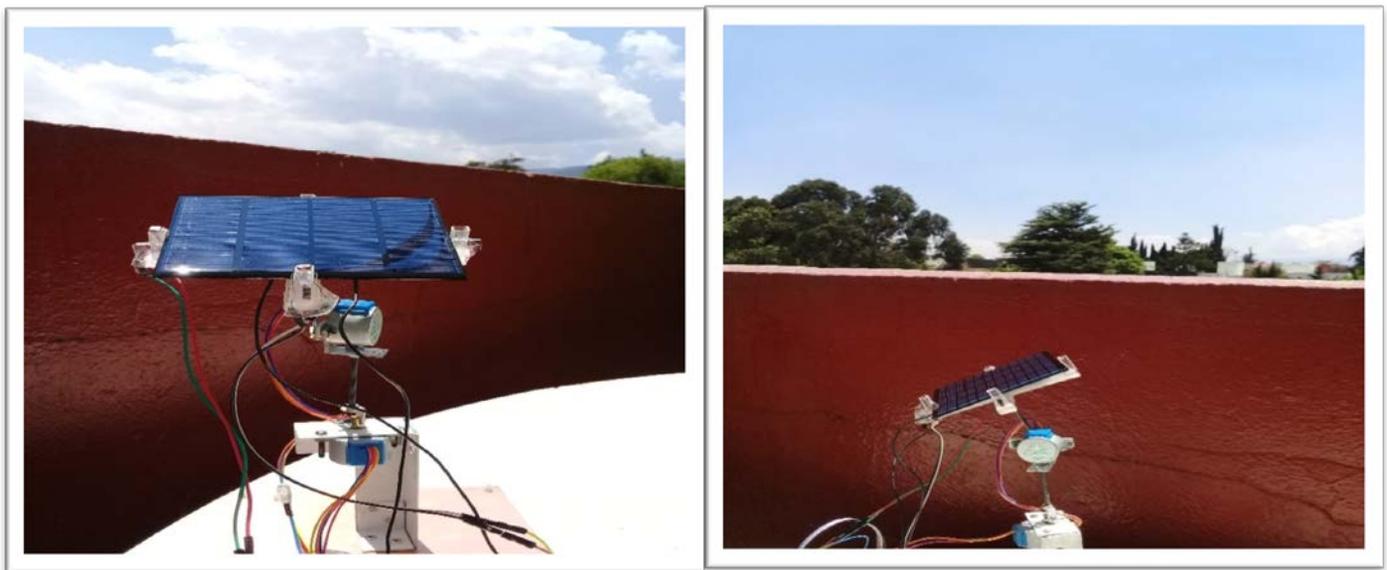
### **5.1 Resultados**

Como primer paso se colocará el soporte que contiene a la celda solar y a los dos sensores (fotorresistencias) del seguidor, a 30 grados con respecto al plano horizontal y se fijará en esa posición, como se muestra en la figura 106, de tal manera que se tendrá una modulo solar fijo. A continuación, se colocará una carga a la salida de dicho modulo, en este caso la carga es un motor para dron de corriente directa a 12 V. Una vez conectada la carga, se registrarán las lecturas de corriente y voltaje que el modulo solar fijo entregue a la carga, así como también se registrarán las lecturas de voltaje que reflejen los dos sensores. Estas mediciones se efectuarán en un día, en un horario de 6:00 am a 8 pm, en intervalos de una.

Después se realizará un proceso casi igual, con la única diferencia que se iniciara la operación del seguidor solar de dos ejes, para que este se posicione en donde capte la mayor radiación solar posible, esto lo ilustra la Figura 107, y de manera similar se registraran las lecturas de corriente y voltaje sobre la carga y la lectura de voltaje en los dos sensores.

Una vez recopiladas las lecturas anteriores se efectuará la comparación entre el modulo solar fijo y el seguidor solar de dos ejes para observar las ventajas y desventajas que estos presentan.

En las Figuras 106 y 107 se muestran las posiciones del módulo solar fijo y del seguidor solar de dos



ejes.

Figura 106. Modulo solar fijo cuyo soporte está colocado a 30° con respecto al plano horizontal. La hora de registro de datos para esta posición es 12:00 pm (medio día)

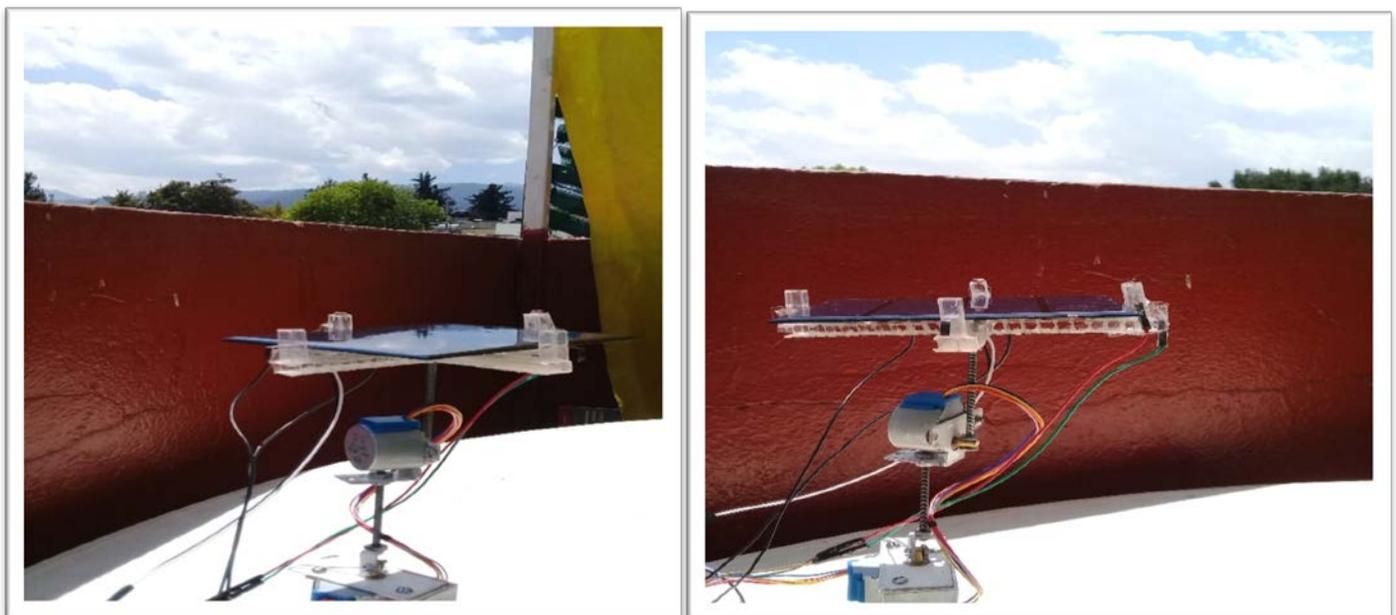


Figura 107. Seguidor solar de dos ejes en funcionamiento, cuyo soporte está colocado en un Angulo donde capta la mayor radiación solar posible. La hora de registro de datos para esta posición es 12:02 pm (dos minutos pasando

Hora	Valor de resistencia del Sensor 1	Valor de resistencia del Sensor 2	Voltaje de la celda sobre la carga [V]	Corriente de la celda sobre la carga [mA]
6:00	1.0 M	1.1 M	0.996	0.001
7:00	0.9 M	0.9 M	3.99	1.39
8:00	0.331 k	0.685 k	12.29	18.77
9:00	0.243 k	0.418 k	12.67	18.6
10:00	0,219 k	0.357 k	12.51	16.3
11:00	0.205 k	0.299 k	12.29	16.3
12:00	0.203 k	0.289 k	12.33	16.0
13: :00	0.207 k	0.289 k	12.51	17.5
14: :00	0.594 k	0.807 k	10.72	16.00
15:00	0.291 k	0.361 k	12.82	18.6
16:00	0.565 k	0.673 k	12.12	14.5
17:00	8.24 k	8.86 k	1.569	0.77
18:00	14.30 k	14.80	1.44	0.39

medi  
0  
día).  
  
En  
las  
Tabl  
as 4  
y 5  
se  
mue  
stra

n los datos para el modulo solar fijo y el seguidor solar de dos ejes.

Tabla 5. Valores registrados para el Modulo solar Fijo a 30° del plano horizontal

Hora	Valor de resistencia del Sensor 1	Valor de resistencia del Sensor 2	Voltaje de la celda sobre la carga [V]	Corriente de la celda sobre la carga [mA]
6:00	0.9 M	1 M	1.57	0.001
7:00	0.431 k	0.666 k	13.00	6.39
8:00	0.266k	0.344 k	13.01	20.5
9:00	0.209k	0.325 k	12.81	18.8
10:00	0.205 k	0.306 k	12.53	17.00
11:00	0.199 k	0.286 K	12.34	16.3
12:00	0.199 k	0.283 k	12.36	16.0
13: :00	0.206 k	0.275 k	12.55	17.6
14: :00	0.582 k	0.804 k	10.80	16.09
15:00	0,270 k	0.325 k	12.96	19.00
16:00	0.477 k	0.632 k	12.25	15
17:00	4.60 k	7.35 k	2.41	1.55
18:00	9.79 k	11.00 k	1.90	0.85

Tabl  
a 6.  
Valor  
es  
regis  
trado  
s  
para  
el  
Segu  
idor  
solar  
de  
Dos  
Ejes  
en  
funci  
ona

miento.

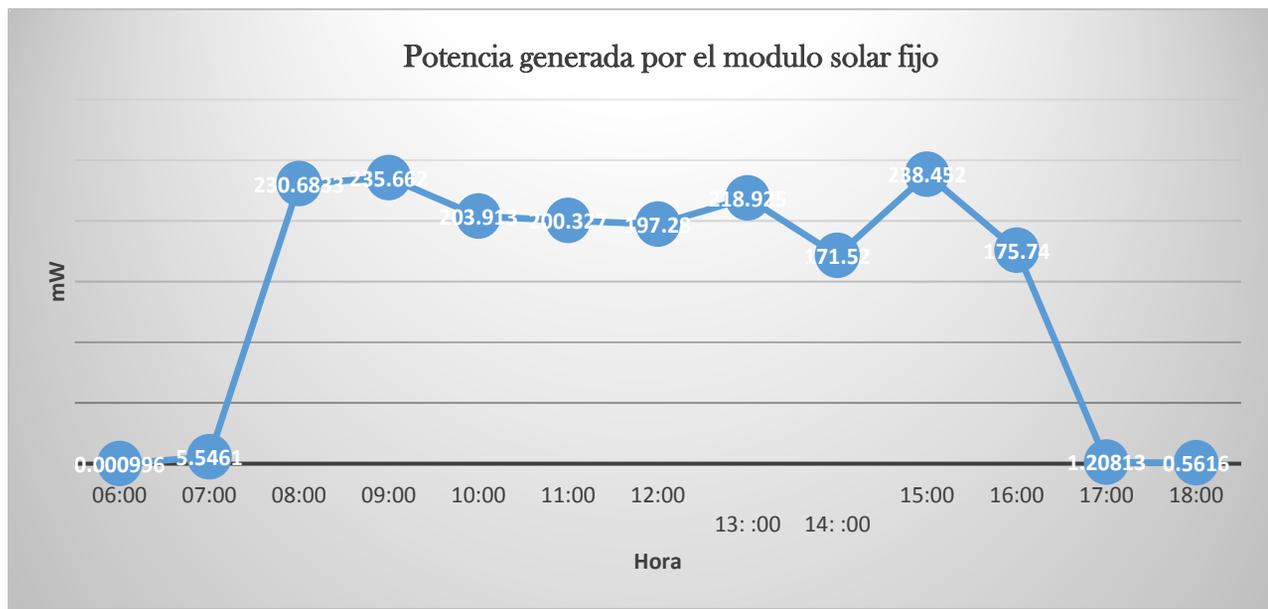
Con los datos de corriente y voltaje de las Tablas 4 y 5 se calculó la potencia que produce la celda en cada hora, tanto para el para el seguidor solar de dos ejes, como para la del módulo solar fijo. Esto se aprecia en las tablas 6 y 7.

En la siguiente tabla se muestran los valores de corriente, voltaje y potencia que genera la celda solar de las 6 am a las 18 hrs, montada en el Módulo Solar Fijo.

Hora	Voltaje de la celda sobre la carga [V]	Corriente de la celda sobre la carga [mA]	Potencia de la celda [mWh]
6:00	0.996	0.001	<b>0.0009</b>
7:00	3.99	1.39	<b>5.546</b>
8:00	12.29	18.77	<b>230.683</b>
9:00	12.67	18.6	<b>235.662</b>
10:00	12.51	16.3	<b>203.913</b>
11:00	12.29	16.3	<b>200.327</b>
12:00	12.33	16.0	<b>197.280</b>
13: :00	12.51	17.5	<b>218.925</b>
14: :00	10.72	16.00	<b>171.520</b>
15:00	12.82	18.6	<b>238.452</b>
16:00	12.12	14.5	<b>175.740</b>
17:00	1.569	0.77	<b>1.208</b>
18:00	1.44	0.39	<b>0.561</b>

Tabla 7. Valores de corriente, voltaje y potencia generadas por la celda cuando está montada en el módulo solar fijo, de las 6 a las 18:00 hrs.

En la Figura 108. se muestra la gráfica Potencia-Tiempo para los datos de la Tabla 6, en ella se pueden



apreciar los valores de potencia a diferentes horas.

Figura 108. Gráfica Potencia-Tiempo de la celda montada en el módulo solar fijo.

En la Tabla 8 se muestran los valores de corriente, voltaje y potencia que genera la celda solar de las 6 am a las 18 hrs,

montada en el seguidor de dos ejes

Hora	Voltaje de la celda sobre la carga [V]	Corriente de la celda sobre la carga [mA]	Potencia de la celda [mWh]
6:00	1.57	0.001	<b>0.001</b>
7:00	13.00	6.39	<b>83.070</b>
8:00	13.01	20.5	<b>266.705</b>
9:00	12.81	18.8	<b>240.828</b>
10:00	12.53	17.00	<b>213.010</b>
11:00	12.34	16.3	<b>201.142</b>
12:00	12.36	16.0	<b>197.760</b>
13: :00	12.55	17.6	<b>220.880</b>
14: :00	10.80	16.09	<b>173.772</b>
15:00	12.96	19.00	<b>246.240</b>
16:00	12.25	15	<b>183.750</b>
17:00	2.41	1.55	<b>3.735</b>
18:00	1.90	0.85	<b>1.615</b>

en el solar de en

funcionamiento.

Tabla 8. Valores de corriente, corriente y potencia

En la Figura 109 se muestra la gráfica Potencia-Tiempo para los datos de la Tabla 7. en ella se pueden apreciar los valores de potencia a diferentes horas.

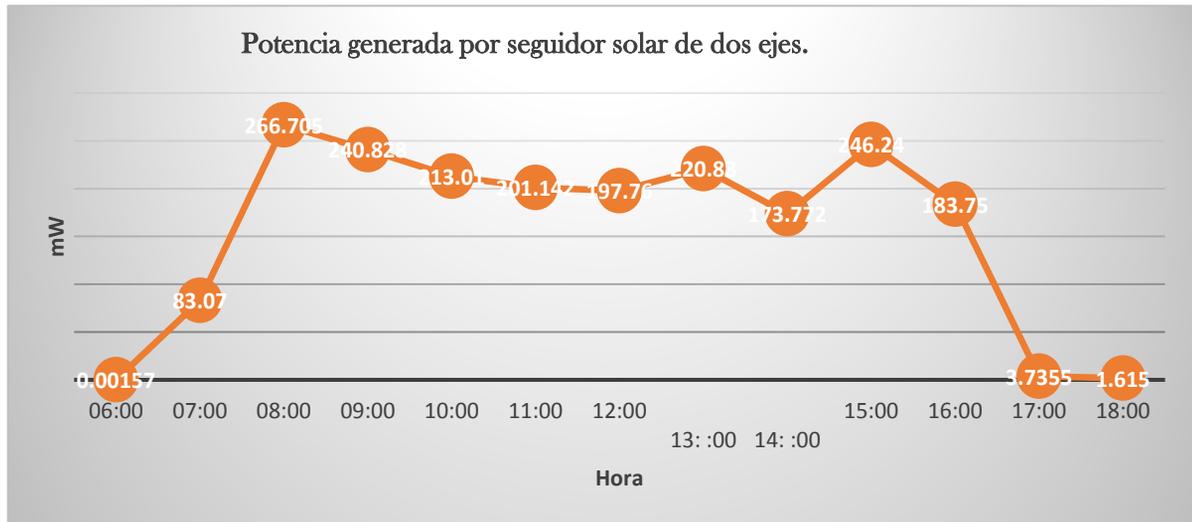
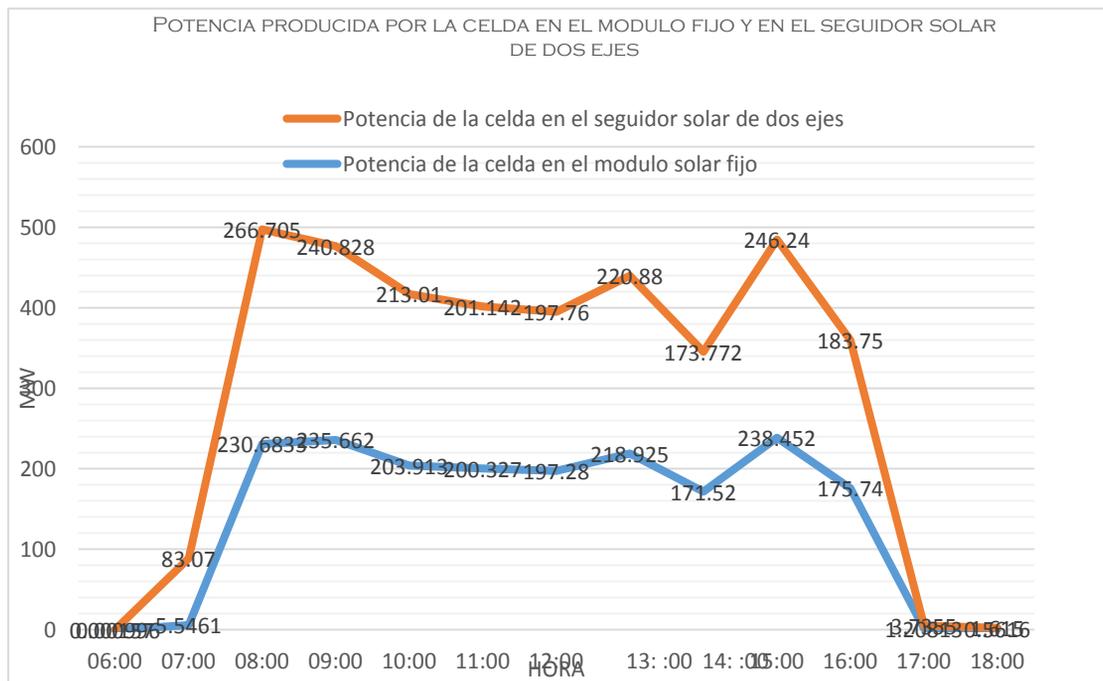


Figura 109. Gráfica potencia-tiempo de la celda montada en el seguidor solar de dos ejes.

En la Figura 110 se muestra la comparación de las graficas de Potencia- Tiempo, para ambas configuraciones de la celda, tanto para la fija como para la proporcionada por el seguidor solar de dos



ejes.

Figura 110. Gráfica Potencia-Tiempo de la celda montada en el seguidor solar de dos ejes.

De la gráfica mostrada en la Figura 111 podemos observar que, para las horas seleccionadas de toma de lecturas, los valores de potencia suministrados por celda fotovoltaica en el seguidor solar de dos ejes sobrepasan en gran medida a los valores de potencia suministrados de la celda en el módulo solar fijo. Podemos entonces aseverar que el seguidor solar de dos ejes suministra mayor potencia que el modulo solar fijo, por lo consiguiente el seguidor solar de dos ejes presenta mayor eficiencia en su funcionamiento que la que pudiera ofrecer el modulo solar fijo.

De las la graficas mostradas en Figura 95 se apreciar que las áreas por debajo de las respectivas curvas representan la energía proporcionada durante el intervalo de tiempo definido entre las 6am y las 18:00 hrs.

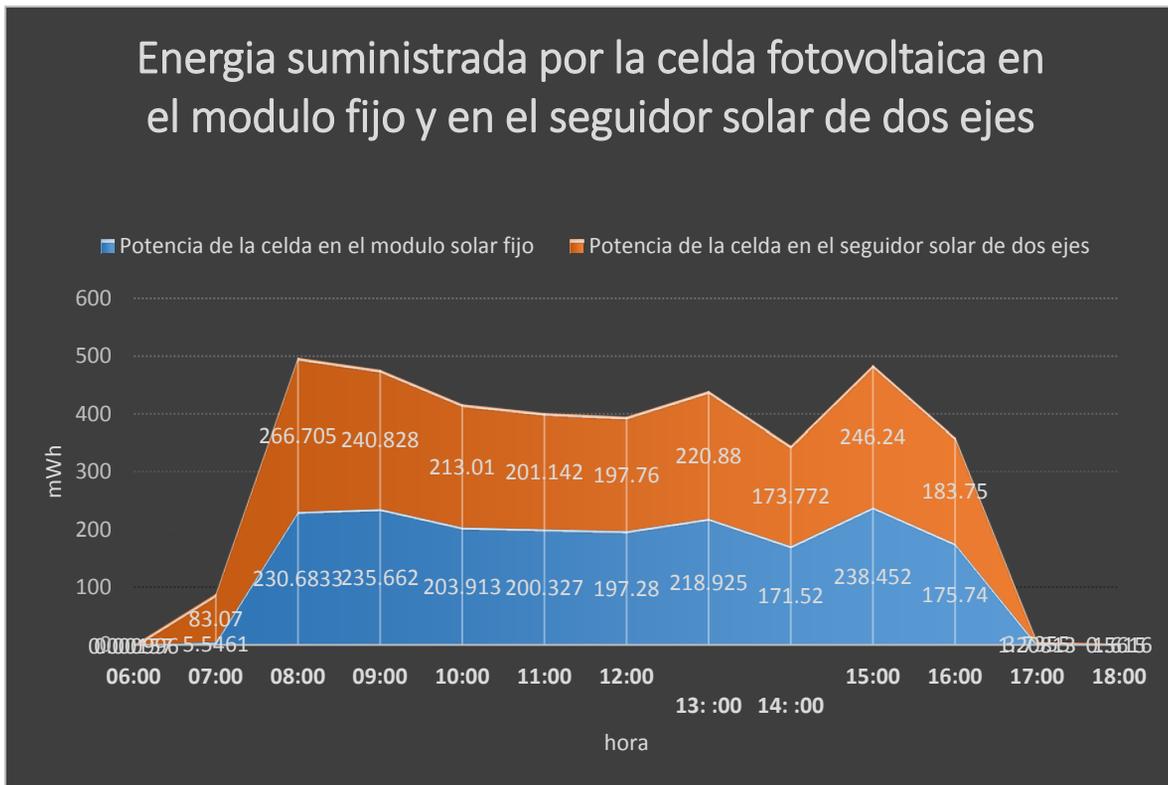


Figura 111. Suministro de energía de la celda durante el intervalo de tiempo de 6am a 6pm para la configuración fija y para la del seguidor solar de dos ejes.

Podemos observar en la Figura 111, que el área naranja por debajo de la curva de potencia-tiempo del seguidor solar de dos ejes, la cual representa la anergia que suministra el seguidor solar es **mayor** que la energía del área azul que se dibuja por debajo de la curva de potencia-tiempo del módulo solar fijo, por

Hora	Valor de resistencias del Sensor 1 en el módulo solar fijo	Valor de resistencia del Sensor 1 en el seguidor solar de dos ejes	Valor de resistencia del Sensor 2 en el módulo solar fijo	Valor de resistencia del Sensor 2 en el seguidor solar de dos ejes
6:00	1.0 M	<b>0.9 M</b>	1.1 M	<b>1 M</b>
7:00	0.9 M	<b>0.431 k</b>	0.9 M	<b>0.666 k</b>
8:00	0.331 k	<b>0.266k</b>	0.685 k	<b>0.344 k</b>
9:00	0.243 k	<b>0.209k</b>	0.418 k	<b>0.325 k</b>
10:00	0,219 k	<b>0.205 k</b>	0.357 k	<b>0.306 k</b>
11:00	0.205 k	<b>0.199 k</b>	0.299 k	<b>0.286 K</b>
12:00	0.203 k	<b>0.199 k</b>	0.289 k	<b>0.283 k</b>
13: :00	0.207 k	<b>0.206 k</b>	0.289 k	<b>0.275 k</b>
14: :00	0.594 k	<b>0.582 k</b>	0.807 k	<b>0.804 k</b>
15:00	0.291 k	<b>0,270 k</b>	0.361 k	<b>0.325 k</b>
16:00	0.565 k	<b>0.477 k</b>	0.673 k	<b>0.632 k</b>
17:00	8.24 k	<b>4.60 k</b>	8.86 k	<b>7.35 k</b>

consi  
guient  
e,  
pode  
mos  
afirma  
r que  
el  
segu  
dor  
solar  
de  
dos  
ejes,

nos proporciona mucha más energía eléctrica que un módulo solar fijo.

18:00	14.30 k	<b>9.79 k</b>	14.80	<b>11.00 k</b>	Analic emos
-------	---------	---------------	-------	----------------	----------------

ahora la magnitud de los valores de resistencia ofrecidos por los sensores en el periodo de tiempo ya mencionado (6:00am – 18:00 hrs) para los casos: Modulo solar fijo y seguidor solar de dos ejes. Esto se aprecia en la Tabla 9.

**Tabla 9. Resistencias Ofrecidas por los Sensores S1 Y S2**

Recordemos que los sensores del seguidor solar de dos ejes son dos fotorresistencias, en las cuales su valor de **resistividad disminuye** a medida que **aumenta la energía luminosa incidente** sobre ellas y viceversa.

Siendo así podemos ver en la Tabla 9 que la magnitud de los valores de resistencia de los sensores 1 y 2 son **siempre menores** cuando los sensores están montados sobre el seguidor solar de dos ejes en comparación con las magnitudes de los valores de resistencia que se registraron de los sensores 1 y 2 para la configuración de modulo solar fijo. Por lo tanto, se puede concluir que el seguidor solar de dos ejes posiciona a la celda fotovoltaica en un lugar donde capta mayor radiación solar y donde **produce más energía** eléctrica que la que pudiera producir en un módulo solar fijo.

Respecto a la eficiencia en tiempo de respuesta del seguidor solar se dice, que dicho tiempo está vinculado con la estructura del seguidor y del tipo de motor, ya que para motores pequeños el tiempo de respuesta se puede reducir en un nivel de respuesta **casi inmediato sin causar daños a la estructura**, pero en motores de gran dimensión al aumentar la rapidez de respuesta, puede crearse un momento mecánico que dañe los ejes del seguidor solar, en cada caso se tiene que ajustar el tiempo de respuesta y de ello se encarga el microcontrolador mediante el programa que el diseñador genera.

Otra prueba que se efectuó sobre el seguidor consistió en fijar la base del seguidor en una azotea a una altura de aproximadamente de 7 metros del suelo, esto en un día con mucho viento donde las antenas de televisión se movían agitadamente, así como también las copas de los pinos de la zona. La estructura de aluminio y los ejes del seguidor soportaron la fuerza de empuje del viento, por momentos parecía que la celda fotovoltaica quería desprenderse del soporte pero se mantuvo, lo que fue muy notorio, fue que la celda, como en la mayoría de los seguidores queda expuesta a posibles colisiones de objetos que arroja el viento, como respuesta a lo anterior se procedió a cambiar los sujetadores de seguidor por pequeñas láminas de acero para que la celda no se saliera del soporte y se puso una mica delgada sobre el seguidor con la finalidad de protegerla de los impactos de objetos pequeños, también se ajustó la longitud de los cables de conexión haciéndolos más cortos para evitar que fueran desplazados por el viento.

## Capítulo 6. Acoplamiento del seguidor solar de dos ejes a un dron.

En el presente capítulo se tratan aspectos importantes que explican cómo acoplar el seguidor solar de dos ejes a un dron. Existe varios modelos de drones, que van desde los profesionales hasta los que son armados caseramente, todos ellos construidos con el único objetivo de cumplir una tarea específica que proporcione algún beneficio al hombre.

Es importante mencionar que el seguidor solar de dos ejes diseñado y construido en la presente tesis, puede adaptarse a una gran variedad de drones, con tan solo efectuar sobre él algunas modificaciones y ajustes para aumentar o modificar sus capacidades.

Sin embargo, para cumplir el objetivo de este capítulo se ha seleccionado un tipo de dron llamado cuadricoptero.

Un **cuadricóptero** es un helicóptero multi-rotor, con cuatro brazos, los cuales tienen en su parte final un motor y una hélice. Son parecidos a los helicópteros en muchos aspectos, aunque la elevación y el empuje lo realizan con cuatro hélices en vez de una. La Figura 112. muestra uno de los tantos modelos de cuadricópteros que hay en el mercado, en este caso el modelo es el QR X350 PRO.



Figura 112. Quadricoptero modelo QR X350 PRO.

Es conveniente mencionar que no se pretende describir a detalle cada parte del dron cuadricoptero, ya que muchas de ellas varían según el modelo y diseño y tampoco es el objetivo del capítulo; pero si se proporcionarán los elementos necesarios y suficientes que permitan cubrir el objetivo planteado en el presente capítulo.

Aunque los diseños de cuadricopteros pueden ser diferentes unos a otros, hay ciertos componentes mecánicos y eléctricos que son necesarios y siempre están presente en este tipo de drones, A continuación, se mencionaran tales elementos:

### 6.1 Componentes mecánicos de un quadricoptero

**Estructura, soporte o chasis.** Es el elemento donde se ensamblan y acoplan el resto de componentes. Puede ser de diferentes tamaños y diseños, siendo su función principal la de reducir al máximo las vibraciones producidas por los motores. Por otro lado, es importante que el material empleado en la fabricación de la estructura, tenga las propiedades de ser resistente, rígido y ligero, como la fibra de carbono.

El soporte incluye tres secciones que son las siguientes:

1. Una placa central donde se colocarán los elementos electrónicos, tales como el controlador de vuelo, entre otros, y en nuestro caso el seguidor solar de dos ejes.

2. Cuatro brazos unidos a la placa central que soportan los sistemas de propulsión o rotores. La longitud de los brazos normalmente está relacionada con el tamaño de las hélices, de forma que se garantice el giro de las mismas sin obstrucciones de los componentes situados en la placa central.

3. Cuatro soportes para los motores posicionados en el extremo de cada brazo. Normalmente los materiales con los que se fabrican suelen ser fibras de carbono, madera o aluminio, aunque existen marcos de materiales más recomendados, como fibras de vidrio. La fibra de carbono es un material rígido que absorbe perfectamente las vibraciones, pero tiene el inconveniente de que es relativamente caro. Los otros dos materiales presentados son más económicos que la fibra de carbono, pero, como era de esperar, no son tan efectivos.

El aluminio goza de una gran rigidez, así como un peso relativamente bajo, pero tiene el problema de que no absorbe las vibraciones de los motores, pudiendo afectar gravemente a las medidas de los sensores acoplados al marco. Por el contrario, la madera tiene la propiedad de absorber las vibraciones, pero desafortunadamente, es bastante frágil y puede romperse el marco en caso de colisión.

La Figura 113 muestra un esquema de cómo están distribuidos los elementos del cuadricoptero en su armazón.

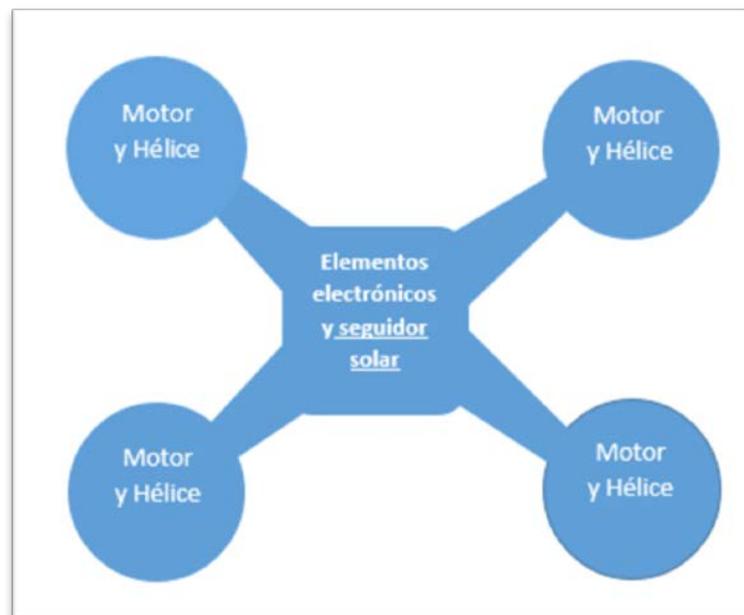


Figura 113. Distribución de componentes en el armazón del cuadricoptero.

## 6.2 Motores.

El cuadricoptero tiene cuatro motores que se colocan en la parte final de los brazos de la estructura y en cada uno de ellos se fija una hélice.

Existen diversos tipos de motores para los drones, uno de los más usados es el motor "brushless" o motor sin escobillas.



Figura 114. Motor brushless outrunner Emax cf2822 - 1200kv.

Dentro de los motores sin escobillas existe el tipo "outrunner". Este motor está diseñado para trabajar a bajas revoluciones, en aplicaciones de alto torque y su principal característica es que proporciona mucha potencia y es de peso ligero.

Expuesto lo anterior, se puede elegir un motor del tipo brushless outrunner para el cuadricóptero que trata este capítulo. Específicamente, se puede elegir el motor modelo EMAX CF2822- 1200Kv. Este motor se muestra en la Figura 114. En la siguiente Tabla 10 se muestran las características de este motor.

Características del Motor brushless outrunner Emax cf2822 - 1200kv.	
Propiedad	Valor
Constante KV	1200
Corriente de máxima eficacia	7-16 A (82%)
Diametro del eje	3 mm
Dimensiones del estator	22x10mm.
Empuje	De 200 a 600 g
Intensidad de corriente máxima	16 A
Peso	39 g
Peso recomendado del drone	200-700 g
Potencia	177 W
RPM/V	1200RPM/
Rpm Max	7700
Numero de celdas de batería	2-3X Li-Poly
Tamaños de la hélice	8",9",10"
Voltaje	7.4-11.1V

Tabla 10. Características del motor Emax cf2822 - 1200kv.

### 6.3 Hélices

Son cuatro hélices las que se usan en este dron, las cuales hacen que el cuadricoptero se más estable en el vuelo. Se ha escogido hélices bipala especiales para cuadricoptero en concreto el modelo de 8"x4.5" (miden 8 pulgadas y tienen 4.5 pulgadas de paso), Las cuales están unidas al motor usando un portahélices de 3 mm, para que se puedan reemplazar en caso de daño.

En la Figura 115 se puede apreciar la imagen de las hélices y de los portahélices.



Figura 115. Hélices y porta hélices del cuadricoptero.

### 6.4 Control electrónico de velocidad (ESC; Electronic Speed Controller) .

Un ESC es un dispositivo electrónico que sirve para controlar la velocidad del motor sin escobillas. Es un circuito que se encarga de generar una señal trifásica que alimenta el motor. La velocidad de giro se varía mediante una señal suministrada por PWM (Modulación por ancho de pulso).

Para el cuadricoptero de este capítulo se usa el ESC EMAX de 25A, con el objetivo de contar con un rango superior en amperaje con respecto a los 15 A que consume cada motor.

Este ESC permite ajustar el rango de PWM desde un de minino 1ms a un máximo 2 ms,



por defecto, detecta el 0% de empuje a 1,2ms y el 100% de empuje a 2ms. La Figura 116 muestra este dispositivo.

Figura 116. ESC EMAX de 25 A.

## 6.5 Batería.

La batería es el dispositivo que alimenta de energía a todos los componentes eléctricos del cuadricoptero y al momento de seleccionar una, hay que considerar los siguientes tres puntos:

- a) Intensidad de descarga constante.
- b) La capacidad de la batería.
- c) El voltaje de la batería

Para el cuadricoptero se usa una batería Lipo (litio-polímero), ya que estas suministran mucha energía en poco tiempo y son muy ligeras en comparación con otras hechas de otros materiales. El modelo y marca que se usa para el cuadricoptero es TCB 2200mAh 3S (11,1V) 25C. La Figura 117 muestra la batería seleccionada.



Figura 117. Batería TCB 2200mAh 3S (11,1V,) 25C.

## 6.6 Unidad de medición inercial (IMU)

La IMU es un dispositivo que incluye un conjunto de sensores capaces de medir la velocidad, la orientación y las aceleraciones del dron. Estas medidas son procesadas en el controlador y son utilizadas para calcular los cambios en las velocidades de los motores. Para determinar las propiedades descritas anteriormente, la IMU dispone de una combinación de acelerómetros, giróscopos y en ocasiones

magnetómetros, que permiten obtener las medidas en las tres direcciones del espacio. A continuación, se describe cada uno de los elementos mencionados anteriormente.

### 6.7 Giróscopo

Es el encargado de medir la velocidad de giro del cuerpo en los tres ejes. Este dispositivo, utiliza los principios del momento angular para medir y mantener su orientación.

### 6.8 Acelerómetro

Un acelerómetro es un dispositivo que, como su nombre indica, mide la aceleración del sistema al que esta acoplado en una determinada dirección.

### 6.9 Magnetómetro

Un magnetómetro es un dispositivo encargado de medir la intensidad y, en algunos casos, la dirección, de un campo magnético en un punto concreto del espacio. Las variaciones de altura del sistema al cual este acoplado, generaran pequeñas variaciones en la medida del campo magnético terrestre, de modo que estos dispositivos pueden complementar las medidas de los giróscopos y los acelerómetros.

Para el cuadricoptero se seleccionó una IMU cuyo modelo es AltImu-10. Esta es una placa de medición inercial que incorpora un giroscopio de 3 ejes L3GD20, un acelerómetro con magnetómetro de 3 ejes LSM303DLHC y un barómetro LPS331AP. Todos los sensores funcionan con el bus I2C, que permite lecturas utilizando sólo una línea de datos. Esta IMU Funciona con un rango de alimentación de 2.5V hasta 5.5V. esta IMU y

se muestra en la Figura

118.



Figura 118. IMU Altimu-10.

## 6.10 Controlador

El control de vuelo se efectúa con un microcontrolador, que funciona como el cerebro del cuadricoptero, el cual se mantiene registrando continuamente medidas de los sensores, a través de la IMU, para modificar las velocidades de los rotores de forma que mantenga en equilibrio la nave. Estas modificaciones se calculan a través de algoritmos de cierta complejidad de forma que la aeronave este siempre controlada, independientemente de perturbaciones. Para el cuadricoptero se puede usar la tarjeta ATmega 2560 de Arduino la cual se muestra en la Figura 119.

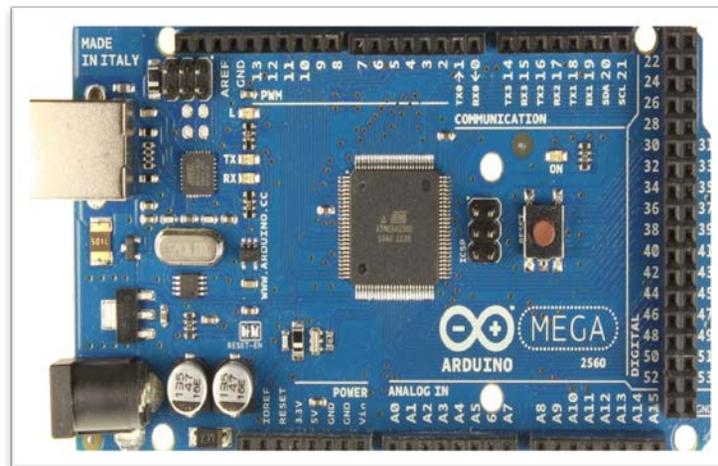


Figura 119. ATmega 2560 de Arduino.

## 6.11 Comunicación piloto a distancia-cuadricoptero.

Una cualidad importante de los cuadricopteros es que se pueden manejar a control remoto, ósea no necesitan tripulación o piloto en cabina, pero para que se efectúe dicho control a distancia es necesario instalar un sistema de comunicación piloto a distancia--cuadricoptero, que funcione de forma eficaz y acorde a las exigencias del operador.

A continuación, se mencionarán los sistemas de comunicación más usados en los drones:

### 6.12. Zigbee.

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la ZigBee Alliance. Es un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area Network, WPAN) y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

### 6.13 Bluetooth

**Bluetooth** es una **tecnología inalámbrica** destinada a conectar dispositivos que se encuentran a corta distancia. En el año 2000 aparecía en los primeros teléfonos móviles y en auriculares con manos libres sin cables. Actualmente, podemos encontrarla en smartphones, tabletas, móviles, ordenadores portátiles, ratones, teclados, impresoras, cámaras digitales, auriculares, televisores, receptores multicanal, videoconsolas, y drones entre otros productos.

### 6.14 Transmisores de radio control

El sistema de radio control es usado con bastante frecuencia en la comunicación de drones y su estación de control. Este sistema cuenta con un emisor, que se identifica como el transmisor, desde el cual efectuaremos una comunicación con un receptor situado en el cuadricoptero. El emisor genera una señal portadora modulada, como consecuencia del movimiento de un joystick (palanca de control) por parte del piloto. Por lo general, el sistema de modulación empleado suele ser FM, puesto que rechaza mejor las interferencias que la modulación AM. El receptor ha sido calibrado para operar en el rango de frecuencias en que el transmisor emite y, por lo tanto, el receptor decodificará la señal recibida y la enviará al controlador donde se harán los ajustes pertinentes.

Normalmente, los transmisores tienen un número específico de canales asociado al número de elementos a controlar en el dispositivo, es decir, si queremos controlar los tres ángulos de giro del cuadricoptero y su altura, necesitaremos 4 canales.

### **6.15 Sensores ultrasónicos**

El funcionamiento de estos sensores es similar al de un radar o un sonar. El emisor generará un pulso de alta frecuencia electromagnético que se propagará por el entorno. Cuando el pulso choca contra un objeto, parte de la señal rebota siendo captada por el receptor del sensor. Además, el sensor cuenta con un reloj que permite determinar el intervalo de tiempo transcurrido entre emisión y recepción, valor con el cual se puede estimar la distancia a la que se encuentra el obstáculo (a través de la velocidad de transmisión del sonido). Se usan ondas de alta frecuencia para aumentar el rango efectivo del sensor, así como para evitar su percepción en el oído humano.

### **6.16. Sensor Infrarrojo.**

Los sensores infrarrojos funcionan de manera similar a los de ultrasonido, con la particular diferencia de que emiten una señal infrarroja en vez de una onda de ultra sonido y estos se usan en combinación con los sensores ultrasónicos para cubrir la mayor área posible de cobertura del dron.

Hay elementos extras que pueden incorporarse en el cuadricoptero como son: cámaras, gps, protecciones contra impactos, etc.

### **6.17. Principio de operación del cuadricoptero**

La operación del cuadricoptero se basa en el movimiento combinado de sus hélices, de tal manera que un par de hélices giran en el sentido de las agujas del reloj y el otro par en sentido contrario. Las cuatro hélices trabajan al mismo tiempo para crear la fuerza de empuje necesaria para llevar al dispositivo hacia arriba. Variando el empuje que se ejerce con cada hélice se puede conseguir una estabilidad completa del cuadricoptero.

El peso total del cuadricoptero es soportado por la fuerza de empuje de cada uno de los motores y, si se modifica el par de cada uno de ellos, se podrá controlar el vuelo.

Un cuadricoptero tiene cuatro tipos de movimiento: guiñada (hacia la derecha o izquierda del eje vertical), inclinación (hacia la derecha o izquierda del eje longitudinal), cabeceo (rotación hacia delante o hacia atrás con respecto al eje transversal) y altitud (elevación en vertical).

Estos movimientos están controlados por la variación o el ajuste de la propulsión en cada hélice. Por ejemplo, si queremos que el cuadricoptero se incline o cabecee, deberemos incrementar la propulsión de una de las hélices y al mismo tiempo reducir la propulsión de la hélice opuesta.

Esto debe hacerse de forma simultánea y al mismo nivel, lo que producirá que la fuerza se divida en dos componentes, la horizontal y la vertical, que tendrá dos consecuencias: La primera es que el cuadricoptero empezará a volar en sentido contrario a la componente horizontal, y la segunda es que la componente vertical será más pequeña causada por la disminución de la fuerza. Esto provocará el descenso vertical del cuadricoptero. Para que esto no ocurra, es necesario incrementar la propulsión de las cuatro hélices.

En la Figura 120 se muestran los elementos que conforman al cuadricoptero.

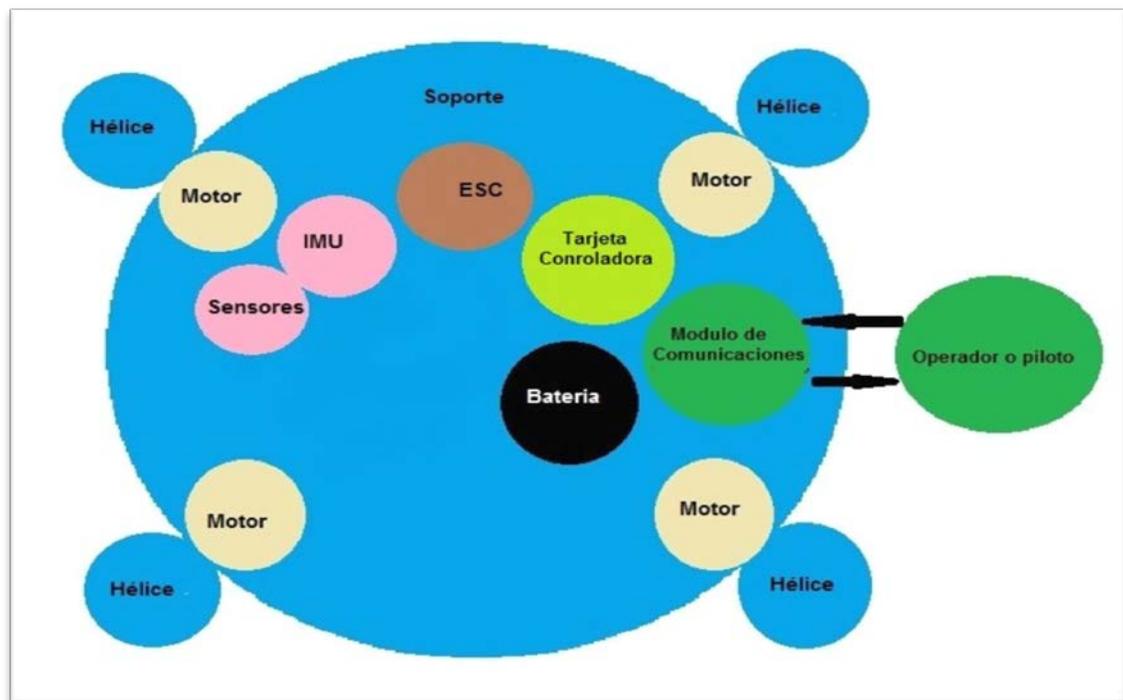


Figura 120..Elementos del cuadricoptero,

Ya se han dado a conocer los elementos esenciales del cuadricoptero. El siguiente punto a tratar consiste en definir cómo y dónde se puede colocar el seguidor solar de dos ejes en dicho dron.

Recordemos que el objetivo de esta tesis es aprovechar al máximo la energía solar que irradia a una celda o panel solar, mediante un seguidor solar de dos ejes y abastecer de energía a la o a las baterías de un dron, con el fin de recargarlas y de esa manera prolongar el tiempo de operación de dicho dron.

Para definir el cómo acoplar el seguidor solar al cuadricoptero es indispensable definir un nuevo elemento denominado cargador solar.

### **6.18 Cargador Solar**

Los cargadores solares permiten recargar las baterías de los dispositivos electrónicos con energía solar.

#### **6.19 ¿Para qué sirven los cargadores solares?**

Con los cargadores solares es posible recargar las baterías de los dispositivos electrónicos portátiles como IPODS, cámaras fotográficas digitales, Drones, teléfonos inteligentes portátiles, Mp3, y otros algunos otros dispositivos portátiles, mediante la energía eléctrica que proporciona una celda fotovoltaica.

Al permitir prescindir de los enchufes estos cargadores resultan de gran utilidad para usar los dispositivos portátiles en zonas alejadas de la red eléctrica general (en el campo o en zonas remotas) o cuando se esté en movimiento y no sea posible o práctico quedarse en un lugar fijo durante varias horas en lo que tarda en recargarse la batería del componente.

Al ser los cargadores solares también portátiles resulta muy sencillo transportarlos y ponerlos a funcionar casi en cualquier parte.

#### **¿Cómo funcionan los cargadores solares?**

Los cargadores solares utilizan la tecnología fotovoltaica para aprovechar el suministro de energía que proporciona una celda o panel solar. Mediante un conjunto de elementos electrónicos procesan la energía eléctrica de la celda y la acondicionan de tal manera que esta pueda usarse para cargar la batería de diversos dispositivos. Estos dispositivos son capaces de funcionar con casi cualquier tipo de luz, generando corriente eléctrica aún en días nublados o incluso en interiores de casas. Sin embargo, se

obtendrán los mejores resultados en días totalmente despejados cuando están expuestos a la radiación solar directa.

No es necesario poner a recargar los dispositivos electrónicos portátiles en los momentos en los que haya Sol, ya que estos cargadores solares cuentan con una batería interna que almacena la energía solar durante las horas del día. De esta manera, en el momento en que se desee, se puede conectar el dispositivo portátil y se recargará ya sea directamente con la luz del Sol o con la energía que quedó almacenada en su batería. La mayoría de los cargadores solares permiten también conectarlos a la red eléctrica para recargar su batería interna. Los cargadores solares son en esencia pequeñas instalaciones solares fotovoltaicas portátiles, semejantes a las que se emplean para la electrificación de casas o de instalaciones aisladas.

La Figura 121 esquematiza el principio de funcionamiento del cargador solar. Durante las horas del día el cargador solar puede abastecer tanto a los dispositivos electrónicos, como a su batería interna y en las horas donde no haya sol, es posible recargar los dispositivos gracias a la energía que quedó acumulada en la batería del cargador.

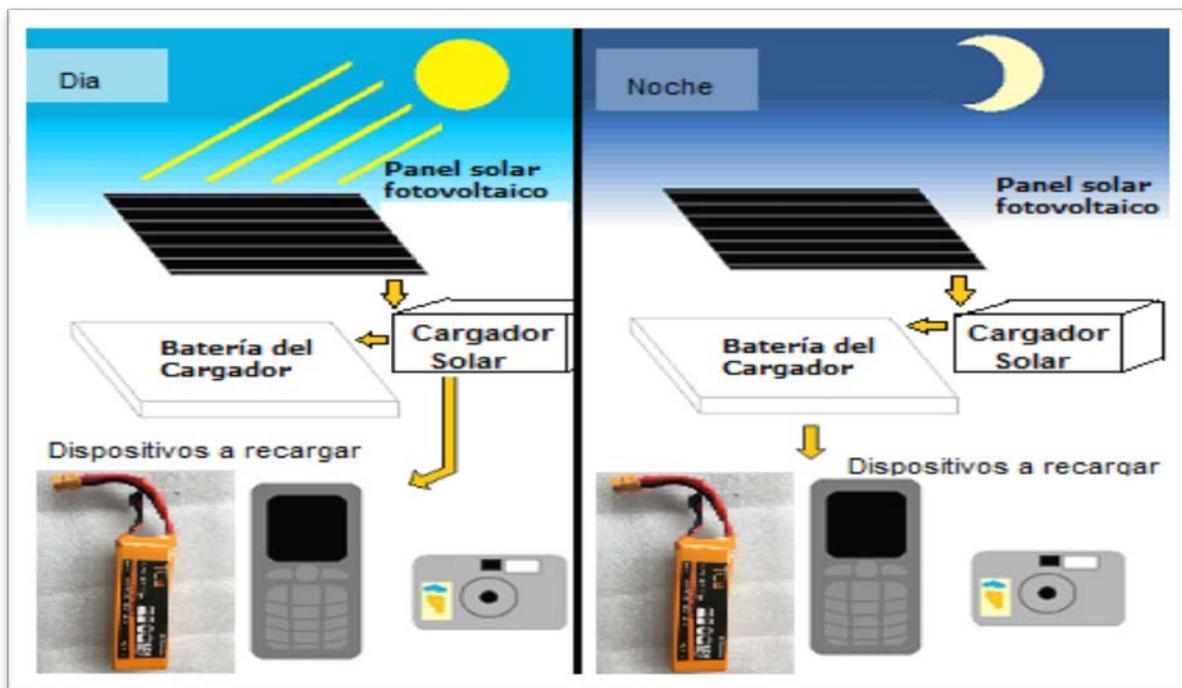
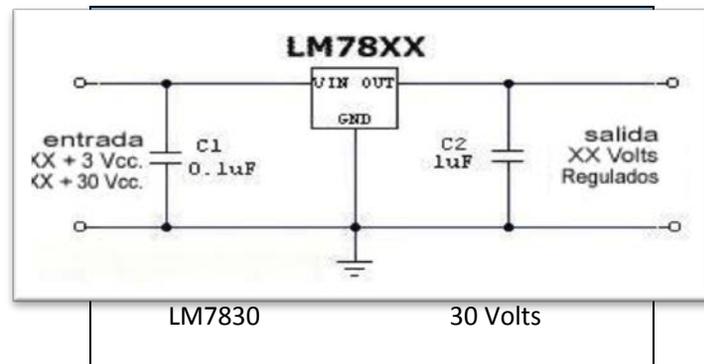


Figura 121. Diagrama de funcionamiento del cargador solar.

Un circuito base un cargador solar, muestra en la



para el diseño de puede ser el que se Figura 122.

Figura 122. circuito base para el diseño de UN CARGADOR solar.

Donde el circuito LM78XX puede ser cualquiera de los circuitos mostrados en la siguiente Tabla.11.

Tabla 11. Especificaciones del dispositivo de carga

Una vez definido el cargador solar y su principio de operación, se puede hacer uso de este dispositivo y combinarlo con el seguidor solar de dos ejes, de tal manera que la celda o panel solar del seguidor enviará energía eléctrica al cargador solar, el cual acondicionará la señal a las características eléctricas del dispositivo a cargar, en nuestro caso, la batería del cuadricoptero.

Anteriormente en la Figura 123 se mostraron los elementos generales internos del cuadricoptero. Ahora se verá cómo se modifica dicho esquema con la inclusión del seguidor solar de dos ejes y el cargador solar dentro de la estructura de dicho dron.

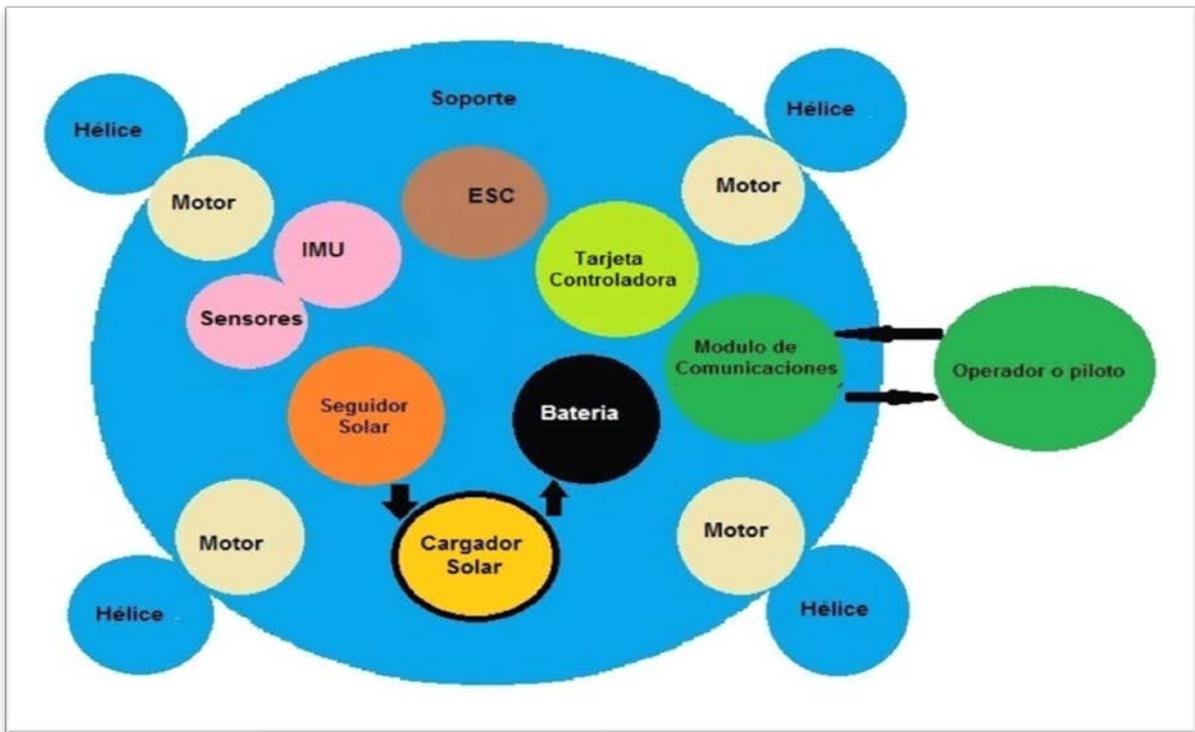


Figura 123. Elementos del cuadricoptero incluyendo el seguidor solar de dos ejes y cargador solar en la estructura del mismo.

Es importante destacar que, con la inclusión del seguidor solar de dos ejes y el cargador solar, se podrá abastecer y recargar la batería del cuadricoptero cuando está lo requiera. Veamos ahora donde se puede colocar físicamente el seguidor solar y el cargador mediante el siguiente esquema. Se ha generado mediante el programa solidworks una estructura que modela el chasis del cuadricoptero y también se ha modelado el seguidor solar en el software sketchup pro,

Lo anterior para poder explicar gráficamente donde se puede colocar el seguidor solar de dos ejes y el cargador solar dentro del soporte o chasis del cuadricoptero. Esto se ve ilustrado en la Figura 124.

Esquema de integración del seguidor solar al cuadricoptero

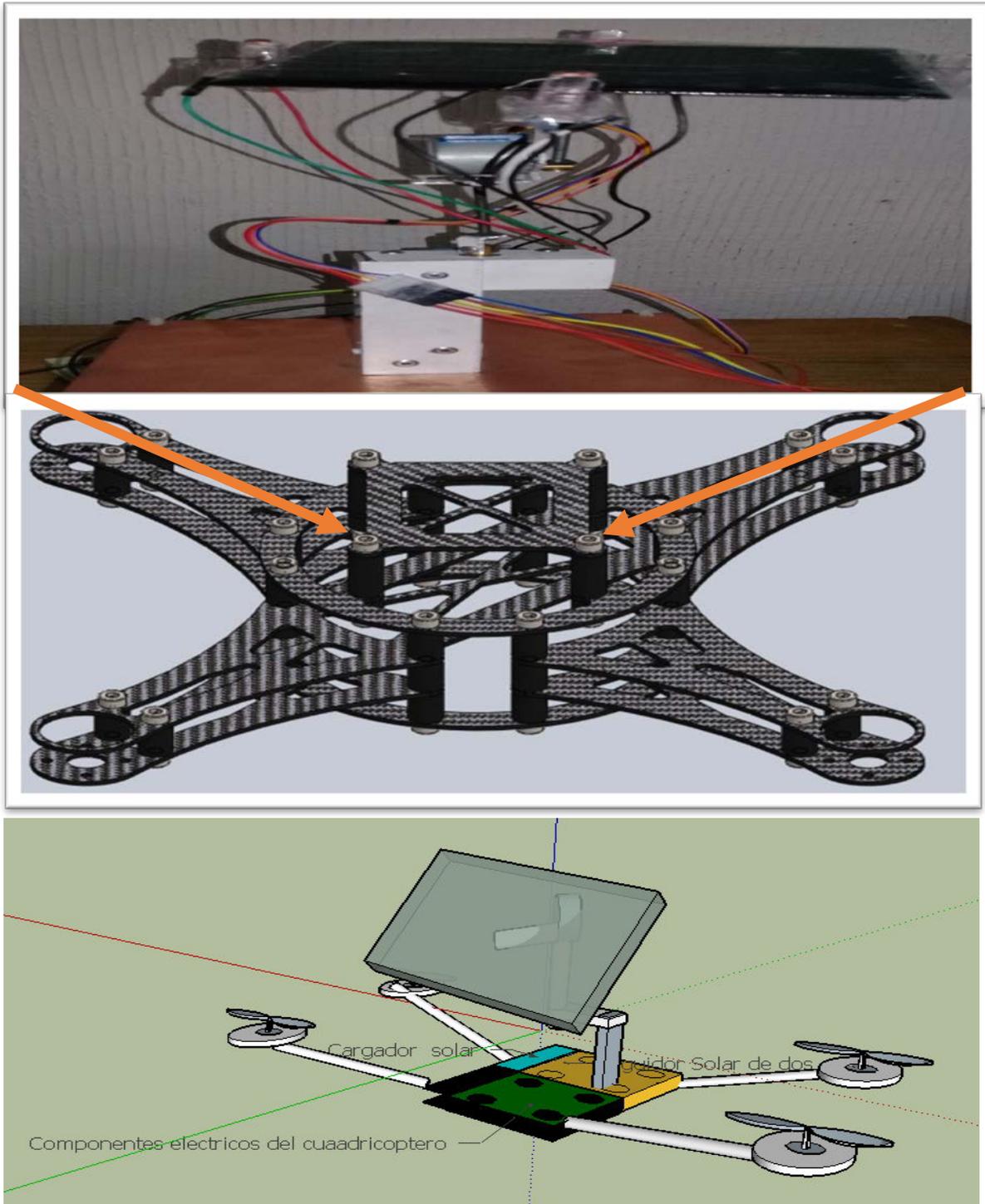


Figura 124. Diagrama de integración del seguidor solar de dos ejes al cuadricoptero

En la parte superior de la Figura 124 se puede apreciar el seguidor solar de dos ejes implementado en esta tesis, el cual tiene bajo su base una tarjeta que contiene todos circuitos que lo hacen funcionar. La base se forma con una placa fenólica ligera de forma cuadrada, en cada una de sus esquinas tiene cuatro orificios donde se insertan los tornillos que fijarán el seguidor solar a la estructura del cuadricoptero en su parte central. Esto lo ilustra en la parte media de la Figura 124. En la parte inferior de la Figura 124 podemos ver un modelo en 3D de cómo se vería montado el seguidor solar en el cuadricoptero.

Es importante mencionar que el tiempo que se requirió para realizar el presente trabajo de tesis se extendió más allá de lo planeado y por motivos del reglamento de titulación, que fija un tiempo para la culminación del trabajo de tesis, no se pudo montar físicamente el seguidor solar de dos ejes sobre un modelo físico de un cuadricoptero, sin embargo en este capítulo se han presentado los elementos necesarios para en un futuro montar físicamente el seguidor en algún dron profesional o de tipo industrial.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES.

El seguidor solar de dos ejes implementado en la presente tesis, cumplió en la práctica con el comportamiento previsto y los requerimientos que se plantearon en su etapa de diseño. Probando así que, efectivamente, los seguidores de su clase (seguidores de dos ejes de giro), pueden alcanzar cualquier orientación donde se encuentre el sol sobre nuestro planeta, orientando a la celda o panel solar en la dirección más adecuada, que corresponde a donde se capte la mayor cantidad de luz sobre la superficie de dichos elementos solares.

Durante la etapa de prueba al seguidor, se observó en el multímetro, que, al medir el voltaje y la corriente proporcionada a la carga de prueba, en la configuración de modulo solar fijo, que la magnitud de los valores de voltaje y corriente disminuían al momento de que el sol se desplazaba alejándose de la perpendicular de la celda solar, excepto para la lectura tomada a las 12:00 horas (medio día), debido que el sol se colocó encima de la celda, dando como consecuencia que los valores registrados fueran muy similares a los del seguidor solar. Sin embargo, fuera de esa hora las lecturas tomadas fueron siempre menores a las del seguidor solar.

En cuanto a las lecturas arrojadas por los sensores, el multímetro registró valores de resistencia mayores en ambas fotorresistencias, en comparación con los valores que fueron registrados en la configuración de seguidor solar.

De la prueba de empuje del viento podemos decir que es importante tomar en cuenta la fuerza del mismo a la hora del diseño e implementación, ya que, si no se construye un seguidor con una estructura resistente, se correrá el riesgo de que este se desarme o bien si no se da un adecuado diseño al soporte de la celda fotovoltaica, podría suceder que la celda se suelte del seguidor y se impacte con algún objeto, dañándose y quedando inservible. Recordemos que las celdas no son baratas y el remplazo de la misma acarrearía un gasto no contemplado, sobre todo si quisiera construirse una gran cantidad de seguidores.

El capítulo final de esta tesis planteo desde un inicio, proveer los conceptos necesarios y suficientes para entender el proceso de acoplamiento del seguidor solar de dos ejes a un dron, en este caso un cuadricoptero, Sin embargo, se pretendía construir un dron de esta clase o bien comprar uno y efectuar el acoplamiento físico y realizar las pruebas reales del seguidor con estos drones, sin embargo, por motivos de falta de tiempo no se pudo realizar esa etapa.

## CONCLUSIONES

Como primer punto hay que destacar que el objetivo de la presente tesis fue cumplido realizando para ello, el diseño e implementación física de un seguidor solar de dos ejes, con características adecuadas para acoplarse a un dron y fungir como fuente de alimentación de la batería de dicho dron.

El seguidor solar de dos ejes abordado en la presente tesis realizó satisfactoriamente el seguimiento del sol en las diversas coordenadas donde el astro se posicionaba.

El seguidor solar de dos ejes produce más energía eléctrica, que la que puede producir un módulo solar fijo.

Es de suma importancia contar con sistemas o elementos como es el seguidor solar de dos ejes o algunos otros sistemas, que se puedan usar en la adecuada y bien planeada explotación de la energía solar radiante, ya que esta energía está presente en mucha o en poca cantidad en casi cualquier parte del planeta.

El poder contar con un sistema real y funcional como es el seguidor solar de dos ejes de esta tesis, que sirva como elemento base, ayudará a desarrollar nuevos diseños y sistemas que requieran un abastecimiento eficiente de energía eléctrica a través de celdas solares.

La velocidad de respuesta del seguidor solar, se puede ajustar a las necesidades requeridas, con solo modificar el programa de control que se diseña para el PIC18F4550.

Las funciones especiales y recursos del PIC18F4550 como las que ofrece su convertidor A/D para el fácil manejo de señales analógicas, hacen que este microcontrolador sea el adecuado para el proyecto del seguidor solar de dos ejes desarrollado en esta tesis.

## APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Indudablemente el seguidor solar de dos ejes se puede mejorar. Por ejemplo, la estructura puede diseñarse con una estética de mayor calidad y con materiales que vayan acorde al modelo de cada dron al que se quiera abastecer de energía. La celda solar que se uso es una celda comercial, es lógico pensar que si se adquiere una de mayor calidad el rendimiento de esta sea mucho mayor a la actual.

Se puede mandar a construir a una empresa especializada en la fabricación de tarjetas electrónicas la placa PCB donde se montan los componentes electrónicos del seguidor solar de dos ejes, con la finalidad de que la tarjeta sea de más calidad y más ligera o bien que se quiera producir en serie.

Se podrían hacer pruebas utilizando diferentes motores para el seguidor, por ejemplo, usar uno de más potencia en el eje inferior y uno más pequeño en el eje superior y observar si el seguidor mejora su desempeño.

Se puede mandar a fabricar los ejes con acero de mayor calidad y menor diámetro.

Se podrían hacer pruebas destructivas sobre todo el seguidor o en los motores para determinar su límite de operación.

Ya que este proyecto de tesis aborda un tema que ha sido poco explotado, se puede usar como base, para que su tecnología pueda ser usada en diversas aplicaciones.

Como trabajos futuros se pretende construir un dron del tipo cuadricoptero a partir de la estructura que ya se diseñó en el capítulo 6 y también, construir un dron terrestre e insertar en ellos el seguidor solar de dos ejes de tal manera que su batería sea recargada por éste.

Se pretende construir un seguidor solar de dos ejes de mayores dimensiones con base en el desarrollado en esta tesis, para ser aplicado como fuente de alimentación de una casa habitación.

Por último, se desea probar la tecnología de película delgada fotovoltaica en el seguidor solar, en sustitución de la celda fotovoltaica convencional y observar y analizar como dicha película modifica la eficiencia del seguidor solar de dos ejes.

## Bibliografía y Mesografía

- [1] Miguel García Reyes. *Estados unidos, petróleo y geopolítica: las estrategias petroleras como un instrumento de reconfiguración geopolítica*. 2005. México, D.F: Plaza y Valdés, S.A. de C.V. ISBN:970-722-351-0.
- [2] Erminia silvas. *Energías Renovables: definición y principales tipos*. [ febrero de 2012]. Disponible en web <http://www.capitaldelabiodiversidad.es/2012/02/energias-renovalbles-definicion-y.html>.
- [3] Robert L.Boylestad. Louis Nashelsky. *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos Electrónicos y dispositivos electrónicos*. Décima edición. México. Estado de México: Pearson, 2009. Traducción de Rodolfo Navarro Salas.ISBN:978-607-442-292-4.
- [ 4 ] Donald A. Neamen . *Microelectronics: Circuit Analysis and Design, fourth edition*. McGraw-Hill , 4th ed 2010. ISBN 978-0-07-338064-3—ISBN 0-07-338064-4.
- [5] SENER/ GIZ. *Programa de Fomento de Sistemas Fotovoltaicos en México (ProSolar)*, México, D.F., Julio de 2012
- [6] Centro meteorológico nacional.
- [7] Rodríguez Israel. (2015, 14 de diciembre.16:24). Aspira México a ser líder en energía solar en AL. *La jornada en línea*.
- [8] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Jose Luis Esteban Herreros. *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Madrid, 2015 Depósito Legal: M. 4519-2015
- [9] Meca solar. *Seguidores Solares de alta tecnología*. MS-2E TRACKER
- [10] Adalberto Tejeda Martínez, Gabriel Gómez-Azpeitia, Compila *Prontuario solar de México* Dirección General de Publicaciones © Universidad de Colima, 2015© Universidad veraCrUzana, Abril de 2015. ISBN: 978-607-8356-45-4.
- [11] John A. Duffie (Deceased), William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada. Fourth Edition. ISBN 978-0-470-87366-3 (cloth); ISBN 978-1-118-41541-2 (ebk); ISBN 978-1-118-41812-3 (ebk); ISBN 978-1-118-43348-5 (ebk); ISBN 978-1-118-67160-3 (ebk).

[12] Ibrahim, Dogan: *Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F series/Dogan Ibrahim*. British Library Cataloguing-in-Publication Data. ISBN: 978-0-7506-8611-2

[13] Creación del primer proyecto en mikroC PRO for PIC. MikroElektronika Software and hardware solutions for embedded world, 2009

[14] Eduardo J. Carletti. *Motores paso a paso características básicas*. © 2007, 2016 Robots Argentina -  
Contacto: [e.carletti@gmail.com](mailto:e.carletti@gmail.com)

[15] Takashi Kenjo. *Stepping motors and their microprocessor controls*. Oxford Science Publications

[16] Glenis Moreno y Fernando Martínez. *Mediciones industriales*. Disponible en web:  
[http://martinezmorenomedicionesind.blogspot.mx/2007/06/fotoresistencia-ldr\\_16.html](http://martinezmorenomedicionesind.blogspot.mx/2007/06/fotoresistencia-ldr_16.html).

[17] <http://fadisel.com/docs/C-2795.pdf> hoja de datos de fotorresistores empresa CEBEK.

[18] Gallardo Puertas Omar. *Fabricación de placas de circuito impreso con Proteus*. Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales Valladolid, Septiembre 2015.