

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN
SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR PARA UN
AEROMODELO SPIRIT**

SERGIO ANDRÉS ARDILA GÓMEZ

JULIAN ENRIQUE TRILLOS GÓMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN
SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR PARA UN
AEROMODELO SPIRIT**

SERGIO ANDRÉS ARDILA GÓMEZ

JULIAN ENRIQUE TRILLOS GOMEZ

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

Director

CARLOS BORRAS PINILLA

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por su infinito amor.

A mi madre Luz Helena Gómez por su amor, paciencia y comprensión.

A mi Padre Luis Enrique Trillos por su cariño y guía.

A María Camila Domínguez por su ayuda, comprensión y cariño.

Julián Enrique Trillos Gómez

DEDICATORIA

A Dios primeramente, a mis padres Raquel Gómez y Ernesto Ardila por su apoyo incondicional en éste proyecto de vida, a mis hermanos por su gran ayuda y sus consejos; por último a todos los compañeros y amigos que creyeron en mí

Sergio Andrés Ardila Gómez

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Carlos Borrás Pinilla, docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su confianza, colaboración, conocimiento, formación académica y apoyo en el desarrollo de este proyecto de grado.

Al Ingeniero en formación Juan Camilo Santana, por su gran ayuda y conocimiento; Al experto aeromodelista Marnix Van Geert, por la colaboración prestada.

A todos nuestros amigos y compañeros de la Universidad por su amistad.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	26
1. ENERGIAS RENOVABLES.....	30
1.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE	30
1.2 NORMAS QUE REGULAN LA SEGURIDAD AMBIENTAL Y USO DE ENERGÍA EN COLOMBIA	31
1.2.1 Protocolo de kioto	31
1.2.2 Convenio de viena	32
1.2.3 ISO 50001	33
1.2.4 Ley ure 697 del 2001	33
1.3 EL SOL COMO FUENTE RENOVABLE	33
1.3.1 Energía solar fotovoltaica.....	33
1.3.2 Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica	34
1.3.3 Sistemas fotovoltaicos en colombia	36
2. CELULAS FOTOVOLTAICAS.....	38
2.1 HISTORIA DEL ARTE	38
2.2 CARACTERISTICAS GENERALES	40
2.3 EL EFECTO FOTOVOLTAICO	42
2.4 CLASIFICACION DE LAS CELULAS FOTOVOLTAICAS	45
2.4.1 Clasificación según la estructura del material	45
2.4.2 Según su configuración.....	46
2.4.3 Según el método de fabricación.....	47
2.5 Arreglo de celdas fotovoltaicas	48
2.5.1 Características eléctricas	52
3. CLASIFICACION Y TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS.....	60
3.1. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES	61
3.1.1 Tecnología de fabricación de celdas solares de si-sc.....	61

3.1.1.1 Celdas de si-sc	61
3.1.1.2 Producción de silicio monocristalino	62
3.1.1.3 Fabricación de celdas de si-sc.....	62
3.1.1.4 Fabricación de si-mc.....	63
3.1.1.5 Celdas de si-sc y si-mc	63
3.1.2 Celdas de película delgada.....	64
3.1.2.1 Celdas de si-a.....	64
3.2 OTRAS CELDAS SOLARES.....	66
3.3 EFICIENCIA	67
4. VEHICULOS AEREOS REMOTOS NO TRIPULADOS.....	71
4.1 DEFINICION Y CLASIFICACION DE UAV	73
4.2 APLICACIONES GENERALES DE LOS UAV's	77
4.3 LOS UAV's Y LA AUTONOMIA DE VUELO	79
4.4 PROYECTOS DE UAV's MUNDIALES	81
5. VEHICULOS AEREOS Y LA ENERGIA SOLAR.....	87
6. CARACTERISTICAS SOLARES.....	98
6.1 IRRADIACION: EL SOL (HORA SOLAR PICO)	
.....	101
6.2 DIA SOLAR PROMEDIO	
.....	101
6.3 LA TRAYECTORIA SOLAR Y LA UBICACIÓN SOBRE LA TIERRA	102
6.3.1 Factores dependientes del movimiento de la tierra.....	103
6.3.1.1 Angulo de declinación δ	104
6.3.1.2 Angulo de inclinación horaria ω	106
6.3.2 Factores dependientes de la ubicación en la tierra.....	107
6.3.2.1 Latitud terrestre.....	108
6.3.2.3 Azimut superficial de pared (γ_p).....	109
6.3.2.4 Azimut solar (γ_s).....	109

6.3.3	Calculo de inclinación de radiación solar θ para diferentes superficies	110
6.4	DATOS DE INSOLACIÓN	111
6.5	MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN Y EL BRILLO SOLAR.	112
6.5.1	Piranometro	112
6.5.2	Pirheliómetro.....	113
6.5.3	Piranografo	114
6.5.4	Heliógrafo.....	114
6.6	MAPAS Y TABLAS DE RADIACIÓN SOLAR	115
6.6.1	Mapas de radiación solar	115
6.6.1.1	Radiación solar mundial.....	115
6.6.1.2	Radiación solar en colombia.....	116
6.6.2	Tablas de radiación solar	118
7.	DISEÑO TOTAL Y COMPONENTES DEL SISTEMA.....	120
7.1	SELECCIÓN Y CONFIGURACION DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS ...	121
7.1.1	Celdas seleccionadas	122
7.1.2	Reguladores de carga.....	129
7.1.2.1	Funciones del regulador.....	130
7.1.2.2	Selección del regulador.....	130
7.1.3	Diodos.....	131
7.2	SELECCIÓN Y CONSTRUCCION DEL AEROMODELO.....	133
7.2.1	Consideraciones iniciales de la selección	134
7.2.2	Requerimientos del vehículo	139
7.2.3	Conceptos generales del aerodelismo	140
7.2.3.1	Las superficies aerodinámicas de los aviones.....	140
7.2.3.2	Perfil alar.....	142
7.2.4	Dimensiones generales del aerodelo spirit	145
7.2.5	Componentes y sistema de control del avion.....	150
7.2.5.1	Sistema equipo de radio control.....	150
7.2.5.2	Servomotores.....	155

7.2.5.3 Motores de aerodelismo.....	159
7.2.5.4 Speed control.....	161
7.2.5.5 Hélice	164
7.2.6 Modelamiento cad del aerodelo spirit	165
7.3 CARACTERISTICAS Y SELECCIÓN DE ACUMULADORES	181
7.3.1 Características de acumuladores.....	182
7.3.1.1 Profundidad de descarga	182
7.3.1.2 Corriente como valor fraccional	184
7.3.1.3 Voltaje de salida.....	185
7.3.1.4 Densidad del electrolito.....	186
7.3.1.5 Nivel o estado de carga	186
7.3.1.6 Eficiencia.....	188
7.3.1.7 Temperatura	188
7.3.1.8 Envejecimiento.....	189
7.3.2 Clases de baterías en aerodelismo.....	189
7.3.3 Especificaciones de la batería seleccionada.....	191
7.4 CAMARA DE VIDEO DE TRANSMISION EN VIVO	197
7.4.1 Arquitectura del sistema de transmisión de video.....	199
7.4.2 Componentes del sistema.....	200
7.4.3 Características de la mini cámara.....	200
7.5 SISTEMA DE SENSADO DE INFORMACION	202
7.5.1 Tarjeta arduino uno.....	204
7.5.2 Módulos Xbee pro XBP 24-AWI-001.....	206
7.5.3 Sensor de corriente ACS 714	208
7.5.4 Divisor y sensor de voltaje LM 235	214
7.6 ESTADO FINAL DEL PROTOTIPO.....	217
7.6.1 Esquema general.....	217
7.6.2 Realización de pruebas del prototipo.....	220
CONCLUSIONES.....	229

RECOMENDACIONES.....236
BIBLIOGRAFÍA.....237

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contribución de diferentes focos del CO ₂ al efecto invernadero	26
Figura 2. Aumento de concentración de CO ₂ desde los años 60.....	31
Figura 3. Distribución países según cambio climático protocolo de Kioto....	32
Figura 4. Satélites artificiales.....	34
Figura 5. Panel Fotovoltaico en zona rural	35
Figura 6. Morral con celdas fotovoltaicas para almacenar carga.....	36
Figura 7: Panel Fotovoltaico básico.....	42
Figura 8: Funcionamiento Fotovoltaico y agentes de dopado	43
Figura 9: Efecto fotovoltaico con Silicio tipo P.....	44
Figura 10: Conexión en serie de un sistema de celdas fotovoltaicas.....	49
Figura 11: Conexión en paralelo de un sistema de celdas fotovoltaicas	50
Figura 12. La conexión de celdas fotovoltaicas serie paralelo	51
Figura 13. Variación de la potencia producida por un panel para tres diferentes irradiaciones, en función de la tensión entre bornes.....	54
Figura 14: Curva I – V de un panel fotovoltaico	55
Figura 15. Efecto de la variación de la intensidad radiante (medida de milivatios por cm ²) sobre la curva I-V.	57
Figura 16. Efecto de la variación de la temperatura, manteniendo constante la intensidad radiante, sobre la curva I-V.	57
Figura 17. Grafica que muestra la variación relativa según la temperatura de la célula de la corriente, tensión y potencia.....	59
Figura 18. Sistema fotovoltaico	60
Figura 19. Clasificación de los UAV de acuerdo al tipo de despegue.....	75
Figura 20. Espectro de los tipos de UAVs.	76
Figura 21. UAV LFPV	81
Figura 22. Hermes 450.....	82
Figura 23. UAV-HADA.....	83

Figura 24. Scan Eagle	84
Figura 25. Quadricoptero GmbH.....	85
Figura 26. UAV NAVIGATOR X1.....	85
Figura 27. Solar Challenger 1.....	88
Figura 28. Solar Challenger 2.....	89
Figura 29. Sunseeker	90
Figura 30. Icare II.....	91
Figura 31. Solong.....	92
Figura 32. Pathfinder	94
Figura 33. Pathfinder Plus.....	95
Figura 34. El Zephyr.....	97
Figura 35. Espectro de la radiación solar	99
Figura 36. Fracción de energía solar contenida en la parte del espectro por encima de la longitud de onda λ.....	100
Figura 37. Irradiación y horas solares pico durante día soleado	102
Figura 38. Movimiento aparente del sol en la bóveda celeste en función de la hora del día y la época del año	103
Figura 39. Movimientos de rotación, precesión y nutación de la tierra.	104
Figura 40. Declinación de la tierra respecto al plano elíptico	105
Figura 41. Variación del ángulo de declinación sobre una superficie en latitud cero.....	106
Figura 42. Variación del ángulo horario ω.....	107
Figura 43. Latitud terrestre.....	108
Figura 44. Inclinação de una superficie respecto a la horizontal	109
Figura 45. Azimut solar y azimut de pared para una superficie inclinada. .	110
Figura 46. Angulo incidente de la radiación sobre superficie inclinada.	111
Figura 47. Piranómetro.....	113
Figura 48. Pirheliómetro.....	113
Figura 50. Actinógrafo.....	114
Figura 51. Heliógrafo.	115

Figura 52: Irradiación solar promedio global.	116
Figura 53. Promedio multianual radiación solar en Colombia.	117
Figura 54. Esquema del sistema Electrico de la Aeronave (general)	121
Figura 55. Componentes de un sistema DC.	122
Figura 56. Componentes de un sistema AC.	122
Figura 57. Celdas Solares Flexibles Para Aeromodelismo	124
Figura 58. Curva I-V del panel	125
Figura 59. Primer arreglo FV de prueba	126
Figura 60. Segundo arreglo FV de prueba	127
Figura 61. Tercer arreglo FV de prueba	128
Figura 62. Regulador de Carga elaborado	131
Figura 63. Instalación de diodos de bypass en un sistema Fotovoltaico.	132
Figura 64. Instalación de diodos de bloqueo en un arreglo de módulos en serie.	133
Figura 65. Aeromodelo Tipo Zaggy.	136
Figura 66. Aeromodelo Tipo Spirit	137
Figura 67. Aeromodelo Propuesto tipo Spirit	138
Figura 68. Geometría de las superficies sustentadoras	141
Figura 69. Torsión o giro relativo de las cuerdas.	142
Figura 70. Geometría de un perfil alar	144
Figura 71. Planos de Aeromodelo	146
Figura 72. Perfil Alar tipo NACA 4415	147
Figura 73. Plano Ligeramente Ahusado	147
Figura 74. Ángulos Diedros	148
Figura 75. Diedros del Aeromodelo Spirit	149
Figura 76. Fuselaje del Aeromodelo Spirit	149
Figura 77. Superficies de Control del Aeromodelo Spirit	150
Figura 78. Esquema del Equipo de Radio Control	151
Figura 79. Equipo de radiocontrol de 6 canales	152
Figura 80. Circuitos del equipo transmisor.	153

Figura 81. Receptor del Radio Control.....	153
Figura 82. Esquema de un receptor de conversión simple.....	154
Figura 83. Mecanismo de Transmisión de Movimiento y Fuerza.....	155
Figura 84. Conexión de las diferentes marcas.	156
Figura 85. Servo motor	158
Figura 86. Esquema del Funcionamiento de Motor Brushless	160
Figura 87. Motor Brushless.....	161
Figura 88. Speed Control Turnigy AE-25A.....	163
Figura 89. Hélice Plegable de 8 x 4.5.....	165
Figura 90. Alas de Aeromodelo Spirit	166
Figura 91. Fuselaje del Aeromodelo Spirit.....	167
Figura 92. Empenaje del Aeromodelo Spirit	168
Figura 93. Tren de Aterrizaje y Hélice del Aeromodelo Spirit	169
Figura 94. CAD del Aeromodelo Spirit	170
Figura 95. Proceso de Corte y Pegado del Fuselaje	176
Figura 96. Corte y Pegado del Empenaje o Cola del Aeromodelo	177
Figura 97. Corte y Armado de las Alas del Aeromodelo	178
Figura 98. Forrado y Estado Final del Aeromodelo	180
Figura 99. Capacidad de descarga de una batería.....	183
Figura 100. Variación en el voltaje de una batería de 12V Pb-acido 25°C.....	185
Figura 101. Variacion en el voltaje de una bateria 12V Pb-acido 1°C.....	186
Figura 102. Calculadora de baterías Li-po	192
Figura 103. Tabla de la batería por el fabricante	193
Figura 104. Batería LiPo de 1000 mAh Turnigy	195
Figura 105. Cargador de Baterías Variable	196
Figura 106. Sistemas de Transmisión de Video	197
Figura 107. Batería de 9 voltios.	198
Figura 108. Secuencia del manejo de Información	199
Figura 109. Mini cámara	201
Figura 110. Componentes Cámara	202

Figura 111. Entorno Arduino.....	204
Figura 112. Arduino UNO	205
Figura 113. Módulo Xbee Pro.....	207
Figura 114. Xbee Explorer	208
Figura 115. Montaje Tipico ACS714	210
Figura 116. Voltaje de Salida Vs Corriente Sensada.....	212
Figura 117. Arreglo de aumento a 610mV/A	212
Figura 118. Grafica de caracterización del sensor de corriente	213
Figura 119. Conexiones LM235.....	214
Figura 120. Montaje de Resistencias divisoras.....	215
Figura 121. Grafica de caracterización del sensor de voltaje.	216
Figura 122. Esquema Electrónico General del Proyecto.....	217
Figura 123. Distribución de elementos dentro del aeromodelo.....	218
Figura 124. Gráfico de descarga de la batería sin implementación de celdas Solares (Prueba # 1)	220
Figura 125. Prueba sin celdas en tierra	221
Figura 126. Gráfico de descarga de la batería con la Implementación de las celdas solares (Prueba # 2).....	222
Figura 127. Prueba con celdas en tierra	223
Figura 128. Gráfico de comparación de descarga de la batería pruebas 1 y 2	223
Figura 129. Gráfico de Corriente generada durante la Prueba # 2	224
Figura 130. Suministro de Potencia durante la Prueba # 2	225
Figura 131. Gráfico de descarga de la batería en vuelo sin la implementación de celdas solares (Prueba # 3).....	226
Figura 132. Gráfico de descarga de la batería Prueba # 4.....	227
Figura 133. Gráfico de comparación de descarga de la batería pruebas 3 y 4	228
Figura 134. Gráfico de corriente generada por las celdas solares durante la Prueba # 4.....	229

Figura 135. Suministro de Potencia durante la Prueba # 4230
Figura 136. Preparacion del aeromodelo previa al vuelo.231

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadro comparativo de eficiencias de diferentes tipos de celdas.	67
Cuadro 2. Eficiencias de diferentes tipos de celdas de silicio. (1999/2000) ...	68
Cuadro 3. Eficiencia de diferentes tipos de celdas de película delgada.....	69
Cuadro 4. Eficiencias con tecnología de película delgada con la mayor área posible.	70
Cuadro 5. Eficiencias de otros tipos de celdas.....	70
Cuadro 6. Clasificación de UAVs (alcance, altitud, autonomía).	75
Cuadro 7. Clasificación de UAVs dependiendo del nivel de autonomía.	77
Cuadro 8. Datos físicos de cada aeronave	96
Cuadro 9. Radiación Solar en las principales ciudades de Colombia	119
Cuadro 10. Características del Aeromodelo a Seleccionar.....	135
Cuadro 11. Rangos de Velocidad según el Régimen.....	145
Cuadro 12. Características del Receptor	154
Cuadro 13. Características del Servo HK 15148.....	158
Cuadro 14. Características Técnicas del Motor Turnigy 2627	161
Cuadro 15. Características Técnicas del Speed Control Turnigy.....	163
Cuadro 16. Propiedades físicas del Icopor (poliestireno expandido).	171
Cuadro 17. Propiedades Físicas de la Madera Balsa.....	172
Cuadro 18. Propiedades Físicas de la Fibra de Vidrio.....	174
Cuadro 19. Características de las distintas baterías recargables	182
Cuadro 20. Características principales de Baterías.....	190
Cuadro 21. Necesidad de emplear baterías	196
Cuadro 22. Especificaciones mini cámara.	198
Cuadro 23. Especificaciones técnicas de la mini cámara.	202
Cuadro24. Datos generales Arduino UNO	205
Cuadro 25. Guia de Selección ACS714	210

Cuadro 26. Performance ACS714.....211
Cuadro 28. Tabla de datos de caracterización del sensor de voltaje.....216

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: PLANOS GENERALES DE DISEÑO DE UN AEROMODELO TIPO SPIRIT	239
ANEXO B: ELABORACION Y MANEJO DEL PROGRAMA DE SENSADO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DEL SISTEMA.....	243
ANEXO C: TABLAS CON LOS DATOS DE LA HORA, RADIACIÓN DIRECTA Y RADIACIÓN DIFUSA REGISTRADOS EN FEBRERO DE 2012 EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, SEDE BUCARAMANGA.....	247
ANEXO D: DATOS TOMADOS DE LAS PRUEBAS RESPECTIVAS EN DIA SOLEADO, CON EL USO Y SIN EL USO DE LAS CELDAS FOTOVOLTACIAS	253

RESUMEN

TITULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR PARA UN AEROMODELO SPIRIT*

AUTORES:

Sergio Andrés Ardila Gómez
Julián Enrique Trillos Gómez.**

PALABRAS CLAVES:

Celdas Fotovoltaicas, Aeromodelismo, Energía Solar, diseño, energía alternativa.

DESCRIPCIÓN:

Hoy en día la búsqueda de energías alternativas que permitan suavizar el impacto ambiental causado por las energías convencionales se ha convertido en un amplio campo de estudio a nivel ingenieril en búsqueda de la sostenibilidad energética.

Teniendo en cuenta que el sol es una fuente renovable de energía y cada día su potencial aumenta debido a sus grandes avances, desarrollo de nuevas tecnologías, reducción de costos de producción y el aumento en la eficiencia de estos sistemas, se decidió establecer como objetivo del proyecto de grado utilizar este tipo de energía y acoplarla en sistemas de aeromodelismo diseñando así un sistema capaz de suplir su consumo energético mejorando su eficiencia, desempeño y costo de uso. El sistema a diseñar se hará debido a la necesidad de aumentar la eficiencia de vuelo de los aeromodelos que se usan para monitoreo de campos o espionaje y la mejor manera de hacer esto es utilizando recursos renovables, que sean amigables con el medio ambiente y que por más que tengan una gran inversión, la ganancia se verá a futuro. Además se construyó el aeromodelo que muestre en mayor escala el efecto del sistema energético y así llevar al máximo el aumento en la eficiencia.

Después de realizada la investigación se pudo evidenciar que con la presencia de un buen día soleado es decir con una radiación de 800W/m² promedio, la eficiencia del aeromodelo es bastante alta logrando incluso por momento mantenerse en vuelo sin consumir energía es decir, lo que carga, lo descarga. Al realizar la comparación con el uso del aeromodelo sin sistema fotovoltaico se observa que el gasto de energía es más elevado y se tiene una eficiencia realmente baja. Por último, se establece un referente en cuanto al diseño de aeromodelos con celdas fotovoltaicas y su aplicación.

*Proyecto de grado

**Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONTRUCCTION OF AN EXPERIMENTAL PROTOTYPE OF A SOLAR ENERGY UTILIZATION SYSTEM FOR A SPIRIT MODEL AIRPLANE*

AUTHORS:

Sergio Andrés Ardila Gómez
Julián Enrique Trillos Gómez**

KEY WORDS:

Photovoltaic cells, FV, Aerodelism, Solar Energy, Design, Renewable energy.

DESCRIPTION:

Today the search for alternative energies to be easy with environmental impact produced by conventional energy has become a broad field of engineering-level study in pursuit of energy sustainability.

Given that the sun is a renewable source of energy and every day increases their potential because of its great advances, developing new technologies, reducing production costs and increased efficiency of these systems, it was decided to aim for the graduation project using this type of energy and use it in designing model aircraft systems and a system able to meet its energy consumption by improving efficiency, performance and cost of use. The system will be designed by the need to increase the efficiency of flying model aircraft used for monitoring or spying fields and the best way to do this is using renewable resources that are friendly to the environment and even though they have a large investment, the gain will be seen in the future. The project also built the model airplane that can shows the bigger effect of the energy system and thus to maximize the increase in efficiency.

After completion of the investigation it became clear that the presence of a good sunny day is an average 800W/m² radiation, the efficiency of the aircraft is quite high, making it even stay aloft without consuming energy is, while it charges it discharges the battery. When comparing the use of the airplane without PV system shows that energy expenditure is higher and has a really low efficiency. Finally, establishing a benchmark for the design of model aircraft with photovoltaic cells and its application.

• Graduation Project

•• Faculty of Physics-Mechanic Engineerings, School of Mechanic Engineering, Director Carlos Borrás Pinilla

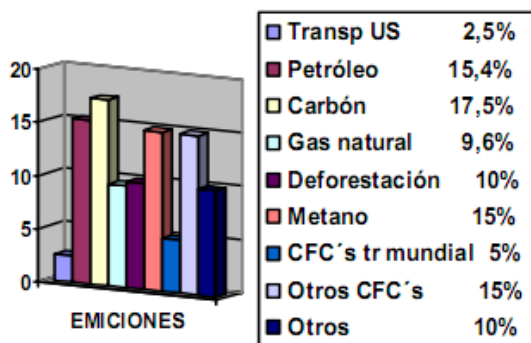
INTRODUCCIÓN

A través de la historia el ser humano se ha enfocado o caracterizado por estar en la continua búsqueda de controlar, utilizar y aprovechar al máximo las diversas formas de energía presentes en nuestro planeta.

Actualmente la demanda energética se encuentra en constante crecimiento, debido a que es destinada para satisfacer requerimientos tales como: comerciales, industriales, domésticos y de transporte, entre otros. Las tecnologías utilizadas actualmente para el consumo de esta energía poseen baja eficiencia de conversión energética y además dejan como resultado gran producción de residuos (emisiones) que generan un gran impacto negativo en el medio ambiente.

Uno de los principales componentes generadores del efecto invernadero, son las emisiones de dióxido de carbono; estas emisiones son producto generalmente del consumo de combustibles fósiles, sin olvidar que existen otros factores como la deforestación, las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC's), las emisiones de los procesos naturales como el metano y otros.

Figura 1. Contribución de diferentes focos del CO₂ al efecto invernadero



Fuente: Fuentes de Energía

- Utilizar las fuentes de energías renovables presentes.
- Desarrollar procesos de mayor eficiencia en la conversión energética, políticas energéticas, así como una cultura amigable con el ambiente.

Para cumplir con esto se requiere tanto del apoyo del estado, como el compromiso de la sociedad, para poder generar un sistema con ciencia y tecnología más acorde con los requerimientos productivos, las necesidades de la sociedad y sobre todo amigable con el ambiente.

Una de las tecnologías más congruentes para enfrentar este reto son las Celdas Fotovoltaicas, al ser una tecnología eficiente, silenciosa, limpia, muy versátil e inagotable a escala humana.

Retomando el tema de las emisiones de CO₂, se observa que el sector del transporte juega un papel importante en este tema, por ende una de las ideas que más toma auge en estos días es la implementación de sistemas de energía renovable en los diversos equipos de transporte, con el fin de mejorar su eficiencia, cambiar gradualmente los combustibles utilizados y sobre todo conservar el ambiente.

Para este caso particular se enfocará el estudio en el sector del transporte, específicamente en el transporte aéreo, el cual va en constante crecimiento a través de los días; cada vez hay más aerolíneas, así como vuelos en las diferentes partes del mundo. Este aumento del sector, conlleva al aumento de las emisiones de contaminantes productos de la combustión, arrojadas por las aeronaves.

Visualizando la gran superficie externa que poseen los aviones, la cual entra en contacto directo con la radiación solar, se desea implementar celdas fotovoltaicas en estas superficies, con el fin de suplir las demandas energéticas de la aeronave de una manera autónoma y renovable.

Una forma de dar los primeros avances de este tipo de tecnología en dicha aplicación será utilizando prototipos a escala de las aeronaves reales, los cuales

se conocen como “vehículos aéreos no tripulados” UAV (Unmanned Aerial Vehicle), los cuales también han tomado gran auge en los últimos años debido a los diversos campos de desempeño como en el ámbito militar, en monitoreo de campos, entre otros.

Se revisarán algunos de los aspectos relacionados con las tecnologías de las celdas fotovoltaicas y de los UAV (Unmanned Aerial Vehicle), en especial el sistema energético.

Se realizará el proceso de diseño del sistema energético de la aeronave, el cual implica la implementación de las celdas fotovoltaicas sobre la superficie alar del mismo, como fuente de energía renovable para suplir parte del consumo de energía. Además se acoplará un sistema de monitoreo en tiempo real, para hacer seguimiento al comportamiento de la carga y descarga de la batería en cada instante, con y sin el uso de la fuente de energía renovable. Siguiendo con el desarrollo, se incorporará un equipo de video de transmisión en vivo, haciendo las veces de una carga muerta del sistema y cumpliendo con el objetivo de las aplicaciones a gran escala.

Finalmente se realizarán una serie de pruebas tanto en tierra como en vuelo en cuanto a consumo energético del sistema y de los equipos de captura de video.

La Universidad Industrial de Santander en conjunto con la escuela de Ingeniería Mecánica y el grupo de investigación DicBot, ven la necesidad de plantear proyectos investigativos que permitan desarrollar las últimas tecnologías en la obtención de energías no convencionales y promocionar proyectos con el fin de estudiar el comportamiento de sistemas de captación solar, entre ellos, las celdas fotovoltaicas.

En lo relacionado con este proyecto de celdas fotovoltaicas y aeromodelismo, los capítulos tendrán la siguiente información al respecto.

Capítulo 1. En este capítulo se desarrolla una breve descripción y clasificación de las energías renovables desarrollando un énfasis en la energía solar

Capítulo 2. En este capítulo se describen las celdas fotovoltaicas, estableciendo método de evaluación de eficiencia y describiendo algunas aplicaciones y métodos de fabricación

Capítulo 3. En este capítulo se realiza un análisis más exhaustivo de las celdas fotovoltaicas así como sus diferentes tipos y características de cada una con el fin de entenderlas mejor y seleccionar las adecuadas.

Capítulo 4. En este capítulo se trata de una introducción a los vehículos aéreos no tripulados junto a sus aplicaciones y tecnologías utilizadas.

Capítulo 5. En este capítulo se trata de mostrar la relación entre la energía solar y los vehículos aéreos no tripulados en los últimos años observando sus avances, ventajas y algunas desventajas.

Capítulo 6. En este capítulo se describen las generalidades acerca de la radiación solar y los elementos necesarios para evaluar el potencial solar.

Capítulo 7. En este capítulo se muestra el proceso de diseño, selección de materiales y pruebas experimentales desarrolladas para el análisis de la eficiencia del sistema de generación energética.

1. ENERGÍAS RENOVABLES

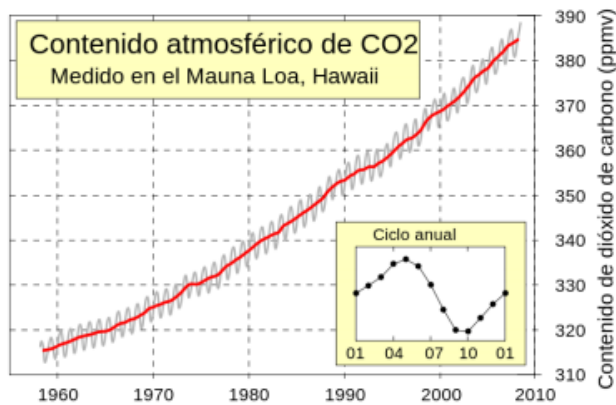
Se denominan energías renovables o energías verdes a las fuentes que no involucran la combustión de combustibles fósiles como el gas, el petróleo y el carbón. Existen dos grandes clasificaciones: fuentes de energía renovable y la energía nuclear.

1.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Se conocen como energías renovables a las energías que se adquieren de fuentes naturales teóricamente ilimitadas, éste término surge bien sea porque se renuevan por medios naturales o por la enorme cantidad de energía que poseen. Entre las clases de energías renovables se resaltan la eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, la biomasa, hidroeléctrica, y los biocombustibles.

La comunidad mundial posee un gran reto, el cual es la sostenibilidad energética; esto se logra fomentando el desarrollo de nuevas fuentes energéticas que sean amigables con el ambiente, disminuyendo así el riesgo que corren los diversos ecosistemas por el afán de suplir la demanda energética por parte de la humanidad. De la siguiente grafica se puede observar el aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) durante los últimos cuarenta años, paso de ser 315 PPM a 385 PPM, de 1960 al 2010; este aumento de concentración ha provocado el calentamiento lento de la atmósfera terrestre, dando lugar a un cambio mundial (ver figura 17).

Figura 2. Aumento de concentración de CO2 desde los años 60.



Fuente: Wikipedia, Keeling Curve.

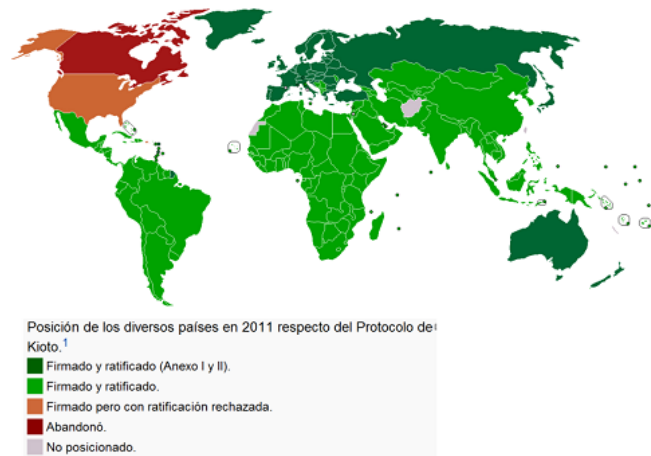
1.2 NORMAS QUE REGULAN LA SEGURIDAD AMBIENTAL Y USO DE ENERGÍA EN COLOMBIA

Con el fin de buscar soluciones y disminuir los problemas que provoca el actual crecimiento industrial, las entidades gubernamentales han desarrollado algunos tratados y leyes importantes a nivel mundial, como lo son:

1.2.1 Protocolo de Kyoto: Este tratado fue creado en 1997 en Kioto, Japón, pero entró en vigencia hasta el 2005. Su principal objetivo es disminuir la emisión de gases que causan el efecto invernadero en un 5% aproximadamente. Los gases de mayor impacto son:

- Dióxido de carbono (CO2).
- Gás metano (CH4).
- Óxido nitroso (N2O).
- Hidrofluorocarbonos (HFC).
- Perfluorocarbonos (PFC).
- Hexafluoruro de azufre (SF6).

Figura 3. Distribución países según cambio climático protocolo de Kioto.



Fuente: Wikipedia, Imagen según el protocolo de Kioto.

1.2.2 Convenio de Viena: Este convenio internacional acoge medidas para la recuperación de la capa de ozono. Las actividades que este convenio propone son:

- Investigar sobre procesos físicos y químicos que pueden afectar la capa de ozono.
- Examinar sustancias y tecnologías que ayuden a la protección y recuperación de la capa de ozono.
- Continuo seguimiento a la capa de ozono, para la detección de cualquier modificación en ella que pueda alterar el clima terrestre.
- Investigar los efectos de la radiación ultravioleta baja sobre los seres vivos, producto de la contaminación de la capa de ozono.

1.2.3 ISO 50001: Norma que especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de energía, su fin es permitir que una empresa promueva un rumbo sistemático para mejorar la eficiencia energética, la seguridad energética, el uso y consumo de la energía. Creada por la Organización Internacional de Normalización en sistemas de gestión de la energía.

1.2.4 Ley URE 697 del 2001: Ley expedida en el 2001 por el gobierno de la Republica de Colombia, su objetivo es generar conciencia sobre el uso racional y eficiente de la energía por parte de la población. Sus objetivos son:

- Desarrollar proyectos y asesorar a personas naturales o jurídicas de derecho público o privado, en el programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía.
- Incentivar proyectos que conlleven al uso de energías no convencionales dentro del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía.

1.3 EL SOL COMO FUENTE RENOVABLE

Entre las energías alternativas, se distingue la energía solar como la más ecológica y amigable con el ecosistema, a su vez ésta comprende dos grandes campos, la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica.

1.3.1 Energía solar fotovoltaica: Estos tipos de sistemas capturan la radiación solar y la convierten en energía eléctrica, este proceso se logra por medio de la foto-detección cuántica; estos elementos son usualmente láminas metálicas semiconductoras llamadas células fotovoltaicas, o una deposición de metales sobre un sustrato llamada capa fina.

La energía solar fotovoltaica ha enfocado sus investigaciones en el mejoramiento de los materiales y su versatilidad. Entre los diversos dispositivos encontramos paneles solares desplegados, paneles solares flexibles, Celdas de materiales Bi_2S_3 (Bismuto de sulfuro), celdas de Cu_3BiS_3 (wittichenit), celdas de materiales orgánicos, entre otras.

1.3.2 Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica: Actualmente esta tecnología es poco viable para su utilización debido al gran costo que implica la implementación y desarrollo de algún sistema de estos y además sus beneficios son bajos. Sus aplicaciones son diversas debido a que generan energía eléctrica, solo es necesario adicionar algunos dispositivos electrónicos como inversores, rectificadores, controladores de carga y transformadores. Los sistemas de energía solar fotovoltaica son implementados en su mayoría en lugares donde el acceso a la electricidad es de difícil consecución, dentro de estas aplicaciones se encuentran:

- **Industria Aeroespacial:** Los sistemas que componen los satélites son alimentados por medio de paneles fotovoltaicos con unos pequeños sistemas de respaldo, permitiendo el funcionamiento de estos dispositivos por largos periodos, todo esto debido a la gran intensidad de radiación solar presente en el espacio, donde permanecen estos satélites, a su vez estas condiciones generan un mayor rendimiento de las celdas fotovoltaicas.

Figura 4. Satélites artificiales.



Fuente: <http://www.iecologia.com>

- **Zonas rurales:** En lugares de difícil acceso tanto para la implementación de un sistema de redes eléctricas o para el transporte de una planta generadora y su combustible, se hace necesario la implementación de un sistema fotovoltaico para la obtención de energía eléctrica y así obtener mejores condiciones de vida en estos lugares alejados de la civilización.

Figura 5. Panel Fotovoltaico en zona rural



Fuente: <http://mx.class.posot.com>

- **Equipos Portables:** Cuando se realiza una expedición o se permanece durante muchas horas o días sin el acceso a la energía eléctrica y ésta es indispensable para algunos dispositivos electrónicos, se recurre a sistemas portables con paneles fotovoltaicos incluidos.

Figura 6. Morral con celdas fotovoltaicas para almacenar carga.



Fuente: <http://www.voltaicsystems.com/>

1.3.3 Sistemas fotovoltaicos en Colombia: La implementación de sistemas no convencionales de obtención de energía en Colombia se da a mediados del siglo XX; la investigación e implementación de estos sistemas fue producto de la influencia extranjera y la problemática mundial del medio ambiente.

En la década de los 80 la empresa Telecom de Colombia, empresa de telecomunicaciones, se enfrenta ante un gran reto cuando decidió llevar su servicio telefónico a todo el territorio nacional, el problema radicaba en las zonas rurales donde no se contaba con el suministro de energía eléctrica convencional, lo cual su implementación implicaba un costo elevado. Entonces se opta por implementar paneles fotovoltaicos los cuales permitirían poner en funcionamiento los radioteléfonos rurales. Este programa avanzó entre los años 1985 y 1994, bajo el respaldo de Telecom y la Universidad Nacional, pero la falta de apoyo económico, los pocos avances en la investigación de esta tecnología y el mantenimiento requerido por los paneles indujeron a que actualmente de los 248 sistemas instalados, el 8% estén fuera de servicio y el 37% presente algún problema.

Sí bien se sabe que en Colombia el apoyo para la investigación sobre este tipo de energía es muy poco, además sin mencionar que no se cuenta con la tecnología requerida; el IPSE (Instituto para la Promoción de Soluciones Energéticas) se encarga de investigar y desarrollar nuevas ideas para la obtención de energías en las zonas rurales del territorio nacional. También se están instalando sistemas fotovoltaicos en áreas rurales gracias al apoyo del ministerio de minas y energía por medio del Fondo De Apoyo Financiero Para La Energización De Las Zonas No Interconectadas (FAZNI).

2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

2.1 HISTORIA DEL ARTE

Las celdas fotovoltaicas son elementos que producen electricidad al incidir la luz sobre su superficie. La fuente de luz utilizada generalmente es el sol, considerando su costo marginal nulo. Estas celdas también son conocidas como baterías solares, fotopilas o generadores heliovoltáicos.

Dado que cada elemento puede generar una cantidad reducida de electricidad, en sus orígenes se destinaron a alimentar consumos pequeños con requerimientos particulares, como los de la exploración espacial. Con el avance tecnológico este campo se fue ampliando, como se puede ver en detalle en la bibliografía sugerida al final. Generalmente se les agrupa en disposiciones serie-paralelo, formando paneles solares para aumentar la potencia generada.

Su desarrollo empezó en el año de 1839 cuando becquerel descubrió que si ilumina uno de dos electrodos sumergidos en un electrolito, aparece una diferencia de potencial.

En 1887, cuando investigaba la descarga eléctrica entre dos electrodos usada como fuente de ondas electromagnéticas, Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico externo o fotoemisión, observando que la intensidad de la descarga aumentaba si radiaba el electrodo positivo con luz ultravioleta, lo que sugirió que las superficies iluminadas emitían más electrones.

Por su parte, en el año 1900 Planck desarrolló la teoría cuántica, que le permitió a Einstein explicar la fotoemisión en 1905.

La explicación del efecto fotoeléctrico externo permitió también explicar el efecto foto conductivo y el efecto fotovoltaico. En 1920 Gdden y Pohl indicaron que en el efecto foto conductivo, los electrones excitados permanecen dentro del metal,

ocupando las órbitas externas de los átomos y gozando de mayor libertad, provocándose así un aumento en la capacidad de conducción. Por su parte, en el efecto fotovoltaico los electrones son desplazados a través de una barrera en el sólido, produciéndose así un diferencial de potencial.

Pero fue hasta que finalmente en el año 1954, Chapin, descubrió la primera célula solar que convertía la luz solar en electricidad, llamada CZHRALSKY.

El comercio y la producción de las células fotovoltaicas inicio con las de silicio monocristalino, las cuales aún hoy en día continúan ocupando el primer lugar en el mercado. Después debido a la demanda de células y su alto costo se comenzaron a producir las compuestas por materiales policristalinos, que aunque son más económicas también presentan un rendimiento mucho más bajo en comparación con las monocristalinas, pero con una ventaja adicional y es que las células de materiales policristalinos tienen la posibilidad de ser producidas de forma cuadrada lo cual es una característica importante ya que se puede aprovechar mejor el área disponible para las celdas.

Desde comienzos de los años 90' aparecieron otro tipo de células en el mercado, estas son conocidas como Células de silicio Amorfo (Si-a), con la aparición de este tipo de celdas fue posible extender el uso de la energía solar a sectores con consumos más bajos de potencia pero no menos importantes como relojes, radios, calculadoras y hasta aeromodelismo etc.; Y así como iban saliendo nuevas configuraciones de celdas con nuevos materiales también la tecnología fue innovando y tornándose más sofisticada, haciendo que la eficiencia de las celdas vaya en aumento al paso del tiempo.

Investigadores del Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (ISE), obtuvieron 39.7% de eficiencia en una fotocelda multi-unión, rompiendo su record anterior de 37.6% que habían logrado hace poco tiempo. Las fotoceldas multi-unión con semiconductor III-V se utilizan en concentradores fotovoltaicos para plantas solares de generación eléctrica.

En los últimos tiempos los avances más recientes en este arte han estado orientados a la reducción de costos de fabricación mediante el uso de nuevos materiales disponibles en la naturaleza como lo son los silicios mono-poli cristalino y amorfo mencionado con anterioridad y algunos otros como el arseniuro de galio. Algunos estudios también han sido enfocados en la reducción de peso y volumen de las células con el fin de aumentar su campo de acción y abrir paso para que otros sectores utilicen esta alternativa de generación de energía. Con la reducción de volumen se pueden utilizar celdas mucho más delgadas que pueden ser incluso elásticas y plegables, así como un ahorro significativo de material.

Hoy en día la industria de las células fotovoltaicas se consolidó en el mercado internacional y es muy fácil tener acceso a este tipo de tecnología, la cual puede llegar a ser muy útil casi en cualquier campo de acción de la industria.

En la época actual, la industria de la energía solar fotovoltaica se muestra consolidada en el mercado internacional, lo cual es apreciable por los cientos de fabricantes y distribuidores que en la actualidad ofrecen sus productos en internet.

2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Como se mencionó con anterioridad las celdas solares son dispositivos semiconductores que transforman la radiación solar directamente en energía eléctrica. Las celdas fotovoltaicas modernas están formadas generalmente por una juntura semiconductor POSITIVA-NEGATIVA de silicio de gran superficie y reducido espesor.

Entre las capas de dopaje positivo y negativo se forma por difusión una capa límite en la que se establece una barrera de potencial. Para que se logre obtener un rendimiento energético considerablemente bueno, esta capa límite deberá encontrarse lo más cerca posible de la superficie que está en contacto a la luz ultravioleta (Sol).

La disposición de las células es en serie, todo esto para que los electrones expulsados de cada una sean recogidos por la siguiente y se vayan sumando y comunicando la energía adicional hasta alcanzar una diferencia de potencial adecuada para los efectos prácticos, que puede ser de 6 a 24 Volts.

Al incidir la luz sobre la juntura, el efecto fotovoltaico produce un desplazamiento de portadores que da lugar a una diferencia de potencial aprovechable de alrededor de 0,5 V entre los electrodos a circuito abierto.

En dado caso que una de las celdas que se encuentra conectada en serie se tape o quede oscurecida, de forma que solamente recibirá una pequeña parte de la energía solar comparada a las otras células, esta célula generará únicamente una corriente limitada. Si la carga impuesta al panel solar es tal que necesita una corriente superior a dicha corriente "limitada" ocurrirá un efecto inverso haciendo así que la corriente se transporte en un sentido indebido generando calentamiento de la celda y con riesgo de quemarla.

Para evitar este problema es muy importante añadir diodos en paralelo al circuito de las celdas y así evitar el calentamiento y posible daño permanente de las celdas.

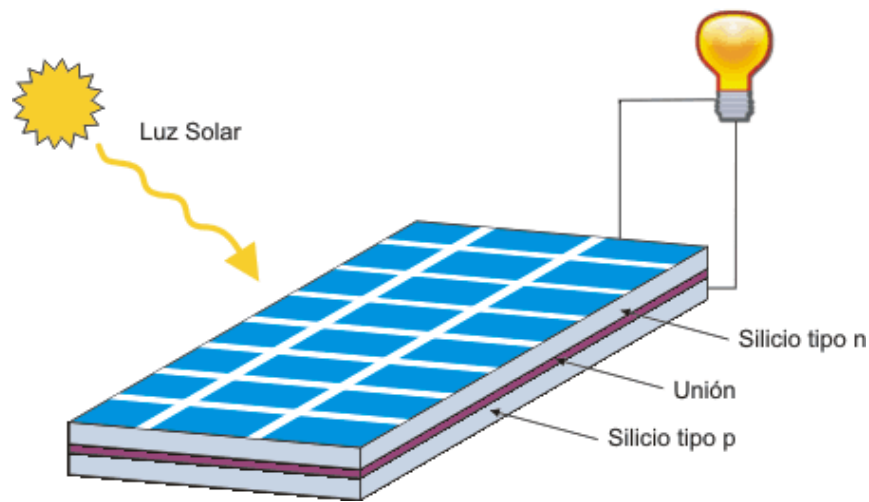
Así mismo, en dado caso que se realicen conexiones en paralelo, si alguna de las celdas también queda tapada o sin incidencia de luz solar solamente podrá generar una tensión limitada, la cual será menor a la de las otras. Entonces la celda oscurecida funcionará como receptor si la tensión de funcionamiento se hace superior a la suya cuando se tiene el circuito abierto; lo que también provoca su calentamiento y de la misma manera una gran posibilidad de daño permanente.

Nuevamente para solucionar este inconveniente, es necesario añadir diodos anti retorno, para proteger a las celdas de esta posibilidad de daño.

La celda cuenta con dos terminales que se conectan a un circuito externo para extraer la corriente eléctrica producida. La cara de la oblea expuesta a la luz,

posee un enrejado metálico muy fino (plata y/o aluminio), el cual colecta los electrones fotogenerados (Ver Figura 7). Esta capa corresponde a la terminal negativa. La otra cara cuenta con una capa metálica, usualmente de aluminio. Ésta corresponde a la terminal positiva ya que en ella se acumulan las cargas positivas. Sobre esta capa está conectado el otro conductor del circuito exterior. También la celda está cubierta con una película delgada antireflejante para disminuir las pérdidas por reflexión.

Figura 7: Panel Fotovoltaico básico



Fuente: www.zhgsolar.com

2.3 EL EFECTO FOTOVOLTAICO

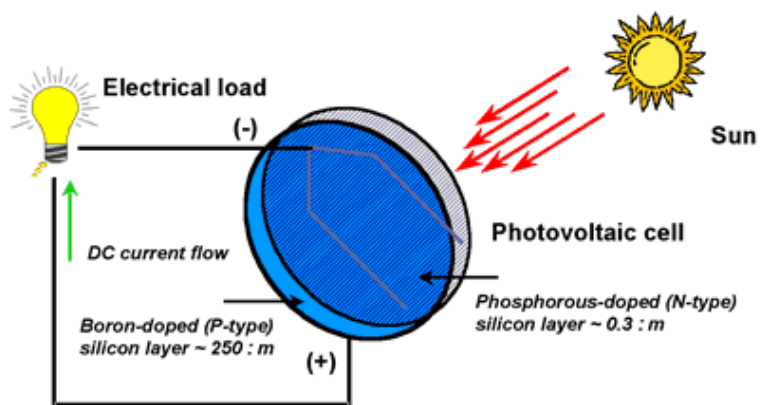
Para la generación de este efecto en particular, existen algunos materiales que al absorber un determinado tipo de radiación electromagnética generan en su interior cargas positivas y negativas. Si para este caso la radiación es ultravioleta, es decir, la emitida por el sol y el material que la recibe es un semiconductor tal como el Silicio o el Arsenio, las cargas emitidas son electrones y unos llamadas huecos

(h+), los cuales una vez producidos se mueven a lo largo de todo el volumen del sólido presente. En caso de no existir ninguna condición especial interior ni exterior, las cargas de signos opuestos se recombinan neutralizándose mutuamente. Por el contrario, si mediante algún procedimiento se crea en el interior del material un campo eléctrico permanente, las cargas negativas y positivas serán separadas por él. La clave para producir una corriente eléctrica útil está en lograr extraer los electrones liberados fuera del material antes de que estos vuelvan a recombinarse con los huecos (lugares vacíos que dejan los electrones).

Este efecto es posible lograrlo al introducir en el material semiconductor agentes químicos capaces de generar un exceso tanto de electrones como de huecos. Estos elementos, se denominan dopantes y el proceso de su incorporación al semiconductor se llama dopado.

En la figura a continuación se mencionan algunos agentes químicos de dopado como el Fósforo (Tipo N) y el Boro (Tipo P).

Figura 8: Funcionamiento Fotovoltaico y agentes de dopado



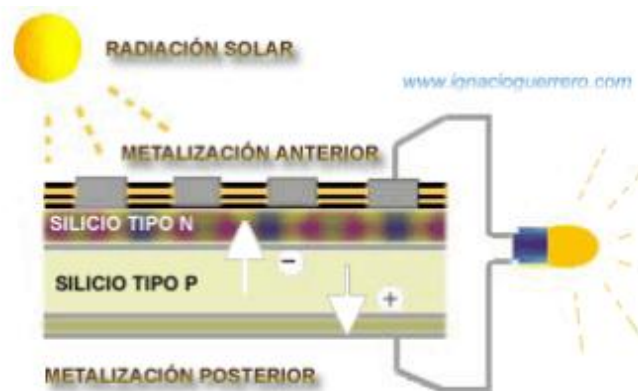
Fuente: zhgsolar.com

Como se observó en la imagen para dopar el Silicio en la mayoría de los casos se utiliza el Boro, el cual tiene 1 electrón de enlace menos que el Silicio así cada átomo de boro se enlaza con solo 3 de silicio, generando así el hueco en el lugar donde existía el “cuarto” electrón de enlace. El nombre que se le da a esta estructura generada entre el boro y el silicio es el semiconductor tipo P.

Por otro lado para formar los semiconductores tipo N el dopaje se realiza en la mayoría de los casos con el elemento del fósforo que al contrario del boro presenta un electrón de enlace más que el silicio, así entonces al combinarse con éste deja un electrón libre listo para generar el efecto.

La realización de los procesos de dopaje con boro y fósforo respectivamente lleva al establecimiento de una diferencia de potencial entre las 2 zonas del material, los cuales si son conectados entre sí y se les hace incidir radiación electromagnética, generarán una corriente eléctrica que recorrerá todo el circuito. A este fenómeno se le conoce como el efecto fotovoltaico el cual se encarga de realizar la acción principal de toda celda fotovoltaica que es producir electricidad.

Figura 9: Efecto fotovoltaico con Silicio tipo P.



Fuente: zhgsolar.com

La generación de electricidad por medio de las celdas fotovoltaicas depende de que tanta irradiación solar cae sobre ellas y de la intensidad solar de cada hora del día.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

El tipo más común de celdas fotovoltaicas es aquel que es producido por el silicio monocristalino si hablamos de su estructura de material. Pero esta no es la única forma en la cual se puede clasificar las celdas fotovoltaicas, éstas se pueden clasificar en varios grupos como lo son según su configuración, según el método de fabricación y según su tipo de material tal y como se mencionó.

- ✓ Según la estructura del material
- ✓ Según su configuración
- ✓ Según el método de fabricación

2.4.1 Clasificación según la estructura del material

- **Silicio Monocristalino:** Son el tipo de celdas más comunes en el mercado y las primeras en ser producidas a gran escala. Este tipo de celdas están hechas de un único cristal de silicio de muy alta pureza. Se obtienen a partir de barras cilíndricas de silicio (generadas a partir de 1 solo cristal) producidas en hornos especiales. A partir de estas barras de silicio de forma cilíndrica, o cuadrada se obtiene por cortado, obleas delgadas de espesor (0,4 a 0,5 mm) aproximadamente. Las celdas fabricadas a partir de este tipo de silicio tienen eficiencias de conversión de la luz solar en electricidad superiores al 12%

- **Silicio Policristalino:** Tal y como lo dice su nombre estas celdas están formadas por varios cristales de silicio. Este tipo de celdas se produce a partir de bloques de silicio obtenidos por fusión de trozos de silicio puro en moldes especiales. La tecnología de las celdas policristalinas surgió del afán de conseguir una disminución en los costos de fabricación. Estas celdas tienen eficiencias de aproximadamente de 10 a 12%, algo menores a las de silicio monocristalino.
- **Silicio Amorfo:** Para este tipo de celdas según su nombre se infiere que no poseen una estructura determinada, no es ordenada, característica del silicio cristalino. Este es el tipo de celdas que se ha estado produciendo en los últimos años de una manera acelerada, su eficiencia es la más baja en comparación con los otros tipo de materiales, pero también su costo de fabricación es menor. La eficiencia de estas celdas varía entre un 5% y un 10%.

2.4.2 Según su configuración

- **Células Monofaciales:** La característica especial de este tipo de celdas es que únicamente reciben la radiación por una sola cara. Pueden ser producidas con cualquier estructura del material.
- **Células Bifaciales:** Al contrario de las anteriores están reciben la radiación y la absorben por ambas caras, lo cual es importante a la hora de tener en cuenta la eficiencia de la celda. Este tipo de celda aparte de ser producida con cualquier estructura de material también es posible producirla en forma de película delgada.

- **Célula de Película Delgada:** Tipo de celdas de alta tecnología las cuales han sido el foco de estudio en los últimos años debido a su gran área de aplicación, no poseen grandes espesores, sino una finísima capa de solamente 1 ó 2 μm de espesor de material semiconductor que se deposita sobre un sustrato adecuado, formándose un módulo continuo que no requiere interconexiones interiores.

2.4.3 Según el método de fabricación

- **Método CZ o Czichaisky:** En el método Cz (método de crecimiento de *Czichaisky*), una semilla se pone en contacto con el silicio fundido y luego es retirada lentamente. Con este método se obtienen lingotes cilíndricos de Si-monocristalino de diámetros entre cuatro y seis pulgadas, a una velocidad de 10 cm/hora y de longitud del orden de decenas de centímetros.
- **Método Fz (Floating Zone):** El método FZ (Floating Zone) produce silicio monocristalino más puro que el método CZ debido a que en este método el silicio no se contamina en el crisol. En el método FZ, se coloca la barra de si-policristalino sobre una semilla. Una bobina induce un campo eléctrico, calentando la barra y fundiendo la interface entre la semilla y el material. A medida que se desplaza la bobina alejándose de la semilla, el silicio se solidifica con la misma estructura de la semilla. El silicio fundido se sostiene entre las dos barras gracias a la tensión superficial.
- **Método EFG (Edge-Defined Film-red Growth):** En el EFG (*Edge-Defined Film-red Growth*), se produce una cinta de silicio cuando este se solidifica al fluir por entre unos bordes estrechos.

2.5 ARREGLO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS

Los arreglos de celdas fotovoltaicas pueden estar formados por una cierta cantidad de celdas individuales conectadas en serie y paralelo (lo mismo ocurre en una celda individual), esto con el fin de aumentar el voltaje y la corriente que generen y así suplir una necesidad determinada.

Una celda de forma individual proporcionaría únicamente una tensión muy pequeña y una potencia no muy elevada de alrededor de uno o dos Watts. Es por esto que se realizan conexiones de celdas en serie, con el fin de producir las tensiones de 6, 12 o 24 Voltios, aceptadas en la mayor parte de las aplicaciones. De la misma manera se conectan algunas de las celdas en paralelo para aumentar la corriente del circuito generada y suplir las necesidades de carga. Entonces lo que se obtiene en general es un conjunto de celdas interconectadas eléctricamente en serie o paralelo. Las características eléctricas del arreglo son las mismas a la de módulos individuales, teniendo en cuenta que la potencia, corriente y voltaje estarán limitados de acuerdo al número de celdas (módulos) conectados en serie y en paralelo.

Para incrementar el voltaje las celdas solares se deben conectar en serie para obtener voltajes de salida más grandes. El voltaje de salida, V , de celdas conectadas en serie está dado por la suma de los voltajes generados por cada módulo.¹

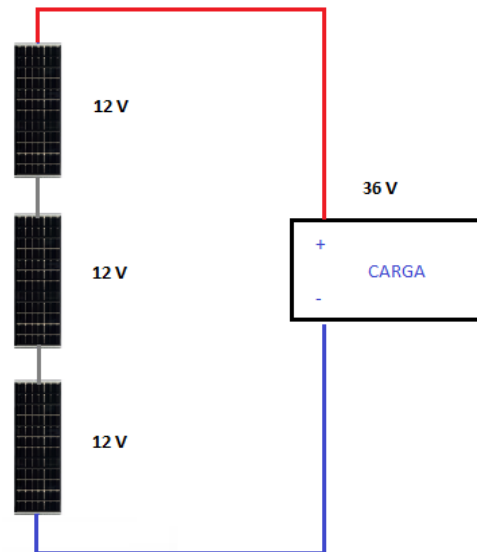
$$V=V1+V2+V3+...$$

Una forma más sencilla de entender el conceptos de los sistemas que se encuentran conectados en serie es observando la figura a continuación la cual muestra la forma de realizar la conexión y el resultado del voltaje obtenido. Entonces si se tienen 3 celdas que producen 12 Voltios, el voltaje que tendrá la

¹ Tesis Control Digital Para Convertidor Multinivel Alimentado Con Energía Solar, Instituto Politécnico Nacional

carga será de 36 Voltios y así sucesivamente si se le agregan más celdas al circuito en serie hasta obtener el voltaje deseado.

Figura 10: Conexión en serie de un sistema de celdas fotovoltaicas.



Fuente: Los Autores

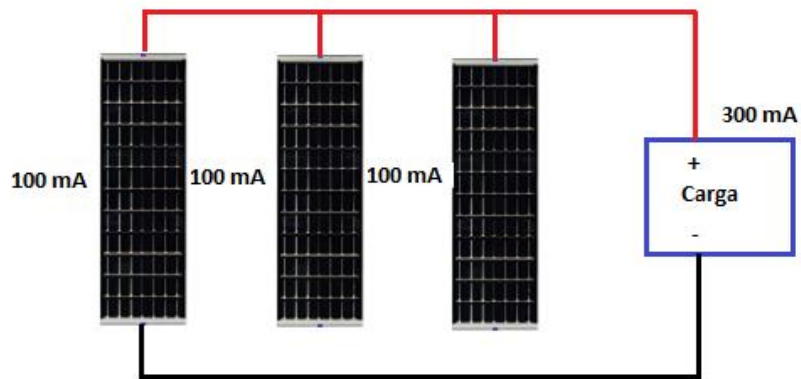
Para incrementar la corriente las celdas solares o paneles se conectan en paralelo para obtener corrientes generadas más grandes. El voltaje del conjunto es el mismo que el de un módulo (o un panel); pero la corriente de salida, I_T , es la suma de cada unidad conectada en paralelo.²

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

² Tesis Control Digital Para Convertidor Multinivel Alimentado Con Energía Solar, Instituto Politécnico Nacional

En el caso de realizar una conexión en paralelo el voltaje producido por el sistema se mantendría, siendo el mismo, pero con la ventaja que se aumentaría la corriente del sistema entre más celdas se ubiquen en paralelo más corriente obtendrá la carga y así sucesivamente hasta alcanzar la corriente de carga deseada. Entonces en la figura 11 se observa que si se tienen 3 celdas, donde cada una produce 100mA, la carga recibirá una corriente de 300mA.

Figura 11: Conexión en paralelo de un sistema de celdas fotovoltaicas



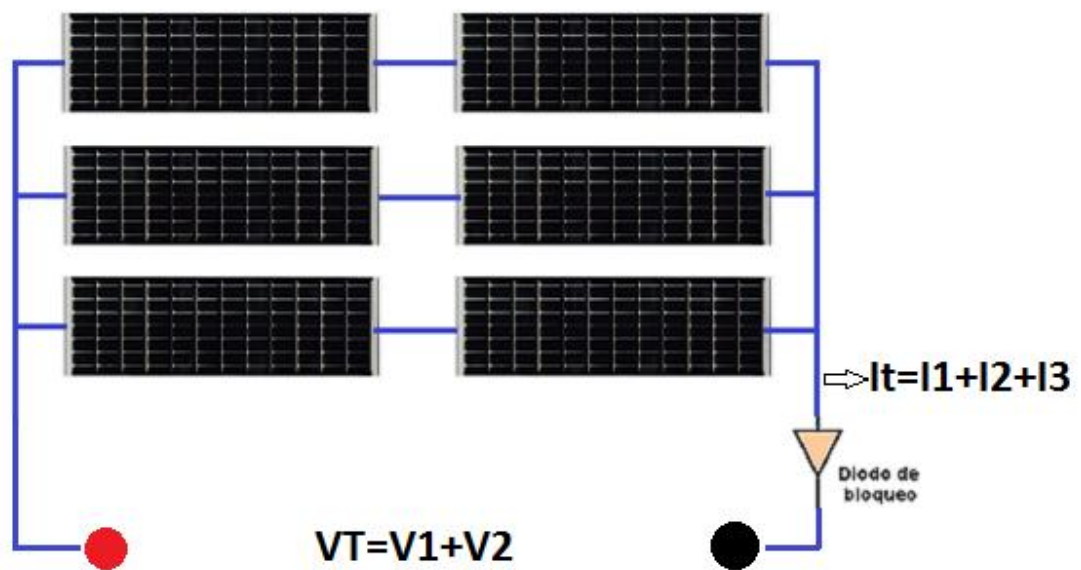
Fuente: Los Autores

Como se mencionó en una sección anterior, existe la posibilidad que en el sistema fotovoltaico deseado se utilicen baterías como almacenamiento, debido a esto es posible que si las celdas no están recibiendo radiación solar o en algún momento tienen sombra no generaran energía y la batería comenzará a verlos como una carga más y enviara corriente hacia las celdas (dirección contraria a la deseada), siendo esto un posible causante de una falla en las celdas o un excesivo sobrecalentamiento y como consecuencia de esto un deterioro acelerado de la celda. Por esta razón para evitar estos flujos de corriente en la dirección opuesta se utilizan diodos de bloqueo, los cuales son seleccionados dependiendo de la

corriente a la que se va a trabajar en el sistema, estos actúan como una válvula cheque, la cual deja pasar el flujo de corriente en una sola dirección, la deseada.

En la Figura 12 se puede observar un ejemplo de cómo es el montaje de varias celdas fotovoltaicas en serie y paralelo al mismo tiempo, con el fin de que con una sola configuración se aumenten los valores de voltaje, corriente y potencia, en ella también se muestra la posición de los diodos de paso y el diodo de bloqueo, que como se dijo anteriormente se debe elegir teniendo en cuenta la máxima corriente que generara el arreglo fotovoltaico en condiciones de corto circuito. La norma internacional dice que el valor de la corriente que soporta el diodo debe ser por lo menos 1.56 veces el valor de la corriente corto circuito.

Figura 12. La conexión de celdas fotovoltaicas serie paralelo



Fuente: Los Autores

Es importante advertir que los paneles que se interconectan deberán tener la misma curva I-V, a fin de evitar descompensaciones.

2.5.1 Características Eléctricas: La respuesta que se genere por parte de un arreglo de celdas fotovoltaicas vendrá determinada por la cantidad de células o celdas que lo forman, pudiendo ser descrita mediante algunos parámetros explicados a continuación.

Voltaje de cortocircuito (V_{cc}): es el voltaje máximo que pueden producir las celdas fotovoltaicas cuando se realice una medición en los bornes positivo y negativo del arreglo sin ningún tipo de carga presente en él. Es decir en condiciones de resistencia infinita en los bornes. La medición se realiza con un voltímetro.

Corriente de cortocircuito (I_{cc}): es la máxima corriente o intensidad que se puede llegar a obtener en determinadas condiciones. Se realiza la medición de corriente con un Amperímetro colocado entre los bornes positivo y negativo del arreglo fotovoltaico, sin ningún otro tipo de resistencia presente, es decir colocando el circuito en corto circuito.

Los dos casos anteriores son extremos e indican una especie de circuito idealizado, en la práctica esto no sucede y se tienen diferentes cargas o resistencias que hacen variar los valores de corriente y voltaje del circuito

Corriente (I): Cuando hay presente una determinada diferencia de potencial se genera una determinada Corriente en el circuito, dependiendo de la tensión generada la corriente variara su valor, lo que generalmente ocurre es que el arreglo fotovoltaico produce una determinada corriente que fluye por el circuito hacia las llamadas cargas de trabajo las cuales poseen una determinada resistencia. Se dice que la intensidad de corriente (I) se produce a una determinada tensión (V).

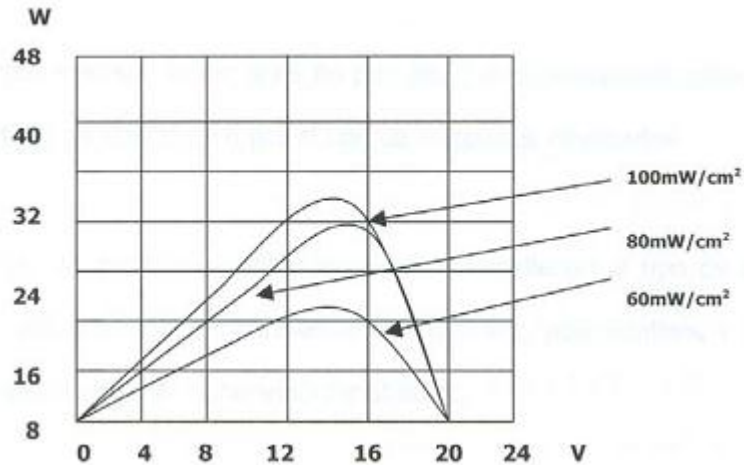
Potencia máxima (Pm): En determinadas condiciones el valor de la corriente tendrá cierto valor que comprende el rango entre cero y I_{cc} para el cual corresponde también una determinada diferencia de potencial que tomará un valor entre cero y V_{cc} . Como es sabido la potencia es el producto entre la tensión y la corriente, entonces ésta será máxima cuando únicamente para un cierto par de valores I y V . Se dice que un arreglo fotovoltaico trabaja en condiciones de potencia máxima cuando la resistencia del circuito externo es tal que determina unos valores de I_m y V_m logrando así que el producto entre estos sea máximo.

Normalmente un panel no trabaja en condiciones de potencia máxima, ya que la resistencia exterior está fijada por la característica propia del circuito.

Potencia Nominal Pico: Esta es la potencia proporcionada al recibir una irradiación de 1000 W/m^2 a una temperatura de las celdas de 25°C , se trata de un pico máximo en las medidas reales de la intensidad radiante, esta corresponde a un día muy claro con el sol cercano al Cenit.

La mayoría del tiempo la intensidad solar que recibe el panel es menor a 1000 W/m^2 , por lo que la potencia real producida será también inferior a la nominal pico. Las potencias nominales más usuales que se pueden encontrar en el mercado son: 5, 10, 20, 35, 40, 60, 80, 100 y 120 Watts.

Figura 13. Variación de la potencia producida por un panel para tres diferentes irradiaciones, en función de la tensión entre bornes.



Fuente: CENSOLAR, Energía solar para sistemas fotovoltaicos

Eficiencia total: En cuanto a la eficiencia total de los paneles esta se define como el cociente entre la potencia máxima producida y la potencia de la radiación incidente sobre el panel.

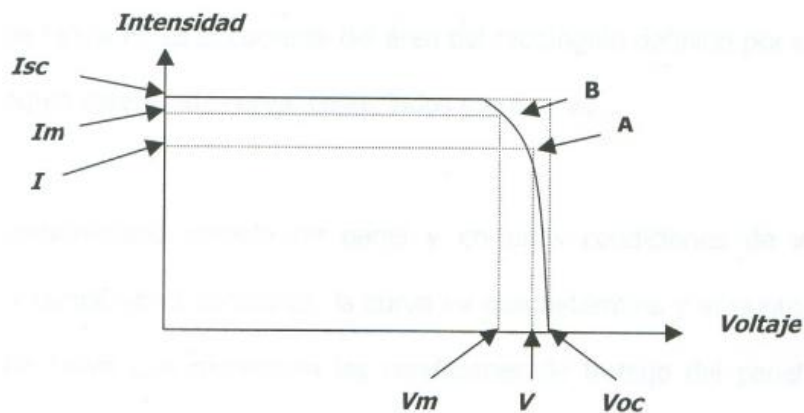
Factor de forma (FF): Es un concepto teórico útil para medir la forma de la curva definida por las variables I y V.

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

Una forma de entender más fácilmente los conceptos definidos en esta sección es observando claramente la figura a continuación, la cual representa la curva medida experimentalmente de un arreglo fotovoltaico cualquiera, el cual fue sometido a diversas condiciones de radiación y temperatura.

Si se varia la resistencia externa desde un valor de cero hasta infinito es posible hacer mediciones de los distintos valores de I-V, los cuales si se grafican se genera la llamada curva característica del panel o curva de intensidad-tensión (abreviadamente I-V).

Figura 14: Curva I – V de un panel fotovoltaico



Fuente: CENSOLAR, Energía solar para sistemas fotovoltaicos

En la gráfica se observan dos puntos representativos de funcionamiento. El punto A presenta unas determinadas condiciones dadas por la carga y resistencia y muestra un valor dado para I y V, con este par el arreglo desarrollará cierta potencia $P=I*V$ que en la gráfica es representada por el área bajo la curva y delimitada por el rectángulo cuyo vértice es el mismo punto A.

Si se varían las condiciones es decir, se mueve A hacia la derecha bajando por la curva se ve que el área del rectángulo comienza a disminuir abruptamente debido a la gran disminución en la corriente. De la misma manera si el punto A es corrido hacia la izquierda también el área comenzará a decrecer rápidamente, con la diferencia que en este caso no se está sacrificando corriente si no disminuyendo el

voltaje generado. Entonces se puede inferir que siempre existirá un punto intermedio B en el cual se logre generar la mayor potencia sin reducir ni la corriente ni el voltaje del arreglo. Este punto B será el punto en el cual se desarrolle la máxima potencia.

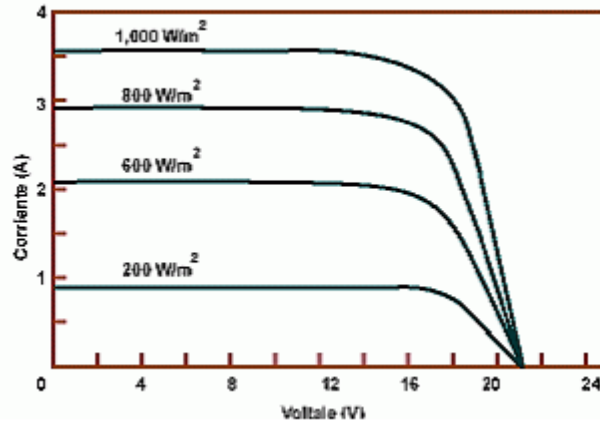
El factor de forma FF es el cociente del área del rectángulo definido por el punto B y el rectángulo exterior de la curva, cuyos lados son I_{sc} y V_{oc} .

Para los diferentes modelos de paneles y arreglos con unas ciertas condiciones de intensidad luminosa y temperatura constante, la curva I-V determina el punto concreto "B".

Para un determinado modelo de panel y arreglo en unas condiciones de intensidad luminosa y temperatura constante, la curva I-V que determina el punto concreto sobre dicha curva que representa las condiciones de trabajo del panel, quedará fijado para el circuito que alimenta éste.

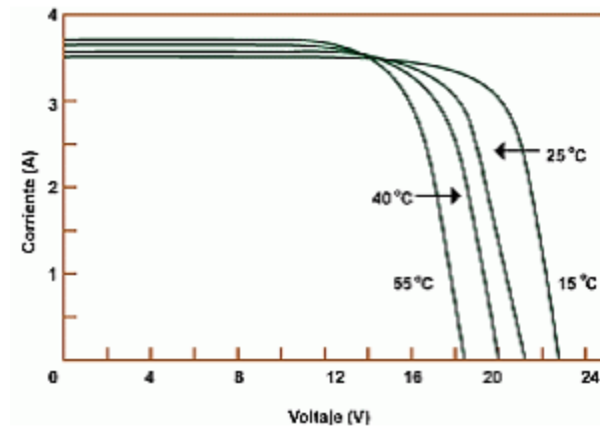
Por ejemplo en el caso de este proyecto y como más adelante se explicará se desea cargar una batería de 12V, entonces la tensión mínima que se debe asegurar que el arreglo suministre debe ser más o menos entre 12.5 y 13 V, es por este que no serviría de nada si el arreglo no logra alcanzar esta tensión obligatoria.

Figura 15. Efecto de la variación de la intensidad radiante (medida de milivatios por cm^2) sobre la curva I-V.



Fuente: <http://solar.nmsu.edu>

Figura 16. Efecto de la variación de la temperatura, manteniendo constante la intensidad radiante, sobre la curva I-V.



Fuente: <http://solar.nmsu.edu>

Los estándares internacionales indican que para medir la respuesta de las celdas fotovoltaicas el valor de intensidad solar es de 1000 W/m^2 y una temperatura de celda del orden de los 25°C y como se observa en la figura anterior a medida que

la temperatura de las celdas va incrementando su rendimiento es propenso a disminuir generando así una menor energía, es por esto que es necesario controlar de alguna forma la temperatura del arreglo fotovoltaico.

Por el lado de la corriente eléctrica generada por el arreglo, se sabe que es proporcional a la radiación incidente sobre cada panel. En caso de ser necesario valores de corriente elevados en comparación con lo que puede generar cada celda, se deberá realizar el arreglo con la cantidad de bloques en paralelo que se necesiten con el fin de suplir sus necesidades. Para una batería por ejemplo, entre más corriente se logre generar más rápido se cargará.

Si no se conocen las curvas de variación con la temperatura de las magnitudes características del panel (que deben ser suministradas por el fabricante o proveedor de los mismos), resulta útil conocer unas variaciones medias a saber:

- Para paneles de células de silicio la tensión disminuye a razón de $2,3 \cdot 10^{-3}$ volts por cada célula que contenga el panel y por cada grado centígrado de aumento de temperatura de la célula por encima de los $25 \text{ }^\circ\text{C}$. La corriente aumenta a razón de $15 \cdot 10^{-6}$ amperios por cada centímetro cuadrado de área de células y grado centígrado de aumento de temperatura por encima de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

-Para paneles de tecnología de película delgada las variaciones son respectivamente de $-2,8 \cdot 10^{-3}$ V/célula y $+1,3 \cdot 10^{-5}$ A/cm² por cada grado centígrado de aumento.

En la práctica basta recordar que la potencia del panel disminuye aproximadamente un 0,5% por cada grado de aumento de la temperatura de la célula por encima de los $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

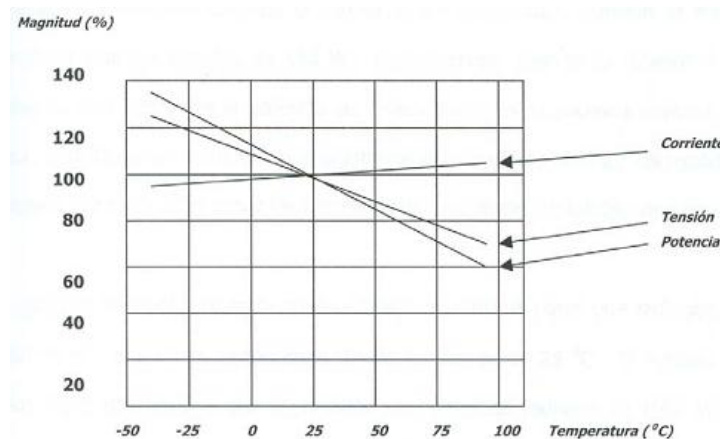
Cabe resaltar que la temperatura de la célula no coincide con la temperatura ambiente, debido a que la célula, al ser un cuerpo receptor de radiación situado bajo una cubierta transparente, se calentará al incidir la luz del Sol. El incremento de temperatura de la célula respecto a la temperatura del ambiente depende de

las características de la misma y de las de construcción del propio panel. Se puede admitir como válida la siguiente función:

$$\Delta t^{\circ} = 0.034 \times I - 4$$

Entonces si se utiliza la ecuación anterior y se realiza un cálculo rápido suponiendo que el arreglo fotovoltaico se encuentra a una radiación de 700 W/m^2 y la temperatura ambiente es de 26°C , las celdas alcanzaran una temperatura de 46°C de temperatura y teniendo en cuenta que en la práctica la potencia de un panel disminuye aproximadamente 0.5% por cada grado de aumento de temperatura de la celda por encima de los 25°C , se tendrá luego que en estas condiciones la potencia del arreglo fotovoltaico disminuirá en cerca de un 10.5% , respecto a las especificaciones estándar.

Figura 17. Grafica que muestra la variación relativa según la temperatura de la célula de la corriente, tensión y potencia.



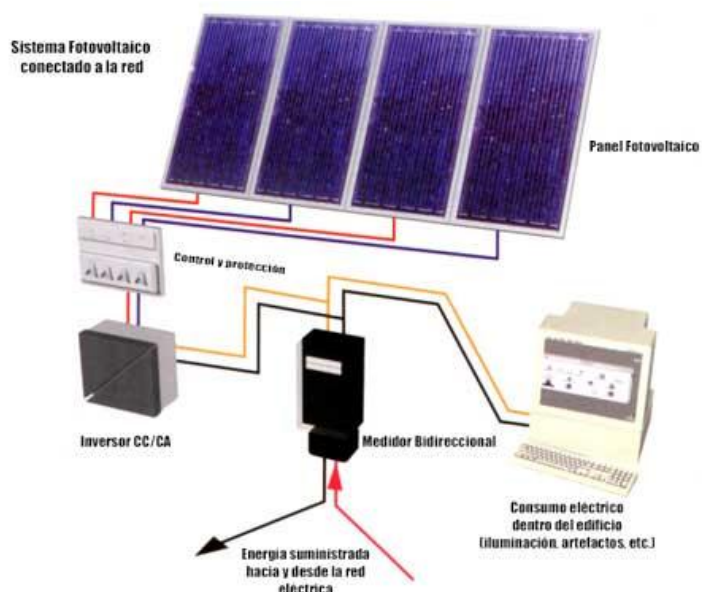
Fuente: CENSOLAR, Energía solar para sistemas fotovoltaicos

De la gráfica se infiere que el efecto de la temperatura sobre la corriente es pequeño pero bastante alto en cuanto a voltaje y por ende a disminución de potencia.

3. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS

El llamado sistema fotovoltaico corresponde a un conjunto de aparatos eléctricos y electrónicos que dan la posibilidad de convertir la radiación solar y generar energía. Los sistemas más básicos de energía solar están compuestos por

Figura 18. Sistema fotovoltaico



Fuente: Tecnología 3° E.S.O Centrales de Energía Eléctrica

Los sistemas fotovoltaicos se pueden diseñar para operación autónoma o funcionamiento en sistemas híbridos o alternativamente con sistemas de generación convencionales. También pueden operar aislados de redes o interconectados a ellas.

3.1. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES

El proceso utilizado para la fabricación es generalmente automático se realiza utilizando soldaduras especiales que unen el dorso de las células con la cara frontal de la adyacente.

A pesar de que hay muchos tipos diferentes de celdas solares, las más utilizadas y reconocidas comercialmente son las de silicio monocristalino, aunque como ya se mencionó existen de otros tipos como son las de silicio policristalino, de silicio amorfo, diselenuro de cobre y arseniuro de galio.

3.1.1 Tecnología de fabricación de celdas solares de SI-SC: Las celdas de silicio disponibles comercialmente actualmente son las de Si-sc (Silicio-single cristal: Silicio monocristalino) y Si-mc (Si-multicristalino). También hay algunos fabricantes que suministran celdas de Si-a (Si-amorfo). Sin embargo, la celda de Si-sc es sobre la que hay más experiencia de campo.

También se disponen de células bifaciales las cuales pueden captar las radiaciones solares por ambos lados de la célula, aumentando de esta manera su eficiencia.

3.1.1.1 Celdas de SI-SC: El proceso de fabricación de una celda es bastante complejo y un poco costoso, éste consta de las siguientes etapas: obtención del silicio, cristalización del mismo y la posterior unión y fabricación de la celda.

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno y se encuentra en distintas configuraciones como dióxidos de silicio y silicatos. La arena y el cuarzo son las dos formas más comunes, pero la arena contiene demasiadas impurezas lo que complica su procesamiento, pero mientras

la arena es muy impura los depósitos de cuarzo pueden llegar a tener hasta un 98% de sílica, es por esto que es la forma más utilizada para la obtención del silicio para la fabricación de celdas solares.

3.1.1.2 Producción de Silicio Monocristalino: Para la producción del silicio Si-sc (Monocristalino), lo primero que se realiza es fundir el Silicio policristalino en un crisol a temperaturas muy elevadas del orden de 1400°C. En contacto con una semilla de Si-monocristalino, así pues los átomos de la materia fundida comienzan a adaptarse la estructura cristalina de la semilla introducida y a medida que comienza el proceso de solidificación, un monocristal de silicio va creciendo, a continuación se explica brevemente los métodos más utilizados.

En el método CZ (método de crecimiento de Czochralski) Se pone en contacto una semilla junto al silicio fundido y luego esta es retirada lentamente. Con la realización de este método se logran obtener lingotes cilíndricos de Si-monocristalino de diámetros de 4 a 6 pulgadas y con longitudes de él orden de las decenas de centímetros.

El método FZ (Floating Zone) logra producir Silicio monocristalino de una forma más pura que el método anterior, todo esto debido a que en este método el silicio no es contaminado durante su estancia en el crisol. En este método se coloca una barra de silicio policristalino sobre una semilla luego una bobina induce un campo eléctrico, calentando la barra y fundiendo la interfase entre la semilla y el material. A medida que se desplaza la bobina alejándose de la semilla, el silicio se adapta a la estructura de la semilla y así se solidifica.

3.1.1.3 Fabricación de celdas de Si-Sc: La estructura de una celda de Si-sc consta esencialmente de las mismas capas de materiales semiconductores aunque puede variar ligeramente entre los diferentes fabricantes. Dicha estructura

consiste de las siguientes capas: una capa conductora en la parte superior, una película antirrefletores o una superficie tratada, una película delgada de Si-n (semiconductor tipo n) de 0,3 mm llamada colector, la juntura, un substrato Si-p (semiconductor tipo p) de 0,25 mm y un contacto inferior.

3.1.1.4 Fabricación de Si-mc: Cuando el silicio está fundido, es decir antes de obtener los lingotes, el material se dopa con boro de 10^{16} átomos/cm³, obteniéndose Si-mc, con una resistividad de aproximadamente 1,5 Ohm* cm, realizando este proceso las obleas que se van a cortar ya son de Si-mc.

Las obleas se meten a un horno con una temperatura cercana a los 900°C en donde se les realiza la difusión de los átomos de fósforo, a partir generalmente de vapores de POCL₃ (cloróxido de fósforo). El tiempo de permanencia de la oblea en el horno depende de la concentración de impurezas y el espesor de la capa de Si-n.

Debido a que en el proceso anterior toda la superficie de las obleas fue recubierta con la capa tipo n, se deberá remover ésta de una de las caras, para esto es necesario cubrir una cara y quitar la otra mediante el uso de químicos.

3.1.1.5 Celdas de Si-sc Y Si-mc: Se entiende que las celdas de Si-mc el área de la celda está cubierta por pequeñas estructuras cristalinas de más o menos 1 mm² y que las celdas de Si-sc toda el área se extiende en una sola pieza cristalina única. En las celdas de Si-mc la orientación de los granos es aleatoria y como consecuencia de esto, las cargas eléctricas al atravesar la celda de una cara a la otra, pasarían de un grano a otro atravesando las fronteras de los granos. Son caracterizadas por tener un alto número de defectos en los cuales las cargas se

pueden recombinar y perderse, lo que conlleva a una pérdida conjunta de tensión y potencia.

No obstante si el grano posee estructura en forma de columna y las columnas la mayor área posible, se logra disminuir la posibilidad de que los electrones encuentren fronteras de grano en las cuales se recombinen.

Por otro lado el Si-mc se produce partiendo de silicio fundido y dejando que este se solidifique en forma de bloque. Como se mencionó anteriormente después de solidificar se cortan pedazos en forma de obleas cuadradas, lo cual sugiere una ventaja porque permite llenar el área de un módulo con una mayor área activa en comparación con las celdas circulares. Este método ha logrado reducir costos de producción fabricación y energéticos.

3.1.2 Celdas de película delgada: Otro tipo de configuración para las celdas fotovoltaicas de silicio son aquellas de película delgada. Lo que ocurre con algunos de estos tipos de celdas es que los fotones que no logran transmitir su energía a los electrones atraviesan la película a causa de su extrema delgadez, lo cual da la posibilidad de diseñar módulos que sean semitransparentes que pueden ser utilizados en Aeromodelismo, techos de los carros, ventanas de los edificios etc. Actualmente el tipo de película delgada más utilizado es la de Silicio-Hidrogeno que es un material semiamorfo el cual se puede encontrar en pequeños dispositivos solares, aunque también existen en paneles de mayor potencia.

3.1.2.1 Celdas de Si-a: Otro de los tipos de celdas presentes y tal vez el más reciente es el de celdas de Silicio-Amorfo Si-a, sus propiedades difieren con sus antecesoras en ciertos aspectos importantes, por ejemplo que estas tienen un ancho de banda de 1.7 eV, que puede ser ajustado desde 1,3 hasta 2,2 eV

mediante la formación de aleaciones con germanio y carbono y que la movilidad de los portadores de carga está fuertemente reducida en relación con las del Si-c y por tal razón requiere de un campo eléctrico muy fuerte.

En las celdas de Si-cristalino (Si-sc o Si-mc) los portadores de carga difunden en un material cuya estructura tiende a la perfección, reduciendo los defectos que producen una recombinación de portadores de carga, en las celdas de Silicio Amorgo Si-a, la estructura no es uniforme y los portadores de carga están condenados a recombinarse a menos que tan pronto se generen actué sobre ellos un campo eléctrico y la distancia de recorrido sea mínima. Estas condiciones se dan si los portadores de carga se generan ya dentro de un campo eléctrico fuerte y la separación (distancia que tienen que recorrer los portadores de carga) entre las zonas que producen este campo es mínima, para tal efecto entonces los semiconductores tipo p y tipo n, no se encuentran en contacto sino que entre ellos se encuentra una capa de semiconductor intrínseco (juntura pin); de esta manera los portadores tan pronto se generan se encuentran sometidos a la acción de un fuerte campo eléctrico.

Lo anterior es posible debido a que las células de Si-a absorben la radiación solar con una eficiencia 40 veces mayor a la de las células de Silicio Cristalino, requiriéndose tan solo una película de 1mm de espesor para poder absorber el 90% de la luz lo que conlleva a una disminución en la cantidad de material necesaria para su elaboración, esta disminución de material constituye la más grande característica que poseen este tipo de celdas.

Puesto que como se dijo anteriormente la banda de Si-a es de 1,7eV, el V_{oc} de estas celdas es superior al de las celdas de Si-c. Este V_{oc} compensa de alguna manera la pérdida de fotones con energías inferiores a 1,7eV.

Otra de las ventajas más importantes de este tipo de celdas es que pueden fabricarse no solamente como la celda en sí, sino que también se pueden realizar en forma de módulos en proceso continuo.

Esta tecnología aparte de permitir la fabricación en serie también tiene la ventaja del bajo consumo de materiales y energía. No obstante las celdas y módulos poseen algunos problemas de estabilidad y su eficiencia desciende muy rápidamente hasta valores entre 10%-20%. En todo caso es posible superar este inconveniente empleando una modificación de la estructura de las celdas, pero eso es otro tema a tratar.

3.2 OTRAS CELDAS SOLARES

Existen también otro tipo de celdas solares en el mercado que también poseen ciertas ventajas respecto a las demás, así como también algunas desventajas a tener en cuenta por ejemplo Las celdas de arseniuro de galio (GaAs), estas tienen dentro de sus ventajas que poseen un ancho de banda de 1,43 eV, una alta absorptividad y altísima resistencia al calor. Poseen eficiencias cercanas al 25% y utilizando concentradores se han logrado obtener eficiencias del orden de 29%. El problema es que todo tiene una desventaja y la de este tipo de celda es su alto costo para usarlo únicamente en aplicaciones terrestres y sin el uso de concentradores de luz.

Otras celdas pueden fabricarse buscando aprovechar mejor el espectro solar. Las celdas multijuntura (celdas tándem) se construyen superponiendo diferentes juntas con diferentes bandas para aprovechar diferentes partes del espectro solar. Una celda tándem con GaAs como celda superior y GaSb (antimonio de galio) como celda inferior alcanza, bajo una concentración de 100 soles, una eficiencia de hasta 34,2%.

3.3 EFICIENCIA

El término de eficiencia cuando se quiere trabajar con cualquier tipo de energía es muy importante, es por esto que para el correcto análisis y estudio de esta tecnología hay que tener en cuenta su eficiencia para realizar los cálculos pertinentes a cada investigación. Pero se debe ser muy cuidadoso respecto a los resultados obtenidos en la pruebas, ya que existe una gran diferencia entre: Celdas de laboratorio (miniceldas con área inferiores a 1 cm² generalmente), Módulos ID donde los resultados de estos módulos no son reproducibles en grandes cantidades y Módulos comerciales donde su potencia nominal ha sido determinada antes de la estabilización de los módulos.

El estado del desarrollo comparativo de diferentes celdas en los años 1985 y 2000 se puede observar en el cuadro uno.

Cuadro 1. Cuadro comparativo de eficiencias de diferentes tipos de celdas.

		Año	Mejor celda (0.1 m ²) %/Empresa	Mejor resultado de Investigación áreas muy pequeñas %/Empresa	Límite teórico
Silicio cristalino o monocristalino		85	14 ARCO	18 UNIVERSIDADES	>25%
		90	17 TST	21 UNIVERSIDADES	
		95	19 TST	22 UNIVERSIDADES	
		2000	20 ARCO	22 UNIVERSIDADES	
Películas delgadas	Si-a	85	4 ARCO	6 SOLAREX	<21%
		90	8.5 FUJI	9 ECD	
		95	11 SIEMENS SOLAR	13 SIEMENS SOLAR	
		2000	13 SIEMENS SOLAR	15.8 SIEMENS SOLAR	
	CIS	85	X	11.9 BOEING	<20%
		90	11.2 SIEMENS SOLAR	14.2 SIEMENS SOLAR	
		95	12.2 SIEMENS SOLAR	15.1 SIEMENS SOLAR	
		2000	13 SIEMENS SOLAR	15.1 SIEMENS SOLAR	
	Cd- Te	85	8.5 MATSUSHITA	12.5 MATSUSHITA	<28%
		90	9.6 BP SOLAR	14 NAPS	
		95	10.4 BP SOLAR	16 NAPS	
		2000	12.5 BP SOLAR	17.2 NAPS	

Fuente: RICAUD. A, 'THIN Photovoltaic Technology: From the laboratory to mass production', en Advanced technology System, United Nations New York. May 2000

El concepto PESC ha sido mejorado con nuevos conceptos como son PERC (Passivated Emitter Rear Contact Ce/!), PERL (Passivated Emitter, Rear Local/y diffused Ce/!) , LG-BC (Laser Grooved-Buried contact) con estas tecnologías se han alcanzado eficiencias récord de celdas de Si-c (Silicio cristalino) de 24.2% y de módulos de 20.5%. Los récords actuales para celdas de laboratorio de silicio se dan en el cuadro número dos.

Cuadro 2. Eficiencias de diferentes tipos de celdas de silicio. (1999/2000)

Celda Si	Area (cm ²)	Eficiencia récord	Fuente / observación
Si-c	4	24.2	MA.Green (UNSW) PERC CELL
Si-c contacto grabado	12	21.3	MA.Green (UNSW)
Si-c contacto grabado	100	18	BP Solar
Si-c	X	18	Telafuken
Si-m	X	17	MA.Green (UNSW) PERC CELL
Si-m contacto impreso	225	15.3	Kyrocea
Si-m contacto impreso	100	16.4	Sharp
Celdas esféricas	10	11.5	Texas Instruments
Película delgada epitaxial	1	15.7	Astropower

Fuente: MERTENS. R, 'Photovoltaics: Present Reality and Future prospects', en AdvancedTechnology Assesment System, United Nations New York. May 2000.

En cuanto a las investigaciones realizadas en laboratorio para células de película delgada estos se pueden observar en el cuadro 3. Donde aparte de las celdas de Si-c y Si-a también se tienen algunos datos de celda Cu(In,Ga)Se_2 (con 25% Ga), de la nueva generación de celdas CISG la cual posee el record de eficiencia respecto a celdas de película delgada.

La flexibilidad de ajustar el ancho de banda del absorbedor y la alta eficiencia lograda con ellas, la hace la celda de película delgada más prometedora actualmente.

Cuadro 3. Eficiencia de diferentes tipos de celdas de película delgada

Celda de película delgada	Area (cm ²)	Eficiencia récord (%)	Fuente
Si-a juntura simple	1	12.6	SELC
Stacks:Si-a/Si-a/Si-aGe	1	13.7	ECD
Cd-Te	1	13.4	USF
Cu(In,Ga)Se_2	1	16.2	IPE/RIT
CuInSe_2	1	14.1	SIEMENS SOLAR
Stacks:GaAs/ CuInSe_2	1	25.8	BOEING/KOPIN

Fuente: MERTENS. R, 'Photovoltaics: Present Reality and Future prospects', en Advanced Technology Assesment System, United Nations New York. May 2000.

Teniendo en cuenta que las mejores eficiencias en laboratorio se obtienen con áreas que son realmente pequeñas, en el cuadro 4 se pueden observar las eficiencias alcanzadas por las celdas de película delgada, pero en este caso con la mayor área posible por celda.

Para finalizar se muestra en el cuadro 5 lo que ocurre respecto a eficiencias de otros tipos de celdas de juntura simple y de las utilizadas en concentradores, las cuales poseen record de eficiencia de conversión de energía solar en electricidad.

Cuadro 4. Eficiencias con tecnología de película delgada con la mayor área posible.

Celda de película delgada	Mayor área (ft ²)	Eficiencia récord (%)	Fuente/fecha
CdS/CdTe	9.5	10.6	BP solar,5/00
Si-a/Si-aGe/Si-aGe/SS	10.2	7.6	United solar,9/97
CdTe/CdS	7.8	9.1	First solar,6/96
CdS/CdTe	6	11	Matsushita,6/00
Si-a/Si-aGe	8.2	7.6	BP solar,9/96
CdS/CdTe	5.4	10.8	BP solar,4/00
CdS/CIS	4	12.1	Siemens solar,3/99
Si-a/Si-c/vidrio	4.1	10	Kaneka,9/00
Si-a triple juntura	5	7.9	United solar,9/97

Fuente: CURRY. Robert, Photovoltaic Insider's Report, Feb. 2000.

Cuadro 5. Eficiencias de otros tipos de celdas.

Tipo de celda	Area (cm ²)	Eficiencia (%)	Fuente/observación
Juntura simple			
GaAs/GaAlAs	4	25.1	KOPIN
GaAs/GaInP	0.2	25.7	NREL
InP	4	21.9	Spire
Celdas para concentrador			
Si, juntura simple	x	28.2	Stanford C [*] =140
GaAs, juntura simple	x	29.2	Spire, Varian C=200
Stack:GaAs/GaSb	x	34.2	Boeing C=100
Stack:GaAs/Si	X	31.0	Stanford, Varian, Sandia C=500
Stack:InP/GaInAs	x	31.8	NREL C=50

*C: Factor de concentración.

Fuente: MERTENS. R, 'Photovoltaics: Present Reality and Future prospects', en Advanced Technology Assesment System, United Nations New York. May 2000.

4. VEHÍCULOS AÉREOS REMOTOS NO TRIPULADOS

Los vehículos aéreos no tripulados UAV, son vehículos motorizados que vuelan sin llevar ningún tipo de operadores humanos a bordo. Estos utilizan todos los tipos de fuerzas aerodinámicas para proporcionar el despegue, la elevación y la sustentación, necesarios para un vuelo satisfactorio, estos tipos de vehículos son utilizados en distintas ramas tanto de trabajo como de investigación, sea para monitorear campos, vigilancia privada o hasta transporte de carga de un determinado peso.

En cuanto a su control, este tipo de vehículos son dirigidos por controladores u operadores situados en tierra, o aire, y en caso de no ser necesario un controlador constante estos pueden estar programados para realizar un itinerario de vuelo durante cierto tiempo por ciertos sectores y regresar cuando se le indique sin necesidad de tener a alguien pendiente de su trabajo.

Los vehículos que son dirigidos por un controlador humano y son manejados por control remoto se denominan RPV (*Remote piloted Vehicle*), estos son fabricados en diferentes tipos y diseños que involucran aeroplanos, helicópteros, barcos y hasta misiles dirigidos. Todos estos lógicamente varían en su tamaño dependiendo del uso que se les desee dar, y su diseño también varía dependiendo de la aplicación que se le quiera dar, ya que no es lo mismo un vehículo de espionaje que un vehículo de carga.

Hoy en día es muy importante tener en cuenta el presupuesto necesario para la fabricación y el uso de los RPV, como es sabido el factor dinero es muy importante, es por esto que los RPV que son más versátiles y de más bajo costo encajan mejor en los actuales presupuestos que cada día son más reducidos.

Este tipo de tecnología que últimamente viene siendo perfeccionada tiene muchos tipos de aplicaciones de diferentes tipos, militares, civiles, comerciales y hasta

personales. Por ejemplo se encontró que el Gobierno israelí recibió hace algunos años una carta de una organización para la preservación de la naturaleza en África pidiendo informes acerca del empleo de los UAV para contrarrestar las actividades de cazadores furtivos en busca de pieles y marfil.

Otro caso más reciente nos presenta una de las estrategias más exitosas que ha implementado Estados Unidos en la guerra contra el terrorismo de Al Qaeda y los talibanes, es el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), tipo Hawk RQ-4 Global, MQ-9 Reaper y Predator MQ-1, que en los últimos tres años se ha incrementado sustancialmente. La combinación de estos aviones no tripulados, que son operados por la Inteligencia estadounidense y comandos militares, ha permitido localizar y eliminar a numerosos líderes terroristas en Afganistán, Irak, Pakistán, Yemen y Somalia

Así también las centrales eléctricas Canadienses están utilizando algunos tipos de UAV dedicados a vigilar las líneas de cables eléctricos de alto voltaje.³

- **Desventajas de los UAV**

Como sabemos los vehículos no tripulados poseen un sin número de capacidades hoy en día y se encuentran en tendencia a mejorar pero aun así nada es perfecto y se sabe que cada cosa tiene sus limitaciones y uno de los objetivos específicos de este trabajo de grado es experimentar acerca de cómo vencer algunas de las limitaciones más grandes en estos vehículos, las preocupaciones actuales acerca de estos vehículos se refieren a la supervivencia de estos mismos, su consumo energético, el enlace de la información obtenida y el extenso entrenamiento del personal necesario para el manejo de los programas.

Los UAV o RPV tienen una velocidad de vuelo más reducida que los demás vehículos, esto se hace para aumentar la duración del vuelo, reduciendo así el consumo de energía, sea eléctrica o combustible y poder mantenerse en posición

³ A. Barrientos, Vehículos aéreos no tripulados para uso civil y aplicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 2007

por una mayor duración de tiempo y lograr transmitir la información. Así también uno de los problemas es su alcance de visión o alcance óptico.

Dentro de las limitaciones presentes tenemos:

- Tiempo de vuelo o autonomía de vuelo por consumo energético.
- Limitaciones de peso y volumen de los equipos en su interior.
- Problemas de interferencia en las comunicaciones.
- Alcance óptico o línea visual.
- Dependencia de las estaciones terrestres.

4.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE UAV

En la actualidad existen una gran cantidad de tipos de aeronaves con las capacidades de realizar algunas misiones con un cierto grado de autonomía. La novedad de su llegada a las aplicaciones civiles dificulta la existencia de un consenso en su definición, que cuestiona, en determinadas ocasiones si un determinado sistema responde o no al concepto de UAV o RPV. Es por estos que existen también diferentes términos para referirse a estos vehículos, por ejemplo antiguamente se referían a ellos como ROA (*Remotely Piloted Aircraft*) o UA (*Uninhabited Aircraft*). Pero en la actualidad suele utilizarse el término al que anteriormente se le hizo mención, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) o más recientemente UAS (*Unmanned Aircraft System*).

Entonces según estas denominaciones se puede decir que se entiende por una aeronave no tripulada aquella capaz de realizar una operación sin necesidad de tener una tripulación en su interior. Debe pues entenderse que este hecho no quiere decir que no exista un piloto encargado del manejo de la aeronave, ya que estos pueden realizar su trabajo desde una base en tierra. Entonces de la definición de este concepto se precisa, que no es solo una aeronave debidamente instrumentada, sino que también de una estación en tierra la cual complementa los

instrumentos y las capacidades de la aeronave en operación. Como ejemplo se puede colocar un globo aerostático el cual cumple parcialmente con la definición pero no se puede clasificar como un UAV ya que este no puede ser controlado de ninguna manera, es libre en su movimiento.

Otra definición posible para estos sistemas es aquel que es capaz de desarrollar una misión u operación sin ninguna necesidad de intervención humana, ya que con esto se está excluyendo el radiocontrol o telecontrol de las aeronaves en los sistemas autónomos (AAS: *Autonomus Aerial System*).

En los últimos años, la proyección de estos sistemas desde el sector militar al civil ha propiciado que diferentes grupos de investigadores procedentes del área de la robótica y las energías renovables, hayan enfocado buena parte de sus esfuerzos a la investigación y desarrollo de estos.

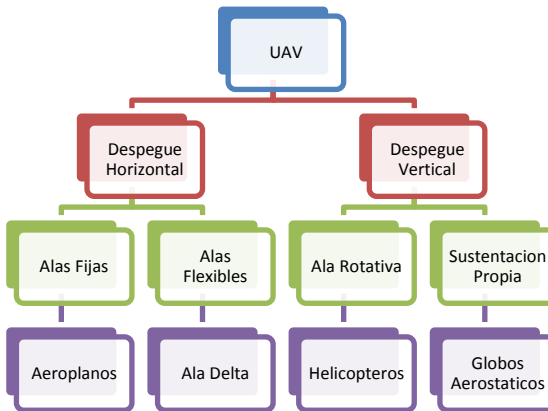
En lo que sigue, se utilizará el término UAV de manera indistinta, considerando en todo caso que la aeronave no transporta personas, sino que conlleva un propósito y que puede ser total o parcialmente controlado desde la estación de tierra.

Una de las formas más sencillas para establecer la clasificación de los UAV es la más simple la cual se basa en el tipo de aeronave.

De acuerdo a este tipo de clasificación pueden distinguirse aquellas en las que el despegue es vertical u horizontal, dependiendo del tipo de ala presente en la aeronave o aquellos que son auto sustentados como por ejemplo los dirigibles o los globos⁴. En la clasificación que se va a tener en cuenta en este libro se tienen a aquellos de despegue no vertical (horizontal) o los de ala fija (aeroplanos). En la figura a continuación se observa los tipos de aeronaves usadas en las UAV.

⁴ A. Barrientos, Vehículos aéreos no tripulados para uso civil y aplicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 2007

Figura 19. Clasificación de los UAV de acuerdo al tipo de despegue



Fuente: Autores

Otros de los criterios utilizados para la clasificación pueden ser aquellos en los que se tienen en cuenta las capacidades de vuelo. En la tabla a continuación se muestra este criterio.

Cuadro 6. Clasificación de UAVs (alcance, altitud, autonomía).

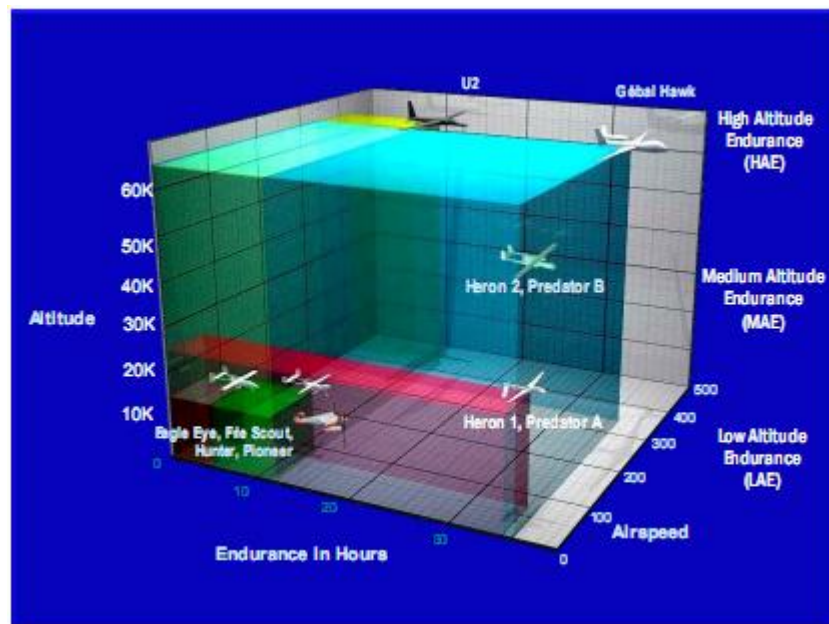
Categoría	Acronimo	Alcance (km)	Altitud de vuelo (m)	Autonomía (horas)	Carga en despegue máxima (kg)	Tipo de aeronave
Micro	μ(Micro)	< 10	250	1	< 5	H,A,otros
Mini	Mini	< 10	150 a 300	< 2	< 30	H,A, P, Otros
Alcance cercano	CR	10 a 30	3.000	2 a 4	150	H,A,P, Otros
Alcance corto	SR	30 a 70	3.000	3 a 6	200	A, Otros
Alcance medio	MR	70 a 200	5.000	6 a 10	1.250	A, Otros
Altitud baja	LADP	> 250	50	0,5 a 1	350	A
Penetración profunda			9.000			
Autonomía media	MRE	> 500	8.000	10 a 18	1.250	A,H
Autonomía alta	LALE	> 500	3.000	> 24	< 30	A
Altitud baja						
Autonomía alta	MALE	> 500	14.000	24 a 48	1.500	A,H
Altitud media						
Autonomía alta	HALE	> 2000	20.000	24 a 48	12.000	A
Altitud alta						
Combate	UCAV	aprox. 1500	10.000	aprox. 2	10.000	H,A
Ofensivo	LETH	300	4.000	3 a 4	250	A
Señuelo	DEC	0 a 500	5.000	< 4	250	A,H
Estratosférico	STRATO	> 2000	Entre 20.000 y 30.000	> 48	ND (no disponible)	A
Exo-estratosférico	EXO	ND	> 30.000	ND	ND	A

Fuente: Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid

Según la fuente de la cual se obtuvo la tabla, cabe resaltar que esta clasificación tiene en cuenta todas las aplicaciones de los UAV, tanto civiles como militares, siendo las militares las que abarcan la mayor parte de la clasificación.

A continuación se muestra una representación gráfica de todos los tipos de UAVs realizada por la International UAV strategy con el fin de ubicar el tipo de aeronave a utilizar en el proyecto dentro de una clasificación más amplia.

Figura 20. Espectro de los tipos de UAVs.



Fuente: International uav strategy_CDR Sisson

Por último podemos establecer una clasificación dependiendo del nivel de autonomía como se observa en la siguiente tabla:

Cuadro 7. Clasificación de UAVs dependiendo del nivel de autonomía.

	Blanco móvil (Drone)	Nivel 1 No autónomo	Nivel 2 Maniobra autónoma	Nivel 3 Piloto inteligente limitado	Nivel 4 Piloto inteligente completo
Trayectoria de vuelo en 4 dimensiones	Preprogramada	Preplanificada, preprogramada	Preplanificada, preprogramada	Parcialmente autónomo Posibilidad de cálculo de ruta	Posibilidad de cálculo de ruta
Presencia de piloto	Por seguridad	Guiado y control continuo	Como Nivel 1	Supervisión continua. Guiado y control ocasional	Solo como respaldo
Posibilidad de actuación del piloto	Solo en despegue y aterrizaje	Manipulación	Como Nivel 1	POsible	Solo como respaldo
Necesidad de actuación del piloto	Solo en FTS	En todos los casos	Cuando no haya maniobra automática	Ocasionalmente	Solo como respaldo
Piloto automático	No	No	No	Limitado	Completo
Presencia de ATC	Supervisión	Contacto continuo con el operador	Contacto continuo con el operador	Contacto continuo con el operador y con el piloto automático	Contacto continuo con el piloto automático (con el operador como respaldo)
Intervención de ATC	Petición o activación del FTS	Por petición del operador	Por petición del operador	Por petición del operador o del piloto automáticos	Por petición del piloto automático (del operador por respaldo)

Fuente: Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid

4.2 APLICACIONES GENERALES DE LOS UAV's

Hoy en día hay muchas y distintas aplicaciones que se les da a estos vehículos aéreos, desde el sector militar, pasando por el civil y hasta el sector comercial.

El sector militar fue donde se comenzó con esta tecnología y es el que ha impulsado su desarrollo desde hace más de 20 años ya que con la creciente necesidad de obtener inteligencia táctica y estratégica en tiempo real, así como el imperante apremio de mantener capacidades de vigilancia sobre sitios donde se moviliza el enemigo, las aeronave no tripuladas han surgido como solución efectiva y de bajo costo para suplir dichas necesidades. Dentro del espectro de las Aeronaves No Tripuladas podemos encontrar varias categorías como se observó en la figura 20, pero en este sector la mayoría de las aeronaves existentes son del

tipo aeroplano y están presentes en las categorías de los Mini-UAV que son usualmente usadas para reconocimientos cortos y son lanzados con la mano por los soldados. Los UAV tácticos de corto y medio alcance, los cuales pueden transportar cargas de hasta 150 Kg y son lanzados por catapulta, los MALE o llamados Ofensivos, Ataque o Señuelo con cargas de hasta 300 Kg. Y la categoría de los HALE (High Altitude Long Endurance) Utilizados para alcanzar alturas de más de 6000 pies y alcanzar objetivos hasta de 25000 kilómetros de distancia de la base.

Mientras tanto debido a este alto desarrollo proporcionado por las fuerzas militares a lo largo del mundo, las aplicaciones civiles o cotidianas han ampliado su interés, y comenzado con la investigación en esta área, aunque con algunas características algo diferentes por ejemplo en esta categoría los aeroplanos presentes se encuentran en la categoría de MINI según se puede percibir en el cuadro 7 mostrado anteriormente, todo esto debido a que este tipo de aeronaves tiene una mejor maniobrabilidad y capacidad de vuelo haciendo que este tipo sea el más frecuente para las aplicaciones de ámbito civil.

Las aplicaciones más utilizadas hoy en día en el ámbito civil son las de monitoreo, vigilancia, y registro, algo similares a las aplicaciones militares pero sin tanta importancia estatal, algo más para el sector de la industria privada y la vida cotidiana. Un terrateniente puede recorrer sus tierras y monitorear el estado de los pastos y el ganado, así como Las centrales eléctricas pueden realizar una vigilancia y registro de las redes eléctricas, etc.

Para la mayoría de estas aplicaciones es muy importante el uso de una cámara de video o de algún medio con el cual se puede obtener las imágenes, ya sea capturarlas o transmitir las instantáneamente al punto de control. Con la incorporación de esta capacidad para las aeronaves se puede cumplir las tareas de vigilancia, búsqueda o inspección mencionadas anteriormente. Es por esto que

en la realización del proyecto se tuvo muy en cuenta este factor y sin duda estará presente en el desarrollo.

El operario entonces con el uso de esta tecnología y la inclusión de un sistema de grabación de video podrá tener el control de la operación que está realizando y manejar o modificar lo que sea pertinente teniendo así el control del vuelo en un 100%.

Después de todo lo expuesto anteriormente, se encuentra que dentro de las aplicaciones más importantes están las siguientes, entre otras:

- Control e inspección de carreteras y vías de transporte en general.
- Detección y control de incendios, forestales o ciudadanos.
- Localización de objetos, animales o personas desde una gran altura.
- Inspección de redes eléctricas de alto voltaje.
- Localización de accidentes en lugares remotos.
- Control de agricultura regional (cosechas).
- Fotografías topográficas para realización de mapas.
- Usado por compañías de seguridad para vigilancia de terrenos, barrios o viviendas.

4.3 LOS UAV's Y LA AUTONOMIA DE VUELO

Una de las características más importantes de este tipo de aeronaves y la cual no es posible pasarla por alto, es el factor de la autonomía de vuelo, ya que de este factor dependen muchas cosas en lo que respecta al uso, el diseño y la eficiencia de estos tipos de vehículos aéreos no tripulados, dependiendo de este factor se deberá elegir el tipo de aeronave necesaria para una aplicación determinada, es por esto que será uno de los blancos más importantes en la realización de este proyecto. Como primera medida debemos llegar al significado de autonomía de vuelo.

El concepto de autonomía de vuelo se define como el tiempo en el cual un UAV es capaz de permanecer en vuelo sin tener que aterrizar ya sea por falla o por falta de combustible sea gasolina o electricidad.

En términos de consumo de combustible, para este tipo de UAV's (MINI) utilizados en aeromodelismo o aplicaciones a menor escala, es posible establecer un consumo promedio de combustible, teniendo en cuenta los factores de uso y características del diseño, como lo son la aerodinámica, el tipo de motor, forma de volar, cargas muertas, cargas a levantar, dirección del viento etc.; con todos estos datos se calcula un promedio de vuelo de entre 40 a 60 minutos, lo cual es bastante tiempo en el cual se pueden realizar algunas operaciones sin ninguna dificultad , pero entonces es ahí donde entra el factor económico y como es sabido hoy en día el valor del combustible por hidrocarburos es más alto y algunos dicen que cada vez más escaso; es por esto que nuevas tecnologías han venido a ser implementadas como lo es el uso de la energía eléctrica para muchos casos, desde transporte de pasajeros hasta para vehículos aéreos no tripulados, una energía que es en cierto modo más limpia y más barata.

Sin embargo, la limitación más importante en la autonomía de vuelo de las aeronaves eléctricas es la duración de las baterías, que a pesar de que pueden ser recargadas, su duración en vuelo aún no se compara con la duración de las aeronaves que utilizan gasolina⁵. Pero hay que tener en cuenta que cada día la tecnología en el uso de baterías esta en evolución y se han originado cambios tanto como en la duración, como en el peso.

Pero mientras la tecnología de baterías evoluciona a un punto en el que el beneficio sea superior, es un deber buscar las soluciones necesarias para obtener el mejor rendimiento de vuelo, la mejor autonomía y aun haciendo esto, ser amigable con el medio ambiente que como es sabido, no pasa por su mejor momento en los últimos años. Es ahí donde entra el uso de energías renovables

⁵ A. Barrientos, Vehículos aéreos no tripulados para uso civil y aplicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 2007

para las distintas aplicaciones y en este proyecto se realizará un enfoque en el uso de la energía Renovable en los Vehículos Aéreos No Tripulados.

4.4 PROYECTOS DE UAV's MUNDIALES

Después de haber dado características de toda clase de este tipo de vehículos es importante dar algún ejemplo de lo que ha sido llevado a cabo en el mundo en cuanto a esta tecnología a gran escala y pequeña escala y con todo la trascendencia que estos han tenido para futuras investigaciones.

- *UAV LFPV*

Este nuevo y flamante UAV incluye un GPS y conectividad inalámbrica constante a un sistema de control terrestre con video 800 x 480 en streaming, que permite de esta forma manipular el vehículo de forma segura si el usuario necesita desconectar el piloto automático para salirse de ruta. Dado que ha sido desarrollado con fines de reconocimiento, incluye una cámara desmontable de 11 megapíxeles con grabación de vídeo a 1080p (juraríamos que se trata de una GoPro), y guarda cualquier contenidos en tarjetas de memoria extraíbles. En cuanto a sus dimensiones, el LFPV posee una envergadura de 92 cm y pesa menos de 1,3 kg.

Figura 21. UAV LFPV



Fuente: Lehmann Aviation

- *Hermes 450 hecho en Israel*

El Hermes 450 es de fabricación israelí. Es muy utilizado en las guerras en medio oriente como avión espía, pesa unos 450 kilos, puede alcanzar los 5500 metros y tener una autonomía de vuelo de hasta 15 horas.

Figura 22. Hermes 450



Fuente: Fuerza Aérea Brasileña

- *UAV HADA Avión y Helicóptero*

Tipo de aeromodelo cuya característica especial es cambiar su funcionamiento entre un helicóptero para el despegue y el aterrizaje, y un avión para cubrir las distancias largas, la novedad es que una vez llega a cierta velocidad desplegará las alas y comenzará a impulsarse con una hélice presente en la parte trasera del avión. Se está planeando construirlo para que se pueda tripular y usado para el transporte de pasajeros y carga, cumplirá requisitos de usuarios civiles y militares

Figura 23. UAV-HADA



Fuente: <http://www.altran-alumni.org>

- *SCAN EAGLE*

Base ScanEagle Insight plataforma UAV fue desarrollado originalmente por Instituto del estado de Washington, Inc. para realizar un seguimiento a delfines y atunes de los barcos de pesca, a fin de garantizar que el pescado que usted compra en los supermercados es "dolphin - Seguro". Resulta que las mismas características necesarias por barcos de pesca (capaz de manejar el medio ambiente de agua salada, el lanzamiento y la recuperación de infraestructura de bajo, tamaño pequeño, de 20 horas de Resistencia, patrones automáticos de vuelo) son igualmente importantes para las operaciones navales de buques de mayor tamaño, y para la vigilancia del campo de batalla. La asociación con Boeing tuvo ScanEagle al mercado en los campos, y el diseño se está forjando una posición líder en el mercado en su nicho.⁶

⁶ <http://defense-update.com/products/s/scaneagle.htm>

Figura 24. Scan Eagle



Fuente: Boeing & Insitu

- *Quadricoptero GmbH Fabricación Alemana*

Es especialmente adecuado para evaluaciones e inspecciones en primer plano, y es capaz de obtener imágenes aéreas y vídeos sobre el mismo lugar durante un período determinado, según informa el Instituto de Naciones Unidas. Podrá realizar las fotografías directamente sobre el terreno con una distancia mínima de 5 cm, lo que le hace tener una alta resolución, una autonomía media de vuelo de 30 minutos, un alcance de un kilómetro cuadrado.

Figura 25. Quadricoptero GmbH



Fuente: <http://www.infouas.com/unosat-recibe-un-micro-uav-para-incrementar-su-capacidad-en-la-cartografia-local/>

- *UAV X1 Universidad San Buenaventura*

Es una aeronave desarrollada por el grupo de investigación de la Universidad San Buenaventura de Bogotá, Colombia. Esta aeronave es operada con un bimotor uno trasero y otro delantero lo cual es un sistema llamada push-pull⁷.

Figura 26. UAV NAVIGATOR X1



Fuente: FF.MM- FAC

⁷ Propulsión push-pull: Se refiere a aviones con 2 motores los cuales son opuestos, en los cuales uno da tracción y otro empuje.

Después de haber observado algunos ejemplos de Vehículos Aéreos No Tripulados desarrollados Mundialmente y conociendo todos los logros alcanzados con esta tecnología, es momento de pensar en la innovación y evolución de estos sistemas, lo cual pretende hacerlos más baratos y más limpios en términos energéticos, es por esto que se propone el uso de las energías renovables para su funcionamiento. A continuación se presentan características de estos tipos de energía y a seguir los ejemplos reales de su aplicación en los Vehículos Aéreos No Tripulados.

5. VEHICULOS AÉREOS Y LA ENERGÍA SOLAR

Después de haber analizado un poco acerca de las energías renovables disponibles, más específicamente la energía solar y otro poco acerca de los tipos de UAV's desarrollados a nivel mundial, es momento de comenzar a fusionar estas dos temáticas y observar cual puede ser el resultado de esta interacción.

Antes de comenzar a explicar la realización del proyecto, se realizará un resumen de los estudios e investigaciones realizadas previamente en este campo de las aeronaves sean tripuladas o no tripuladas en combinación con la energía solar.

Para comenzar se muestran algunas de las aeronaves tripuladas impulsadas con el efecto de la energía solar y se expondrán algunas de sus características ya que para irnos más a fondo en las aeronaves no tripuladas es una buena idea tener una idea del comportamiento y las características de las aeronaves de gran escala (Tripuladas).

A continuación los proyectos Tripulables:

1) ***Solar Challenger***

Diseñado por la empresa Aero Vironment y patrocinado por la empresa Dupont Corporation de EE.UU. Tenía una envergadura de 14.3 metros y un peso de 90 kg y 16.128 células fotovoltaicas que cubrieron las alas, con una potencia total de 2.600 Watts. El Solar Challenger era capaz de alcanzar una altitud de 3.660 m, y en 1981 esta aeronave fue el primer avión solar en recorrer la distancia 262 km desde París al Reino Unido y cruzar el canal de la mancha solamente usando energía solar.

El éxito del Solar Challenger provocó un interés creciente en el gobierno de EE.UU. respecto del vuelo solar y la financiación en investigación de aviones teledirigidos y la energía solar para vuelos largos y a gran altitud.

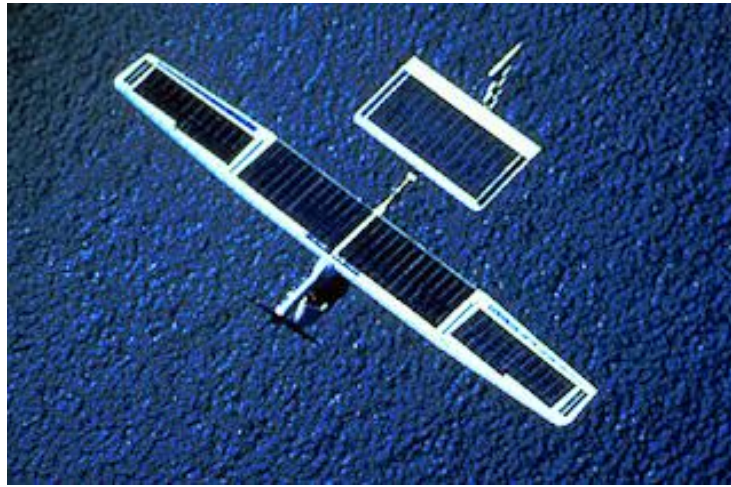
Figura 27. Solar Challenger 1



Fuente : <http://www.nasa.gov/>

Debido a esto, la empresa AeroVironment empezó con el proyecto de HALSOL, que era un avión solar para volar a gran altitud, y fue iniciado en 1983. HALSOL era un ala voladora simple, de 30 metros de envergadura. Los vuelos del HALSOL fueron dirigidos usando control remoto y baterías, dado que la aeronave no había sido equipada con células solares todavía. La aerodinámica de HALSOL fue revalidada, pero las pruebas resultaron en la conclusión de que la tecnología fotovoltaica no estaba lo suficientemente madura en ese momento.

Figura 28. Solar Challenger 2



Fuente: <http://www.nasa.gov/>

2) *Sunseeker*

El avión solar Sunseeker fue realizado por el piloto y campeón de planeadores Eric Raymond. Después de diseñar y desarrollar sus propios planeadores, fue invitado a pilotear la aeronave propulsada por la fuerza del hombre con pedales, Musclair II diseñada y desarrollada por Gunther Rochelt. Eric Raymond luego de volar la nave a energía muscular se dio cuenta de que con placas solares sobre las alas, podía tener más de diez veces la potencia que tenía con los pedales.

Con el estímulo de Klaus Savier y Gunther Rochelt, Eric desarrolló su concepto del avión solar. Los diseños previos tenían alas grandes, para captar grandes cantidades de energía. Pero Eric quería una aeronave más rápida así que diseñó alas más pequeñas, eficientes, y ligeras, pero dependía de baterías para suministrar energía en el momento de tomar altura y luego almacenaba energía cuando el avión quedaba planeando, las placas solares utilizadas pudieron suministrar la energía suficiente para mantener el vuelo a nivel.

Figura 29. Sunseeker



Fuente: <http://www.solar-flight.com/>

Entre 1986 y 1990 construyó el avión solar al que llamó SUNSEEKER y durante el mes de agosto de 1990 lo pilotó desde California a Carolina del Norte en 21 días. Donde el tramo más largo recorrido por el avión fue de 400 km. El "Sunseeker" pesa sin el piloto 89 kg y está fabricado con células de silicio amorfo.

3) *Icare II*

El avión solar Icaré II es un proyecto del cuerpo docente de la Facultad de tecnología de viajes espaciales de la universidad de Stuttgart en Alemania. Él avión es movido por medio de la energía solar y es un avión que está dentro de la categoría de los aviones solares. Con este proyecto, algunos premios fueron ganados y quedó en uso para el futuro. El vuelo de demostración de la capacidad de funcionamiento del avión fue de 350 Km de recorrido.

Figura 30. Icare II



Fuente: <http://www.ifb.uni-stuttgart.de/icare/icare.html>

El Icaré II es un planeador de gran rendimiento adaptado a su funcionamiento con energía solar, conjuntamente con el vuelo con térmicas característico de los planeadores. Esto demostró que el vuelo con motor y térmicas es posible. El motor es un motor eléctrico de 1200 w y está colocado en el timón del avión para aumentar su rendimiento, para el inicio del vuelo se utiliza una batería cuya capacidad de almacenaje de energía es de 915 Wh que es cargada por los mismos paneles solares del avión cuando éste no está en funcionamiento. Con las baterías que se utilizaron en el primer vuelo del avión solo se llegaba a una altura de 400 m, debido al peso de éstas, pero con la colocación de baterías de Li-polímero se logró alcanzar alturas de 1200 m sobre el nivel del mar. Las características más sobresalientes del avión son su bajo peso y el viajar a una velocidad baja que hace recordar a los viejos vuelos.

A continuación se continúa con la misma temática, pero con la variante que serán aviones No Tripulados.

Aviones a energía solar ya construidos No Tripulados:

1) **Solong**

AC Propulsión es una compañía de Alan Cocconi, y se dedica a la investigación, desarrollo y fabricación a pequeña escala de vehículos eléctricos. Desde 1991 la mayoría de los proyectos de la compañía han sido automovilísticos. El proyecto de este UAV Solong se basa en la demostración de la viabilidad de hacer un UAV (Vehículo aéreo no tripulado) que funcione con energía solar y que pueda mantenerse en vuelo perpetuo durante el día y la noche.

Figura 31. Solong



Fuente: <http://www.acpropulsion.com/solong>

La gran duración de los vuelos que este avión eléctrico SoLong puede realizar le permite ser utilizado como plataforma de comunicaciones temporales o por grandes periodos de tiempo. Su tamaño regular, la propulsión eléctrica silenciosa y la utilización de fuentes de energía no contaminantes lo hace una alternativa práctica para otros UAV que ya se utilizan en otros fines. El esfuerzo de

investigación y desarrollo están continuando hacia una reunión de datos de UAV completamente autónoma.

2) ***Aviones desarrollados por la NASA Pathfinder, Pathfinder Plus, Centurión , y Helios***

El programa de tecnología (ERAST) es un programa para el uso de aviones como sensores ambientales de la administración espacial norteamericana. El programa de ERAST es una de las iniciativas de la administración espacial norteamericana diseñada para desarrollar nuevas tecnologías para continuar el liderazgo de EE.UU. en la industria espacial cada vez más competitiva.

Avión Solar Pathfinder

Proviene del desarrollo del avión HALSOL en 1983 (posterior al Solar Challenger), el Pathfinder fue modificado con el agregado de las células solares actualizadas. Luego fue llevado a la base aérea de Dryden EE.UU. para nuevos vuelos de su etapa de desarrollo en el año 1995. El 11 de septiembre de 1995, el Pathfinder alcanzó una altitud de 15.400 m, estableciendo un nuevo registro de altitud para aeronaves solares. Después de nuevas versiones actualizadas del avión en Dryden, a fines de 1996, el Pathfinder fue transferido a la base de misiles del Pacífico de la marina norteamericana en Barking Sands, Hawai. La isla de Hawai fue escogida como una ubicación óptima para evaluar el Pathfinder debido a los altos niveles de luz solar existentes en la zona, por el espacio aéreo y las frecuencias de radio disponibles y por la diversidad de los ecosistemas terrestres y costeros para validar aplicaciones de obtención de imágenes científicas.

En Hawai el Pathfinder realizó siete vuelos a gran altitud, uno de ellos llegó a una altitud que vatio el record del mundo para vuelos con aviones a hélice y para aviones solares y fue de 21.815 m.

Figura 32. Pathfinder



Fuente:<http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-054-DFRC.html>

Avión Solar Pathfinder “Plus”

Durante 1998, el Pathfinder fue modificado a la configuración de Pathfinder Plus, y tenía una mayor envergadura de sus alas. El 6 de agosto de 1998, la aeronave modificada fue enviada a una altitud de 24.460 m en el tercero de los vuelos de prueba durante el desarrollo de Pathfinder Plus sobre Hawái. El objetivo de los vuelos era revalidar el nuevo sistema de propulsión solar, la aerodinámica y la tecnología de los sistemas desarrollados para este Pathfinder Plus.

El cambio más perceptible es la instalación de una nueva sección del ala en su centro de 13,42 m de largo que incluye un plano aerodinámico de gran altitud. La nueva sección es dos veces más larga que la sección del centro del Pathfinder original e incrementa la envergadura en conjunto del avión de 30 m a 36,9 m.

Avión Solar Centurión

El Centurión, de la misma manera que sus predecesores inmediatos el Pathfinder y el Pathfinder Plus, es una aeronave de ala voladora pilotada por control remoto liviana y propulsada con energía solar en la que se utilizó para demostrar la tecnología de la aplicación de la energía solar para vuelos de larga duración y a gran altitud; y es considerado un avión de demostración de la tecnología y un prototipo para un futuro de aeronaves solares que podían quedarse en el aire por semanas o meses para realizar muestras científicas, misiones de obtención de imágenes o servir de plataformas de telecomunicaciones.

Aunque comparte gran parte de los conceptos de diseño del Pathfinder, el Centurión tiene una envergadura de 62,8 m, más de dos veces el ancho del Pathfinder y un 70 % más que el Pathfinder Plus. Al mismo tiempo, mantiene la cuerda del ala del Pathfinder, dando una proporción del ala de 26 a 1 en el ala del Centurión.

Figura 33. Pathfinder Plus



Fuente:<http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-054-DFRC.html>

Avión Solar Helios

La empresa constructora de estos aviones AeroVironment prevé que el Helios es la aeronave solar final que puede brindar vuelos prácticamente eternos en la estratosfera. Se basa en las tecnologías desarrolladas por el Pathfinder y el Centurión pero añade un sistema de almacenamiento de energía para el vuelo continuo en la noche. Con un tamaño de un 25 a un 50 % más grande que Centurión, el avión Helios almacenará hasta dos tercios de la energía solar recibida por las células solares durante el día en las baterías eléctricas de litio y usará esta energía guardada para mantener el vuelo a su altitud durante toda la noche. Como renovará su energía todos los días con el sol, el Helios tendrá un vuelo con un límite práctico de hasta quizás seis meses de duración durante el verano.

Se presenta entonces una tabla realizada por un aficionado con los datos físicos de cada uno de las aeronaves.

Cuadro 8. Datos físicos de cada aeronave

	<i>Pathfinder</i>	<i>Pathfinder Plus</i>	<i>Centurión</i>	<i>Helios</i>
Envergadura [m]	30	36,9	62,3	62,3
Longitud [m]	3,66	3,66	3,66	3,66
Cuerda del ala [m]	2,4	2,4	2,4	2,4
Peso bruto [Kg]	252	315	855	855
Carga máxima [Kg]	45	67,5	270	270
Vel. Crucero [Km/h]	27 a 32	27 a 32	27 a 33	27 a 33
Motores eléctricos	6 mot. de 1,25 Kw c/u	8 mot de 1,5 Kw c/u	14 mot de 2,2 Kw c/u	14 mot de 2,2 Kw c/u
Potencia [Kw]	8	12,5	31	31

Fuente:<http://tipos-de-energia.blogspot.com/2007/07/aviones-energia-solar.html>

3) *Aviones desarrollados por la NASA Pathfinder, Pathfinder Plus, Centuri3n , y Helios*

El Zephyr fue dise1ado por la empresa privada de seguridad y defensa QinetiQ de Inglaterra. El avi3n s3lo pesa 14 kilogramos, con alas de 12 metros de envergadura. Tiene el record de velocidad: 252 Km/h y puede volar durante meses alimentado con la energ3a solar en altitudes de hasta 40 mil metros.

El Zephyr es simplemente un versi3n aligerada de un proyecto que ya lleva mucho tiempo en su desarrollo de un sistema de UAV barato capaz de realizar recolecciones de datos constante a altas altitudes del orden de los 30 km y adem3s se puede utilizar como plataforma de telecomunicaciones sobre una franja de 300 Km.

Figura 34. El Zephyr



Fuente: <http://www.qinetiq.com/>

6. CARACTERÍSTICAS SOLARES

El sol se comporta como un cuerpo negro que emite un conjunto de radiaciones electromagnéticas denominadas radiación solar. El sol emite esta energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura de aproximadamente 6000 K.

El sol es una fuente ilimitada de energía gracias a las reacciones nucleares que ocurren en su parte central. Gran parte de esa energía liberada llega a nuestro planeta en forma de radiación electromagnética, la luz solar que percibe el ojo humano se encuentra en el espectro que comprende desde 0.2 hasta 2.6 μm .

La radiación sufre una atenuación a medida que atraviesa la atmósfera terrestre, esto debido a los procesos de absorción, reflexión y refracción. Estos procesos se experimentan cuando los rayos de luz colisionan con las nubes o con el vapor de agua presente en la atmósfera. La radiación que alcanza la superficie terrestre se clasifica en dos, directa y difusa. La radiación directa es la que se absorbe en la superficie terrestre y que pasa por la atmósfera sin sufrir ninguno de los procesos mencionados anteriormente. La radiación difusa es la que se recibe después de haber sufrido los procesos de refracción y reflexión que ocurren en la atmósfera y por ende después de haber cambiado su dirección inicial.

A su vez, la radiación global se define como la potencia energética solar que incide sobre una superficie, se precisa como:

$$\text{Radiación Global } (H) = R. \text{ Directa } (H_b) + R. \text{ Difusa } (H_d) + R \text{ reflejada}$$

Donde la radiación reflejada es la radiación recibida, ya sea de tipo directa o difusa, que ha sido reflejada por alguna superficie.

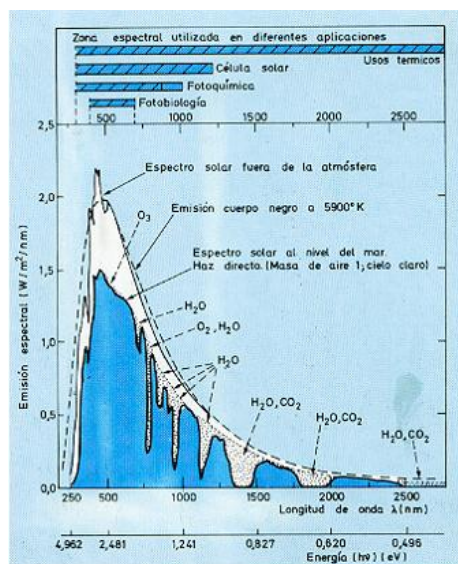
Un dispositivo captador de la energía solar "percibe" la radiación como si emanara de la bóveda celeste. La radiación solar recibida en un dispositivo

captador, en un día nublado, es sólo difusa, ya que la radiación directa es obstaculizada por las nubes.

La continua energía irradiada por el Sol se compone por ondas electromagnéticas de longitudes de onda ubicadas en las zonas ultravioleta, visible e infrarroja del espectro como se ve en la figura 46. Para el desarrollo eficaz de las aplicaciones solares es de gran importancia conocer el espectro de emisión del Sol. Se observa que la máxima emisión se da a una longitud de onda de aproximadamente 0,5 μm , que coincide con el color verde. Por otra parte, como se aprecia en la figura, parte de la radiación solar se absorbe por los diferentes componentes de la atmósfera terrestre. Se observa que aproximadamente el 80% de energía que emite el Sol pertenece a longitudes de onda de la radiación menores a $\approx 1,5 \mu\text{m}$. las longitudes de onda se expresan en las siguientes unidades: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$; $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$. Las energías de los fotones se expresan en eV (electrón-voltio).

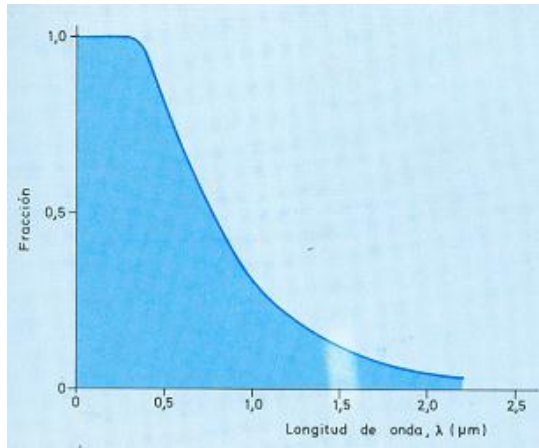
$$h\nu(\text{eV}) = \frac{1.2406}{\lambda(\mu\text{m})}$$

Figura 35. Espectro de la radiación solar



Fuente: EnerPoint

Figura 36. Fracción de energía solar contenida en la parte del espectro por encima de la longitud de onda λ .



Fuente: Enerpoint

Se le conoce como irradiación a la energía de la radiación absorbida por una superficie determinada en un instante dado y se mide en unidades de W/m^2 . Para cada instante la irradiación posee un valor distinto, por ejemplo, para un día despejado se espera que el valor de la irradiación a las 10:00 AM sea diferente y menor a la medida a la 1:00 PM, esto es debido al movimiento de la tierra sobre su eje (rotación) y por ende al ángulo de incidencia de los rayos solares. La irradiación en la noche es de $0 \text{ Watts}/\text{m}^2$, sencillamente porque el sol no se está “viendo” con esa parte de la tierra.

La Insolación es otro concepto para tener en cuenta, ésta corresponde a la energía radiante que incide en una superficie de área conocida durante un intervalo de tiempo dado. Se expresa en unidades de energía por área, usualmente en Watts-hora por metro cuadrado ($\text{W-h}/\text{m}^2$). Generalmente este valor es reportado como una a acumulación de energía horaria, diaria, estacional o anual.

6.1 IRRADIACIÓN: EL SOL (HORA SOLAR PICO)

La irradiación es el valor de la potencia luminosa. En la industria, los fabricantes de paneles fotovoltaicos han desarrollado un estándar para la fuente de radiación solar con una potencia luminosa de 1 KW/m², este valor es conocido con el nombre de SOL; con esto se determina la máxima potencia eléctrica de salida de los paneles y a su vez facilita la comparación de paneles de diferentes orígenes. Resaltar que 1 m² = 10.000 cm², y que 1 KW = 1.000 W, se tiene que: 1 SOL = 1 KW/m² = 100 miliwatts/cm².

6.2 DÍA SOLAR PROMEDIO

El valor de la irradiación varía continuamente desde que amanece hasta que anochece. Para facilitar el cálculo de la energía generada diariamente por un panel FV, se acostumbra a definir el día solar promedio.

El valor de la irradiación constantemente desde el amanecer al anochecer. Para simplificar el cálculo de la energía eléctrica generada diariamente por un panel FV, se acostumbra a definir el día solar promedio. Este valor es el equivalente del número de horas, del total de horas entre el amanecer y el anochecer, durante el cual el sol irradia con una potencia luminosa de 1 SOL. Un ejemplo, que el promedio de insolación diaria en una locación es de 5 KWh/m². Si este valor es dividido por un SOL, se consigue el valor (en horas) del día solar promedio para esa locación y esa inclinación.

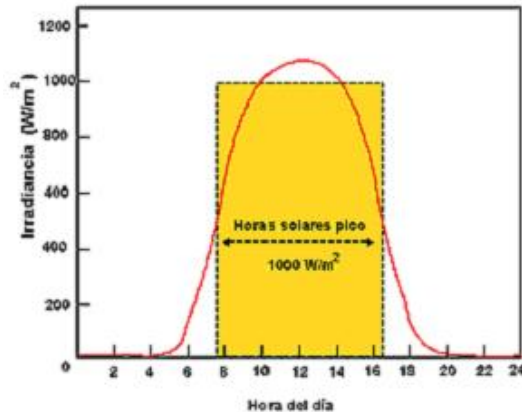
El ejemplo:

$$DIA\ SOLAR = \frac{5\text{Kwh}/m^2}{1\text{Kw}/m^2} = 5\text{horas}$$

Resaltando que los paneles son valorados utilizando una intensidad luminosa de un SOL, la duración del día solar promedio representa la cantidad de horas, del

total de horas de luz diaria, en que el panel es capaz de generar la potencia máxima de salida especificada por el fabricante.

Figura 37. Irradiación y horas solares pico durante día soleado



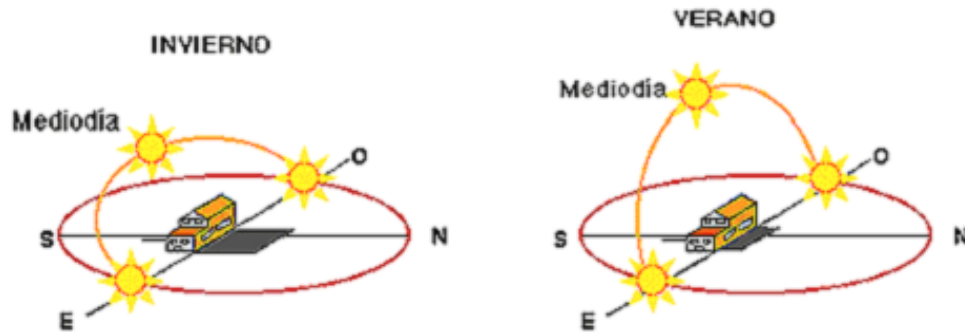
Fuente: <http://solar.nmsu.edu>

6.3 LA TRAYECTORIA SOLAR Y LA UBICACIÓN SOBRE LA TIERRA

Otros factores importantes que perturban radicalmente la incidencia de la radiación sobre cualquier dispositivo captador de sol, además de las condiciones atmosféricas, es el aparente movimiento del sol durante el día y a lo largo del año, como se muestra en la figura 38 y la ubicación del sistema sobre la tierra.

Se indica movimiento “aparente” del Sol, ya que en realidad la Tierra es la que gira alrededor del sol y no el Sol sobre esta.

Figura 38. Movimiento aparente del sol en la bóveda celeste en función de la hora del día y la época del año



Fuente: <http://solar.nmsu.edu>

De lo anterior se puede concluir que existen dos tipos de factores que influyen en la radiación solar, más específicamente en el ángulo de inclinación de ésta radiación; los dos tipos de factores son:

- Factores dependientes del movimiento de la tierra
- Factores dependientes de la ubicación sobre la tierra

6.3.1 Factores dependientes del movimiento de la tierra: Los movimientos que posee la Tierra se clasifican en cuatro: traslación, rotación, precesión y nutación (Ver Figura 39).

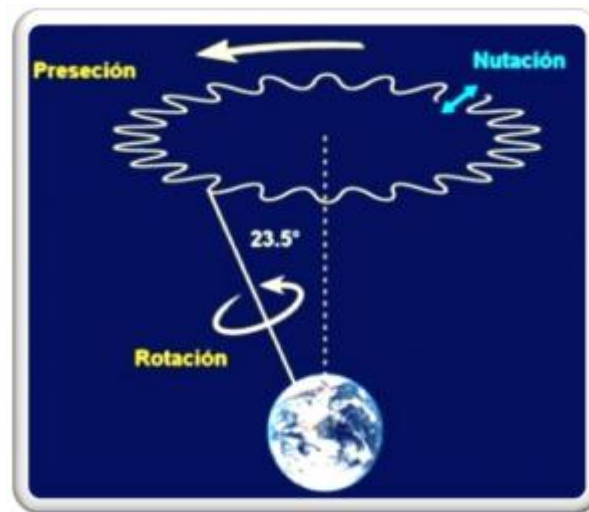
-Traslación: Es el movimiento de la tierra alrededor del sol, dicho movimiento describe una trayectoria elíptica, la cual da lugar a las estaciones del año.

-Rotación terrestre: Es el giro de la Tierra sobre su propio eje, el eje pasa por el polo sur magnético y el polo norte magnético de la Tierra, este giro se da en sentido anti horario y es el que da lugar al día y la noche.

-Precesión de los equinoccios: Es un movimiento lento de la inclinación del eje de la Tierra con respecto a la elíptica. Este movimiento retrasa la llegada de los equinoccios lentamente. Completa una vuelta cada 25.790 años.

-Nutación: es un bamboleo menor del eje de la Tierra con respecto a la elíptica tiene un ciclo de 19 años en el que la inclinación varía entre 6 y 9 segundos.

Figura 39. Movimientos de rotación, precesión y nutación de la tierra.



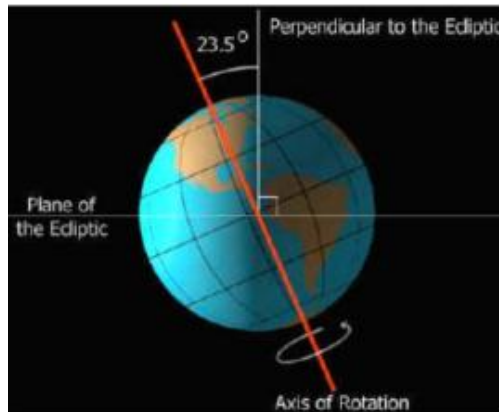
Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO- UIS

Los movimientos más importantes de la Tierra el momento de estudiar la radiación solar sobre una superficie para poder determinar la irradiación sobre ésta misma, son el de traslación y el de rotación, los cuales influyen directamente en el ángulo de declinación [δ] y el ángulo de inclinación horaria [ω] respectivamente.

6.3.1.1 Angulo de declinación δ : Al situar un plano sobre la trayectoria elíptica de la tierra alrededor del sol, se observa como el eje de rotación de la

tierra se encuentra inclinado aproximadamente 23.5° (ver figura 40) este valor varía de 21.5° a 24.5° causado por el movimiento de nutación.

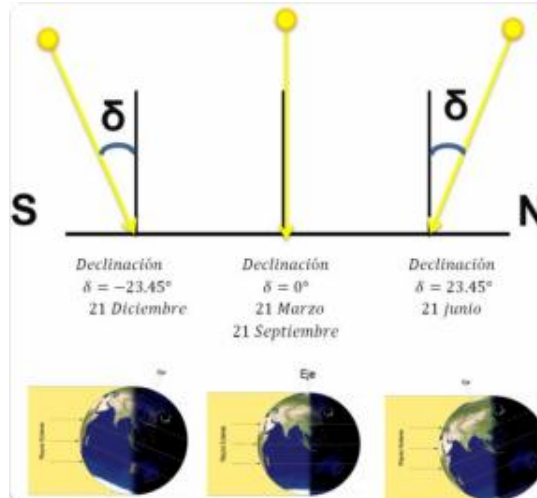
Figura 40. Declinación de la tierra respecto al plano elíptico



Fuente: ovnisultimahora.blogspot.com

El ángulo de declinación influye directamente en la forma en la cual los rayos solares inciden sobre una superficie vertical con sus caras de frente a los polos, esto debido al movimiento de translación. Éste ángulo cambia durante el recorrido de la tierra desde -23.5° el 21 de diciembre a 23.5° el 21 de junio aproximadamente (ver figura 41).

Figura 41. Variación del ángulo de declinación sobre una superficie en latitud cero.



Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO- UIS

La declinación (δ) de la radiación solar varía durante de todo el año, la forma más fácil de calcular esta inclinación en el año se realiza por medio de la expresión:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right)$$

Donde n representa el día del año, tomando como 1 el primero de Enero.

6.3.1.2 Angulo de inclinación horaria ω : Éste ángulo depende de la rotación de la Tierra y mide el desplazamiento angular del sol durante el día, tomando como referencia el mediodía (Ver figura 42). El ángulo horario es igual a 0° , en el instante que se encuentre más alto el Sol en el cielo y el ángulo cenital solar sea mínimo; Cada hora es igual a 15° de longitud, además se toma un valor positivo (+) para las mañanas y negativos (-) para las tardes.

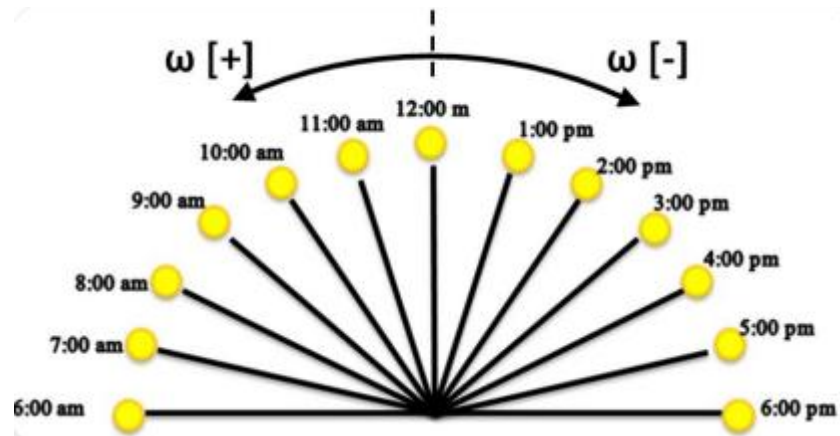
En ese orden de ideas, un ejemplo de ángulos de inclinación horaria sería:

Hora: 6:00 AM $\rightarrow \omega = 90^\circ$

Hora: 12:00 M $\rightarrow \omega = 0^\circ$

Hora: 6:00 PM $\rightarrow \omega = -90^\circ$

Figura 42. Variación del ángulo horario ω



Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO- UIS

6.3.2 Factores dependientes de la ubicación en la tierra: Las condiciones de un plano como su ubicación y orientación son diferentes en toda la superficie terrestre, presentaran diferentes condiciones un plano horizontal situado con Latitud 90° (los polos) con respecto a un plano que se encuentre en la Latitud 0° (el Ecuador), además, se deben tener en cuenta las variaciones del área efectiva para el estudio de la irradiación sobre un plano, sí éste posee una inclinación respecto a la horizontal y su normal no apunta al sur. De esta manera, los factores

dependientes de la ubicación de la superficie en la tierra y que afectan la radiación solar sobre ésta son:

-Latitud terrestre (φ).

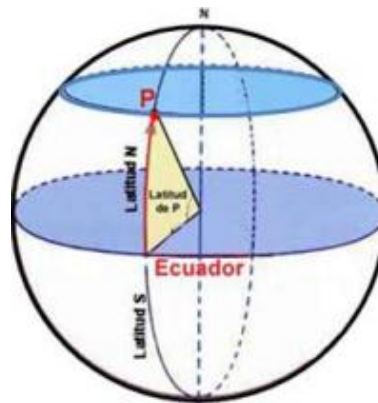
-Angulo de inclinación superficial (β).

-Azimut superficial de la pared (γ_p).

-Azimut solar (γ_s).

6.3.2.1 Latitud terrestre: Es el ángulo comprendido entre el plano de la línea ecuatorial y algún punto P ubicado sobre la superficie terrestre medido sobre el meridiano del lugar en cuestión (Ver Figura 43).

Figura 43. Latitud terrestre.

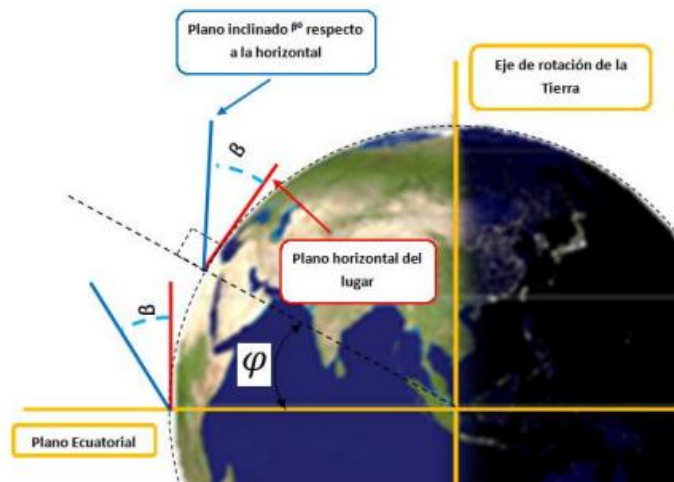


Fuente: Definición ABC.

El máximo valor de la Latitud es 90° , y para indicar su sentido se menciona el hemisferio (Sur o Norte) o se indica el ángulo de manera negativa (-) para el hemisferio sur y de forma positiva (+) para el hemisferio Norte.

6.3.2.2 Angulo de inclinación de la superficie (β): Es el ángulo formado entre una superficie y la horizontal del lugar donde está ubicado (Ver figura 44).

Figura 44. Inclinación de una superficie respecto a la horizontal

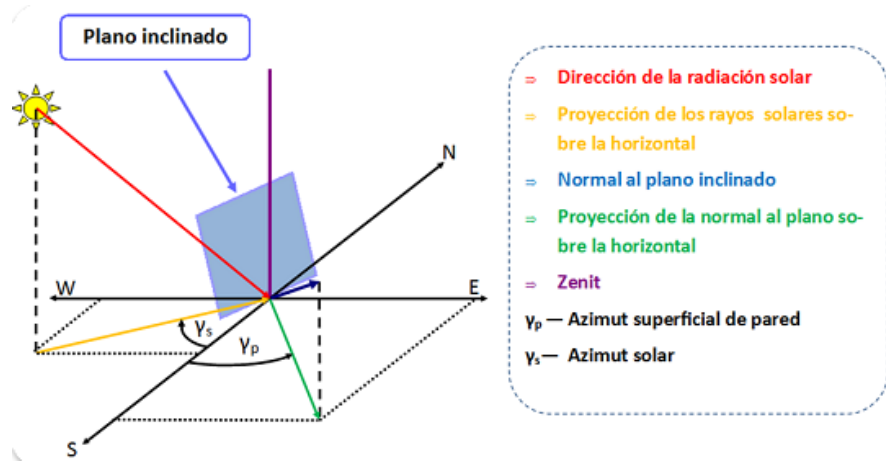


Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO- UIS

6.3.2.3 Azimut superficial de pared (γ_p): Es el ángulo constituido entre la línea norte-sur y la proyección sobre la horizontal de la normal de una superficie, se expresa de forma negativa hacia el este y positiva hacia el oeste (Ver figura 45).

6.3.2.4 Azimut solar (γ_s): Es el ángulo establecido entre la línea norte-sur y la proyección sobre la horizontal de la dirección de la radiación solar, éste valor es negativo hacia el este y positivo hacia el oeste.

Figura 45. Azimut solar y azimut de pared para una superficie inclinada.



Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO- UIS

6.3.3 Calculo de inclinación de radiación solar θ para diferentes superficies

El ángulo formado entre la normal del plano y la dirección de la radiación, es la inclinación de la radiación solar (θ), se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

$$\alpha_s = 90 - \theta_z$$

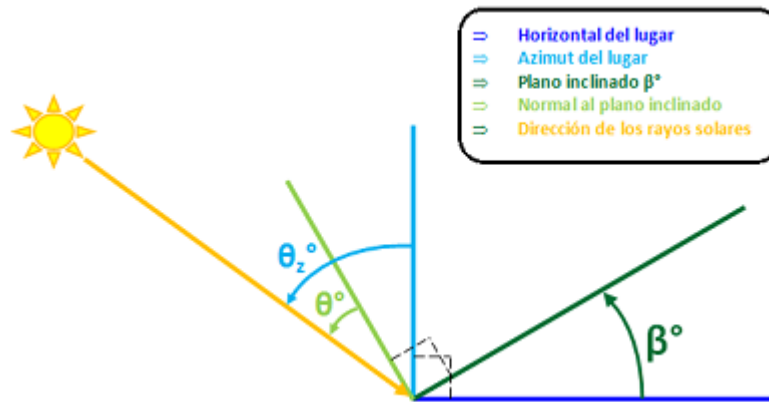
$$\cos \gamma_s = \frac{\cos \theta_z * \sin \varphi - \cos \delta}{\cos \theta_z * \sin \varphi}$$

$$\cos \theta = \cos(\gamma_s - \gamma_p) \cos \alpha_s \sin(\beta) + \sin \alpha_s \cos(\beta)$$

Teniendo en cuenta los tres tipos de planos que se pueden presentar:

- Superficies horizontales ($\beta = 0$)
- Superficie inclinada mirando al sur ($\beta \neq 0 \rightarrow \gamma_p = 0$)
- Superficie inclinada indiferentemente ($\beta \neq 0 \rightarrow \gamma_p \neq 0$)

Figura 46. Angulo incidente de la radiación sobre superficie inclinada.



Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO- UIS

6.4 DATOS DE INSOLACIÓN

El diseño de sistemas solares depende claramente de la insolación. A su vez la insolación sobre la superficie captadora se ve afectada principalmente por dos factores, las condiciones climáticas y el ángulo de posición de la superficie respecto al sol. La insolación promedio es menor en lugares donde los días nublados son más frecuentes. En lugares donde la latitud sea mayor a 15° , los días de inviernos son más cortos que los días de verano. Lo que conlleva a una mayor insolación promedio en verano.

Como la insolación depende del ángulo de posición del dispositivo respecto al sol, se utiliza la insolación horizontal para reseñar el potencial solar de un lugar. En

base a la insolación horizontal se logra estimar la insolación a un azimut y elevación establecida. Para diferentes regiones y épocas del año ya existen tablas y mapas de insolación horizontal, provenientes de varias fuentes.

6.5 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN Y EL BRILLO SOLAR.

Hoy en día se han desarrollado métodos e instrumentos que permiten registrar la intensidad de la radiación directa o difusa, el brillo solar y las horas en la que se da. Los instrumentos de medición de la radiación solar son los siguientes:

- a). Piranómetro, mide la radiación solar global.
- b). Pirheliómetro, mide la radiación solar directa.
- c). Actinógrafo o Piranógrafo, registra la radiación solar global directa y difusa.
- d). Heliógrafo, mide el tiempo de insolación diaria.

6.5.1 Piranometro: Instrumento de gran precisión utilizado para medir la irradiación incidente sobre una superficie horizontal. Consiste en un sensor que mide la densidad del flujo de radiación solar en un campo de 180 grados, éste arroja un voltaje proporcional a la irradiación con el cual se determina la radiación total (H), Ver figura 47. Este instrumento según la WMO (*World Meteorological Organization*) se clasifica en tres clases: uno, dos y tres. Se debe considerar además de las características ya conocidas en los Piranómetros, la respuesta coseno y la respuesta azimut.

Figura 47. Piranómetro.



Fuente: Rumtor, Aparatos meteorológicos.

6.5.2 Pirheliómetro: Es un aparato semejante a un piranómetro pero cumple una función diferente, a diferencia de éste, no mide la radiación en un campo de 180 grados sino mide solamente la radiación directa hacia donde se encuentre orientado el instrumento. En Colombia, en pocas estaciones climáticas es empleado el pirheliómetro de incidencia normal. La sensibilidad se da en Jl vj ($W \cdot m^2$) y la lectura puede hacerse sencillamente con un voltímetro digital. Este instrumento necesita de un seguidor de sol, esto es, un dispositivo que le permite seguir el sol durante su movimiento diurno.

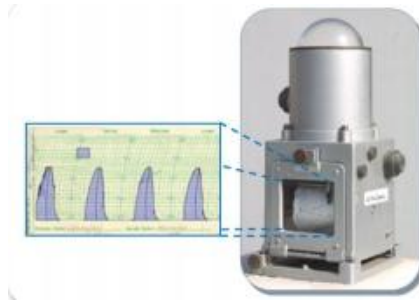
Figura 48. Pirheliómetro.



Fuente: <http://www.labsolar.utfsm.cl>.

6.5.3 Piranografo: Mide la radiación solar global directa y difusa mediante la diferencia de temperaturas entre una banda metálica negra y dos bandas metálicas semejantes blancas expuestas a la radiación solar. Se requiere de un planímetro para calcular el área que se encuentra bajo la curva, valor que se multiplica por el factor de calibración para obtener la suma diaria de la radiación global en Watt/m^2 .

Figura 50. Actinógrafo.



Fuente: <http://meteorologia.pucp.edu.pe>, modificada por los autores.

El *Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras* (HIMAT), ahora conocido como IDEAM, utiliza en Colombia ampliamente el actinógrafo ROBITI5CH, el cual es de bajo valor y tiene la capacidad de registrar la información. Este instrumento es de tercera clase, por ende la precisión de los valores de la radiación global que se captan con este instrumento está en el orden de $\pm 10\%$.

6.5.4 Heliógrafo: Instrumento meteorológico que mide el tiempo de insolación diaria. El tiempo de duración de la insolación se obtiene concentrando los rayos del sol sobre una cinta de cartulina pintada de azul que se quema en el punto que se forma la imagen del sol. Si el cielo está despejado se formará una línea

continúa sobre la cinta de cartulina. Para hallar las horas de insolación sólo se debe sumar la distancia total carbonizada en la banda.

Este aparato permite determinar cuántas horas y durante qué horas hubo una radiación solar por encima de cierta intensidad.

Figura 51. Heliógrafo.



Fuente: <http://www.labsolar.utfsm.cl>.

6.6 MAPAS Y TABLAS DE RADIACIÓN SOLAR

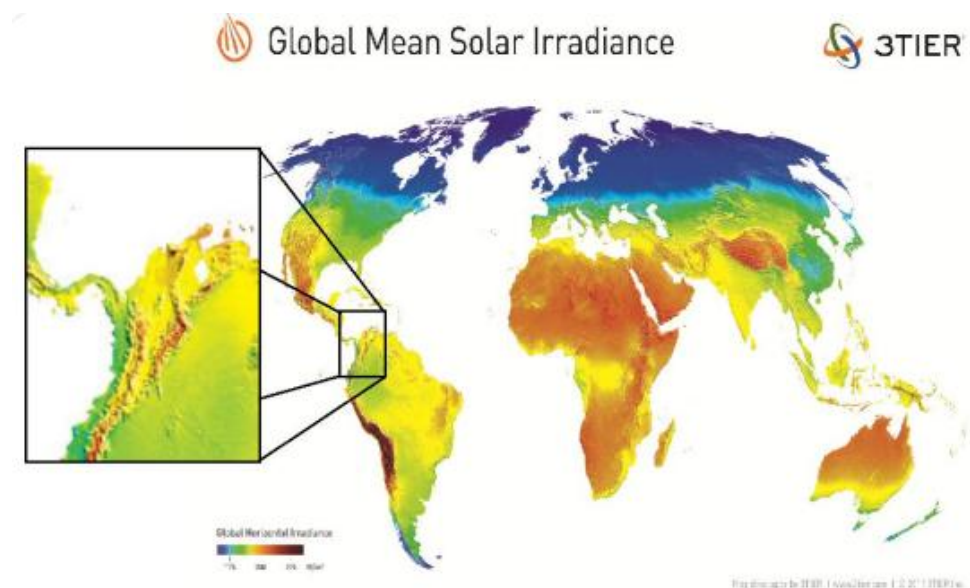
6.6.1 Mapas de radiación solar: Los mapas de radiación solar son archivos que permiten representar y determinar visualmente un promedio de irradiación para diferentes épocas del año en diferentes lugares, estos mapas se han diversificado de tal forma que la irradiación en cualquier parte del mundo puede ser estimada. Cabe resaltar que los mapas de radiación solar constituyen solo una tendencia de la irradiación, por tanto si se desea realizar un análisis complejo es indispensable contar con la medición de la irradiación del lugar en cuestión.

6.6.1.1 Radiación Solar Mundial: La irradiación en nuestro planeta presenta variaciones según la posición geográfica y otros factores climáticos y ambientales

de cada lugar. Esto permite que algunas zonas tengan mayor ventaja en el momento de implementar proyectos de energía solar (Ver figura 52).

El estudio global de energía solar permite establecer los lugares con mayor irradiación promedio en todo el año. De éste estudio se puede observar que las zonas ubicadas en los trópicos tienen mayor potencial solar, con una irradiación estimada entre los 200 W/m² y los 250 W/m².

Figura 52: Irradiación solar promedio global.



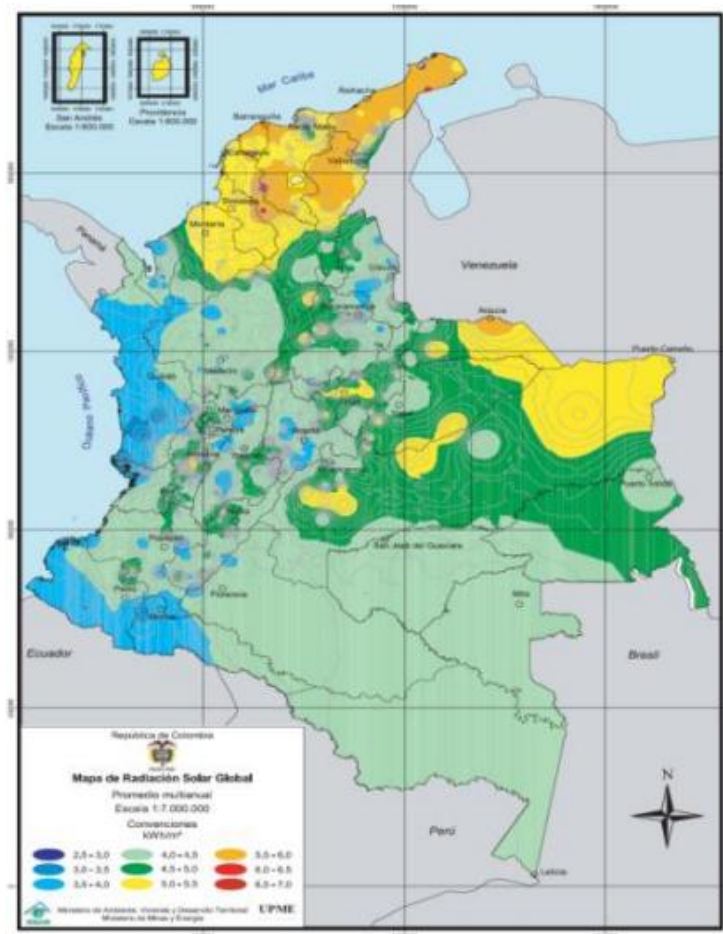
Fuente: 3TIER.

6.6.1.2 Radiación Solar en Colombia: Colombia al estar ubicado en una zona tropical cerca de la línea de ecuador posee un buen potencial solar (ver figura 52). Esta ventaja se puede aprovechar mediante el impulso de proyectos enfocados en la obtención de energía por métodos no convencionales como son las celdas

fotovoltaicas y los colectores solares, para ello es necesario avanzar en la investigación y tecnología que permita revelar el potencial de este recurso.

El promedio multianual de irradiación en Colombia es de 4.5 KWh/m²/día según estudios de la radiación en Colombia. Asimismo las zonas con mayor irradiación en Colombia como la Guajira cuentan con un valor de irradiación promedio aproximada de 6 KWh/m²/día, debido a su geografía y ubicación en el territorio Colombiano (ver figura 53).

Figura 53. Promedio multianual radiación solar en Colombia.



Fuente: Atlas de radiación solar de Colombia

6.6.2 Tablas de radiación solar: Las siguientes tablas muestran los valores resumidos de la radiación solar global promedio diaria de las estaciones situadas en las áreas metropolitanas de las principales ciudades del país y/ las estaciones de mayor importancia en el departamento de Santander. Cabe resaltar que Colombia posee 264 estaciones con información de radiación y brillo solar a lo largo de todo el territorio nacional; además también existe un programa desarrollado por la Universidad Nacional que permite estimar la radiación y el brillo solar de localidades donde no hay estaciones.

Además con el fin de obtener fuentes de información más precisas sobre la radiación solar en la ciudad de Bucaramanga, se anexa al final del presente documento una tabla con los datos de radiación solar directa, difusa; tomados con una frecuencia de un minuto por medición para el intervalo de horas comprendido entre las 10:19 AM hasta las 3:39 PM, tomados el mes de febrero de 2012 en el laboratorio de sistemas térmicos de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Cuadro 9. Radiación Solar en las principales ciudades de Colombia

Cuadro 12. Radiación solar en las principales ciudades del país (kWh/m²/día)

Departamento	Ciudad/municipio	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
Cundinamarca	Fontibon	Apto.Dorado	4,89	4,99	4,54	4,29	4,06	3,92	4,43	4,41	4,48	4,21	4,22	4,47	4,41
Cundinamarca	Pto.Salgar	Apto.Palenquero	4,7	4,38	4,4	4,71	5,03	4,88	5,33	5,27	5,26	4,76	4,65	4,6	4,83
Antioquia	Medellin	Apto.Olaya Herrera	4,78	4,94	4,76	4,76	4,51	4,96	5,47	5,33	4,98	4,39	4,34	4,37	4,8
Antioquia	Bello	Tulio.Ospina	4,8	5	4,81	4,82	4,51	5	5,56	5,35	4,92	4,4	4,39	4,4	4,83
Atlántico	Soledad	Apto.E.Cortizo	5,8	6,25	5,94	5,85	5,46	5,31	5,66	5,51	4,89	4,89	4,96	5,43	5,5
Bolívar	Cartagena	Apto.Crespo	6,01	6,29	6,12	5,92	5,61	5,53	5,76	5,68	5,18	4,86	5,06	5,7	5,64
Magdalena	Santamarta	San lorenzo	3,77	3,86	4,05	3,93	3,8	3,9	4,31	4,15	3,58	3,28	3,14	3,44	3,77
Valle	Cali	Univalle	4,9	4,95	5,03	4,79	4,4	4,51	5,1	5,05	4,94	4,52	4,33	4,56	4,76
Valle	Palmira	ICA-Palmira	5,08	5,06	4,92	4,85	4,39	4,47	4,95	4,88	4,8	4,71	4,54	4,7	4,78

Fuente: RODRIGUEZ, Humberto. Manual de radiación solar en Colombia: U. Nacional 1990.

Cuadro 13. Radiación solar en las principales ciudades del departamento de Santander (kWh/m²/día)

Departamento	Ciudad/municipio	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
Santander	Bucaramanga	UIS	4,8	4,34	4,09	4,29	4,44	4,03	4,34	4,45	4,33	4,22	4,24	4,44	4,33
Santander	Lebrija	Apto.Palonegro	5,34	5,1	4,89	4,91	4,8	4,68	5,02	5,07	5,09	4,87	4,67	4,85	4,95
Santander	Lebrija	La Esperanza	4,73	4,66	4,45	4,46	4,58	4,65	5	4,94	4,8	4,34	4,18	4,21	4,58
Santander	B/bermeja	Apto.Yariguies	5,54	5,23	4,8	5,02	5,07	5,12	5,7	5,58	5,37	5,05	4,77	4,95	5,18
Santander	Surata	Cachiñ	4,33	4,61	4,69	4,26	4,11	4,18	4,56	4,33	4,27	3,81	4,15	4,15	4,29
Santander	Velez	Campo capote	5,05	4,82	4,45	4,87	4,94	5,05	5,45	5,41	5,31	4,98	4,68	4,72	4,96
Santander	San Vicente	El diviso-aguablanca	4,46	4,37	4,13	4,41	4,7	4,65	5,07	4,95	4,8	4,38	4,06	4,24	4,52
Santander	Mogotes	Escuela. Agronomia	5,49	5,39	5,05	4,76	4,87	4,72	5,2	5,24	5	4,77	4,93	5,1	5,04
Santander	Sabana de torres	Villa de leyva	5,56	5,24	4,84	4,99	4,98	5,11	5,56	5,59	5,34	4,96	4,71	5,02	5,16

Fuente: RODRIGUEZ, Humberto. Manual de radiación solar en Colombia: U. Nacional 1990.

Fuente: Manual de radiación solar en Colombia U. Nacional 1990.

7. DISEÑO TOTAL Y COMPONENTES DEL SISTEMA

Por medio de la elaboración de este proyecto se pretende suplir la necesidad de los vehículos no tripulados, de obtener una mayor eficiencia y tiempo de vuelo para desarrollar las actividades que les fueron propuestas a cabalidad. Dotándolos con un sistema de generación energética basado en la energía solar que aparte de mejorar su eficiencia de funcionamiento, es amigable con el medio ambiente.

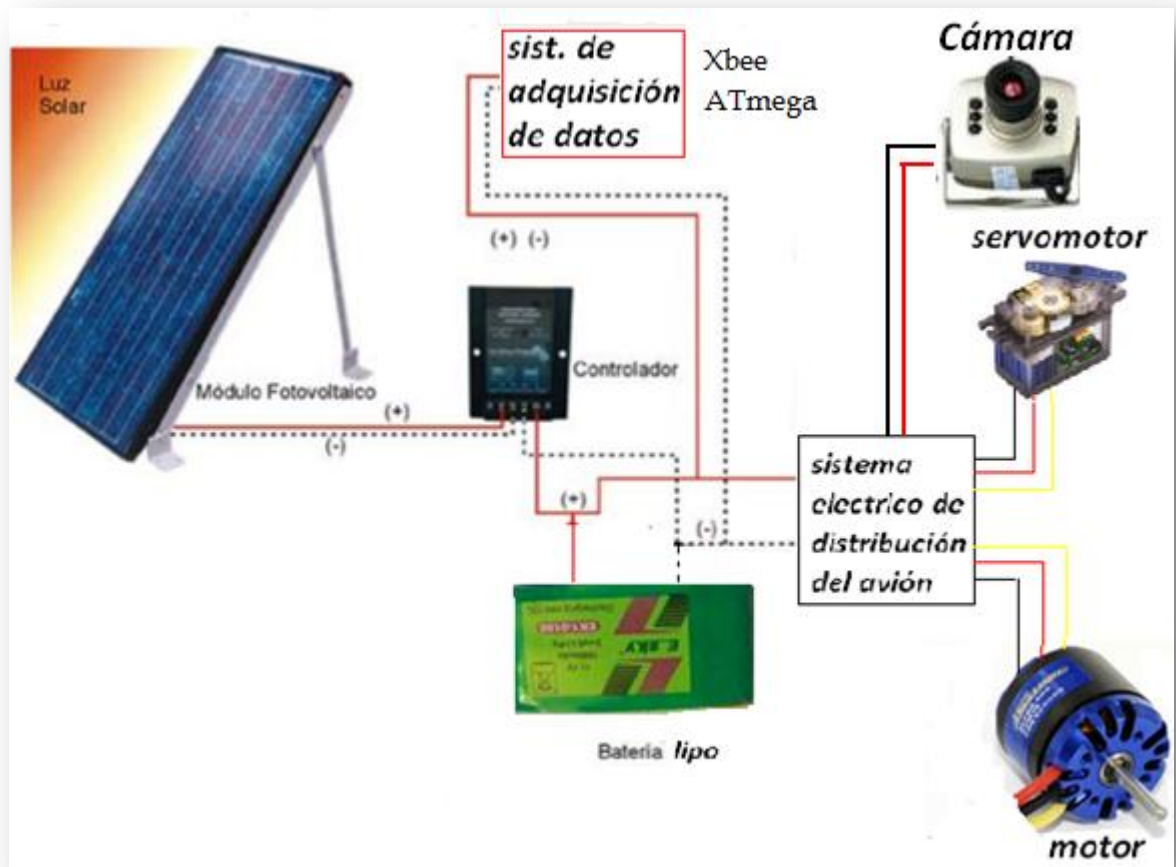
El sistema a desarrollar proporcionará una generación energética a través de celdas fotovoltaicas, con el fin de alimentar las baterías acumuladoras que son las encargadas de la distribución de energía a todo el sistema eléctrico y electrónico del aeromodelo, todo esto con el fin de eliminar las falencias que presentan estos vehículos en este sector.

El sistema también proporcionará el monitoreo del vuelo, con información adquirida en tiempo real, lo cual permitirá observar los beneficios de uso de la energía solar y el ahorro de energía presente en comparación con el vehículo sin la generación de energía.

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser diseñados para trabajar con cargas tanto de corriente directa DC o para corriente alterna AC mediante el uso de un inversor de corriente. Los sistemas de corriente directa DC principalmente están conformados por el arreglo fotovoltaico, los diodos tanto de bypass como de bloqueo, regulador de carga en caso de ser necesario, el banco de baterías para el respaldo del sistema y la respectiva carga.

Los sistemas para las cargas AC incluyen adicionalmente un inversor DC-AC como se mencionó anteriormente.

Figura 54. Esquema del sistema Eléctrico de la Aeronave (general)

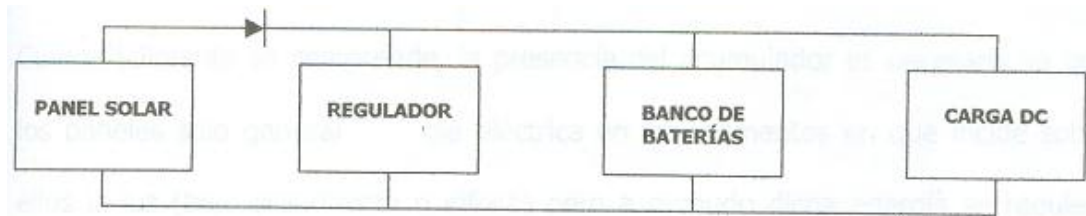


Fuente: Los Autores

7.1 SELECCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS

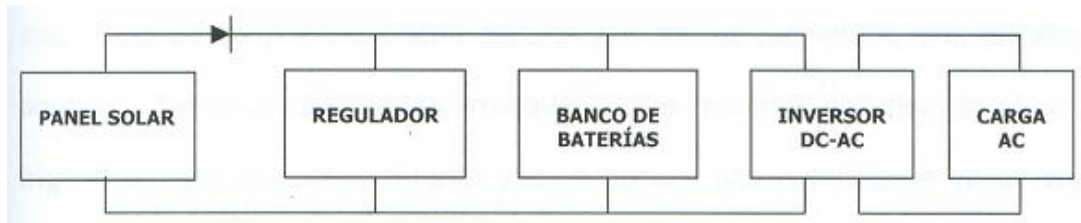
En la primera sección de este capítulo se va a tratar lo que concierne a la selección, características y arreglo fotovoltaico que se optó por utilizar en la realización del proyecto. Para comenzar con el desarrollo lo primero que se debe tener en cuenta es la disposición general o el diagrama general de los elementos que estarán presentes en el arreglo fotovoltaico.

Figura 55. Componentes de un sistema DC.



Fuente: Los Autores

Figura 56. Componentes de un sistema AC.



Fuente: Los Autores

Para este proyecto se trabajara únicamente con elementos bajo el funcionamiento de la corriente continua es por esto que se deberá tener más en cuenta el diagrama DC.

Se comienza con la selección adecuada de los elementos comenzando por los paneles solares a utilizar.

7.1.1 Celdas Seleccionadas: Las células solares que se seleccionaron son llamadas "Módulos PowerFilm®" que son especialmente utilizadas para Aeromodelismo han sido especialmente diseñadas para ser integrados a aviones radio controlados.

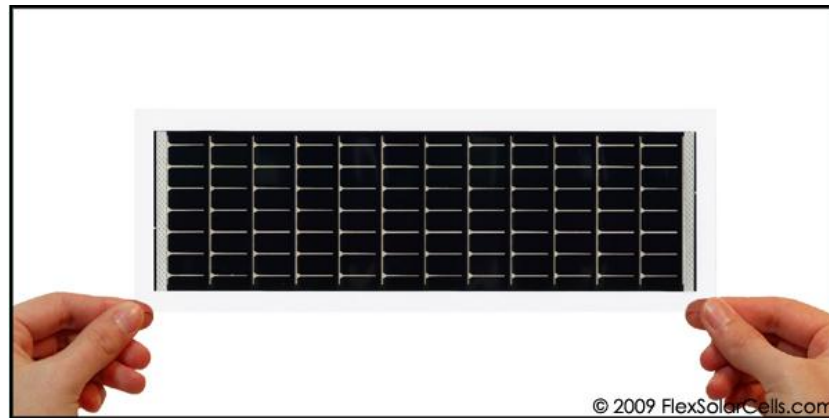
Estas celdas son muy livianas y se le pueden soldar cables en la parte de atrás para extender la conexión, y vienen con un sello especial el cual los protege de la contaminación y del clima. Dentro de los tipos de estas células que están a la venta se encuentran unas que vienen con Adhesivos Sensibles a la Presión (PSA en inglés), las cuales facilitan la instalación, pero no poseen filtro UV en la superficie. Una característica muy importante de estas células es que para conectarlas, sólo es necesario soldar un cable en la cinta de cobre que poseen.

Su eficiencia no es la mejor ya que en la mayoría de los casos la eficiencia de un panel es cercana al 20% y para este tipo de células no se alcanza casi que ni el 16% pero tienen a su favor un peso realmente bajo y la facilidad de instalación ya que su espesor es menos de 0.5 mm.

Estas células se producen sobre una lámina de base transparente de 50um que se aplica en un proceso especial de plasma y se le agrega una capa extremadamente fina de Silicio Amorfo (Si-a). En un procedimiento de laminado de gran formato, esta capa revestida de soporte es colocada entre dos capas de fluorpolimero. Los fluorpolimeros han sido probados mundialmente en el área de construcción durante décadas y presenta características importantes como su alta durabilidad y resistencia. La alta transparencia de las capas de fluorpolimero asegura duraderamente la mayor cantidad posible de energía solar para las células fotovoltaicas.

Por cuestiones económicas para el proyecto solo se usaran seis (6) celdas de este tipo.

Figura 57. Celdas Solares Flexibles Para Aeromodelismo



Fuente: FlexSolarCells.com

Datos Técnicos:

Dimensiones: 90 x 270 mm

Voltaje: 7.2 V

Corriente: 100 mA

Voltaje (ca): 10.5 V

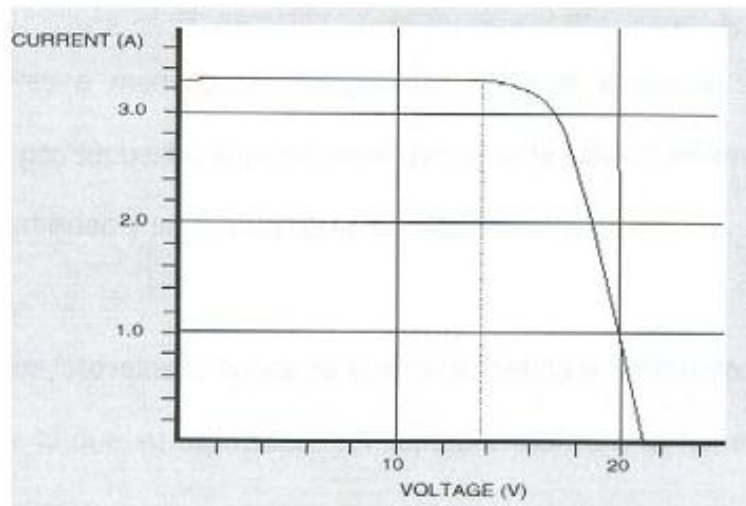
Corriente (cc): 120 mA

Espesor: 0.2 mm

Peso: 5.9 gramos

De la curva I-V del panel (figura 58) se determina el valor de la corriente (I) la cual corresponde a la tensión característica de 13.5 V (este valor de corriente es siempre inferior a la intensidad máxima posible I_{sc}). La potencia real aportada por el panel se obtiene del producto $(13.5) \times (I)$.

Figura 58. Curva I-V del panel



Fuente: CENSOLAR, Energía solar para sistemas fotovoltaicos

Para el caso particular del panel cuya curva se presenta en la figura 58, y su potencia nominal es 5.76 W, la potencia real del panel para una tensión de 19V es igual a $19V \cdot 300 \text{ mA}$ (5.7 W).

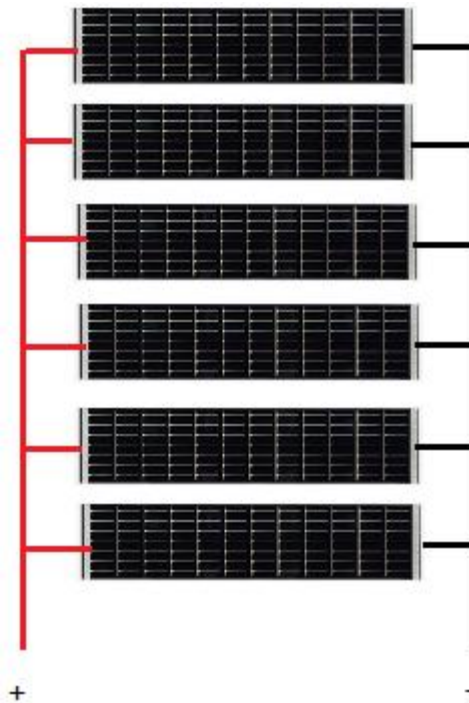
Para continuar con el proceso de selección del arreglo adecuado y más eficiente, el cual produjera la más alta eficiencia, se realizaron varias pruebas diferentes con distintas configuraciones de celdas hasta lograr llegar a el arreglo que satisficiera los requerimientos base y le diera más autonomía al proyecto, todo esto teniendo en cuenta que para que funcione el arreglo se deben tener en cuenta ciertos datos que limitan la carga del acumulador. A continuación se presentan datos de las pruebas realizadas.

Las condiciones a tener en cuenta es que desde un principio es conocido que el acumulador para cargarse necesita que se le genere una diferencia de potencial mayor a los 12,4 V y respecto a la corriente generada solo cabe aclarar que entre mayor sea esta, mayor será la velocidad de carga del acumulador.

Arreglo 1

El primer arreglo que se realizo fue el de ubicar las seis celdas de la siguiente forma en un arreglo de 1-1-1-1-1-1.

Figura 59. Primer arreglo FV de prueba



Fuente: Autores

Una vez realizada esta prueba y con una irradiación de 850 W/m^2 se obtuvo como resultado que la tensión generada entre los bornes no excedía los 8.2V , la corriente generada por este arreglo fotovoltaico era del orden de 500mA .

De esta prueba se puede concluir que por el lado de la corriente sería perfecto debido a que la velocidad de carga del acumulador sería muy elevada lo cual en

dado caso extendería el tiempo de vuelo al compensar la descarga de un supuesto motor con la carga de las celdas fotovoltaicas.

Pero por otro lado y observando el valor obtenido de la tensión entre bornes se genera un problema, y este es que los 8,2 V que se generan como máximo no son suficientes para suplir los requerimientos de carga de un acumulador dado, el cual como se mencionó anteriormente necesita de una tensión mayor a los 12,4 Voltios para cargar de manera adecuada.

Arreglo 2

El segundo arreglo que se realizó fue el de ubicar las seis celdas de la siguiente forma en un arreglo de 3-3.

Figura 60. Segundo arreglo FV de prueba



Fuente: Autores

Con la realización de esta prueba también se pudieron obtener una serie de conclusiones, con una irradiación media de 810 W/m², los resultados obtenidos para la máxima tensión generada en los bornes del arreglo de 27.3 V y una corriente de 180mA, con estos datos se podría decir que se cumplen los requerimientos básicos de la carga de la batería, ya que se generan más de 12,4

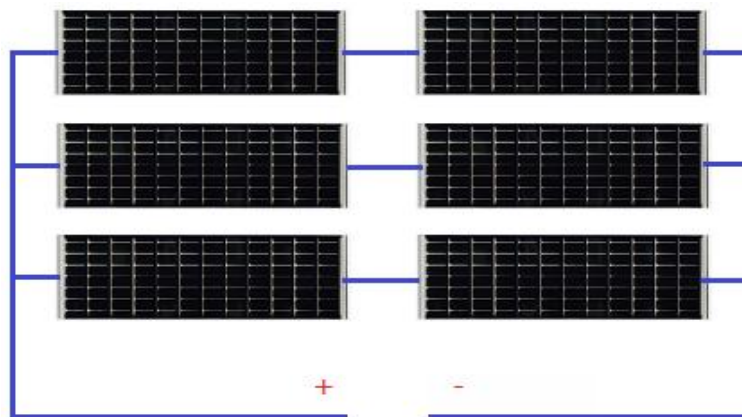
V y la corriente puede que no sea tan elevada pero igual esto no es un impedimento para que se cargue el acumulador.

El problema con este arreglo es que se está desperdiciando mucha potencia, como se verá más adelante, cuando el arreglo fotovoltaico se conecta a los bornes del acumulador, es la batería y no las celdas la que le pone límite a el voltaje generado, es decir que por más que se generen 27.3 V en vacío, al momento de conectar la batería que debería estar por el orden de los 12.4V, este voltaje caerá a este valor perdiendo un valor de potencia de más o menos $P=V*I \rightarrow P=14.9*180= 2.7$ Watts siendo que la máxima potencia generada para todos los arreglos posibles de seis celdas en vacío es de 6 Watts según las tablas del fabricante. Es por esto que habría probar otros arreglos a ver qué ocurre con la pérdida de potencia de estos otros y ver las ventajas de cada uno de ellos.

Arreglo 3

El tercer arreglo que se realizó fue el de ubicar las seis celdas de la siguiente forma en un arreglo de 2-2-2.

Figura 61. Tercer arreglo FV de prueba



Fuente: Autores

Después de la realización de las pruebas con este tercer arreglo en búsqueda del mejor posible, los datos que se obtuvieron para una irradiación promedio en la prueba de 815 W/m² por máxima tensión se tuvo valores de 18.3V y en términos de intensidad de corriente se obtuvieron en vacío valores de 290 mA.

En este caso ocurre lo mismo que la prueba anterior, también ocurre una pérdida de potencia la cual en este caso es de, $P=V \cdot I \rightarrow P=(18,3-12,4) \cdot 290= 1.7 \text{ Watts}$.

Lo ideal sería que no se perdiera nada de la energía generada por las celdas pero en este arreglo es el que más beneficio se obtiene por parte de ellas ya que, se cumple con los requerimientos de voltaje mayores a 12,4 V y la corriente que se genera es de 290 mA, la cual es un poco mayor y aumenta la velocidad de carga y por ende el tiempo de vuelo.

Es por esto y las razones dadas para cada arreglo que lo que se seleccionó fue realizar un montaje de 2-2-2 donde se obtiene el mejor beneficio de Voltaje y Corriente y una menor pérdida de potencia al momento de conectar con el acumulador.

7.1.2 Reguladores de carga

Los arreglos fotovoltaicos se diseñan para que produzcan un voltaje un poco superior en la salida respecto a la tensión que requiere una batería para cargarse. Esto se hace con el fin de garantizar que el panel siempre esté en condiciones para cargar la batería, sin importar las condiciones del sistema, como por ejemplo cuando la temperatura de las celdas es alta, lo cual disminuye la tensión proporcionada.

El uso de reguladores. El regulador es un componente de protección y seguridad para la batería, se recomienda siempre su uso, aunque existen casos en los que su uso no es necesario.

En sistemas donde la proporción entre la potencia de los paneles FV y la capacidad de la batería es muy pequeña, por ejemplo cuando las baterías son sobredimensionadas por seguridad u otra causa, es muy difícil que la corriente de carga pueda producir algún daño en la batería del sistema.

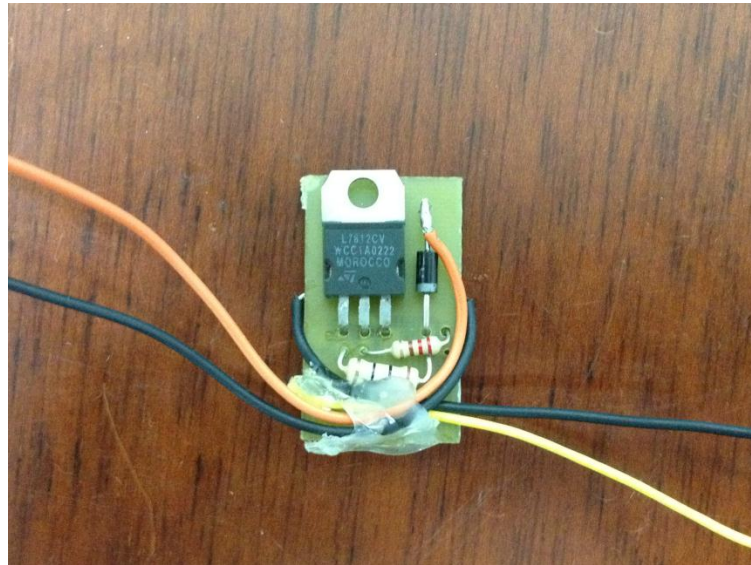
Un criterio empírico para saber si existe la necesidad de utilizar o no regulador es el siguiente: Si la potencia del conjunto de paneles en Watts es menor que una centésima de la capacidad de la batería en W-hora, puede prescindirse del regulador.

Igualmente, para evitar el uso de reguladores, se están fabricando paneles, que usados bajo ciertas circunstancias, eliminan la necesidad de usar reguladores, y se denominan paneles autorregulados.

7.1.2.1 Funciones del Regulador: Cuando el sistema no está sometido a irradiación solar, en días nublados, o cuando el nivel de insolación es bajo; los paneles no pueden cargar las baterías. En estos casos el regulador aísla el banco de acumulación del sistema de generación, evitando así su descarga. Cuando la insolación aumenta, el voltaje de los paneles aumenta superando al del banco de baterías y se reanuda el proceso de carga.

7.1.2.2 Selección del Regulador: La selección del regulador es fijada por los parámetros eléctricos del sistema (voltaje y amperaje de trabajo), el diseño del sistema (número de unidades de carga, tipo de batería y montaje mecánico más favorable) y por las opciones ofrecidas en el mercado de fabricantes.

Figura 62. Regulador de Carga elaborado

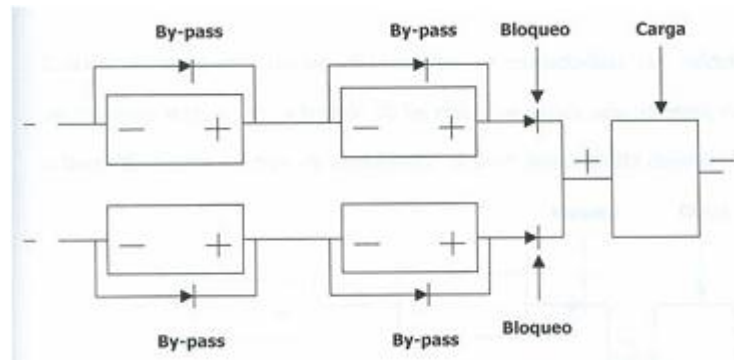


Fuente: Los Autores

7.1.3 Diodos

Diodos By-Pass. Los diodos by-pass es un tipo de protección de cada celda o modulo individual contra posibles daños que pueden ocurrir como resultado del sombreado parcial sobre alguno de ellos. Estos diodos se requieren siempre en un panel en el cual los módulos estén conectados en serie, especialmente cuando la tensión de operación es de 24 V o superior a esta. La celda o grupo de celdas con sombreado parcial no conducen corriente, interrumpiéndola en todo el modulo y en la línea de celdas en serie. Los diodos producen el efecto de cortocircuito permitiendo así el flujo de corriente en el tramo afectado, esto como consecuencia genera una descompensación de voltaje, pero lo importante es que no interrumpe la corriente.

Figura 63. Instalación de diodos de bypass en un sistema Fotovoltaico.



Fuente: Los Autores

Para el caso de este proyecto no será necesario el uso de Diodos de Bypass ya que la tensión de trabajo no será superior a los 24 Voltios y porque todas las celdas se encuentran distribuidas en un área relativamente pequeña la cual es muy difícil que se sombree solo una celda, si se sombreen serán todas a la vez evitando este fenómeno y el posible daño de las demás celdas.

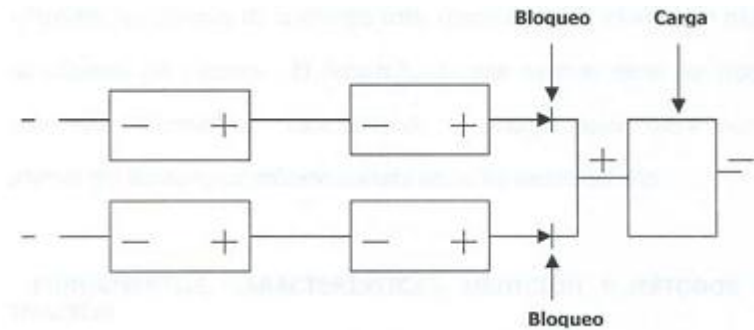
Diodos de bloqueo. Los diodos de bloqueo evitan la descarga de la batería a través de los módulos durante los periodos sin Sol y además el flujo de corriente inverso que puede ocurrir desde una línea de celdas en serie hacia otra línea que este en paralelo y que se encuentre parcialmente sombreada.

Estos diodos se usan en sistemas con baterías y módulos conectados en serie. En sistemas que tienen módulos conectados a las baterías, durante los periodos sin sol, el diferencial de tensión en los bornes de la batería genera una corriente inversa en el módulo, lo cual lo convierte en fuente disipadora de potencia y descarga la batería. Este flujo de corriente es bloqueada por el diodo.

Si un módulo está parcialmente sombreado dentro de un panel o arreglo de módulos interconectados, la tensión de los otros módulos inducen una corriente en

sentido contrario a través la línea en serie de ese modulo sombreado, implementando un diodo se bloqueará esta corriente.

Figura 64. Instalación de diodos de bloqueo en un arreglo de módulos en serie.



Fuente: Los Autores

El diodo de bloqueo es fundamental en el proyecto ya que como la batería estará en constante carga y descarga es necesario evitar el paso de corriente hacia las celdas ya que es posible quemarlas y dejarlas inutilizables en caso de un día nublado.

7.2 SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL AEROMODELO

Parte del objetivo, es realizar la selección de un aeromodelo tipo UAV que cumpla con las tareas de adquirir datos en tiempo real (datos de censado de variables como datos de video), y además que posea la suficiente superficie alar para la implementación y aprovechamiento de la energía fotovoltaica; se presenta la realización del proceso de selección del aeromodelo según requerimientos especificados y finalmente, la construcción del prototipo con el cual se realizarán las pruebas; los resultados obtenidos se analizarán y se darán conclusiones como parte de ésta investigación. A tener en cuenta, el diseño del aeromodelo se tomará

de algún modelo ya existente que cumpla en su mayoría con las necesidades del proyecto, se presentan unos requerimientos mínimos del modelo a seleccionar, se realiza una breve explicación de los elementos a bordo del aeromodelo y su funcionamiento; luego de todo esto se procede al diseño en CAD del aeromodelo y al final la construcción; al terminar la construcción del modelo se le realizarán pruebas de vuelo para evaluar su comportamiento, al tener listo ésta parte se procede con la implementación de los sistemas de generación energética y de adquisición y transmisión de datos.

7.2.1 Consideraciones iniciales de la selección : Se debe tener en cuenta las previas investigaciones y el desarrollo de pequeñas aeronaves o aeromodelos para la toma de datos en tiempo real, además la implementación de sistemas fotovoltaicos en estos modelos con el fin de aumentar la autonomía de vuelo, además de fácil construcción, sencillo manejo y adaptable con el sistema de adquisición de datos seleccionado; de acuerdo con las aplicaciones existentes como por ejemplo el monitoreo de cosechas o grandes extensiones de tierras, la fotografía aérea, inspección visual de líneas eléctricas o pozos petroleros, vigilancia, entre otras; da lugar a los modelos de referencia que serán especificados.

A continuación, se presentan los modelos propuestos para la selección teniendo en cuenta que posean las siguientes características según los tipos de aviones UAVs (Cuadro 10.)

Cuadro 10. Características del Aeromodelo a Seleccionar.

CARACTERÍSTICAS GENERALES
Vuelo Ligero y Estable
Amplia Superficie Alar
Baja Fuerza de Arrastre de las Alas
Motor Ligero y con Empuje suficiente
Fácil Adaptabilidad de Sistemas de Adquisición de Datos

Fuente: Los Autores

Teniendo en cuenta las características presentadas en la anterior tabla y los aeromodelos presentados en la anterior sección del capítulo, los cuales son empleados específicamente para estas investigaciones; se proponen los siguientes tipos de aeromodelos:

- Aeromodelo Tipo Zaggy

Se trata de un aeromodelo en forma de ala delta, por lo general planeador aunque si se requiere se le hace una adaptación para ser propulsado mediante un motor eléctrico tipo pusher (motor de empuje trasero); presenta un vuelo ligero y estable, lo cual lo hace de fácil control o manipulación. Sus mandos o superficies de control son dos alerones que se encuentran en su parte posterior, los cuales trabajan de forma sincronizada.

para manejar éste tipo de aviones se requiere un radio control programable con un mínimo de 6 canales, ya que para hacer virar el avión ya sea para la izquierda o derecha se necesita realizar una mezcla de movimientos, lo cual es sincronizar los servos-motores de los mandos, para que se muevan en sentido contrario (uno alerón hacia arriba y el otro hacia abajo) para éste caso; a su vez si se desea

hacer elevar o descender el avión, los servos-motores deben moverse de forma sincronizada hacia la misma dirección (figura 65).

Figura 65. Aeromodelo Tipo Zaggy.



Fuente: <http://www.tormodel.com>

Asimismo, el avión tipo zaggy presenta una amplia superficie alar, ya que todo su fuselaje es al mismo tiempo sus alas, lo anterior proporciona una pequeña desventaja para el aeromodelo ya que la forma que presenta éste, hace que se genere una gran fuerza de arrastre, lo cual implica mayor potencia de empuje. Otra pequeña desventaja presente es éste tipo de aeromodelo, respecto a los requerimientos anteriormente mencionados, es el reducido espacio que presenta para la inserción de sistemas o equipos de transmisión de datos.

- Aeromodelo Tipo Spirit

Los aeromodelos tipo spirit se caracterizan por poseer alas largas y delgadas (gran envergadura y pequeña cuerda alar), lo cual les proporciona un vuelo ligero y estable; son aeromodelos súper livianos, la gran superficie alar que poseen se distribuye de forma tal que proporciona la menor fuerza de arrastre posible; son aeromodelos tipo planeadores, pero cuando se requiere que sea propulsado por algún motor, éste se puede adaptar de forma fácil en su parte frontal o punta.

Las superficies de control que presenta este tipo de aeromodelos se encuentran en su parte posterior o cola, las cuales son el timón de dirección, el cual permite los movimientos laterales del avión (izquierda o derecha) y el timón elevador, el cual permite los movimientos verticales del avión (ascender o descender); éstas dos superficies de control actúan de manera independiente, por lo que no es necesario realizar algún tipo de mezcla o sincronización de movimientos en el radio control para poder manejarlo, y por ende se requiere solamente un radio control de 4 canales de transmisión. Cabe resaltar que si se desea adquirir un mejor control o maniobrabilidad se le pueden implementar alerones a éste tipo de aeromodelo, pero para ello sí sería necesario un radio control programable con mayor número de canales.

Por último, la gran ventaja que se presenta en estos aeromodelos tipo spirit es el gran espacio presente dentro de su fuselaje, en el cual de manera práctica se les puede insertar o adaptar los sistemas de adquisición y transmisión de datos requeridos para el presente proyecto (ver figura 66).

Figura 66. Aeromodelo Tipo Spirit



Fuente: <http://www.planeadores-rc.com.ar/>

- **Aeromodelo seleccionado:** Observando los dos tipos de aeromodelos presentados anteriormente se opta por escoger el aeromodelo tipo Spirit por las ventajas que éste presenta con respecto al aeromodelo tipo zaggy, con respecto a los requerimientos del presente proyecto, ya que el Spirit devenga una menor potencia para el motor por la baja fuerza de arrastre que genera, además el área de las alas es suficiente para instalar los paneles requeridos, otra aspecto importante es que no se requiere un radio control complejo o programable para volarlo y por último se destaca el buen espacio que presenta éste avión dentro del fuselaje, para la implementación de los dispositivos de adquisición y transmisión de datos que se desea realizar.

Asimismo, como el fin del proyecto es aumentar la autonomía de vuelo del aeromodelo mediante la generación de energía eléctrica, se adaptará un motor eléctrico tipo Brushless (motor especial para aeromodelismo) en la parte frontal del avión para que proporcione el empuje necesario para mantenerse en el aire (Ver figura 67).

Figura 67. Aeromodelo Propuesto tipo Spirit



Fuente: <http://nasgul.blogspot.com>

7.2.2 Requerimientos del vehículo: El UAV o aeromodelo debe tener la capacidad de despegar y aterrizar en pistas cortas de un máximo de 30 metros de longitud y además cumplir con los siguientes requerimientos:

- Carga útil (sistema de adquisición de datos) de hasta 500 gramos.
- Facilidad para configurar, manipular los sistemas de control, los sistemas de adquisición y transmisión de datos dentro del aeromodelo.
- Tener la capacidad de volar hasta 1 Kilometro a la redonda como máximo, respecto a la estación base.
- Tener la capacidad de volar en condiciones hostiles como vientos fuertes, condiciones lluviosas y aterrizajes con vientos cruzados.
- capacidad de despegar en pistas cortas, o campos abiertos.
- Ser de fácil mantenimiento, tener fácil acceso a los repuestos o elementos del avión y equipos de adquisición de datos, así como tener un bajo costo de operación.
- Envergadura máxima de hasta 1.80 metros, empleo de materiales compuestos y ligeros como fibra de vidrio y materiales convencionales como madera de balsa, icopor, entre otras.
- Cuerda alar mínima de 11 centímetros para la implementación de los paneles solares en línea recta sobre el ala.
- Equipo de radio control para aeromodelismo con un alcance efectivo de hasta 1.5 Kilómetros, vuelo remoto.
- Equipo de adquisición de datos básico, receptor, mini cámara de video y cableado, visualización de la señal con un computador portátil o televisor con entrada de video RCA.

7.2.3 Conceptos generales del aeromodelismo: A continuación se presentan unos conceptos generales que se deben tener en cuenta en el momento de diseñar, construir o trabajar con cualquier tipo de aeromodelo.

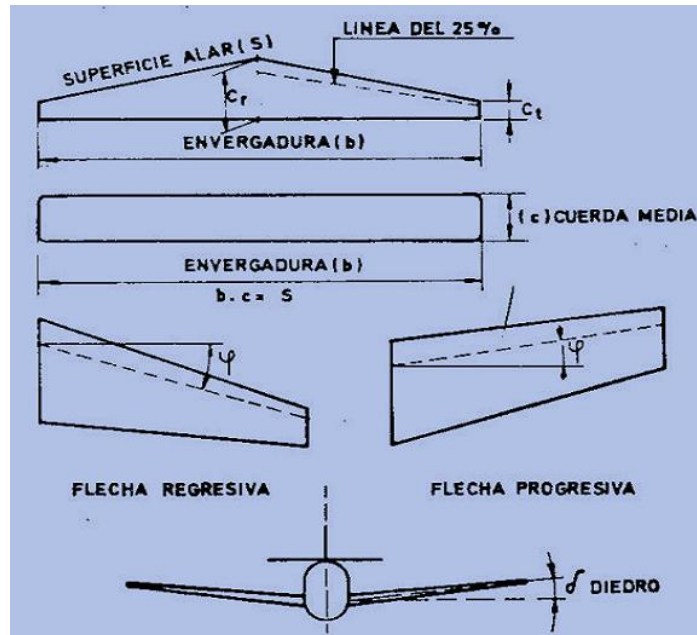
7.2.3.1 Las superficies aerodinámicas de los aviones⁸: La siguiente explicación define algunos conceptos básicos sobre los planos sustentadores presentes en un aeromodelo (ver figura 68).

1. Envergadura (b): Es la distancia desde una punta a la otra punta del ala.
2. Superficie alar (S): Es el área total de las alas incluyendo la parte del ala que pueda estar cubierta por el fuselaje u otro elemento, como si no existieran estos elementos.
3. Cuerda media (c): Normalmente, los perfiles que constituyen el ala suelen ser distintos a lo largo de la envergadura, y además, las cuerdas que los constituyen van disminuyendo desde el centro hasta las puntas. Se define cuerda media como aquella que, multiplicada por la envergadura es igual a la superficie alar: $c \times b = S$.
4. Estrechamiento (taper ratio) (λ): Se precisa por el cociente: C_t / C_r , en donde C_r es la cuerda del perfil en el encastrado o centro y C_t es la cuerda del perfil en la punta.
5. Alargamiento (aspect ratio) (A): Es la relación existente entre la envergadura y la cuerda media. $A = b / c$ o lo que es igual $A = b^2 / S$.

El alargamiento varía entre 3 y 4 en aviones muy rápidos, de 20 a 30 en algunos planeadores.

⁸ JENKINSON, Lloyd R. Aircraft Design Projects for engineering Students, Butterworth Heinemann, 2003.

Figura 68. Geometría de las superficies sustentadoras



Fuente:

http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/BUENOS_AIRES/62/tecnolog/alas.htm

6. Línea del 25% de la cuerda: Es aquella que se obtiene si se unen todos los puntos a lo largo de la envergadura que están situados a los 25 % de su cuerda, contados a partir del borde de ataque.

7. Flecha (sweep) φ : Es el ángulo formado entre la línea del 25% y una perpendicular al eje longitudinal del avión. Si el ala no tiene estrechamiento, éste ángulo será el mismo que se forma entre el borde de ataque del ala y la perpendicular al eje longitudinal. La flecha puede ser progresiva o regresiva.

8. Cuerda media aerodinámica (mean aerodynamic chord) – MAC: Es la que poseería un ala rectangular (estrechamiento uno) y sin flecha que originara el mismo momento y sustentación.

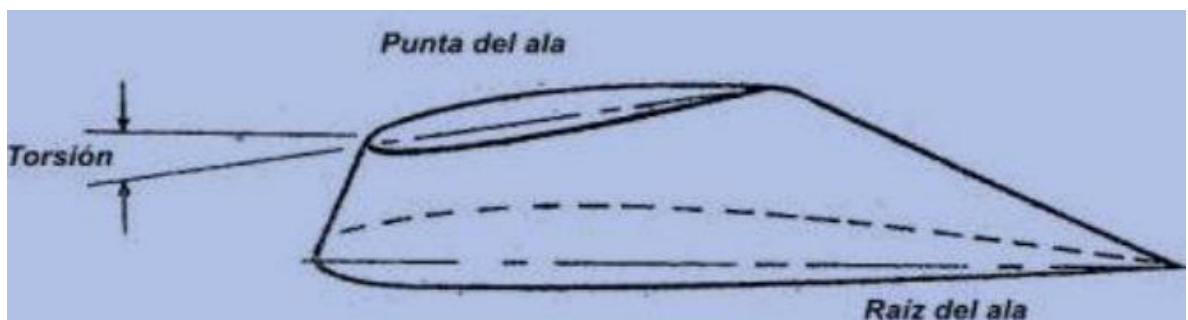
La posición de la cuerda media aerodinámica respecto al eje longitudinal del avión puede hallarse mediante fórmulas apropiadas o geoméricamente. La posición de ésta es de gran importancia para la estabilidad longitudinal.

9. Diedro: Es el ángulo formado por la intersección de dos planos del ala y tiene gran influencia en la estabilidad lateral del avión.

10. Torsión: puede ser geométrica o aerodinámica.⁹

La torsión geométrica consiste en la variación de los ángulos de ataque de cada uno de las secciones o perfiles que componen el ala; la sección de la punta posee un ángulo de ataque menor que en el centro o encastre. Este giro relativo o torsión de las cuerdas se hace de forma gradual desde el centro hasta la punta del ala (ver figura 69).

Figura 69. Torsión o giro relativo de las cuerdas.



Fuente:

http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/BUENOS_AIRES/62/tecnolog/alas.htm

7.2.3.2 Perfil alar: Un perfil alar es la sección transversal del ala de un avión. En el estudio de los perfiles alares se ignora la distribución en proyección horizontal

⁹ http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/BUENOS_AIRES/62/tecnolog/alas.htm

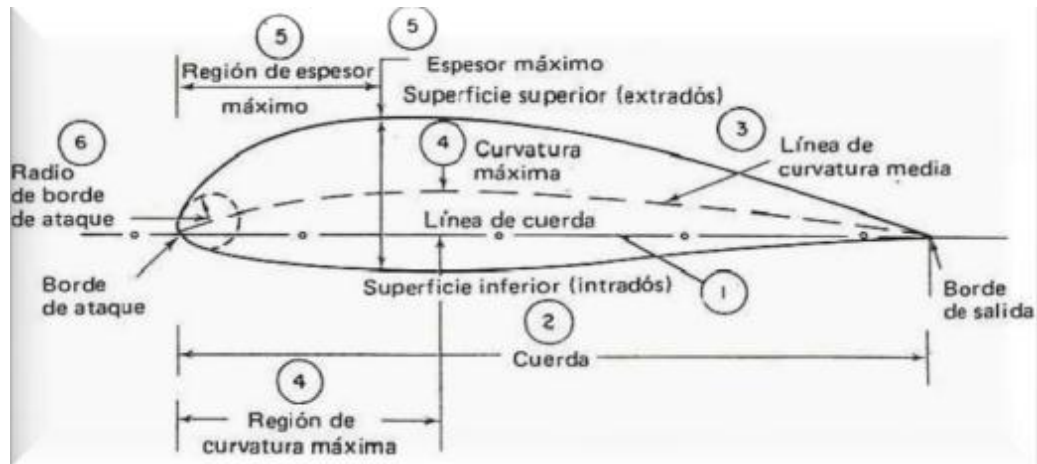
del ala, así como también los efectos del extremo del ala, flecha, alabeo y otras características de diseño.

Las siguientes son las terminologías¹⁰ más usadas al momento de referirse a los perfiles alares, y su identificación en la respectiva grafica (ver figura 70).

1. Línea de cuerda: Es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil.
2. Cuerda: Es la longitud de la línea anterior. Cabe resaltar que todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
3. Línea de curvatura media: Es la línea media entre el extradós y el intradós.
4. Curvatura máxima: Es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
5. Espesor máximo: Es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós).
6. Radio del borde de ataque: Es una medida delafilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0 para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2 % de la cuerda para perfiles achatados.

¹⁰ Definiciones tomadas del libro Lloyd R. Jenkinson, Aircraft Design Projects for engineering Students, Butterworth Heinemann, 2003.

Figura 70. Geometría de un perfil alar



Fuente:

http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/BUENOS_AIRES/62/tecnolog/alas.htm

A continuación se presenta la terminología de mecánica de fluidos en perfiles aerodinámicos. Los siguientes son algunos términos más usados en diseño:

- Flujo laminar: Corriente o flujo uniforme de aire con muy poca transferencia de momento entre las capas paralelas.
- Centro de presión (CP): Punto de la cuerda donde actúa la fuerza aerodinámica.
- Coeficiente de sustentación (CL): Puede definirse como la relación entre la presión de sustentación y la presión dinámica, es una medida de la efectividad del perfil para producir sustentación¹¹.
- Velocidad Aerodinámica (V): Varía desde subsónica hasta hipersónica, a través de un régimen transónica a supersónico. Los límites de cada régimen son mostrados en la siguiente tabla en términos del número Mach de la estela libre.
- Rango de Velocidad (M):

¹¹ E. L Houghton, Aerodynamics for Engineering Students, Butterworth Heinemann, Great Britain, 2003.

Cuadro 11. Rangos de Velocidad según el Régimen

RÉGIMEN	NUMERO DE MACH
Subsónico bajo	<0.3
Subsónico alto	0.3-0.6
Transónico	0.6-1.1
Supersónico	1.0-5.0
Hipersónico	>5.0

Fuente: Los Autores

El rango de velocidad para los aeromodelos UVAs es de régimen subsónico bajo, el cual es de numero Mach < 0.3.

Los límites son definidos por los eventos que cambian las características del flujo. Los mayores cambios son graduales, excepto el limite $M = 1$, el cual cambia solamente en el caso cuando las características del flujo cambian abruptamente.

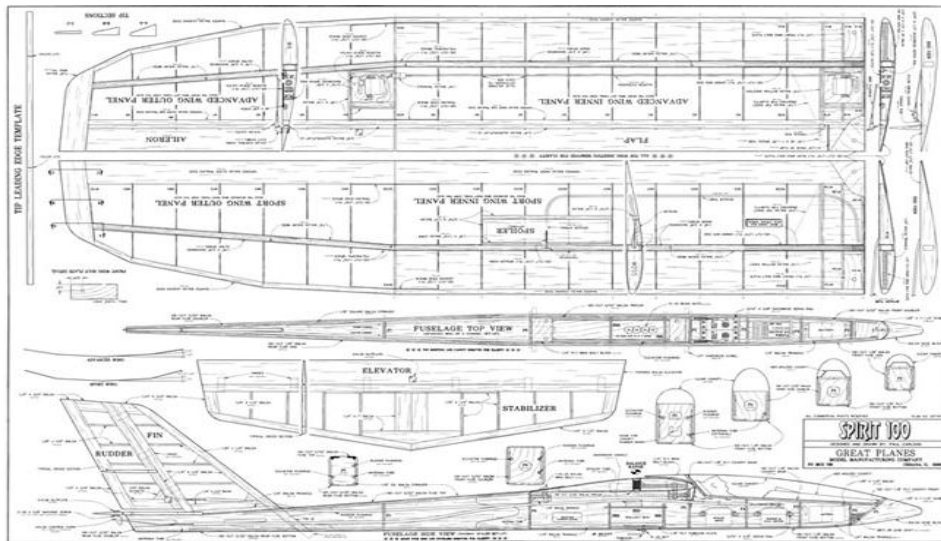
7.2.4 Dimensiones generales del aeromodelo SPIRIT: Como se mencionó anteriormente, se seleccionó un aeromodelo tipo Spirit para el desarrollo del presente proyecto.

Este aeromodelo se caracteriza por ser de tipo planeador (sin motor), pero por requerimientos de la investigación se le implementará un pequeño motor eléctrico tipo brushless, además se debe garantizar que la superficie alar sea lo suficiente grande para albergar las seis (6) celdas fotovoltaicas seleccionadas anteriormente; éstas celdas tienen una longitud aproximada de 27 centímetros con un ancho de 9 centímetros, por tal razón si se desean distribuir las celdas en línea recta sobre el ala se debe tener una envergadura mínima de 162 cm (27 cm x 6 celdas); éstos

fueron los aspectos más importantes al momento de seleccionar el tipo de avión spirit específico.

El avión fue construido a base de planos, los cuales fueron adquiridos de un blog de aeromodelismo y éstos eran los que más se acoplaban a los requerimientos del proyecto (Ver figura 71).

Figura 71. Planos de Aeromodelo



Fuente: <http://www.ceinfor.net>

El aeromodelo escogido presenta las siguientes dimensiones generales:

- Envergadura: 180 cm.
- Longitud del Fuselaje: 85 cm.
- Cuerda en el encastre o centro: 20 cm.
- Cuerda en la punta: 13 cm.
- Fuselaje en celosía con forma de cajón:

Dimensiones de 5 x 6.3 cm en la parte frontal

Dimensiones de 7 x 6.3 cm en la parte central

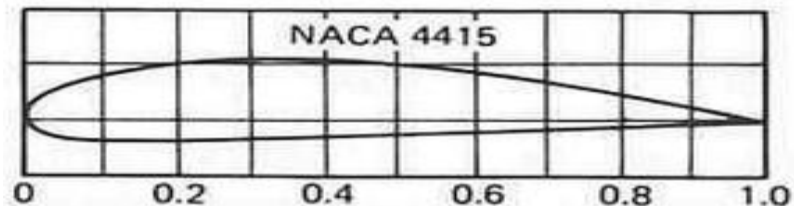
Dimensiones de 5 x 3.5 cm en la parte posterior

- Diedro en el encastre o centro: 7.5°

- Diedro en la punta del ala: 10.5°

- Perfil alar: NACA 4415 (ver figura 72).

Figura 72. Perfil Alar tipo NACA 4415



Fuente: <http://www.mexicorc.com>

Como se menciona en las características anteriores las alas del aeromodelo Spirit seleccionado presenta dos dimensiones de cuerda alar, en la parte central más grande que en las puntas, por ende significa que las alas presentan una planta alar con un ligero ahusamiento en sus puntas (ver figura 73).

Figura 73. Plano Ligeramente Ahusado



Fuente: Los Autores

Un ala ahusada requiere menos estructura portante en las puntas y en la parte interior; como resultado proporciona un ahorro de peso estructural, lo cual es fundamental en el diseño de una aeronave.

Por otro lado, ahusando el espesor del ala al mismo tiempo que la cuerda, el ala se torna mucho más esbelta. Sin embargo, esta configuración conlleva unas desventajas y una de ellas es el comportamiento durante la pérdida de sustentación.

Continuando con la descripción del aeromodelo, también se destaca los dos diedros positivos (ángulos) que poseen las alas del Spirit, se resalta que son diedros positivos ya que también existen diedros negativos y neutros (ver figura 74), estos ángulos aportan un mayor grado de estabilidad lateral al avión.

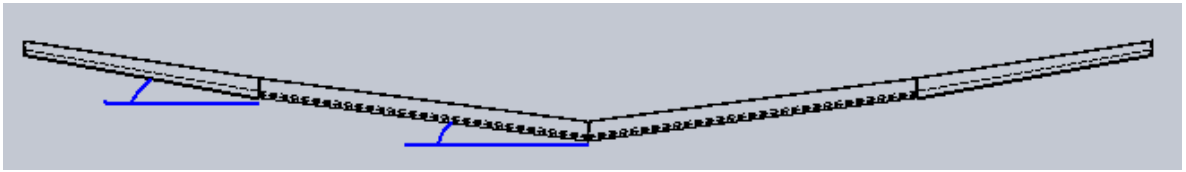
Figura 74. Ángulos Diedros



Fuente: <http://www.manualvuelo.com>

El principio que utiliza el ángulo diedro para dar estabilidad al avión es el efecto péndulo que se genera al golpear el aire contra las superficies sustentadoras (las alas) (ver figura 75).

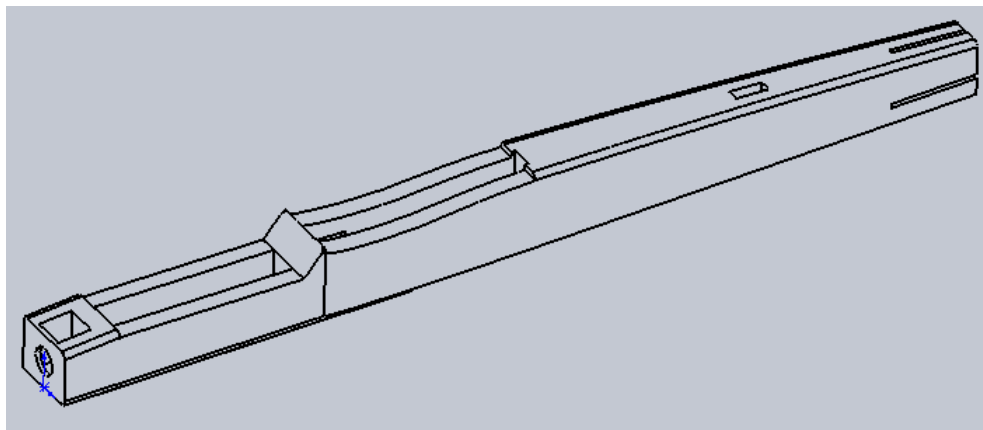
Figura 75. Diedros del Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

En la parte del fuselaje del aeromodelo seleccionado se destaca su forma tipo celosía o cajón, como se mencionó anteriormente, éste fuselaje posee la respectiva variación de la sección transversal a lo largo de su eje longitudinal como se ve en la figura 76

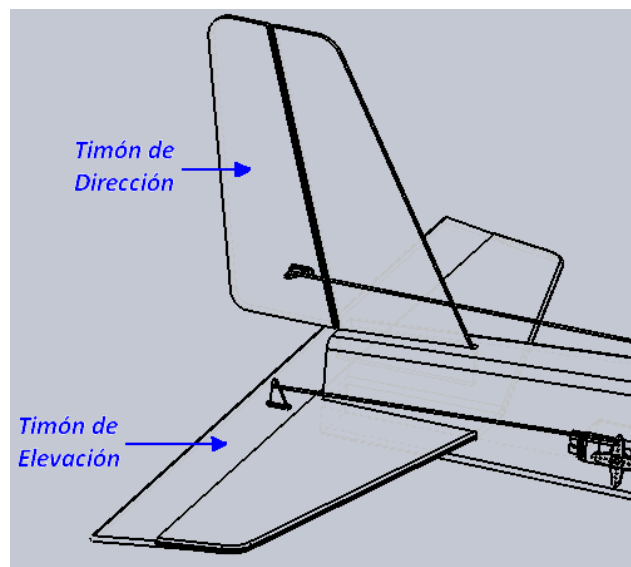
Figura 76. Fuselaje del Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

Por último, se destacan las superficies de control que posee el aeromodelo seleccionado. El aeromodelo Spirit consta de dos mandos de control los cuales están ubicados en la parte posterior del avión o cola, éstos dos mandos son el timón elevador, que permite el control del avión en la dirección vertical, y el timón de dirección, que concede el control del avión en la dirección horizontal (ver figura 77).

Figura 77. Superficies de Control del Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

7.2.5 Componentes y sistema de control del avión

7.2.5.1 Sistema equipo de radio control: La forma clara para describir el funcionamiento del sistema de radio control utilizado para la maniobrabilidad de los aeromodelos es mediante la explicación de su estructura principal o arquitectura; la arquitectura del sistema de radio control está conformada por

tres elementos básicos los cuales son: Transmisor, receptor y servos, (ver figura 78). En ésta sección se describirán el transmisor y receptor del equipo, los servos serán descritos posteriormente como elementos finales de control.

Figura 78. Esquema del Equipo de Radio Control



Fuente: Los Autores

- El Radio Control

El equipo de radio control es el utilizado en aeromodelismo; para seleccionar el equipo se tuvo en cuenta los canales necesarios para mover las superficies de control que posee el aeromodelo seleccionado, en éste caso son 2 canales los requeridos para mover éstas superficies, más un canal utilizado para el control de la velocidad del motor, entonces los canales mínimos son requeridos serían 3, pero el mínimo de canales presentes en un radio control más sencillo es 4 canales (4 Ch). El radio control seleccionado es un Hobby King de 2.4Ghz y 6Ch, por cuestiones de disponibilidad en el mercado se optó por uno radio de 6 canales y no de 4 canales como se planteó anteriormente (ver figura 79).

Figura 79. Equipo de radiocontrol de 6 canales.

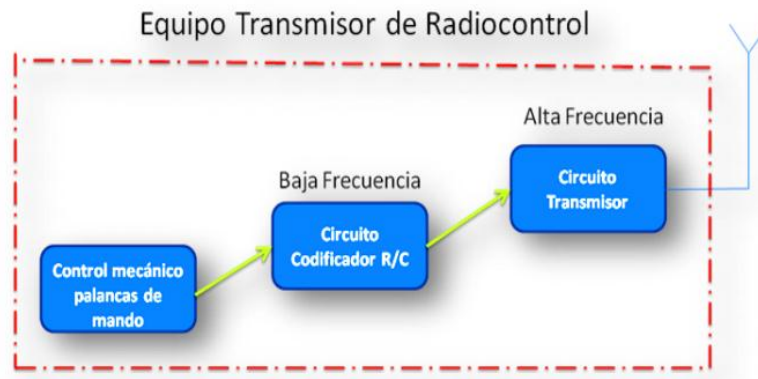


Fuente: <http://www.hobbyking.com>

Éste radio control tiene la ventaja de poder ser programadas las variables de cada uno de sus canales, incluyendo las mezclas y la servo inversión; para ello se requiere conectar el radio control a un PC, el cual posea el software de programación de éste radio control, que se encuentra disponible en la página de Hobby King.

Para describir internamente el radio control, se sabe que dentro de éste se encuentra el sistema o equipo transmisor; el equipo transmisor está formado por diversos circuitos, (ver figura 80), uno de éstos circuitos que conforma el sistema o equipo transmisor es el generador de señal base de radiocontrol y el otro, es el transmisor propiamente dicho. Es decir, el transmisor es parte del equipo transmisor y es la última etapa del proceso de la señal en el equipo transmisor o radio control.

Figura 80. Circuitos del equipo transmisor.



Fuente: <http://www.towerhobbies.com>

- El Receptor

El receptor es el elemento que recibe la señal o la información proveniente del transmisor, ésta comunicación se realiza a través de las ondas de radiofrecuencia. Cabe aclarar que cada receptor es compatible solamente con su respectivo radio control, con el cual está sintonizado. Para éste caso se utilizará un receptor de referencia HK-TR6A V2 de 2.4GHz (ver figura 81).

Figura 81. Receptor del Radio Control



Fuente: <http://www.hobbyking.co>

El receptor se encuentra dentro del avión y además de recibir la señal proveniente de la estación en tierra, le transmite estas órdenes a los servos y al motor del avión. Sus características técnicas son:

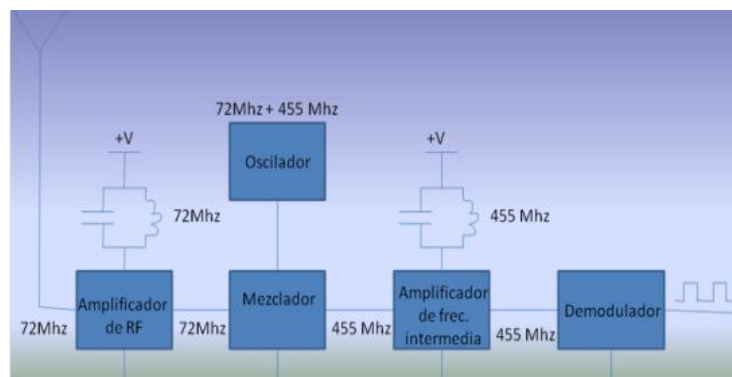
Cuadro 12. Características del Receptor

Características Técnicas del Receptor HK-TR6A V2	
Dimensiones	25.5 x 50.5 x 16.8mm
Peso	13 gr.

Fuente: Los Autores

En cuanto al funcionamiento del receptor; la señal entra al receptor por la antena con la información para los servos, pero así como viene no puede ser utilizada debido a que la frecuencia es muy alta para utilizarla directamente. Entonces, el receptor se encarga de obtener la misma forma de onda que posee en un principio en el modulador del equipo transmisor. Esto lo logra mediante las etapas internas que posee, como las mostradas en la siguiente figura (ver figura 82).

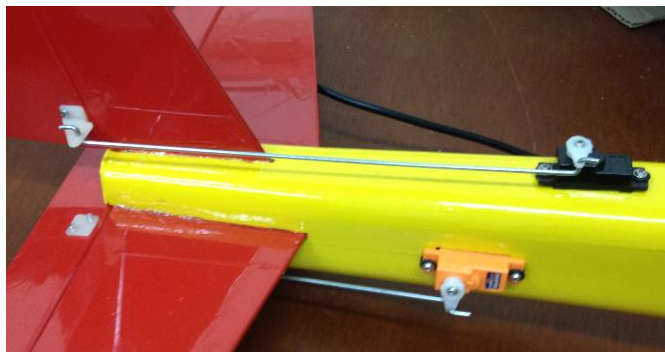
Figura 82. Esquema de un receptor de conversión simple.



Fuente: www.futaba.com

7.2.5.2 Servomotores: Los elementos finales del control de la aeronave son los servo motores, los cuales su función es posicionar los timones de control de dirección y elevación, o cualquier otra superficie de control que posea el aeromodelo; esto se logra por medio del movimiento de palancas proporcionando la fuerza necesaria para el funcionamiento del mecanismo (ver figura 83)

Figura 83. Mecanismo de Transmisión de Movimiento y Fuerza



Fuente: Los Autores

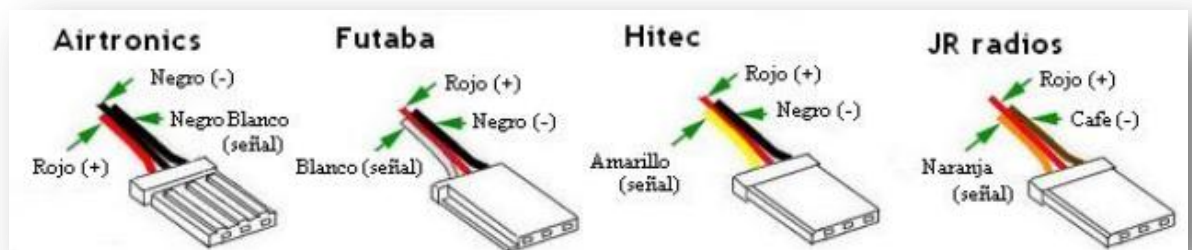
Los servos son pequeños dispositivos que tienen un eje de rotación que poseen un torque controlado, además tienen la gran ventaja del control de la posición angular mediante una señal codificada; éstos se conectan al receptor desde el cual se alimentan eléctricamente y además reciben el control mediante pulsos. Siempre que esté presente una señal codificada en la línea de entrada, el servo conservará una posición angular determinada (posición del engranaje), al momento que la señal codificada varié, la posición del engranaje y por ende del eje del servo también cambiará.

Los servos poseen tres cables de conexión: La masa o tierra, el positivo y el de control:

- Cable rojo: positivo de 4,8V.
- Cable negro o café: negativo (siempre es el cable oscuro)
- Cable amarillo, blanco o naranja: Pin de control por pulsos.

Cada fabricante tiene su característica de color y disposición de los cables (ver figura 84).

Figura 84. Conexión de las diferentes marcas.



Fuente: <http://www.towerhobbies.com>

El control de los servomotores se realiza a través del receptor, el cual emite pulsos en un rango de duración de 1ms a 2ms impartidos entre 50-60 veces por segundo.

El eje de un servo es capaz de girar alrededor de 180 grados normalmente, como es el caso de los servos utilizados en el presente estudio; pero también existen servo motores con la capacidad de girar más de 180 grados, como por ejemplo 210 grados, ésta característica depende del fabricante.

El voltaje que se aplica al motor es proporcional al recorrido que éste necesita realizar. Así que, si el eje necesita recorrer un ángulo amplio, el motor rota a toda velocidad, por el contrario, si éste necesita recorrer sólo un pequeño ángulo, el

motor rotará a una velocidad más lenta. A éste sistema de control se le llama control proporcional.

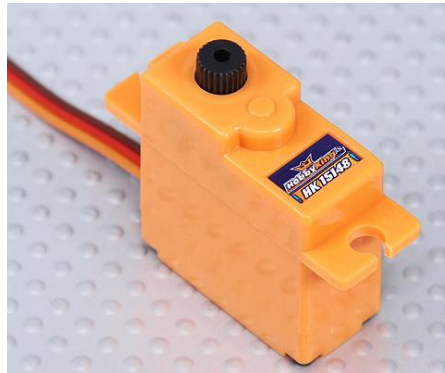
Por otra parte, comercialmente la designación de los servos depende de los fabricantes, y ésta designación o nombre varía entre nano servos, micro, mini, estándar, gigantes, etc.

Enfocándose en la marca de los servos utilizados para el aeromodelo en cuestión, la cual es Hobby King: se emplean las designaciones de ultra-micro servo, micro-servo y servo-estándar. Los ultra-micro servos son poco utilizados y su peso se caracteriza por ser menor de 4 gramos, los micro-servos se utilizan principalmente en aeromodelos de vuelo de interiores no muy pequeños y van aproximadamente de los 4 gramos a los 8 gramos de peso, aunque a veces los servos de hasta 19 gramos también se consideran Micro servos. Luego vienen los Mini servos que se encuentran entre los 20 gramos y los 40 gramos; de allí en adelante empieza la línea de servos estándar.

Además debe tener en cuenta el peso y fuerza del servo, se debe mirar el material de los engranajes, ya que éstos deben ser capaces de soportar los sobreesfuerzos que pudiese tener la superficie a la que está conectado.

Por último, los dos servos utilizados en el aeromodelo seleccionado son los Hobby King con referencia HK 15148 (Ver figura 85), los cuales son micro servos y serán empleados para el movimiento de las superficies de control del avión como se mencionó anteriormente.

Figura 85. Servo motor



Fuente: <http://www.hobbyking.com>

Algunas de las características técnicas del micro servo HK 15148 se encuentran especificados en la siguiente tabla. Cabe aclarar que el servo presenta variaciones es sus parámetros, dependiendo del voltaje de alimentación (máximo o mínimo).

Cuadro 13. Características del Servo HK 15148.

Características Técnicas Servo HK 15148	
Peso	17 gr.
Alimentación	4.8 V ~ 6 V.
Velocidad	0.17 ser/ 60° (@4.8v) 0.14 ser/ °60 (@6v)
Par	2.3 Kg-cm (@4.8v) 2.5 Kg-cm (@6v)
Dimensiones	28 x 30 x 13 mm
Material de Engranajes	Compuesto de Carbono

Fuente: Los Autores

7.2.5.3 Motores de aeromodelismo

- Motor de combustión interna: utilizan un combustible como fuente energética, estos motores generan una explosión dentro de un cilindro completamente cerrado por todas partes menos por una, la explosión es producida por una mezcla de combustible y aire presente dentro del cilindro. El cilindro cuenta con un embolo, el cual es empujado por ésta explosión instantánea. El movimiento del embolo junto con el mecanismo de transmisión de movimiento y fuerza, origina el trabajo de eje requerido para el giro de la hélice.

- Motor eléctrico: Un motor eléctrico, es un dispositivo rotativo que transforma energía eléctrica en energía mecánica. Los motores eléctricos utilizados en el aeromodelismo son los motores tipo Brushless, los cuales se caracterizan por no poseer escobillas, lo cual aumenta su rendimiento debido a que no presentan fricción alguna y por ende no se recalientan, ni necesitan de continuo mantenimiento; Además son motores trifásicos, de alto rendimiento y bajo peso.

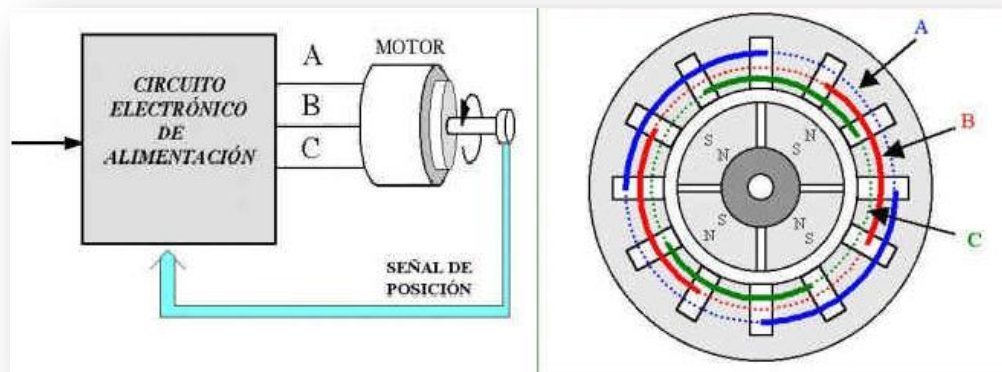
Básicamente, hay dos tipos de motores brushless, los inrunner y los outrunner. Los primeros son de mayor velocidad, su torque máximo lo tienen a muy altas revoluciones. Los outrunner tienen su torque máximo a baja velocidad.

Estos motores constan de un bobinado de varios polos y varios imanes permanentes de alta potencia, normalmente de Neodimio, y dos rodamientos, no tienen fricción de ningún tipo al no tener escobillas (carbones), lo que los hacen casi eternos, hasta se pueden cambiar fácilmente los rodamientos, que podrían llegar a desgastarse o romperse ante un golpe muy fuerte.

Lo que gira en los outrunner es la parte exterior, donde están pegados los imanes, quedando en su interior los bobinados fijos, que suelen ser de alambre de cobre grueso. Estos motores trabajan gracias a los variadores de velocidad (speed control), que transforman la corriente continua de las baterías en una tensión alterna trifásica.

En pocas palabras, su funcionamiento se basa en la alimentación secuencial de cada una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor. De esta forma, los imanes permanentes siguen el movimiento del campo magnético estático, cuyo desplazamiento depende a su vez del giro del rotor (ver figura 86).

Figura 86. Esquema del Funcionamiento de Motor Brushless



Fuente: <http://www.brushlessmotor.com.ar>

El motor escogido para su implementación en el aeromodelo seleccionado es un Motor Turnigy 2627-1200 (ver figura 87); éste motor se seleccionó teniendo en cuenta las especificaciones por parte del diseñador del aeromodelo, las cuales se encuentran en los planos, junto con la carga adicional que generan los dispositivos de adquisición de datos que se incluirán en el aeromodelo.

Figura 87. Motor Brushless



Fuente: <http://www.hobbyking.com>

Cuadro 14. Características Técnicas del Motor Turnigy 2627

Características Técnicas del Motor Turnigy 2627	
Dimensiones	26mm x 27mm, 40mm (con eje)
Peso	39 gr.
Diámetro del Eje	3 mm
Espesor de la Laminación	0,2 mm
Tipo de imán	45SH
Kv	1200 rpm/volt
Empuje	480 gr.
Potencia	130 W
Máximo Voltaje	11 Volt.

Fuente: Los Autores

7.2.5.4 Speed Control: Un Speed Control, también conocido como ESC (Electronic Speed Controller) o "controlador de velocidad electrónico", es un dispositivo que, comandado por un canal del receptor, es capaz de gobernar el motor del modelo haciendo que gire a más o menos revoluciones por

minuto. Estos dispositivos se utilizan por lo general en motores brushless (motores sin escobillas), los cuales son utilizados en el aeromodelismo.

- Dos cables gruesos, rojo y negro, los cuales proporcionan la alimentación al motor, éstos van conectados a la batería LiPo.

- Un conector de 3 pines, igual que el de los servos, éste conector van en el receptor:

- Amarillo: Señal PWM de 50Hz
- Rojo y negro: Alimentación del ESC

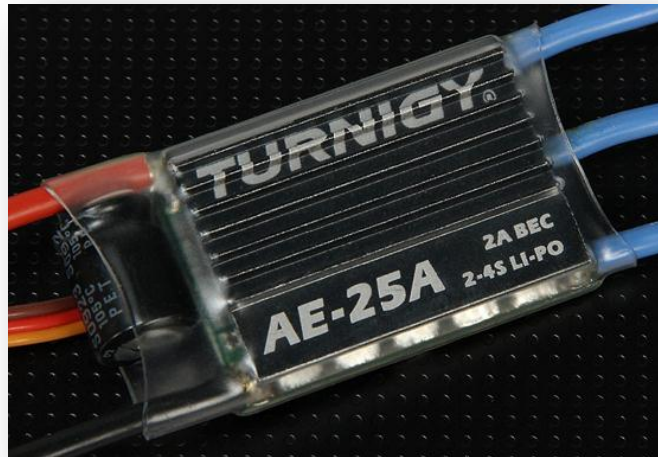
- Tres cables de trifásica para la alimentación del motor brushless.

El variador o ESC recibe una señal PWM de 50 Hz y dependiendo de la longitud del ancho de pulso entrega más o menos potencia al motor. La longitud del pulso PWM varía de 1 ms a 1.5 ms, parado y a máxima potencia respectivamente. Por ejemplo si se manda una señal PWM desde el control al ESC con un ancho de pulso de 1.25 ms, el motor funcionará aproximadamente a la mitad de la potencia máxima. Cabe resaltar que estos rangos de longitudes de pulsos varían según el fabricante. Además dentro del ESC existe un circuito conocido como BEC (Battery Elimination Circuit) o Circuito de eliminación de batería, éste término se emplea sobre todo en los aeromodelos que funcionan con motor eléctrico brushless; éste circuito se encarga de tomar parte del voltaje que la batería LiPo debe entregarle al motor brushless por medio del ESC y transmitirlo al receptor para su alimentación y a su vez la alimentación de los servos y demás componentes de bajo consumo que se conecten al receptor. Los ESC poseen un límite máximo de entrega de amperaje por medio del circuito BEC, el cual si se llegase a superar existe el riesgo de quemarse el circuito.

El ESC empleado en el aeromodelo seleccionado para la presente investigación es un Turnigy AE-25A (2-4s LiPo); para selección de éste componente se debe

tener en cuenta que el amperaje que es capaz de soportar el ESC sea mayor a los amperios máximos que consume el motor seleccionado, en éste caso el ESC soporta 25 Amperios, como lo indica su designación. (Ver figura 88).

Figura 88. Speed Control Turnigy AE-25A



Fuente: <http://www.hobbyking.com>.

Cuadro 15. Características Técnicas del Speed Control Turnigy

Características Técnicas del Speed Control Turnigy AE-25A	
Corriente de Salida	25 A (al máximo 35A durante 10 seg)
Voltaje de Entrada	Batería LiPo de 2 a 4 celdas (7.4v-14.8v)
Limite BEC	2 A (@ 5 volts)
Dimensiones	50 x 26 x 12 mm.
Peso	25 gr.
Máxima Velocidad	210.000 - 70.000 - 35.000 RPM (motores de 2, 6 y 12 polos respectivamente)

Fuente: Los Autores

7.2.5.5 Hélice: La hélice es el elemento físico que se instala en el eje del motor, su función es generar la fuerza de atracción del aire mediante su rotación, y crea el empuje necesario para generar la sustentación del aeromodelo, mediante sus superficies de sustentación. Las hélices se clasifican según su diámetro y su paso. El diámetro, es la distancia en pulgadas que separa las dos puntas de la hélice, y el paso, es la distancia en pulgadas que avanzaría la hélice en una vuelta siguiendo la trayectoria de la pala. El paso es una medida de la inclinación de la pala.

Las hélices mayormente empleadas en el aeromodelismo son de dos palas, sin embargo, existen hélices que poseen más de dos palas, la diferencia radica que una hélice de dos palas me proporciona mayor velocidad y mejor régimen de ascenso, pero éste tipo de hélices producen mayor ruido; en cambio, las hélices que poseen tres palas proporcionarían mayor empuje sacrificando la velocidad y además son menos ruidosas. A su vez en el aeromodelismo existen hélices rígidas y plegables, la ventaja que posee una hélice plegable con respecto a una rígida es que si se apaga el motor en pleno vuelo, para que el aeromodelo haga las veces de planeador, éste tipo de hélice no le va a producir ninguna corriente de aire parasita o freno, debido a que ella misma se retrae al apagar el motor y cuando se encienda el motor de nuevo ésta se desplegará por efecto de la inercia.

Para el modelo seleccionado se utilizará una hélice plegable con spinner incluido de referencia 8 X 4.5 (diámetro y paso en pulgadas) (ver figura 89). La hélice se seleccionó según las especificaciones de los planos del diseñador, y además se optó por una hélice plegable debido a que en la presente investigación se busca reducir al máximo el consumo de potencia del aeromodelo y éste tipo de hélices colaboran con esto al no generar algún tipo de freno durante los periodos de vuelo estilo planeador (con motor apagado).

Figura 89. Hélice Plegable de 8 x 4.5



Fuente: <http://www.mercamania.es>

7.2.6 Modelamiento CAD del aeromodelo SPIRIT: A continuación se presenta el modelamiento completo en CAD del aeromodelo Spirit seleccionado para el presente estudio; todos los componentes y el avión en general se modelaron bajo las especificaciones presentes en los planos del avión. El software utilizado para el modelamiento fue SolidWorks 2010, el cual es de gran uso en el área de la ingeniería, para el modelamiento y análisis de piezas, componentes y sistemas en general; entre las ventajas que posee éste software se encuentra su versatilidad, el fácil manejo y su amplia compatibilidad con otros software.

Para comenzar, se muestran las alas o superficies sustentadoras del avión, las cuales, como se especificó anteriormente, poseen una envergadura de 180 cm, dos diedros de 7.5° y 10.5° en su parte central y en las puntas respectivamente, además presentan un ligero ahusamiento en sus puntas, lo que hace que su curda disminuya de 20 cm en su parte central a 13 cm en las puntas (ver figura 90).

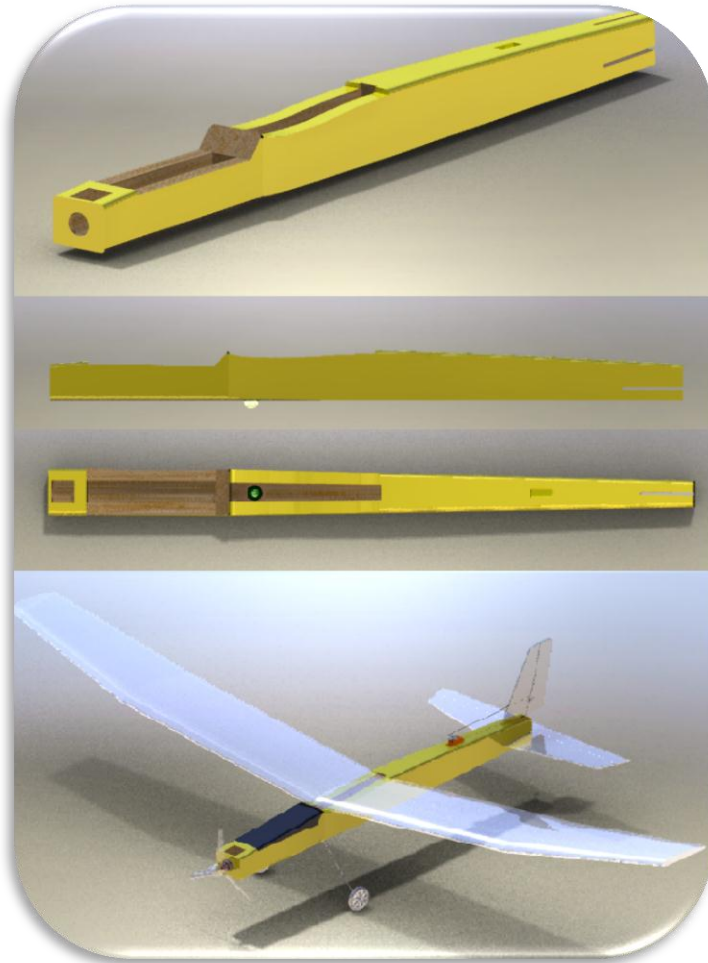
Figura 90. Alas de Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

La siguiente parte principal del avión es el fuselaje, el cual es en forma de celosía o cajón y posee una longitud de 85 cm. El fuselaje posee un espacio libre en su parte central a lo largo de su eje longitudinal, espacio en el cual se instalarán los dispositivos de adquisición de datos, además en la cara inferior del avión se encuentra un hueco por donde sale el lente de la cámara de transmisión en vivo (ver figura 91)

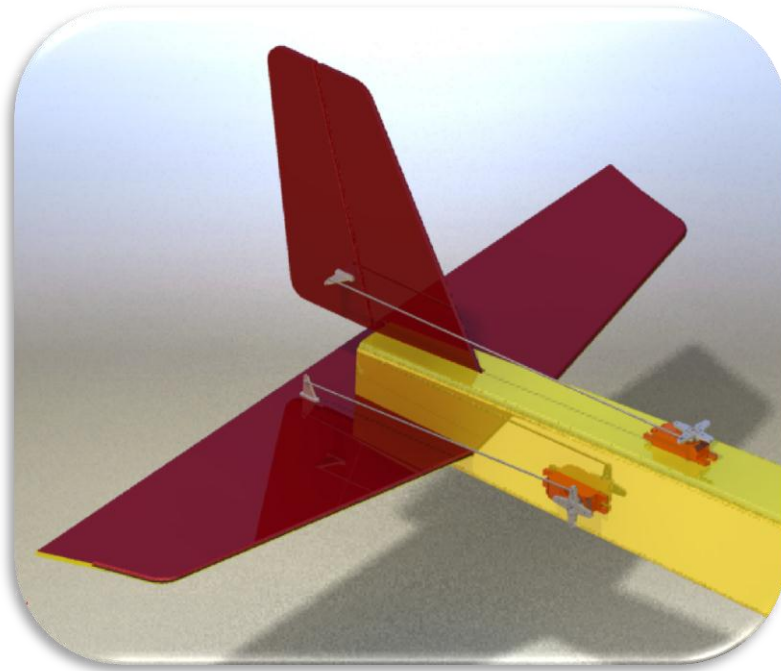
Figura 91. Fuselaje del Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

La siguiente parte fundamental del avión es el empenaje o cola, donde se encuentran las superficies de control (los timones de elevación y dirección), junto con su sistema de transmisión de fuerza.

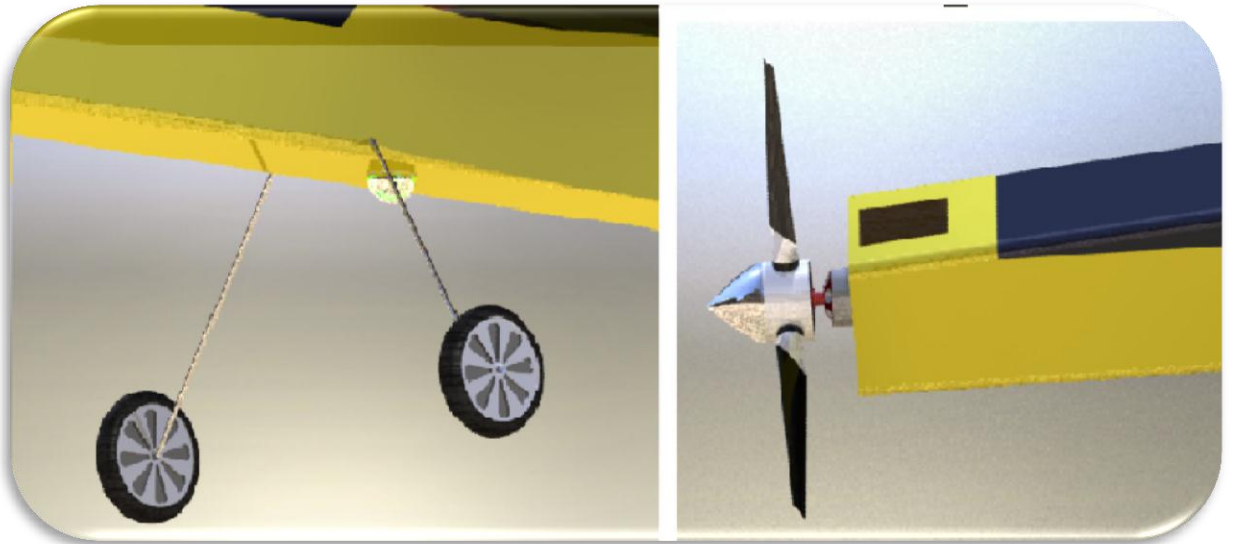
Figura 92. Empenaje del Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

Siguiendo con las partes del avión, se encuentran el tren de aterrizaje y su propela o hélice plegable. El tren de aterrizaje está hecho a base de un alambre de acero dulce de diámetro 1/8" en conjunto con dos llantas de goma de diámetro 5 cm, las cuales son especiales para el aeromodelismo.

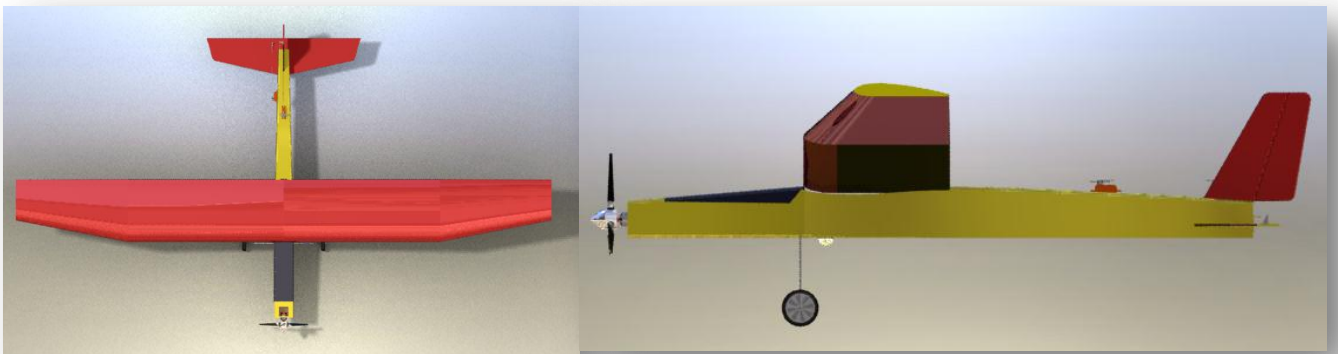
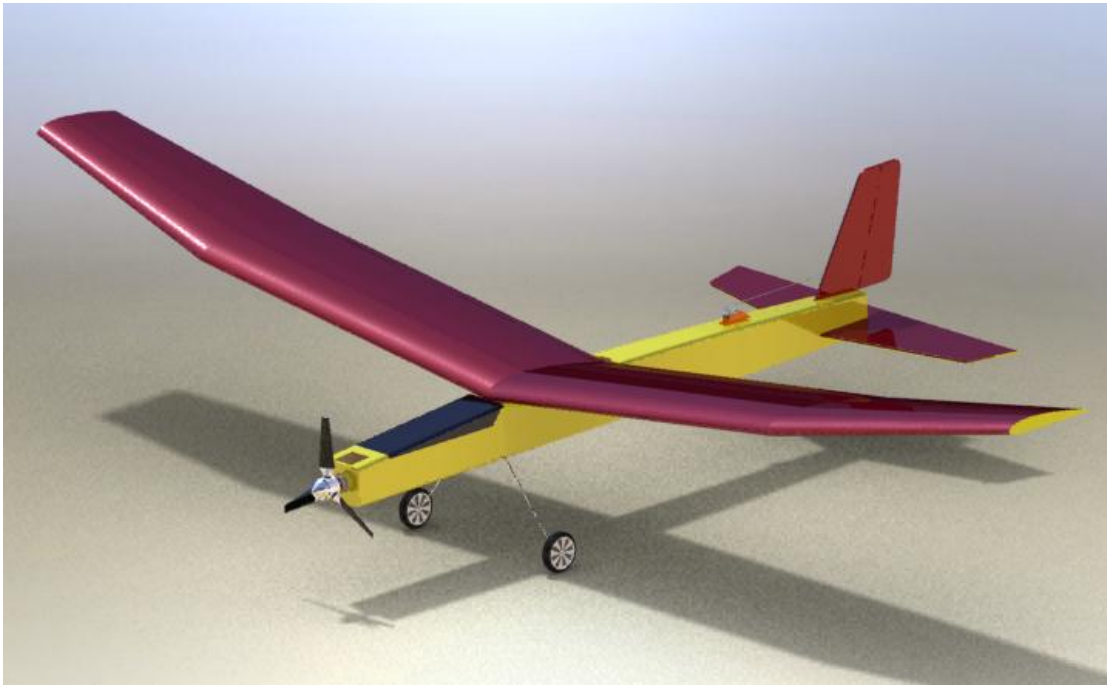
Figura 93. Tren de Aterrizaje y Hélice del Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

Para terminar, se presenta el modelo en CAD del avión completo, donde se puede observar el estilo de éste, sus características y demás (ver figura 94). Al final del presente documento, se anexarán los planos de cada una de las partes del avión, así como el plano general del avión.

Figura 94. CAD del Aeromodelo Spirit



Fuente: Los Autores

7.2.7 Construcción del aeromodelo Spirit: Antes de especificar la construcción de aeromodelo, se realizará un reconocimiento de los materiales empleados y se hará una justificación de su empleo en éste proyecto. Los materiales utilizados

para la construcción del aeromodelo son los siguientes: - Poliestireno expandido (EPS o Icopor).

Es un material plástico celular rígido, de celda cerrada, su estructura está formada por millones de celdas finas rellenas de aire (98%), las cuales se obtienen mediante un proceso de polimerización del estireno cuyos componentes básicos son el carbono y el hidrogeno, junto con un agente expansor. Las propiedades físico-mecánicas del icopor están directamente relacionadas con la densidad (peso específico aparente) a la que se elabora, éste se procesa para obtener diferentes densidades, de acuerdo con la aplicación a la cual será destinado.

Cuadro 16. Propiedades físicas del Icopor (poliestireno expandido).

Overview of materials for Expanded Polystyrene (EPS)			
Categories:	Polymer; Thermoplastic; Polystyrene; Expanded Polystyrene (EPS)		
Physical Properties	Metric	English	Comments
Bulk Density	0.0100 - 0.640 g/cc	0.000361 - 0.0231 lb/inA ³	Average value: 0.473 g/cc Grade Count:94
Density	0.00800 - 0.100 g/cc	0.000289 - 0.00361 lb/inA ³	Average value: 0.0231 g/cc Grade Count:160
Water Absorption	0.800 - 9.00 %	0.800 - 9.00 %	Average value: 2.95 % Grade Count:7
Particle Size	400 - 3150 Aµm	400 - 3150 Aµm	Average value: 1380 Aµm Grade Count:13
Bead Size	0.200 - 3.20 mm	0.00787 - 0.126 in	Average value: 0.994 mm Grade Count:78
Maximum Moisture Content	0.200	0.200	Average value: 0.200 Grade Count:13
Chemical Properties	Metric	English	Comments
Styrene Content	0.0500 - 0.100 %	0.0500 - 0.100 %	Average value: 0.0991 % Grade Count:57
Blowing Agent Content	4.00 - 6.80 %	4.00 - 6.80 %	Average value: 5.71 % Grade Count:78
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Flexural Yield Strength	0.0750 - 3.17 MPa	10.9 - 460 psi	Average value: 0.552 MPa Grade Count:11
Compressive Yield Strength	0.0549 - 1.07 MPa	7.97 - 155 psi	Average value: 0.230 MPa Grade Count:12

Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROMODELO REMOTO (RPV)-UIS

- Madera balsa.

Su nombre científico es *Ochroma pyramidale*. Es un gran árbol que crece hasta 30 m de altura y con diámetro hasta de 1.8 m, su tronco es recto y cilíndrico, libre de ramas hasta de 15 m de altura. La madera es supremamente liviana (densidad de 0.20-0.30), resistente y estable. La albura es blancuzca, amarillenta o rosada y el duramen marrón pálido. Tiene textura fina, grano recto y buen lustre. Ésta madera es de fácil trabajo y requiere que las cuchillas se encuentren bien afiladas para no producir desgarraduras en su corte. Su uso en el presente proyecto es justificado por las propiedades físicas descritas anteriormente, así como su disposición en el mercado y su bajo costo. Las propiedades físicas del balsa se encuentran resumidas en la siguiente tabla.

Cuadro 17. Propiedades Físicas de la Madera Balsa

Tropical Balsa Wood			
Categories:	Wood and Natural Products; Wood; Hardwood		
Key Words:	<i>Ochroma lagopus</i> ; Lumber, Timber		
Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.160 g/cc	0.00578 lb/in ³	Air Dry (12-15% Moisture Content)
Cell Length	2.20 mm	0.0866 in	Mature Wood
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Wood Indentation	400 N	89.9 lb (f)	Side
Tensile Strength, Ultimate	1.00 MPa	145 psi	Perpendicular to Grain
	73.0 MPa	10600 psi	Axial
Modulus of Rupture	0.0190 GPa	2.76 ksi	Static Bending
Flexural Modulus	2.55 - 3.17 GPa	370 - 460 ksi	Static Bending
Compressive Yield Strength	6.90 - 9.00 MPa	1000 - 1310 psi	Parallel to Grain
	1.00 MPa	145 psi	Perpendicular to Grain
Shear Strength	1.10 MPa	160 psi	Orientation Unknown
Impact	2.20	2.20	J/cm ² Toughness
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Shrinkage	0.600 %	0.600 %	Axial; Green to Zero Moisture
	2.40 %	2.40 %	Radial; Green to Zero Moisture
	4.40 %	4.40 %	Tangential; Green to Zero Moisture
	7.50 %	7.50 %	Volumetric; Green to Zero Moisture

Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROMODELO REMOTO (RPV)-UIS

- Fibra de vidrio

La fibra de vidrio comenzó a utilizarse como refuerzo a mediados de los años 40, y se ha venido desarrollando según los requerimientos de la industria. Ésta consiste en una gran cantidad de filamentos que se agrupan a gran velocidad para formar hebras o hilos; los hilos están formados aproximadamente entre 50 a 200 filamentos, el diámetro de estos filamentos es de 50 a 70 micras.

Se debe aclarar que el proceso empleado para utilización de la fibra de vidrio en el avión fue el moldeo por contacto, el cual es uno de los métodos de fabricación más utilizados, se aplicó una capa de fibra de vidrio sobre el fuselaje y sobre las alas, con el fin de darle mayor resistencia estructural a estos dos componentes.

La fibra de vidrio se emplea comúnmente en series de producción cortas, por ende se considera un proceso discontinuo. Éste método de producción es el único que aprovecha al máximo las dos principales características de la resina poliéster, las cuales son que la resina fragua sin presión y a temperatura ambiente. Cuando se trabaja con fibra de vidrio se deben tener en cuenta otros elementos importantes como lo son las resinas. Las resinas que se utilizan son líquidos que se endurecen o polimerizan a temperatura ambiente y baja presión, transformándose en materiales sólidos. Gracias a esto se obtienen estructuras con elevada resistencia y buen comportamiento. Existen diferentes tipos de resinas como: Ortoftálicas o isoftálicas, utilizadas normalmente en lanchas, bañeras y otras aplicaciones.

En la siguiente tabla se presentan las propiedades físicas de la fibra de vidrio.

Cuadro 18. Propiedades Físicas de la Fibra de Vidrio

C-GLASS FIBER, GENERIS			
Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.52 • 2.56g/cc	0.0910 • 0.0925 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	3310 MPa	480000 psi	
	5380 MPa	780000 psi	
	@Temperature -190 Å°C	@Temperature -310 Å°F	
Elongation at Break	4.80 %	4.80 %	
Modulus of Elasticity	68.9 GPa	99 90ksi	
Poissons Ratio	0.276	0.276	
Shear Modulus	27.0 GPa	39 20ksi	Calculated
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Dielectric Constant	6.90	6.90	
	@Frequency 1e+6 Hz	@Frequency 1e+6 Hz	
Dissipation Factor	0.00850	0.00850	
	@Frequency 1e+6 Hz	@Frequency 1e+6 Hz	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE_linear	6.30 Åµm/m-Å°C	3.50 Åµin/in-Å°F	
	@Temperature 20.0 Å°C	@Temperature 68.0 Å°F	
	6.30 Åµm/m-Å°C	3.50 Åµin/in-Å°F	
	@Temperature -30.0 • 250 Å°C	@Temperature -22.0 • 482 Å°F	
Specific Heat Capacity	0.787 J/g-Å°C	0.188 BTU/lb-Å°F	
	@Temperature 23.0 Å°C	@Temperature 73.4 Å°F	
	0.900 J/g-Å°C	0.215 BTU/lb-Å°F	
	@Temperature 200 Å°C	@Temperature 392 Å°F	
Thermal Conductivity	1.10 W/m-K	7.63 BTU _h /hr-ÅÅ-Å°F	

Fuente: Tesis de grado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROMODELO REMOTO (RPV)-UIS

Para la construcción del aeromodelo, se partió de los planos del aeromodelo obtenidos a partir del modelo en CAD en solidwork, del aeromodelo Spirit, los

cuales se anexan al final del presente documento. Se realizaron tres planos, que comprenden el fuselaje, planos sustentadores y planos estabilizadores de cola, el conjunto de estos tres elementos dan como resultado el aeromodelo.

El fuselaje está compuesto por un núcleo o matriz de icopor, la cual se reforzó con madera balsa en su parte exterior y por último se le aplicó una ligera capa de fibra de vidrio para dar mayor resistencia estructural, garantizando siempre que la estructura sea lo más liviana posible. Para ello se empieza imprimiendo sobre las láminas de balsa e icopor las partes que conforman el fuselaje y el empenaje o cola. Se debe recordar que el fuselaje es de tipo celosía o cajón. Después de cortar todas las partes del fuselaje se procede a pegarlas, tanto el icopor como el balsa, para obtener la forma del fuselaje (ver figura 95).

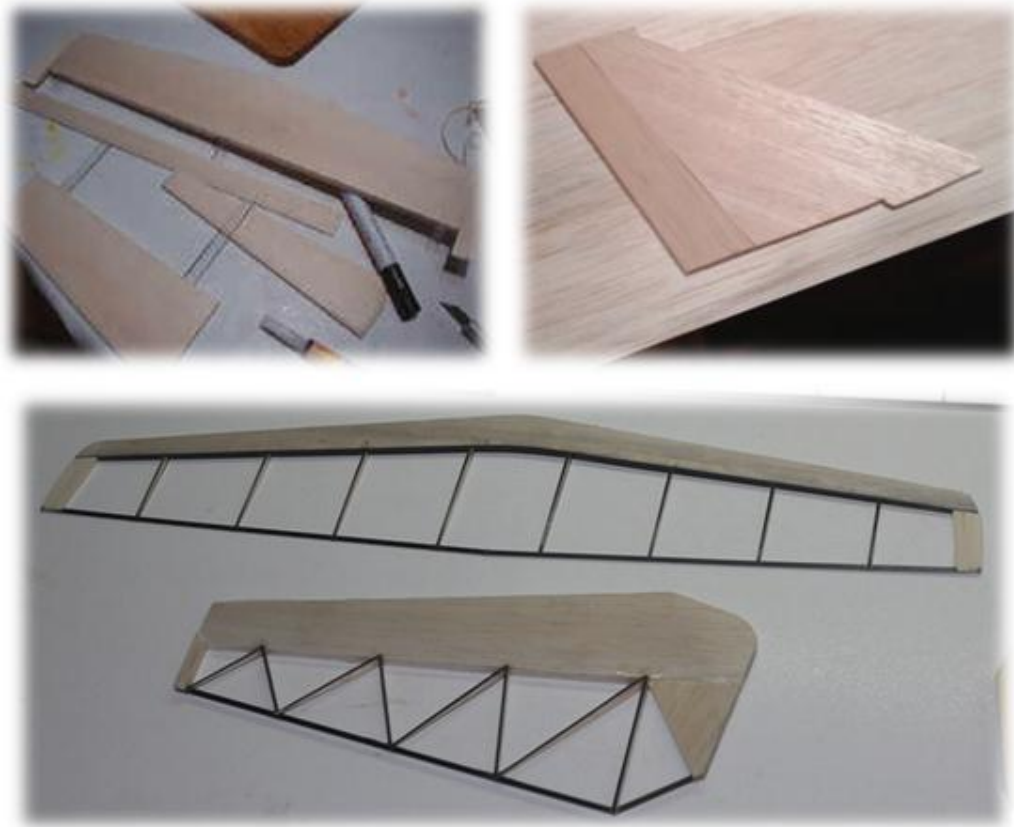
Figura 95. Proceso de Corte y Pegado del Fuselaje



Fuente: Los Autores

Siguiendo con las superficies de control, teniendo ya cortadas las partes de la cola o empenaje se procede a pegarlas con adhesivo industrial, ya que ellas son hechas en forma de estructura con pequeños palos, no son totalmente macizas, esto con el fin de reducir peso en la cola, la cual debe ser lo más ligera posible para un buen balanceo del avión (ver figura 96).

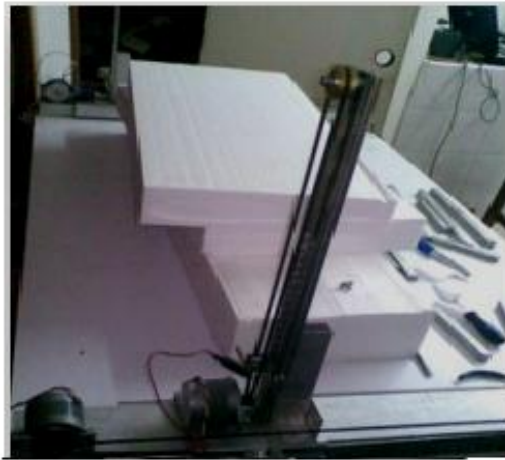
Figura 96. Corte y Pegado del Empenaje o Cola del Aeromodelo



Fuente: Los Autores

Los siguientes componentes del aeromodelo son las alas, como se explicó anteriormente, éstas tienen un núcleo de icopor el cual se corta mediante una cortadora CNC, para lograr exactamente el perfil deseado; sobre el núcleo de icopor se hace un enchapado con láminas de balsa, luego se aplica la ligera capa de fibra de vidrio y por último el papel de colores tipo monokote (ver figura 97).

Figura 97. Corte y Armado de las Alas del Aeromodelo





Fuente: Los Autores

Para finalizar se procede a forrar todo el avión con el papel monokote, luego se ensamblan todas sus partes y por último se le incorporan los componentes electrónicos (ver figura 98).

Figura 98. Forrado y Estado Final del Aeromodelo



Fuente: Los Autores

7.3 CARACTERÍSTICAS Y SELECCIÓN DE ACUMULADORES

En todo tipo de sistemas fotovoltaicos es indispensable el uso de baterías son elementos que siempre deberán estar presentes en estos sistemas debido al requerimiento de electricidad durante los periodos en los cuales no hay suficiente sol o en horas de la noche. En sí la función principal de estos objetos es el de almacenar la energía suministrada por parte del arreglo fotovoltaico a lo largo del día y suministrársela al sistema en caso de necesitarla en cierto momento. Aparte de esto las baterías tienen en especial dos funciones muy importantes.

Su primera función es la de suministrar potencia instantánea o durante breves momentos que sea superior a la que el arreglo fotovoltaico podría llegar a generar aun en los momentos más favorables. Como por ejemplo en el caso de un arranque de motor cuando se desea arrancar el avión el cual para vencer la inercia tiene altos requerimientos de corriente que las celdas no son capaces de suplir.

Y su segunda misión más importante es la de mantener una tensión estable ya que como se vio en un capítulo anterior la salida de tensión por parte de los paneles varía en función de la intensidad radiante de cada momento, lo cual es desfavorable para el funcionamiento de los aparatos. Es por esto que la batería mantiene una tensión estable y constante dentro de su rango, independientemente de las condiciones de radiación solar.

Este fenómeno es observado más claramente cuando se conecta la batería a los bornes positivo y negativo del arreglo fotovoltaico, en el momento que se realiza la conexión la tensión de la batería la cual se mantiene constante determinará la tensión de funcionamiento de las celdas, es decir en la curva I-V de respuesta eléctrica de las celdas la tensión será la que la batería posea en ese momento. Esto indica que si el arreglo de celdas realizado suministran 20V y la batería a la que se conecta posee un rango de entre 10V-12V la tensión de operación de todo el sistema se encontrara en este rango ni más, ni menos de este.

7.3.1 Características de acumuladores

Cuadro 19. Características de las distintas baterías recargables

Type	Voltaje ^a	Densidad de energía ^b			Potencia ^c	Eficiencia ^d	E/\$ ^e	Descarga ^f	Ciclos ^g	Vida media ^h
	(V)	(MJ/kg)	(Wh/kg)	(Wh/L)	(W/kg)	(%)	(Wh/\$)	(%/mes)	(#)	(años)
Plomo y ácido	2.1	0.11-0.14	30-40	60-75	180	70%-92%	5-8	3%-4%	500-800	5-8 (batería de coche), 20 (estacionaria)
Bat. selladas VRLA ⁱ	2.105									
Alcalina	1.5	0.31	85	250	50	99.9%	7.7	<0.3	100-1000	<5
Ni-Hierro	1.2	0.18	50		100	65%	5-7.3 ⁴	20%-40%		50+
Ni-Cadmio	1.2	0.14-0.22	40-60	50-150	150	70%-90%		20%	1500	
Ni-H ₂	1.5		75						20.000	15+
NiMH	1.2	0.11-0.29	30-80	140-300	250-1000	66%	1.37	20%	1000	
Ni-zinc	1.7	0.22	60	170	900		2-3.3		100-500	
ion Li	3.6	0.58	160	270	1800	99.9%	2.8-5 ⁵	5%-10%	1200	2-3
polímeros Li	3.7	0.47-0.72	130-200	300	3000+	99.8%	2.8-5.0		500~1000	2-3
LiFePO ₄	3.25		80-120	170 ⁶	1400		0.7-3.0		2000+ ⁷	
Li azufre ⁸	2.0	0.94-1.44 ⁹	400 ¹⁰	350					~100	
Li titanato	2.3		90		4000+	87-95% ^r	0.5-1.0 ¹¹		9000+	20+
Li película delgada	?			350	959	?	? ^{p12}		40000	
ZnBr			75-85							
V redox	1.15-1.55		25-35 ¹³			80% ¹⁴		20% ¹⁴	14,000 ¹⁵	10(estacionario) ¹⁴
NaS			150			89%-92%				
Sal fundida			70-110 ¹⁶		150-220		4.54 ¹⁷		3000+	8+
Plata-zinc (Ag-Zn)	1.86		130	240						

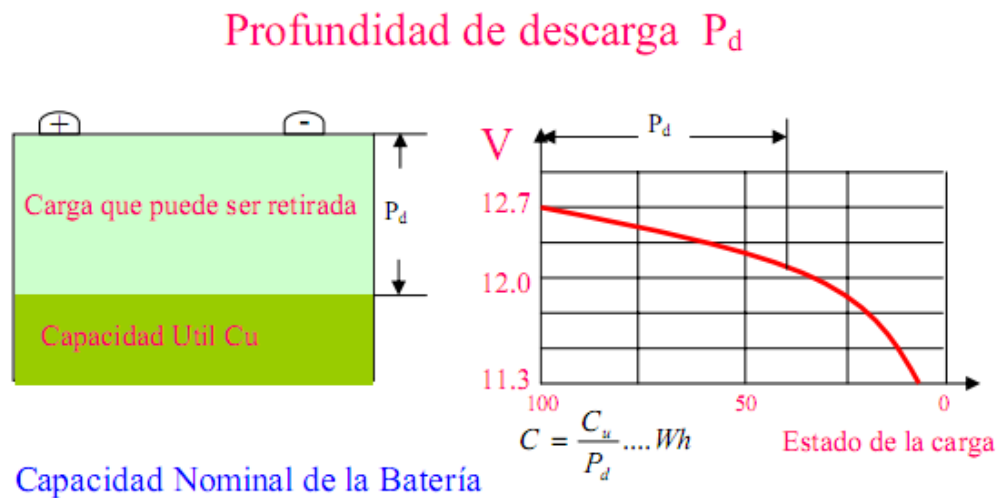
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_recargable

7.3.1.1 Profundidad de descarga: La profundidad de descarga es una representación de la energía que puede extraérsele a una batería, este valor se da en forma porcentual.

La profundidad de descarga está determinada según el tipo de batería que se va a utilizar y dependiendo también de las recomendaciones del fabricante. En el caso de las baterías de Polímero de Litio su profundidad de descarga es muy similar a las baterías de Ni-Cd por lo que su profundidad se encuentra en el rango de 80 a 85%, en ningún caso puede excederse en este valor, aunque también existen

baterías con una menor profundidad que llegan hasta el 60%, pero que son especialmente utilizadas para el uso fotovoltaico (como la de Pb-Ca) y bajar incluso hasta un 20% en caso de una batería de automóvil.

Figura 99. Capacidad de descarga de una batería.



Fuente: Wikipedia

Las características más importantes incluyen la cantidad de energía que puede almacenar, la máxima corriente que puede entregar y la profundidad de descarga que puede sostener. Es conocido que la cantidad de energía que puede dar una batería está dada por el número de watts-hora (Wh) de la misma y La capacidad indica el régimen de descarga y está dada por el número de amperios-h (Ah)

Para una dada batería, el número de Wh puede calcularse multiplicando el valor del Voltaje nominal por el número de Ah, es decir:

$$\text{Wh} = \text{Voltaje nominal} \times \text{Ah}$$

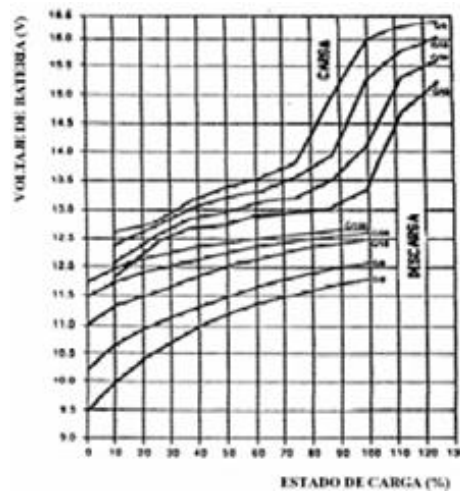
7.3.1.2 Corriente como valor fraccional: El valor de los Amperios-hora de una batería sale de un régimen de descarga especificado por el fabricante. Los fabricantes de baterías expresan el valor fraccional de la corriente de carga o descarga como un valor fraccional de su capacidad (C) en Ah. Por ejemplo una batería con una capacidad de 200Ah, y una capacidad de descarga de C/20 representa 10A y C/40 por ende 5A. Esta forma de dar el valor de la corriente parece arbitraria, pero no lo es si recordamos que la capacidad de una batería, por definición requiere un número específico de horas de descarga. Si la batería solar tiene un voltaje nominal de 6V, la cantidad de energía que puede ser acumulada es de: $6V \times 200 \text{ Ah} = 1.200 \text{ Wh}$ (1,2 Kwh.)

Ahora si se dice que un pack es de 10C significa que es capaz de descargar en continuo hasta 10 x capacidad x 1/h, ósea que para un pack por ejemplo de 1050mAh seria: $10 \times 1050\text{mAh} \times 1/h = 10500\text{mAh} = 10,5 \text{ A}$ de descarga máxima continua.

Esta forma de definir cargas o descargas para las baterías se utiliza para todos los tipos de baterías independientemente de la química de las mismas. Hasta ahora no ha sido muy relevante debido a que no había mucho donde elegir ni tampoco el modelismo eléctrico ha tenido tanta difusión como ahora. Un dato a tener muy en cuenta: Aunque las “C” de descarga de una batería son importantes y nos dan un dato sobre la potencia de la misma esto no es del todo correcto, ya que la potencia de una batería realmente se mide en W/Kg. no en “Cs” Hay que tener muy en cuenta este dato al elegir una batería ya que normalmente una batería de muchas “C” de descarga puede tener muy baja potencia en relación a su peso. Y es muy posible que una batería con menos “C” tenga más potencia en relación a su peso, este dato es muy importante sobre todo en aeromodelos en los que el peso tiene gran influencia en su rendimiento.

7.3.1.3 Voltaje de salida: En una batería, el voltaje de salida durante la carga o descarga no permanece constante. Existen dos variables que determinan su valor: la temperatura del electrolito y el estado de carga. Las Figuras 100 y 101 muestran las curvas que corresponden a estas variaciones de voltaje, estas graficas muestran el proceso de carga y el de descarga. Los valores mostrados usan diferentes valores de corriente, para dos temperaturas de trabajo diferentes: 25°C y 1°C. Las curvas a 25°C muestra el comportamiento de una batería trabajando a una temperatura adecuada. Las curvas a 1°C reflejan la conducta de la misma batería cuando la temperatura del electrolito esta próxima al punto de congelación del agua. Los valores presentados en las curvas corresponden a una batería de 12V nominales. Si la batería es de 6V, estos valores deberán ser divididos entre dos. Si el valor del banco de baterías es un múltiplo de 12V, los valores observados deberán multiplicarse por el valor del múltiplo. Para asimilar el efecto de la temperatura en el comportamiento de la batería se debe recordar que cualquier reacción química se acelera sí la temperatura aumenta y se retarda cuando ésta disminuye.

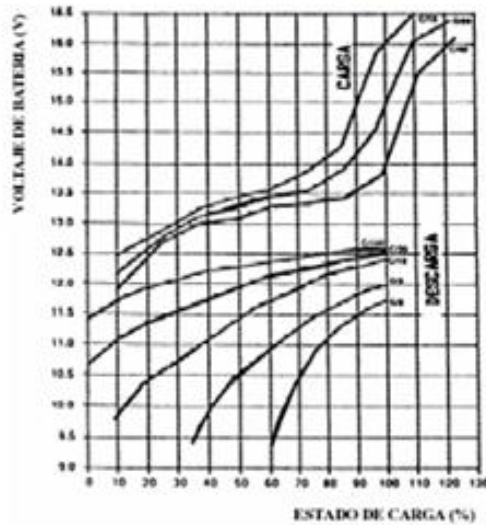
Figura 100. Variación en el voltaje de una batería de 12V Pb-acido 25°C



Fuente: Revista HOME POWER

Figura 101. Variación en el voltaje de una batería 12V Pb-acido 1°C

Figura 32. Variación en el voltaje de una batería de pb-acido de 12v
Temperatura del Electrolito: 1°C



(Cortesía de la Revista HOME POWER)

Fuente: Revista GOME POWER

7.3.1.4 Densidad del electrolito: El electrolito forma parte de las reacciones químicas que se producen en la batería por lo tanto su valor en cualquier momento sirve como indicación muy apropiada del estado de carga de la batería. La densidad es la relación del peso por unidad de volumen del electrolito.

El valor de esta densidad en una batería deberá ser lo suficientemente alta para que el electrolito contenga una cantidad de ácido sulfúrico adecuada, para cumplir los requerimientos electroquímicos de la celda, sin que esto tenga efectos químicos directos en ciertas partes de la celda.

7.3.1.5 Nivel o estado de carga: En cuanto al estado de carga. Si una batería está recibiendo corriente para que se realice el proceso de carga, la diferencia de

potencial entre bornes es siempre algo superior a la que tendría si se desconecta de la corriente, debido a la resistencia interna de la batería.

A medida que la batería se está descargando la tensión disminuye y cuando la batería se está cargando aumenta hasta llegar a un máximo, el cual está dado dependiendo del tipo de batería, para este tipo de trabajos generalmente se utilizan baterías de 12V de tensión es decir que al cargarse se obtendrá un máximo de 13V.

El valor del voltaje a circuito abierto para una batería no representa una buena indicación del estado de carga o la vida útil de la misma. Para que esta medición tenga alguna significado, la lectura debe ser precedida por la carga de la misma. La medición de la densidad del electrolito constituye una evaluación más fiable, pues se mide un grupo de celdas por separado. Diferencias substanciales en el valor de la densidad entre un grupo de celdas y los restantes da una indicación clara del envejecimiento de la misma. Un voltaje que es importante es el de “final de descarga” para la batería. Este valor está dado por el fabricante, pero es siempre cercano a los 10,5V, para una batería de Pb-ácido de 12V nominales, trabajando a una temperatura cercana a los 25°C.

Así como es perjudicial para un batería el hecho de descargarle demasiado también es perjudicial el exceso de carga de ella cuando se le deja cargando por demasiado tiempo.

Eso quiere decir que si se alcanza el estado de plena carga aun así los paneles continuaran forzando corriente hacia la batería, la energía que esta recibe ya no se puede emplear en aumentar la diferencia de potencial, al haber esta llegado a su límite superior, es por esto que puede que sea necesario el uso de un regulador de carga que no permita el flujo de corriente hacia la batería cuando esta llegue a su límite. Este tema se tratara con posterioridad y se analizara si realmente es necesario el uso de un regulador

7.3.1.6 Eficiencia: La eficiencia de carga de las baterías se refiere a cuanta capacidad se queda en la batería de la que le proporcionamos con el cargador. Esta eficiencia lógicamente depende de la química de la batería, calidad, antigüedad y tipo de carga. Lógicamente cuanto más vieja es la batería menor es su eficiencia de carga y cuanto más rápida es la carga menor es la eficiencia. Sirva como referencia esta Lista de eficiencias:

- Nimh < 80%
- NiCd 85% aprox.
- Plomo 90% aprox.
- Lipo > 98%

En las instalaciones donde se utiliza energía solar como es en este caso las intensidades de carga y descarga de una batería son en general muy bajas por lo que los rendimientos al haber poca pérdida de calor por efecto Joule y otras causas son bastante aceptables cerca al 90%. Lo que en pocas palabras quiere decir que por cada 100W que el arreglo fotovoltaico produzca la batería será capaz de devolverle al consumo entre 90Watts.

7.3.1.7 Temperatura: En una batería las reacciones internas son de naturaleza química, por tal razón la temperatura influye contundentemente sobre las mismas. De hecho, para lograr que la batería alcance el estado de plena carga, la tensión final recomendada debe ser mayor cuanto más baja sea la temperatura, ya que la reacción química se efectuará con mayor dificultad, requiriendo mayor energía para completar el proceso. Este hecho tiene importancia, pues según el lugar donde se ubique la instalación, podrá ser necesario corregir la tensión aplicada, esto en función de la temperatura media a la que estará sometida la batería. Tomando como referencia una temperatura de 20° C, la tensión debe ser del orden de $-0,006 \text{ V/}^{\circ}\text{C/celda}$. Los reguladores con compensación de temperatura corrigen este defecto.

Debe aclararse que la capacidad real de la batería disminuye cuando baja la temperatura, debido a la influencia de esta en la eficiencia con que se realizan las reacciones electroquímicas. Como los valores de las capacidades suministradas por los fabricantes a menudo están referenciados con la temperatura estándar de 25° C, se aconseja usar el siguiente coeficiente de corrección, aplicable cuando la temperatura media que debe soportar la batería es menor de 20°C:

$$K_t = 1 - \frac{\Delta t^\circ}{160}$$

Donde Δt° es el número de grados centígrados por debajo de los 20° C en que, como media, se supone va a trabajar la batería.

7.3.1.8 Envejecimiento: A medida que pasa el tiempo todas las baterías existentes pierden la capacidad de almacenar su carga, esto se debe a que con cada descarga generada se está perdiendo algo de material activo. No obstante la vida útil de las mismas puede ser prolongada si se mantiene cargadas en cierto nivel y no se sobrecargan ni descargan en exceso, permanecen en un lugar donde las condiciones de humedad y temperatura son correctas y no son sometidas a cortocircuito. Estos consejos se dan para todo tipo de baterías del mercado pero individualmente algunas merecen ciertos cuidados especiales.

7.3.2 Clases de baterías en aerodelismo: En general son muchos los tipos de baterías utilizados en los distintos tipos de modelismo donde en la mayoría de los casos la mejor selección suele ser el uso de baterías Li-po, pero se explicaran algunas características de los demás tipos de baterías también utilizadas.

A continuación se presenta un cuadro con los tipos de baterías utilizados en modelismo y sistemas fotovoltaicos en los cuales se presentan algunas características incluyendo profundidad de descarga.

- Densidad de capacidad: Hace relación a la capacidad nominal y el peso del elemento/pack y se mide en Wh/Kg.
- Densidad de potencia: Hace relación a la máxima descarga continua que un elemento/pack da y el peso del mismo y se mide en W/Kg.

Cuadro 20. Características principales de Baterías

TIPO DE BATERÍA	DENSIDAD DE CAPACIDAD Wh/Kg	DENSIDAD DE POTENCIA	PROFUNDIDAD DE MAX DESCARGA (%)
Ni-Cd	44	700	80
Ni-mh	66	700	75
Saphion	83	900	65
A123	115	2400	80
Lipoly	150	2600	80
NanoLipo	200	2300	90
Li-ion	220	300	75

Fuente: Los Autores

NiCd y NiMh están bastante obsoletas y poco a poco irán desapareciendo, principalmente debido a su alto contenido en metales pesados. Además ya se ha escrito mucho sobre ellas por lo que no se entrará en detalles sobre ellas.

Baterías Lipo y NanoLipo son el mejor compromiso entre capacidad potencia y peso por lo que son la mejor opción para aeromodelos (aviones, helicópteros) y por el momento no tienen competidor en este área. Las baterías de Lipo y NanoLipo también pueden utilizarse en coches y barcos RC pero con muy poco

ahorro en peso en relación a Saphion o A123 ya que para conseguir altos picos de corriente los packs deben de ser bastante grandes.

Baterías Li-Ion tienen la mejor relación capacidad peso pero su potencia es muy baja, por lo que son solo utilizadas como alimentación de sistemas eléctricos de bajo consumo (receptores, servos, emisoras, etc.)

7.3.3 Especificaciones de la batería seleccionada: Cuando se quiere elegir el tipo y modelo de batería a utilizar es muy importante tener todos los datos por parte del fabricante y toda la información detallada necesaria con el fin de no hacer una elección errónea. La información más importante a saber incluye.

- Tipo de batería y tensión nominal, dimensiones, peso, etc.
- Rango de temperatura de funcionamiento.
- Profundidad máxima de descarga.
- Régimen de Carga.
- Efectividad de carga.
- Vida útil de la Batería.
- Tensiones finales en función del régimen de descarga.

Según todos los datos obtenidos de un estudio a fondo del tipo de baterías en general y aquellas utilizadas específicamente en aeromodelismo se decide que para el tipo de aeromodelo, motor seleccionado, potencia consumida y tipo de aplicación la mejor selección será el uso de una batería LIPO de 1000 mAh de 3 celdas y con un voltaje nominal de 11.1 V. Se presentan las características principales de este tipo de baterías y como se llegó a la selección mediante un programa de Excel hecho para esta función.

La selección de esta batería fue soportado por un software especial de cálculo de baterías adecuadas para ciertas características.

Figura 102. Calculadora de baterías Li-po

LiPo A123 Calc www.Rcmaterial.com	
CONSUMO MÁXIMO REAL (no el consumo medio) de su motor:	<input type="text" value="10,00"/> Amperios
Tiempo de funcionamiento que desea de su modelo:	<input type="text" value="13"/> Minutos
Para packs de Lipo recomendamos un mínimo de 9m. aconsejable entre 13 y 25m Para Packs A123 recomendamos un mínimo de 4 min. Aconsejable entre 9 y 13 min.	
El pack para ese motor debería entregar como mínimo:	<input type="text" value="14,00"/> Amperios continuo
El pack recomendado ideal para ese modelo debe entregar:	<input type="text" value="16,00"/> Amperios continuo
La capacidad del pack para conseguir ese tiempo debe ser de al menos:	<input type="text" value="1083"/> mAh
No se auto engañe cualquier pack que se salga de estos datos no funcionara correctamente.	
<u>En las formulas de esta hoja de calculo ya se ha tenido en cuenta:</u> Las perdidas del sistema. Que el motor no se utiliza a máximo régimen constantemente. Margen de seguridad para no sobre descargar el pack en el tiempo requerido de vuelo. Esta calculadora esta ajustada para aviones y helicópteros no para coches, barcos o veleros de trepada.	
V3,0 ES	

Fuente: RCMATERIAL.COM

Como se puede observar el cálculo dio una batería de 1083 mAh, por lo cual se seleccionó una de 1000 mAh debido a la facilidad de conseguirla y que es más cercana. Tener en cuenta que esta selección se hizo para un avión sin el uso de celdas fotovoltaicas, únicamente en caso de volar con la batería.

Datos específicos de la Batería seleccionada:

- Tensión nominal y dimensiones.

La tensión nominal de la batería es de 11.1V los cuales están distribuidos en tres celdas de carga cada una con una tensión nominal de 3.3 V a continuación se observa la tabla del fabricante.

Figura 103. Tabla de la batería por el fabricante

Spec.
 Minimum Capacity: **1000mAh**
 Configuration: **3S1P / 11.1v / 3Cell**
 Constant Discharge: **25C**
 Peak Discharge (10sec): **30C**
 Pack Weight: **94g**
 Pack Size: **73 x 35 x 14mm**
 Charge Plug: **JST-XH**

Product Config Table	
Capacity(mAh)	1000
Config(s)	3
Discharge(c)	25
Weight(g)	94
Max Charge Rate (C)	2
Length-A(mm)	78
Height-B(mm)	36
Width-C(mm)	19



Fuente: hoobyking.com

- Rango de Temperatura de funcionamiento

Este tipo de baterías como se indicó en una sección anterior es mejor trabajarlas dentro de un rango de -5°C a 66°C, en caso de transporte o de almacenamiento se debe evitar que su temperatura alcance los 77°C ya que pueden dañarse o causar un incendio. Aparte es necesario que se deje enfriar hasta la temperatura ambiente la batería LiPo antes de empezar la carga nuevamente.

- Profundidad de descarga.

La profundidad de descarga que presenta este tipo de baterías es muy similar a sus compañeras de Ni-Cd o de A123, estas baterías presentan una profundidad máxima de descarga del 80%, dato verificado por el fabricante.

- Régimen de carga.

Las baterías de polímero de Litio se deben cargar como máximo a una intensidad de 1C y recomendable entre 0,2 y 0,7C. Algunas últimas tecnologías de baterías de Polímero de Litio permiten cargas a mayor intensidad de 1C pero es a expensas de vida del pack (al igual que en otras químicas). Las baterías de Polímero de Litio no tienen efecto memoria por lo que no es necesario ni beneficioso descargarlas antes de recargarlas.

- Efectividad.

En términos de efectividad las baterías Lipo, la efectividad de carga es muy alta cercana al 100% incluso en regímenes muy altos de carga como 1C por lo cual el dato que refleja la pantalla de un cargador digital es muy cercano a la capacidad realmente almacenada en el pack.

- Vida Útil de la batería.

Respecto a la vida útil de este tipo de baterías es importante tener en cuenta ciertos cuidados a tener con el fin de alargarla y no tener ningún tipo de problemas con su funcionamiento por ejemplo nunca las almacene cargadas por completo durante más de 3 días, algunas personas muy bien informadas dicen que incluso tres días es demasiado tiempo. Tenga en cuenta lo acumulado. Así que el almacenamiento de carga por completo durante 10 horas en 100 días es lo mismo que almacenar completo durante 40 días. (Suficiente para matar el paquete). Siempre guarde en 3.8v/celda si no se va a cargar y volar por más de un par de días.

- Tensiones finales en función del régimen de descarga.

Nunca permita que bajen de 3.6 V por celda después de volar, mejor aún 3.7 V por celda. Ya que el voltaje mínimo al que se pueden trabajar estas celdas es de 3.3 V es decir a 9.9 V para una batería de 3 celdas como es en este caso. Esto en caso de vuelo, pero cuando se está realizando la carga es importante evitar la sobre carga de la batería y estar pendiente de esto, aunque existen los llamados cargadores balanceadores los cuales abren el circuito al momento de llegar a la máxima carga, es decir 4.2 V por celda o 12.6 V para 3 celdas, y evitan que se sobrecargue, en todo caso hay que estar pendientes que eso no ocurra o utilizar un regulador de carga.

Figura 104. Batería LiPo de 1000 mAh Turnigy



Fuente: Hobbyking

Las baterías deben llevar grabadas de forma indeleble los indicadores + y – del polo positivo y negativo y además un rótulo que indique su tensión y tipo, así como su capacidad y fecha de inicio del período de garantía.

Cuadro 21. Necesidad de emplear baterías

FACTORES A FAVOR	FACTORES EN CONTRA
Demanda de potencia en periodos sin sol.	Elevado costo inicial
Cargas que no requieren corrientes de arranque elevadas.	Requerimientos adicionales de espacio.
Demanda de tensión constante.	Dificultad de proteger la batería de condiciones climáticas externas.
Capacidad de almacenar energía generada en exceso a la demanda.	Pérdidas de energía por ineficiencia de las baterías.

Fuente: Los Autores

Para la carga rápida y correcta de las baterías en caso de no utilizar las celdas fotovoltaicas se usa el siguiente tipo de cargador. El cual es un cargador balanceador variable con protección en caso de un corto o picos de tensión para proteger la batería. Cargador marca Hobby King.

Figura 105. Cargador de Baterías Variable



Fuente: Los Autores

7.4 CÁMARA DE VIDEO DE TRANSMISIÓN EN VIVO

Inicialmente para selección del sistema de transmisión de datos, se seleccionó un sistema como el que se muestra en la figura 106. Esta selección se realizó teniendo en cuenta la necesidad de transmitir videos en tiempo real; evidentemente existen diversos equipos que cumplen con éste trabajo, por tal razón se ejecutó una recopilación de información para encontrar un sistema que fuese flexible, fácil de conseguir, manipulación sencilla y que ya este probado en Colombia.

Figura 106. Sistemas de Transmisión de Video



Fuente: Range video wireless video solutions, www.rangevideo.com

El conjunto se compone de una mini cámara de moderada resolución y alcance, la cual cuenta con su respectivo sistema de alimentación (una batería de 9 Voltios), y la antena de transmisión, un dispositivo receptor que estará en la estación de tierra con sus respectivos elementos de operación como lo son las antenas, cables, etc.

Teniendo ya el sistema seleccionado, se toman los elementos que van dentro del fuselaje del avión y se establece su respectiva posición.

En el Cuadro 22 se muestran las especificaciones técnicas de la mini-cámara, uno de los elementos que estará dentro del aeromodelo, junto con su batería y cableado del sistema.

Cuadro 22. Especificaciones mini cámara.

Características técnicas mini-cámara	
Tipo de sensor	CMOS color de 1/3"
Tamaño imágenes	PAL 628x582 px
Dimensiones / Peso	21 x 21 x 21 mm / 21 g
Alimentación	8V DC / 80 mA

Fuente: Range video wireless video solutions, www.rangevideo.com

Figura 107. Batería de 9 voltios.



Fuente: <http://www.powerseguridad.es>.

7.4.1 Arquitectura del sistema de transmisión de video: En éste paso se describe el montaje, funcionamiento, objetivo y las cualidades del sistema de adquisición de datos visuales, el cual esta implementado en el aeromodelo en un ángulo específico para las necesidades de captura de imágenes, con el fin de optimizar el campo visual, precisando objetivos visuales y puntos de enfoque fijados.

Figura 108. Secuencia del manejo de Información



Fuente: <http://www.ecotips.com.ar/camina/circuitocamara.jpg>.

La mini cámara inalámbrica se instala en la parte inferior del aeromodelo, la cual tiene un transmisor de video incorporado en la misma carcasa de la cámara; éste envía la señal a un receptor el cual se encuentra en tierra, éste receptor envía la

información por el puerto de video a una tarjeta capturadora (TV o Pantalla con entrada de video), y ésta a su vez envía la información Vía USB al computador portátil, donde se puede se ver en tiempo real el video. Ver figura anterior.

7.4.2 Componentes del sistema: Éste sistema se compone de los siguientes elementos:

- Mini cámara: Su función es tomar los datos visuales en formato de video, lleva incluida una antena de transmisión inalámbrica y su respectivo transmisor.
- Batería de 9 voltios: Se encarga de dar la energía de alimentación para la mini cámara.
- Receptor RX: Se encarga de recibir de forma inalámbrica los datos visuales tomados por la mini cámara, para luego ser transmitidos en una pantalla; éste se encuentra en una estación en tierra.
- Antena RX: Antena que se instala en el receptor, por medio de la cual recibe los datos visuales el receptor.
- Cables RCA: Estos cables permiten la conexión entre el receptor y la pantalla o dispositivo por el cual se va a transmitir en tiempo real el video.
- Cable adaptador para el receptor: Proporciona la alimentación energética al receptor, convierte la fuente de energía alterna en directa.
- Pantalla: Por medio de éste se visualizan los datos tomados (video) en tiempo real, puede ser una pantalla, un televisor o cualquier dispositivo que tenga entradas RCA.

7.4.3 Características de la mini cámara

La mini cámara es de la serie CAM001 208C, posee un transmisor de 50 mW, con frecuencias de salida entre los 900 MHz y los 2400 MHz; además tiene

incorporado en su carcasa tecnología CMOS¹² (sensor de detección de luz), y por supuesto tiene la capacidad de capturar vídeo, (ver figura 109).

Posee regulación automática de exposición luminosa de 3 Lux, Control automático del color blanco, control automático de ganancia, dispone de un zoom de enfoque regulable, sensor de imagen 1,3 pulgadas CMOS, lente de 6.0MM/F1.2, resolución de 380 líneas y una antena de goma con conector tipo F.

Se alimenta mediante una batería de 9 voltios o también tiene la posibilidad de alimentarse por medio de un adaptador de corriente alterna de 110V.

Figura 109. Mini cámara



Fuente: Los Autores

¹ Un Active Píxel Sensor (APS) es un sensor que detecta la luz basado en tecnología CMOS y por ello más conocido como Sensor CMOS.

Cuadro 23. Especificaciones técnicas de la mini cámara.

Elemento de imagen	Sensor CMOS color de 1/3
Sistema de TV	PAL
Resolución	380 líneas de Tv
Frecuencia de escaneo	50 Hz
Iluminación mínima	3 lux
Micrófono	Incorporado en cámara
Potencia de salida	50 mw
Frecuencia de salida	900 MHz – 1200 MHz
Alimentador de cámara	9 Volt/ 80 mA (batería) o adaptador
Alimentador receptor	Adaptador 12 Volt DC
Duración de la pila 9 Volt	5 horas
Peso aproximado de la cámara	55 gramos

Fuente: Los Autores

Figura 110. Componentes Cámara



Fuente: Los Autores

7.5 SISTEMA DE SENSADO DE INFORMACIÓN

Los datos a los cuales se les van a realizar las mediciones son a la corriente y al voltaje producido por las celdas fotovoltaicas cuando el aeromodelo se encuentra en movimiento, esta medición se realizara de dos formas, la primera cuando el

aeromodelo funciona sin el uso de celdas fotovoltaicas y la segunda funcionando con la ayuda del arreglo, de esta forma se podrán obtener datos de voltaje, corriente, potencia y tiempo de descarga en ambos casos lo cual es muy importante para dar conclusiones del proyecto.

La organización del sistema será de la siguiente forma. La energía producida por el arreglo fotovoltaico pasa en primera instancia por regulador de carga en el caso que este se esté utilizando, posteriormente se realiza la medición de corriente por parte del sensor ACS 714, de ahí hay una salida que va a un PIN del Arduino dedicado a realizar esta medición. Luego de la medición de corriente, se continúa con el divisor de voltaje LM 235 el cual al igual que el sensor de corriente tiene una salida que va hacia un PIN del Arduino dedicado únicamente a esta función. Finalizando, la energía producida por las celdas que será un poco menor, ya que una cantidad despreciable se consume para el funcionamiento de los circuitos anteriores, esta energía pasará directamente a la carga de la batería LiPo.

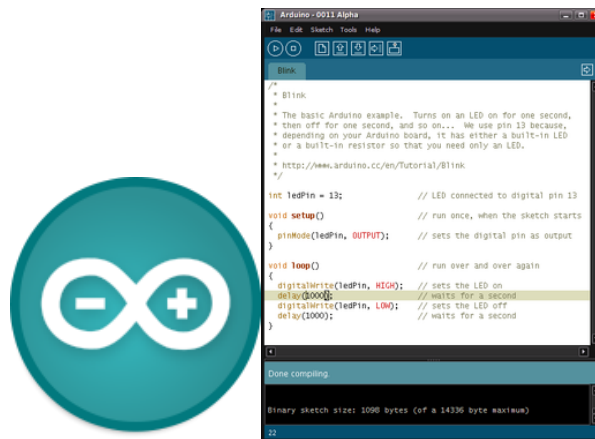
Una vez la tarjeta Arduino UNO reciba las señales procedentes de los sensores llevará a cabo el programa que se le fue asignado y transmitirá los datos vía los módulos XBEE de manera instantánea hacia un computador ubicado en tierra, así se podrá tener idea de los datos y comportamiento instantáneo del aeromodelo en términos energéticos. Cabe aclarar que tanto la tarjeta Arduino como los sensores de corriente y voltaje, necesitan una alimentación de 5 V para su funcionamiento, la cual será proporcionada por una fuente de energía externa al sistema.

Los elementos utilizados para todo el sistema de adquisición de datos del aeromodelo son los siguientes:

- Tarjeta Arduino UNO
- Módulos Xbee Pro XBP 24-AWI-001
- Sensor de Corriente ACS 714
- Divisor de Voltaje LM 235

7.5.1 Tarjeta Arduino UNO: Arduino es una plataforma de hardware libre basada en una sencilla placa de entradas y salidas simple y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring. Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador (por ejemplo: Macromedia Flash, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Figura 111. Entorno Arduino



Fuente: www.arduino.cc/es/

El Arduino "Uno" es una placa electrónica basada en el ATmega328. Cuenta con 14 entradas / salidas digitales pines (de los cuales se pueden utilizar hasta seis salidas PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera de ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para el soporte del microcontrolador; Basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador AC-DC o la batería para empezar.

Figura 112. Arduino UNO



Fuente: www.arduino.cc

Cuadro24. Datos generales Arduino UNO

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (Atmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (Atmega328)
EEPROM	1 KB (Atmega328)
Clock Speed	16 MHz

Fuente: www.arduino.cc

La tarjeta Arduino será utilizada específicamente como tarjeta de adquisición de datos y no controladora ya que su función principal será la de recibir los datos que envíen el sensor de corriente y el sensor de voltaje respectivamente y mediante el programa presente en ella, imprimirá los datos requeridos para posteriormente

enviarlos a una tabla de Excel y sacar las respectivas graficas de Voltaje Corriente y Potencia en el tiempo y así observar el beneficio del uso de las celdas comparándolo con el aeromodelo volando sin celdas.

7.5.2 Módulos Xbee Pro XBP 24-AWI-001: Los módulos XBee son dispositivos que integran un receptor- transmisor de ZigBee y un procesador en un mismo módulo, lo que le permite desarrollar aplicaciones de manera rápida y sencilla.

Zigbee es un protocolo de comunicaciones inalámbrico basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE 802.15.4. Zigbee permite que dispositivos electrónicos de bajo consumo puedan realizar sus comunicaciones inalámbricas. Es especialmente útil para redes de sensores en entornos industriales, médicos y domóticos.

Las comunicaciones Zigbee son realizadas en una banda libre de 2.4GHz. Este sistema realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir, de un solo canal. Normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles. El alcance depende de la potencia de emisión del dispositivo así como el tipo de antenas utilizadas (cerámicas, dipolos,...).

Figura 113. Módulo Xbee Pro



Fuente: <http://www.xbee.cl/caracteristicas.html>

Los módulos Xbee Pro XBP 24-AWI-001 son económicos, poderosos y fáciles de utilizar. Algunas sus principales características son:

- Buen Alcance: hasta 300ft (100 mts) en línea vista y hasta 1 milla (1.6 Km) para los módulos Xbee Pro.
- 9 entradas/salidas con entradas analógicas y digitales.
- Bajo consumo <50mA cuando están en funcionamiento y <10uA cuando están en modo sleep.
- Interfaz serial.
- 65,000 direcciones para cada uno de los 16 canales disponibles. Se pueden tener muchos de estos dispositivos en una misma red.
- Fáciles de integrar.

La función principal de los módulos Xbee es la de recibir los datos generados por el programa de la tarjeta Arduino y transmitirlos de uno en el aire a otro en tierra, para posteriormente ser recibidos por el computador base y generar la tabla de datos del funcionamiento energético del aeromodelo.

Para realizar la conexión entre la tarjeta Arduino y Xbee así como entre el computador base y Xbee son necesarias algunas tarjetas especiales que facilitan el trabajo. Las cuales son llamadas tarjetas Xbee Explorer a continuación sus datos.

Figura 114. Xbee Explorer



Fuente: <http://www.xbee.cl>

El XBee explorer USB permite conectar y utilizar cualquier módulo XBee directamente mediante un puerto USB. Es tan sencillo como conectar un módulo XBee, conectar un cable mini USB al PC y se obtendrá el acceso a los pines TX/RX del XBee y estará listo para funcionar.

7.5.3 Sensor de Corriente ACS 714: Para el sensado de la corriente producida por las celdas fotovoltaicas se utilizó un Chip sensor de corriente ACS 714 de 5A de rango El chip ACS714, es un sensor de corriente capaz de medir de forma lineal corrientes de hasta 5 Amperios en ambos sentidos (+5A y -5A). Produce en su salida una tensión lineal proporcional a la corriente que atraviesa sus pines de medición, lo cual es extremadamente útil para medir consumos o excesos de

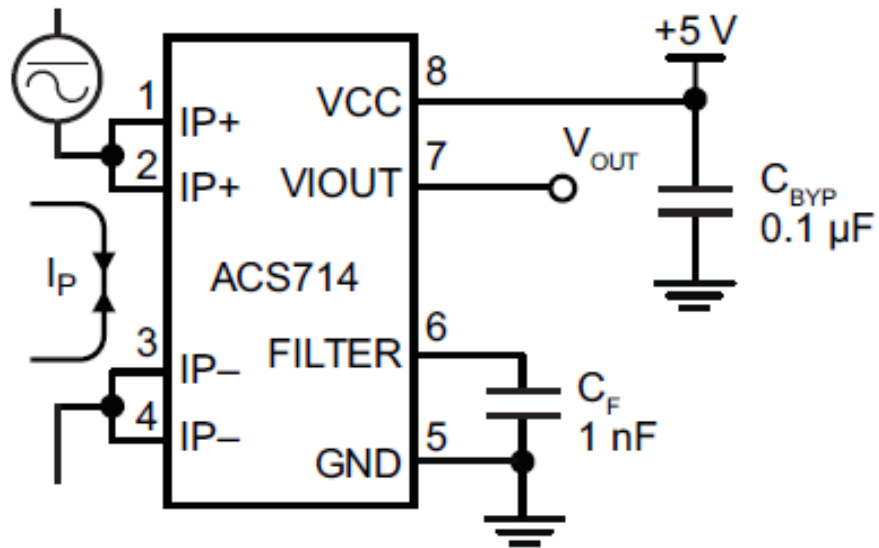
consumo en diversos proyectos como en robótica cuando se utilizan grandes motores DC, en quadcopters o todo circuito que necesite saber la corriente consumida por algún dispositivo.

La salida produce una ventana de sensibilidad de 185mV/A y está centrado en 2.5 V, con un margen de error de 1.5%. La resistencia interna del sensor es de 1.2 mΩ por lo que el consumo generado por la medición es muy bajo. Puede funcionar desde -40°C a 150°C.

Características y Beneficios tomadas directamente del Datasheet.

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the FILTER pin
- 5 μs output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% typical, at TA = 25°C
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 mΩ internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage
- Operating temperature range, -40°C to 150°C

Figura 115. Montaje Típico ACS714



Fuente: Allegro Micro systems inc.

Cuadro 25. Guía de Selección ACS714

Selection Guide

Part Number	Optimized Range, I_p (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)	T_A (°C)	Packing*
ACS714ELCTR-05B-T	±5	185	-40 to 85	Tape and reel, 3000 pieces/reel
ACS714ELCTR-20A-T	±20	100		
ACS714ELCTR-30A-T	±30	66		
ACS714LLCTR-05B-T	±5	185	-40 to 150	
ACS714LLCTR-20A-T	±20	100		
ACS714LLCTR-30A-T	±30	66		

*Contact Allegro for additional packing options.

Fuente: Allegro Micro systems inc.

Como es posible corroborar con las imágenes de selección del sensor adecuado y de las características principales de este, su sensibilidad de sensado es de 185mV/A, lo cual para el caso de este proyecto puede ser un problema, todo esto

debido a que como se mencionó en una sección anterior con el arreglo fotovoltaico que se seleccionó y se va a trabajar la máxima corriente generada será de 300mA. Es decir que por cada amperio que aumente la corriente generada por las celdas, el sensor enviara 185mV, lo cual en si es poco y más aún cuando la máxima corriente generada por el arreglo seleccionado es de 300mA lo cuándo indicaría un aumento en el pulso de voltaje de máximo 55,5 mV lo cual al momento de enviar esta señal a la tarjeta Arduino puede producir un error y no reconocer con suficiente rango el cambio de corriente.

Cuadro 26. Performance ACS714

x05B PERFORMANCE CHARACTERISTICS¹ over Range L: $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 150°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-5	-	5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	185	-	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{\text{OUT}} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	21	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta I_{\text{OUT(Q)}}$	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	-0.26	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.08	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	0.054	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.008	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
Electrical Output Voltage	V_{OE}	$I_P = 0\text{ A}$	-60	-	60	mV
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_P = \pm 5\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	± 1.5	-	%
		$I_P = \pm 5\text{ A}$, $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-7	-	7	%

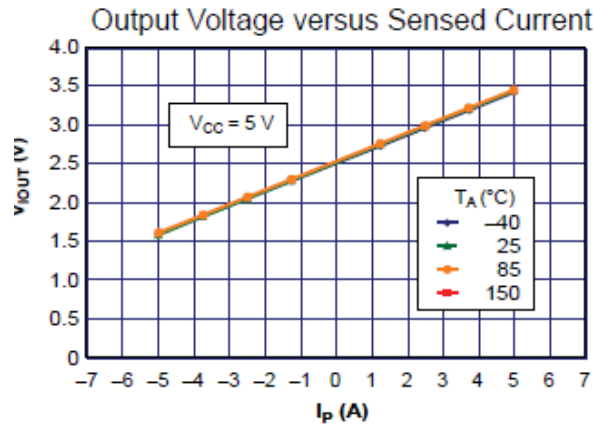
¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{\text{J(max)}}$, is not exceeded.

²Percentage of I_P , with $I_P = 5\text{ A}$. Output filtered.

Fuente: Allegro Micro systems inc.

Es por esto que para movernos en un rango más elevado a los 55,5 mV debemos aumentar la sensibilidad de sensor y tener una mayor ventana de análisis para recorrer por completo la gráfica de I vs V.

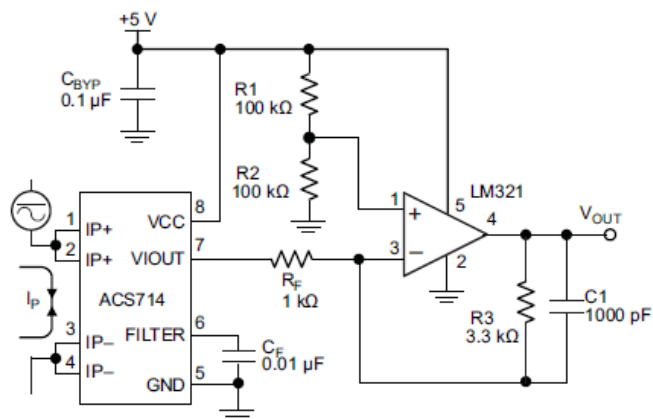
Figura 116. Voltaje de Salida Vs Corriente Sensada



Fuente: Allegro Micro systems inc.

Por ende para realizar el mencionado aumento de sensibilidad del sensor se decidió realizar un montaje como el que se muestra a continuación y así obtener un mayor rango de desplazamiento en la curva.

Figura 117. Arreglo de aumento a 610mV/A



Application 3. This configuration increases gain to 610 mV/A (tested using the ACS714ELC-05A).

Fuente: Allegro Micro systems inc.

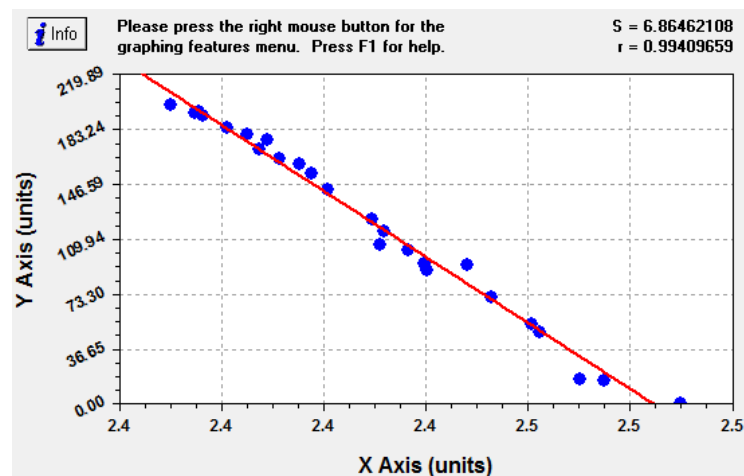
Con la realización de este montaje será posible realizar las mediciones de una manera más precisa y obtener mejores resultados para ver más claramente el verdadero comportamiento de la corriente generada por las celdas fotovoltaicas.

Cuadro 27. Caracterización del sensor de corriente.

V_out	I_out
2,495	0
2,476	15,6
2,458	53,4
2,39	170
2,382	184
2,376	192,6
2,368	199,9
2,432	89,6
2,431	93,4
2,448	71,3
2,442	92,6
2,42	106,3

Fuente: Los Autores

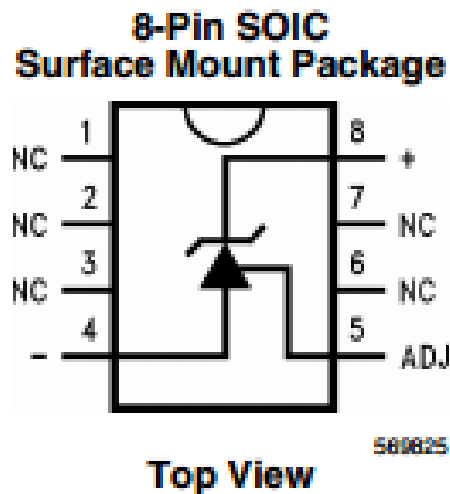
Figura 118. Grafica de caracterización del sensor de corriente



Fuente: Los Autores

7.5.4 Divisor y Sensor de Voltaje LM 235: Una vez terminada la parte de sensar corriente se procede a realizar el sensado del voltaje o diferencia de potencial producida por el arreglo fotovoltaico. Esta medición de voltaje es relativamente sencilla pero hay que tener en cuenta ciertas incidencias al momento de realizar el montaje. El componente más importante que se va a utilizar es el amplificador LM 235 que normalmente es utilizado para mediciones de temperatura pero en este caso es para amplificar y corregir la señal producida por las resistencias divisoras del voltaje que producen las celdas.

Figura 119. Conexiones LM235



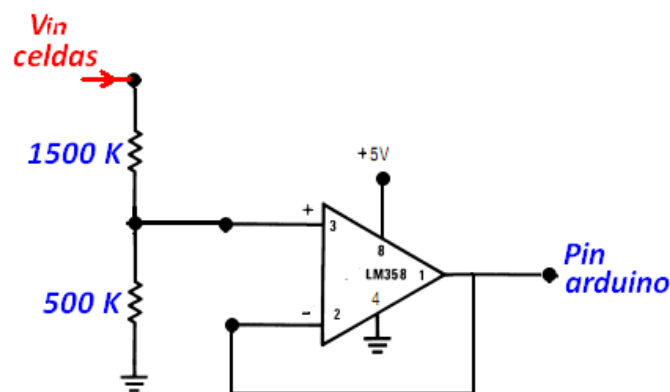
Fuente: National Semiconductor

Ahora bien, el hecho de realizar una división de voltaje se debe a que como se dijo con anterioridad la tarjeta de adquisición a utilizar es una Arduino, la cual solamente recibe pulsos de voltaje no mayores a los 5V, y con el arreglo que se propuso realizar de celdas fotovoltaicas se produce una diferencia de potencial

cercana a los 20V, lo que causaría si se conectara directamente al Arduino sería un posible daño en la tarjeta quemándola y dejándola inservibles, es por esta razón que se decidió realizar una división de voltaje para bajar hasta el rango necesario y sin consumir mucha corriente que es lo más importante.

La división de voltaje se realizó con resistencias de valores de 500 K Ohm y 1500 K Ohm de la siguiente forma.

Figura 120. Montaje de Resistencias divisoras



Fuente: National Semiconductor

Una vez terminado el montaje del sensor de voltaje se procede a realizar una serie de pruebas con el fin de caracterizar el amplificador y poder encontrar su curva de funcionamiento y obtener mayor precisión al momento de recibir los datos en la tarjeta Arduino.

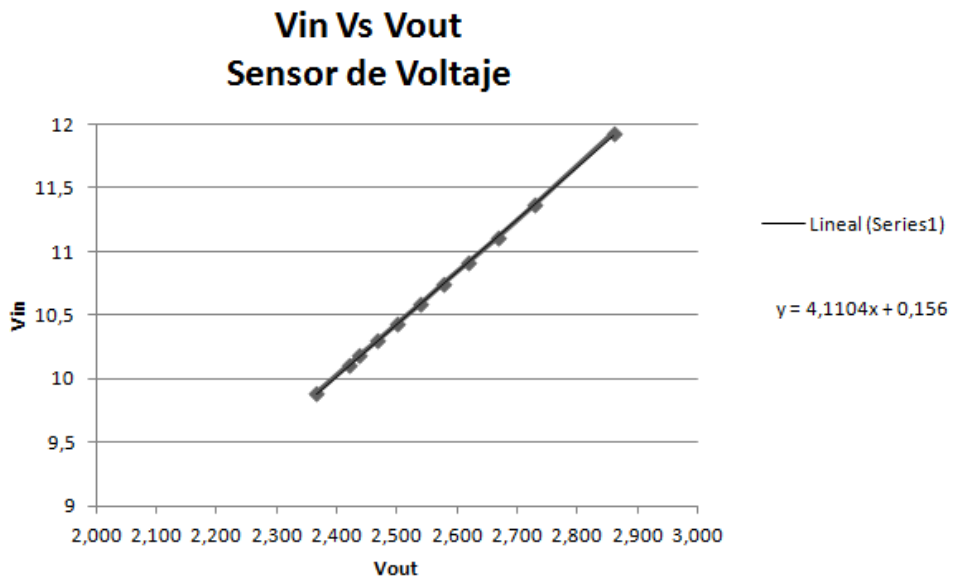
La prueba para la caracterización se realizó variando el voltaje de entrada al sensor de voltaje para ver qué valor se obtendría a la salida, así sucesivamente con varios datos hasta obtener la curva necesaria. La tabla de datos y la curva de la caracterización del sensor de voltaje fueron las siguientes.

Cuadro 28. Tabla de datos de caracterización del sensor de voltaje.

V_out	V_in
2,860	11,93
2,730	11,37
2,668	11,11
2,618	10,91
2,578	10,75
2,540	10,59
2,500	10,43
2,468	10,3
2,437	10,18
2,420	10,11
2,367	9,89

Fuente: Los Autores

Figura 121. Grafica de caracterización del sensor de voltaje.

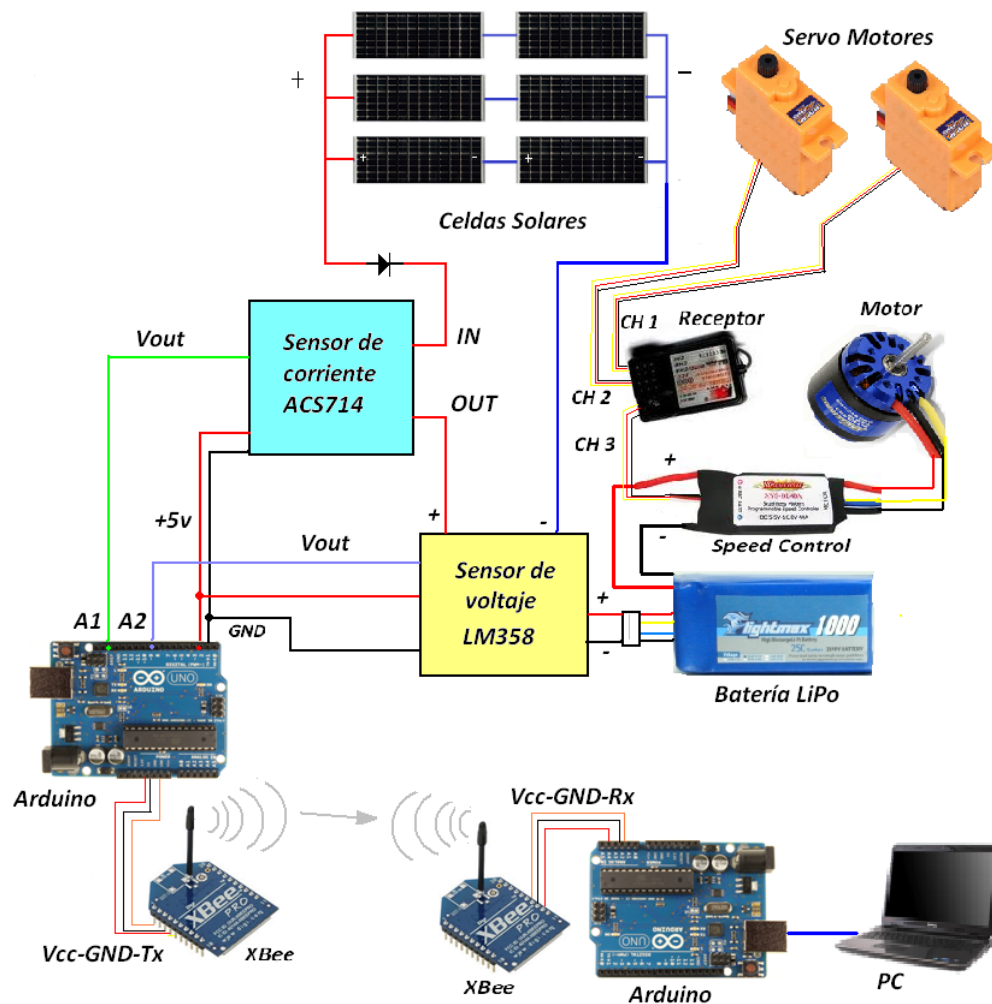


Fuente: Los Autores

7.6 ESTADO FINAL DEL PROTOTIPO

7.6.1 Esquema general: a continuación se mostrara el esquema del montaje electrónico el cual incluye los sensores, la tarjeta de adquisición de datos, el video y las celdas. Todo se mostrara en el orden que va y con sus respectivas conexiones.

Figura 122. Esquema Electrónico General del Proyecto

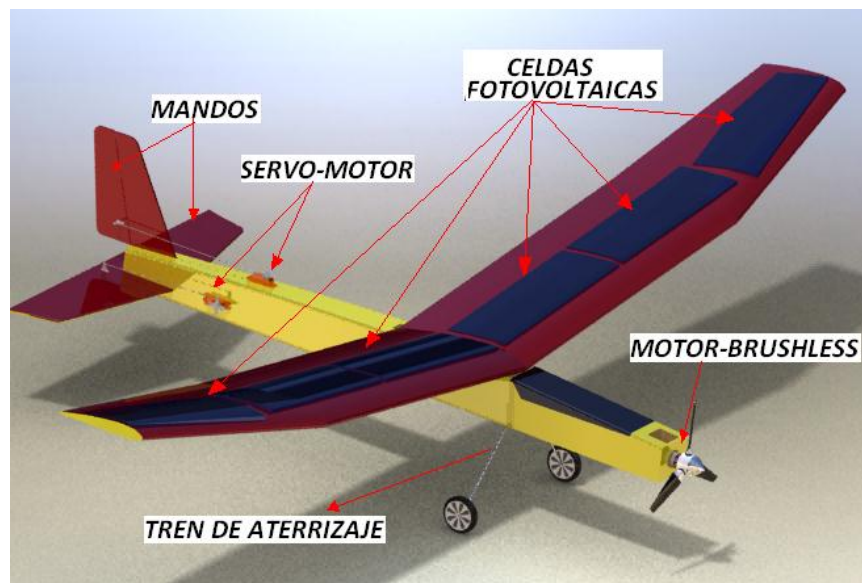


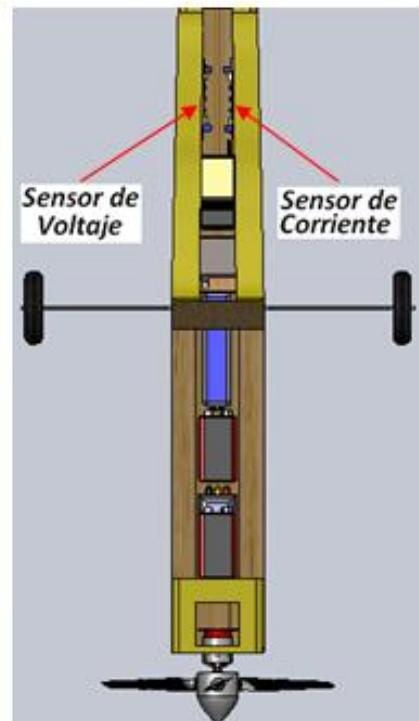
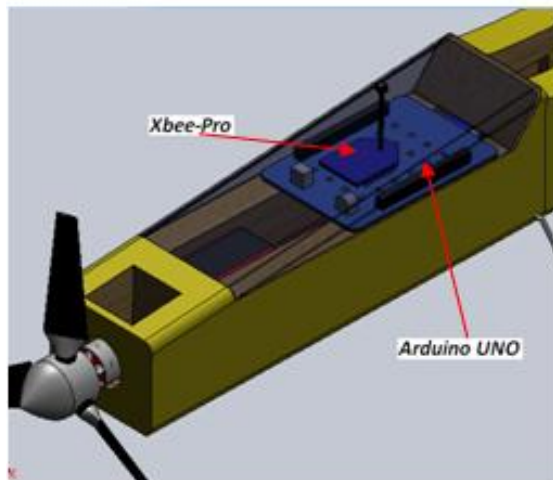
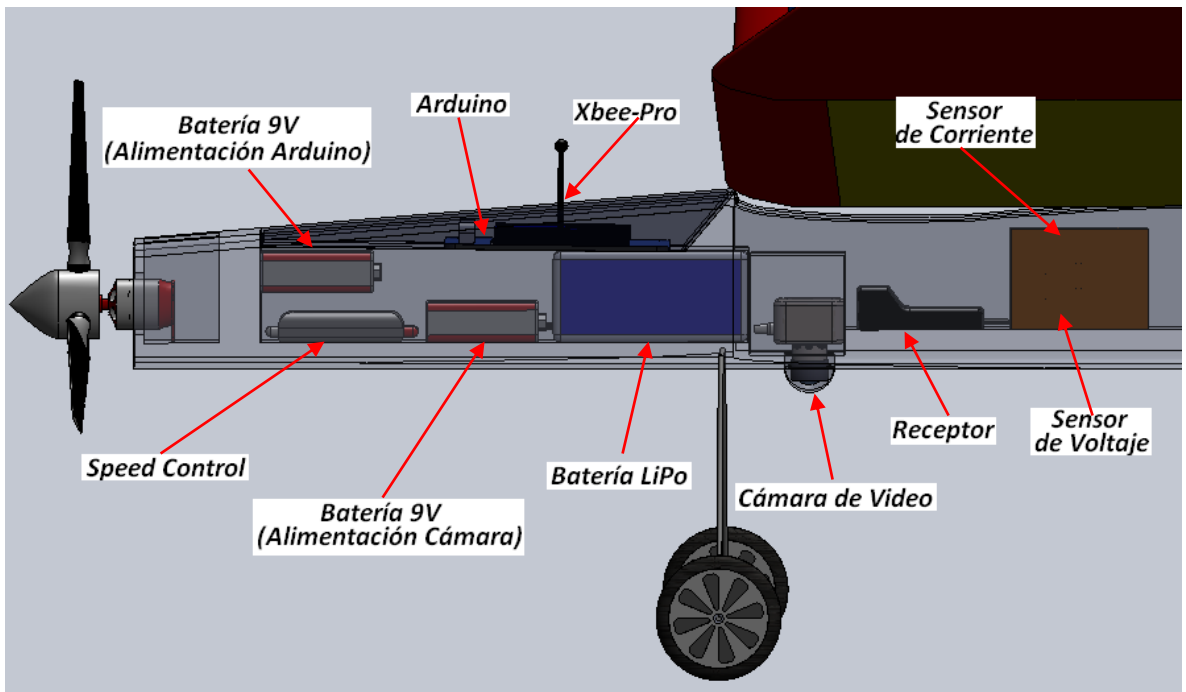
Fuente: Los Autores

En la imagen es posible observar de qué consta el sistema de generación energética de una manera general se tienen las celdas fotovoltaicas que generan la electricidad para el circuito de ahí la energía pasa por el sensor de corriente y posteriormente al sensor de voltaje, de estos dos sensores se envían pulsos que van a la tarjeta Arduino la cual recibe la señal y la envía por medio de los módulos Xbee de forma instantánea al computador en la base de tierra para realizar el respectivo monitoreo del vuelo, esto por el lado de mediciones. Después del paso por los sensores la energía pasa a ser acumulada en la batería la cual es la encargada de recibir la energía y entregarla dependiendo del consumo exigido por parte de la aeronave la cual está compuesta por motor brushless, los servos motores y el Speed control.

En cuanto a la organización física del aeromodelo y como se ubicaron los circuitos en la figura a continuación (ver figura 123) se puede observar como quedo la distribución de los elementos dentro del avión.

Figura 123. Distribución de elementos dentro del aeromodelo





Fuente: Los Autores

7.6.2 Realización de pruebas del prototipo: En esta sección se muestran las pruebas que se le realizaron tanto al sistema energético como al vuelo del aeromodelo y ver cómo se comporta en comparación al prototipo convencional, es decir, sin el uso del sistema de generación a base de energía solar.

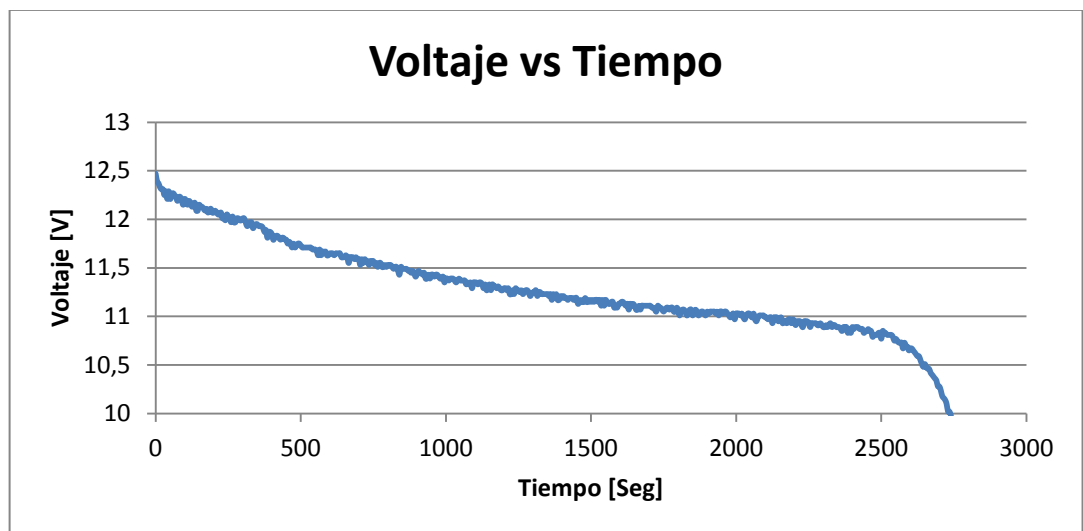
Las dos primeras pruebas se realizaron con el aeromodelo en tierra acelerando el motor a cierta velocidad, pero sujetándolo para evitar accidentes.

Primera Fase de Pruebas: Pruebas en Tierra

Prueba # 1. Descarga del Avión Sin Implementación de las Celdas Solares.

Esta prueba se realizó el día Jueves 19 de Julio y consistió en descargar la batería del aeromodelo acelerándolo a unas Rpm constantes “Medio Stick”. La prueba comenzó con la batería cargada a 12.4 Voltios y se finalizó a los 10 Voltios, es decir se fue desde su máxima carga hasta su máxima descarga. Se obtuvo un tiempo de descarga de **45 Minutos y 17 Segundos**, de allí se generó el siguiente gráfico con los datos tomados mediante el software Arduino.

Figura 124. Gráfico de descarga de la batería sin implementación de celdas Solares (Prueba # 1)



Fuente: Los Autores

Figura 125. Prueba sin celdas en tierra



Fuente: Los Autores

De la gráfica se puede tomar un punto de partida para la comparación del rendimiento y beneficio utilizando celdas fotovoltaicas. En las siguientes pruebas se obtendrán datos del beneficio de las celdas y será posible compararlos con los obtenidos anteriormente.

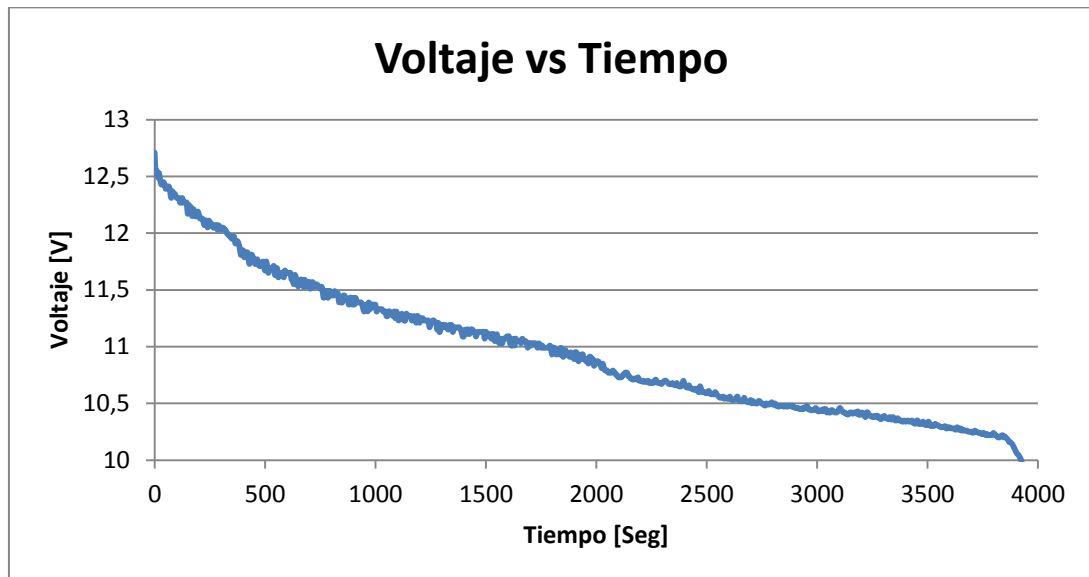
Prueba # 2. Descarga del Avión con Implementación de las Celdas Solares.

La prueba 2 se realizó de la misma forma que la anterior, acelerando el motor a media velocidad con el aeromodelo en tierra, pero ahora utilizando el arreglo fotovoltaico para generación de energía; lo importante de esta prueba es que fue hecha en un día donde el promedio de la irradiación solar medida con un piranometro durante toda la prueba fue de 756 W/m^2 .

El día de realización de la prueba 2 fue el martes 24 de julio de 2012, día soleado, esta fue realizada entre las 11am y 12m con el fin de obtener la mayor cantidad de radiación directa y al mejor ángulo de inclinación. La grafica que se obtuvo de la

descarga de la batería en el tiempo fue la siguiente, cabe resaltar que la batería también se descargó desde 12,4 Voltios hasta 10 Voltios.

Figura 126. Gráfico de descarga de la batería con la Implementación de las celdas solares (Prueba # 2)



Fuente: Los Autores

Observando la gráfica y los datos de la prueba, los cuales se adjuntan en los anexos, se obtiene el tiempo total de descarga, el cual fue de 3930 segundos es decir 65,5 minutos: **1 hora 5 minutos y 32 segundos.**

Si se realiza la comparación del rendimiento del sistema con y sin el uso de las celdas fotovoltaicas, es decir comparando la pruebas 1 y 2, que serían los casos extremos, se puede observar que por un lado se obtienen 45 minutos de descarga y por el otro 65,5 minutos de descarga, lo cual indica un aumento de tiempo gracias al uso del sistema energético, la eficiencia entonces será de:

$$\% \text{ Ganancia} = \frac{T_{\text{celdas}} - T_{\text{sin celdas}}}{T_{\text{sin celdas}}} \cdot 100$$

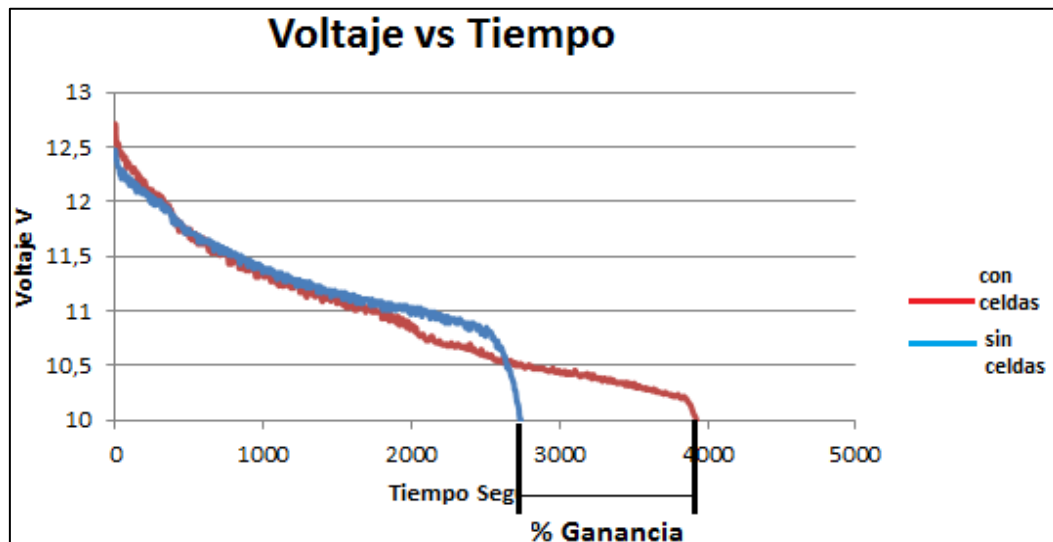
$$\% \text{ Ganancia} = \frac{65,5 - 45}{45} \cdot 100 = 45.55 \%$$

Figura 127. Prueba con celdas en tierra



Fuente: Los Autores

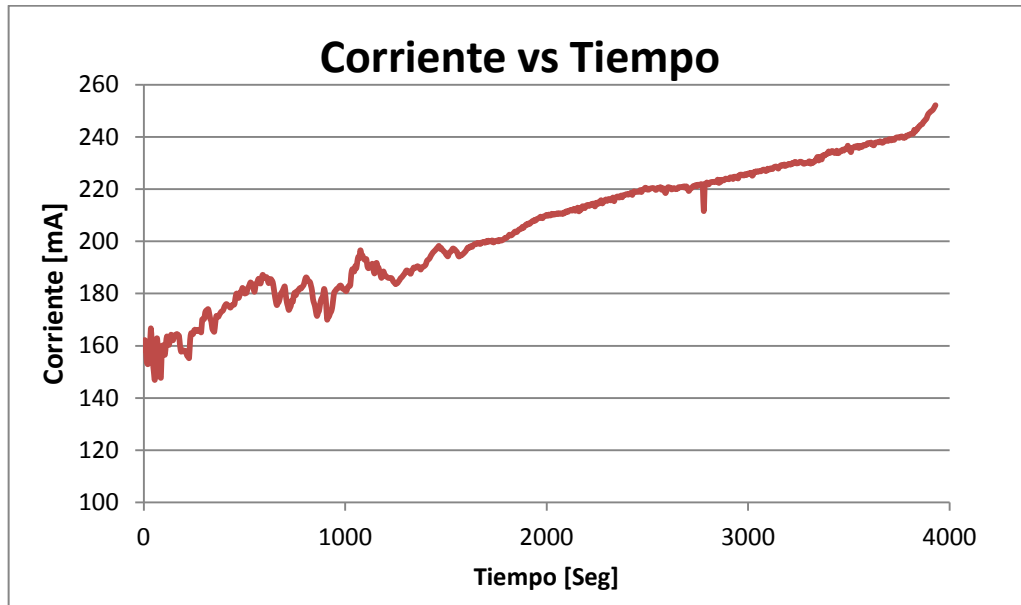
Figura 128. Gráfico de comparación de descarga de la batería pruebas 1 y 2



Fuente: Los Autores

El comportamiento de la corriente generada por el arreglo fotovoltaico durante la realización de esta prueba fue el siguiente.

Figura 129. Gráfico de Corriente generada durante la Prueba # 2



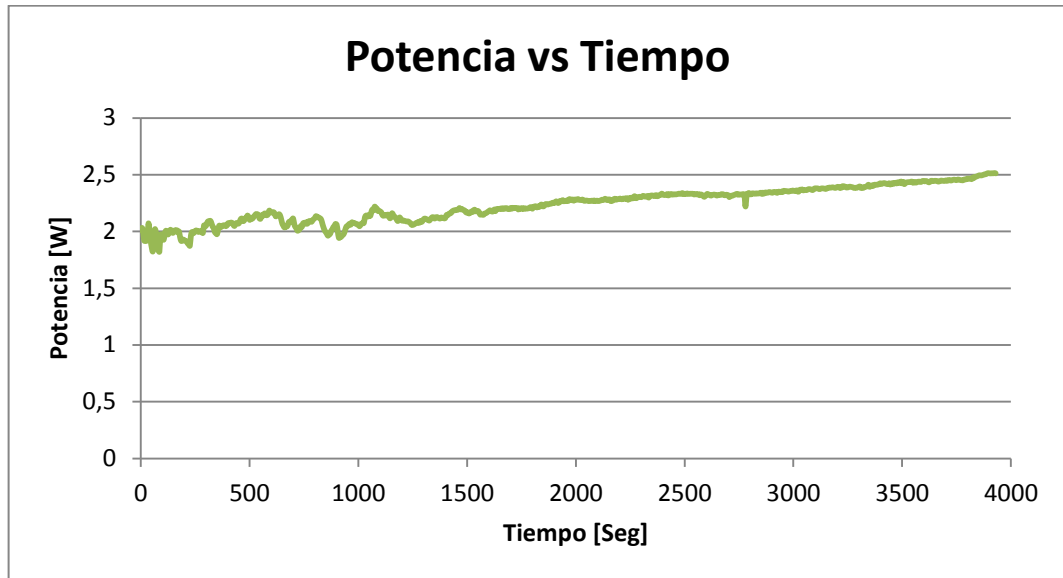
Fuente: Los Autores

En el gráfico se puede observar que en un inicio la corriente no era tan alta como se esperaba que fuera, esto debido a que la carga de la batería estaba también casi completa, entre más carga tenga la batería, más se restringe el paso de corriente.

Con el uso del sistema energético en las pruebas en tierra se logró corroborar que si existe un beneficio con el uso de energía solar y este fue de un máximo de **45,5%** con el uso de una batería de 1000 miliamperios-hora (mAh).

El gráfico de consumo de la potencia suministrada por las celdas durante toda la prueba se observa a continuación.

Figura 130. Suministro de Potencia durante la Prueba # 2



Fuente: Los Autores

Segunda Fase de Pruebas: Pruebas en Aire

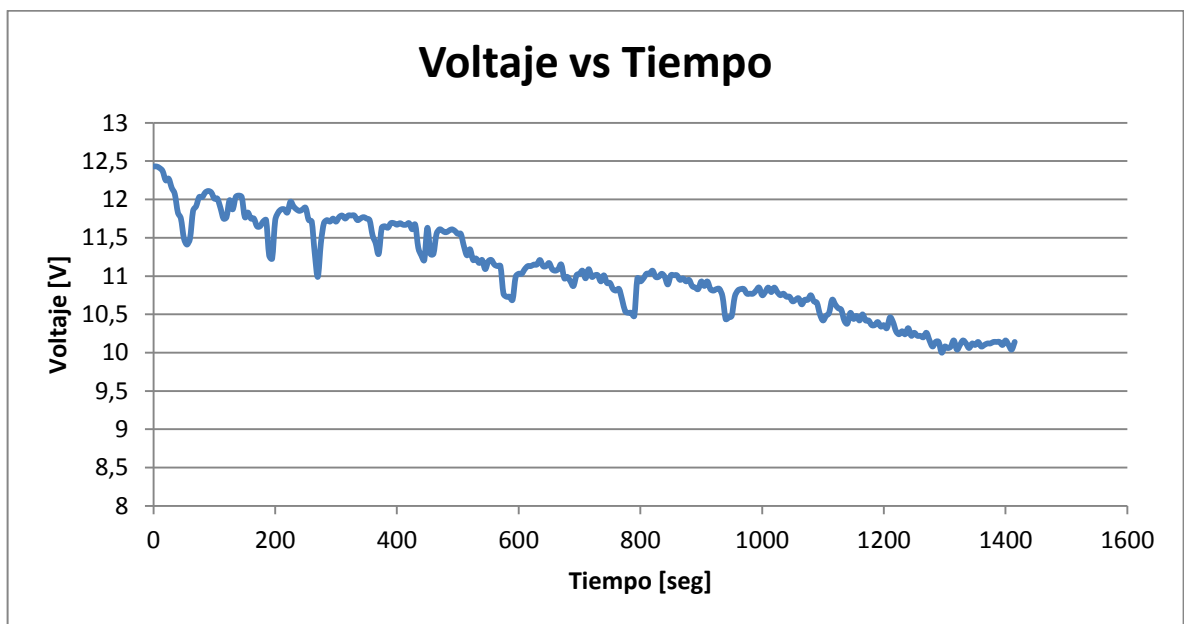
Para la siguiente tanda de pruebas, las cuales son las más importantes y donde se puede ver el beneficio del sistema energético de una forma más real, las condiciones cambian de cierta forma, ahora ser realizaran en el aire, ya no con un mismo régimen de aceleración si no con el necesario para mantener el aeromodelo en vuelo durante el mayor tiempo posible, además se procuró no realizar cambios bruscos con el fin de no alterar mucho los parámetros de la prueba y las mediciones.

Prueba # 3. Descarga del Avión en el Aire sin implementación de Celdas Solares.

Esta prueba se realizó el día Jueves 9 de Agosto de 2012, en el voladero de aeromodelos ubicado en la vereda de Acapulco del municipio de Floridablanca, Santander; con la ayuda del piloto experto en Aeromodelos no tripulados Marnix Van Geert. De igual forma que en las demás pruebas esta consistió en descargar

la batería del aeromodelo colocándolo en vuelo, sin el uso del sistema de generación fotovoltaico y sin un régimen de velocidad establecido. La prueba comenzó con la batería con carga de 12.4 Voltios y se finalizó a los 10 Voltios, es decir se fue desde su máxima carga hasta su máxima descarga. Se obtuvo un tiempo de descarga de **23 Minutos 32 Segundos** y se generó el siguiente gráfico con los datos tomados mediante el software Arduino.

Figura 131. Gráfico de descarga de la batería en vuelo sin la implementación de celdas solares (Prueba # 3)



Fuente: Los Autores

Con este gráfico se observa el comportamiento de descarga de una batería de 1000mA-h bajo condiciones de vuelo normales y con distintos regímenes de velocidad, los picos que se observan en algunos momentos específicos, representan aumentos en la velocidad y aceleración del aeromodelo por necesidad del vuelo, lo que genera una caída de Voltaje, pero al momento de desacelerar recupera un poco de esta carga.

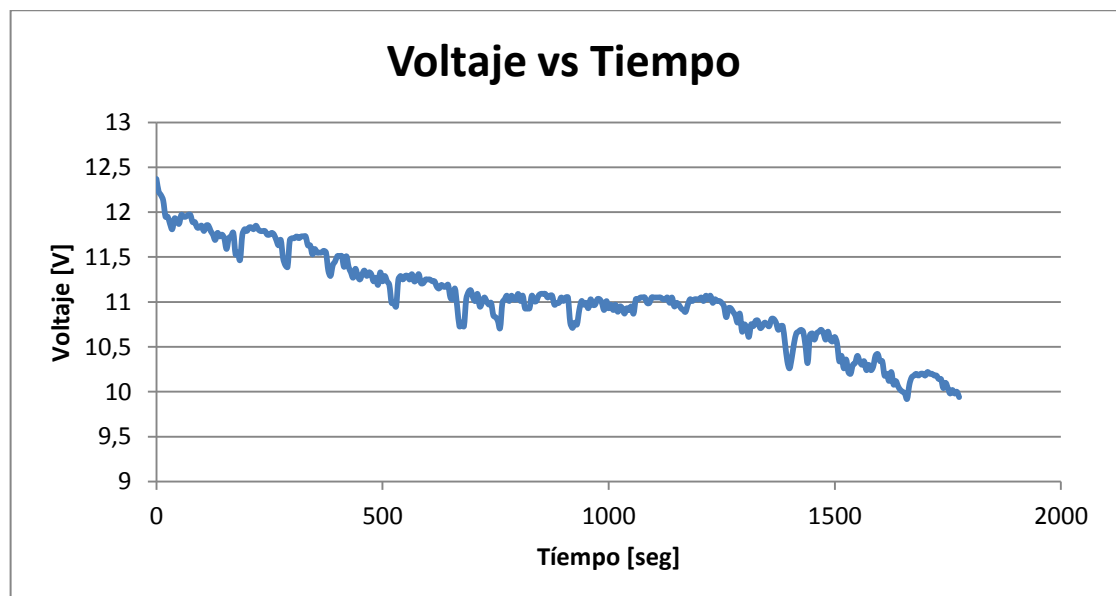
Lo que se pretende con esta prueba es tener también un punto base de comparación al momento de dar una conclusión acerca del uso de celdas fotovoltaicas.

Prueba # 4. Descarga del Avión en el Aire con implementación de Celdas Solares.

La prueba 4 se realizó de la misma forma que la prueba 3, pero utilizando el arreglo de generación energética, sin un régimen de velocidad específico y con el aeromodelo en aire, la prueba fue realizada con un promedio de 730 W/m² de irradiación, esto no quiere decir que todo el tiempo hubo sol ya que esto es incontrolable, pero si durante la mayoría del tiempo.

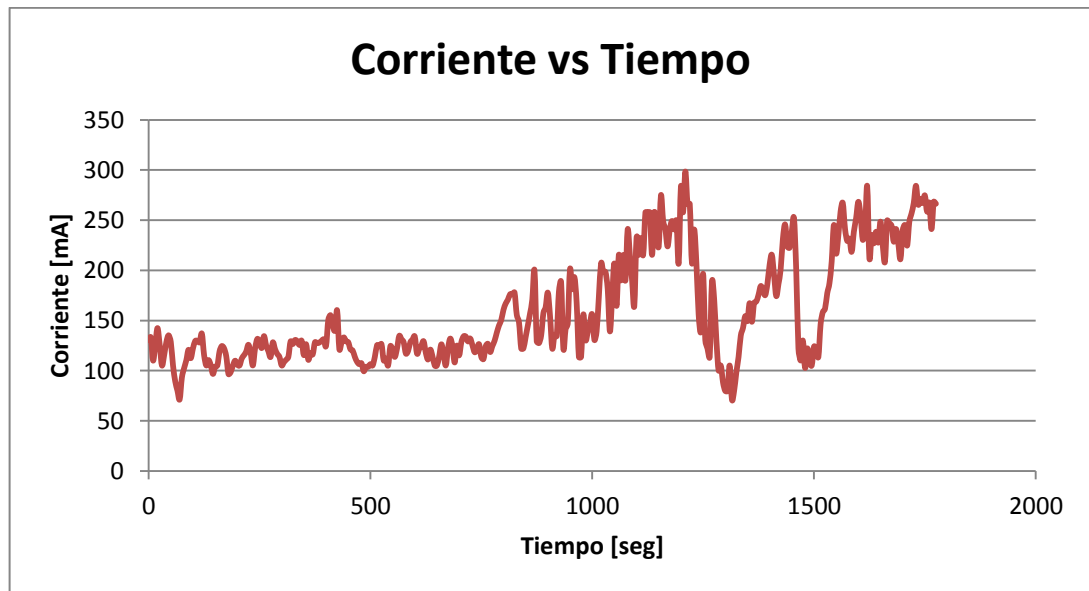
El día de realización de la prueba 4 fue el jueves 9 de agosto de 2012 en el voladero de aeromodelos mencionado anteriormente; el cual fue un día soleado, esta prueba fue realizada entre las 11:40am y 12:30m con el fin de obtener la mayor cantidad de radiación directa y al mejor ángulo de inclinación. La grafica que se obtuvo de la descarga de la batería en el tiempo fue la siguiente, resaltando que la batería se descargó de 12,4 Volts hasta 10Volts.

Figura 132. Gráfico de descarga de la batería Prueba # 4



En la figura 129 se observan dos aspectos muy importantes a tener en cuenta, el primero y el cual se ve a simple vista es el beneficio en términos de tiempo que presta el arreglo fotovoltaico para el vuelo del aeromodelo, con el cálculo realizado se determinó que es de un 39 % de beneficio y el segundo aspecto notorio es que durante el vuelo cuando se realizan cambios de aceleración, se observa que en la prueba sin celdas la descarga que sufre la batería es más abrupta que la descarga que sufre esta misma batería utilizando las celdas, esto se debe a que mientras la batería se descarga debido al consumo del motor, al mismo tiempo se está cargando debido a la electricidad que le entrega el arreglo fotovoltaico.

Figura 134. Gráfico de corriente generada por las celdas solares durante la Prueba # 4



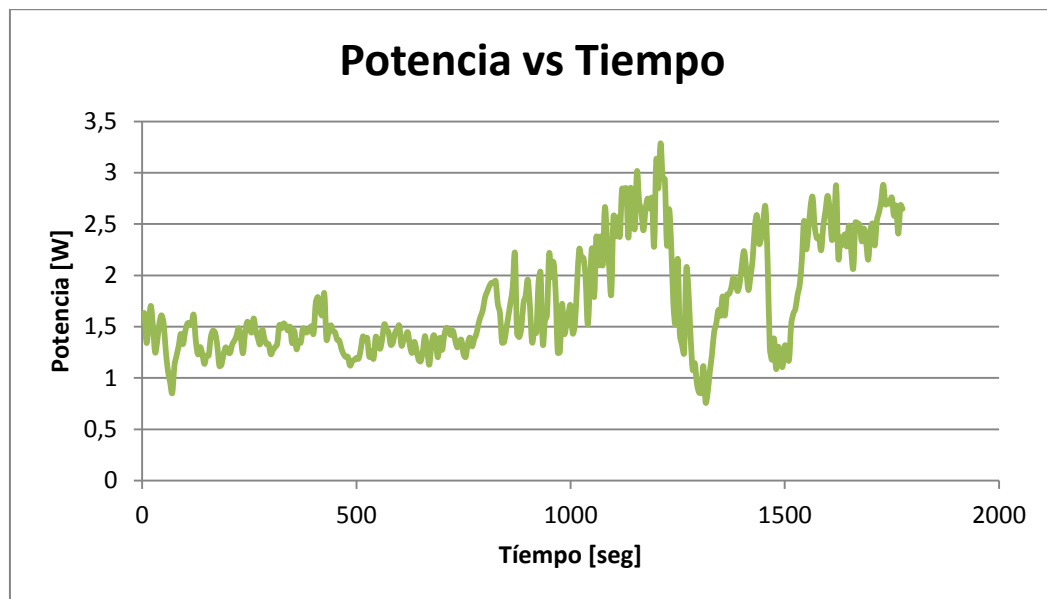
Fuente: Los Autores

En la Figura 130 se observa el comportamiento de la corriente generada por las celdas fotovoltaicas a lo largo de la prueba. Como se puede apreciar en el principio de la prueba de igual forma que en las demás la corriente se encuentra

limitada por la carga de la batería, si la batería esta con su máxima carga la corriente producida será mínima, después de un tiempo de vuelo la batería comienza a descargarse y por ende la corriente comienza a aumentar

Hay que tener en cuenta que durante el vuelo la incidencia del sol sobre las celdas va variando en todo momento es por esto que se presentan cambios bruscos en la corriente y otra situación que se presento fue el hecho que terminando la prueba la radiación solar disminuyo debido al paso esporádico de algunas nubes. Respecto a la potencia generada por el sistema fotovoltaico se obtuvo la siguiente gráfica.

Figura 135. Suministro de Potencia durante la Prueba # 4



Fuente: Los Autores

Debido a la variación de la corriente expuesta con anterioridad y la descargas abruptas generadas por las aceleraciones necesarias para el vuelo, el grafico de potencia nos muestra una variación entre 1 Watt en los momentos críticos, hasta de 3,3 Watts en los momentos con mejores condiciones.

Figura 136. Preparación del aeromodelo previa al vuelo.



Fuente: Los Autores

Relacion Costo Beneficio.

Para la realización de la relacion costo beneficio se debe tener en cuenta cual fue el costo inicial o la inversion necesaria para llevar a cabo este proyecto y cual es el beneficio brindado por el sistema de generacion energetica a base de celdas fotovoltaicas.

Valor / Celda: \$ 70.000 COP

Cantidad: 6 celdas

Valor Total: \$420.000 COP

Promedio de potencia generada del arreglo: 2,2 Watts

Área total Utilizada: 1458 cm² / 0,1458 m²

$$\frac{\text{Costo}}{\text{Beneficio}} = \frac{\text{Valor del Sistema}}{\text{Energia Producida}}$$

$$\frac{\text{Costo}}{\text{Beneficio}} = \frac{\$420.000}{2.2 \text{ Watts}} = 190.909 \frac{\$}{\text{Watts}}$$

Relación Potencia Generada por Área.

$$\frac{\text{Potencia}}{\text{Area}} = \frac{\text{Potencia Promedio del Arreglo}}{\text{Area Utilizada por el Arreglo}}$$

$$\frac{\text{Potencia}}{\text{Area}} = \frac{2.2 \text{ Watts}}{0.1458 \text{ m}^2} = 15.089 \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2}$$

De esta relación se observa que la potencia generada por unidad de área es bastante alta y podría llegar a obtenerse un vuelo autónomo con una suficiente cantidad de celdas fotovoltaicas.

CONCLUSIONES

- Se contribuyó con el avance, investigación e innovación de las nuevas tecnologías basadas en las energías renovables, por medio del desarrollo y construcción de un sistema de generación energética a base de celdas fotovoltaicas flexibles de alto rendimiento, esto aplicado al aeromodelismo con el fin de ver el beneficio del uso de estas celdas en términos de eficiencia de vuelo.
- Se implementó un sistema de adquisición de datos para el monitoreo y control del consumo energético del aeromodelo tipo Spirit mediante el software Arduino y hardware de transmisión de datos: módulos Xbee Pro (Transmisión de datos inalámbricos en tiempo real), permitiendo evaluar en tiempo real cual es la incidencia del uso o no de celdas fotovoltaicas en aeromodelismo.
- Los sistemas fotovoltaicos presentan un reducido impacto ambiental, respecto a las tecnologías que emplean combustibles fósiles. Uno de los principales beneficios de esta tecnología es la reducción de emisiones asociadas con la producción de la electricidad. Estas emisiones incluyen los gases de efecto invernadero y aquellos que producen la lluvia acida de las plantas que producen combustibles fósiles y la radioactividad asociada con el ciclo de combustible nuclear.
- Se demuestra una innovación en el uso de materiales asequibles y de fácil manipulación para la construcción de este tipo de aparatos y aeronaves para aplicaciones civiles.
- Los tiempos de duración de la pruebas 1 y 2 (Tiempos de descarga) fueron de 45 minutos 17 segundos y 1 hora 5 minutos 32 segundos respectivamente. En

las cuales la prueba # 1 no implica el uso del sistema de generación energética de celdas fotovoltaicas, mientras que la prueba # 2 si hace uso de éste. La prueba # 2 fue realizada el Martes 24 de Julio, día soleado con una irradiación promedio de 756 W/m^2 .

- Las pruebas desarrolladas en tierra (Pruebas estáticas), dieron como resultado un incremento en la eficiencia del consumo de energía, reflejado en el aumento del tiempo de descarga de la batería, de un 45,5%. Este resultado se obtuvo de la comparación realizada entre las pruebas 1 y 2 de la presente investigación, en las cuales se descarga la batería de 1000mAh del aeromodelo tipo Spirit desde 12,4 V hasta 10 V, manteniendo constante la velocidad del motor y los demás parámetros que involucran la descarga del avión durante ambas pruebas.
- Los tiempos de duración de las pruebas 3 y 4 (Tiempos de descarga) fueron de 23 minutos 32 segundos y 32 minutos 25 segundos respectivamente. En las cuales la prueba # 3 no implica el uso del sistema de generación energética de celdas fotovoltaicas, mientras que la prueba # 4 si hace uso de éste. Ambas pruebas fueron realizadas el jueves 9 de agosto, día soleado con una irradiación promedio de 730 W/m^2 . El vuelo fue realizado en el voladero ubicado en la vereda de Acapulco del municipio de Floridablanca, el piloto que realizó los vuelos fue Marnix Van Geert.
- Las pruebas desarrolladas en aire (Vuelos), dieron como resultado un incremento en la eficiencia del consumo de energía, reflejado en el aumento del tiempo de descarga de la batería, de un 39,10%. Este resultado se obtuvo de la comparación realizada entre las pruebas 3 y 4 de la presente investigación, en las cuales se descarga la batería de 1000mAh del aeromodelo tipo Spirit desde 12,4 V hasta 10 V. Las dos pruebas se realizaron

sin un régimen de velocidad establecido, es decir, acelerando y desacelerando dependiendo de las exigencias del vuelo.

- Por último, mediante la presente investigación se logró demostrar el beneficio que puede llegar a brindar el uso de energías renovables en los diversos campos de la ingeniería y del diario vivir, logrando así un mayor aprovechamiento de la energía y la conservación de los recursos naturales y del medio ambiente.

RECOMENDACIONES

- El uso de aeromodelos es de mucho cuidado, un mal uso podría llevar a algún tipo de accidente, por esto se recomienda tener la ayuda de algún experto.
- Se recomienda realizar un correcto uso del peso y balance antes del vuelo, con el fin de evitar problemas de estabilidad dinámica.
- Para la correcta interpretación de los datos obtenidos es necesario tener puntos de comparación y un experto que sepa analizar estos resultados.
- La Universidad Industrial de Santander debe actuar como motor que apoye este tipo de tecnologías potenciando la utilización de este tipo de energías en las instalaciones.
- Seguir con la continua investigación en el campo de las energías renovables, con el fin de mejorar esta tecnología día a día.

BIBLIOGRAFÍA

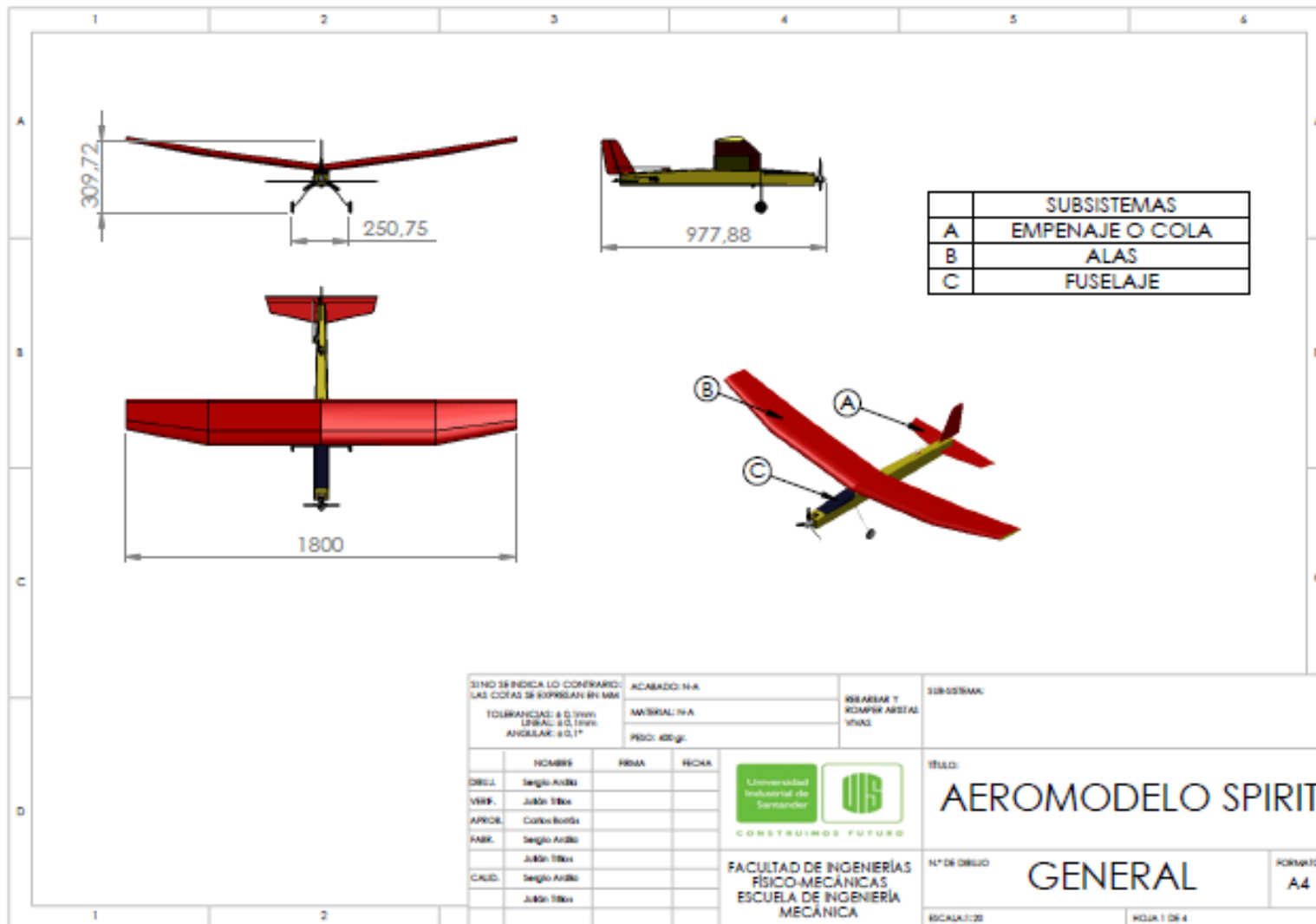
- CENSOLAR. Energía solar (Sistemas Fotovoltaicos). Madrid: Progensa, 193. 254p. [1]
- INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES Y UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA. Atlas de radiación solar en Colombia. Bogotá: Casa editorial de Colombia, 2005. 175p. [2]
- JAIMES, Miguel. Aerodinámica Fácil: Construye y Vuela tu Propia Nave. Bucaramanga: Sic, 2006. 155P. [3]
- MERTENS, Robert. Photovoltaics: Present reality and future prospects, en adadvanced technology assessment systems. New York: United Nations, May 2000. 7p. [4]
- PÁEZ, Edison y VILLABONA, Álvaro. Entrenador de Celdas Fotovoltaicas. Tesis de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2004. 205P. [5]
- PANTOJA, José y VIDAL, Jorge. Diseño, construcción y prueba en vuelo de un aeromodelo remoto (RPV) para la toma de datos visuales en tiempo real. Tesis de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2009. 197P. [6]
- RODRIGUEZ G, Humberto. Estudio del régimen del brillo solar en Colombia. Bogotá: U. Nacional, 1990. 147p. [7]
- ANEXOS.....238

Enlaces Complementarios:

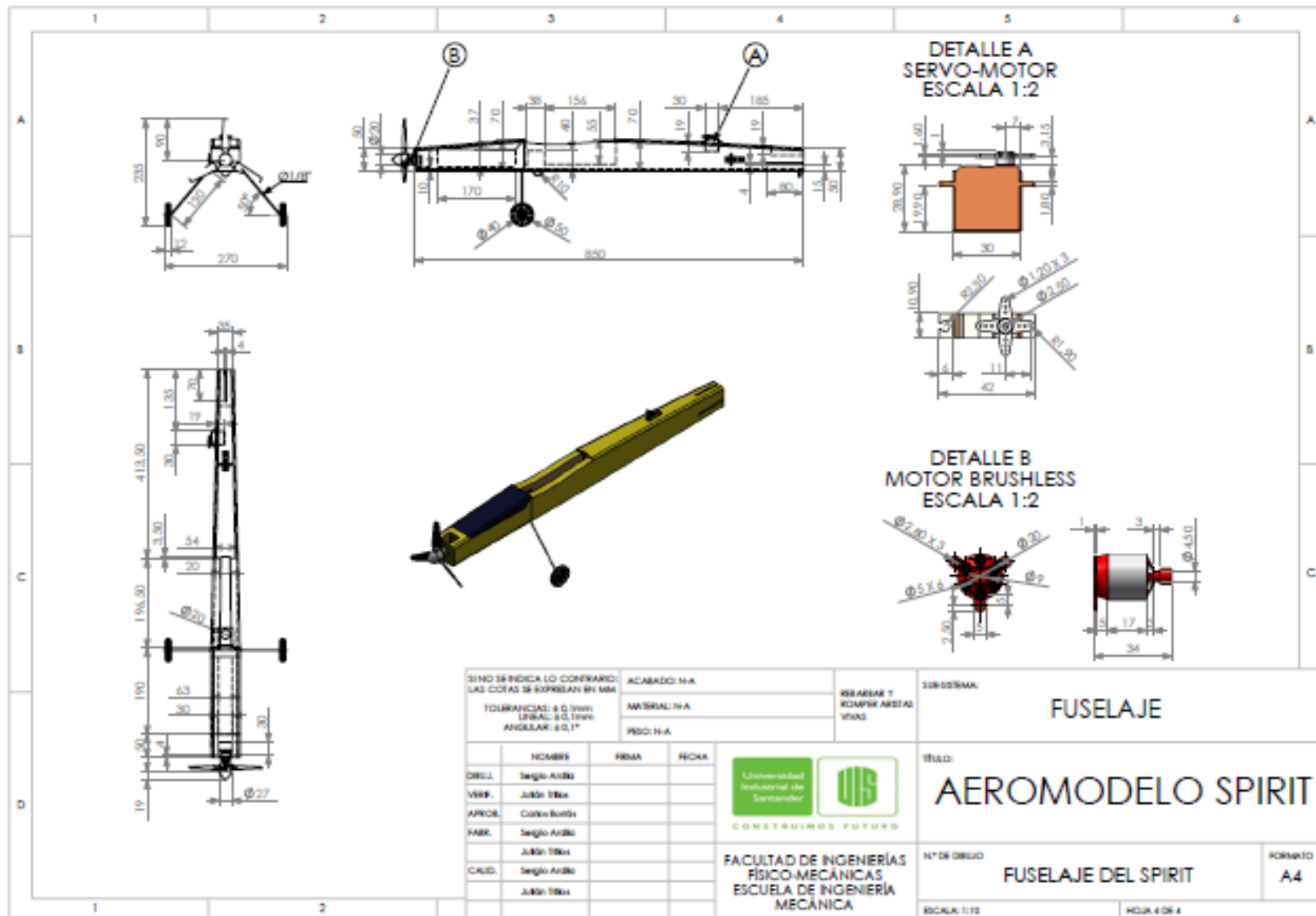
- www.hobbyking.com
- <http://www.celdassolaresflexibles.com/index.php>
- <http://www.rcmaterial.com/pdfs/LipoManualES.pdf>

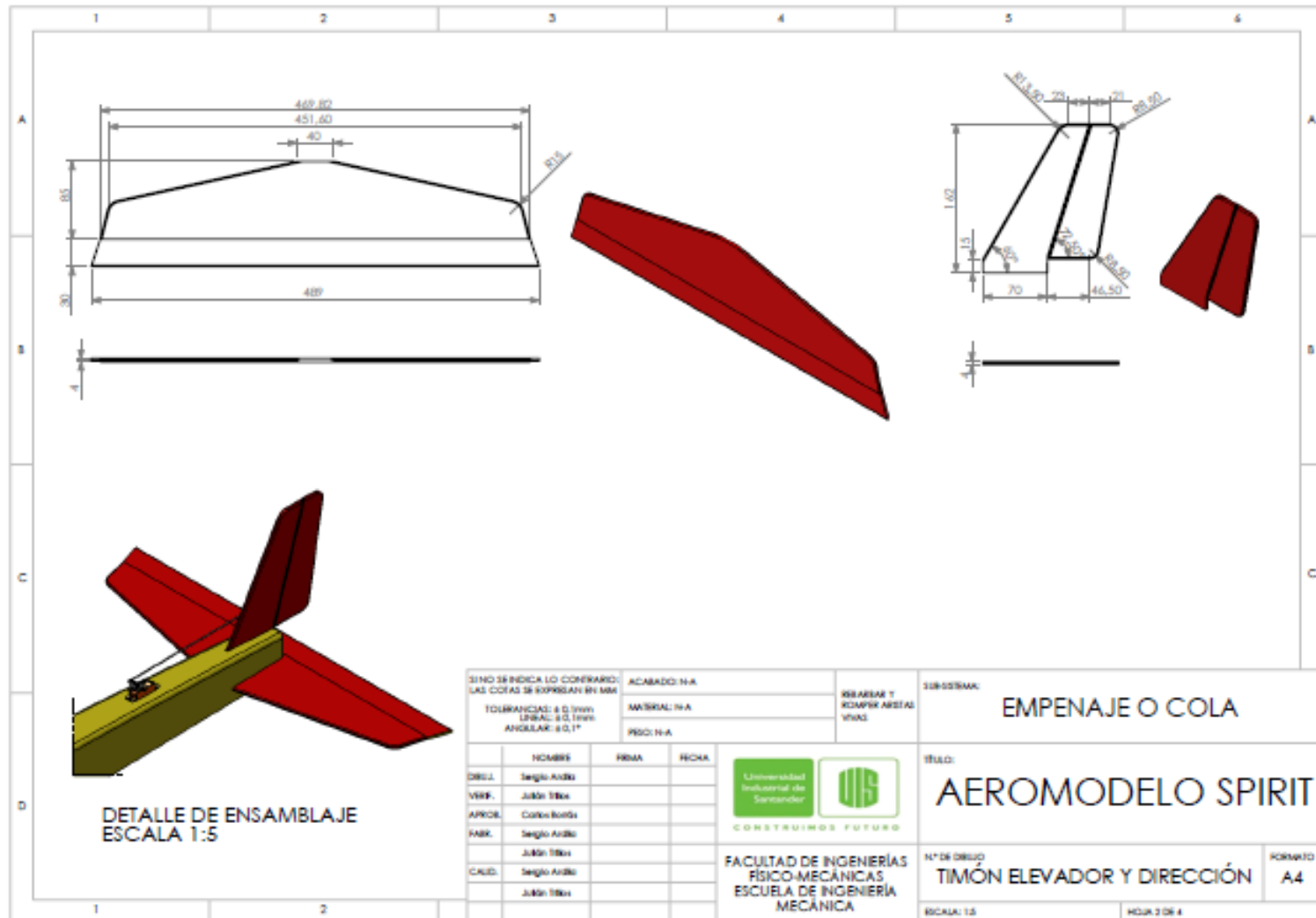
ANEXOS

**ANEXO A: PLANOS GENERALES DE DISEÑO DE UN AEROMODELO TIPO
SPIRIT**



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO: N.A.		REBARBAR Y CORRER ARISTAS VIVAS		SUB-DIVISIÓN:		
TOLERANCIAS: ± 0.1mm LINEAL: ± 0.1mm ANGULAR: ± 0.1°		MATERIAL: N.A.		PESO: 400g.		TÍTULO:		
	NOMBRE	FECHA	FECHA	 CONSTRUIMOS FUTURO		TÍTULO:		
DISEÑO	Sergio Ardito					AEROMODELO SPIRIT		
VUELO	Jairo Torres					N.º DE DISEÑO		
APROB.	Carlos Borda					GENERAL		FORMATO
FABR.	Sergio Ardito					A4		
CALED.	Sergio Ardito			FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		ESCALA: 1:20	HOJA 1 DE 4	





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			ACABADO: N/A	REVISAR Y COMPROBAR VÍAS	SISTEMA: EMPEÑAJE O COLA	
TOLERANCIAS: ± 0.1mm LINEAL: ± 0.1mm ANGULAR: ± 0.1°			MATERIAL: N/A		TÍTULO: AEROMODELO SPIRIT	
	NOMBRE	PRIMA	FECHA	 CONSTRUIENDO FUTURO	FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
DIRJL	Segundo Andrés				N° DE DISEÑO: TIMÓN ELEVADOR Y DIRECCIÓN	
VNRF	Julián Tilly				FORMATO: A4	
APROB	Carlos Ronda				ESCALA: 1:5	
FABR	Segundo Andrés				HOJA 2 DE 4	
CAUD	Segundo Andrés					

**ANEXO B: ELABORACIÓN Y MANEJO DEL PROGRAMA DE SENSADO DE
VOLTAJE Y CORRIENTE DEL SISTEMA**

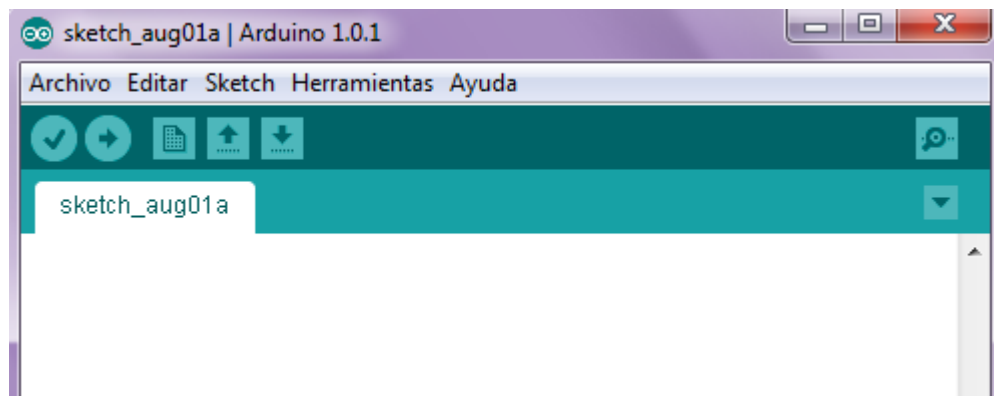
Desarrollo del programa y manejo de los sensores de voltaje y corriente.

Básicamente lo que se realizó en esta parte fue el desarrollo del programa que se iba a utilizar para cargárselo a la tarjeta ARDUINO y que esta se encargara de recibir las señales por parte de los sensores y posteriormente ser enviadas a la base en tierra por parte de los módulos Xbee.

Como se dijo con anterioridad se trabajó con el software Arduino Projects, un software capaz de hacer una gran cantidad de acciones, pero en este caso específico fue utilizado únicamente para medir la corriente producida por las celdas y el voltaje o carga de la batería durante los diferentes momentos de vuelo, y con estos datos poder realizar una gráfica que nos muestre el comportamiento y el consumo de energía de la aeronave en las etapas de vuelo.



Se abre el programa Arduino Versión 1.0.1 el cual mostrara después de cargar por completo la interfaz que se debe utilizar para la programación deseada.



CÓDIGO DEL PROGRAMA A UTILIZAR.

```
const int analogVoltaje = A1; // Pin análogo lectura de Voltaje
const int analogCorriente = A2; // Pin de lectura de corriente
float sensorVoltaje = 0; // Lectura en el Pin de Volta
float sensorcorriente = 0; // Lectura Sensor de Corriente
float Volt; //Voltaje entregado por las celdas (mismo de la batería)
float Corriente; // Corriente entregada por el arreglo fotovoltaico

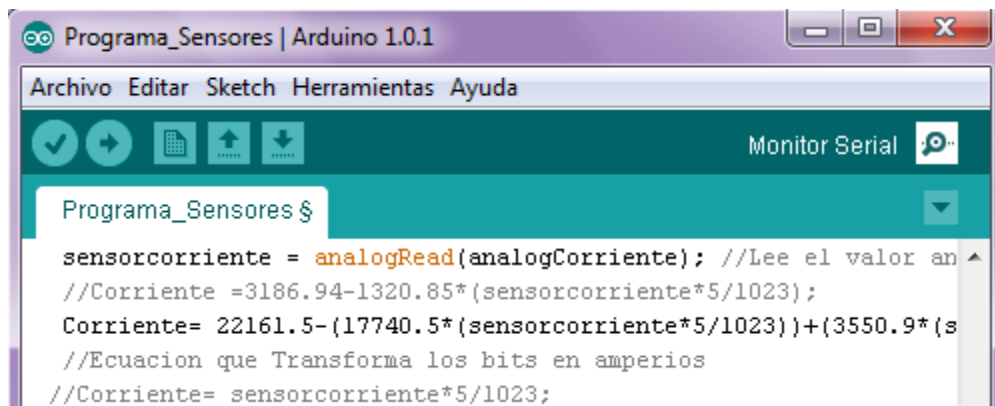
void setup() {
  // inicializa comunicación serial a 9600 Baudios:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  sensorVoltaje = analogRead(analogVoltaje); //Lee el valor analogo en pin A1.
  Volt= 4.1104*(sensorVoltaje*5/1023)+0.156-0.5; // Ecuacion que Transforma los bits a Voltios.
  sensorcorriente = analogRead(analogCorriente); //Lee el valor analogo en el pin A2
  Corriente =4314.23-1733.99*(sensorcorriente*5/1023);
  //Ecuacion que Transforma los bits en amperios
  //Corriente= sensorcorriente*5/1023;

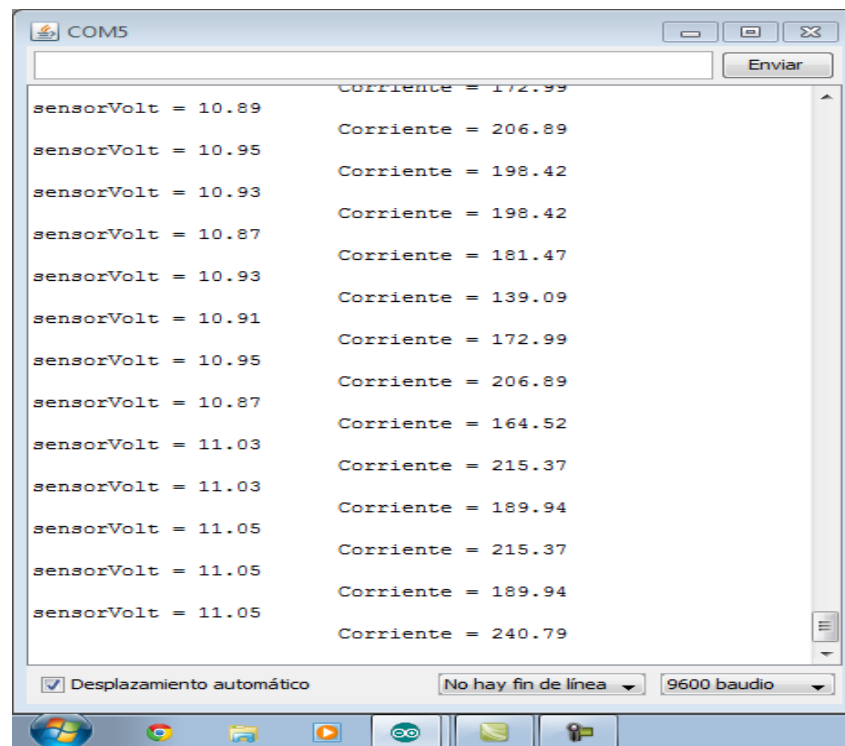
  // imprime los resultados al monitor serial:
  Serial.print("sensorVolt = ");
  Serial.println(Volt);
  Serial.print("          Corriente = ");
  Serial.println(Corriente);

  // Hace esperar 5 segundos antes de cada pulso para medir
  delay(5000);
}
```

Para poder observar los resultados obtenidos en la medición y cómo va el comportamiento de la aeronave en la figura a continuación se debe dirigir a la esquina superior derecha en la parte que muestra el “Monitor Serial” se le da click e inmediatamente muestra una pantalla en la cual cada 5 segundos se estará imprimiendo los valores de corriente y voltaje y así poder monitorear el sistema energético.



```
Programa_Sensores $
sensorcorriente = analogRead(analogCorriente); //Lee el valor an
//Corriente =3186.94-1320.85*(sensorcorriente*5/1023);
Corriente= 22161.5-(17740.5*(sensorcorriente*5/1023))+(3550.9*(s
//Ecuacion que Transforma los bits en amperios
//Corriente= sensorcorriente*5/1023;
```



```
COM5
sensorVolt = 10.89      Corriente = 172.99
sensorVolt = 10.95      Corriente = 206.89
sensorVolt = 10.93      Corriente = 198.42
sensorVolt = 10.87      Corriente = 198.42
sensorVolt = 10.93      Corriente = 181.47
sensorVolt = 10.91      Corriente = 139.09
sensorVolt = 10.95      Corriente = 172.99
sensorVolt = 10.87      Corriente = 206.89
sensorVolt = 10.87      Corriente = 164.52
sensorVolt = 11.03      Corriente = 215.37
sensorVolt = 11.03      Corriente = 189.94
sensorVolt = 11.05      Corriente = 215.37
sensorVolt = 11.05      Corriente = 189.94
sensorVolt = 11.05      Corriente = 240.79
```

**ANEXO C: TABLAS CON LOS DATOS DE LA HORA, RADIACIÓN DIRECTA Y
RADIACIÓN DIFUSA REGISTRADOS EN FEBRERO DE 2012 EN LA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, SEDE BUCARAMANGA.**

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
10:19:00	781.67	183.64
10:20:00	753.19	175.98
10:21:00	771.21	176.75
10:22:00	799.95	180.06
10:23:00	791.80	181.52
10:24:00	503.07	138.14
10:25:00	600.91	153.20
10:26:00	776.20	178.23
10:27:00	796.21	186.16
10:28:00	557.20	152.93
10:29:00	440.50	148.74
10:30:00	606.48	184.00
10:31:00	592.96	188.88
10:32:00	886.83	232.25
10:33:00	886.57	222.42
10:34:00	752.46	184.92
10:35:00	628.21	150.78
10:36:00	766.23	161.17
10:37:00	773.20	160.07
10:38:00	788.02	164.27
10:39:00	785.54	164.97
10:40:00	790.85	164.69
10:41:00	807.87	163.81
10:42:00	814.18	161.21
10:43:00	828.03	161.52
10:44:00	845.72	162.72
10:45:00	857.60	162.48
10:46:00	857.98	161.50
10:47:00	862.49	162.53
10:48:00	866.83	164.19
10:49:00	871.67	166.80
10:50:00	881.34	170.36
10:51:00	889.24	175.14
10:52:00	885.21	173.27
10:53:00	872.06	168.17
10:54:00	872.32	169.91
10:55:00	875.35	171.39
10:56:00	876.11	173.11

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
10:57:00	874.14	172.54
10:58:00	868.63	171.02
10:59:00	865.26	173.96
11:00:00	868.02	175.36
11:01:00	881.67	179.79
11:02:00	894.35	185.43
11:03:00	892.07	187.56
11:04:00	887.96	190.97
11:05:00	881.88	191.43
11:06:00	394.86	119.56
11:07:00	243.90	104.56
11:08:00	347.77	124.06
11:09:00	603.38	166.14
11:10:00	900.18	206.09
11:11:00	693.32	169.67
11:12:00	838.98	197.20
11:13:00	884.19	203.23
11:14:00	891.94	206.28
11:15:00	910.46	223.55
11:16:00	955.38	248.66
11:17:00	982.97	261.47
11:18:00	999.79	263.95
11:19:00	1017.02	270.34
11:20:00	1023.25	276.15
11:21:00	1032.83	280.91
11:22:00	1045.15	281.08
11:23:00	1044.43	274.81
11:24:00	1031.38	256.43
11:25:00	1016.57	239.28
11:26:00	1011.75	234.12
11:27:00	1029.26	244.71
11:28:00	1021.67	245.06
11:29:00	754.46	197.19
11:30:00	995.80	235.03
11:31:00	766.76	208.88
11:32:00	437.91	180.55
11:33:00	468.25	196.02
11:34:00	385.10	195.72

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
11:35:00	524.92	222.56
11:36:00	608.28	229.98
11:37:00	413.29	193.04
11:38:00	294.46	165.38
11:39:00	238.32	139.68
11:40:00	204.23	122.56
11:41:00	189.51	119.06
11:42:00	183.18	119.14
11:43:00	192.02	122.65
11:44:00	210.09	134.42
11:45:00	219.78	136.87
11:46:00	223.23	132.72
11:47:00	305.36	141.12
11:48:00	282.75	142.81
11:49:00	231.95	133.30
11:50:00	209.68	121.98
11:51:00	196.08	120.66
11:52:00	196.20	117.11
11:53:00	184.22	109.86
11:54:00	182.19	113.55
11:55:00	196.58	122.09
11:56:00	240.45	141.34
11:57:00	318.60	157.33
11:58:00	541.49	192.95
11:59:00	711.64	212.85
12:00:00	669.24	194.22
12:01:00	342.86	134.24
12:02:00	562.60	166.57
12:03:00	951.13	225.45
12:04:00	795.58	210.03
12:05:00	281.65	127.25
12:06:00	193.74	111.77
12:07:00	199.39	110.20
12:08:00	220.82	116.58
12:09:00	227.47	127.51
12:10:00	234.03	136.69
12:11:00	240.91	144.87
12:12:00	241.75	152.77

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
12:13:00	250.47	148.73
12:14:00	287.27	149.06
12:15:00	809.58	233.09
12:16:00	1058.44	267.47
12:17:00	688.49	204.69
12:18:00	590.47	189.85
12:19:00	325.05	153.67
12:20:00	639.33	205.46
12:21:00	953.94	238.91
12:22:00	441.09	148.42
12:23:00	865.04	222.45
12:24:00	1014.08	252.36
12:25:00	1021.88	260.80
12:26:00	1017.52	269.75
12:27:00	453.17	174.66
12:28:00	195.81	121.82
12:29:00	173.77	108.19
12:30:00	163.79	96.65
12:31:00	165.25	87.84
12:32:00	159.29	84.19
12:33:00	153.22	90.30
12:34:00	144.59	86.49
12:35:00	149.84	88.91
12:36:00	157.16	92.09
12:37:00	156.23	88.43
12:38:00	172.00	95.69
12:39:00	226.78	115.19
12:40:00	371.62	138.97
12:41:00	982.33	242.05
12:42:00	962.82	243.52
12:43:00	307.75	133.38
12:44:00	215.54	111.60
12:45:00	216.81	109.49
12:46:00	273.45	119.45
12:47:00	224.41	104.59
12:48:00	467.76	130.70
12:49:00	185.10	85.00
12:50:00	169.66	87.34

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
12:51:00	173.19	90.07
12:52:00	163.26	86.87
12:53:00	160.59	91.22
12:54:00	173.76	98.61
12:55:00	241.91	119.98
12:56:00	865.66	226.19
12:57:00	1061.60	277.01
12:58:00	1064.78	292.48
12:59:00	1062.18	296.50
13:00:00	1048.57	289.24
13:01:00	1039.38	270.38
13:02:00	1027.16	245.14
13:03:00	1007.06	225.71
13:04:00	975.11	214.34
13:05:00	955.91	209.37
13:06:00	949.14	208.47
13:07:00	957.86	213.72
13:08:00	976.43	223.04
13:09:00	606.29	167.89
13:10:00	268.36	129.50
13:11:00	263.58	141.61
13:12:00	232.06	139.47
13:13:00	222.42	127.80
13:14:00	196.66	103.75
13:15:00	172.87	91.31
13:16:00	164.11	89.30
13:17:00	160.05	90.78
13:18:00	175.76	99.70
13:19:00	217.00	113.24
13:20:00	321.40	126.99
13:21:00	814.26	206.35
13:22:00	456.13	135.53
13:23:00	327.93	102.74
13:24:00	135.61	64.23
13:25:00	110.92	56.38
13:26:00	99.59	51.67
13:27:00	99.85	55.11
13:28:00	125.72	68.29

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
13:29:00	321.01	117.46
13:30:00	734.02	203.30
13:31:00	234.26	139.76
13:32:00	610.28	206.94
13:33:00	1009.15	279.68
13:34:00	1029.96	293.36
13:35:00	1019.58	297.15
13:36:00	1005.59	298.04
13:37:00	987.80	276.58
13:38:00	961.14	250.62
13:39:00	926.88	224.41
13:40:00	900.80	207.57
13:41:00	882.26	202.46
13:42:00	715.49	181.75
13:43:00	258.45	131.35
13:44:00	820.37	256.10
13:45:00	939.77	277.79
13:46:00	918.23	264.15
13:47:00	884.20	242.38
13:48:00	403.44	139.35
13:49:00	163.65	86.13
13:50:00	136.43	72.46
13:51:00	138.38	71.40
13:52:00	141.46	77.15
13:53:00	166.66	83.43
13:54:00	815.08	204.61
13:55:00	503.16	153.15
13:56:00	299.81	129.10
13:57:00	208.42	125.17
13:58:00	596.12	204.37
13:59:00	718.13	219.29
14:00:00	250.92	122.73
14:01:00	730.44	218.79
14:02:00	910.56	260.54
14:03:00	481.53	182.49
14:04:00	229.40	135.15
14:05:00	226.62	117.49
14:06:00	206.53	113.25

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
14:07:00	511.47	179.14
14:08:00	909.36	270.17
14:09:00	623.44	220.99
14:10:00	303.78	158.35
14:11:00	236.50	138.48
14:12:00	211.34	129.62
14:13:00	223.29	131.13
14:14:00	737.70	218.35
14:15:00	854.02	231.69
14:16:00	806.20	231.78
14:17:00	648.56	206.19
14:18:00	427.10	157.90
14:19:00	262.02	124.36
14:20:00	213.75	115.54
14:21:00	339.12	139.16
14:22:00	852.28	253.08
14:23:00	880.72	254.82
14:24:00	864.76	234.19
14:25:00	851.71	231.29
14:26:00	848.28	235.61
14:27:00	828.33	222.24
14:28:00	853.77	223.74
14:29:00	818.45	218.99
14:30:00	764.89	213.25
14:31:00	716.77	218.94
14:32:00	841.78	256.08
14:33:00	856.66	244.06
14:34:00	827.01	225.49
14:35:00	806.64	218.88
14:36:00	794.78	210.21
14:37:00	788.71	204.30
14:38:00	801.00	212.94
14:39:00	801.11	219.59
14:40:00	622.65	194.98
14:41:00	743.09	220.79
14:42:00	796.33	225.25
14:43:00	792.06	219.40
14:44:00	742.34	214.03

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
14:45:00	802.62	237.35
14:46:00	805.63	249.37
14:47:00	485.06	190.61
14:48:00	340.91	161.80
14:49:00	593.19	191.10
14:50:00	218.14	122.44
14:51:00	173.28	109.61
14:52:00	163.49	100.43
14:53:00	175.00	92.19
14:54:00	689.65	195.72
14:55:00	551.82	171.33
14:56:00	182.70	102.78
14:57:00	213.05	101.44
14:58:00	379.72	134.52
14:59:00	168.57	113.14
15:00:00	171.85	115.54
15:01:00	486.12	177.56
15:02:00	731.32	208.44
15:03:00	717.27	205.87
15:04:00	362.73	126.36
15:05:00	149.73	86.34
15:06:00	135.59	83.22
15:07:00	356.86	120.17
15:08:00	655.52	176.64
15:09:00	671.80	185.19
15:10:00	651.03	184.91
15:11:00	632.56	174.08
15:12:00	593.56	158.43
15:13:00	574.60	150.51
15:14:00	523.38	139.74
15:15:00	467.81	128.80
15:16:00	591.22	152.96
15:17:00	600.96	159.82
15:18:00	590.90	160.73
15:19:00	579.91	150.82
15:20:00	573.44	154.12
15:21:00	574.14	169.16
15:22:00	589.73	172.27

Hora	Radiación total [W/m ²]	Radiación difusa [W/m ²]
15:23:00	604.45	161.24
15:24:00	583.92	156.28
15:25:00	564.41	155.05
15:26:00	552.95	147.64
15:27:00	551.35	145.60
15:28:00	554.07	151.59
15:29:00	521.46	139.81
15:30:00	539.51	138.51
15:31:00	546.81	145.41
15:32:00	536.14	145.21
15:33:00	532.33	145.58
15:34:00	493.79	138.21
15:35:00	545.64	148.98
15:36:00	554.91	158.08
15:37:00	449.44	139.78
15:38:00	151.65	81.29
15:39:00	147.08	83.13

**ANEXO D: DATOS TOMADOS DE LAS PRUEBAS RESPECTIVAS EN DÍA
SOLEADO, CON EL USO Y SIN EL USO DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS**

**Datos Prueba # 1Sin
celdas en Tierra**

<i>Tiempo [s]</i>	<i>Voltaje [V]</i>
0	12,47
5	12,39
10	12,37
15	12,33
20	12,31
25	12,31
30	12,25
35	12,29
40	12,21
45	12,29
50	12,21
55	12,25
60	12,27
65	12,25
70	12,23
75	12,19
80	12,23
85	12,23
90	12,19
95	12,15
100	12,21
105	12,19
110	12,15
115	12,19
120	12,17
125	12,13
130	12,15
135	12,17
140	12,09
145	12,09
150	12,15
155	12,13
160	12,13
165	12,11
170	12,09
175	12,11

180	12,07
185	12,09
190	12,11
195	12,07
200	12,07
205	12,09
210	12,07
215	12,05
220	12,05
225	12,07
230	12,01
235	12,03
240	11,99
245	12,05
250	12,03
255	12,01
260	11,97
265	12,03
270	11,97
275	11,97
280	12,01
285	12,01
290	11,99
295	11,99
300	12,01
305	12,01
310	11,97
315	11,93
320	11,95
325	11,97
330	11,97
335	11,91
340	11,93
345	11,95
350	11,95
355	11,93
360	11,93
365	11,93
370	11,91
375	11,87

380	11,89
385	11,81
390	11,87
395	11,87
400	11,85
405	11,79
410	11,81
415	11,83
420	11,83
425	11,81
430	11,79
435	11,81
440	11,81
445	11,79
450	11,79
455	11,75
460	11,77
465	11,75
470	11,71
475	11,75
480	11,71
485	11,73
490	11,75
495	11,75
500	11,73
505	11,71
510	11,71
515	11,71
520	11,71
525	11,71
530	11,71
535	11,71
540	11,69
545	11,69
550	11,69
555	11,67
560	11,63
565	11,69
570	11,63
575	11,67

580	11,65
585	11,67
590	11,63
595	11,63
600	11,65
605	11,65
610	11,65
615	11,63
620	11,65
625	11,65
630	11,65
635	11,65
640	11,61
645	11,61
650	11,61
655	11,63
660	11,61
665	11,55
670	11,61
675	11,61
680	11,61
685	11,59
690	11,61
695	11,59
700	11,59
705	11,53
710	11,59
715	11,55
720	11,59
725	11,57
730	11,57
735	11,53
740	11,57
745	11,57
750	11,57
755	11,53
760	11,55
765	11,51
770	11,55
775	11,55

780	11,51
785	11,51
790	11,53
795	11,51
800	11,53
805	11,53
810	11,53
815	11,51
820	11,49
825	11,51
830	11,51
835	11,47
840	11,43
845	11,51
850	11,49
855	11,49
860	11,49
865	11,49
870	11,47
875	11,47
880	11,45
885	11,47
890	11,45
895	11,41
900	11,43
905	11,47
910	11,45
915	11,45
920	11,43
925	11,45
930	11,39
935	11,39
940	11,43
945	11,39
950	11,43
955	11,43
960	11,41
965	11,43
970	11,43
975	11,41

980	11,39
985	11,39
990	11,41
995	11,35
1000	11,39
1005	11,39
1010	11,37
1015	11,39
1020	11,39
1025	11,39
1030	11,37
1035	11,35
1040	11,37
1045	11,39
1050	11,37
1055	11,37
1060	11,37
1065	11,37
1070	11,33
1075	11,35
1080	11,33
1085	11,35
1090	11,29
1095	11,35
1100	11,35
1105	11,35
1110	11,33
1115	11,35
1120	11,35
1125	11,33
1130	11,29
1135	11,33
1140	11,27
1145	11,29
1150	11,33
1155	11,27
1160	11,33
1165	11,31
1170	11,31
1175	11,29

1180	11,31
1185	11,29
1190	11,27
1195	11,27
1200	11,29
1205	11,29
1210	11,27
1215	11,29
1220	11,23
1225	11,23
1230	11,27
1235	11,23
1240	11,29
1245	11,27
1250	11,27
1255	11,25
1260	11,27
1265	11,23
1270	11,25
1275	11,27
1280	11,27
1285	11,25
1290	11,21
1295	11,23
1300	11,25
1305	11,25
1310	11,27
1315	11,21
1320	11,25
1325	11,25
1330	11,23
1335	11,23
1340	11,23
1345	11,23
1350	11,23
1355	11,21
1360	11,23
1365	11,17
1370	11,23
1375	11,19

1380	11,23
1385	11,17
1390	11,17
1395	11,21
1400	11,19
1405	11,21
1410	11,19
1415	11,19
1420	11,17
1425	11,19
1430	11,19
1435	11,19
1440	11,17
1445	11,19
1450	11,19
1455	11,13
1460	11,15
1465	11,17
1470	11,15
1475	11,15
1480	11,19
1485	11,15
1490	11,15
1495	11,17
1500	11,15
1505	11,17
1510	11,15
1515	11,17
1520	11,17
1525	11,15
1530	11,17
1535	11,11
1540	11,17
1545	11,11
1550	11,17
1555	11,15
1560	11,13
1565	11,13
1570	11,15
1575	11,15

1580	11,09
1585	11,11
1590	11,09
1595	11,13
1600	11,13
1605	11,15
1610	11,15
1615	11,13
1620	11,11
1625	11,13
1630	11,07
1635	11,13
1640	11,11
1645	11,13
1650	11,11
1655	11,07
1660	11,07
1665	11,11
1670	11,07
1675	11,11
1680	11,11
1685	11,11
1690	11,11
1695	11,11
1700	11,11
1705	11,11
1710	11,09
1715	11,09
1720	11,07
1725	11,05
1730	11,11
1735	11,09
1740	11,09
1745	11,07
1750	11,05
1755	11,07
1760	11,09
1765	11,09
1770	11,07
1775	11,09

1780	11,09
1785	11,05
1790	11,05
1795	11,09
1800	11,07
1805	11,01
1810	11,05
1815	11,07
1820	11,07
1825	11,05
1830	11,01
1835	11,03
1840	11,07
1845	11,07
1850	11,01
1855	11,05
1860	11,07
1865	11,05
1870	11,01
1875	11,03
1880	11,05
1885	11,05
1890	11,03
1895	11,01
1900	11,05
1905	11,03
1910	11,05
1915	11,05
1920	11,05
1925	11,05
1930	11,03
1935	11,05
1940	11,01
1945	11,05
1950	11,05
1955	11,03
1960	11,05
1965	11,05
1970	11,03
1975	11,01

1980	10,99
1985	11,01
1990	11,03
1995	10,97
2000	11,03
2005	11,03
2010	11,03
2015	11,01
2020	11,03
2025	10,99
2030	10,97
2035	11,01
2040	11,03
2045	11,03
2050	11,01
2055	10,99
2060	11,03
2065	10,97
2070	10,95
2075	10,99
2080	11,01
2085	11,01
2090	11,01
2095	11,01
2100	10,99
2105	10,99
2110	10,97
2115	10,99
2120	10,99
2125	10,93
2130	10,99
2135	10,99
2140	10,99
2145	10,95
2150	10,97
2155	10,99
2160	10,93
2165	10,95
2170	10,95
2175	10,93

2180	10,97
2185	10,97
2190	10,93
2195	10,97
2200	10,95
2205	10,91
2210	10,95
2215	10,95
2220	10,95
2225	10,91
2230	10,89
2235	10,95
2240	10,95
2245	10,95
2250	10,93
2255	10,89
2260	10,93
2265	10,93
2270	10,93
2275	10,93
2280	10,91
2285	10,91
2290	10,93
2295	10,91
2300	10,89
2305	10,89
2310	10,91
2315	10,89
2320	10,91
2325	10,93
2330	10,89
2335	10,91
2340	10,91
2345	10,89
2350	10,89
2355	10,89
2360	10,87
2365	10,85
2370	10,89
2375	10,89

2380	10,89
2385	10,83
2390	10,87
2395	10,83
2400	10,89
2405	10,87
2410	10,89
2415	10,89
2420	10,89
2425	10,87
2430	10,87
2435	10,87
2440	10,83
2445	10,85
2450	10,85
2455	10,87
2460	10,85
2465	10,85
2470	10,79
2475	10,81
2480	10,81
2485	10,81
2490	10,83
2495	10,83
2500	10,77
2505	10,85
2510	10,83
2515	10,83
2520	10,81
2525	10,81
2530	10,81
2535	10,81
2540	10,79
2545	10,75
2550	10,77
2555	10,75
2560	10,73
2565	10,73
2570	10,73
2575	10,67

2580	10,73
2585	10,69
2590	10,69
2595	10,65
2600	10,67
2605	10,67
2610	10,65
2615	10,63
2620	10,61
2625	10,59
2630	10,59
2635	10,55
2640	10,51
2645	10,48
2650	10,51
2655	10,48
2660	10,46
2665	10,46
2670	10,42
2675	10,4
2680	10,38
2685	10,36
2690	10,34
2695	10,28
2700	10,28
2705	10,24
2710	10,18
2715	10,16
2720	10,14
2725	10,1
2730	10,02
2735	10,02
2740	9,98

Datos Prueba # 2 Con celdas en Tierra

Corriente [mA]	Voltaje [V]	Tiempo [seg]	Potencia [W]
158,4	12,71	0	2,013264
162,2	12,53	5	2,032366
159,3	12,55	10	1,999215
153,7	12,49	15	1,919713
152,9	12,53	20	1,915837
153,8	12,47	25	1,917886
157,4	12,43	30	1,956482
166,7	12,43	35	2,072081
160,1	12,45	40	1,993245
154,1	12,43	45	1,915463
149,9	12,39	50	1,857261
147,2	12,41	55	1,826752
157	12,41	60	1,94837
162,9	12,41	65	2,021589
159,8	12,37	70	1,976726
157,2	12,31	75	1,935132
148,6	12,37	80	1,838182
147,8	12,33	85	1,822374
159,6	12,35	90	1,97106
160,2	12,33	95	1,975266
158,1	12,31	100	1,946211
156,6	12,31	105	1,927746
160,8	12,31	110	1,979448
163,6	12,27	115	2,007372
161,9	12,27	120	1,986513
160,3	12,31	125	1,973293
162,5	12,27	130	1,993875
164,2	12,27	135	2,014734
163,7	12,27	140	2,008599
162,1	12,27	145	1,988967
163,6	12,17	150	1,991012
164,1	12,25	155	2,010225
164,3	12,19	160	2,002817
164,5	12,23	165	2,011835
164,1	12,15	170	1,993815

163,8	12,21	175	1,999998
160	12,19	180	1,9504
157,8	12,15	185	1,91727
157,9	12,15	190	1,918485
158,3	12,19	195	1,929677
157,8	12,17	200	1,920426
158,1	12,13	205	1,917753
157,6	12,13	210	1,911688
156,2	12,13	215	1,894706
155,9	12,11	220	1,887949
155,3	12,07	225	1,874471
162,2	12,11	230	1,964242
164,8	12,11	235	1,995728
164,6	12,05	240	1,98343
164,5	12,11	245	1,992095
165,9	12,09	250	2,005731
166,2	12,09	255	2,009358
165,9	12,07	260	2,002413
165,6	12,05	265	1,99548
166,1	12,05	270	2,001505
166,1	12,07	275	2,004827
165,8	12,07	280	2,001206
165,2	12,03	285	1,987356
170,1	12,07	290	2,053107
170,1	12,03	295	2,046303
170,3	12,05	300	2,052115
172,8	12,03	305	2,078784
173,5	12,05	310	2,090675
173,8	12,03	315	2,090814
174	12,03	320	2,09322
172,3	12,01	325	2,069323
170,3	11,99	330	2,041897
169,4	11,99	335	2,031106
166,6	11,97	340	1,994202
165,8	11,97	345	1,984626
165,4	11,95	350	1,97653
168,7	11,95	355	2,015965
171,4	11,97	360	2,051658
171,2	11,91	365	2,038992
171,1	11,93	370	2,041223

171,9	11,93	375	2,050767
172,5	11,91	380	2,054475
173,1	11,87	385	2,054697
173,3	11,81	390	2,046673
173,8	11,81	395	2,052578
174,9	11,85	400	2,072565
175,6	11,79	405	2,070324
176	11,79	410	2,07504
175,7	11,83	415	2,078531
175,4	11,83	420	2,074982
175	11,77	425	2,05975
174,6	11,73	430	2,048058
175,2	11,81	435	2,069112
175,7	11,81	440	2,075017
175,7	11,79	445	2,071503
175,9	11,77	450	2,070343
178,3	11,73	455	2,091459
180	11,73	460	2,1114
179,5	11,77	465	2,112715
178,3	11,73	470	2,091459
179,2	11,71	475	2,098432
180,6	11,73	480	2,118438
180,9	11,71	485	2,118339
182,2	11,75	490	2,14085
181,3	11,73	495	2,126649
180,1	11,67	500	2,101767
180,1	11,75	505	2,116175
180,3	11,71	510	2,111313
181,8	11,65	515	2,11797
182,5	11,69	520	2,133425
183,4	11,69	525	2,143946
184,3	11,69	530	2,154467
183,8	11,69	535	2,148622
183,4	11,71	540	2,147614
181,9	11,63	545	2,115497
180,7	11,69	550	2,112383
183,2	11,69	555	2,141608
184	11,61	560	2,13624
184,7	11,65	565	2,151755
185,7	11,63	570	2,159691

184,3	11,65	575	2,147095
183,9	11,65	580	2,142435
185,7	11,61	585	2,155977
187,2	11,67	590	2,184624
186,5	11,65	595	2,172725
186	11,65	600	2,1669
186,1	11,65	605	2,168065
186,3	11,65	610	2,170395
185,2	11,65	615	2,15758
184	11,59	620	2,13256
184,8	11,61	625	2,145528
185,6	11,55	630	2,14368
185,1	11,63	635	2,152713
184,4	11,61	640	2,140884
182,2	11,57	645	2,108054
179,5	11,53	650	2,069635
177,3	11,57	655	2,051361
175,6	11,59	660	2,035204
176,3	11,59	665	2,043317
176,8	11,55	670	2,04204
178,1	11,53	675	2,053493
179,8	11,59	680	2,083882
180,5	11,53	685	2,081165
181,2	11,57	690	2,096484
182,1	11,55	695	2,103255
182,7	11,57	700	2,113839
179,4	11,51	705	2,064894
176,7	11,55	710	2,040885
175,2	11,57	715	2,027064
173,7	11,55	720	2,006235
174,5	11,53	725	2,011985
175,3	11,53	730	2,021209
177,4	11,55	735	2,04897
176,9	11,53	740	2,039657
179,5	11,53	745	2,069635
180,4	11,51	750	2,076404
179,4	11,53	755	2,068482
180,9	11,51	760	2,082159
180,9	11,43	765	2,067687
181,6	11,49	770	2,086584

182,1	11,49	775	2,092329
181,9	11,49	780	2,090031
182,4	11,43	785	2,084832
182,9	11,49	790	2,101521
183,6	11,49	795	2,109564
185,1	11,45	800	2,119395
186,2	11,47	805	2,135714
185,9	11,45	810	2,128555
185,1	11,49	815	2,126799
184,7	11,47	820	2,118509
184,4	11,47	825	2,115068
183	11,47	830	2,09901
181,2	11,39	835	2,063868
177,9	11,43	840	2,033397
176,4	11,39	845	2,009196
175,1	11,39	850	1,994389
172,9	11,45	855	1,979705
171,4	11,45	860	1,96253
172,7	11,43	865	1,973961
173,4	11,41	870	1,978494
175,8	11,41	875	2,005878
177,6	11,37	880	2,019312
178,4	11,43	885	2,039112
179,3	11,43	890	2,049399
181,8	11,37	895	2,067066
180,2	11,43	900	2,059686
176,2	11,37	905	2,003394
170,1	11,43	910	1,944243
171,1	11,39	915	1,948829
171,3	11,39	920	1,951107
172,5	11,39	925	1,964775
173,1	11,39	930	1,971609
174,6	11,39	935	1,988694
177,5	11,37	940	2,018175
180,4	11,33	945	2,043932
180,9	11,31	950	2,045979
181,5	11,35	955	2,060025
181,9	11,37	960	2,068203
182,1	11,31	965	2,059551
182,7	11,39	970	2,080953

183,1	11,33	975	2,074523
182,9	11,35	980	2,075915
182,1	11,37	985	2,070477
181,8	11,37	990	2,067066
181,6	11,35	995	2,06116
181,2	11,37	1000	2,060244
180,9	11,31	1005	2,045979
181,8	11,33	1010	2,059794
182,7	11,33	1015	2,069991
182,9	11,33	1020	2,072257
183,1	11,33	1025	2,074523
187,5	11,33	1030	2,124375
189,3	11,31	1035	2,140983
189,1	11,31	1040	2,138721
188,5	11,31	1045	2,131935
190,6	11,27	1050	2,148062
189,7	11,27	1055	2,137919
192,3	11,31	1060	2,174913
194,1	11,31	1065	2,195271
193,6	11,29	1070	2,185744
196,6	11,29	1075	2,219614
195,2	11,27	1080	2,199904
194,7	11,31	1085	2,202057
193,8	11,25	1090	2,18025
193	11,31	1095	2,18283
193	11,27	1100	2,17511
193,2	11,23	1105	2,169636
190,5	11,27	1110	2,146935
189,7	11,27	1115	2,137919
190,1	11,29	1120	2,146229
190,3	11,25	1125	2,140875
190,8	11,23	1130	2,142684
191,4	11,23	1135	2,149422
189,2	11,29	1140	2,136068
187,7	11,27	1145	2,115379
189,1	11,27	1150	2,131157
191,8	11,27	1155	2,161586
190,3	11,27	1160	2,144681
190	11,23	1165	2,1337
188,6	11,25	1170	2,12175

187,2	11,27	1175	2,109744
186	11,25	1180	2,0925
187,3	11,21	1185	2,099633
188,5	11,27	1190	2,124395
187,3	11,25	1195	2,107125
186,9	11,21	1200	2,095149
186,5	11,25	1205	2,098125
186,2	11,25	1210	2,09475
186	11,25	1215	2,0925
186	11,23	1220	2,08878
186	11,23	1225	2,08878
185,9	11,23	1230	2,087657
185,2	11,23	1235	2,079796
184,5	11,23	1240	2,071935
184,2	11,17	1245	2,057514
183,6	11,21	1250	2,058156
183,9	11,21	1255	2,061519
184,1	11,23	1260	2,067443
184,7	11,23	1265	2,074181
185,2	11,21	1270	2,076092
185,9	11,21	1275	2,083939
186,2	11,15	1280	2,07613
186,7	11,21	1285	2,092907
187,2	11,13	1290	2,083536
187,7	11,15	1295	2,092855
188,4	11,19	1300	2,108196
188,9	11,19	1305	2,113791
188,7	11,19	1310	2,111553
188,5	11,17	1315	2,105545
188	11,19	1320	2,10372
187,6	11,17	1325	2,095492
188,7	11,15	1330	2,104005
189,2	11,19	1335	2,117148
190	11,19	1340	2,1261
189,9	11,19	1345	2,124981
189,9	11,13	1350	2,113587
190,3	11,15	1355	2,121845
190,5	11,17	1360	2,127885
190,1	11,17	1365	2,123417
189,6	11,17	1370	2,117832

189,2	11,17	1375	2,113364
190,1	11,17	1380	2,123417
190,2	11,15	1385	2,12073
190,4	11,13	1390	2,119152
190,7	11,09	1395	2,114863
191,2	11,09	1400	2,120408
192,4	11,15	1405	2,14526
192,9	11,11	1410	2,143119
193,2	11,15	1415	2,15418
193,7	11,15	1420	2,159755
194,5	11,11	1425	2,160895
195,1	11,15	1430	2,175365
195,7	11,15	1435	2,182055
196,1	11,15	1440	2,186515
196,5	11,13	1445	2,187045
196,9	11,13	1450	2,191497
197,4	11,09	1455	2,189166
197,7	11,11	1460	2,196447
198,3	11,13	1465	2,207079
197,2	11,13	1470	2,194836
197,6	11,13	1475	2,199288
196,9	11,13	1480	2,191497
196,6	11,13	1485	2,188158
196,1	11,13	1490	2,182593
195,8	11,07	1495	2,167506
195,1	11,13	1500	2,171463
194,6	11,11	1505	2,162006
194,3	11,11	1510	2,158673
195,4	11,09	1515	2,166986
195,9	11,11	1520	2,176449
196,1	11,07	1525	2,170827
196,8	11,11	1530	2,186448
197,3	11,11	1535	2,192003
197,1	11,05	1540	2,177955
196,8	11,07	1545	2,178576
196,3	11,11	1550	2,180893
195,9	11,07	1555	2,168613
194,8	11,03	1560	2,148644
194,2	11,07	1565	2,149794
194,8	11,03	1570	2,148644

194,6	11,03	1575	2,146438
194,9	11,07	1580	2,157543
195,2	11,07	1585	2,160864
195,6	11,07	1590	2,165292
196	11,09	1595	2,17364
196,5	11,09	1600	2,179185
197,2	11,09	1605	2,186948
197,7	11,03	1610	2,180631
197,5	11,01	1615	2,174475
198	11,01	1620	2,17998
198,2	11,07	1625	2,194074
197,9	11,01	1630	2,178879
198,5	11,07	1635	2,197395
198,8	11,05	1640	2,19674
199,1	11,05	1645	2,200055
198,9	11,05	1650	2,197845
199,4	11,05	1655	2,20337
199,4	11,03	1660	2,199382
199,2	11,07	1665	2,205144
199	11,05	1670	2,19895
199,4	11,05	1675	2,20337
199,7	11,05	1680	2,206685
199,6	11,03	1685	2,201588
199,8	10,99	1690	2,195802
199,5	11,03	1695	2,200485
200,1	11,03	1700	2,207103
199,8	11,01	1705	2,199798
200,3	11,03	1710	2,209309
199,9	11,03	1715	2,204897
200,2	11,03	1720	2,208206
200	11,03	1725	2,206
200,4	11,01	1730	2,206404
199,6	10,99	1735	2,193604
199,8	11,03	1740	2,203794
200,1	11,01	1745	2,203101
200,1	10,99	1750	2,199099
200,4	11,01	1755	2,206404
200	10,99	1760	2,198
200,6	10,99	1765	2,204594
200,4	10,99	1770	2,202396

200,3	10,99	1775	2,201297
200,5	10,99	1780	2,203495
200,7	10,99	1785	2,205693
201,1	11,01	1790	2,214111
201,4	10,99	1795	2,213386
201,3	10,93	1800	2,200209
201,7	10,99	1805	2,216683
202	10,99	1810	2,21998
202,6	10,97	1815	2,222522
202,4	10,93	1820	2,212232
202,3	10,95	1825	2,215185
202,8	10,97	1830	2,224716
203	10,93	1835	2,21879
203,6	10,99	1840	2,237564
203,8	10,95	1845	2,23161
203,5	10,91	1850	2,220185
203,9	10,93	1855	2,228627
204,3	10,97	1860	2,241171
204,7	10,95	1865	2,241465
204,7	10,93	1870	2,237371
205	10,93	1875	2,24065
205,6	10,91	1880	2,243096
205,2	10,95	1885	2,24694
205,9	10,91	1890	2,246369
206,2	10,93	1895	2,253766
206,6	10,89	1900	2,249874
206,4	10,95	1905	2,26008
206,9	10,95	1910	2,265555
206,7	10,91	1915	2,255097
207,1	10,87	1920	2,251177
207,5	10,93	1925	2,267975
207,8	10,89	1930	2,262942
207,7	10,93	1935	2,270161
208,3	10,93	1940	2,276719
208	10,89	1945	2,26512
208,5	10,89	1950	2,270565
208,7	10,87	1955	2,268569
208,9	10,89	1960	2,274921
209,1	10,85	1965	2,268735
209,5	10,91	1970	2,285645

209,1	10,91	1975	2,281281
208,9	10,89	1980	2,274921
209,6	10,89	1985	2,282544
209,7	10,83	1990	2,271051
209,9	10,87	1995	2,281613
210,2	10,85	2000	2,28067
209,8	10,87	2005	2,280526
210,3	10,87	2010	2,285961
210	10,85	2015	2,2785
210	10,85	2020	2,2785
210,6	10,81	2025	2,276586
210,3	10,85	2030	2,281755
210,4	10,81	2035	2,274424
210,3	10,79	2040	2,269137
210,6	10,79	2045	2,272374
210,6	10,79	2050	2,272374
210,8	10,77	2055	2,270316
210,5	10,77	2060	2,267085
210,8	10,77	2065	2,270316
210,7	10,77	2070	2,269239
210,6	10,79	2075	2,272374
210,5	10,78	2080	2,26919
211,1	10,77	2085	2,273547
210,9	10,75	2090	2,267175
211,3	10,75	2095	2,271475
211,6	10,73	2100	2,270468
211,3	10,73	2105	2,267249
211,7	10,73	2110	2,271541
211,9	10,73	2115	2,273687
212,1	10,75	2120	2,280075
211,8	10,75	2125	2,27685
212	10,77	2130	2,28324
212,5	10,77	2135	2,288625
211,8	10,77	2140	2,281086
211,9	10,74	2145	2,275806
212,5	10,74	2150	2,28225
212,9	10,72	2155	2,282288
211,5	10,72	2160	2,26728
212,8	10,71	2165	2,279088
212,1	10,71	2170	2,271591

213,2	10,72	2175	2,285504
213,5	10,72	2180	2,28872
212,9	10,71	2185	2,280159
212,8	10,73	2190	2,283344
213,6	10,7	2195	2,28552
213,9	10,7	2200	2,28873
214	10,7	2205	2,2898
213,6	10,69	2210	2,283384
213,8	10,7	2215	2,28766
214,3	10,69	2220	2,290867
213,9	10,69	2225	2,286591
214,5	10,69	2230	2,293005
214,2	10,7	2235	2,29194
213,4	10,68	2240	2,279112
214,8	10,68	2245	2,294064
214,3	10,68	2250	2,288724
215	10,69	2255	2,29835
214,5	10,68	2260	2,29086
215,1	10,7	2265	2,30157
215,8	10,71	2270	2,311218
214,6	10,69	2275	2,294074
214,9	10,68	2280	2,295132
215,6	10,68	2285	2,302608
215,8	10,68	2290	2,304744
216,1	10,67	2295	2,305787
215,5	10,68	2300	2,30154
216	10,69	2305	2,30904
216,3	10,7	2310	2,31441
215,8	10,7	2315	2,30906
215,8	10,69	2320	2,306902
216,3	10,68	2325	2,310084
216,8	10,67	2330	2,313256
215,4	10,67	2335	2,298318
216,7	10,67	2340	2,312189
216,9	10,68	2345	2,316492
217,2	10,67	2350	2,317524
217,2	10,66	2355	2,315352
216,8	10,66	2360	2,311088
217,1	10,68	2365	2,318628
217,6	10,66	2370	2,319616

216,9	10,65	2375	2,309985
217,7	10,65	2380	2,318505
217,7	10,65	2385	2,318505
217,9	10,67	2390	2,324993
218,1	10,7	2395	2,33367
218,1	10,67	2400	2,327127
217,9	10,65	2405	2,320635
218,3	10,64	2410	2,322712
218,3	10,64	2415	2,322712
218,6	10,66	2420	2,330276
217,8	10,64	2425	2,317392
218,9	10,63	2430	2,326907
219,2	10,63	2435	2,330096
218,9	10,62	2440	2,324718
219	10,63	2445	2,32797
219	10,62	2450	2,32578
219	10,63	2455	2,32797
219,3	10,61	2460	2,326773
219,7	10,6	2465	2,32882
218,9	10,65	2470	2,331285
219,5	10,63	2475	2,333285
219,9	10,6	2480	2,33094
220,2	10,6	2485	2,33412
220,6	10,6	2490	2,33836
219,9	10,59	2495	2,328741
220,3	10,59	2500	2,332977
219,8	10,6	2505	2,32988
220,1	10,61	2510	2,335261
220,3	10,59	2515	2,332977
220,3	10,58	2520	2,330774
220,5	10,58	2525	2,33289
220,4	10,58	2530	2,331832
220,3	10,59	2535	2,332977
219,8	10,6	2540	2,32988
219,8	10,58	2545	2,325484
220,5	10,57	2550	2,330685
220,5	10,56	2555	2,32848
220,4	10,55	2560	2,32522
220,8	10,55	2565	2,32944
219,8	10,55	2570	2,31889

220,3	10,56	2575	2,326368
220,3	10,54	2580	2,321962
219,3	10,55	2585	2,313615
218,5	10,55	2590	2,305175
219,5	10,54	2595	2,31353
220,6	10,54	2600	2,325124
220,8	10,56	2605	2,331648
220,6	10,54	2610	2,325124
220,5	10,53	2615	2,321865
219,9	10,53	2620	2,315547
220,3	10,53	2625	2,319759
220,4	10,54	2630	2,323016
220,4	10,55	2635	2,32522
220	10,56	2640	2,3232
220,2	10,53	2645	2,318706
220,2	10,52	2650	2,316504
220,8	10,52	2655	2,322816
220,7	10,52	2660	2,321764
220,8	10,52	2665	2,322816
220,8	10,55	2670	2,32944
220,8	10,53	2675	2,325024
221,1	10,52	2680	2,325972
220,6	10,51	2685	2,318506
221,1	10,51	2690	2,323761
221	10,51	2695	2,32271
220,3	10,53	2700	2,319759
219,3	10,5	2705	2,30265
219,8	10,52	2710	2,312296
220,3	10,51	2715	2,315353
220,5	10,5	2720	2,31525
221	10,5	2725	2,3205
221,3	10,5	2730	2,32365
221,3	10,52	2735	2,328076
221,6	10,52	2740	2,331232
221,1	10,51	2745	2,323761
221,7	10,5	2750	2,32785
221,7	10,49	2755	2,325633
221,7	10,49	2760	2,325633
221,9	10,48	2765	2,325512
221,9	10,5	2770	2,32995

220,9	10,49	2775	2,317241
211,6	10,49	2780	2,219684
222	10,49	2785	2,32878
222	10,5	2790	2,331
222,6	10,51	2795	2,339526
221,9	10,49	2800	2,327731
221,9	10,49	2805	2,327731
222,5	10,5	2810	2,33625
222,7	10,48	2815	2,333896
222,8	10,48	2820	2,334944
222,7	10,47	2825	2,331669
222,9	10,48	2830	2,335992
222,8	10,48	2835	2,334944
222,8	10,48	2840	2,334944
223	10,48	2845	2,33704
223,7	10,47	2850	2,342139
222,4	10,48	2855	2,330752
223,5	10,48	2860	2,34228
222,9	10,47	2865	2,333763
223,6	10,48	2870	2,343328
223,6	10,48	2875	2,343328
223,4	10,48	2880	2,341232
223,9	10,47	2885	2,344233
224,1	10,48	2890	2,348568
223,9	10,47	2895	2,344233
224	10,46	2900	2,34304
223,8	10,46	2905	2,340948
224,5	10,46	2910	2,34827
224,5	10,46	2915	2,34827
224,5	10,45	2920	2,346025
223,9	10,45	2925	2,339755
224,7	10,45	2930	2,348115
224,8	10,46	2935	2,351408
224,5	10,45	2940	2,346025
224,9	10,46	2945	2,352454
224,1	10,47	2950	2,346327
225	10,48	2955	2,358
225,6	10,45	2960	2,35752
225,5	10,45	2965	2,356475
225,6	10,44	2970	2,355264

225,3	10,44	2975	2,352132
225,3	10,44	2980	2,352132
225,8	10,44	2985	2,357352
225,4	10,45	2990	2,35543
225,7	10,46	2995	2,360822
226	10,44	3000	2,35944
226,1	10,43	3005	2,358223
225,8	10,43	3010	2,355094
226,3	10,44	3015	2,362572
225,2	10,44	3020	2,351088
225,6	10,43	3025	2,353008
226,6	10,45	3030	2,36797
226,6	10,43	3035	2,363438
226,9	10,45	3040	2,371105
226,7	10,42	3045	2,362214
226,7	10,43	3050	2,364481
227	10,42	3055	2,36534
226,9	10,42	3060	2,364298
226,9	10,44	3065	2,368836
227,3	10,44	3070	2,373012
227,5	10,43	3075	2,372825
227,5	10,42	3080	2,37055
227,1	10,42	3085	2,366382
227	10,42	3090	2,36534
227,8	10,43	3095	2,375954
227,8	10,45	3100	2,38051
227,5	10,46	3105	2,37965
228	10,44	3110	2,38032
227,9	10,43	3115	2,376997
227,7	10,42	3120	2,372634
228,1	10,42	3125	2,376802
228,6	10,41	3130	2,379726
228,6	10,41	3135	2,379726
228,7	10,4	3140	2,37848
228,3	10,41	3145	2,376603
227,9	10,42	3150	2,374718
228,7	10,42	3155	2,383054
228,9	10,41	3160	2,382849
229,3	10,41	3165	2,387013
229	10,42	3170	2,38618

229,1	10,42	3175	2,387222
229,5	10,41	3180	2,389095
228,9	10,43	3185	2,387427
229,3	10,4	3190	2,38472
229,3	10,4	3195	2,38472
229,7	10,41	3200	2,391177
229,7	10,42	3205	2,393474
229,4	10,4	3210	2,38576
229,9	10,39	3215	2,388661
229,7	10,38	3220	2,384286
230,2	10,42	3225	2,398684
230,2	10,42	3230	2,398684
230,5	10,4	3235	2,3972
229,9	10,39	3240	2,388661
230	10,39	3245	2,3897
230	10,38	3250	2,3874
230,5	10,38	3255	2,39259
230,5	10,39	3260	2,394895
230,5	10,38	3265	2,39259
230,1	10,39	3270	2,390739
229,8	10,39	3275	2,387622
229,8	10,37	3280	2,383026
230,1	10,37	3285	2,386137
230,1	10,36	3290	2,383836
230,1	10,38	3295	2,388438
230,5	10,38	3300	2,39259
230,7	10,39	3305	2,396973
229,8	10,37	3310	2,383026
230,4	10,37	3315	2,389248
230,1	10,37	3320	2,386137
230,6	10,36	3325	2,389016
230,6	10,38	3330	2,393628
231,2	10,36	3335	2,395232
231,8	10,36	3340	2,401448
232,4	10,38	3345	2,412312
231	10,36	3350	2,39316
231,8	10,35	3355	2,39913
232,5	10,35	3360	2,406375
231,4	10,37	3365	2,399618
232,8	10,35	3370	2,40948

233,1	10,35	3375	2,412585
232,9	10,35	3380	2,410515
233,4	10,34	3385	2,413356
233,4	10,34	3390	2,413356
233,8	10,35	3395	2,41983
234,5	10,34	3400	2,42473
233,9	10,34	3405	2,418526
234,1	10,35	3410	2,422935
234,6	10,34	3415	2,425764
234,6	10,34	3420	2,425764
234,1	10,34	3425	2,420594
233,9	10,35	3430	2,420865
234	10,33	3435	2,41722
234,8	10,33	3440	2,425484
233,9	10,32	3445	2,413848
233,9	10,34	3450	2,418526
234,5	10,35	3455	2,427075
234,5	10,32	3460	2,42004
234,9	10,32	3465	2,424168
235,2	10,33	3470	2,429616
234,8	10,32	3475	2,423136
235,4	10,34	3480	2,434036
235,5	10,32	3485	2,43036
235,5	10,31	3490	2,428005
236,7	10,31	3495	2,440377
235,1	10,31	3500	2,423881
235,8	10,34	3505	2,438172
234,2	10,32	3510	2,416944
235,7	10,3	3515	2,42771
235,9	10,31	3520	2,432129
236,1	10,31	3525	2,434191
236,4	10,3	3530	2,43492
236	10,32	3535	2,43552
236,5	10,31	3540	2,438315
236,6	10,31	3545	2,439346
235,8	10,3	3550	2,42874
236,6	10,3	3555	2,43698
236,4	10,29	3560	2,432556
236,2	10,29	3565	2,430498
236,8	10,29	3570	2,436672

237	10,29	3575	2,43873
236,8	10,3	3580	2,43904
236,9	10,28	3585	2,435332
237,4	10,28	3590	2,440472
237,7	10	3595	2,445933
237,5	10,29	3600	2,443875
237,5	10,28	3605	2,4415
237,9	10,28	3610	2,445612
237,4	10,28	3615	2,440472
236,9	10,28	3620	2,435332
236,9	10,27	3625	2,432963
237,8	10,27	3630	2,442206
237,9	10,29	3635	2,447991
238	10,27	3640	2,44426
238	10,27	3645	2,44426
238	10,28	3650	2,44664
238,4	10,26	3655	2,445984
238,1	10,27	3660	2,445287
237,8	10,26	3665	2,439828
237,9	10,26	3670	2,440854
238,3	10,26	3675	2,444958
238,7	10,26	3680	2,449062
238,7	10,25	3685	2,446675
238,7	10,25	3690	2,446675
238,5	10,25	3695	2,444625
239,1	10,25	3700	2,450775
239,1	10,24	3705	2,448384
238,7	10,25	3710	2,446675
239,2	10,26	3715	2,454192
239,2	10,25	3720	2,4518
238,9	10,25	3725	2,448725
239,5	10,24	3730	2,45248
239,8	10,24	3735	2,455552
239,9	10,24	3740	2,456576
239,9	10,23	3745	2,454177
239,7	10,23	3750	2,452131
240	10,24	3755	2,4576
240,2	10,23	3760	2,457246
240,2	10,22	3765	2,454844
239,7	10,23	3770	2,452131

239,9	10,22	3775	2,451778
239,8	10,22	3780	2,450756
240,5	10,22	3785	2,45791
240,6	10,22	3790	2,458932
240,5	10,23	3795	2,460315
240,9	10,24	3800	2,466816
241,1	10,22	3805	2,464042
241,3	10,22	3810	2,466086
241,3	10,21	3815	2,463673
241,3	10,2	3820	2,46126
242,8	10,2	3825	2,47656
242,1	10,21	3830	2,471841
242,9	10,21	3835	2,480009
243	10,22	3840	2,48346
243,8	10,2	3845	2,48676
244	10,21	3850	2,49124
244,6	10,2	3855	2,49492
244,8	10,19	3860	2,494512
245	10,18	3865	2,4941
245,8	10,16	3870	2,497328
246,1	10,16	3875	2,500376
246,7	10,15	3880	2,504005
247	10,14	3885	2,50458
248,1	10,12	3890	2,510772
248,9	10,1	3895	2,51389
249,3	10,08	3900	2,512944
249,7	10,06	3905	2,511982
250	10,05	3910	2,5125
250,3	10,04	3915	2,513012
250,8	10,02	3920	2,513016
251,5	10	3925	2,515
252,2	9,96	3930	2,511912

**Datos Prueba # 3 Sin
celdas en Aire**

Tiempo[s]	Voltaje[V]
0	12,43
5	12,43
10	12,41
15	12,37
20	12,25
25	12,27
30	12,15
35	12,07
40	11,83
45	11,75
50	11,49
55	11,41
60	11,49
65	11,85
70	11,91
75	12,03
80	12,03
85	12,09
90	12,11
95	12,09
100	12,01
105	12,01
110	11,89
115	11,75
120	11,77
125	11,99
130	11,87
135	12,03
140	12,05
145	12,03
150	11,77
155	11,83
160	11,75
165	11,75

170	11,65
175	11,65
180	11,71
185	11,73
190	11,27
195	11,23
200	11,73
205	11,83
210	11,87
215	11,87
220	11,83
225	11,97
230	11,91
235	11,87
240	11,85
245	11,87
250	11,89
255	11,73
260	11,71
265	11,29
270	10,99
275	11,43
280	11,69
285	11,73
290	11,71
295	11,75
300	11,71
305	11,77
310	11,79
315	11,75
320	11,79
325	11,79
330	11,79
335	11,73
340	11,75
345	11,77
350	11,75
355	11,73
360	11,53
365	11,43

370	11,29
375	11,63
380	11,65
385	11,63
390	11,69
395	11,69
400	11,67
405	11,69
410	11,67
415	11,67
420	11,69
425	11,61
430	11,67
435	11,37
440	11,27
445	11,21
450	11,63
455	11,29
460	11,29
465	11,55
470	11,61
475	11,59
480	11,57
485	11,59
490	11,61
495	11,59
500	11,55
505	11,55
510	11,39
515	11,27
520	11,35
525	11,21
530	11,23
535	11,17
540	11,21
545	11,09
550	11,19
555	11,21
560	11,15
565	11,13

570	11,13
575	10,77
580	10,73
585	10,73
590	10,69
595	10,99
600	11,03
605	11,03
610	11,09
615	11,13
620	11,13
625	11,15
630	11,15
635	11,21
640	11,13
645	11,13
650	11,17
655	11,09
660	11,07
665	11,09
670	11,15
675	10,97
680	10,99
685	10,93
690	10,87
695	11,01
700	11,03
705	11,07
710	10,97
715	11,09
720	10,99
725	11,01
730	11,01
735	10,93
740	11,01
745	10,91
750	10,91
755	10,83
760	10,81
765	10,83

770	10,69
775	10,54
780	10,52
785	10,52
790	10,48
795	10,97
800	10,93
805	10,97
810	11,03
815	11,03
820	11,07
825	10,99
830	10,99
835	11,03
840	10,99
845	10,89
850	11,01
855	11,01
860	11,01
865	10,95
870	10,97
875	10,93
880	10,95
885	10,87
890	10,85
895	10,83
900	10,93
905	10,87
910	10,93
915	10,83
920	10,81
925	10,83
930	10,83
935	10,73
940	10,44
945	10,46
950	10,48
955	10,73
960	10,81
965	10,83

970	10,83
975	10,77
980	10,77
985	10,77
990	10,81
995	10,85
1000	10,75
1005	10,79
1010	10,85
1015	10,79
1020	10,85
1025	10,79
1030	10,75
1035	10,77
1040	10,73
1045	10,73
1050	10,67
1055	10,69
1060	10,71
1065	10,63
1070	10,69
1075	10,69
1080	10,75
1085	10,67
1090	10,65
1095	10,5
1100	10,42
1105	10,48
1110	10,52
1115	10,69
1120	10,63
1125	10,58
1130	10,56
1135	10,42
1140	10,38
1145	10,52
1150	10,44
1155	10,48
1160	10,42
1165	10,5

1170	10,42
1175	10,42
1180	10,36
1185	10,36
1190	10,4
1195	10,34
1200	10,36
1205	10,32
1210	10,46
1215	10,4
1220	10,28
1225	10,24
1230	10,28
1235	10,24
1240	10,32
1245	10,22
1250	10,26
1255	10,22
1260	10,22
1265	10,2
1270	10,26
1275	10,16
1280	10,08
1285	10,14
1290	10,14
1295	10
1300	10,08
1305	10,06
1310	10,08
1315	10,16
1320	10,04
1325	10,1
1330	10,16
1335	10,12
1340	10,06
1345	10,12
1350	10,1
1355	10,14
1360	10,08
1365	10,1

1370	10,12
1375	10,12
1380	10,14
1385	10,14
1390	10,14
1395	10,1
1400	10,16
1405	10,1
1410	10,04
1415	10,14

Datos Prueba # 4 Con celdas en Aire

Tiempo	Voltaje	Corriente	Potencia
0	12,37	130,52	1,6145324
5	12,23	133,28	1,6300144
10	12,19	110,09	1,3419971
15	12,13	125,49	1,5221937
20	11,95	142,51	1,7029945
25	11,95	125,72	1,502354
30	11,87	105,19	1,2486053
35	11,81	115,32	1,3619292
40	11,93	128,45	1,5324085
45	11,91	135,29	1,6113039
50	11,87	128,67	1,5273129
55	11,97	105,21	1,2593637
60	11,95	89,32	1,067374
65	11,95	80,12	0,957434
70	11,97	71,29	0,8533413
75	11,97	93,15	1,1150055
80	11,89	102,48	1,2184872
85	11,89	110,34	1,3119426
90	11,83	120,85	1,4296555
95	11,83	112,4	1,329692
100	11,85	122,17	1,4477145
105	11,79	129,59	1,5278661
110	11,85	129,77	1,5377745
115	11,85	128,34	1,520829
120	11,79	136,98	1,6149942
125	11,75	115,81	1,3607675
130	11,69	105,19	1,2296711
135	11,77	110,58	1,3015266
140	11,73	105,63	1,2390399
145	11,75	96,72	1,13646
150	11,71	103,86	1,2162006
155	11,59	105,19	1,2191521
160	11,71	119,34	1,3974714
165	11,73	124,55	1,4609715
170	11,77	122,37	1,4402949

175	11,53	114,38	1,3188014
180	11,55	96,72	1,117116
185	11,47	98,44	1,1291068
190	11,75	105,11	1,2350425
195	11,81	109,98	1,2988638
200	11,79	106,1	1,250919
205	11,83	105,19	1,2443977
210	11,83	112,13	1,3264979
215	11,81	115,44	1,3633464
220	11,85	119,08	1,411098
225	11,81	125,84	1,4861704
230	11,79	117,81	1,3889799
235	11,79	105,19	1,2401901
240	11,79	122,14	1,4400306
245	11,75	131,58	1,546065
250	11,75	128,47	1,5095225
255	11,77	122,59	1,4428843
260	11,75	134,48	1,58014
265	11,69	125,1	1,462419
270	11,63	119,45	1,3892035
275	11,69	113,67	1,3288023
280	11,49	128,22	1,4732478
285	11,41	121,43	1,3855163
290	11,39	116,71	1,3293269
295	11,69	113,66	1,3286854
300	11,71	105,19	1,2317749
305	11,71	108,42	1,2695982
310	11,73	110,86	1,3003878
315	11,71	113,67	1,3310757
320	11,73	129,11	1,5144603
325	11,73	126,48	1,4836104
330	11,73	130,59	1,5318207
335	11,63	129,42	1,5051546
340	11,63	125,66	1,4614258
345	11,53	129,88	1,4975164
350	11,59	115,43	1,3378337

355	11,55	126,45	1,4604975
360	11,55	110,85	1,2803175
365	11,55	117,72	1,359666
370	11,57	116,24	1,3448968
375	11,55	128,32	1,482096
380	11,35	127,45	1,4465575
385	11,29	128,04	1,4455716
390	11,41	129,84	1,4814744
395	11,45	131,15	1,5016675
400	11,51	124,55	1,4335705
405	11,51	150,49	1,7321399
410	11,51	155,35	1,7880785
415	11,39	145,17	1,6534863
420	11,51	140,23	1,6140473
425	11,39	160,17	1,8243363
430	11,33	121,41	1,3755753
435	11,27	128,37	1,4467299
440	11,37	133,18	1,5142566
445	11,29	129,16	1,4582164
450	11,25	128,42	1,444725
455	11,31	121,34	1,3723554
460	11,35	120,17	1,3639295
465	11,29	113,67	1,2833343
470	11,33	108,82	1,2329306
475	11,31	106,43	1,2037233
480	11,23	107,39	1,2059897
485	11,27	99,41	1,1203507
490	11,19	103,75	1,1609625
495	11,33	103,79	1,1759407
500	11,23	106,5	1,195995
505	11,29	105,19	1,1875951
510	11,23	113,67	1,2765141
515	11,19	125,42	1,4034498
520	10,99	124,31	1,3661669
525	10,99	126,47	1,3899053
530	10,95	110,18	1,206471
535	11,25	112,07	1,2607875
540	11,29	105,19	1,1875951

545	11,25	124,34	1,398825
550	11,29	121,08	1,3669932
555	11,29	113,67	1,2833343
560	11,25	122,14	1,374075
565	11,31	134,59	1,5222129
570	11,23	131,42	1,4758466
575	11,25	128,41	1,4446125
580	11,31	117,04	1,3237224
585	11,21	119,68	1,3416128
590	11,21	128,32	1,4384672
595	11,25	131,09	1,4747625
600	11,25	134,21	1,5098625
605	11,25	117,12	1,3176
610	11,23	121,53	1,3647819
615	11,23	125,13	1,4052099
620	11,17	129,32	1,4445044
625	11,15	117,65	1,3117975
630	11,19	111,16	1,2438804
635	11,17	121,03	1,3519051
640	11,17	114,32	1,2769544
645	11,19	105,19	1,1770761
650	11,05	105,19	1,1623495
655	11,03	114,21	1,2597363
660	11,15	126,34	1,408691
665	10,95	116,42	1,274799
670	10,73	105,19	1,1286887
675	10,77	122,14	1,3154478
680	10,73	132,02	1,4165746
685	11,03	124,35	1,3715805
690	11,11	108,14	1,2014354
695	11,13	124,99	1,3911387
700	11,05	115,19	1,2728495
705	11,01	128,34	1,4130234
710	11,09	134,12	1,4873908
715	10,95	134,09	1,4682855
720	10,99	129,11	1,4189189
725	11,05	132,16	1,460368
730	11,01	125,34	1,3799934

735	10,97	118,37	1,2985189
740	10,99	121,33	1,3334167
745	10,85	126,39	1,3713315
750	10,83	113,67	1,2310461
755	10,79	111,59	1,2040561
760	10,71	124,35	1,3317885
765	10,99	126,78	1,3933122
770	11,03	118,55	1,3076065
775	11,07	124,54	1,3786578
780	11,01	129,83	1,4294283
785	11,07	137,89	1,5264423
790	11,03	145,18	1,6013354
795	11,03	150,45	1,6594635
800	11,09	160,6	1,781054
805	11,01	166,89	1,8374589
810	11,07	170,77	1,8904239
815	10,93	176,23	1,9261939
820	10,93	176,18	1,9256474
825	10,93	177,88	1,9442284
830	11,07	155,66	1,7231562
835	11,01	148,23	1,6320123
840	11,01	122,14	1,3447614
845	11,07	122,14	1,3520898
850	11,09	133,47	1,4801823
855	11,09	145,18	1,6100462
860	11,09	157,23	1,7436807
865	11,05	170,84	1,887782
870	11,07	199,9	2,212893
875	11,07	129,32	1,4315724
880	10,97	127,42	1,3977974
885	10,99	135,14	1,4851886
890	10,99	157,33	1,7290567
895	11,05	163,12	1,802476
900	11,01	177,76	1,9571376
905	11,05	154,42	1,706341
910	11,05	122,14	1,349647
915	10,77	135,42	1,4584734
920	10,71	134,52	1,4407092

925	10,77	178,62	1,9237374
930	10,75	188,17	2,0228275
935	10,91	122,14	1,3325474
940	11,01	141,33	1,5560433
945	10,97	147,32	1,6161004
950	10,99	201,2	2,211188
955	10,93	181,21	1,9806253
960	11,03	193,12	2,1301136
965	10,97	167,67	1,8393399
970	10,97	113,67	1,2469599
975	11,03	113,67	1,2537801
980	11,03	156,04	1,7211212
985	10,99	130,62	1,4355138
990	10,91	138,34	1,5092894
995	11,01	147,57	1,6247457
1000	10,93	156,04	1,7055172
1005	10,97	130,62	1,4329014
1010	10,91	139,09	1,5174719
1015	10,97	172,99	1,8977003
1020	10,89	206,89	2,2530321
1025	10,95	198,42	2,172699
1030	10,93	198,42	2,1687306
1035	10,87	181,47	1,9725789
1040	10,93	139,09	1,5202537
1045	10,91	172,99	1,8873209
1050	10,95	206,89	2,2654455
1055	10,87	164,52	1,7883324
1060	11,03	215,37	2,3755311
1065	11,03	189,94	2,0950382
1070	11,05	215,37	2,3798385
1075	11,05	189,94	2,098837
1080	11,05	240,79	2,6607295
1085	10,99	215,37	2,3669163
1090	10,99	189,94	2,0874406
1095	11,05	164,52	1,817946
1100	11,05	232,32	2,567136
1105	11,05	215,37	2,3798385
1110	11,05	232,32	2,567136

1115	11,05	215,37	2,3798385
1120	11,03	257,74	2,8428722
1125	11,03	257,74	2,8428722
1130	11,05	257,74	2,848027
1135	10,99	215,37	2,3669163
1140	11,05	257,74	2,848027
1145	10,95	240,79	2,6366505
1150	10,99	223,84	2,4600016
1155	10,97	274,69	3,0133493
1160	10,93	249,27	2,7245211
1165	10,91	240,79	2,6270189
1170	10,89	223,84	2,4376176
1175	10,97	240,79	2,6414663
1180	11,03	249,27	2,7494481
1185	11,01	240,79	2,6510979
1190	11,03	249,27	2,7494481
1195	11,03	206,89	2,2819967
1200	11,03	283,17	3,1233651
1205	11,05	257,74	2,848027
1210	11,01	298,59	3,2874759
1215	11,07	266,22	2,9470554
1220	11,03	266,22	2,9364066
1225	11,07	206,89	2,2902723
1230	10,99	240,79	2,6462821
1235	11,03	206,89	2,2819967
1240	11,01	156,04	1,7180004
1245	11,01	139,09	1,5313809
1250	10,99	196,72	2,1619528
1255	10,95	130,62	1,430289
1260	10,83	122,14	1,3227762
1265	10,93	113,67	1,2424131
1270	10,93	188,24	2,0574632
1275	10,89	171,29	1,8653481
1280	10,85	130,62	1,417227
1285	10,77	100,24	1,0795848
1290	10,87	105,19	1,1434153
1295	10,67	88,29	0,9420543
1300	10,75	79,77	0,8575275

1305	10,71	79,77	0,8543367
1310	10,61	105,19	1,1160659
1315	10,75	71,29	0,7663675
1320	10,73	79,77	0,8559321
1325	10,79	98,12	1,0587148
1330	10,79	113,67	1,2264993
1335	10,71	134,89	1,4446719
1340	10,73	142,54	1,5294542
1345	10,77	154,34	1,6622418
1350	10,75	149,56	1,60777
1355	10,73	167,34	1,7955582
1360	10,81	148,69	1,6073389
1365	10,81	167,45	1,8101345
1370	10,77	168,85	1,8185145
1375	10,69	175,56	1,8767364
1380	10,73	184,34	1,9779682
1385	10,73	180,46	1,9363358
1390	10,54	175,21	1,8467134
1395	10,34	186,34	1,9267556
1400	10,26	205,44	2,1078144
1405	10,38	215,51	2,2369938
1410	10,54	195,42	2,0597268
1415	10,65	174,37	1,8570405
1420	10,67	186,45	1,9894215
1425	10,69	201,34	2,1523246
1430	10,67	231,45	2,4695715
1435	10,52	245,75	2,58529
1440	10,32	223,89	2,3105448
1445	10,63	222,54	2,3656002
1450	10,65	238,78	2,543007
1455	10,58	251,75	2,663515
1460	10,65	200,58	2,136177
1465	10,67	122,14	1,3032338
1470	10,69	110,08	1,1767552
1475	10,65	130,15	1,3860975
1480	10,58	102,62	1,0857196
1485	10,67	122,14	1,3032338
1490	10,58	110,91	1,1734278

1495	10,56	105,19	1,1108064
1500	10,61	123,85	1,3140485
1505	10,54	119,25	1,256895
1510	10,34	113,67	1,1753478
1515	10,4	146,34	1,521936
1520	10,26	158,42	1,6253892
1525	10,36	161,75	1,67573
1530	10,22	177,24	1,8113928
1535	10,2	187,29	1,910358
1540	10,3	209,04	2,153112
1545	10,32	245,34	2,5319088
1550	10,4	216,74	2,254096
1555	10,34	234,77	2,4275218
1560	10,3	258,45	2,662035
1565	10,34	267,22	2,7630548
1570	10,24	241,56	2,4735744
1575	10,3	229,34	2,362202
1580	10,24	231,55	2,371072
1585	10,28	218,45	2,245666
1590	10,4	238,54	2,480816
1595	10,42	251,78	2,6235476
1600	10,34	268,39	2,7751526
1605	10,34	255,08	2,6375272
1610	10,18	230,45	2,345981
1615	10,2	238,45	2,43219
1620	10,12	284,15	2,875598
1625	10,22	212,15	2,168173
1630	10,08	234,94	2,3681952
1635	10,12	226,89	2,2961268
1640	10,06	238,54	2,3997124

1645	10,02	227,77	2,2822554
1650	10	248,64	2,4864
1655	9,98	225,41	2,2495918
1660	9,92	208,38	2,0671296
1665	10,08	249,57	2,5156656
1670	10,16	246,86	2,5080976
1675	10,18	244,51	2,4891118
1680	10,2	228,45	2,33019
1685	10,18	241,32	2,4566376
1690	10,2	227,45	2,31999
1695	10,2	211,18	2,154036
1700	10,18	239,75	2,440655
1705	10,22	245,07	2,5046154
1710	10,2	224,58	2,290716
1715	10,2	248,31	2,532762
1720	10,18	256,79	2,6141222
1725	10,18	267,11	2,7191798
1730	10,14	284,35	2,883309
1735	10,14	265,51	2,6922714
1740	10,04	271,38	2,7246552
1745	10,1	267,12	2,697912
1750	10,04	274,71	2,7580884
1755	9,98	258,49	2,5797302
1760	10,02	267,34	2,6787468
1765	9,98	241,08	2,4059784
1770	10	268,24	2,6824
1775	9,94	266,38	2,6478172