



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA APLICACIONES MÓVILES
DE TRACCIÓN ELÉCTRICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

JUAN PABLO ANDRÉS CASTILLO MIRANDA

**PROFESOR GUÍA:
RODRIGO PALMA BEHNKE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÓSCAR MOYA ARAVENA
PATRICIO MENDOZA ARAYA**

**SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2008**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: JUAN PABLO ANDRÉS CASTILLO MIRANDA
FECHA: __/08/2008
PROF. GUÍA: Sr. RODRIGO PALMA BEHNKE

“SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA APLICACIONES MÓVILES DE TRACCIÓN ELÉCTRICA”

El escenario energético internacional permite visualizar que el uso de la energía solar tiene fuertes perspectivas de crecimiento. En este contexto, el objetivo general de este trabajo es contribuir al desarrollo de aplicaciones móviles energizadas con recursos renovables a través de la propuesta de un modelo de sistema fotovoltaico móvil para aplicaciones en tracción eléctrica. Se busca contar con una herramienta de diseño y análisis de paneles fotovoltaicos de geometría variable, formados por distintos tipos de celdas solares.

Se establece el estado del arte en tecnologías fotovoltaicas y aplicaciones móviles de tracción eléctrica que utilicen energía solar, junto con estudiar los antecedentes teóricos que explican los fenómenos relacionados directamente con la radiación solar en la Tierra y el comportamiento de celdas solares ante la radiación. Asimismo, se desarrolla e implementa un modelo de comportamiento de celdas fotovoltaicas específicas que incluya la radiación espectral. Para realizar este modelo, denominado “modelo integrado”, se consideran tres grandes bloques. El primer bloque corresponde al modelo que entrega la radiación solar para un conjunto de planos (celdas solares), el que se selecciona de la literatura especializada en el tema y atendiendo a los requerimientos específicos de aplicaciones móviles. El segundo bloque corresponde al modelo de comportamiento de un panel solar, el cual se subdivide en tres subbloques, los que corresponden al modelo térmico para una celda, el modelo de comportamiento de una celda solar y el modelo que entrega el comportamiento de un conjunto de celdas solares interconectadas. Este modelo permite caracterizar genéricamente un panel formado por celdas solares, y es implementado para las celdas específicas del auto solar Eolian I desarrollado en la Universidad de Chile en el marco de este trabajo. Para este fin, se desarrolla y utiliza una metodología de estimación de parámetros para las celdas consideradas. Finalmente, el tercer bloque del modelo integrado se desarrolla sólo para el caso de Eolian I, el que corresponde al modelamiento de su superficie y obtención de las variables que definen la posición geométrica de sus celdas. Este tercer bloque es necesario para el modelo integrado. En el caso de considerar otra superficie “irregular” es posible adaptar el procedimiento propuesto para Eolian I.

Los resultados del modelo de radiación solar, indican que sistemáticamente él entrega valores mayores de radiación solar respecto de los medidos en Santiago, teniéndose diferencias entre $50[\text{W}/\text{m}^2]$ y $80[\text{W}/\text{m}^2]$. A su vez, el modelo implementado para un panel solar, entrega resultados con errores inferiores al 7% en todas sus variables, excepto en el modelo térmico, en donde dicho error llega hasta un 15%, lo cual no repercute mayormente en el modelo integrado ya que el error promedio del modelo térmico es del orden de un 6%.

Los resultados obtenidos mediante el uso del modelo integrado, y la ejecución de pruebas experimentales, indican que los paneles del vehículo solar Eolian I presentan graves daños, que hacen inutilizable los paneles Spectrolab DJ (aproximadamente un sexto de todo el panel). El resto del panel, formado por celdas SunPower A300, también presenta daños importantes, teniéndose que los cuatro paneles independientes entregan un 59%, 76%, 75% y 56% de la potencia esperada. Los daños del sistema de paneles fotovoltaicos hacen que su eficiencia promedio sea sólo de un 7,3%, y que se tenga una pérdida en la generación de energía diaria de un 58,9% en un día con una alta radiación solar incidente. Sin embargo, el modelo desarrollado es capaz de reproducir adecuadamente los resultados obtenidos, por lo que se proyecta como la base de desarrollo de geometrías y agrupaciones de paneles para aplicaciones de tracción móviles.

Como trabajo futuro se propone considerar una corrección de la radiación solar en base a datos reales medidos y poder calcularla para un panel que esté desplazándose sobre la superficie terrestre; además, incorporar el cálculo automático de sombras sobre la superficie “irregular” del panel con la que se trabaje, poder realizar giros de ella en torno a los 3 ejes espaciales, e integrar al modelo diodos de “bypass” conectados al panel fotovoltaico. Asimismo, se propone implementar un modelo de optimización que determine para una distribución dada de celdas su conexión óptima, en base al modelo integrado desarrollado.

A mi familia

Agradecimientos

Aunque suene sentimental, estos siete años y medio (tirando a $\frac{3}{4}$) pululando por Beauchef han pasado harto más rápido de lo que pensé. Aún parece que sólo hubiera sido hace un par de meses cuando me pasaba toda la tarde tratando de invertir una matriz marciana pa'l control del jueves. De eso en verdad mucho ha pasado, y creo tener la suerte de haberme llevado en mi paso por este templo del saber (y del sufrir) demasiadas cosas buenas que no me imaginé en su momento. Se me vienen muchas formas a la cabeza de escribir esta página, pero en deshonra al jugo, las obviaré.

En primer lugar, quiero, debo, tengo y no sé qué más que agradecerle a mi mamá y mi papá, por estos casi 26 años aguantándome, ayudándome y todos los algoándome que no se me ocurren ahora. Si bien sé que aún hoy soy como las pelotas, ustedes dos siempre han estado ahí de formas que no piensan me he dado cuenta. También gracias pa' ti Oso, y tu simpaticona familia, por wevearme (en toda el espectro de la palabra) cuando ha sido justo y necesario.

A mis queridos y grandes amigos del Parroquial Álvaro, Guasho, Muti, Niquín, César por la buena onda y todas las vivencias que hemos pasado en estos 20 años aprox. de amistad.

A mis amigos de la U, por los muy buenos ratos vividos, y también por los malos y complicados sobrevividos. Por orden de antigüedad (si es que la línea de tiempo no me falla): Cepech, Pato, Amaru, Fabián, Acadiz, RdelaCas, Llopez, Anguitz, Seba Wilson, Tollero, Pato Soto, Diego (el cabezón), Manu, Claudio, Jaime, Joy, Ine, Mai, Álvaro, Andrés, Diego (Huara), Adio, Heinz, Fariñator, Astrid. Si olvido a alguien, hinche pa' que corrija esta página xD.

Además, le doy las gracias a los 11 Magníficos por esa experiencia genial de armar Cuetazo RC, que para mí tiene un valor sentimental mayor del que creen, y que fue donde comenzó el weveo vehicular.

A TODO el equipo de Eolian, parte I y parte II, dígase los conecta, el 2D, los profes, los técnicos de Enaer (mención Férrez y Pato), nosotros mismos, por haber llevado a cabo entre todos algo nunca hecho en nuestras tierras, y por haber logrado llegar down under con el bicho solar y cruzar Australia pese al jugo (vean el capítulo 7). Agradecimientos especiales a división celdas (Diego por la calma, Jaime por los fariñazos y los otros dos por el coro de ruidos), sin quienes habría sido imposible realizar toda la pega que ha inspiró esta memoria.

También le doy gracias a todo quienes alguna vez hayan querido, o tenido, que hacer un trabajo de la U conmigo, por haberme obligado, convencido o motivado a hacerlo.

Agradecimientos directos de la memoria a mis viejos con el apoyo en todo, Ine con la logística (tb tu hermana chica), Andrés por el apoyo que me has tirado todo este rato, y a todos los que me han hinchado de buena o mala manera pa que termine esto luego.

No puedo dejar de agradecer enormemente al profe Rodrigo, el profe guía, por haberme permitido una libertad un tanto inusual en el desarrollo de la memoria y por el apoyo que me ha dado a lo largo de todo este proceso, y a mi profesor integrante Patricio por ayudarme todas las veces que me quedé pegado y me encontraba un poco perdido en esto.

Si he olvidado a alguien (problemente por la hora en que escribo esto, Uds. saben), fuera de leseo, también muchas gracias.

Juan Pablo

Índice

RESUMEN	I
Agradecimientos	III
Índice	IV
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XII
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Alcances	2
1.3 Estructura del trabajo	3
2 Antecedentes Teóricos	4
2.1 Energía solar [3]	4
2.1.1 La energía proveniente del Sol.....	4
2.1.2 El espectro solar	6
2.1.3 La radiación solar en la Tierra	7
2.1.3.1 Radiación solar en el tope de la atmósfera terrestre	7
2.1.3.2 Radiación solar en la superficie terrestre.....	8
2.1.4 Factores atmosféricos influyentes sobre la radiación solar	9
2.1.4.1 Estructura de la atmósfera [6]	10
2.1.4.2 El concepto de <i>masa de aire</i>	10
2.1.4.3 Absorción por gases atmosféricos	11
2.1.4.4 Dispersión de los rayos solares	13
2.1.5 Sistemas de coordenadas.....	15
2.1.5.1 Coordenadas horizontales	15
2.1.5.2 Coordenadas ecuatoriales	17
2.1.6 Factores geométricos influyentes sobre la radiación solar	19
2.1.7 Modelos de radiación solar	20
2.1.7.1 Modelo de Perrin de Brichambaut [6].....	21
2.1.7.2 Modelo de Burridge & Gadd [13]	22
2.1.7.3 Modelo de Ashrae [14].....	22
2.1.7.4 Modelo de Spokas & Forcella [16]	24
2.1.8 Instrumentos de medición de radiación solar	26
2.1.8.1 Piranómetro	26
2.1.8.2 Pirheliómetro	27
2.1.8.3 Heliógrafo	28
2.2 Celdas fotovoltaicas	29
2.2.1 Historia de las celdas fotovoltaicas [19]	29
2.2.2 Principio de funcionamiento	32
2.2.3 Celdas solares y el espectro del Sol	34
2.2.4 Estructura básica de una celda fotovoltaica	35
2.2.5 Tipos de celdas fotovoltaicas [28].....	36
2.2.5.1 Celdas de silicio cristalino.....	36
2.2.5.2 Películas policristalinas delgadas	37
2.2.5.3 Semiconductores tipo III-IV.....	37
2.2.5.4 Celdas de simple o múltiple juntura	38
2.2.5.5 Materiales amorfos	38
2.2.5.6 Celdas sensibilizadas al tinte	39

2.2.5.7 Celdas de punto de contacto	39
2.2.5.8 Celdas solares plásticas	39
2.2.5.9 Nitruro de indio galio	40
2.2.5.10 Celdas solares orgánicas.....	40
2.2.6 Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica.....	40
2.2.7 Variables características de comportamiento.....	42
2.2.7.1 Efecto de la radiación solar incidente.....	44
2.2.7.2 Efecto de la temperatura.....	44
2.2.8 Efecto sombra	45
2.2.8.1 Celdas en paralelo	46
2.2.8.2 Celdas en serie.....	46
2.2.9 Punto de operación.....	48
2.2.10 Componentes de un sistema fotovoltaico.....	50
2.2.11 Aplicaciones de sistemas fotovoltaicos.....	51
2.2.11.1 Aplicaciones estacionarias	51
2.2.11.2 Aplicaciones móviles	54
2.2.11.2.1 Aplicaciones espaciales	54
2.2.11.2.2 Aplicaciones terrestres.....	58
2.2.11.2.3 Aplicaciones Aéreas	64
2.2.11.2.4 Aplicaciones marítimas	65
3 Metodología de trabajo.....	69
3.1 Metodología Modelo de Radiación Solar	70
3.2 Metodología Modelamiento Panel Solar	71
3.3 Metodología Modelación de la superficie del vehículo	74
3.4 Metodología Modelo integrado.....	74
4 Modelo de Radiación Solar	76
4.1 Elección del modelo	76
4.2 Implementación del modelo	77
4.2.1 Posición del Sol	77
4.2.2 Radiación sobre un plano inclinado	81
4.2.3 Consideración de la variación distancia Tierra-Sol.....	82
4.2.4 Implementación computacional	83
4.3 Validación y resultados del modelo	84
4.3.1 Radiación horizontal anual.....	85
4.3.2 Componente de radiación Directa, Difusa y Global.....	85
4.3.3 Radiación horizontal diaria	86
4.3.4 Radiación sobre planos inclinados	88
4.4 Comentarios y Análisis	91
5 Modelamiento Panel Solar.....	92
5.1 Modelo celda fotovoltaica.....	92
5.2 Modelo panel de celdas fotovoltaicas	95
5.2.1 Celdas conectadas en serie	95
5.2.2 Celdas conectadas en paralelo.....	96
5.2.3 Celdas conectadas en serie y paralelo	96
5.3 Modelación de la temperatura de una celda solar	97
5.4 Ajuste de parámetros.....	98
5.4.1 Sistema de Medición utilizado	99
5.4.2 Celdas SunPower A300 Eolian I.....	102
5.4.3 Celdas SunPower A300 control	106

5.4.4 Celdas Spectrolab DJ control.....	109
5.5 Implementación Computacional.....	111
5.6 Validación y resultados del modelo	112
5.6.1 Variación de la temperatura	112
5.6.2 Variación de la radiación solar incidente	115
5.6.3 Temperatura celda solar	118
5.6.4 Paneles Solares.....	120
5.6.4.1 Conexión Serie	123
5.6.4.2 Conexión paralelo	124
5.6.5 Efecto sombra	125
5.7 Comentarios y análisis	129
6 Modelación de la superficie del vehículo.....	130
6.1 Procedimiento utilizado e implementación.....	130
6.1.1 Discretización del vehículo.....	130
6.1.2 Localización de celdas sobre el vehículo	134
6.2 Comentarios y análisis	139
7 Modelo Integrado Celda-Superficie-Radiación	140
7.1 Resultados del modelo integrado.....	140
7.1.1 Curvas de máxima potencia diaria	142
7.1.2 Curvas de tensión diaria	143
7.1.3 Curvas de corriente diaria	145
7.1.4 Curva diaria factor de llenado	146
7.1.5 Curva de factor de desalineación diaria	147
7.1.6 Curva de eficiencia diaria	149
7.2 Estado de las celdas.....	150
7.2.1 Celdas SunPower A300	150
7.2.2 Celdas Spectrolab DJ	152
7.3 Estado paneles solares Eolian I.....	154
7.3.1 <i>Panel 1</i> SunPower A300.....	154
7.3.2 <i>Panel 2</i> SunPower A300.....	156
7.3.3 <i>Panel 3</i> SunPower A300.....	157
7.3.4 <i>Panel 4</i> SunPower A300.....	159
7.3.5 Paneles Spectrolab DJ.....	160
7.4 Estado global arreglo paneles solares Eolian I.....	161
7.5 Comentarios y Análisis	164
8 Conclusiones.....	166
Bibliografía	168
Anexos.....	174
A Códigos de Programación	A.1
A.1 Radiación Solar	A.1
A.2 Celda Solar	A.4
A.3 Panel Solar	A.12
A.4 Modelo Térmico Celda Solar	A.15
A.5 Superficie Vehículo	A.16
B Hojas de datos	B.1
C Simulaciones adicionales	C.1
C.1 Simulación de temperatura Sección “5.6.3 Temperatura celda solar” Panel 1, $A_{z_{Auto}}=57^\circ$	C.1
C.2 Simulación de temperatura Sección “5.6.3 Temperatura celda solar” Panel 4, $A_{z_{Auto}}=147^\circ$	C.2
C.3 Simulación paneles Sección “7.3 Estado paneles solares Eolian I”	C.3

C.4 Simulaciones diarias Sección “7.1 Resultados del modelo integrado”	C.3
D Otros	D.1
D.1 Corrección por temperatura característica I-V celda solar	D.1
D.2 Inclinación Puerta	D.1
D.3 Correspondencia nombre numérico con nombre algebraico Cuadernas	D.2
D.4 Ejemplo de salida datos AutoCad	D.2
D.5 Elección y determinación ángulo Az_{Auto}	D.3
D.6 Largo cables de interconexión paneles Eolian I	D.3
D.7 Porcentaje de sombra por celda en simulación <i>Panel 2</i>	D.4

Índice de figuras

Figura 2.1 Esquema del Sol visto desde el límite superior de la atmósfera terrestre [4]	5
Figura 2.2 Espectro electromagnético de Frecuencias [5].....	6
Figura 2.3 Distribución del espectro electromagnético sobre la Tierra [5].....	6
Figura 2.4 Superficie horizontal sobre el tope de la atmósfera [4]	8
Figura 2.5 Ángulo cenital.....	11
Figura 2.6 Respuesta espectral de la irradiancia para distintas masas de aire [4]	11
Figura 2.7 Presencia de componentes de la atmósfera a distintas alturas [7]	12
Figura 2.8 Absorción de las distintas longitudes de onda del espectro solar [5].....	12
Figura 2.9 Presencia de material particulado en la atmósfera para distintas alturas [7]	13
Figura 2.10 Dispersión de la luz solar según su longitud de onda [9].....	13
Figura 2.11 Rango típico de absorción y dispersión de los rayos solares [4].....	14
Figura 2.12 Desarrollo Coordenadas Horizontales [10]	15
Figura 2.13 Desarrollo Coordenadas Horizontales 2 [10].....	16
Figura 2.14 Coordenadas Ecuatoriales [11].....	19
Figura 2.15 Piranómetro de Radiación Global [17]	26
Figura 2.16 Piranómetro de radiación difusa con anillo sombreador [17]	27
Figura 2.17 Piranómetro de radiación solar reflejada [17].....	27
Figura 2.18 Pirheliómetro Angstrom [17]	28
Figura 2.19 Heliógrafo [18]	28
Figura 2.20 Diagrama Efecto Fotoeléctrico [21].....	32
Figura 2.21 Par electrón-hueco.....	33
Figura 2.22 Pares electrón-hueco en un material con contactos.....	33
Figura 2.23 Fotones incidentes sobre una celda solar con distintas longitudes de onda [26].....	34
Figura 2.24 Eficiencia teórica calculada, celda solar de simple juntura, espectro AM1.5 [22]	35
Figura 2.25 Estructura básica de una celda solar con juntura p-n [27]	36
Figura 2.26 Celda de Silicio Monocristalino [29].....	37
Figura 2.27 Celda de Silicio Policristalino [30].....	37
Figura 2.28 Esquema de una celda solar de múltiple juntura [28]	38
Figura 2.29 Circuito Equivalente “muy” básico de una celda solar.....	40
Figura 2.30 Circuito Equivalente básico de una celda solar.....	41
Figura 2.31 Circuito equivalente de una celda solar.....	41
Figura 2.32 Variación Característica V-I Celda Solar ante: (a) aumento R_s , (b) reducción R_{SH} [19].....	42
Figura 2.33 Curvas Características Celda Fotovoltaica. Curva I-V (negro); curva P-V (gris) [19].....	42
Figura 2.34 Variación característica I-V al variar la radiación incidente [33].....	44
Figura 2.35 Variación característica P-V al variar la radiación incidente [33].....	44
Figura 2.36 Variación característica I-V al variar la temperatura de trabajo [33].....	45
Figura 2.37 Variación característica P-V al variar la temperatura de trabajo [33].....	45
Figura 2.38 Curva I-V arreglo de n celdas con una celda sombreada [34]	46
Figura 2.39 Circuito equivalente de una celda solar con diodo de “bypass” externo	47
Figura 2.40 Arreglos de celdas solares con diodos de bypass [35].....	47
Figura 2.41 Características de un panel fotovoltaico y carga Resistiva R en el plano I-V	48
Figura 2.42 Puntos de trabajo Panel Fotovoltaico con MPPT funcionando.....	49
Figura 2.43 Curva P-V de una celda fotovoltaica.....	49
Figura 2.44 Esquema General de un sistema fotovoltaico.....	50
Figura 2.45 Sistema "Hospital in a box" [42].....	53
Figura 2.46 Parquímetro que utiliza celdas solares, Edimburgo, Alemania [43]	53
Figura 2.47 Satélite Vanguard I [45].....	54
Figura 2.48 Paneles Solares y de frenado del Mars Global Surveyor [46].....	55
Figura 2.49 Celdas Solares sobre el cuerpo del Lunar Prospector [47].....	55
Figura 2.50 Magellan [48].....	56
Figura 2.51 Mars Global Surveyor [49].....	56
Figura 2.52 Mars Observer [50].....	56
Figura 2.53 Hubble Space Telescope [51].....	56
Figura 2.54 Rosetta Space Probe [52].....	56

Figura 2.55 Sturdust [53].....	56
Figura 2.56 MIR (junio 1998) [54].....	57
Figura 2.57 International Space Station (marzo 2008) [55].....	57
Figura 2.58 Concepto de un Satélite de Energía Solar [59].....	57
Figura 2.59 Nuna4 [64].....	60
Figura 2.60 Aurora 101 [65].....	60
Figura 2.61 Eolian I [66].....	60
Figura 2.62 Umicar Infinity [66].....	60
Figura 2.63 Toyota Prius [68].....	61
Figura 2.64 Toyota Rav4 EV [68].....	61
Figura 2.65 Toyota Highlander [68].....	61
Figura 2.66 Ford Escape Hybrid [68].....	61
Figura 2.67 Venturi Astrolab [71].....	62
Figura 2.68 Venturi Eclectic [72].....	62
Figura 2.69 PVscooter y su inventor Don Dunklee [73].....	63
Figura 2.70 Solartaxi y su trailer con celdas solares [75].....	63
Figura 2.71 Gossamer Penguin [79].....	64
Figura 2.72 Solar Challenger [78].....	64
Figura 2.73 Helios [76].....	65
Figura 2.74 Zephyr [80].....	65
Figura 2.75 Sky Sailor [81].....	65
Figura 2.76 Solar Impulse [78].....	65
Figura 2.77 Aquarel II en el lago de Geneva [83].....	66
Figura 2.78 Sonneschein [83].....	66
Figura 2.79 RA 66 [83].....	66
Figura 2.80 RA82 Alster Soonne [83].....	66
Figura 2.81 Tecnología "Solar Wing " [84].....	67
Figura 2.82 Catamarán Solar Sailor con tecnología "Solar Wing" [84].....	67
Figura 2.83 Casa-bote energizada mediante paneles solares [85].....	68
Figura 2.84 Canoa "Carl" con Thomas Meyer en La Rochelle [82].....	68
Figura 3.1 Metodología de trabajo.....	69
Figura 3.2 Metodología implementación modelo de radiación solar.....	71
Figura 3.3 Metodología "Bloque Celda Solar".....	71
Figura 3.4 Metodología "Bloque Panel Solar".....	72
Figura 3.5 Metodología "Bloque Temperatura".....	73
Figura 3.6 Metodología implementación modelamiento panel solar.....	74
Figura 3.7 Metodología modelación superficie del vehículo.....	74
Figura 3.8 Metodología utilizada Modelo Integrado.....	75
Figura 4.1 Convención utilizada para el azimut.....	80
Figura 4.2 Radiación solar directa sobre un plano horizontal.....	81
Figura 4.3 Plano inclinado.....	81
Figura 4.4 Radiación máxima diaria año 2007.....	85
Figura 4.5 Componentes de Radiación Solar, cielo despejado y cubierto, día 231 (19 de agosto).....	86
Figura 4.6 Radiación horizontal medida y modelada, distintos días año 2007.....	86
Figura 4.7 Radiación horizontal medida y modelada, distintos días año 2007.....	86
Figura 4.8 Radiación días con precipitaciones y baja amplitud térmica.....	87
Figura 4.9 Radiación solar modelo, días despejados y nublados.....	88
Figura 4.10 Radiación sobre planos inclinados, 21 de marzo.....	88
Figura 4.11 Radiación sobre planos inclinados, 21 de junio.....	88
Figura 4.12 Radiación sobre planos inclinados, 21 de diciembre.....	89
Figura 4.13 Radiación solar sobre planos inclinados, día 80 (21 de marzo).....	89
Figura 4.14 Radiación solar sobre planos inclinados, día 172 (21 de junio).....	89
Figura 4.15 Radiación solar sobre planos inclinados, día 355 (21 de diciembre).....	90
Figura 4.16 Planos verticales, día 290 (17 de octubre).....	91
Figura 5.1 Modelo equivalente celda solar y carga L.....	92
Figura 5.2 Esquema de medición utilizado.....	99
Figura 5.3 Plataforma SP de medición, celdas SunPower A300.....	100
Figura 5.4 Plataforma SL de medición, celdas Spectrolab DJ.....	100
Figura 5.5 Diodo de "bypass" conectado a una celda (izquierda). Detalle regleta y diodo (derecha).....	100

Figura 5.6 Multímetros utilizados en las mediciones.....	101
Figura 5.7 Mediciones de temperatura sobre celdas solares.....	102
Figura 5.8 Sistema de medición implementado.....	102
Figura 5.9 Característica I-V promedio, celdas SunPower A300, Eolian I.....	103
Figura 5.10 Características I-V y P-V celdas medidas y simuladas, SunPower A300 Eolian I.....	105
Figura 5.11 Característica I-V Promedio, celdas SunPower A300 control.....	106
Figura 5.12 Características I-V y P-V celdas medidas y simuladas, SunPower A300 control.....	108
Figura 5.13 Característica I-V, celdas Spectrolab DJ.....	109
Figura 5.14 Características I-V y P-V celdas medidas y simuladas, Spectrolab DJ.....	110
Figura 5.15 Características I-V P-V, celda SunPower A300, $L=1.000[W/m^2]$	112
Figura 5.16 Características I-V P-V, celda Spectrolab DJ, $L=1.353[W/m^2]$	114
Figura 5.17 Características I-V P-V, celda SunPower A300, $T=25[^\circ C]$	115
Figura 5.18 Características I-V P-V, celda Spectrolab DJ, $T=28[^\circ C]$	117
Figura 5.19 Radiación solar incidente celdas Panel 1 Eolian I.....	119
Figura 5.20 Temperatura celdas Panel 1 Eolian I, modelo (izquierda) y medición (derecha).....	119
Figura 5.21 Radiación solar incidente celdas Panel 4 Eolian I.....	119
Figura 5.22 Temperatura celdas Panel 4 Eolian I, modelo (izquierda) y medición (derecha).....	119
Figura 5.23 Radiación Solar celdas SunPower A300.....	120
Figura 5.24 Temperatura celdas SunPower A300.....	120
Figura 5.25 Características I-V P-V celdas SunPower A300.....	121
Figura 5.26 Radiación Solar incidente celdas Spectrolab DJ.....	122
Figura 5.27 Temperatura celdas Spectrolab DJ.....	122
Figura 5.28 Características I-V P-V celdas Spectrolab DJ.....	122
Figura 5.29 Características I-V P-V, Panel serie SunPower A300.....	123
Figura 5.30 Características I-V P-V, Panel serie Spectrolab DJ.....	123
Figura 5.31 Características I-V P-V, Panel paralelo SunPower A300.....	124
Figura 5.32 Características I-V P-V, Panel paralelo Spectrolab DJ.....	124
Figura 5.33 Características I-V P-V, mediciones efecto sombra SunPower A300.....	126
Figura 5.34 Características I-V P-V, mediciones efecto sombra Spectrolab DJ.....	127
Figura 6.1 Vehículo Eolian I, vista lateral.....	130
Figura 6.2 Vehículo Eolian I, vista superior.....	130
Figura 6.3 Cuadernas de Eolian I, vista lateral.....	130
Figura 6.4 Ejes de coordenadas utilizados.....	131
Figura 6.5 Obtención de coordenadas, cuaderna cúpula.....	132
Figura 6.6 Obtención de coordenadas, cuadernas planas.....	132
Figura 6.7 Proyección puntos discretización Eolian I, plano x-y.....	133
Figura 6.8 Modelo discretizado Eolian I, parte posterior.....	133
Figura 6.9 Modelo discretizado Eolian I, parte delantera.....	133
Figura 6.10 Comparación Eolian I real (arriba) y modelo discretizado Eolian I (abajo).....	134
Figura 6.11 Celdas SunPower A300 Eolian I, disposición y real y esquemático.....	134
Figura 6.12 Celdas Spectrolab DJ Eolian I, disposición y real y esquemático.....	134
Figura 6.13 Superposición celdas en perfil Naca66 y conjunto de cuadernas.....	135
Figura 6.14 Pendientes celdas A300 sobre perfil Naca66 Eolian I.....	136
Figura 6.15 Azimuts celdas A300 sobre perfil Naca66 Eolian I.....	136
Figura 6.16 Superposición vista lateral Eolian I y conjunto de cuadernas.....	137
Figura 6.17 Celdas Spectrolab DJ, parte trasera cúpula Eolian I, vista lateral.....	137
Figura 6.18 Determinación puntos representativos sobre una cuaderna cúpula.....	138
Figura 6.19 Pendientes celdas Spectrolab DJ sobre cúpula Eolian I.....	138
Figura 6.20 Azimuts celdas Spectrolab DJ sobre cúpula Eolian I. Rojo: $Az_p < 0$. Negro: $Az_p \geq 0$	139
Figura 7.1 Definición ángulo azimut auto Az_{Auto}	140
Figura 7.2 Radiación solar horizontal y temperatura, 27 de octubre de 2007, Santiago de Chile.....	140
Figura 7.3 Máxima potencia diaria, paneles Eolian I.....	142
Figura 7.4 Tensiones V_{MP} y V_{OC} diarias, paneles Eolian I.....	143
Figura 7.5 Corrientes I_{MP} e I_{SC} diarias, paneles Eolian I.....	145
Figura 7.6 Factor de llenado diario paneles Eolian I.....	146
Figura 7.7 Factor de desalineación diario paneles Eolian I.....	148
Figura 7.8 Eficiencia diaria paneles Eolian I.....	149
Figura 7.9 Característica I-V P-V, celdas SunPower A300.....	151

<i>Figura 7.10 Característica I-V P-V, celdas Spectrolab DJ.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 7.11 Desempeño Panel 1 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^{\circ}$.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 7.12 Desempeño Panel 1 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^{\circ}$.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 7.13 Desempeño Panel 2 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^{\circ}$.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 7.14 Desempeño Panel 2 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^{\circ}$.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 7.15 Desempeño Panel 3 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^{\circ}$.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 7.16 Desempeño Panel 3 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^{\circ}$.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 7.17 Desempeño Panel 4 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^{\circ}$.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 7.18 Desempeño Panel 4 Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^{\circ}$.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 7.19 Curva de máxima potencia diaria, distintas configuraciones de paneles</i>	<i>162</i>
<i>Figura 7.20 Curva de eficiencia diaria, distintas configuraciones de paneles</i>	<i>163</i>

Índice de tablas

Tabla 2.1 Constantes modelo de radiación solar de Perrin de Brichambaut	21
Tabla 2.2 Valores de A, B y C modelo de Ashrae [14].....	23
Tabla 2.3 Valores de τ de acuerdo a condiciones de precipitación [16].....	25
Tabla 2.4 Variación Relativa Variables Celda Solar con la temperatura [24].....	45
Tabla 4.1 Caracterización modelos de radiación solar descritos.....	76
Tabla 4.2 Variables de entrada modelo de radiación solar.....	84
Tabla 4.3 Variables climáticas de interés modelo de radiación solar, días 13 y 14 de junio de 2007	87
Tabla 5.1 Parámetros físicos y de funcionamiento celda solar.....	98
Tabla 5.2 Resolución instrumentos utilizados.....	101
Tabla 5.3 Parámetros de referencia propios, celdas SunPower A300 Eolian I.....	103
Tabla 5.4 Parámetros de referencia comunes, celdas SunPower A300 Eolian I.....	104
Tabla 5.5 Determinación coeficiente de transferencia calórico kte, celdas SunPower A300 Eolian I.....	104
Tabla 5.6 Parámetros n , R_S y R_{Sh} propios, celdas SunPower A300 Eolian I.....	105
Tabla 5.7 Parámetros de referencia y funcionamiento comunes. Celdas SunPower A300 Eolian I.....	106
Tabla 5.8 Parámetros de referencia propios, celdas SunPower A300 control	107
Tabla 5.9 Parámetros de referencia comunes, celdas SunPower A300 control.....	107
Tabla 5.10 Determinación coeficiente de transferencia calórico kte, celdas SunPower A300 control.....	107
Tabla 5.11 Parámetros n , R_S y R_{Sh} propios, celdas SunPower A300 control.....	107
Tabla 5.12 Parámetros de referencia y funcionamiento comunes, celdas SunPower A300 control	108
Tabla 5.13 Parámetros de referencia propios, celdas Spectrolab DJ.....	109
Tabla 5.14 Parámetros de referencia comunes, celdas Spectrolab DJ control.....	109
Tabla 5.15 Determinación coeficiente de transferencia calórico kte, celdas Spectrolab DJ control	109
Tabla 5.16 Parámetros n , R_S y R_{Sh} propios, celdas Spectrolab DJ control.....	110
Tabla 5.17 Parámetros de referencia y funcionamiento comunes. Celdas Spectrolab DJ control	110
Tabla 5.18 Límites establecidos parámetros n , R_S y R_{Sh}	112
Tabla 5.19 Variables de desempeño, celda SunPower A300, $L=1.000[W/m^2]$	113
Tabla 5.20 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda SunPower A300, $L=1.000[W/m^2]$	113
Tabla 5.21 Variables de desempeño, celda Spectrolab DJ, $L=1.353[W/m^2]$	114
Tabla 5.22 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda Spectrolab DJ, $L=1.353[W/m^2]$	115
Tabla 5.23 Variables de desempeño, celda SunPower A300, $T=25[^\circ C]$	116
Tabla 5.24 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda SunPower A300, $T=25[^\circ C]$	116
Tabla 5.25 Variables de desempeño, celda Spectrolab DJ, $T=28[^\circ C]$	117
Tabla 5.26 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda Spectrolab DJ, $T=28[^\circ C]$	118
Tabla 5.27 Contraste temperatura modelo y medición, celdas Panel 1 Eolian I.....	119
Tabla 5.28 Contraste temperatura modelo y medición, celdas Panel 4 Eolian I.....	119
Tabla 5.29 Resumen desempeño celdas SunPower A300.....	121
Tabla 5.30 Resumen desempeño celdas Spectrolab DJ.....	122
Tabla 5.31 Resumen desempeño panel serie SunPower A300 y Spectrolab DJ.....	123
Tabla 5.32 Resumen desempeño panel paralelo SunPower A300 y Spectrolab DJ	124
Tabla 5.33 Radiación solar y temperatura sobre celdas SunPower A300, efecto sombra.....	125
Tabla 5.34 Contraste modelo y mediciones, efecto sombra SunPower A300.....	126
Tabla 5.35 Potencia de salida plataforma SP según sombreado, efecto sombra.....	126
Tabla 5.36 Radiación solar y temperatura sobre celda Spectrolab DJ, efecto sombra	127
Tabla 5.37 Contraste modelo y mediciones, efecto sombra Spectrolab DJ.....	128
Tabla 6.1 Localización de celdas solares sobre Eolian I.....	134
Tabla 7.1 Resumen desempeño energético paneles Eolian I.....	142
Tabla 7.2 Resumen desempeño de tensión paneles Eolian I.....	144
Tabla 7.3 Resumen desempeño de corriente paneles Eolian I.....	145
Tabla 7.4 Resumen factor de llenado paneles Eolian I.....	147
Tabla 7.5 Resumen factor de desalineación diario paneles Eolian I.....	148
Tabla 7.6 Resumen eficiencia diaria paneles Eolian I.....	149
Tabla 7.7 Parámetros físicos y de referencia celdas SunPower A300.....	150
Tabla 7.8 Variables características de comportamiento, celdas SunPower A300.....	151
Tabla 7.9 Variación variables de comportamiento respecto celda “DataSheet”, SunPower A300.....	151

<i>Tabla 7.10</i>	<i>Parámetros físicos y de referencia celdas Spectrolab DJ.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 7.11</i>	<i>Variables características de comportamiento, celdas Spectrolab DJ.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 7.12</i>	<i>Variación variables de comportamiento respecto celda “DataSheet”, Spectrolab DJ</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 7.13</i>	<i>Contraste desempeño real y teórico Panel 1 Eolian I.....</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 7.14</i>	<i>Contraste desempeño real y teórico Panel 2 Eolian I.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 7.15</i>	<i>Contraste desempeño real y teórico Panel 3 Eolian I.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 7.16</i>	<i>Contraste desempeño real y teórico Panel 4 Eolian I.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 7.17</i>	<i>Factores de escalamiento paneles solares Eolian I.....</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 7.18</i>	<i>Desempeño energético, distintas configuraciones de paneles</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 7.19</i>	<i>Desempeño de eficiencia, distintas configuraciones de paneles.....</i>	<i>164</i>

1 Introducción

Durante los últimos años se ha acentuado en el mundo la búsqueda de energías alternativas a las fuentes tradicionales, como el petróleo y el carbón. Esta tendencia se ha debido tanto a factores económicos (alza en los precios del petróleo a nivel mundial) como al impacto de éstas en el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera.

Una de las fuentes más abundantes de energía disponibles en la Tierra corresponde a la energía solar, lo cual ha hecho que, junto a lo mencionado anteriormente y una naciente conciencia ambiental, esté tomando cada día más fuerza como un complemento a las fuentes de energía tradicionales, e incluso como una alternativa en aplicaciones, donde, ya sea por razones económicas, de disponibilidad o de logística, sea conveniente utilizarla.

Si bien gran parte de las aplicaciones que utilizan la energía solar como fuente primaria de energía son estacionarias, en la actualidad se están realizando nuevos desarrollos experimentales (tanto la empresa privada como a distintas universidades alrededor del mundo) que proponen la utilización de esta energía en aplicaciones móviles de uso diario, como vehículos híbridos por ejemplo, y no tan solo en aplicaciones científicas y estratégicas como es el caso de las red de satélites que orbitan el planeta desde hace décadas. Adicionalmente, en la actualidad hay disponible en el mercado pequeños cargadores solares móviles que se pueden utilizar para cargar aparatos electrónicos de uso común como celulares, reproductores de MP3, etc.

En este contexto, a principios del año 2006 nace al interior de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile un grupo de alumnos con la inquietud y el deseo de ser los primeros en Chile en desarrollar y construir un auto impulsado sólo por energía solar para participar en la *Panasonic World Solar Challenge (PWSC)* durante octubre de 2007, la carrera de autos solares más importante del mundo que se realiza en Australia desde 1987 en forma bianual [1].

Todo equipo participante debe ser capaz de diseñar y construir un vehículo capaz de completar un recorrido de 3.000[km] entre las ciudades de Darwin y Adelaide a lo largo de una semana de competencia. Para tener éxito en este desafío de eficiencia energética, es primordial mantener un adecuado balance entre la velocidad y el gasto energético para lograr un óptimo aprovechamiento de la poca energía disponible. Para realizar todo lo anterior, es necesario combinar distintas ramas de la ingeniería, además de la física y la matemática.

Sin duda alguna, el tener la oportunidad de asistir a este tipo de eventos marca la formación como futuro ingeniero, tanto desde el punto de vista técnico como personal.

Es en el contexto de lo anterior, junto con el aportar en el desarrollo de la ingeniería en nuestro país, que nace este trabajo de memoria de título. El trabajo se focaliza en las problemáticas relacionadas con la conversión de la energía solar en energía eléctrica aprovechable por el auto solar. [2].

1.1 Objetivos

El objetivo general de la memoria de título es contribuir al desarrollo de aplicaciones móviles energizadas con recursos renovables a través de la propuesta de un modelo de sistema fotovoltaico móvil para aplicaciones en tracción eléctrica.

Los objetivos específicos asociados son los siguientes:

- Disponer de una visión del estado del arte en tecnologías fotovoltaicas y aplicaciones móviles de tracción eléctrica que utilicen energía solar.
- Disponer de un modelo de comportamiento de celdas fotovoltaicas específicas que incluya la radiación espectral.
- Desarrollar un modelo de optimización para un panel fotovoltaico sobre superficies irregulares.
- Probar el desempeño del modelo en un sistema real.
- Proponer futuras mejoras tanto a los modelos implementados como al diseño experimental estudiado.

1.2 Alcances

En el presente trabajo de memoria se desarrollará e implementará un modelo que permita estudiar el comportamiento de un panel fotovoltaico dado, y optimizar la conexión de las celdas que lo conforman sobre una superficie irregular.

En cuanto a los modelos con los que se trabajará, se pueden realizar los siguientes alcances:

- Se utilizará un modelo de radiación solar disponible en la literatura.
- En cuanto a la superficie para el sistema de paneles fotovoltaicos, se trabajará sobre un caso particular de una superficie “irregular”. Otras superficies no serán analizadas en este trabajo, pero el modelo permitirá en su analizar cualquier superficie.
- La modelación de una celda fotovoltaica se realizará de manera genérica, pero su implementación computacional será para tipos específicos de celdas fotovoltaicas.
- El desempeño del modelo será comprobado en base a mediciones empíricas realizadas sobre el auto solar Eolian I [2], que corresponde a la superficie particular previamente mencionada.

Si bien la dinámica del panel de celdas fotovoltaicas depende tanto de las celdas que lo conforman como del MPPT¹ que lo controla, no se estudiará en este trabajo el efecto del MPPT sobre el desempeño del panel de celdas fotovoltaicas. Se supondrá un MPPT con eficiencia conocida para efectos de los análisis.

1.3 Estructura del trabajo

En el capítulo 2 se revisan los antecedentes teóricos, sobre energía solar y celdas fotovoltaicas, en los cuales se fundamenta este trabajo.

En el capítulo 3 se presenta la metodología de trabajo que se utiliza, y se explica la implementación e integración de los tres modelos que se desarrollan en este trabajo.

En el capítulo 4 se estudia el comportamiento de un modelo de radiación solar y se implementa.

En el capítulo 5 se desarrolla e implementa un modelo de comportamiento para una celda solar en particular.

En el capítulo 6 se explica la necesidad y desarrolla un modelo en particular de una superficie para un sistema fotovoltaico.

En el capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos del modelo integrado desarrollado, y se analiza el comportamiento de un sistema de paneles fotovoltaicos ya construido.

En el capítulo 8 se concluye sobre el trabajo realizado y se plantean los trabajos futuros asociados.

¹ El MPPT o Maximum Power Point Tracker es el encargado de transferir la máxima potencia de un panel de celdas fotovoltaicas hacia los dispositivos de almacenamiento eléctrico (acumuladores) o consumos.

2 Antecedentes Teóricos

2.1 Energía solar [3]

Desde nuestra pequeña perspectiva humana, el Sol es una fuente inagotable de energía. La energía proveniente desde él, que es recibida en la Tierra, es la que permite que exista vida en nuestro planeta. Parte de la energía que llega puede ser aprovechada por el hombre de manera útil. Dicha parte, depende de una gran variedad de factores que determina la radiación que finalmente incide sobre la superficie terrestre. Uno de los principales factores que repercute en la cantidad de energía recibida es la atmósfera del planeta ya que ella actúa como un filtro al flujo energético incidente.

2.1.1 La energía proveniente del Sol

El Sol es una estrella más entre los millones de estrellas que hay en el universo. Su diámetro es de 1.392.000[km] (109 veces el de la Tierra) y su masa equivale a la de unos 300.000 planetas iguales a la Tierra. Se formó hace cinco *billones* de años y todavía durará otros cinco. El Sol está a una distancia media de *tan sólo* 149,5 millones de kilómetros (1[AU]), por lo que los rayos de luz tardan 8 minutos y 17 segundos en viajar a la Tierra desde que lo abandonan.

El Sol es un cuerpo esférico de naturaleza gaseosa que genera energía debido a las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en su zona central. En su núcleo se concentra el 40% de la masa a una temperatura de $1,36 \cdot 10^7$ [°K] y una densidad de $1,411$ [kg/m³]. Saliendo del núcleo, que es donde se producen las reacciones nucleares, se atraviesa una zona intermedia y disminuye la densidad y la temperatura. La capa exterior, con una densidad muy baja, se llama zona convectiva ya que el calor se transmite por convección hasta la superficie.

La superficie es conocida como fotosfera y es visible desde la Tierra. Su estructura es irregular, granulosa y cambiante. Es allí donde se producen las fulguraciones solares y las manchas. Su temperatura se estima en unos $5,8 \cdot 10^3$ [°K]. La parte más externa de la atmósfera solar es conocida como corona.

Las reacciones nucleares que se producen en el Sol, consisten en la transformación de hidrógeno en helio. Cuatro átomos de hidrógeno se convierten en uno de helio. En esta transformación se produce una pérdida de masa y una liberación de energía.

Viendo el Sol como un cuerpo negro de acuerdo a la Ley de Stefan Boltzmann, se tiene que éste irradia un flujo energético por unidad de tiempo y de área (potencia por unidad de área) dado por (2.1).

$$E = \sigma \cdot T^4 \approx 63,3 \left[\frac{MW}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

Donde:

E : flujo energético por unidad de tiempo y de área.

σ : constante de Stefan Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$).

T : temperatura del Sol (cuerpo negro) en $[\text{°K}]$.

Definiendo como *luminosidad solar* a la energía emitida por el Sol por unidad de tiempo (potencia), e integrando sobre toda la superficie solar, se tiene que ella está dada por (2.2).

$$L_S = E \cdot A_{Sol} = \sigma \cdot T^4 \cdot (4 \cdot \pi \cdot r_s^2) \approx 3,65 \cdot 10^{23} [\text{kW}] \quad (2.2)$$

Donde:

L_S : luminosidad solar.

σ : constante de Stefan Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$).

T : temperatura del cuerpo negro en $[\text{°K}]$.

r_s : radio del Sol ($r_s=0,7 \cdot 10^6 [\text{km}]$).

Ahora, un observador en la Tierra, viendo el Sol desde el límite superior de la atmósfera (para poder despreciar los procesos de dispersión y absorción) de manera normal al plano donde se encuentra, se ubica a una distancia $d_{T-S}=1[\text{AU}]$ del Sol, que es la distancia media Tierra-Sol, de acuerdo a la Figura 2.1.

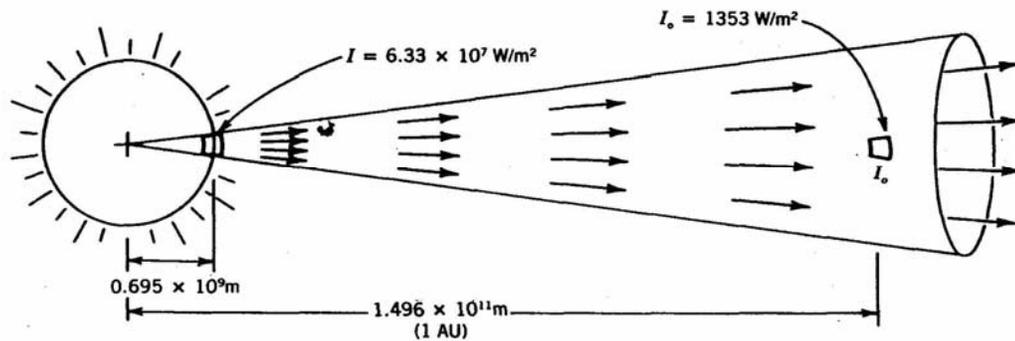


Figura 2.1 Esquema del Sol visto desde el límite superior de la atmósfera terrestre [4]

En virtud de la ley del cuadrado inverso, se tiene que la potencia disminuye con el cuadrado de la distancia de acuerdo a (2.3).

$$I = \frac{L_S}{4 \cdot \pi \cdot (d_{T-S})^2} = 1.353 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.3)$$

Donde:

I : energía por unidad de tiempo y de área a una distancia d_{T-S} del Sol.

L_S : luminosidad solar.

d_{T-S} : distancia entre el Sol y el observador en la Tierra ($d_{T-S}=1[\text{AU}]=149,6 \cdot 10^6 [\text{km}]$).

El valor $I=1.353 [\text{W}/\text{m}^2]$ es conocido como *Constante Solar*.

2.1.2 El espectro solar

El Sol emite radiación electromagnética a lo largo de un gran rango de frecuencia dentro del espectro electromagnético de frecuencias. Dicha radiación viaja a la velocidad de la luz ($c=3 \cdot 10^8 [m/s]$). En la Figura 2.2 se muestra el espectro electromagnético de frecuencias, apreciándose las distintas longitudes de onda asociadas a los distintos tipos de radiaciones. En particular, se distingue la zona del espectro visible, ubicada entre $0,4[\mu m]$ y $0,7[\mu m]$, que es el rango de longitudes de onda que el ojo humano es capaz de ver.

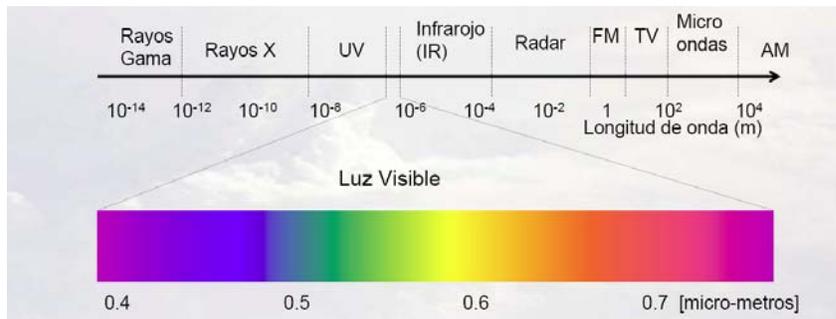


Figura 2.2 Espectro electromagnético de Frecuencias [5]

En la Figura 2.3 se aprecia la distribución del espectro recibido del Sol en la Tierra, asimismo como el emitido por nuestro planeta. En ella se aprecia que gran parte de la energía se encuentra en la región del espectro visible (debido al filtrado que produce la atmósfera). Antes de la acción de la atmósfera se tiene que entre la región *Visible* y la región *IR* se encuentra casi toda la energía del espectro. Sólo una pequeña parte viene en la zona UV del espectro.

En la misma figura, se tiene que la radiación que emite la Tierra es de una mayor longitud de onda que la del Sol. Es por lo anterior que radiación electromagnética (REM) proveniente del Sol es conocida como *Radiación de Onda Corta*, mientras que la REM proveniente de la Tierra es llamada *Radiación de Onda Larga*.

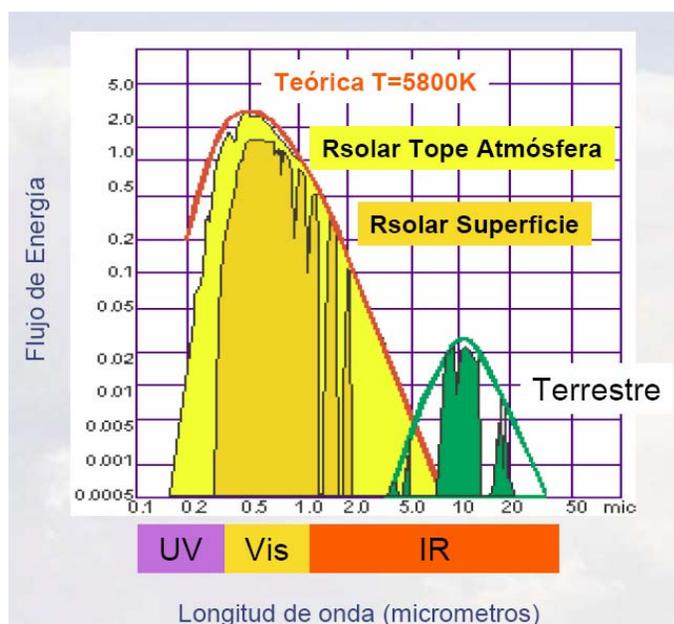


Figura 2.3 Distribución del espectro electromagnético sobre la Tierra [5]

La energía transmitida en la REM viene contenida en los fotones que forman los haces de luz. Se tiene que la energía asociada a cada fotón viene dada por (2.4) y (2.5).

$$E_F = h \cdot \nu \quad (2.4)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.5)$$

Donde:

- E_F : energía asociada a cada fotón.
- h : constante de Planck ($h=6,626 \cdot 10^{-19}$ [J·m]).
- ν : frecuencia de cada fotón.
- c : velocidad de la luz.
- λ : longitud de onda de cada fotón.

De (2.5) se deduce que la energía contenida en un fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda.

2.1.3 La radiación solar en la Tierra

La radiación solar que llega a la Tierra se ve afectada por un conjunto de factores agrupados en dos tipos: geométricos (astronómicos y geográficos), y atmosféricos. Los primeros inciden sólo en la radiación que se tiene en el tope de la atmósfera, mientras que los segundos afectan a los rayos incidentes provenientes del Sol que la traspasan y llegan a la superficie terrestre.

2.1.3.1 Radiación solar en el tope de la atmósfera terrestre

Previo a que los rayos solares penetren la atmósfera, se tienen los siguientes tipos de radiación.

1. Constante Solar

Corresponde a la irradiancia (deducida en la sección 2.1.1) sobre un plano ubicado en el tope de la atmósfera sobre el cual los rayos solares inciden normalmente. La constante solar es calculada cuando la distancia Tierra-Sol es $d_{T-S}=1[AU]=149,5 \cdot 10^6 [km]$, que corresponde a la distancia promedio Tierra-Sol. El valor de la constante solar I_0 viene dado por (2.6).

$$I_0 = 1.353 \left[\frac{W}{m^2} \right] = 135,3 \left[\frac{mW}{cm^2} \right] \quad (2.6)$$

2. Radiación Extraterrestre

Corresponde a la irradiancia sobre un plano ubicado en el tope de la atmósfera sobre el cual los rayos solares inciden normalmente, pero a diferencia de la constante solar, la radiación extraterrestre incluye la variación de la distancia Tierra-Sol durante el año. Ella viene dada por (2.7).

$$I_E = I_0 \left(1 + 0,034 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot N}{365,25} \right) \right) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

I_E : radiación extraterrestre.

I_0 : constante solar.

N : día juliano del año.

3. Radiación extraterrestre sobre un plano horizontal

Considérese una superficie plana justo por encima de la atmósfera y paralela a la superficie de la tierra debajo de ella de acuerdo a la Figura 2.4.

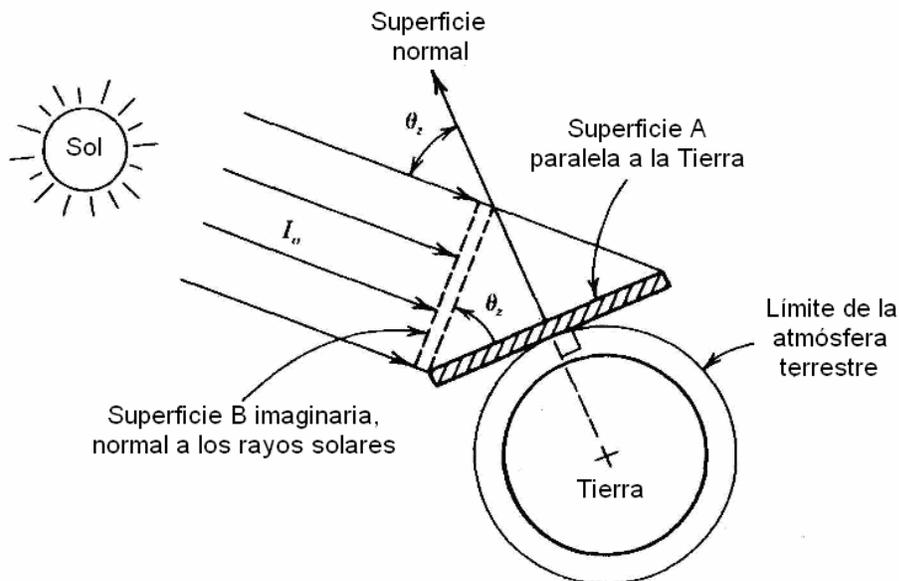


Figura 2.4 Superficie horizontal sobre el tope de la atmósfera [4]

La radiación extraterrestre sobre dicho plano horizontal viene dada por (2.8).

$$I_{EH} = I_E \cdot \cos(\theta_z) \quad (2.8)$$

Donde:

I_{EH} : radiación extraterrestre sobre el plano horizontal.

I_E : radiación extraterrestre.

θ_z : ángulo cenital (ver Figura 2.4).

2.1.3.2 Radiación solar en la superficie terrestre

Una vez que los rayos solares penetran la atmósfera, se distinguen los siguientes tipos de radiación.

1. Radiación Directa I_B

Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

2. Radiación Difusa I_D

Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta es la denominada radiación difusa. Ella va en todas direcciones como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes, sino que de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque sólo ven la mitad.

3. Radiación Reflejada I_R

La radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, conocido como albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben. Las superficies oblicuas reciben una cantidad intermedia entre los dos casos anteriores.

4. Radiación Global I_G

Ella corresponde simplemente a la suma de las tres radiaciones anteriores dada por (2.9).

$$I_G = I_B + I_D + I_R \quad (2.9)$$

En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado casi no existe radiación directa y casi la totalidad de la radiación que incide es difusa.

2.1.4 Factores atmosféricos influyentes sobre la radiación solar

Como se mencionó en la sección 2.1.3, la radiación solar que llega a la Tierra es afectada por la atmósfera. En esta sección se revisan las características de la atmósfera, así como los principales procesos que afectan la radiación solar que llega a la superficie terrestre, junto con el concepto de *Masa de Aire*.

2.1.4.1 Estructura de la atmósfera [6]

La atmósfera terrestre está dividida en 4 capas, las cuales son.

1. Tropósfera

Es la zona más baja de la atmósfera cuya altura llega hasta los 12[km] aproximadamente. En ella se producen todos los fenómenos meteorológicos. Contiene la mayor proporción de vapor de agua, lo que permite mantener el calor emergente de la superficie terrestre.

2. Estratósfera

Es la capa que se encuentra entre los 12[km] y 90[km] de altura. En ella se encuentra la capa de Ozono (O_3) que es la que protege a la tierra del exceso de los rayos ultravioletas provenientes del Sol. Las cantidades de O_2 y CO_2 son casi nulas en esta capa, y la proporción de hidrógeno aumenta.

3. Ionósfera

Es la capa que se encuentra entre 90[km] y 1.100[km] de altura. En ella se encuentra la capa de iones de la atmósfera, que es la que permite realizar las transmisiones de radio y televisión. El gas que predomina en la Ionósfera es el hidrógeno.

4. Exósfera

Es la capa externa de la atmósfera terrestre, por sobre la Ionósfera. Está compuesta principalmente de hidrógeno y helio, y las partículas van disminuyendo hasta desaparecer. Debido a la baja atracción gravitacional algunas de ellas pueden escaparse de la exósfera.

2.1.4.2 El concepto de *masa de aire*

En astronomía, la *masa de aire óptica* o simplemente *masa de aire* corresponde al recorrido óptico a través de la atmósfera de la Tierra por la luz proveniente de un cuerpo celeste. A medida que ella la atraviesa, se ve atenuada por la dispersión y la absorción que se produce. Mientras más atmósfera el rayo de luz deba recorrer, mayor es la atenuación. Así, los cuerpos celestes en el horizonte parecen menos brillantes que cuando se ubican más cercanos al zenit. La atenuación descrita también se conoce como *extinción atmosférica*.

Normalmente la masa de aire indica una masa de aire relativa. Por definición, el largo del camino que recorre un rayo de luz cuando el Sol se encuentra en el zenit, corresponde a masa de aire 1. La masa de aire se incrementa a medida que aumenta el ángulo cenital, alcanzando un valor de aproximadamente 38 cuando el sol se encuentra en el horizonte. Además, la masa de aire puede tomar valores menores a 1, por ejemplo, incrementando la altura desde el nivel de referencia. La intensidad sobre la atmósfera (inmediatamente cuando “se acaba”) se define como “*masa de aire cero*”.

La notación para la masa de aire utilizada es AM_m , donde AM viene de “Air Mass”, y la letra m denota el valor de la masa de aire. Por ejemplo, AM_0 denota la masa de aire cero y $AM_{1.5}$ denota la masa de aire 1.5.

Dada la definición de masa de aire, su valor se puede calcular de manera muy simple de acuerdo a la fórmula (2.10), la cual es válida para ángulos tales que $|\theta_z| < \sim 85[^\circ]$.

$$m = \sec(\theta_z) \quad (2.10)$$

Donde:

- m : valor de la masa de aire.
- θ_z : ángulo cenital (ver Figura 2.5).

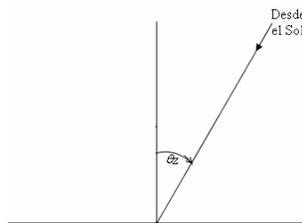


Figura 2.5 Ángulo cenital

La masa de aire, a través de la cual atraviesan los rayos solares, repercute en el espectro de dichos rayos debido a los procesos de dispersión y absorción. Se aprecia dicho comportamiento en la Figura 2.6 para algunas masas de aire.

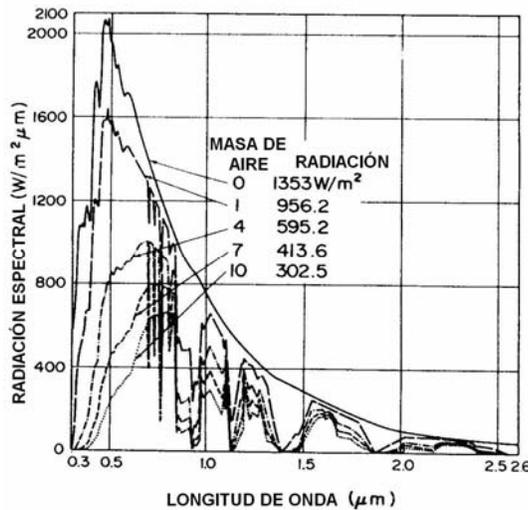


Figura 2.6 Respuesta espectral de la irradiancia para distintas masas de aire [4]

2.1.4.3 Absorción por gases atmosféricos

La atmósfera se encuentra compuesta por distintos componentes, siendo el más preponderante el nitrógeno. Además de la diversidad de componentes por la que está formada, la concentración de éstos varía según se altura. En la Figura 2.7 se aprecian los constituyentes de la atmósfera terrestre a distintas alturas.

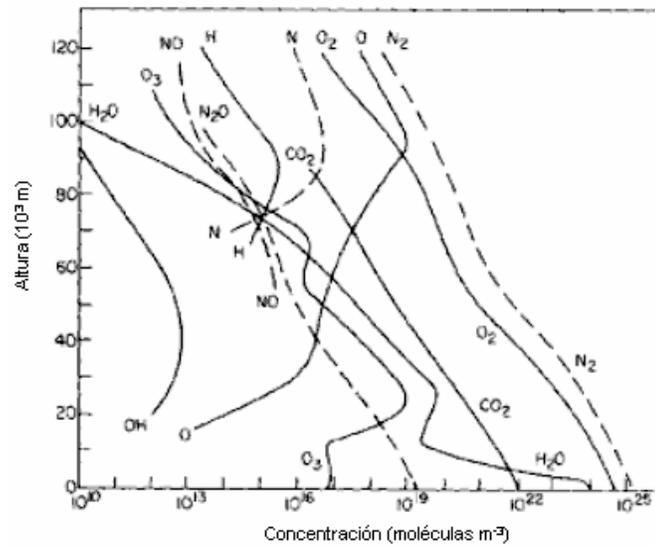


Figura 2.7 Presencia de componentes de la atmósfera a distintas alturas [7]

En cada una de las 4 capas de la atmósfera, y de acuerdo a la distribución de las componentes dentro de ella, se tiene que parte de los rayos solares incidentes son absorbidos por los gases atmosféricos. Cada componente absorbe una distinta longitud de onda de la radiación electromagnética emitida por el Sol, lo cual se aprecia en la Figura 2.8.

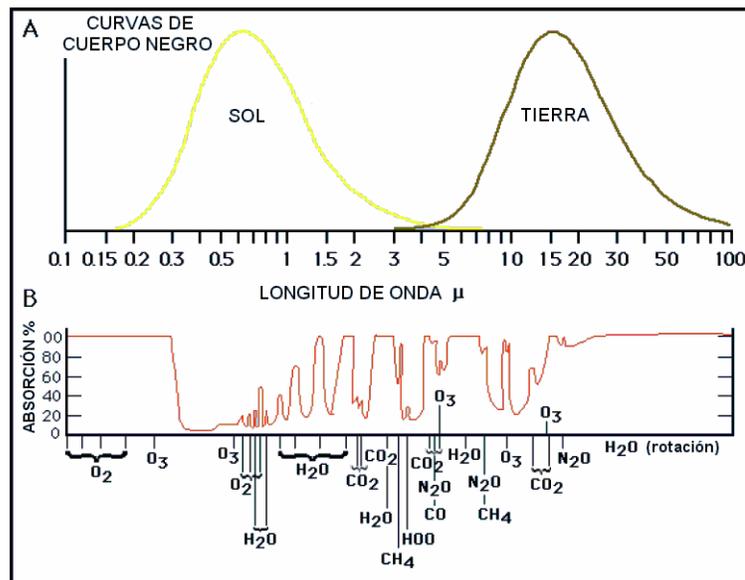


Figura 2.8 Absorción de las distintas longitudes de onda del espectro solar [5]

En la Figura 2.8 se aprecia que la radiación UV, en la banda de ubicada entre $100[\mu m]$ y $400[\mu m]$, es absorbida casi en su totalidad por O_2 y O_3 , a diferencia de lo que sucede en el rango del espectro de la luz visible, en donde la absorción se da sólo en bandas.

Además de los gases propios de la atmósfera, se tiene que otro causante de absorción de REM corresponde al material particulado en la atmósfera. En la Figura 2.9 se aprecia su presencia según sus dimensiones y su ubicación.

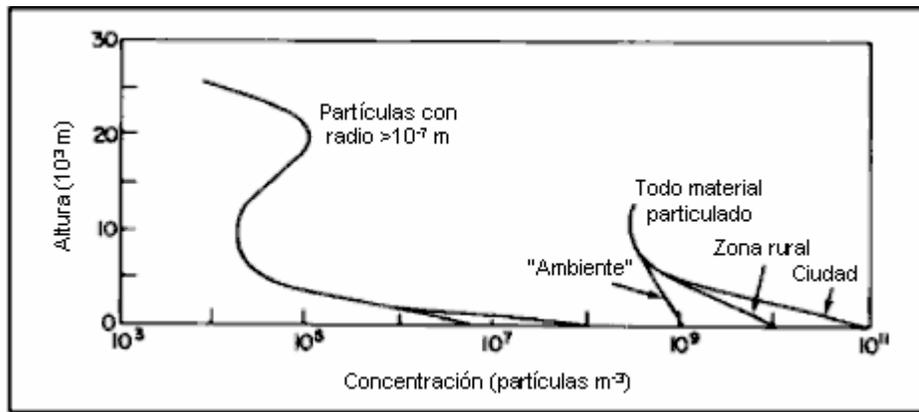


Figura 2.9 Presencia de material particulado en la atmósfera para distintas alturas [7]

2.1.4.4 Dispersión de los rayos solares

Otro importante proceso causado por la atmósfera es la dispersión de los rayos solares debido tanto a la difusión molecular como la difusión por aerosoles.

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviarla. Este proceso es conocido como dispersión. La dispersión ocurre cuando un fotón se encuentra con un obstáculo en su camino, el cual sólo hace que el fotón cambie la dirección de su recorrido, sin ser absorbido. La dispersión depende de la longitud de onda, en el sentido de que mientras más corta sea ésta, mayor será la dispersión. Moléculas de gas con tamaños relativamente pequeño comparadas con la longitud de onda causan que la radiación incidente se disperse en todas las direcciones, hacia adelante y hacia atrás, este fenómeno es conocido como *dispersión de Rayleigh*. Aerosoles cuyos tamaños son comparables o exceden a las longitudes de onda de la radiación incidente, hacen que ésta no se disperse en todas las direcciones de manera igual, sino que mayormente hacia adelante, fenómeno llamado *dispersión de Mie* [8].

El proceso de la dispersión explica por qué un área con sombra o un lugar sin luz solar está iluminada: ella recibe la radiación difusa, la cual parece venir desde toda la bóveda celeste.

Los gases de la atmósfera dispersan más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que las longitudes de onda más largas (naranja y rojo), lo que se aprecia en la Figura 2.10.

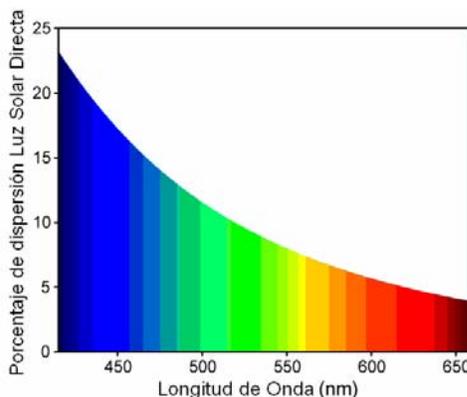


Figura 2.10 Dispersión de la luz solar según su longitud de onda [9]

La *dispersión de Rayleigh* explica el color azul del cielo durante el día y los tonos rojizos del amanecer y atardecer. La *dispersión de Rayleigh* es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda λ , lo cual significa que la longitud de onda más corta de la luz azul se dispersará más que las longitudes de onda más largas de la luz amarilla y roja, lo cual da al cielo su apariencia azul. Por el contrario, cuando se observa el Sol directamente, lo que se aprecia son los colores que no fueron dispersados, siendo ellos los asociados a las longitudes de onda como las del amarillo y rojo. A su vez, cuando el Sol está cerca del horizonte, el rayo de luz debe recorrer un volumen de aire mucho mayor al que recorre cuando el Sol se encuentra lejos del horizonte, haciendo que casi toda la luz azul sea dispersada antes de llegar al observador. Es por eso que la luz reflejada por las nubes o la difundida por las capas brumosas hacia el observador aparece rojiza durante atardeceres y amaneceres [9].

En la Figura 2.11 aprecia el comportamiento típico de la absorción provocada por la atmósfera.

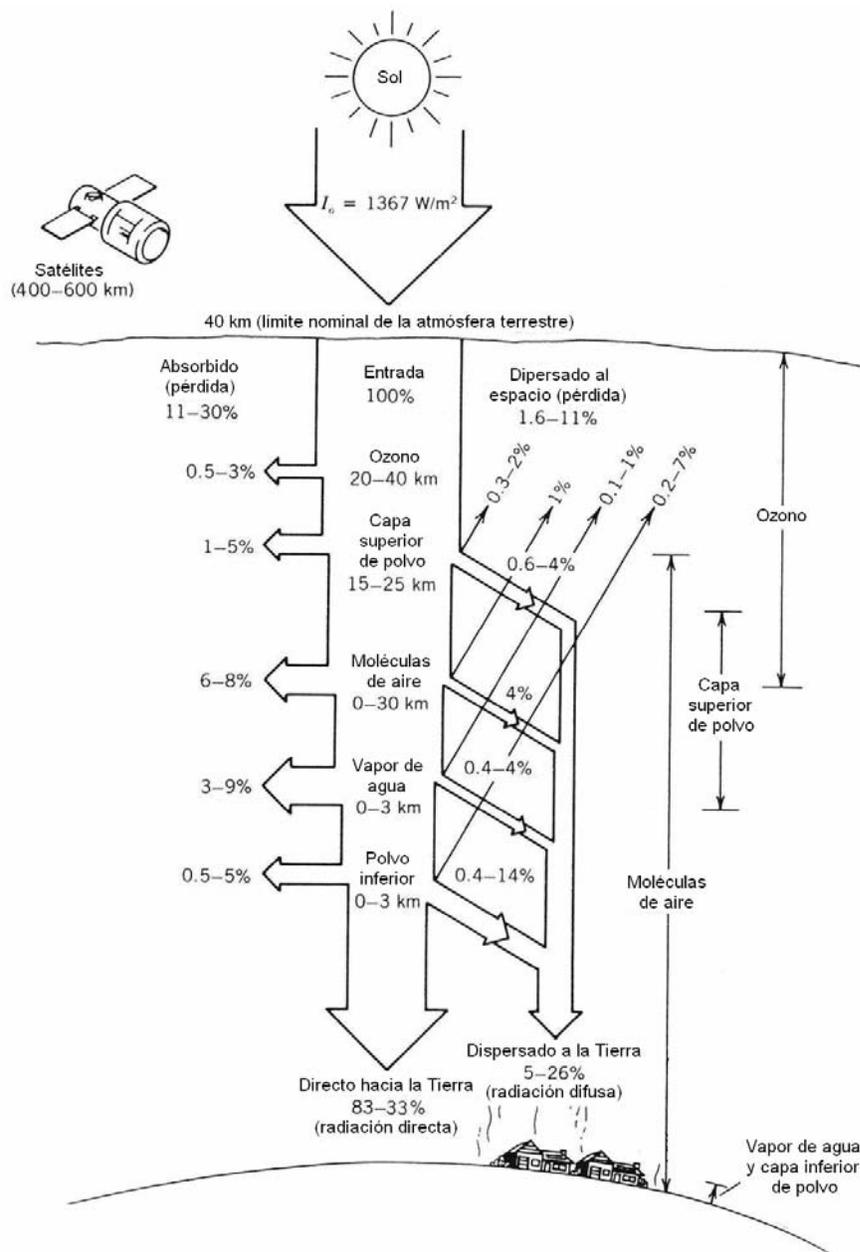


Figura 2.11 Rango típico de absorción y dispersión de los rayos solares [4]

2.1.5 Sistemas de coordenadas

Los factores geométricos que repercuten sobre la radiación solar dependen tanto del lugar sobre la Tierra en el que uno se encuentre, como de la posición del Sol durante el intervalo de observación. Para poder ubicar al Sol en el espacio y la posición del observador sobre la Tierra es necesario utilizar algún sistema de coordenadas. Los más utilizados son los siguientes.

2.1.5.1 Coordenadas horizontales

Las coordenadas horizontales son un sistema de coordenadas celestes referidas al horizonte del observador y a su vertical.

Para determinar la posición de una estrella en coordenadas horizontales, un observador deberá medir su altura, que es la distancia angular desde el horizonte hasta la estrella. En segundo lugar, tendrá que determinar el ángulo que forma la estrella con una dirección que se toma como origen. Generalmente el sur (en astronomía) o el norte (en navegación) medida sobre el horizonte y en sentido horario. Dicho ángulo es el azimut.

Las coordenadas horizontales dependen del observador, es decir, que en un mismo momento, un astro se observa bajo coordenadas horizontales diferentes por observadores diferentes situados en puntos diferentes de la Tierra, por lo que dichas coordenadas son locales.

Para explicar el sistema de coordenadas horizontales se considera en primer lugar la Figura 2.12.

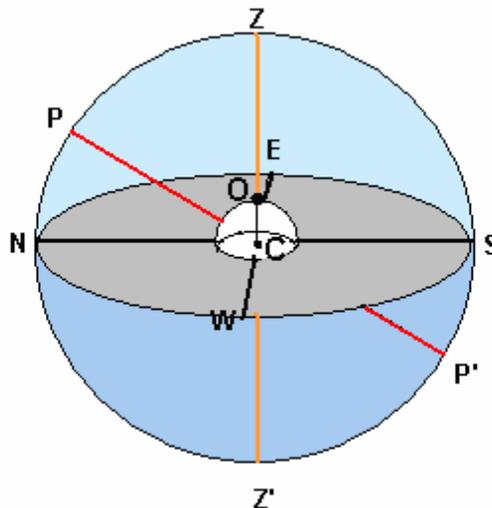


Figura 2.12 Desarrollo Coordenadas Horizontales [10]

Sea C el centro común de las esferas terrestre y celeste (Figura 2.12). Se señala un punto O sobre la superficie terrestre, tal que OC es la vertical de plomada en O. En O se encuentra el observador.

La prolongación de OC corta a la esfera celeste en los puntos Z y Z', *zenit* y *nadir* de O respectivamente. La línea ZZ' es la vertical del observador, o vertical simplemente.

Imaginar por C un plano perpendicular a ZZ' que corta a la esfera celeste en el círculo máximo SWNE, el horizonte astronómico de O. Siempre que se hable de horizonte se entenderá horizonte astronómico, salvo que se indique lo contrario.

La prolongación del eje terrestre da los puntos P y P', los polos de la esfera celeste. PP' es el eje del movimiento diurno. La rotación de la Tierra hace que la esfera celeste se mueva aparentemente en torno a dicho eje.

Las proyecciones de P y P' en el horizonte son los puntos N (Norte) y S (Sur), y la perpendicular a la línea NS por C, en el plano del horizonte, dan el Este E y Oeste W.

La vertical del observador ZZ' , su horizonte SWNE y el punto Sur S, son el sistema de referencia de las coordenadas horizontales.

Ahora considérese la Figura 2.13, en donde la Tierra será reducida al punto C en el centro de la esfera celeste.

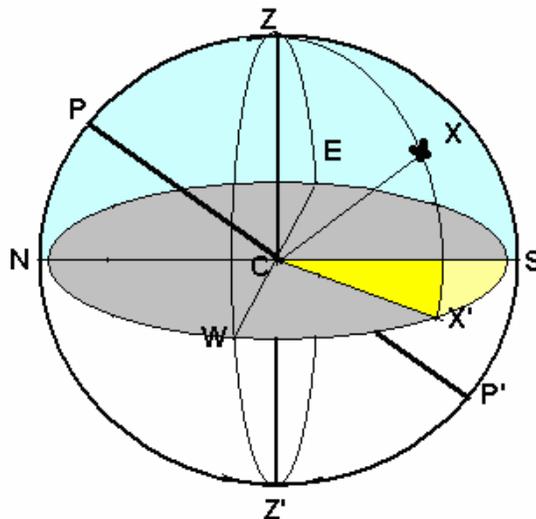


Figura 2.13 Desarrollo Coordenadas Horizontales 2 [10]

La vertical ZZ' es una línea y determina infinitos planos perpendiculares al del horizonte. Cada uno de esos planos corta a la esfera celeste en los círculos verticales, o simplemente los verticales que pasan siempre por el cenit y el nadir. La vertical es siempre la línea ZZ' , mientras que el vertical es uno de los círculos verticales.

De los infinitos verticales se destacan dos:

Meridiano: el vertical $PZSZ'$ que contiene a los polos corta al horizonte en los puntos cardinales Norte N y Sur S. La parte del meridiano que contiene al cenit Z, es el meridiano superior PZP' , y la que contiene al nadir Z' , es el meridiano inferior $P'Z'P'$. La intersección del Meridiano con el plano del horizonte es la línea meridiana que corta a la esfera celeste en los puntos cardinales N y S.

Primer vertical: el vertical $ZEZ'W$, perpendicular al meridiano, cuya intersección con el horizonte determina los puntos Este E y Oeste W. La intersección del Primer vertical con el plano

del horizonte es la línea perpendicular que corta a la esfera celeste en los puntos cardinales E y W.

Las líneas meridiana y perpendicular forman un sistema de referencia perpendicular que apunta a los cuatro puntos cardinales.

La rotación aparente de la esfera celeste de eje PP' hace que los astros surjan por el Este, (en realidad sólo salen por el este si su declinación es cero) se eleven y alcancen su máxima elevación en el meridiano superior (culminación), para después descender y ponerse por el Oeste (ocaso). Siguen su camino por debajo del horizonte y no se ven hasta que al día siguiente en que amanecen de nuevo (orto).

Ahora, sea X un astro de la esfera celeste, CX su dirección, y CX' la proyección de de ésta en el plano del horizonte (ver Figura 2.13). Se definen:

La Altura de X (h o a) es el ángulo XCX', es decir, el ángulo formado por su dirección y el horizonte. También se puede considerar a la altura como el arco XX'. La altura es positiva sobre el horizonte, y negativa por debajo de él, en cuyo caso se llama también depresión. Así la altura del cenit vale 90° , y la depresión del nadir es de -90° .

El Azimut de X (A) es el ángulo SCX', es decir el ángulo formado por CX' y la dirección Sur. El azimut, referido al punto Sur, es positivo en el sentido SWNE, que corresponde al movimiento aparente de la bóveda celeste.

También existen se puede utilizar como convención el azimut referido desde el punto Norte N, caso en el cual el sentido positivo es NESW.

La altura y el azimut son las coordenadas horizontales de X.

El ángulo ZCX es la **distancia cenital** de X, su distancia angular al polo, denotada por z . Claramente se tiene que la altura y la distancia cenital son complementarias.

La distancia angular del polo al horizonte es la altura del polo, ángulo PCN para el Hemisferio Norte, y P'CS para el Hemisferio Sur, es la latitud del lugar dónde se encuentra el observador O.

2.1.5.2 Coordenadas ecuatoriales

Las coordenadas ecuatoriales son un tipo de coordenadas celestes que determinan la posición de un objeto en la esfera celeste respecto al ecuador celeste y al equinoccio vernal. Se denominan **Declinación** y **Ascensión Recta** y son equivalentes a la latitud y longitud geográficas. También es posible utilizar otra coordenada en este sistema conocida como **Ángulo Horario**. Ella es similar a la Ascensión Recta, pero está referida a la Tierra en vez del equinoccio vernal. Si se utilizan esta última coordenada, la posición de un objeto queda determinada por la Declinación y Ascensión Recta.

El Sol, debido al movimiento real de la Tierra, describe una trayectoria aparente sobre la esfera celeste denominada, al igual que el plano que la contiene, eclíptica. A la línea perpendicular a dicho plano se le llama Eje de la eclíptica, mientras que oblicuidad de la eclíptica es el ángulo que forma la eclíptica con el ecuador celeste.

La línea de equinoccios es la intersección del Ecuador con la Eclíptica. La intersección de esta línea con la esfera celeste son los puntos equinocciales. Se llama punto vernal o punto Aries.

En este sistema de coordenadas, las referencias fundamentales son el equinoccio vernal, o Punto Aries, para la Ascensión Recta y el ecuador celeste, para la Declinación.

El equinoccio vernal es el punto de intersección de la eclíptica con el plano ecuatorial celeste por donde el Sol pasa de Sur a Norte de dicho plano en su movimiento aparente por la eclíptica.

El ecuador celeste es el círculo que resulta de la intersección del plano ecuatorial terrestre con la esfera celeste. Ésta y la Tierra son concéntricas. Prolongando el eje de rotación de la Tierra se tiene el Eje del mundo, o eje de rotación del movimiento diurno.

La línea de equinoccios (eje x), el diámetro ecuatorial perpendicular (eje y) y el eje del mundo (eje z), forman el triedro donde se representan las coordenadas rectilíneas ecuatoriales.

La **ascensión recta**, abreviadamente AR, es el ángulo, medido sobre el ecuador celeste, abarcado entre el Punto Aries (equinoccio vernal) y el círculo horario o meridiano que pasa por el objeto observado. Equivale a la longitud geográfica. Su sentido positivo es el antihorario, el mismo de la rotación terrestre vista desde el polo Norte. Sus unidades son las angulares, expresadas en horas: 24 horas corresponden a 360° .

El círculo horario o meridiano celeste de un astro es el círculo máximo que pasa por el astro y los polos celestes.

El **ángulo horario** es el ángulo contado desde el punto de intersección del ecuador con el meridiano del observador hasta el círculo horario del objeto, en sentido horario. El ángulo horario puede ser medido tanto en horas como grados. Considerando que en un día (24 horas) la Tierra completa una vuelta sobre sí misma (360°), se tiene que una hora equivale a 15° .

La **declinación** es el ángulo que forman el ecuador celeste y el objeto. Para objetos situados entre el ecuador y el polo norte, la declinación es positiva y, en caso contrario, negativa. La declinación se denota con δ generalmente. Equivale a la latitud geográfica.

En la Figura 2.14 se destacan en rojo las coordenadas ecuatoriales. La eclíptica en amarillo. El Sol (no representado) se mueve aparentemente por la eclíptica en sentido antihorario, y en el primer punto de Aries pasa al norte del ecuador celeste, en azul. Dicho momento corresponde a la primavera del hemisferio Norte. Seis meses después, cuando se llega al Punto Libra sucede lo contrario, llegando el otoño en el Norte. Lo contrario sucede en el hemisferio Sur.

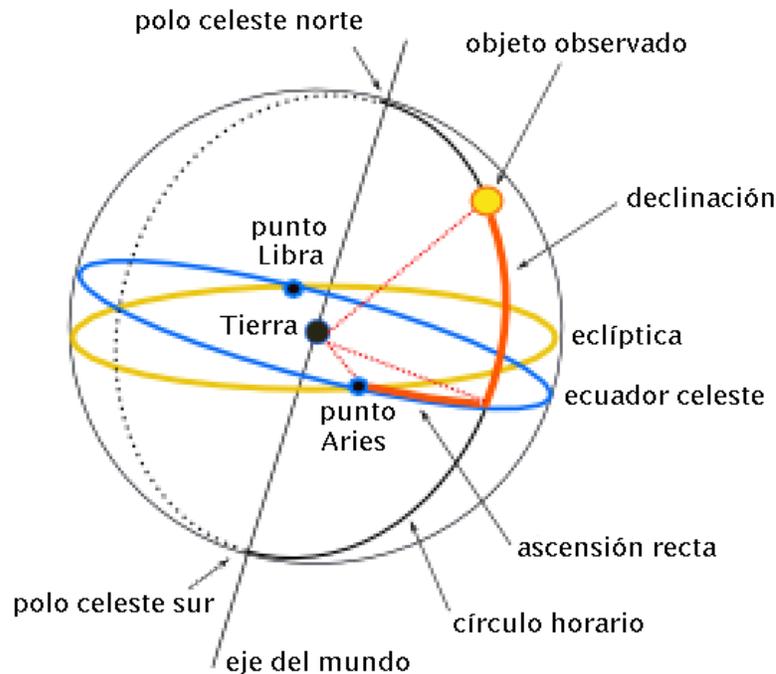


Figura 2.14 Coordenadas Ecuatoriales [11]

2.1.6 Factores geométricos influyentes sobre la radiación solar

Los factores geométricos más influyentes sobre la radiación solar recibida en la Tierra son los siguientes:

1. Latitud

Ángulo entre cualquier punto de la superficie terrestre y el ecuador de ésta. Se mide entre 0° y $+90^\circ$ en el hemisferio norte, y entre 0° y -90° en el hemisferio sur.

2. Longitud

Ángulo entre cualquier punto de la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich. Se mide entre 0° y $+180^\circ$ hacia el este del meridiano de Greenwich, y entre 0° y -180° hacia el oeste del meridiano de Greenwich.

La latitud y longitud definen la ubicación de un lugar determinado en la Tierra.

3. Eclíptica

Corresponde al plano que contiene la órbita de la Tierra alrededor del Sol, y también, a la línea aparentemente recorrida por el Sol a lo largo de un año.

4. Ecuador Celeste

Es la proyección del ecuador terrestre sobre la esfera celeste en el espacio.

5. Azimut del Sol

Corresponde al ángulo medido sobre el horizonte que forman el punto cardinal Norte o Sur (según la referencia utilizada) y la proyección vertical del Sol sobre el horizonte.

6. Altura del Sol

Corresponde al ángulo formado entre el horizonte terrestre y el Sol que ve un observador.

7. Ángulo horario

Es el que determina la posición del Sol con respecto al eje terrestre. El ángulo horario vale cero al mediodía solar (momento en que el Sol se encuentra en la cima de su recorrido), y toma valores negativos antes de mediodía y positivos después de mediodía.

8. Azimut del plano

Corresponde al ángulo formado entre la proyección de la normal del plano sobre la horizontal del lugar y la dirección sur o norte, de acuerdo a la convención que se utilice.

9. Ángulo de inclinación del plano

Corresponde al ángulo formado entre el plano y la superficie (horizontal) terrestre.

10. Día del año

Para cada día del año se tiene una distinta posición del Sol. Los días se miden utilizando el sistema Juliano, donde los días van desde $N=1$ (1 de enero) hasta $N=365$ (31 de diciembre). En años bisiestos, se llega hasta $N=366$.

Conocidas todas las variables anteriores para un determinado lugar y momento, es posible calcular el ángulo que finalmente define la radiación solar directa sobre un plano, el que corresponde al ángulo formado entre la normal del plano y el rayo proveniente del Sol.

2.1.7 Modelos de radiación solar

Si bien la radiación solar extraterrestre puede ser determinada con certeza, determinar la radiación sobre la Tierra es más complicado debido, principalmente, a la acción de la atmósfera. Para realizar lo anterior se han desarrollado numerosos modelos, algunos más complicados y elaborados que otros. Algunos de los modelos realizados utilizan una gran cantidad de datos para poder determinar la radiación solar sobre un lugar en particular. En esta sección se revisarán algunos modelos disponibles en la literatura para determinar la radiación solar.

2.1.7.1 Modelo de Perrin de Brichambaut [6]

Este es un modelo empírico de radiación solar para cielo despejado, publicado por Perrin de Brichambaut en el año 1982. De acuerdo a este modelo, las componentes directa y difusa de la radiación vienen dadas de acuerdo a las ecuaciones (2.11) y (2.12).

$$I_B = A \cdot e^{\left(\frac{-1}{B \cdot \sin(h+C)}\right)} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.11)$$

$$I_D = 125 \cdot K \cdot (\sin(h))^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.12)$$

Donde:

- I_B : radiación solar directa.
- I_D : radiación solar difusa.
- A, B, C, K : constantes del modelo.
- h : altura solar.

Las constantes del modelo dependen del tipo de cielo que se considere. Ellas se aprecian en la Tabla 2.1.

Constante	Cielo Claro	Cielo Normal	Cielo Poluto
A	1210	1230	1260
B	6	3,8	2,3
C	1	1,6	3
K	0,75	1	1,33

Tabla 2.1 Constantes modelo de radiación solar de Perrin de Brichambaut

La radiación total viene dada por (2.13).

$$I_G = I_B \cdot \sin(h) + I_D \quad (2.13)$$

Donde:

- I_G : radiación solar total.
- I_B : radiación solar directa.
- I_D : radiación solar difusa.
- h : altura solar.

Si bien este modelo es muy simple, fácil de implementar, y se ajusta muy bien a la realidad en condiciones medias, dado que no se define claramente qué es cielo claro, cielo normal y cielo poluto, no se tiene claridad respecto de cuáles coeficientes utilizar en un determinado caso [12].

2.1.7.2 Modelo de Burridge & Gadd [13]

La radiación solar total incidente se puede estimar a partir de la radiación solar en el tope de la atmósfera mediante.

$$I_G = I_0 \cdot T_K \cdot \sin(h) \quad (2.14)$$

Donde:

I_G : radiación solar total.

I_0 : constante solar.

T_K : transmisividad.

h : complemento del ángulo cenital (altura solar).

Este modelo permite calcular la radiación solar incidente considerando la existencia de nubosidad. Para ello se calcula la transmisividad T_K que depende del tipo de nubosidad existente de acuerdo a (2.15).

$$T_K = (0,6 + 0,2 \cdot \sin(h)) \cdot (1 - 0,4 \cdot \sigma_{C_H}) \cdot (1 - 0,7 \cdot \sigma_{C_M}) \cdot (1 - 0,4 \cdot \sigma_{C_L}) \quad (2.15)$$

Donde:

T_K : transmisividad.

h : complemento del ángulo cenital (altura solar).

σ_{C_H} : fracción de cielo cubierto por nubosidad alta.

σ_{C_M} : fracción de cielo cubierto por nubosidad media.

σ_{C_L} : fracción de cielo cubierto por nubosidad baja.

2.1.7.3 Modelo de Ashrae [14]

Este es un modelo ampliamente utilizado tanto en el campo de la ingeniería como en el de la arquitectura. La radiación directa se calcula de acuerdo a la ecuación (2.16).

$$I_B = (C_n) \cdot A \cdot e^{(-B \cdot \sec(\theta_z))} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.16)$$

Donde:

I_B : radiación solar directa.

C_n : número de claridad.

A : irradiancia extraterrestre aparente (ver Tabla 2.2).

B : coeficiente de atenuación atmosférica (ver Tabla 2.2).

θ_z : ángulo cenital.

Los valores de los parámetros del modelo se tienen en la Tabla 2.2 [15].

Fecha	A	B	C
21 Ene	1230	0,142	0,058
21 Feb	1215	0,144	0,060
21 Mar	1186	0,156	0,071
21 Abr	1136	0,180	0,097
21 May	1104	0,196	0,121
21 Jun	1088	0,205	0,134
21 Jul	1085	0,207	0,136
21 Ago	1107	0,201	0,122
21 Sep	1152	0,177	0,092
21 Oct	1193	0,160	0,073
21 Nov	1221	0,149	0,063
21 Dic	1234	0,142	0,057

Tabla 2.2 Valores de A, B y C modelo de Ashrae [14]

Los valores de C_n (para EEUU) pueden ser obtenidos desde el libro de aplicaciones de Ashrae [15].

La ecuación (2.16) ha sido desarrollada para las condiciones existentes a nivel del mar. Para otras presiones atmosféricas, se tiene (2.17).

$$I_B = (C_n) \cdot A \cdot e^{\left(-B \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \sec(\theta_z)\right)} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.17)$$

Donde:

- I_B : radiación solar directa.
- C_n : número de claridad.
- A : irradiancia extraterrestre aparente (ver Tabla 2.2).
- B : coeficiente de atenuación atmosférica (ver Tabla 2.2).
- θ_z : ángulo cenital.
- p : presión atmosférica en el lugar de medición (en [mbar]).
- p_0 : presión atmosférica a nivel del mar (1.013,25[mbar]).

En la ecuación (2.17) el término $(p/p_0) \cdot \sec(\theta_z)$ aproxima la masa de aire, bajo los supuestos que la curvatura de la Tierra y el efecto de la refracción son despreciables.

La radiación difusa viene dada de acuerdo a la siguiente expresión.

$$I_D = C \cdot I_B \quad (2.18)$$

Donde:

- I_D : radiación difusa.
- I_B : radiación directa.
- C : coeficiente de difusión (ver Tabla 2.2).

La radiación total finalmente viene dada por (2.19).

$$I_G = I_B \cdot \cos(\theta_z) + I_D$$

$$I_G = I_B \cdot (\cos(\theta_z) + C) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.19)$$

Donde:

- I_G : radiación solar total.
- I_B : radiación solar directa.
- I_D : radiación solar difusa.
- C : coeficiente de difusión (ver Tabla 2.2).
- θ_z : ángulo cenital.

2.1.7.4 Modelo de Spokas & Forcella [16]

Este modelo, a diferencia de los modelos de *Perrin de Brichambaut* y de *Ashrae*, permite calcular la radiación incidente sobre un lugar bajo condiciones de nubosidad con pocos datos, a diferencias de la gran mayoría de los modelos que incluyen nubosidad en el cielo. Este modelo supone una correlación entre la temperatura del lugar (la máxima variación diaria de la temperatura) y la nubosidad presente.

La radiación directa viene dada por (2.20).

$$I_B = I_0 \cdot (\tau_T)^m \quad (2.20)$$

Donde:

- I_B : radiación solar directa.
- I_0 : constante solar.
- τ_T : transmitancia atmosférica (corregida por temperatura).
- m : masa de aire óptica.

La masa de aire óptica m se puede estimar por la relación dada en (2.21).

$$m = \frac{P_a}{101,3 \cdot \cos(\psi)} \quad (2.21)$$

Donde:

- m : masa de aire óptica.
- P_a : presión atmosférica en [kPa].
- ψ : ángulo cenital.

A su vez, la presión atmosférica media se puede estimar mediante (2.22).

$$P_a = 101,3 \cdot e^{\left(\frac{-g}{8200}\right)} \quad (2.22)$$

Donde:

P_a : presión atmosférica en [kPa].

a : elevación del lugar en [m].

La transmitancia atmosférica τ_T corresponde al porcentaje de la radiación directa que penetrará la atmósfera sin ser dispersada. Las nubes son la principal variable que determina la cantidad de radiación directa que llega a la superficie terrestre. A su vez, el rango de variación de las temperaturas extremas diarias se asume, en este modelo, como un importante factor para determinar la presencia o ausencia de nubes junto con la precipitación. Los valores de la transmitancia atmosférica τ , que permiten determinar τ_T se establecen en la Tabla 2.3 de acuerdo a las reglas descritas en ella.

Condiciones de precipitación		Transmitancia atmosférica τ
Presente en el día actual	Presente en el día anterior	
NO	NO	0,7
NO	SI	0,6
SI	NO	0,4
SI	SI	0,3

Tabla 2.3 Valores de τ de acuerdo a condiciones de precipitación [16]

Una vez que se determina el valor de τ , se obtiene τ_T de acuerdo a (2.23).

$$\tau_T = \begin{cases} \tau & \text{si } \Delta T = T_{MAXaire} - T_{MINaire} > 10 \\ \tau / (11 - \Delta T) & \text{si } \Delta T \leq 10 \end{cases} \quad (2.23)$$

Donde:

τ : transmitancia atmosférica.

τ_T : transmitancia atmosférica (corregida por temperatura).

ΔT : diferencia de temperaturas durante el día.

$T_{MAXaire}$: temperatura máxima durante el día del aire del lugar.

$T_{MINaire}$: temperatura mínima durante el día del aire del lugar.

La radiación difusa de acuerdo a este modelo viene dada por (2.24).

$$I_D = 0,30 \cdot (1 - (\tau_T)^m) \cdot I_0 \cdot \cos(\psi) \quad (2.24)$$

Donde:

I_D : radiación solar difusa.

τ_T : transmitancia atmosférica (modificada por temperatura).

m : masa de aire óptica.
 I_0 : constante solar.
 ψ : ángulo cenital.

A medida que la transmitancia de la atmósfera decrece, la importancia de la radiación difusa en el balance total aumenta. Finalmente, la radiación total viene dada por (2.25).

$$I_G = I_B \cdot \cos(\psi) + I_D \quad (2.25)$$

Donde:

I_G : radiación solar total.
 I_B : radiación solar directa.
 I_D : radiación solar difusa.
 ψ : ángulo cenital.

2.1.8 Instrumentos de medición de radiación solar

Si bien es muy útil el poder estimar con antelación la irradiancia solar sobre un lugar determinado de la Tierra a través de modelos, ya sea para diseñar o estudiar sistemas que utilicen como fuente primaria de energía la energía del Sol, sin duda alguna, la mejor manera de conocer la irradiancia de un lugar es medirla directamente. Lo anterior se realiza en estaciones meteorológicas ubicadas alrededor de todo el mundo y en aquellos lugares donde sea necesario a través de instrumentos especializados.

2.1.8.1 Piranómetro

El piranómetro es un instrumento que permite medir la radiación solar global recibida desde todo el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal terrestre.

Su principio de funcionamiento es a través de termocuplas, las cuales al calentarse producto de la radiación del sol, emiten una pequeña f.e.m. que es medida por otro instrumento. El valor indicado por el instrumento es proporcional a la radiación solar medida, por lo que para obtener la irradiancia en $[W/m^2]$, se multiplica la tensión entregada por el piranómetro por la constante del instrumento. En la Figura 2.15 se presenta un piranómetro de radiación global.



Figura 2.15 Piranómetro de Radiación Global [17]

El piranómetro también puede ser utilizado para medir tanto la radiación difusa como la radiación reflejada.

Para medir la radiación difusa, el piranómetro debe estar sombreado durante todo momento de forma tal que sólo la radiación difusa sea medida por el instrumento. Lo anterior se hace añadiendo al instrumento un anillo de sombra (Shadow Ring), el cual debe poseer seguimiento de la trayectoria del Sol para asegurar que el piranómetro esté siempre con sombra, como el que se aprecia en la Figura 2.16.



Figura 2.16 Piranómetro de radiación difusa con anillo sombreador [17]

Para medir la radiación reflejada, el piranómetro debe instalarse de forma tal que sobre él no incidan directamente los rayos solares, y éste se encuentre sombreado, de forma tal de que sólo incida sobre la radiación solar reflejada desde el suelo. En la Figura 2.17 se aprecia un ejemplo de la configuración mencionada.



Figura 2.17 Piranómetro de radiación solar reflejada [17]

2.1.8.2 Pirheliómetro

El pirheliómetro se utiliza para medir la radiación solar directa expresada en unidades de $[W/m^2]$, siendo necesario que esté constantemente orientado hacia el Sol, por lo que este debe tener un mecanismo de seguimiento de la trayectoria del Sol.

Para su funcionamiento debe estar conectado a una unidad de control auxiliar para poder determinar mediante cálculo la radiación que es recibida desde el Sol. Este instrumento, como el que se aprecia en la Figura 2.18 permite realizar la calibración de otros instrumentos de radiación solar, como los piranómetros [17].



Figura 2.18 Pirheliómetro Angstrom [17]

2.1.8.3 Heliógrafo

El heliógrafo sirve para registrar automáticamente la duración de la luz solar. Se compone de una bolsa maciza de cristal pulimentada conforme a un calibrador, con índice de refracción determinado, así como de un casquete metálico dispuesto concéntricamente a esta bola a su distancia focal. En las ranuras del lado interior del casquete se introduce cada día una tira nueva de cartulina con división horaria. El sol quema en la tira huellas más o menos fuertes, según la intensidad de sus rayos y de acuerdo con su movimiento aparente. Después de haber retirado la tira de cartulina del casquete metálico, se puede determinar retroactivamente cuántas, y durante qué horas de cada día ha habido Sol. En la Figura 2.19 se ve un heliógrafo.



Figura 2.19 Heliógrafo [18]

2.2 Celdas fotovoltaicas

La energía solar recibida en la Tierra puede aprovecharse de manera útil por el hombre a través de distintos sistemas de captación y conversión de ella. En particular, lo anterior puede realizarse mediante paneles solares formados por celdas fotovoltaicas que transforman la energía lumínica del Sol en energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico.

2.2.1 Historia de las celdas fotovoltaicas [19]

A continuación, basado en las referencias [19] y [20], se presenta un extracto de la historia de las celdas fotovoltaicas.

El efecto fotovoltaico se registró por primera vez por Edmund Bequerel en 1839 cuando apreció que la acción de la luz sobre un electrodo de platino recubierto de plata sumergido en electrolito producía una corriente eléctrica. Cuarenta años más tarde los primeros dispositivos fotovoltaicos de estado sólido fueron construidos por quienes investigaban la recientemente descubierta fotoconductividad del selenio. En 1876 William Adams y Richard Day descubrieron que una fotocorriente podría ser producida en una muestra de selenio mientras se hiciera contacto con dos contactos de platino. La acción fotovoltaica del selenio difería de su acción fotoconductiva en que una corriente se producía espontáneamente por la acción de la luz. No se necesitaba de una fuente de poder externa. En este primer dispositivo fotovoltaico, una juntura rectificadora se había formado entre el semiconductor y el metal en contacto. En 1894, Charles Fritts preparó lo que probablemente fue la primera celda solar de gran superficie, al unir una capa de selenio entre una de oro y otra de metal. En los años siguientes, se observaron efectos fotovoltaicos en finas películas de cobre-óxido de cobre, sulfuro de plomo y sulfuro de talio. Estas primeras celdas fueron dispositivos de barrera Schottky de película delgada, donde una capa semitransparente de metal depositada en la parte superior del semiconductor proporcionaba tanto la juntura electrónica asimétrica, como el acceso a la juntura de la luz incidente. El efecto fotovoltaico de estructuras como ésta fue relacionado con la existencia de una barrera para el flujo de la corriente en una de las interfaces metal-semiconductor por Goldman Brodsky en 1914. Más tarde, durante la década de 1930, la teoría de la barrera metal-semiconductor fue desarrollada por Walter Schottky, Neville Mott y otros.

Sin embargo, no fueron las propiedades fotovoltaicas de los materiales, como el selenio, lo que entusiasmó a los investigadores, sino la fotoconductividad. El hecho de que la corriente producida fuera proporcional a la intensidad de la luz incidente, y relacionada directamente con la longitud de onda en forma definitiva significó que los materiales fotoconductivos fueran ideales para medidores de luz fotográficos. El efecto fotovoltaico en estructuras tipo barrera fue un beneficio añadido, en el sentido de que el medidor de luz podía funcionar sin una fuente de alimentación. No fue hasta la década de 1950, con el desarrollo de obleas de silicio de buena calidad para aplicaciones en la nueva electrónica de estado sólido, que cantidades potencialmente útiles de potencia fueron producidas por dispositivos fotovoltaicos de silicio cristalino.

En la década de 1950, el desarrollo de la electrónica utilizando silicio siguió al descubrimiento de una forma de fabricar junturas p-n el silicio. Naturalmente, obleas de silicio tipo n desarrollaban una cubierta tipo p cuando eran expuestas a tricloruro de boro en forma

gaseosa. Parte de dicha cubierta podría ser removida para dar acceso a la capa tipo n abajo. Estas junturas p-n producían una rectificación mucho mejor que las de barrera Schottky, y un mejor comportamiento fotovoltaico. Las primeras celdas solares de silicio fueron dadas a conocer por Chapin, Fuller y Pearson en 1954 y convertían la luz solar con una eficiencia del 6%, seis veces mayor que el mejor intento anterior. Esa cifra fue aumentando significativamente en los años y décadas siguientes, pero, en con un costo estimado producción de unos 200 dólares por Watt, estas celdas no fueron considerados seriamente para la generación de energía durante varias décadas. Pese a lo anterior, las primeras celdas solares de silicio sí introdujeron la posibilidad de la generación de energía en lugares remotos donde el combustible no puede ser fácilmente entregado. La aplicación obvia fueron los satélites, donde el requerimiento de confiabilidad y bajo peso hizo el costo de las celdas no tuviera importancia durante las décadas 1950 y 60. Así las celdas solares de silicio fueron ampliamente desarrolladas para aplicaciones espaciales.

Al mismo tiempo, en 1954, un juntura p-n de sulfuro de cadmio fue producida con una eficiencia del 6%, y en los años siguientes estudios de junturas p-n de GaAs, InP y CdTe fueron estimulados por trabajos teóricos que indicaban que estos materiales podrían ofrecer una mayor eficiencia. Sin embargo, el silicio se mantuvo y se mantiene como el material fotovoltaico más utilizado, debido a los avances de la tecnología en el silicio por la industria de la microelectrónica.

En la década de 1970 la crisis en el suministro de energía experimentada por el petróleo-dependiente mundo occidental llevó a un repentino aumento del interés en las fuentes alternativas de energía, y a un mayor financiamiento para la investigación y el desarrollo en dichas zonas. El tema fotovoltaico fue un tema de interés durante este período, y una serie de estrategias para la producción de dispositivos fotovoltaicos y materiales más económicos, junto con la mejora de la eficiencia de los dispositivos fue explorada. Caminos hacia un menor costo incluyeron junturas foto-electroquímicas, y materiales alternativos como el silicio policristalino, silicio amorfo, otros tipos de "películas delgadas" y conductores orgánicos. Estrategias para una mayor eficiencia incluyeron varios tipos de diseños para el variar el valor de la banda prohibida o bandgap. Aunque ninguna de estas estrategias condujo a la generalización del desarrollo comercial, la comprensión de la ciencia relacionada con el tema fotovoltaico debe sus raíces principalmente a este período.

Durante la década de 1990, el interés con lo relacionado al tema fotovoltaico, junto con la conciencia de la necesidad de asegurar fuentes de energía eléctrica alternativas a los combustibles fósiles ha aumentado considerablemente.

Durante este período, la economía de la energía fotovoltaica ha mejorado principalmente a través de las economías de escala. A fines de 1990, la producción fotovoltaica creció a un ritmo de 15-25% por año, lo que llevó a una reducción de los costos. La energía fotovoltaica fue por primera vez competitiva en aplicaciones donde el suministro convencional de electricidad es más caro, por ejemplo, para pequeñas aplicaciones remotas como la navegación, la electrificación rural, las telecomunicaciones y para la mejora del suministro en redes de distribución durante la hora punta en países desarrollados.

Durante la evolución y desarrollo de las celdas solares, se pueden distinguir cuatro generaciones de éstas, cuyas características se detallan a continuación [20].

1. Celdas de Primera Generación

Ellas consistían en una gran superficie de cristal simple. Una simple capa con unión diodo p-n, capaz de generar energía eléctrica a partir de fuentes de luz con longitudes de onda similares a las que llegan a la superficie de la Tierra provenientes del Sol. Estas células son fabricadas, usualmente, usando un proceso de difusión con obleas de silicio. Esta primera generación es en la actualidad la tecnología dominante en la producción comercial y constituyen aproximadamente el 86% del mercado de celdas solares terrestres, pese a tener eficiencia relativamente bajas en torno al 10%.

2. Celdas de Segunda Generación

Esta generación de materiales fotovoltaicos se basa en el uso de depósitos epitaxiales muy delgados de semiconductores sobre obleas con concentradores. Hay dos clases de celdas fotovoltaicas epitaxiales: las espaciales y las terrestres. Las celdas espaciales usualmente tienen eficiencias más altas (28-30%) para radiación AM0, pero tienen un costo por Volt más elevado. En las terrestres, la película delgada se ha desarrollado usando procesos de bajo costo, pero tienen una eficiencia más baja (7-9%) ante dicho tipo de radiación espectral, y son cuestionadas para aplicaciones espaciales.

Delgadas películas de GaAs para aplicaciones espaciales (denominadas celdas delgadas) con potenciales de eficiencia AM0 por encima del 37% están siendo desarrolladas para aplicaciones de elevada potencia específica. La segunda generación de células solares constituye un pequeño segmento del mercado fotovoltaico terrestre, y aproximadamente el 90% del mercado espacial.

3. Celdas de Tercera Generación

Esta generación de celdas fotovoltaicas que se están proponiendo en la actualidad son muy diferentes de los dispositivos semiconductores de las generaciones anteriores, ya que realmente no presentan la tradicional unión p-n para separar los portadores de carga fotogenerados. Para aplicaciones espaciales, se están estudiando dispositivos de huecos cuánticos y dispositivos que incorporan nanotubos de carbono, con un potencial de más del 45% de eficiencia AM0. Para aplicaciones terrestres, se encuentran en fase de investigación dispositivos que incluyen celdas fotoelectroquímicas, celdas solares de polímeros, celdas solares de nanocristales y celdas solares de tintas sensibilizadas.

4. Celdas de Cuarta Generación

Una hipotética cuarta generación de celdas solares consistiría de una tecnología fotovoltaica compuesta, en la que se mezclan conjuntamente, nanopartículas con polímeros para fabricar una capa simple multiespectral. Posteriormente, varias capas delgadas multiespectrales se podrían apilar para fabricar las celdas solares multiespectrales definitivas, que serían más eficientes y baratas. Basadas en esta idea, y la tecnología de multijuntura, se han usado en las misiones de Marte que ha llevado a cabo la NASA. La primera capa es la que convierte los diferentes tipos de luz, la segunda es para la conversión de energía y la última es una capa para el espectro infrarrojo. De esta manera se convierte algo del calor en energía aprovechable. El resultado es una excelente celda solar compuesta. La investigación de base para esta generación se está supervisando

y dirigiendo por parte de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) para determinar si esta tecnología es viable o no.

2.2.2 Principio de funcionamiento

El principio por el cual una celda fotoeléctrica es capaz de convertir la energía lumínica del Sol en energía eléctrica es el llamado Efecto Fotoeléctrico. Dicho efecto consiste en un fenómeno cuántico en el cual electrones son emitidos por un material después de haber absorbido energía proveniente desde una fuente de radiación electromagnética como luz visible o rayos x entre otros.

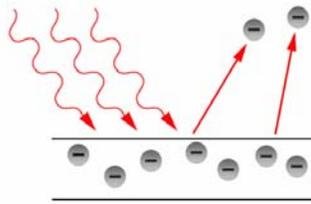


Figura 2.20 Diagrama Efecto Fotoeléctrico [21]

Los fotones de un rayo de luz tienen una energía característica determinada por su frecuencia. En el proceso de fotoemisión, si un electrón absorbe la energía de un fotón y éste último tiene más energía que su Función Trabajo ϕ , la cual corresponde a la energía mínima necesaria para mover un electrón de un sólido a un punto fuera de su superficie, el electrón es arrancado del material. Si la energía del fotón es demasiado baja, el electrón no puede escapar de la superficie del material. El aumentar la energía del rayo no cambia la energía de sus fotones constituyentes, sólo cambia el número de fotones. En consecuencia, la energía de los fotones emitidos no depende de la intensidad de la luz, sino de la energía de los fotones individuales.

Los electrones pueden absorber energía de los fotones cuando son irradiados, pero siguiendo un principio de "todo o nada". Toda la energía de un fotón debe ser absorbida y utilizada para liberar un electrón de un enlace atómico, o sino la energía es reemitida. Si la energía del fotón es absorbida, una parte libera al electrón del átomo y el resto contribuye a la energía cinética del electrón como una partícula libre.

Matemáticamente se tiene que:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.26)$$

$$E_{k \max} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_m^2 \quad (2.27)$$

$$h \cdot \nu = \phi + E_{k \max} = h \cdot \nu_0 + E_{k \max} \quad (2.28)$$

$$E_{k \max} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_m^2 \quad (2.29)$$

Donde:

- E : Energía asociada a un fotón.
- h : constante de Planck ($h=6,626 \cdot 10^{-34}$ [J·s]).
- ν : frecuencia del rayo de luz incidente.
- ν_0 : frecuencia umbral a partir de la cual ocurre el efecto fotoeléctrico para un material.
- λ : longitud de onda del rayo de luz incidente.
- c : velocidad del rayo de luz incidente.
- ϕ : Función Trabajo del sólido.
- E_{kmax} : Energía cinética máxima de los electrones arrancados.

Cada vez que un fotón logre remover un electrón fuera de su órbita, se creará un par electrón hueco como el que se muestra en la Figura 2.21. El hueco corresponde a un átomo que carece de un electrón.

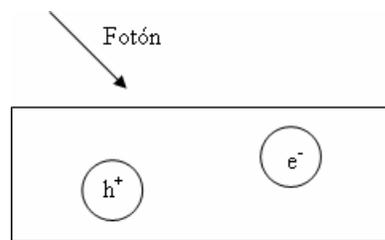


Figura 2.21 Par electrón-hueco

El electrón libre migrará en el material de una manera aleatoria. El átomo que carece de un electrón se convertirá en un hueco y éste migrará dentro del material. Un rayo de luz creará muchos pares electrones-huecos en el material. Cuando un electrón se encuentra con un hueco, ellos se recombinan liberando calor llegando a la posición de equilibrio. El bombardeo de fotones golpeando el material continuará creando pares electrones-huecos, y se alcanzará una densidad de equilibrio de pares libres de electrones-huecos. Así, cada vez que se tenga la situación anterior, se puede crear potencia eléctrica, siempre y cuando los electrones y huecos libres puedan ser organizados. Si se colocan dos contactos en el material, y ellos se conectan a una carga como se ilustra en la Figura 2.22, se generará una pequeña (insignificante) cantidad de potencia eléctrica [22].

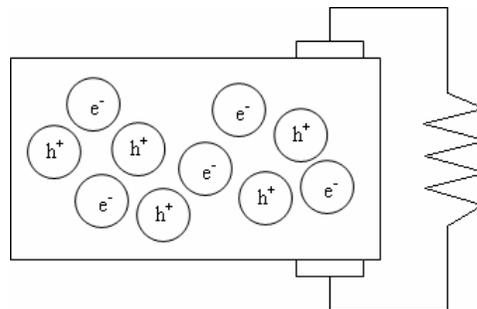


Figura 2.22 Pares electrón-hueco en un material con contactos

2.2.3 Celdas solares y el espectro del Sol

Como se ha mencionado en la sección 2.1.2, la radiación electromagnética emitida por el Sol presenta un gran ancho espectral, lo que significa que los fotones incidentes sobre algún material tienen asociadas diferentes energías. Dado lo anterior, es posible que se presente una de las siguientes situaciones cuando un fotón incide sobre una celda solar [22]:

1. El fotón es reflejado de la celda y no se produce potencia eléctrica.
2. El fotón no tiene suficiente energía para remover un electrón desde su órbita. Dicho fotón puede ser reflejado o bien su energía se convierte en calor y no se genera potencia eléctrica.
3. El fotón tiene exactamente la energía necesaria para remover un electrón desde su órbita. Esencialmente toda su energía se convierte en electricidad.
4. El fotón tiene más energía de la necesaria para remover un electrón de su órbita. El exceso de energía se convertirá en calor y el resto en electricidad (como en el punto anterior).

Lo anterior, de acuerdo a lo explicado en la sección 2.2.2, se debe a las distintas longitudes de onda que poseen los fotones de la radiación solar. Un esquema de lo mencionado en los 4 puntos anteriores se aprecia en la Figura 2.23.

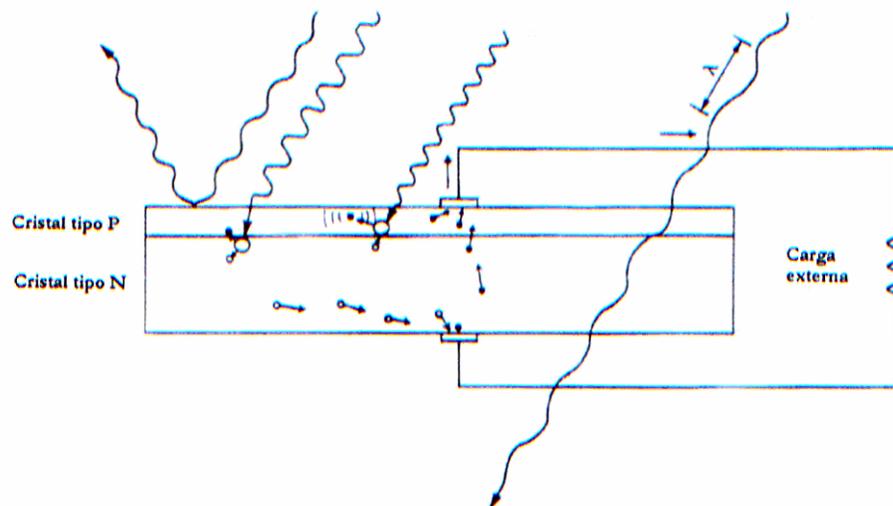


Figura 2.23 Fotones incidentes sobre una celda solar con distintas longitudes de onda [26]

La atmósfera filtra y atenúa todas las longitudes de onda de la radiación solar incidente sobre la Tierra. Así, por ejemplo, la radiación tipo AM0 es aproximadamente lo que reciben los satélites sobre la atmósfera, y la radiación tipo AM1.5 es lo que aproximadamente recibe la Tierra a nivel del mar en un día despejado (ver Figura 2.6).

Es muy importante conocer el tipo de radiación con el que se trabaja para una cierta aplicación con celdas solares. Las celdas solares generan una potencia mayor cuando son probadas con radiación AM0, pero la mayoría de las celdas presenta una mayor eficiencia al ser probadas bajo radiación AM1.5.

Si el Sol emitiera fotones con la misma cantidad de energía, sería posible elegir un material para construir celdas solares que generaran un par electrón-hueco con una energía levemente menor que la del fotón incidente, pero el Sol emite fotones con distintas energías, lo que hace que para cualquier material que se escoja, algunos fotones no tendrán la suficiente energía para liberar electrones del material y generar poder, y otros tendrán demasiada y el exceso será convertido en calor. El material que se elija, debería ser elegido de forma tal que presente un buen comportamiento ante el espectro solar, es decir, que su eficiencia de conversión esté lo más cercana al límite teórico (ver Figura 2.24).

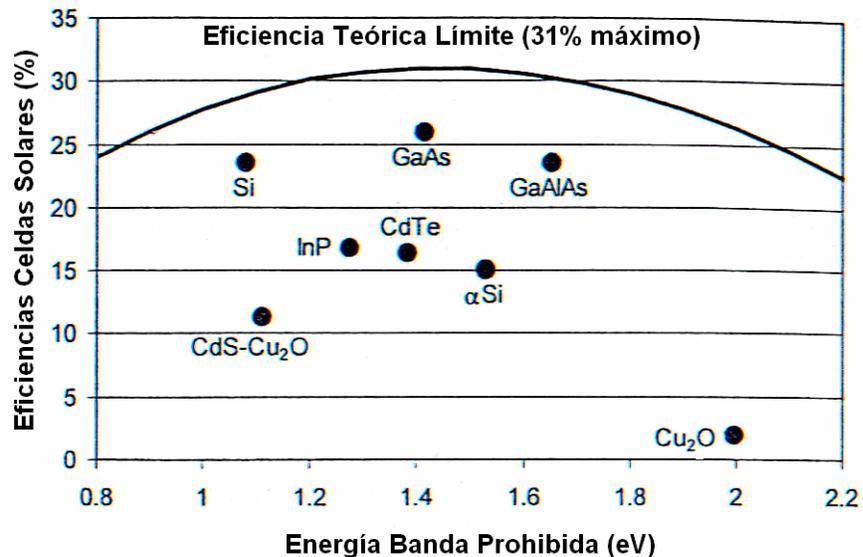


Figura 2.24 Eficiencia teórica calculada, celda solar de simple juntura, espectro AM1.5 [22]

En la Figura 2.24 se aprecian las eficiencias teóricas de ciertos materiales como las medidas experimentalmente para el espectro AM1.5. Se aprecia que las celdas de Silicio (las más usadas) tienen una eficiencia apreciable, y a su vez que las de Galio-Arsénico presentan una de las mayores eficiencias.

2.2.4 Estructura básica de una celda fotovoltaica

En la Figura 2.25 se aprecia cómo está construida (en general) una celda solar de Silicio. Usualmente, ésta tiene contactos metálicos en la parte superior e inferior para así recolectar la corriente generada producto del rayo de luz incidente. Cabe mencionar que existe un compromiso entre maximizar la conductividad eléctrica y permitir el paso de los rayos de luz sobre la celda, lo que repercute en el diseño de los conductores del contacto superior. Además de los elementos anteriores, de manera tal de mejorar su desempeño, se agrega un material antirreflectante y una capa de vidrio para proteger la celda.

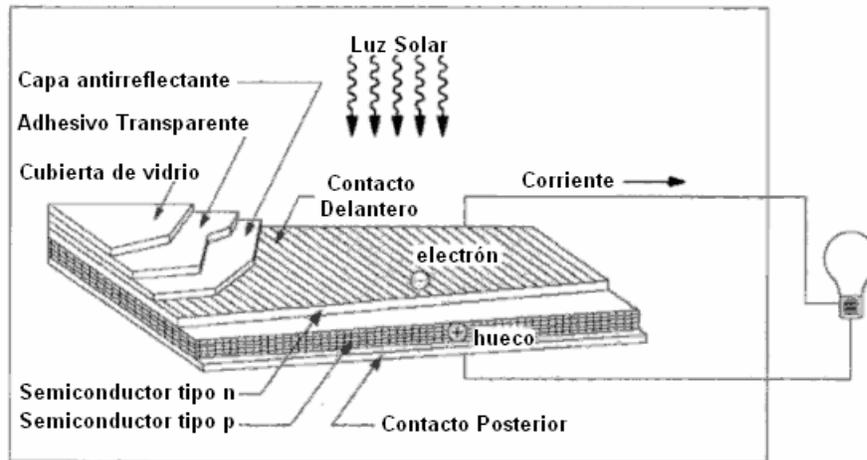


Figura 2.25 Estructura básica de una celda solar con junta p-n [27]

2.2.5 Tipos de celdas fotovoltaicas [28]

Si bien el silicio es el material más utilizado en la construcción de las celdas fotovoltaicas, también se utilizan otros materiales que proveen buenas características en cuanto a la generación de energía eléctrica como mayores eficiencias y mayores niveles de tensión por celda entre otros [6], algunos de los cuales se revisan a continuación.

2.2.5.1 Celdas de silicio cristalino

El silicio es un material muy abundante y las celdas construidas con este material han demostrado su fiabilidad tanto en aplicaciones espaciales como terrestres.

Las celdas de silicio han evolucionado desde la convencional junta p-n hacia diseños y estructuras más complicadas siempre persiguiendo el mejorar la eficiencia al tratar de captar la mayor cantidad de fotones incidentes. Así, se ha mejorado la capa antirreflectora superficial entre otros. Con lo anterior se han conseguido eficiencias superiores al 24% en celdas de silicio monocristalino [28].

Las celdas fotovoltaicas ofrecidas en el mercado en la actualidad utilizan dos estructuras de materiales semiconductores. Uno tiene una estructura cristalina uniforme, mientras que el otro presenta una estructura policristalina. El tipo cristalino requiere de un elaborado proceso de manufactura, que consume enormes cantidades de energía eléctrica, lo que incrementa el costo del material semiconductor. La versión policristalina se obtiene fundiendo el material semiconductor, el que es vertido en moldes rectangulares. Su estructura cristalina no es uniforme. Los dos tipos son reconocibles fácilmente a simple vista ya que mientras la estructura monocristalina posee un brillo uniforme, la policristalina muestra zonas de brillo diferentes de acuerdo a lo mostrado en Figura 2.26 y en la Figura 2.27



Figura 2.26 Celda de Silicio Monocristalino [29]

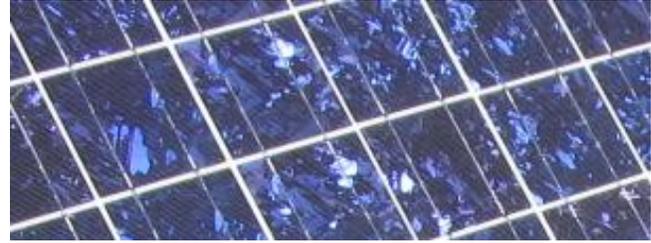


Figura 2.27 Celda de Silicio Policristalino [30]

2.2.5.2 Películas policristalinas delgadas

Las láminas de silicio también han sido enriquecidas mediante dos métodos: un proceso en el cual el silicio aparece mediante una acción capilar entre dos placas de grafito, y otro proceso de redes dendríticas, donde se arrastra una delgada película de silicio entre dos espaciadores desde una superficie derretida que crece.

Una ventaja de las películas policristalinas delgadas es que no hay degradación del rendimiento inducido por la luz.

Las láminas delgadas (1[μm] a 10[μm] de grosor, que absorben 90% de luz) son hechas de arseniuro de galio (GaAs) o de telurio de cadmio (CdTe). Éstas son más eficientes que las de silicio de juntas múltiples debido a que poseen bandas prohibidas más grandes. Tanto los semiconductores cristalinos como los policristalinos de silicio pueden ser unidos a un material plástico o de vidrio, que permita el paso de la luz y entregue integridad estructural, además de proveer protección de los elementos en varias aplicaciones en donde el mantenimiento es difícil de realizar, dado que no se necesita hacer nada excepto una limpieza ocasional. Eficiencias del orden del 32,6% han sido medidas en laboratorio en celdas de múltiples juntas.

Una ventaja adicional del silicio policristalino es la facilidad con la que grandes estructuras pueden ser hechas. Las conexiones eléctricas de celdas de cristal simple deben ser realizadas cuidadosamente, mientras que el silicio policristalino puede ser hecho esencialmente tan grande como se desee.

2.2.5.3 Semiconductores tipo III-IV

Semiconductores tales como el GaAs, GaAlAs, GaInAsP, InSb e InP tienen características excepcionales que ofrecen convertir un tercio (o más) de la energía solar en electricidad. Este tipo de materiales tienen un alto interés tecnológico pues permiten hacer celdas fotovoltaicas de alto rendimiento con poco material.

Un punto destacable es el valor de la concentración intrínseca del GaAs, que está relacionada con el ancho de la banda prohibida. A una temperatura $T=300[^\circ\text{K}]$ y con $E_g=1,43$ [eV], resulta que la concentración intrínseca tiene un valor de $n_i=1,8 \cdot 10^6[\text{cm}^{-3}]$, valor

considerablemente menor que en el silicio. Lo anterior hace que los valores de la tensión de circuito abierto sean mayores en estas celdas que en celdas de silicio.

2.2.5.4 Celdas de simple o múltiple juntura

La mayoría de los materiales fotovoltaicos son hechos de una sola capa de material fonoabsorbente. Sin embargo, dadas las diferencias entre las celdas solares en términos de la energía que absorben, puede ser ventajoso “apilarlas” en capas. Las celdas de distintas bandas prohibidas apiladas una sobre otra se conocen como celdas de múltiple juntura. En la Figura 2.28 se muestra cómo una celda solar de múltiple juntura puede ser configurada.

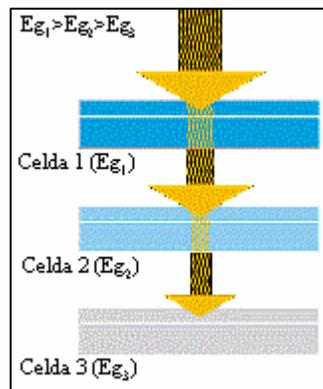


Figura 2.28 Esquema de una celda solar de múltiple juntura [28]

Dado que la luz azul tiene una mayor energía que la luz roja, la primera capa remueve la energía de la luz azul mayoritariamente, y correspondientemente la luz menos azulada (o más enrojecida) es removida mientras ella desciende a través de la secuencia de capas formando la celda solar de múltiple juntura mostrada anteriormente. Una celda de doble juntura de GaInP sobre GaAs puede llegar a tener una eficiencia sobre el 30% [28].

2.2.5.5 Materiales amorfos

Algunos paneles fotovoltaicos no tienen celdas independientes conectadas entre sí, sino una estructura semiconductor que ha sido depositada de forma continua sobre una base metálica laminar. Dicho proceso permite la construcción de un panel fotovoltaico flexible, el que puede adaptarse a superficies que no son completamente planas. La superficie activa de estos paneles no tiene una estructura cristalina, y por ello se le denomina amorfa.

Las celdas solares amorfas de silicio en láminas delgadas exhiben una mejor absorción que las de silicio puro (40 veces tan eficientes como las de silicio cristalino), pero debido a muchos defectos estructurales, sólo llegan a eficiencias máximas del 11%, y la mayoría de las celdas presentan una eficiencia del 4% al 8%. Además, las celdas de silicio amorfo se pueden degradar al ser expuestas a la luz del sol.

El silicio amorfo es mucho más fácil de fabricar que cristales de silicio enriquecidos, y mediante el uso de varias junturas (capas) del primer material mencionado, estando cada una de dichas capas “ajustada” para distintas zonas del espectro, una mayor parte del espectro visible

puede ser usada. Dicho ajuste es posible gracias a la adición de carbono, que aumenta la banda prohibida, mientras que el germanio la disminuye. Sin embargo, si se agrega demasiado material, la eficiencia de la celda cae.

Los semiconductores CuInSe_2 y CdTe son también usados para manufacturar celdas solares.

2.2.5.6 Celdas sensibilizadas al tinte

M. Grätzel, perteneciente al Politécnico de Lausanne, Suiza, descubrió un sistema de capa fina de dióxido de titanio que es sensible a la radiación ultravioleta y que puede ser hecho para responder a la luz común. Una capa de tinte sensible a la luz reviste el semiconductor, y la carga se transfiere de vuelta al tinte desde un electrolito. Las celdas tienen eficiencias razonables (~10%) en condiciones de luz nebulosa, y el costo se proyecta que será muy bajo dado que los materiales pueden ser trabajados a bajas temperaturas, en contraste con la mayoría de arreglos de celdas solares de otros semiconductores.

Una nueva idea para cosechar energía solar usa tintes sobre un sustrato de metal, bastante diferente de lo que ocurre en las celdas solares de silicio. El dispositivo desarrollado por McFarland y Tang tiene múltiples capas sobre películas de metal ultrafino que constituyen un diodo Schottky [28].

2.2.5.7 Celdas de punto de contacto

La celda de punto de contacto tiene una superficie texturada que reduce la reflexión de la luz incidente y una superficie trasera de espejo, que le permite absorber el 90% de la luz incidente. Estas celdas necesitan ser de sólo 100[μm] de grosor. Los contactos están en la superficie trasera, donde no impiden que la luz solar entre, dispuestos en un patrón de diseño de lunares en donde se alternan semiconductores tipo p y tipo n. Una capa de óxido de silicio en la superficie previene la recombinación. Estas celdas pueden dar un 22,8% de eficiencia, la que es un poco mayor que las celdas solares de silicio cristalino convencionales.

2.2.5.8 Celdas solares plásticas

El trabajo usando baños de tinte sensibles ha sido un avance en la dirección hacia celdas solares más baratas. Si la celda pudiera ser hecha completamente de plástico, hay esperanza que se volverían mucho más baratas. Un paso en esa dirección fue hecho por un grupo en la Universidad de Berkeley, el que desarrolló materiales receptivos solares de nanotubos plásticos.

Podría incluso ser posible pintar la superficie de un techo con varas plásticas o adjuntarlas a láminas de plástico que podrían estar unidas a la superficie del techo y hacer que éste se volviera una celda gigantesca.

En su primera versión la eficiencia es baja, cercana al 1%, pero la promesa de celdas solares baratas es atractiva. Las celdas de varas plásticas adosadas a láminas plásticas podrían

incluso ser colocadas en la ropa así como en los techos. La luz del sol cayendo sobre la ropa podría terminar haciendo funcionar la radio, reproductores de MP3 o celulares [28].

2.2.5.9 Nitruro de indio galio

El semiconductor nitruro de indio galio puede ser el material óptimo para el uso de la luz del Sol. Un grupo de investigadores del Laboratorio Lawrence Berkeley y de la Universidad de Ritsumeikan en Japón, encontraron que presenta una banda prohibida de 0,7[eV] a 3,4[eV], justo cerca del máximo que puede ser obtenido desde la luz del Sol (que varía desde el infrarrojo cercano al ultravioleta cercano). Una celda solar de múltiples junturas hecha de nitruro de indio galio podría llegar a tener una eficiencia del 70%, más eficiente que cualquier celda solar actual [28].

Una característica adicional es que el material presenta una resistencia mejorada a la radiación externa. De acuerdo a los autores del estudio esto le da a las celdas “gran potencial para celdas solares de alta eficiencia de alta radiación para aplicaciones en el espacio” [31].

2.2.5.10 Celdas solares orgánicas

La investigación de materiales fotovoltaicos orgánicos de película delgada ha mostrado ser promisoria. Estos materiales son atractivos para los fabricantes, porque dichos materiales (presumiblemente) podrían ser aplicados a otros sustratos similares para otras películas. La eficiencia de las películas delgadas orgánicas actuales es de alrededor del 1%, pero varios casos de eficiencia de 2% se han experimentado. Se cree que la eficiencia debería ser 5% o más relativamente pronto [28].

Sea cual sea el material y la tecnología utilizada en la construcción de celdas fotovoltaicas, todas ellas sufren del efecto Staebler-Wronski, en el que nuevos defectos en el material de la celda surgen a medida que la celda es expuesta a la luz durante las 1.000 primeras horas de operación, lo que tiene el efecto de reducir la salida desde su nivel inicial a un nivel estable más bajo.

2.2.6 Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica

Una celda solar puede ser vista en una primera aproximación muy básica como una fuente de corriente, cuyo valor depende de la radiación incidente sobre ella. En la Figura 2.29 se aprecia lo anterior.

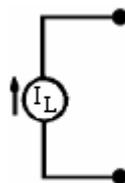


Figura 2.29 Circuito Equivalente “muy” básico de una celda solar

Dado que la celda solar está formada por una juntura p-n (en general), ella puede modelarse como un diodo conectado en paralelo con la fuente de corriente mencionada anteriormente como se ve en la Figura 2.30. Es este diodo el responsable de la tensión generada por la celda, y como es de esperarse, la tensión que entrega la celda varía ante la variación de la carga debido al comportamiento de esta juntura.

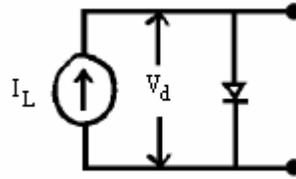


Figura 2.30 Circuito Equivalente básico de una celda solar

Si bien con el modelo anterior ya se puede entender el comportamiento de la celda, para poder modelar la característica de una celda solar de manera adecuada, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La celda presenta pérdidas, que se aprecian en forma de calor.
- El diodo de la juntura p-n no debe ser considerado como un diodo ideal.

Con las consideraciones anteriores, se tiene el siguiente circuito eléctrico equivalente para una celda fotovoltaica, que se aprecia en la Figura 2.31:

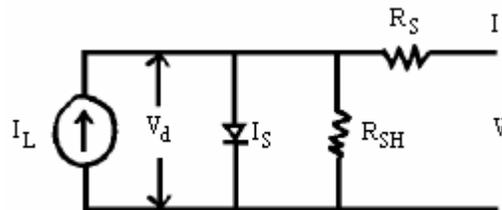


Figura 2.31 Circuito equivalente de una celda solar

En la Figura 2.31, I_L representa la fuente de corriente, también conocida como “fotocorriente”, que depende proporcionalmente de la radiación solar incidente sobre la celda. I_S representa a la corriente de saturación inversa del diodo, también conocida como “Corriente Oscura”. La tensión V_d representa la tensión del diodo formado por la juntura p-n de la celda, y ella depende tanto de la juntura en sí como de la temperatura de funcionamiento de la celda. I_{DB}

Al conectar una carga en los terminales de la celda, se tendrá una diferencia de potencial V y una corriente I pasando por ella. Despreciando aún el efecto de las resistencias R_S y R_{SH} del modelo equivalente, se tiene que cuando la celda es iluminada, la fotocorriente se divide entre el diodo y la resistencia de la carga, en una proporción que depende tanto de la iluminación como de la carga en sí. Para resistencias de carga mayores, se tiene que una mayor parte de la fotocorriente fluye a través del diodo, resultando en una diferencia de potencial mayor en los terminales de la celda, con una corriente menor. Así el diodo es el que provee el fotovoltaaje. Sin la presencia del diodo, no se tendría nada que condujera la fotocorriente a través de la carga.

Ahora, si se consideran las resistencias R_S y R_{SH} , se pueden modelar las pérdidas de la celda en forma de calor. La Resistencia Serie R_S aparece debido a la resistencia eléctrica presente en el material de la celda por el cual fluye la corriente, la cual es un problema particular a altas densidades de corriente (por ejemplo en el caso de tener una gran concentración de luz incidiendo sobre la celda). La resistencia R_{SH} aparece debido a corrientes de fuga a través de la celda, alrededor de los bordes del dispositivo y entre los contactos de distinta polaridad. Este es un problema en dispositivos rectificadores de una pobre calidad. Para que la celda sea lo más eficiente posible, lo ideal es que R_S sea la más pequeña posible y que R_{SH} sea lo más grande posible, idealmente $R_S \rightarrow 0$ y $R_{SH} \rightarrow \infty$ [19].

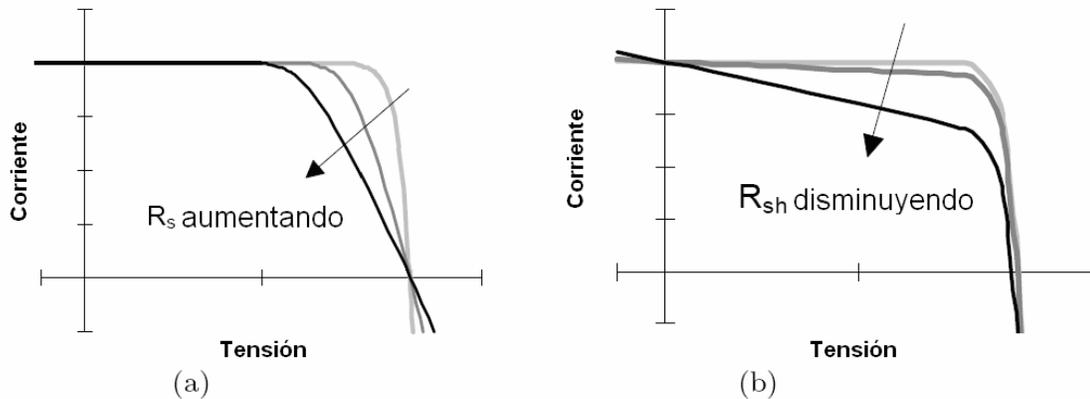


Figura 2.32 Variación Característica V-I Celda Solar ante: (a) aumento R_S , (b) reducción R_{SH} [19]

Un mayor detalle de las ecuaciones que modelan el comportamiento de una celda solar se da en el capítulo 5, correspondiente al desarrollo de un modelo matemático de una celda solar para simular su comportamiento.

2.2.7 Variables características de comportamiento

Los puntos característicos de operación de un sistema fotovoltaico de celdas solares pueden ser apreciados en las dos curvas características en las que se ve el comportamiento de una celda solar.

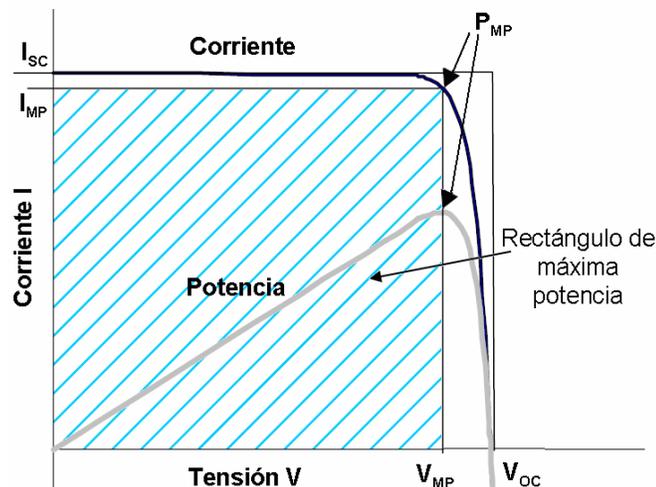


Figura 2.33 Curvas Características Celda Fotovoltaica. Curva I-V (negro); curva P-V (gris) [19]

En la Figura 2.33 se tienen los siguientes puntos de interés

- **I_{SC} : Corriente de Corto Circuito.** Corresponde a la corriente que es capaz de entregar una celda solar cuando sus terminales se encuentran cortocircuitados. Dicho valor varía primordialmente con la radiación solar incidente.
- **V_{OC} : Voltaje de Circuito Abierto.** Corresponde a la tensión de una celda solar cuando sus terminales se encuentran abiertos sin carga alguna. Dicho valor varía primordialmente con la temperatura de la celda.
- **I_{MP} : Corriente de Máxima Potencia.** Corresponde a la corriente para la cual la potencia de salida de la celda es máxima. Este valor es cercano a 0,9 veces I_{SC} .
- **V_{MP} : Voltaje de Máxima Potencia.** Corresponde a la tensión de una celda para la cual su potencia de salida es máxima. Este valor varía entre 0,6-0,85 veces V_{OC} .
- **P_{MP} : Punto de Máxima Potencia.** Dicho punto corresponde al punto de operación donde la celda entrega la mayor potencia eléctrica. Este punto depende de la carga, de la radiación incidente y de la temperatura de la celda. Dicho punto corresponde al par (V_{MP}, I_{MP}) sobre la curva I-V, y su valor corresponde a $P_{MP} = V_{MP} \cdot I_{MP}$, encontrándose sobre la curva P-V en el punto (P_{MP}, V_{MP}) .
- **FF : Factor de Llenado (Fill Factor).** Es a otro término utilizado para describir la calidad de una celda, y corresponde al cociente entre el rectángulo de máxima potencia de área $V_m \cdot I_m$, y el rectángulo inscrito entre el voltaje V_{OC} y la corriente I_{SC} . Viene dado por la relación (2.30).

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.30)$$

- **MMF : Factor de Desalineación (MisMatch Factor).** Este indicador da cuenta de la pérdida de potencia que se produce en un panel de celdas solares debido a la diferencia de radiación solar que incide sobre sus celdas. Para un panel formado por n celdas solares viene dado por (2.31).

$$MMF = \frac{P_{MP_{panel}}}{\sum_{i=1}^n P_{MP_i}} \quad (2.31)$$

Donde:

- MMF : Factor de Desalineación.
- $P_{MP_{panel}}$: Potencia máxima entregada por el panel solar
- P_{MP_i} : Máxima potencia posible de la i -ésima celda que conforma el panel

Las variables que caracterizan el comportamiento de una celda solar se ven afectadas por distintos factores. Los principales se discuten en las siguientes secciones.

2.2.7.1 Efecto de la radiación solar incidente

La tensión de circuito abierto varía gradualmente con la radiación incidente dentro de un amplio rango de niveles, pero cuando el nivel de radiación es muy bajo se tiene que la tensión de circuito abierto cae muy bruscamente. A su vez, se tiene que la corriente de corto circuito y de máxima potencia de la celda varían casi linealmente con la variación del nivel de radiación solar incidente. Los dos efectos anteriores hacen que la potencia generada por la celda solar varíe de forma casi linealmente proporcional con el nivel de radiación incidente [22]. En la Figura 2.34 y en la Figura 2.35 se aprecian los efectos descritos.

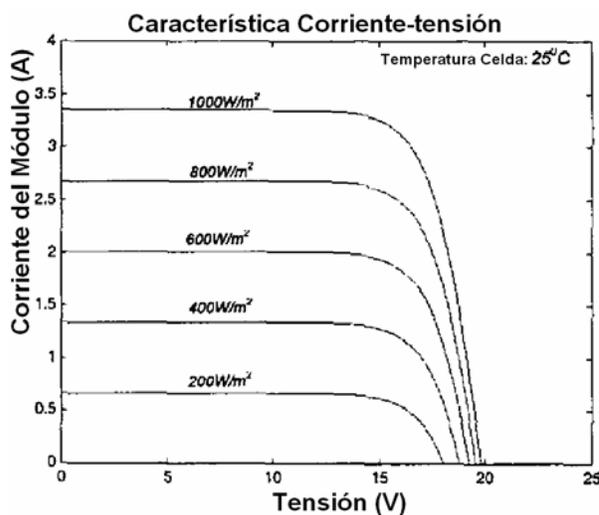


Figura 2.34 Variación característica I-V al variar la radiación incidente [33]

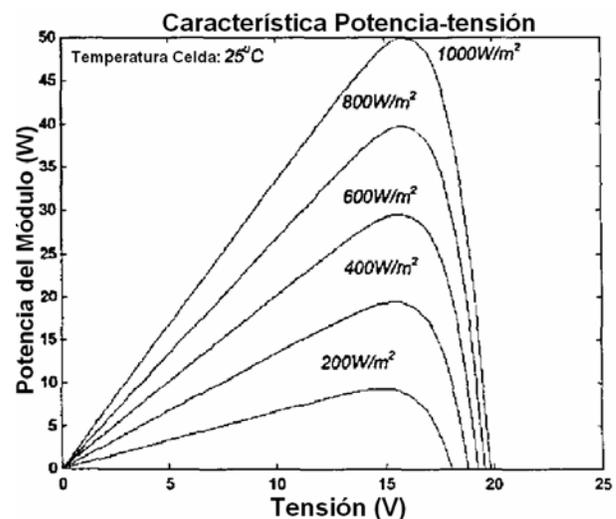


Figura 2.35 Variación característica P-V al variar la radiación incidente [33]

En las figuras anteriores se aprecia que para una radiación del orden de 300-400 [W/m²] se tiene el punto límite de diferenciación de los dos comportamientos de la tensión de circuito abierto V_{OC} . Para valores mayores, ella varía gradualmente, pero para valores menores, ella varía de forma muy brusca. En particular, se aprecia que para 200 [W/m²], V_{OC} se aleja mucho del resto de los valores de tensión con radiaciones mayores.

2.2.7.2 Efecto de la temperatura

Las celdas solares poseen un coeficiente de temperatura inverso para la tensión de circuito abierto, lo cual se debe básicamente a la característica de la juntura p-n que la conforma. Lo anterior en la práctica hace que la tensión de circuito abierto V_{OC} como la tensión de máxima potencia caiga notoriamente de forma lineal al aumentar la temperatura de la celda, lo que se aprecia tanto en la Figura 2.36 como en la Figura 2.37.

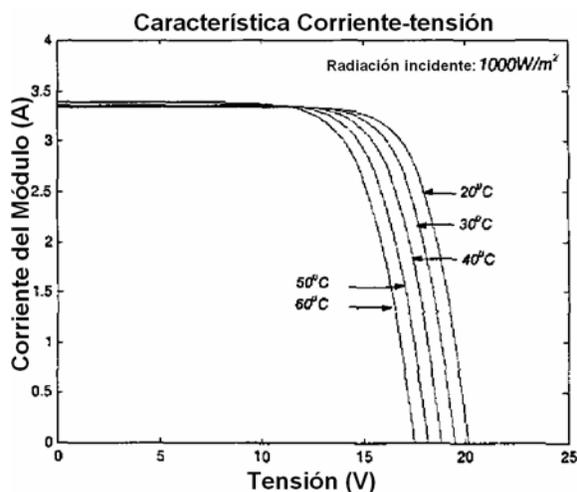


Figura 2.36 Variación característica I-V al variar la temperatura de trabajo [33]

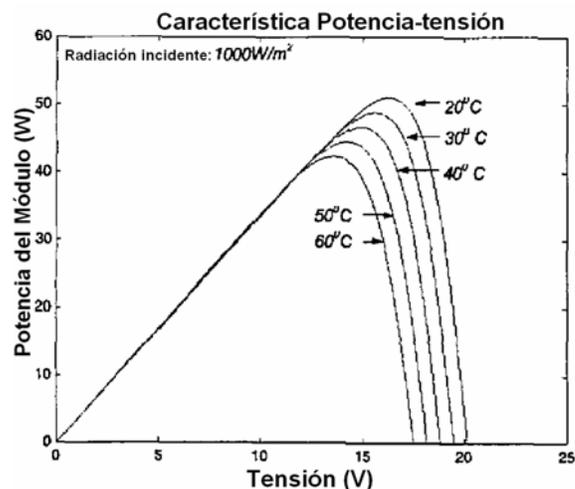


Figura 2.37 Variación característica P-V al variar la temperatura de trabajo [33]

La corriente de cortocircuito I_{SC} varía de manera proporcional con la temperatura [33], pero esta variación es tan pequeña que se le puede considerar constante ante variaciones de temperatura en un amplio rango. En la Figura 2.36 se aprecia que la curva I-V para 60[°C] presenta una corriente I_{SC} levemente mayor que la corriente I_{SC} de la curva I-V para 20[°C].

Para una radiación incidente constante de acuerdo a lo mostrado en la Figura 2.37, se aprecia que el punto de MPP se produce a tensiones menores y además su valor es menor. Lo anterior se debe a que la disminución de la tensión es mucho más notoria que el pequeño aumento de corriente en la celda. Esta reducción de potencia entregada es casi linealmente proporcional con el aumento de la temperatura [22].

En la Tabla 2.4 se muestra el la variación porcentual de las variables de una celda con la temperatura (valores típicos).

Variable	Cambio Relativo [%/°C]
V_{OC}	-0,37
I_{SC}	+0,10
V_{MP}	-0,57
I_{MP}	+0,07
MP	-0,50

Tabla 2.4 Variación Relativa Variables Celda Solar con la temperatura [24]

2.2.8 Efecto sombra

Considérese un arreglo de celdas solares formado por varias celdas conectadas entre sí, ya sea en paralelo, en serie o una combinación de los anteriores. En el caso de que una de las celdas que lo conforman quede sombreada, ella recibirá una cantidad de radiación menor, la cual dependerá claramente de la porción de la celda que esté sombreada. El funcionamiento de la celda se verá afectado de acuerdo a lo explicado en la sección 2.2.7, pero el funcionamiento del arreglo de celdas dependerá del tipo de conexión.

2.2.8.1 Celdas en paralelo

Al tener n celdas conectadas en paralelo, de acuerdo a ley de las mallas de Kirchoff, todas ellas tendrían la misma tensión. En el caso de que una celda esté sombreada, ella recibirá una menor cantidad de radiación solar, lo que hará que su tensión de circuito abierto decaiga, lo que conllevará que la tensión de todo el arreglo llegue hasta dicho valor, acarreado una pérdida de potencia ya que se tendrá una tensión V_{MP} menor que la original. Este efecto no es tan severo ya que el nivel de tensión de una celda solar decae lentamente al disminuir la radiación solar que recibe, en un amplio rango. Sólo en el caso de que la celda esté en gran parte sombreada se tendrá que este efecto será significativo.

2.2.8.2 Celdas en serie

Al tener n celdas conectadas en serie, de acuerdo a la ley de los nodos de Kirchoff, todas ellas tendrán la misma corriente. En el caso de que una celda esté sombreada, la disminución en la radiación hará que la corriente que ella es capaz de transportar se vea disminuida lo que a su vez hará que la corriente de todo el arreglo se vea disminuida. Por ejemplo, considérese un arreglo de n celdas con una celda sombreada en un 50% con radiación incidente AM1.5. Al sombrear esa celda, esta recibirá una radiación del orden de los 500 $[W/m^2]$ en vez de los 1000 $[W/m^2]$ incidentes. Con ello, realizando un cálculo simple, se tiene que esa celda permitirá el paso de una corriente del orden de la mitad de la corriente original. Así, despreciando el resto de los efectos de pérdidas, se tiene que el arreglo estará entregando una potencia del orden de la mitad de la potencia original al tener, tan solo, menos de la enésima parte sombreada.

Es más aún, en el caso de una celda sombreada dentro de un arreglo en serie, se tendrá que su característica I-V cambiará y que esa celda funcionará en otro punto de operación, y comportará como carga, consumiendo una parte de la potencia generada por el resto de las celdas, lo que en casos extremos puede hacer que la celda se destruya debido a un sobrecalentamiento al disipar una potencia que puede llegar a ser muchas veces mayor de la que la celda es capaz de generar.

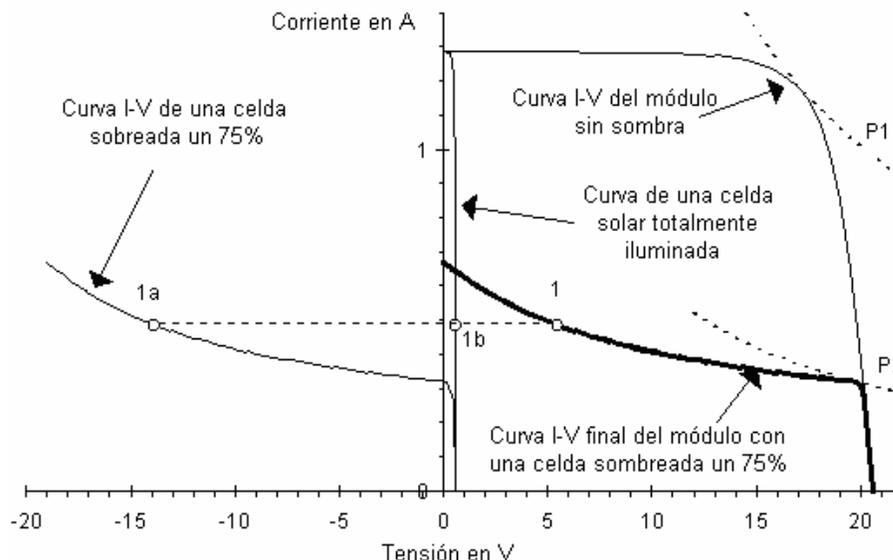


Figura 2.38 Curva I-V arreglo de n celdas con una celda sombreada [34]

Para evitar las consecuencias del efecto sombra en un arreglo serie, es necesario el instalar diodos de “bypass” ya sea en cada celda o en subarreglos de celdas más pequeños dentro del arreglo de n celdas, de manera tal que celdas sombreadas (o dañadas) no provoquen el efecto explicado en la corriente del arreglo. En la Figura 2.39 se aprecia el circuito equivalente de una celda solar con un diodo de “bypass” externo conectado.

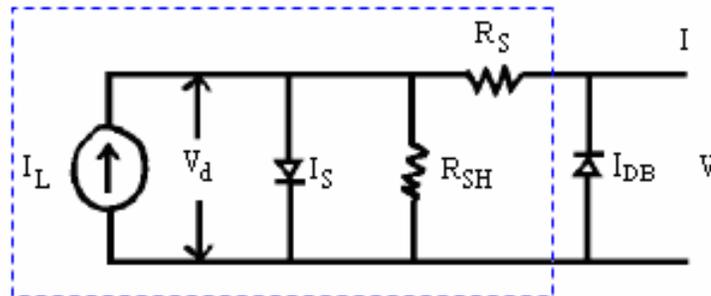


Figura 2.39 Circuito equivalente de una celda solar con diodo de “bypass” externo

El circuito equivalente mostrado en la Figura 2.39 es idéntico al presentado en la Figura 2.31, excepto por el diodo que se ubica fuera del rectángulo azul, el que corresponde al diodo de “bypass” externo que se ha incorporado a la celda solar. En la Figura 2.39 la corriente I_{DB} denota la corriente que transporta el diodo de bypass cuando se encuentra en funcionamiento. En general esta corriente corresponde a la corriente de saturación inversa del diodo, que puede ser considerada inexistente.

Dichos diodos son conectados en antiparalelo con un grupo de celdas solares² en serie de manera tal que ante condiciones normales de funcionamiento, los diodos vean una tensión negativa entre ánodo y cátodo y permanezcan apagados, pero que ante condiciones de celdas sombreadas o dañadas, vean una tensión positiva que hace que el diodo se encienda y conduzca la corriente, ya que en caso de daño o sombreado, la celda actúa como carga y su tensión se hace negativa. En este caso se tiene que el diodo transporta la corriente del subarreglo al que está conectado, haciendo que por todo el resto del arreglo de n celdas circule la corriente original. En este caso la pérdida de potencia viene dada por una reducción de la tensión de salida dada por la caída del diodo, del orden de los 0,7[V] junto con la potencia no generada por el grupo de celdas al cual está conectado el diodo de “bypass” que se encuentra en funcionamiento. Un esquema de instalación de diodos de “bypass” dentro de un panel fotovoltaico se muestra en la Figura 2.40.

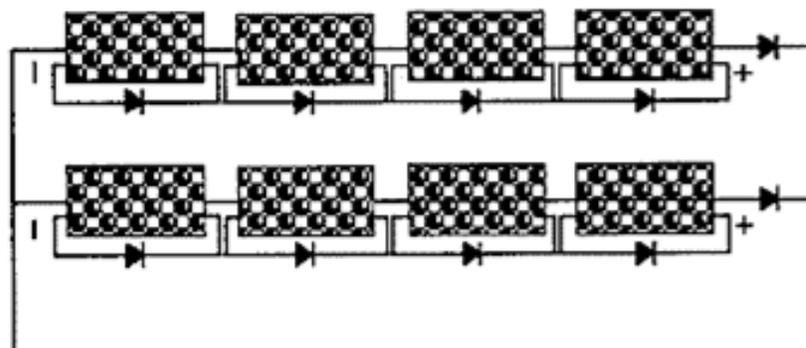


Figura 2.40 Arreglos de celdas solares con diodos de bypass [35]

² Una celda solar sola también es considerada como un grupo de celdas

El caso del efecto sombra para un arreglo serie de celdas es mucho más grave que en el caso de una arreglo paralelo de celdas.

2.2.9 Punto de operación

La conexión directa entre un panel fotovoltaico y la carga lleva a un punto de trabajo dado por la intersección de las características I-V de cada uno de ellos. En general, este punto no coincide con el punto de potencia máxima del panel, lo que conlleva a pérdidas conocidas como pérdidas de operación.

Para evitar estas pérdidas, es necesario utilizar un MPPT o Maximum Point Power Tracker, el que corresponde a un convertor DC-DC cuya función es hacer que el panel de celdas fotovoltaicas vea una carga tal que trabaje en el punto de máxima potencia máxima dado por el par V_{mp}, I_{mp} . Lo anterior es realizado llevando los niveles de tensión y corriente a valores adecuados.

Considérese un panel fotovoltaico conectado a una carga resistiva R. En la Figura 2.41 se muestran ambas características en el plano I-V.

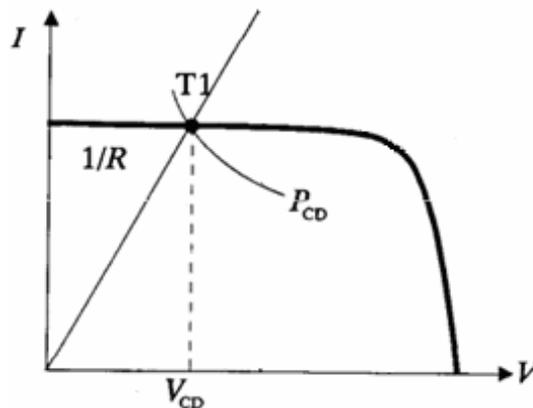


Figura 2.41 Características de un panel fotovoltaico y carga Resistiva R en el plano I-V

En la Figura 2.41 se aprecia la ya conocida característica I-V de un panel fotovoltaico y además la recta de pendiente $1/R$, que representa la característica de la resistencia R.

En el caso de que se conectara directamente como carga la resistencia R al panel, se tendría el punto de operación ubicado la intersección de ambas características, el cual corresponde a T1 en dicha figura. Dicho punto no corresponde al punto de máxima potencia de la celda.

Además, en la figura anterior se presenta la hipérbola P_{CD} , la cual corresponde al lugar geométrico de los puntos donde la potencia es constante con valor $P_{CD} = V_{CD}^2 / R$

Si se conecta un MPPT entre el panel y la carga R, se tiene un comportamiento como el presentado en la Figura 2.42.

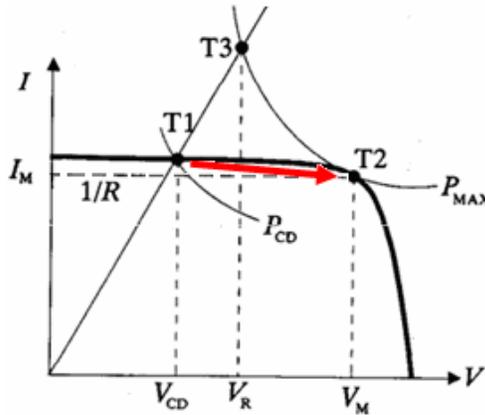


Figura 2.42 Puntos de trabajo Panel Fotovoltaico con MPPT funcionando

Al conectar la carga R y el panel fotovoltaico mediante un MPPT, se tiene que la acción de este último hace que el punto de operación de la celda se desplace desde $T1$ hacia $T2$. Dicho punto corresponde al punto de máxima potencia MPP del panel fotovoltaico de valor $V_{MP} \cdot I_{MP}$. La celda operará en el punto (V_{MP}, I_{MP}) del plano I-V. De manera similar que en la Figura 2.41, la hipérbola P_{MAX} corresponde al lugar geométrico de los puntos donde la potencia es constante con valor $P_{MAX} = V_M \cdot I_M$. Dado que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida para el MPPT (salvo pequeñas pérdidas menores al 4%), la carga operará en el punto $T3$ de la Figura 2.42, correspondiente a la intersección de la característica de la carga R y de la curva de potencia constante P_{MAX} con una tensión V_R y una corriente $I_R = V_R/R$.

Para encontrar el punto de máxima eficiencia, existen varios métodos. Se mencionan a continuación tres métodos ampliamente utilizados:

- Tensión de circuito abierto: en general, para la mayoría de las celdas fotovoltaicas, la razón entre la tensión de máxima eficiencia y la de circuito abierto es aproximadamente constante. Así, si se opera la celda en ese punto, se tendrá una potencia muy cercana a la potencia máxima.
- Variación de tensión: El voltaje de operación es aumentado mientras $dP/dV > 0$. Si $dP/dV < 0$, el voltaje debe ser disminuido. Si se llega a un punto en que $dP/dV \approx 0$, se fija la tensión en ese punto. Lo anterior se justifica gráficamente observando la Figura 2.43.

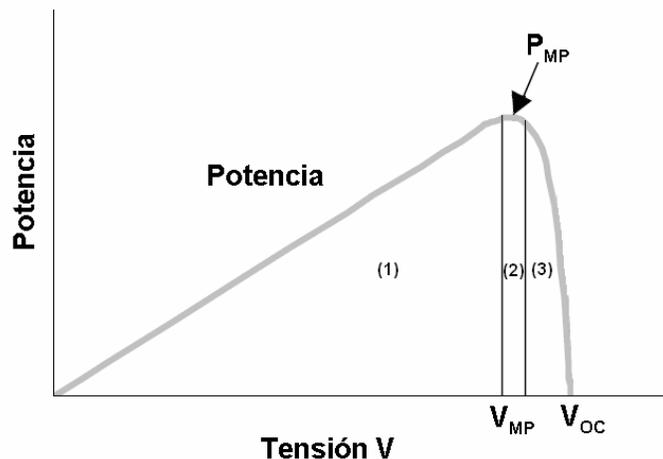


Figura 2.43 Curva P-V de una celda fotovoltaica

En (1) se tiene que $dP/dV > 0$, a su vez en (2) se aprecia que $dP/dV < 0$ y cerca de (3) que $dP/dV \approx 0$.

- **Barrido Completo:** cada cierto intervalo de tiempo, el MPPT realiza un barrido completo de la curva de potencia del panel. Así, se detecta el punto de mayor potencia del sistema y se fija la tensión en dicho punto.

2.2.10 Componentes de un sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico cuenta con distintas etapas, además de los paneles de celdas fotovoltaicas, para funcionar de manera óptima. En la Figura 2.44 se muestran las principales etapas de un sistema fotovoltaico general.

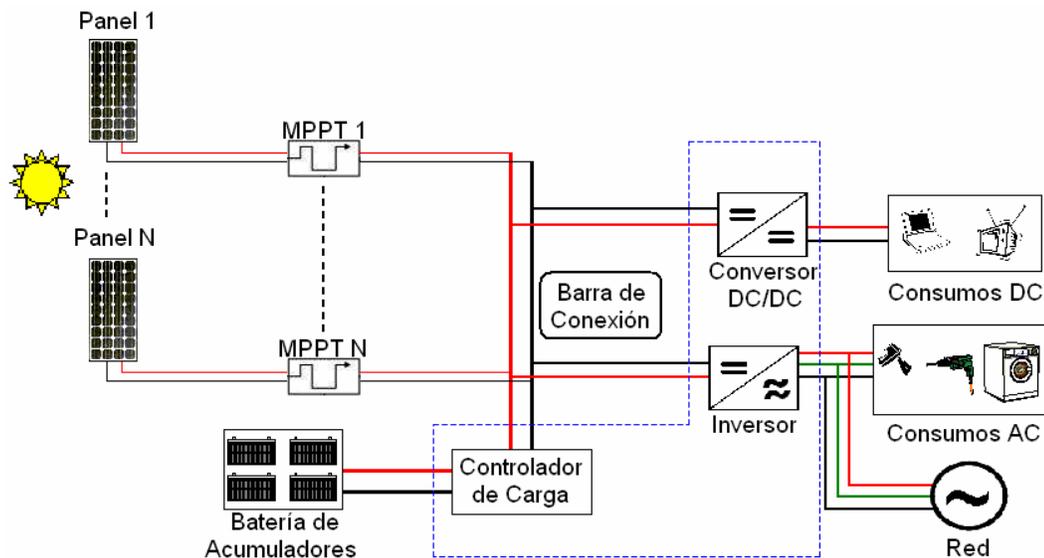


Figura 2.44 Esquema General de un sistema fotovoltaico

- **Panel 1... Panel N:** en un sistema fotovoltaico se puede contar con uno o más arreglos de celdas solares que a su vez conforman uno o más paneles de celdas fotovoltaicas independientes. Cada panel está conformado por varias celdas solares conectadas en serie, paralelo o una combinación de las anteriores.
- **MPPT 1... MPPT N:** el MPPT o Maximum Power Point Tracker, como ya se dijo, es el encargado de transferir la máxima potencia de un panel de celdas solares hacia los consumos o sistemas de almacenamiento. Además, es el encargado de llevar los niveles de tensión de los paneles a rangos adecuados de trabajo de acuerdo a las necesidades del sistema, pudiendo elevar o bajar la tensión de acuerdo a la configuración utilizada. En un sistema fotovoltaico se tiene un MPPT por cada panel de celdas solares.
- **Barra de Conexión:** en el caso de tener más de un panel en el sistema, la Barra de Conexión debe incluirse en el sistema. En ella se realiza la conexión de los MPPTs que controlan el desempeño de cada panel solar. En general, se tiene conectada a ella la salida de los MPPTs en paralelo.

- **Controlador de Carga:** sólo está presente si el sistema fotovoltaico tiene algún sistema de almacenamiento de energía. El Controlador de Carga es el encargado de controlar la carga y descarga de dicho sistema de manera tal que funcione de manera adecuada y no sufra daños por sobre carga o por una descarga excesiva entre otros.
- **Batería de acumuladores:** éste es un bloque opcional del sistema fotovoltaico. Corresponde al sistema de almacenamiento de energía, formado por uno o varios acumuladores reversibles. En caso de que se tenga energía excedente durante la operación del sistema, ella se almacena en los acumuladores y, a su vez, si la energía entregada por los paneles es insuficiente, los acumuladores entregan energía al sistema.
- **Convertor DC/DC:** es el encargado de llevar los niveles de tensión del sistema a otros niveles adecuados para el funcionamiento de los consumos DC que estén conectados al sistema fotovoltaico.
- **Inversor:** es el encargado de convertir la corriente continua en corriente alterna. Su función es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia apropiada para los consumos AC, y/o para conectarse a la red eléctrica.
- **Consumos DC:** corresponden a los consumos de corriente continua conectados al sistema.
- **Consumos AC:** corresponden a los consumos de corriente alterna conectados al sistema.
- **Red:** corresponde a la red eléctrica local. Es posible conectarse a ella para suministrarle potencia.

2.2.11 Aplicaciones de sistemas fotovoltaicos

La utilización de la energía solar a través de sistemas fotovoltaicos ha aumentado de una manera ostensible durante las últimas décadas, y la tendencia muestra que su uso, junto con el de otras fuentes de energías renovables no convencionales, seguirá aumentando. Así, en la actualidad, existen variadas aplicaciones de esta forma de energía. Si bien es posible clasificarlas de muchas maneras, se separarán en dos tipos: aplicaciones estacionarias y aplicaciones móviles.

En esta sección se revisarán las principales aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos, y se pondrá especial énfasis en las aplicaciones móviles, en particular, a aquellas orientadas a realizar trabajos de tracción eléctrica.

2.2.11.1 Aplicaciones estacionarias

Éstas, como su nombre lo indica, corresponden a dichas aplicaciones que se encuentran fijas en algún lugar y no se desplazan durante su funcionamiento. Dentro de ellas cabe mencionar las siguientes [20]:

- **Centrales eléctricas fotovoltaicas:** Europa es quien lleva la delantera en estas centrales, siendo España y Alemania los países en donde ubican el 90% de las 50 mayores instalaciones de este tipo en el mundo, siendo la más grande de ellas la Central Hoya de los Vicentes, ubicada en Murcia, España con una potencia instalada de 23 [MW], construida hacia Enero de 2008 [36].
- **Net Metering:** en algunos países se utiliza este sistema, el cual básicamente consiste en permitir a los usuarios recibir alguna compensación económica por cualquier energía extra que incorporen a la red [37]. Por lo general se trata de inyecciones de energía a la red provenientes de energías renovables no convencionales, en particular de energía eléctrica fotovoltaica.

Lo anterior se realiza convirtiendo la corriente DC en corriente AC, a través de un inversor tipo “grid-tie”, cuya principal diferencia respecto de un inversor tradicional es que se asegura de la onda alterna esté en fase con la de la red eléctrica y además se asegura que la corriente fluya desde el sistema fotovoltaico hacia la red, lo cual lo realiza manteniendo una tensión levemente mayor que la de la red para forzar el flujo de la corriente [38].

Este tipo de venta de energía debe encontrarse regulado por ley para poder ser utilizado. Algunos de los países que permiten este sistema son Australia, Bélgica, México, Nueva Zelanda, Portugal, Singapur, Estados Unidos, España y Alemania [39]. En los últimos dos países hay un fuerte incentivo hacia este sistema. En España, el precio del kWh entregado a la red llega hasta un 575% del valor normal [40], mientras que en Alemania se tiene que la energía inyectada a la red se valora con un precio 8 veces mayor que el regular, lo que ha creado una enorme demanda de paneles solares en ese país [37].

Las siguientes aplicaciones se caracterizan por encontrarse en lugares donde llevar energía vía tendido eléctrico es muy caro y complicado (a veces impracticable) debido a la lejanía y complejidad de los terrenos donde ellas se utilizan.

- **Estaciones repetidoras de microondas y de radio:** presentes en lugares distantes de abastecimiento eléctrico y terrenos de difícil acceso como cerros escarpados.
- **Electrificación de pueblos en áreas remotas (Electrificación rural):** de alta importancia social ya que permite llevar energía a lugares en donde realizar lo anterior mediante instalaciones tradicionales es altamente complicado.
- **Corriente eléctrica para casas de campo.**
- **Sistemas de vigilancia de datos ambientales y de calidad del agua:** muchas veces ellos se instalan en lugares alejados de la civilización como curso de los ríos, glaciares y otros.
- **Bombeo de agua:** el bombeo de agua ya sea para consumo humano, animal o para riego en áreas rurales es una importante aplicación de paneles fotovoltaicos [41]. Estos sistemas funcionan ya sea mediante el uso de motores AC o DC, los cuales tienen la ventaja que pueden ser conectados directamente a los paneles fotovoltaicos sin la necesidad de un inversor u otro dispositivo adicional. Esta aplicación es de vital

importancia en donde el agua es escasa y además no existen fuentes de energía de fácil acceso como electricidad, combustibles fósiles, etc.

- **Instalaciones médicas en áreas rurales:** bajo este punto vale la pena mencionar el sistema “Hospital in a box” de Global Medical Systems [42]. Este sistema es total transportable y cabe sin problemas en la parte trasera de un camión. Permite que un equipo integrado por tres personas entrenadas lleve a cabo operaciones quirúrgicas casi en cualquier lugar del mundo con los mismos estándares de un hospital. Todo lo que este equipamiento necesita para funcionar corresponde a la batería de un camión, la cual puede ser recargada mediante el uso de un panel solar. Así, por ejemplo, en la mayor parte de África, el panel solar es capaz de captar suficiente energía en un día para permitir que el sistema funcione durante 5 días [41].



Figura 2.45 Sistema "Hospital in a box" [42]

Además de las anteriores aplicaciones, la energía fotovoltaica puede ser usada en:

- **Balizamiento para protección aeronáutica.**
- **Sistemas de protección catódica.**
- **Sistemas de desalinización.**
- **Señalización ferroviaria.**
- **Postes SOS (Teléfonos de emergencia de carretera).**
- **Parquímetros (ver Figura 2.46).**



Figura 2.46 Parquímetro que utiliza celdas solares, Edimburgo, Alemania [43]

2.2.11.2 Aplicaciones móviles

Las aplicaciones móviles, como su nombre lo indica, corresponden a aplicaciones en que los paneles de celdas fotovoltaicas se desplazan mientras están funcionando, lo que hace que la radiación solar que reciben varíe de forma distinta al compararlas con aplicaciones estacionarias que utilizan energía fotovoltaica. Dentro de estas aplicaciones, destacan las detalladas a continuación.

2.2.11.2.1 Aplicaciones espaciales

Las celdas solares deben su aparición a la industria aeroespacial, y se han convertido en el medio más fiable de suministrar energía eléctrica a un satélite o a una sonda en las órbitas interiores del Sistema Solar. Esto es gracias a la mayor irradiación solar sin el impedimento de la atmósfera y a su bajo peso [20].

El primer satélite puesto en órbita por el hombre de manera exitosa fue el Sputnik 1 por parte de la ex Unión Soviética el 4 de octubre de 1957 [44], pero el primer satélite en utilizar celdas fotovoltaicas no fue lanzado hasta el 17 de marzo de 1958 por los Estados Unidos. Dicho satélite fue el Vanguard 1 [45], con un peso de 1,47 kilogramos, que corresponde al cuarto satélite puesto en órbita de manera exitosa por el hombre, y el más antiguo que aún se encuentra orbitando la Tierra. Este satélite está formado por una esfera de aluminio de 16,5[cm] de diámetro, y cuenta con dos transmisores para enviar información a la Tierra, uno de ellos de 10[mW], con una frecuencia de 108[MHz] alimentado por una batería de mercurio y otro transmisor de 5[mW], de 108,03[MHz] alimentado por 6 celdas solares cuadradas (5 [cm] por lado aproximadamente) montadas en el cuerpo del satélite. Además cuenta con 6 antenas de 30[cm] de largo que sobresalían desde la esfera.



Figura 2.47 Satélite Vanguard I [45]

Desde el lanzamiento del Vanguard 1 han pasado 50 años, dentro de los cuales la tecnología ha avanzado una gran cantidad (mayores eficiencias en celdas solares, paneles con seguimiento de Sol, etc.) y el número de satélites y otras naves espaciales que utilizan energía solar han aumentado en un gran número, teniéndose que hoy en día la mayoría de los satélites que orbitan la Tierra utilizan celdas solares [46].

Los paneles solares utilizados en satélites necesitan tener una gran área en su superficie que pueda ser orientada hacia el sol mientras la nave se mueve para poder generar más

electricidad. Dado que las naves tienen que ser pequeñas, se tiene un límite en la cantidad de potencia que puede ser producida [46].

Las naves espaciales son construidas de forma tal que sus paneles puedan pivotar mientras ellas se mueven, por lo que los paneles pueden permanecer siempre en el camino de los rayos de luz sin importar la dirección de la nave. Las naves solares hoy en día son diseñadas con paneles solares que pueden estar siempre orientados hacia el Sol. Un mecanismo de seguimiento es a menudo incorporado en los arreglos de celdas solares, para permitirles estar orientados hacia el Sol. Pese a lo anterior, en algunas ocasiones, es conveniente orientar los paneles de manera que no les llegue la luz solar de manera plena. Esto sucede si las baterías están totalmente cargadas y si la cantidad de electricidad necesitada es menor que la de electricidad generada. Además de lo anterior, los paneles solares han sido utilizados para generar un arrastre atmosférico para realizar operaciones de frenado aerodinámico. Algunas naves que han realizado esta operación son *Magellan* (en Venus), *Mars Global Surveyor* (en Marte) y la *Estación Espacial Internacional*. Algunas naves tienen paneles de frenado aerodinámico junto a los paneles solares.



Figura 2.48 Paneles Solares y de frenado del Mars Global Surveyor [46]

Las naves espaciales rotatorias pueden tener celdas solares en todos los lados que pueden enfrentar el Sol, en vez de grandes paneles planos.

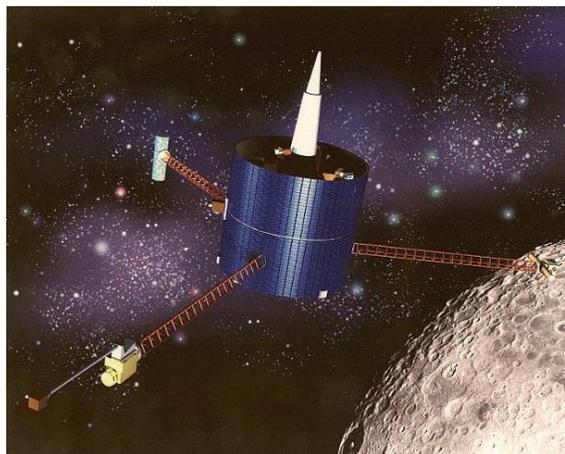


Figura 2.49 Celdas Solares sobre el cuerpo del Lunar Prospector [47]

Hasta la fecha, la energía solar, con excepción de la propulsión, ha sido práctica para las naves espaciales operando no más lejos del Sol que la órbita de Marte (1,5 UA), debido a que a esa distancia la irradiancia es considerablemente menor que en las cercanías de la Tierra (1 UA). Pese a lo anterior, algunas naves a distancias mayores del Sol que Marte, han utilizado paneles Solares, como la Rosetta Space Probe (5,25 UA) y el Stardust (2UA). Ejemplos de naves que han utilizado energía solar son las que se presentan desde la Figura 2.50 a la Figura 2.57:

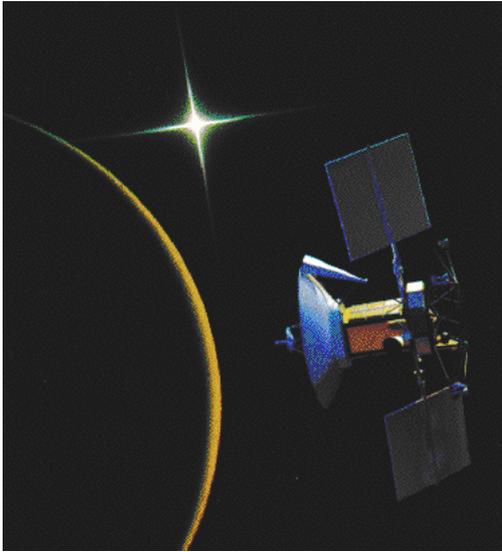


Figura 2.50 Magellan [48]



Figura 2.51 Mars Global Surveyor [49]



Figura 2.52 Mars Observer [50]



Figura 2.53 Hubble Space Telescope [51]

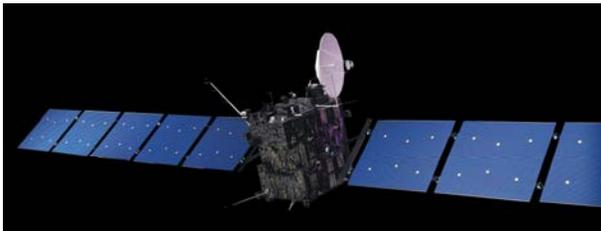


Figura 2.54 Rosetta Space Probe [52]



Figura 2.55 Stardust [53]



Figura 2.56 MIR (junio 1998) [54]



Figura 2.57 International Space Station (marzo 2008) [55]

Las celdas de GaAs son preferidas para utilizarlas en aplicaciones espaciales sobre las de silicio, dado que ellas presentan una mayor eficiencia. Las celdas solares más eficientes en la actualidad corresponden a celdas de múltiple juntura, llegando a más de un 40% en condiciones de laboratorio [56].

Para futuras misiones espaciales es deseable reducir la masa de los paneles solares, y lograr tener una mayor generación de potencia por unidad de área. Lo anterior reduciría la masa total de las naves espaciales, lo que haría factible la utilización de la energía solar en operaciones espaciales a distancias mayores del Sol. La masa de los paneles solares podría ser reducida mediante la utilización de celdas de película delgada, substratos flexibles y estructuras de materiales compuestos. La eficiencia de los paneles podría ser mejorada utilizando nuevos materiales fotovoltaicos para celdas y concentradores solares que intensifican la luz solar incidente. Los concentradores solares para las naves espaciales usarían un lente plano llamado lente de Fresnel [57], el cual toma una gran área de luz solar y la concentra sobre un punto más pequeño.

En la actualidad se cree en la factibilidad de poder de desarrollar Plantas Solares Espaciales, que utilizarían Satélites de energía Solar (Solar Power Satellites SSP) con enormes arreglos de celdas solares. Estos satélites enviarían la energía capturada y generada a la Tierra (también cabe la posibilidad de que sea a la Luna o a una nave espacial) a través de microondas o rayos láser a concentradores especialmente diseñados para tal efecto [58]. Estos satélites estarían en órbita geosincrónica (a 36.000[km] sobre el nivel del mar) en donde el 99% del tiempo los rayos solares inciden sobre las naves.



Figura 2.58 Concepto de un Satélite de Energía Solar [59]

2.2.11.2.2 Aplicaciones terrestres

En la actualidad, la mayoría de las aplicaciones móviles de tracción eléctrica terrestre que utilizan energía solar corresponden a automóviles solares. Además de éstos, también la energía solar está presente (en menor medida) en vehículos tríbridos, que corresponden a vehículos híbridos que obtienen energía adicional a partir de fuentes renovables, en particular, mediante paneles solares [60].

Debe mencionarse que las aplicaciones móviles de tracción eléctrica que utilizan energía solar se encuentran en etapa de desarrollo, y son en su mayoría prototipos o desarrollos experimentales, aunque ya existen algunas aplicaciones comerciales. También se han realizado pruebas en trenes de carga utilizando paneles solares como unidades auxiliares de poder en Italia [61].

1. Automóvil solar

Un automóvil solar es un automóvil propulsado por un motor eléctrico alimentado por energía solar obtenida mediante paneles ubicados sobre su superficie, la que puede ser almacenada en baterías eléctricas o utilizada directamente por el motor. En la actualidad estos vehículos no son una forma de transporte práctica debido, entre otros, a los grandes costos que tiene un vehículo de este tipo.

Los equipos de desarrollo han enfocado sus esfuerzos hacia la optimización de la funcionalidad del vehículo, preocupándose poco por la comodidad del pasajero. La mayoría de los automóviles solares sólo tienen espacio para una persona.

Los automóviles solares compiten en carreras como la Panasonic World Solar Challenge y la American Solar Challenge. Estos eventos son a menudo apoyados por agencias gubernamentales. En estas competiciones participan por lo general universidades provenientes de todo el mundo, aunque también han participado muchos equipos profesionales, incluyendo equipos de General Motors y Honda [62].

La cabina del piloto normalmente contiene un solo asiento, aunque algunos automóviles también tienen un segundo asiento. En ella se encuentran algunos indicadores como los de los automóviles convencionales. Aparte de conducir el automóvil por la carretera, la principal tarea del conductor es vigilar los distintos indicadores para verificar el estado del auto y evitar problemas que no puedan ser detectados por el equipo de apoyo. Los conductores cuentan con un cinturón de seguridad y a veces (según la carrera) deben utilizar un casco como el de los automóviles de carreras. Estos vehículos tienen algunos de los elementos comunes a cualquier automóvil, como frenos, acelerador, luces intermitentes, espejos retrovisores (o cámara), ventilación, entre otros. También cuentan con una radio para comunicarse con el resto del equipo.

El sistema eléctrico es el más importante de los sistemas del automóvil, ya que controla la potencia que entra y sale del conjunto. Las baterías hacen las veces del estanque de combustible en donde se almacena energía para uso futuro. Los automóviles solares usan diversos tipos de baterías, incluyendo plomo-ácido, níquel-cadmio, y litio. Las baterías de plomo son las más económicas y fáciles de operar, pero su relación peso/potencia es mala. A su vez, las baterías de

lito son las más caras, requieren un sistema de manejo complicado, pero su relación peso/potencia es muy buena.

Los MPPTs controlan la potencia que viene desde los paneles solares de forma tal de maximizarla y suministrarla al motor, y el controlador del motor maneja la electricidad que alimenta al motor de acuerdo a las señales que provienen del acelerador. Además, muchos automóviles solares cuentan con sistemas de adquisición de datos que monitorean todo el sistema eléctrico y envían dicha información al equipo de apoyo que viaja con el auto solar.

El conjunto del motor y la transmisión es distinto en los automóviles solares. El motor eléctrico mueve normalmente una sola rueda (generalmente la trasera) debido a la baja potencia con la que se cuenta. Los motores de los automóviles solares tienen generalmente entre 2 y 5 HP (1 a 3 kW). El motor se usa también como transmisión porque las cajas de cambio son raramente usadas debido a que su incorporación involucra mayores pérdidas de energía a lo largo del recorrido. Hay tres tipos básicos de transmisión usados en los automóviles solares, las cuales son la transmisión directa con una sola reducción, la transmisión por correa de relación variable y la transmisión directa, siendo esta última la más utilizada.

Los sistemas mecánicos son diseñados para minimizar tanto el peso como la fricción, pero manteniendo la rigidez. Se utiliza titanio, aluminio y materiales compuestos para asegurar una buena relación entre rigidez y peso.

Los automóviles solares tienen generalmente tres ruedas, encontrándose diseños de hasta cuatro. Los de tres ruedas poseen generalmente dos ruedas frontales y una trasera. Las frontales proveen la dirección y la trasera la tracción usualmente.

Los automóviles solares poseen un amplio rango de suspensiones debido a la variedad de carrocerías y chasis. La suspensión delantera más usada es la de doble brazo articulado, mientras la trasera es del tipo de brazo articulado usado en motos. Los frenos más usados son los de disco, debido a buena capacidad de frenado y ajuste. Se usan tanto frenos mecánicos como hidráulicos.

Los sistemas de dirección son muy variables. Los factores básicos de diseño de los sistemas de dirección son eficiencia, fiabilidad y alineamiento preciso para minimizar el desgaste de neumáticos y pérdida de potencia. Algunos fabricantes han diseñado neumáticos y llantas especiales para vehículos solares.

Los paneles solares constan de cientos de celdas fotovoltaicas. Estos automóviles utilizan distintas tecnologías de celdas, siendo las más comunes el silicio policristalino, el silicio monocristalino y el arseniuro de galio. Las celdas se conectan en cadena que luego se conectan entre sí para formar un panel. Las celdas se encapsulan para protegerlas del clima y la rotura, pero a diferencia de los paneles de uso estacionario, este encapsulamiento debe ser muy liviano. Lo anterior se hace cubriendo las celdas con pinturas especiales o delgadas telas que permiten el paso de la luz a demás de mejorar la resistencia mecánica de las celdas.

Los automóviles solares tienen formas muy especiales. Se trata de minimizar la resistencia del aire, maximizar la exposición al sol, minimizar el peso y hacer los vehículos lo más seguro posible. En el diseño del chasis el propósito es maximizar la rigidez y la seguridad, mientras se mantiene el peso lo más bajo posible. En general se utilizan tres tipos de chasis: la estructura espacial, que usa tubos soldados que soportan la carrocería de resina; el chasis semimonocasco,

que usa las vigas y cabeceras de resina para soportar el peso y está integrado en la parte inferior, con las secciones superiores a menudo unidas a la carrocería; y la estructura monocasco, que usa la carrocería como una estructura que soporta la carga.

Debe mencionarse que las resinas compuestas se usan ampliamente en los automóviles solares. La fibra de carbono, el Kevlar y la fibra de vidrio son los materiales estructurales más frecuentes, mientras la espuma es el material de relleno. Las resinas epoxy se usan para unir estos materiales. Las estructuras de fibra de carbono y Kevlar son tan fuertes como el acero pero con un peso mucho menor.

El optimizar el uso de la energía es de suma importancia en una carrera de automóviles solares. Por tanto, es muy importante monitorear la velocidad, consumo de energía, energía cargada a través del panel solar, entre muchos otros aspectos. La estrategia empleada depende de las reglas y condiciones de la carrera. Estas carreras suelen tener un punto inicial de salida y llegada al que hay que llegar en el menor tiempo posible. Dada la variedad de condiciones en la carrera y el limitado aporte de energía entregado por los paneles solares, los equipos utilizan software que les permite determinar la velocidad óptima a la que debería viajar el automóvil.

Dos de las carreras más importantes son la Panasonic World Solar Challenge [1] y la North American Solar Challenge [63]. En ellas participan gran variedad de equipos universitarios y profesionales. Los automóviles requieren equipos de soporte intensivo, similares a los equipos de carreras profesionales. Existen otras carreras como Suzuka, Phaethon, y la World Solar Rally. Suzuka es una carrera anual en Japón y Peatón fue parte de la Olimpiada Cultural en Grecia antes de las olimpiadas del 2004.

Algunos vehículos que han competido en carreras solares son los que se presentan entre la Figura 2.59 y la Figura 2.62.



Figura 2.59 Nuna4 [64]



Figura 2.60 Aurora 101 [65]



Figura 2.61 Eolian I [66]



Figura 2.62 Umicar Infinity [66]

2. Aplicaciones prácticas

Si bien la energía solar no ha sido utilizada de manera práctica masivamente, ésta ha comenzado a ser utilizada en algunas aplicaciones de manera práctica en los últimos años.

A mediados de 2005 se forma la empresa Solar Electric Vehicles (SEV) [67] para desarrollar un sistema solar viable que fuera capaz de proveer una capacidad eléctrica de carga suplementaria a los vehículos híbridos eléctricos a través de un panel solar y otras componentes necesarias en dicho sistema. Hacia fines de 2005, SEV fue el primero en diseñar, probar y construir un sistema que cuenta con un módulo solar desarrollado exclusivamente para vehículos híbridos y el Toyota Prius 2004-2006.

Dicho modulo es capaz de generar 215[W] y es el primer módulo solar convexo en ser comercialmente producido.

Todos los modelos del sistema de esta empresa utilizan celdas monocristalinas de alta eficiencia, el cual es capaz de proveer hasta un 29% de ahorro en combustible. Algunos de esos sistemas se muestran a continuación entre la Figura 2.63 y la Figura 2.66.



Figura 2.63 Toyota Prius [68]



Figura 2.64 Toyota Rav4 EV [68]



Figura 2.65 Toyota Highlander [68]



Figura 2.66 Ford Escape Hybrid [68]

En mayo de 2007 una alianza de compañías canadienses liderada por Hymotion [69] alteró un Toyota Prius híbrido para utilizar celdas solar capaces de generar hasta 240[W] de potencia en un día totalmente despejado. Esta potencia extra permite el recorrer 15[km] extras en un soleado día de verano si sólo se utiliza el motor eléctrico.

Por su parte, la marca de automóviles Venturi anunció el año 2006 que sacaría al mercado el primer auto comercial electrosolar híbrido a principios de 2008: el *Venturi Astrolab*, con 3,5[m²] de celdas solares de un rendimiento de un 21%, y cubierto por una película compuesta de nanoprisma que permiten tener una concentración más densa de la luz solar sobre el vehículo.

Este auto es capaz de trabajar con muy poca energía respecto de los autos convencionales (su motor es de 16[kW]). Utiliza baterías NiMH de última generación, refrigeradas por líquido. Estas baterías permiten el recuperar la energía utilizada desde los paneles solares o desde la red eléctrica al enchufarlo para que se recargue, haciendo que sea el primer vehículo electrosolar híbrido desarrollado. Posee una velocidad máxima de 120[km/h] y una autonomía de 110[km].

El vehículo posee chasis tipo monocasco de carbono, que es ultra ligero y sirve como una protección, que garantiza la seguridad de sus ocupantes en el caso de una colisión [70].



Leblogauto.fr

Figura 2.67 Venturi Astrolab [71]

Además del Astrolab, la firma Venturi anunció otro modelo electrosolar: el Eclectic [72]. Este vehículo se encuentra actualmente en desarrollo y espera ser comercializado en el año 2009.

El Venturi Eclectic es un auto urbano de tres pasajeros, el cual cuenta con un panel solar de 2,5 [m²] de una eficiencia del 14%, el cual puede generar hasta 300[W], una velocidad máxima de 50[km/h] y una autonomía de 50[km]; además posee la opción de ser cargado mediante una turbina de viento personal de fácil transporte. Este auto está diseñado para ser utilizado como un city-car. La carga que se puede obtener de los paneles en un día equivale a unos 7[km].



Figura 2.68 Venturi Eclectic [72]

Una posible aplicación práctica para vehículos energizados con energía solar serían los carros de golf, algunos de los cuales son poco usados. Aunque poseen una pequeña superficie en su techo, ellos pasan largos tiempos estacionados bajo el Sol, lo que les permitiría obtener una buena cantidad de energía solar.

Un inventor de Michigan, EEUU, durante el año 2005 modificó un scooter eléctrico de forma tal que este pudiera ser cargado con paneles solares. Este vehículo se carga mientras está estacionado y cuenta con 4 paneles solares que se pueden doblar mientras se viaja. Está diseñado para ser usado como un vehículo city-car [73].



Figura 2.69 PVScooter y su inventor Don Dunklee [73]

Otro proyecto que busca llegar a convertirse en una aplicación práctica corresponde a un proyecto suizo, conocido como Solartaxi. La idea es lograr construir un vehículo solar adecuado para los caminos comunes y corrientes, el cual lleva un trailer sobre el que va montado un arreglo de 6[m²] de celdas solares. Las baterías de Solartaxi le permiten recorrer hasta 400[km] sin ser recargado. Además, el auto puede recorrer 200[km] sin el trailer. El auto pesa 500[kg] y el trailer 200[kg], y su velocidad máxima es de 90[km/h]. De acuerdo al jefe del proyecto, este vehículo puede ser producido por 6000 Euros en producción en masa. Solartaxi comenzó un tour alrededor del mundo en diciembre de 2007 [74].



Figura 2.70 Solartaxi y su trailer con celdas solares [75]

2.2.11.2.3 Aplicaciones Aéreas

Una aeronave eléctrica, como su nombre lo indica, corresponde a una aeronave que utiliza motores eléctricos en vez de los clásicos motores de combustión interna. La electricidad para alimentar dichos motores puede provenir de celdas de combustibles, baterías o celdas solares.

Las ventajas de una aeronave eléctrica incluyen una mayor maniobrabilidad debido al gran torque que son capaces de entregar los motores eléctricos, una seguridad mayor debido a una menor probabilidad de fallas mecánicas en los motores, y un menor riesgo de explosión o fuego en el caso de un accidente. A su vez, la mayor desventaja de este tipo de naves corresponde a la baja autonomía de vuelo [76]. La autonomía de vuelo puede ser extendida añadiendo celdas solares al cuerpo de la nave, en especial sobre las alas, caso en el cual se habla de una aeronave solar.

Para que las celdas solares tengan un efecto considerable en el aumento de la autonomía de la nave, es necesaria una gran área sobre la nave en comparación con su peso para instalarlas. Por lo general, lo anterior se consigue construyendo estas naves con alas de una gran envergadura respecto del tamaño del cuerpo.

Hoy en día existe un gran interés militar en los vehículos aéreos no tripulados. La energía solar les permitiría a éstos permanecer en el aire por meses, convirtiéndose en un medio mucho más barato para realizar labores que hoy son llevadas a cabo por satélites [77].

Muchos prototipos han sido construidos, siendo la NASA (en conjunto con otras compañías) una de las agencias que han invertido tiempo y dinero en este tipo de desarrollos. Además, AeroVironment [78] ha construido algunos de los mejores aviones de demostración realizados en el mundo.

Si bien en la actualidad, el mayor interés en desarrollos está en los vehículos aéreos no tripulados, también se han construido naves tripuladas, como las presentadas en la Figura 2.71 y la Figura 2.72:



Figura 2.71 Gossamer Penguin [79]

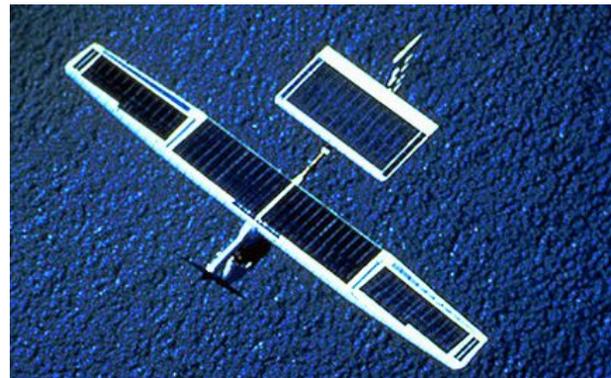


Figura 2.72 Solar Challenger [78]

Vale la pena mencionar que el *Solar Challenger* logró volar desde París a Londres sólo con energía solar.

En cuanto a los vehículos aéreos no tripulados, destacan los presentados en la Figura 2.73 y la Figura 2.74.



Figura 2.73 Helios [76]



Figura 2.74 Zephyr [80]

El *Helios*, el que corresponde a un avión energizado mediante celdas solares y celdas de combustible, logró establecer un récord de altura en un vuelo con 96.383[pie], lo que equivale a 29.524[km] el 14 de agosto de 2001. A su vez, el *Zephyr* logró volar durante dos ciclos diurnos abastecido todo el tiempo sólo de la energía recibida del Sol.

En la actualidad se encuentran en desarrollo algunos proyectos de aeronaves solares como el Sky Sailor (Figura 2.75), que está apuntado para realizar mediciones de exploración en Marte, mientras que el Solar Impulse (Figura 2.76) está orientado a realizar operaciones tripuladas de circunnavegación alrededor de la Tierra.

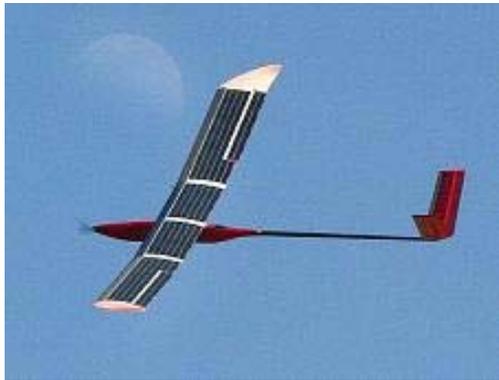


Figura 2.75 Sky Sailor [81]



Figura 2.76 Solar Impulse [78]

2.2.11.2.4 Aplicaciones marítimas

Hoy en día muchas embarcaciones eléctricas o híbridas se encuentran en servicio alrededor del mundo en distintas aplicaciones, desde pequeños botes de paseo hasta grandes embarcaciones capaces de transportar hasta cientos de personas. Si estas embarcaciones utilizan como fuente de energía celdas solares fotovoltaicas, entonces se está hablando de un barco solar.

Cruceros, submarinos y torpedos usan motores eléctricos para la propulsión. La razón de esto es la ausencia de ruido y oscilaciones, así como la confiabilidad de estos sistemas. Grandes trasatlánticos de pasajeros, apuntando a proveer la máxima comodidad posible a sus pasajeros,

los utilizan, pero generan la electricidad necesaria a través del uso de muchos generadores Diesel pequeños.

La historia de los barcos eléctricos se remonta hacia 1838, donde el profesor Moritz Jacobi, en Rusia, realizó experimentos con un barco de 24 pies de largo propulsado eléctricamente [82]. Más de ciento cincuenta años después, periodo durante el cual los barcos eléctricos fueron viendo avances sustanciales en su funcionamiento, se construyó el primer barco solar de pasajeros. Más específicamente, éste fue construido en 1995 por la *MW-Line* en Yverdon, Suiza [83]. Han pasado un poco más de 10 años desde el primer barco solar de transporte de público, y hoy en día existe una cantidad considerable de ellos. Algunos se aprecian a continuación (Figura 2.77 a Figura 2.80).



Figura 2.77 Aquarel II en el lago de Geneva [83]



Figura 2.78 Sonneschein [83]



Figura 2.79 RA 66 [83]



Figura 2.80 RA82 Alster Sonne [83]

La historia muestra que los botes eléctricos no son nada nuevo, pese a lo cual el desarrollo de sistemas solares es un hecho muy interesante para este tipo de transporte. La generación de electricidad solar permite independizarse de la red eléctrica, y además el Sol provee una forma de energía segura y autosuficiente.

Los botes eléctricos son muy eficientes. Existe un gran torque sobre un amplio rango de velocidades, de manera tal que diámetros más grandes en los propulsores pueden ser utilizados de forma más lenta. Así, vibraciones, zumbidos y la polución producida por la combustión son eliminados, de forma tal que los viajes sean más placenteros y la invasión sobre el entorno sea mínima.

La energía solar puede ser utilizada en conjunto con otra fuente de energía en el caso de viajes largos, como por ejemplo, aceite vegetal (biodiesel). En general, para maniobras de puerto, viajes recreacionales, etc. basta con el uso de las baterías cargadas sólo con energía solar.

Uno de los problemas con los botes solares es que la orientación plana no es óptima para la generación de potencia en muchas latitudes. Existe un proyecto australiano, el cual optimiza la posición de los módulos solares de forma tal de capturar más energía del sol y, al mismo tiempo, mejorar el desempeño aerodinámico. Dicho proyecto ha sido desarrollado por la empresa Solar Sailor [84], la cual diseña y construye embarcaciones híbridas para distintos usos.

La idea de dicho proyecto, conocido como *Solar Wing*, es utilizar tanto la energía solar como la eólica. Dependiendo de las condiciones climáticas, estas dos fuentes de energía son utilizadas simultáneamente o por separado. Las alas se mueven automáticamente, siguiendo al Sol para realizar una óptima captación de energía solar y al viento para una navegación a vela óptima. En condiciones de viento extremas, las alas se bajan contra la embarcación y están diseñadas para funcionar con vientos de 40 nudos con un margen de seguridad del 300% [84]. En la Figura 2.81 y la Figura 2.82 aprecia el concepto de este proyecto.



Figura 2.81 Tecnología "Solar Wing " [84]



Figura 2.82 Catamarán Solar Sailor con tecnología "Solar Wing" [84]

Otra aplicación posible de la energía solar es el abastecer botes-casa de baja velocidad de operación, como el que muestra en la Figura 2.83.



Figura 2.83 Casa-bote energizada mediante paneles solares [85]

De manera similar que en el caso de los autos solares, también existen carreras para botes solares en el mundo.

En 1993 el primer campeonato alemán de botes solares ocurre, y en 1995 el primer campeonato europeo de botes solares es organizado. Éste ha tenido lugar en La Rochelle, en el Océano Atlántico, en tres lagos de Suiza, así como en Berlín y Hamburgo. La canoa *Carl* lo ganó con un motor eléctrico de 1,5[kW] de potencia. Dicha embarcación ganó hasta 1997 con una tecnología muy simple: baterías de plomo-ácido de 5 años de antigüedad y un motor eléctrico de 30 años de antigüedad, pero con una tecnología de propulsión optimizada, al igual que la delgada canoa.



Figura 2.84 Canoa "Carl" con Thomas Meyer en La Rochelle [82]

Dos carreras de botes solares son la *Solar Splash* [86], cuya decimoquinta versión se realiza entre el 18 y 22 de junio de 2008 y la *Frisian Solar Challenge* [87], que es realizada en Holanda.

La energía solar ofrece la posibilidad de operar embarcaciones no tripuladas autónomas las que, al igual que los vehículos aéreos no tripulados, son de alto interés militar [77].

3 Metodología de trabajo

Para cumplir los objetivos planteados, y poder desarrollar un modelo de comportamiento de celdas fotovoltaicas específicas que incluya la radiación espectral para una superficie irregular, este trabajo se ha dividido en tres grandes áreas que, una vez desarrolladas, implementadas y validadas, se integran en un modelo por bloques, el que finalmente es el modelo que permite estudiar el comportamiento de un panel de celdas fotovoltaicas cualquiera.

Para realizar lo anterior, la metodología de trabajo que se usa se presenta en la Figura 3.1.

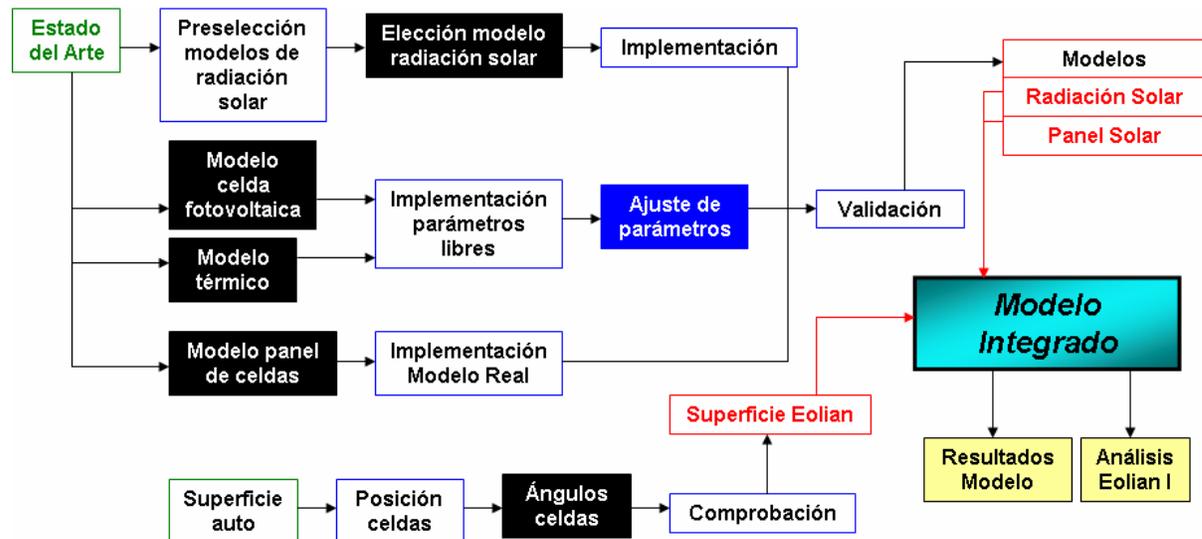


Figura 3.1 Metodología de trabajo

En primer lugar, se realiza una investigación bibliográfica sobre la energía solar y celdas fotovoltaicas, estableciendo el estado del arte de dichos tópicos, con los cuales se fundamenta el resto del trabajo que se realiza. Una vez realizada la investigación bibliográfica pertinente, el trabajo es separado en tres grandes áreas que se detallan a continuación.

En base a la revisión bibliográfica realizada, se preseleccionan algunos modelos de radiación solar, disponibles en la literatura, utilizando criterios generales. Utilizando criterios más específicos (ver sección 3.1), se selecciona finalmente un modelo específico. Luego, se efectúa la implementación de éste, realizando todos los cambios y variaciones necesarias para conseguir la modelación deseada, la cual debe ser validada. Lo anterior se lleva a cabo mediante la realización de simulaciones que se comparan contra datos experimentales. Una vez que el trabajo es validado, recién se cuenta con un modelo para determinar la radiación espectral.

Por otro lado, se selecciona un modelo eléctrico de una celda fotovoltaica y un modelo térmico para ésta, en base al estudio realizado. Ellos se implementan de forma tal que sean generales, es decir, no se especifican los parámetros que los definen, para así contar con modelos aplicables sobre cualquier tipo de celda solar. Además, en esta parte del trabajo, se eligen las hipótesis simplificadoras que se utilizan y las que no. Una vez llevado a cabo lo anterior, mediante mediciones experimentales, se realiza un ajuste de parámetros, que permite implementar los modelos desarrollados sobre tipos de celdas específicas, momento en el cual es

posible realizar la validación de ellos a través de la realización de simulaciones que se comparan contra datos experimentales.

Para el desarrollo de una modelación para un panel de celdas solares, se propone un modelo simple, el que interactúa directamente con los dos mencionados en el párrafo anterior. Este modelo no necesita ser ajustado, siendo totalmente genérico, ya que el ajuste de parámetros que se ha realizado en las otras dos modelaciones especifica el comportamiento de un panel de celdas en particular. Este modelo también se valida, y uniendo los tres bloques descritos se cuenta con el modelo para un panel solar que considera el tipo de celdas que lo conforman, su temperatura y su conexión.

Por otro lado, se desarrolla una metodología propia para determinar la posición de las celdas solares sobre una superficie irregular, que corresponde a la superficie del vehículo solar Eolian I, la cual permite establecer los ángulos que definen las celdas del panel de dicho vehículo. Esta metodología debe ser comprobada antes de considerarla como correcta.

Una vez realizado todo lo mencionado, se cuenta con tres modelos (en rojo en la Figura 3.1), los cuales se integran dentro de un gran modelo denominado “*Modelo Integrado*”. Éste entrega los resultados finales del trabajo de memoria, y además se utiliza para analizar el estado y desempeño del vehículo solar Eolian I.

Entre las secciones 3.1 y 3.4, se detalla la metodología que sigue cada uno de los tres modelos desarrollados, además de la que utiliza el modelo integrado. En las figuras de dichas secciones, se tienen tres tipos de variables: variables de entrada (en color verde), variables intermedias (en color azul) y variables de salida finales (en color rojo). En el caso de que alguna variable de salida de un modelo sea a la vez una variable de entrada de otro, ésta se considera como variable intermedia.

3.1 Metodología Modelo de Radiación Solar

En base a modelos de radiación solar disponibles en la literatura, se preselecciona un conjunto de éstos (presentados en la sección 2.1.7), y en base a uno de ellos se desarrolla el modelo de radiación solar necesario. La elección del modelo a implementar se realiza considerando dos criterios. El primero corresponde a la generalidad de la modelación elegida, para así contar con un modelamiento que sea válido en cualquier lugar de la Tierra. Dado que la implementación del modelo de radiación solar no corresponde al centro de este trabajo, el segundo criterio utilizado persigue el no sobrecomplejizar la programación de esta parte del trabajo. Para ello se busca un modelo cuyas variables de entrada sean de fácil obtención y/o estimación, como por ejemplo, información climática.

En base a los antecedentes revisados en la sección 2.1, se muestra en la Figura 3.2 la metodología considerada para la implementación del modelo de radiación solar.

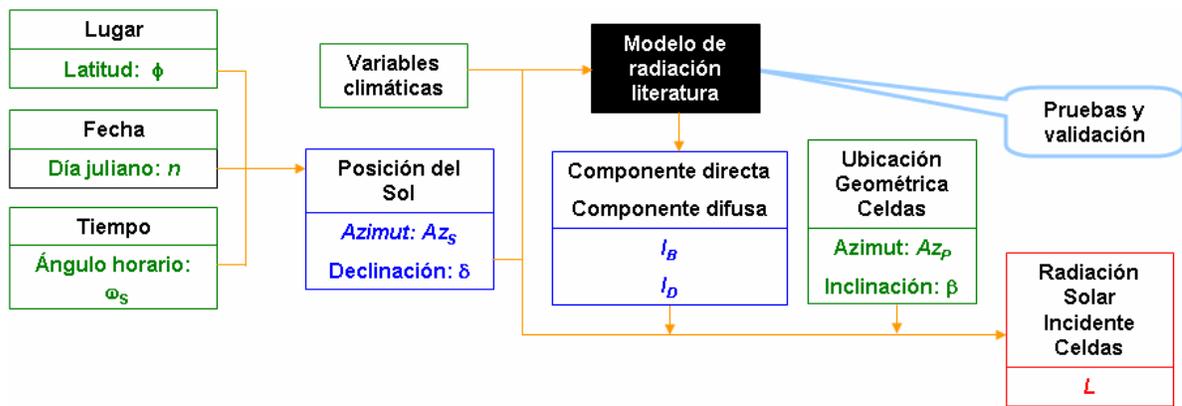


Figura 3.2 Metodología implementación modelo de radiación solar

Se tiene que, en base a las variables de entrada correspondientes a la latitud, día y hora (del observador), se determina la posición del Sol en la bóveda celeste. Utilizando la posición del Sol determinada en conjunto con las variables climáticas (de entrada), el modelo elegido entrega las componentes de radiación solar directa y difusa. Luego, en base a las últimas componentes calculadas junto con la posición de los planos y la posición de Sol se determina la radiación solar incidente sobre cada celda solar.

Una vez implementado el modelo se contempla la realización de distintas pruebas y simulaciones para estudiar el desempeño del modelo.

3.2 Metodología Modelamiento Panel Solar

Para realizar el modelamiento de un panel formado por celdas fotovoltaicas, se considera un modelo formado por 3 bloques, para los cuales se presenta la metodología a utilizar.

1. Bloque Celda Solar

En la Figura 3.3 se tiene la metodología propuesta para realizar la modelación de una celda solar.

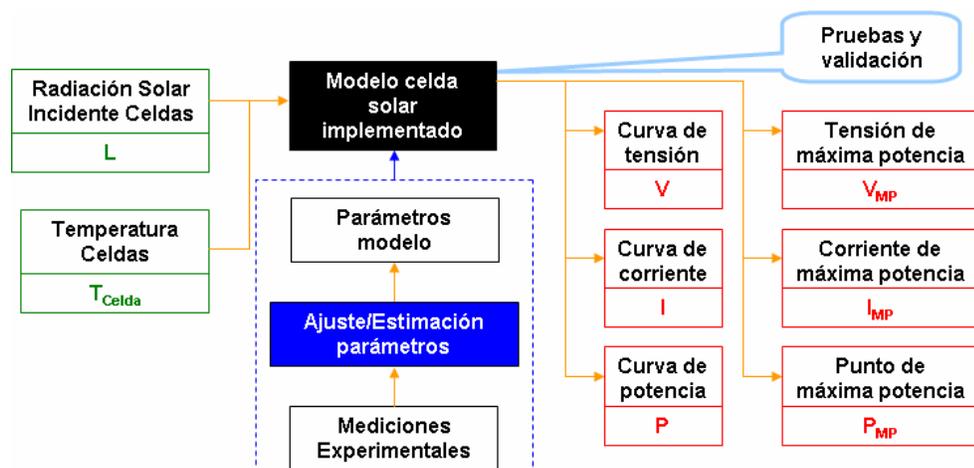


Figura 3.3 Metodología “Bloque Celda Solar”

Este bloque considera como variables de entrada la radiación solar incidente y la temperatura de una celda fotovoltaica o un conjunto de ellas. En base a los parámetros de entrada, se calcula la característica I-V y P-V para cada una de las celdas consideradas, además de determinar las variables para la cual la celda entrega la máxima potencia, correspondientes a V_{MP} , I_{MP} y P_{MP} .

El modelo que se considera en el bloque “Modelo celda solar implementado”, si bien es genérico, será implementado para tipos específicos de celdas solares. Para realizar dicha implementación, se deben introducir en el modelo los distintos parámetros que diferencian un tipo de celda respecto de otro. Para realizar esto último, se considera la realización de un conjunto de mediciones experimentales que permiten determinar los parámetros necesarios en base a un proceso de ajuste y/o estimación de datos según corresponda. En base a dicho proceso, se determinan los parámetros requeridos.

Una vez que el modelo se encuentre implementado, se considera la realización de distintas pruebas y simulaciones para estudiar el desempeño del modelo, y contrastarlo contra mediciones experimentales.

2. Bloque Panel Solar

En la Figura 3.4 se presenta la metodología considerada para modelar un panel solar.

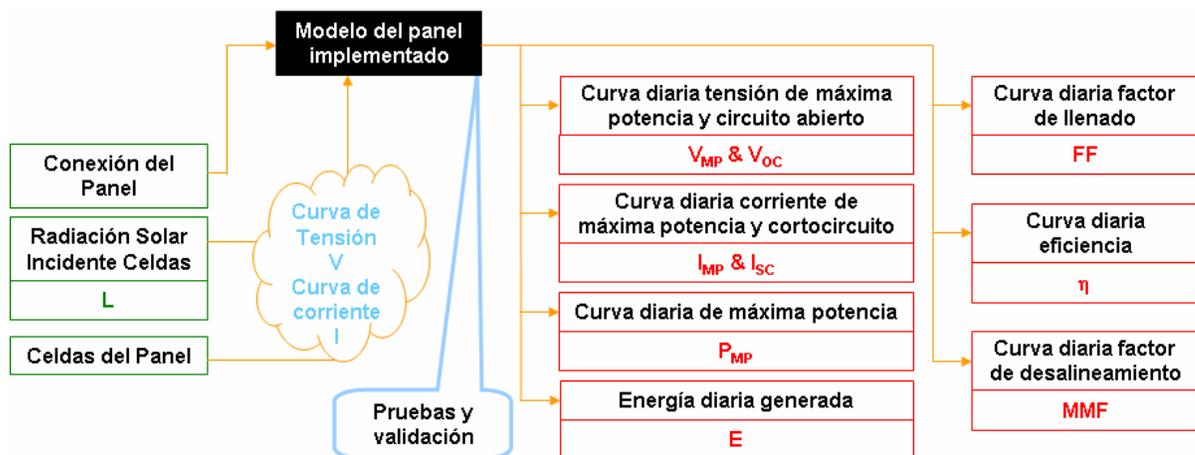


Figura 3.4 Metodología “Bloque Panel Solar”

Este bloque considera como variables de entrada la radiación solar incidente calculada sobre un conjunto de celdas (que conforman dicho panel), las cuales pueden corresponder a todas las celdas consideradas en la simulación, o sólo un subconjunto de ellas, y el tipo de conexión del panel. En base a las dos primeras variables mencionadas, se extraen del espacio de trabajo del software utilizado las características I-V de cada celda, calculadas previamente en el “Bloque Celda Solar”. Con la última información y el tipo de conexión del panel, el modelo determina para cada instante considerado las características I-V y P-V del panel, y en base a ellas el modelo finalmente entrega las variables eléctricas de desempeño del panel (V_{MP} , V_{OC} , I_{MP} , I_{SC} , P_{MP} y E en la Figura 3.4), además de calcular y entregar variables de desempeño y rendimiento del panel (FF , η y MMF en la Figura 3.4).

Se considera la realización de distintas pruebas y simulaciones para estudiar el desempeño del modelo implementado.

3. Bloque Temperatura

Se presenta en la Figura 3.5 la metodología propuesta para calcular la temperatura de una celda solar.

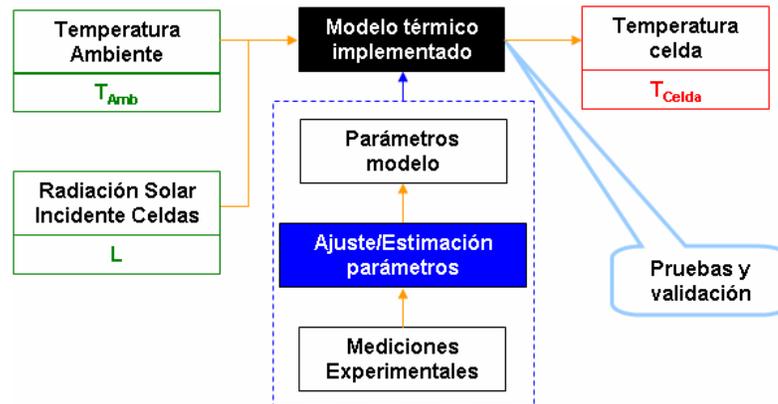


Figura 3.5 Metodología “Bloque Temperatura”

El último bloque considerado tiene como variables de entrada la radiación solar incidente sobre las celdas así como la temperatura ambiente el lugar en donde están localizadas las celdas. En base a dichas variables, el modelo térmico implementado estima la temperatura de las celdas consideradas para todos los instantes que se desee.

El modelo considerado en el bloque “Modelo térmico implementado”, si bien es genérico, será implementado para tipos específicos y distintos de celdas solares. Para realizar dicha implementación, es necesario introducir en el modelo los distintos parámetros que diferencian un tipo de celda respecto de otro. Para realizar esto último, se considera la realización de un conjunto de mediciones experimentales que permiten determinar los parámetros necesarios realizando un proceso de ajuste y/o estimación de datos según corresponda. En base a dicho proceso, se determinan los parámetros requeridos.

Una vez implementado este bloque, se consideran pruebas y simulaciones para validar el modelo realizado. Los resultados que entregue el modelo, serán contrastados contra mediciones experimentales.

Finalmente, en base a los tres bloques considerados para implementar el modelo que entrega el comportamiento de un panel solar, se presenta en la Figura 3.6 la interacción de los tres bloques anteriormente explicados. En la Figura 3.6, para apreciar más claramente la interacción entre los bloques, sólo se presentan las variables globales de entrada, las variables intermedias y las variables globales de salida. Entre la Figura 3.3 y la Figura 3.5 ellas se encuentran con su nombre y simbología.

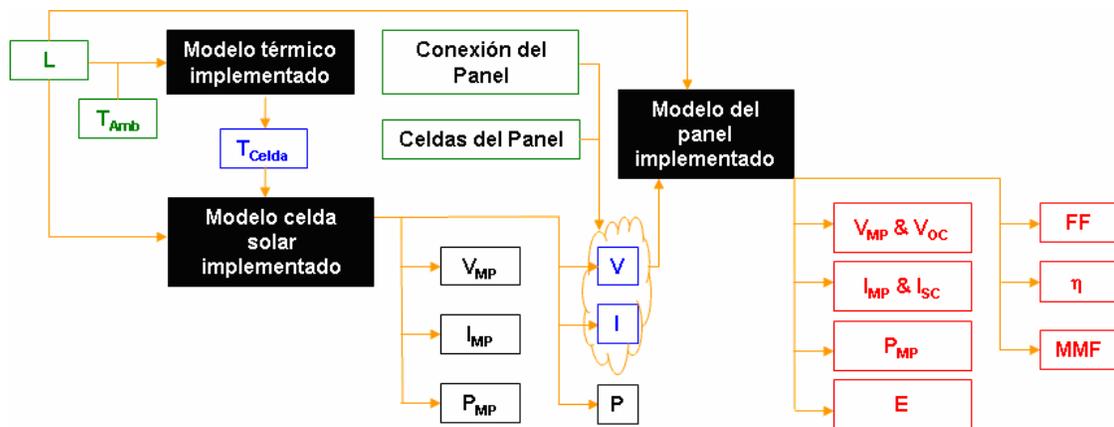


Figura 3.6 Metodología implementación modelamiento panel solar

3.3 Metodología Modelación de la superficie del vehículo

Para determinar la posición de las celdas sobre una superficie irregular, se propone y elige un método dentro de la amplia gama de posibilidades para desarrollarlo. Así, basado en el sistema de construcción de la superficie del vehículo, se realizan los pasos necesarios para modelarla de acuerdo a la metodología presentada en la Figura 3.7

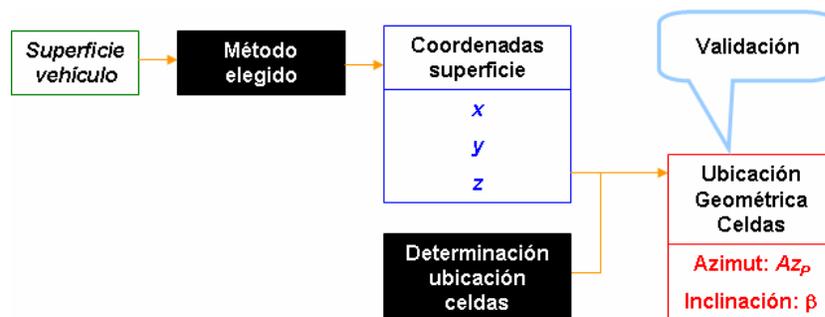


Figura 3.7 Metodología modelación superficie del vehículo

Tomando como dato de entrada la superficie de un vehículo solar, y de acuerdo al método elegido (ver capítulo 6), la idea es generar un conjunto de coordenadas espaciales (x,y,z) para la superficie del panel, las que definen la forma del vehículo. Luego, determinando la posición de las celdas sobre el vehículo, y relacionándolas con las coordenadas de determinadas, se obtiene el azimut y la inclinación de cada celda sobre el vehículo, conjunto que determina la ubicación geométrica y espacial de las celdas sobre el vehículo. Al igual que para los modelos descritos en las secciones 3.1 y 3.2, se consideran algunas pruebas para corroborar la correcta modelación de la superficie del vehículo solar.

3.4 Metodología Modelo integrado

La metodología para desarrollar el modelo de comportamiento de celdas fotovoltaicas específicas que incluya la radiación espectral para una superficie irregular, considera integrar los 3 modelos propuestos dentro de un gran modelo. Una de los beneficios de lo anterior, es que al contar con un modelo formado por bloques, se tiene una flexibilidad para poder realizar pruebas en distintas condiciones y situaciones. Un ejemplo de esto corresponde a considerar la

temperatura de un panel solar diferente a la real, para así poder estudiar su comportamiento bajo dicha condición de funcionamiento. Para llevar a cabo dicho ejemplo basta con definir manualmente, o por algún otro método, las temperaturas de las celdas del panel, y tomar dicho conjunto de temperatura como variables de entrada directamente, no considerando el “Bloque Temperatura.”

En la Figura 3.8 se presenta la interacción entre los tres modelos ya propuestos, para así formar el modelo integrado.

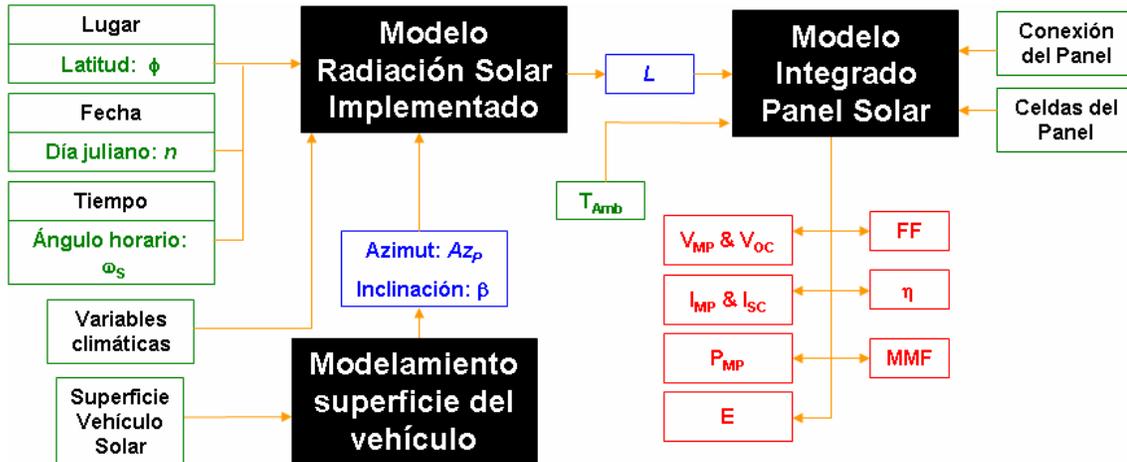


Figura 3.8 Metodología utilizada Modelo Integrado

En la metodología considerada para integrar los tres modelos, se tiene que, en primer lugar, en base a la superficie del vehículo que se desee calcular (u otra superficie) y utilizando la metodología de cálculo implementada, se obtienen los azimuts e inclinaciones de las celdas que conforman el panel solar. Con esa información, y considerando los cuatro bloques de entrada directos para el Modelo de Radiación Solar implementado, que se aprecian en la Figura 3.8, se obtiene la radiación solar incidente para cada una de las celdas solares. Luego, tomando la radiación solar como entrada junto a la temperatura ambiente, es posible calcular las variables de desempeño y eficiencia diarias del panel solar, indicándole al “Modelo Integrado Panel Solar” las celdas que conforman el panel, pudiendo ser todas las simuladas o un subconjunto de éstas, y el tipo de conexión de ellas dentro del panel solar.

4 Modelo de Radiación Solar

4.1 Elección del modelo

De acuerdo a lo explicado en la sección 2.1.7 *Modelos de radiación solar*, en la literatura se cuenta con diversos modelos para estimar la radiación solar. Dichos modelos pueden ser caracterizados y evaluados mediante ciertos atributos. En la Tabla 4.1, se presenta una caracterización de los modelos descritos en la sección mencionada.

	Perrin de Brichambaut	Burridge & Gadd	Ashrae	Spokas & Forcella
Cielo Despejado	SI	SI	SI	SI
Cielo Cubierto	NO	SI	NO	SI
Utilización de coeficientes empíricos	SI	NO	SI	NO
Cantidad de coeficientes empíricos	4x3	-	3x12	-
Uso de información climática	NO	SI	SI	SI
Obtención/estimación información climática	-	compleja	media	sencilla
Variabes información climática	-	3	2	5
Dificultad de programación	normal	normal	normal	normal

Tabla 4.1 Caracterización modelos de radiación solar descritos

Las características de la Tabla 4.1 se explican a continuación:

- **Cielo Despejado:** indica si el modelo estima la radiación solar en ausencia de nubosidad.
- **Cielo Cubierto:** indica si el modelo estima la radiación solar en presencia de nubosidad. Este característica es deseable ya que permite incluir la influencia del clima del lugar sobre la radiación incidente.
- **Utilización de coeficientes empíricos:** en su formulación, algunos modelos usan coeficientes empíricos calculados usualmente en un cierto lugar de la Tierra y época del año. El problema con estos coeficientes se da en el caso de que se quiera utilizar el modelo para estimar la radiación solar en lugares con características diferentes a las del lugar en donde se estimaron dichos coeficientes.
- **Cantidad de coeficientes empíricos:** la notación utilizada en la tabla indica en primer lugar la cantidad de coeficientes que usa el modelo y en segundo lugar la cantidad de valores que dichos coeficientes pueden tomar. A mayor cantidad de coeficientes empíricos se tiene una mayor incerteza respecto de la representatividad del modelo.

- **Uso de información climática:** es deseable que el modelo incluya información climática del lugar en que se quiere estimar la radiación solar ya que así es posible obtener una mejor estimación de la radiación solar incidente.
- **Obtención/estimación información climática:** indica el nivel de dificultad de la recopilación de la información climática que el modelo requiere. Claramente, mientras más simple, el modelo será más fácil de utilizar.
- **Variabes información climática:** indica la cantidad de variables que requiere el modelo para estimar la información climática que requiere. Mientras más variables, el modelo debería ser más preciso, pero esto puede llevar en un aumento del nivel de dificultad de su obtención.
- **Dificultad de programación:** indica, dada la forma algebraica del modelo, qué tan complejo es implementarlo en algún software.

En base a la Tabla 4.1, el modelo elegido para ser implementado corresponde al modelo de *Spokas & Forcella* debido a que permite estimar la radiación solar bajo condiciones de nubosidad incluyendo algunas variables climáticas, cuyos valores son de fácil obtención y estimación (presencia de lluvia, temperaturas extremas durante el día y la altura del lugar), además del hecho de que no utiliza coeficientes empíricos determinados en un lugar particular.

4.2 Implementación del modelo

Para implementar un modelo de radiación solar en particular, no sólo basta con el modelo propiamente tal, sino que también es necesario describir la posición del Sol respecto del observador durante el período en el que se quiera estimar la radiación solar. En esta sección se revisan las relaciones que permiten obtener la posición del Sol para un observador ubicado en un punto de la Tierra durante un día en particular, las cuales, junto con las relaciones descritas en la sección 2.1.7.4 permiten implementar el modelo de *Spokas & Forcella*.

4.2.1 Posición del Sol

De acuerdo a los sistemas de coordenadas revisados en la sección 2.1.5, para determinar la posición de un cuerpo en el cielo (en este caso el Sol) basta con conocer su altura α y su azimut Az . Conociendo la latitud del observador en la Tierra es posible establecer las relaciones entre las coordenados horizontales del cuerpo y sus coordenadas ecuatoriales mediante (4.1), (4.2) y (4.3). En ellas todos los ángulos se encuentran en una misma unidad.

$$\sin(\alpha) = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\phi) \quad (4.1)$$

$$\cos(\alpha) \cdot \cos(Az) = -\cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \quad (4.2)$$

$$\cos(\alpha) \cdot \cos(Az) = \sin(\delta) \cdot \cos(\phi) - \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\phi) \quad (4.3)$$

Donde:

- α : altura del objeto.
- Az : azimut del cuerpo.
- δ : declinación del cuerpo.
- ϕ : latitud del observador sobre la Tierra.
- ω : ángulo horario del cuerpo.

La declinación del Sol puede ser determinada mediante la fórmula de Cooper dada por (4.4).

$$\delta_s = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + N)}{365}\right) \quad (4.4)$$

Donde:

- δ_s : declinación del Sol (en grados).
- N : día juliano.

El ángulo horario del Sol puede ser obtenido mediante (4.5).

$$\omega_s = 15 \cdot (t_s - 12) \quad (4.5)$$

Donde:

- ω_s : ángulo horario del Sol.
- t_s : tiempo solar (medido en horas, en formato de 0 a 24 horas).

A su vez, el tiempo solar se puede determinar mediante (4.6).

$$t_s = LCT + \frac{EOT}{60} - LC - D \quad (4.6)$$

Donde:

- t_s : tiempo solar (en horas).
- LCT : tiempo local (en horas).
- EOT : ecuación del tiempo (en minutos).
- LC : factor de corrección por longitud (en horas).
- D : factor de corrección por cambio de hora (en horas).

Las variables de la ecuación (4.6) son definidas y explicadas a continuación.

El *tiempo local* LCT corresponde a la hora local del observador.

La *ecuación del tiempo* EOT corresponde a la diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar verdadero. Esta diferencia se debe a la forma elíptica de la órbita terrestre y los movimientos de la Tierra durante su recorrido alrededor del Sol haciendo que en ciertos momentos del año el tiempo solar medio se atrase o adelante respecto del tiempo solar verdadero. Dicha variación es cíclica, y puede ser calculada mediante (4.7).

$$EOT = 0,258 \cdot \cos(x) - 7,416 \cdot \sin(x) - 3,648 \cdot \cos(2 \cdot x) - 9,228 \cdot \sin(2 \cdot x)$$

$$x = \frac{360 \cdot (N - 1)}{365,242} \quad (4.7)$$

Donde:

EOT : Ecuación del tiempo (en minutos).

N : día juliano del año.

El *factor de corrección por longitud LC* se aplica ya que la hora local del observador LCT está referida a un meridiano estándar, el que generalmente no coincide con el meridiano en el que se encuentra el lugar. Su expresión está dada por (4.8).

$$LC = \frac{\lambda_{STD} - \lambda}{15} \quad (4.8)$$

Donde:

LC : factor de corrección por longitud (en horas).

λ : longitud en la que se encuentra el observador (en grados).

λ_{STD} : longitud del meridiano de la zona de hora estándar (en grados).

A modo de ejemplo, Chile posee una hora GMT-4, y cada zona horaria abarca 15° de longitud, por lo que para Chile se tiene $\lambda_{STD} = 4 \cdot (-15) = -60^\circ$

El *factor de corrección por cambio de hora D* se aplica debido a que en algunos países durante los meses de verano, se adelanta la hora para aprovechar de mejor manera la luz solar y con ello gastar menos energía. El factor D se puede describir mediante (4.9).

$$D = \begin{cases} 1 & \text{existe cambio de hora (verano)} \\ 0 & \text{no existe cambio de hora (invierno)} \end{cases} \quad (4.9)$$

A partir de la ecuación (4.1) y con las relaciones descritas entre las ecuaciones (4.4) y (4.9) se puede determinar la altura del Sol mediante (4.10)

$$\alpha_s = \arcsin(\sin(\delta_s) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega_s)) \quad (4.10)$$

Donde:

α_s : altura solar.

δ_s : declinación solar.

ϕ : latitud del observador en la Tierra.

ω_s : ángulo horario del Sol.

A su vez, a partir de la ecuación (4.3), junto con las relaciones descritas entre las ecuaciones (4.4) y (4.9), y conociendo la altura solar α_s dada por (4.10) sólo es posible determinar el módulo del azimut solar ya que la función arcoseno entrega valores entre 0° y 180°, y el azimut solar, dependiendo de la locación del observador, la hora del día y la época del año

puede ubicarse en cualquiera de los 4 cuadrantes trigonométricos tomando valores entre -180° y 180° . La manera apropiada para determinar el azimut corresponde en determinar si la hora es anterior o posterior al mediodía solar. Dado que el mediodía solar corresponde a un ángulo horario de valor nulo, se utiliza este último como indicador para determinar si, la hora de medición es anterior o posterior al mediodía solar. Para realizar lo anterior se define la función *signo* que viene dada por (4.11).

$$\text{signo}(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{si } \omega < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Así, utilizando la ecuación (4.3), las relaciones dadas entre las ecuaciones (4.4) y (4.9), la altura solar α_S obtenida mediante (4.10) y la función definida en (4.11) es posible determinar el azimut solar, el que viene dado por (4.12).

$$Az_S = \text{signo}(\omega_S) \cdot \arccos\left(\frac{\sin(\delta_S) \cdot \cos(\phi) - \cos(\delta_S) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\omega_S)}{\cos(\alpha_S)}\right) \quad (4.12)$$

Donde:

- Az_S : azimut solar.
- α_S : altura solar.
- δ_S : declinación solar.
- ϕ : latitud del observador en la Tierra.
- ω_S : ángulo horario del Sol.

Antes del mediodía solar se tiene que $\omega_S < 0$, en el momento del mediodía tiene un valor nulo y después del mediodía solar $\omega_S > 0$. Así, considerando el punto geográfico norte como referencia queda totalmente definida la convención que es utilizada para el azimut. En este caso, el azimut es medido desde la dirección norte, aumentando en sentido antihorario. Un esquema de esto se presenta en la Figura 4.1.

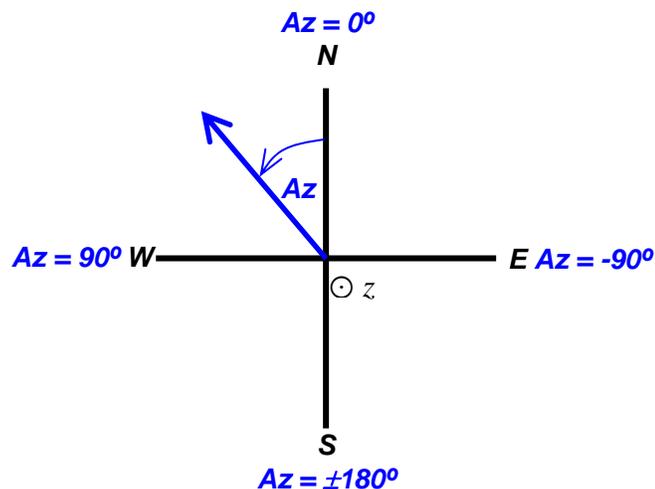


Figura 4.1 Convención utilizada para el azimut

4.2.2 Radiación sobre un plano inclinado

Los modelos descritos en la sección 2.1.7 están desarrollados para calcular la radiación solar sobre un plano horizontal a la superficie terrestre. Ellos calculan la magnitud del vector I_B que corresponde a la componente de la radiación solar directa, y dicho vector es proyectado sobre el plano para calcular la radiación que efectivamente incide sobre él. Dicha proyección se realiza conociendo la altura α_S del Sol (o su complemento, el ángulo cenital del Sol ψ_S), la que viene dada por (4.13).

$$I_B' = I_B \cdot \sin(\alpha_S) = I_B \cdot \sin(90 - \psi_S) = I_B \cdot \cos(\psi_S) \quad (4.13)$$

Donde:

- I_B' : radiación directa incidente sobre un plano horizontal.
- I_B : componente de radiación directa.
- α_S : altura del Sol.
- ψ_S : ángulo cenital del Sol.

Lo descrito en la ecuación (4.13) se aprecia gráficamente en la Figura 4.2

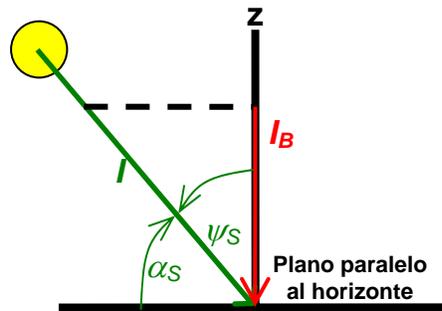


Figura 4.2 Radiación solar directa sobre un plano horizontal

Ahora, considérese un plano inclinado sobre la superficie terrestre de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 4.3.

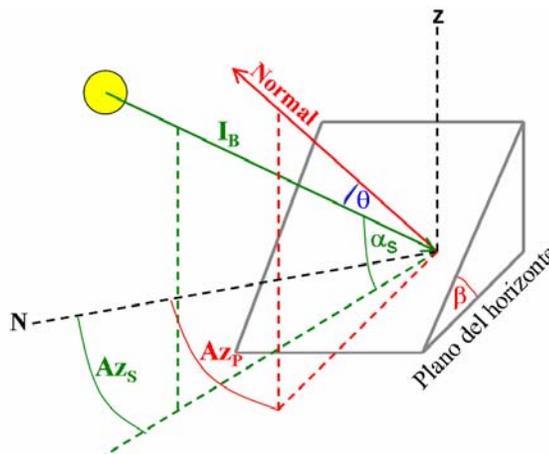


Figura 4.3 Plano inclinado

La radiación directa que efectivamente recibe el plano inclinado corresponde a la proyección de la componente I_B (verde) sobre la normal del plano (rojo). La relación entre los ángulos de dicha figura viene dada por (4.14).

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha_S) + \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha_S) \cdot \cos(Az_S - Az_P) \quad (4.14)$$

Donde:

- Az_S : azimut del Sol.
- α_S : altura del Sol.
- Az_P : azimut del plano.
- β : inclinación del plano.
- θ : ángulo entre la normal del plano y la componente de radiación directa de radiación I_B .

Y finalmente la proyección de la componente I_B sobre la normal del plano será

$$I_B'' = I_B \cdot \cos(\theta) \quad (4.15)$$

Donde:

- I_B'' : radiación directa incidente sobre un plano inclinado.
- I_B : componente de radiación directa.
- θ : ángulo entre la normal del plano y la componente de radiación directa de radiación.

Cuando el plano de la Figura 4.3 presenta inclinación nula, lo que se traduce en $\beta=0^\circ$, se tiene que la ecuación (4.15) se convierte en la ecuación (4.13), con lo que se recupera el planteamiento original del modelo para la radiación incidente sobre un plano horizontal. La demostración correspondiente se encuentra en el grupo de ecuaciones (4.16).

$$\begin{aligned} I_B'' &= I_B \cdot \cos(\theta) \\ &= I_B \cdot (\cos(0) \cdot \sin(\alpha_S) + \sin(0) \cdot \cos(\alpha_S) \cdot \cos(Az_S - Az_S)) \\ &= I_B \cdot \sin(\alpha_S) \\ &= I_B \cdot \cos(\psi_S) \\ &= I_B' \end{aligned} \quad (4.16)$$

4.2.3 Consideración de la variación distancia Tierra-Sol

El modelo de Spokas & Forcella plantea que tanto la radiación directa como la difusa dependen de la constante solar (ver ecuaciones (2.20) y (2.24) en la sección 2.1.7.4). Dicho postulado considera que la distancia entre la Tierra y el Sol durante el año se mantiene constante con un valor $d_{T-S}=1[\text{AU}]$, el que corresponde a la distancia Tierra-Sol promedio. Para considerar la variación de la distancia d_{T-S} durante el año, en la implementación computacional, en vez de utilizar la constante solar I_0 , se utiliza la radiación extraterrestre I_E (ver ecuación (2.7) en la

sección 2.1.3.1), por lo que las ecuaciones (2.20) y (2.24) de la sección 2.1.7.4 se convierten en (4.17) y (4.18) respectivamente.

$$I_B = I_E \cdot (\tau_T)^m \quad (4.17)$$

$$I_D = 0,30 \cdot (1 - (\tau_T)^m) \cdot I_E \cdot \cos(\psi_S) \quad (4.18)$$

Donde:

I_B : radiación solar directa.

I_D : radiación solar difusa.

I_E : radiación extraterrestre.

τ_T : transmitancia atmosférica (corregida por temperatura).

m : masa de aire.

ψ_S : ángulo cenital del Sol.

4.2.4 Implementación computacional

Basándose en las ecuaciones descritas en la sección 2.1.7.4, y tomando en cuenta las consideraciones hechas en las secciones 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, el modelo finalmente implementado se muestra en la ecuación (4.19).

$$I_G = I_B \cdot \cos(\theta) + I_D \quad (4.19)$$

Donde:

I_G : Radiación Global.

I_B : Radiación Directa.

I_D : Radiación Difusa.

θ : ángulo entre la normal del plano y la componente I_B .

En la implementación del modelo de radiación solar no se consideró la radiación reflejada I_R ya que, en general, la radiación reflejada que reciben las superficies “irregulares” en estudio es casi nula debido a que éstas son casi horizontales, y generalmente no cuentan con mayores estructuras sobresalientes respecto del “plano” que contiene los paneles solares³.

La implementación computacional del modelo de radiación solar de Spokas & Forcella fue realizada utilizando el software *MATLAB Version 7.1.0 (R14) Service Pack 3*. El detalle de los códigos realizados se encuentra en el *Anexo A*.

El algoritmo implementado es capaz de calcular la radiación incidente sobre m planos inclinados conociendo tanto sus inclinaciones como azimuts a lo largo de un día específico. El cálculo de radiación se puede realizar sobre determinadas horas del día, las cuales son un parámetro de entrada. En el caso de que no se entreguen dichas horas, el algoritmo estima tanto la

³ El auto solar Eolian es una excepción a esto ya que cuenta con una cúpula que, para los parámetros de los vehículos solares, es muy amplia, siendo su dimensión mayor el largo.

hora del amanecer como la del atardecer teórico, y entrega la radiación solar entre dichas horas de acuerdo al paso de cálculo que se desee y que haya sido ingresado.

Los parámetros que deben ser ingresados al algoritmo se resumen en la Tabla 4.2.

Nombre parámetro	Unidad	Descripción	Comentarios
beta_planos	[°]	Vector fila que contiene las inclinaciones de los planos	
Azp_planos	[°]	Vector fila que contiene los azimuts de los planos	
N	-	Día juliano de trabajo	
lat	[°]	Latitud del lugar	
long	[°]	Longitud del lugar	
long_st	[°]	Longitud del meridiano de la zona de hora estándar	
D	[h]	Factor de corrección por cambio de hora	
t_sim	[1/h]	Paso de simulación del algoritmo	Válido si no se ingresa "hora" manualmente
hora	[°]	Vector fila que contiene las horas de simulación (hora local)	Horas en el intervalo [0;24) en formato decimal. Ej: 15,5=03:30 p.m.
Tmax	[°C]	Temperatura máxima del día	
Tmin	[°C]	Temperatura mínima del día	
hoy	-	Variable que indica la presencia de precipitaciones en el día actual	
ayer	-	Variable que indica la presencia de precipitaciones en el día anterior	
a	[m]	Elevación del lugar sobre el nivel del mar	

Tabla 4.2 Variables de entrada modelo de radiación solar

4.3 Validación y resultados del modelo

Para comprobar el desempeño del modelo de radiación solar implementado, sus resultados serán contrastados con datos reales medidos en la ciudad de Santiago de Chile durante el año 2007. Dichos datos (radiación solar global, temperatura y precipitaciones) han sido proporcionados por el *Grupo de Meteorología, Departamento de Geofísica DGF de la Universidad de Chile*. Respecto de los datos con los que se trabajará deben recalcarse los siguientes puntos. Para más detalles de la estación ver **Anexo B**.

- La estación de toma de datos no es una estación regular climatológica ni sinóptica, y no cumple con ninguna norma de observaciones meteorológicas.
- La estación no cuenta con rutina de mantención, limpieza, calibración.
- El aire de Santiago es contaminado, lo que afecta el sensor de radiación solar.

- La versión utilizada de los datos incluye una corrección preliminar de los datos de radiación solar efectuada por A. Undurraga y R. Zamora (Marzo 2008).

4.3.1 Radiación horizontal anual

En la Figura 4.4 se aprecia la radiación máxima diaria medida por DGF (puntos en rojo) junto con los resultados del modelo (curva continua en azul).

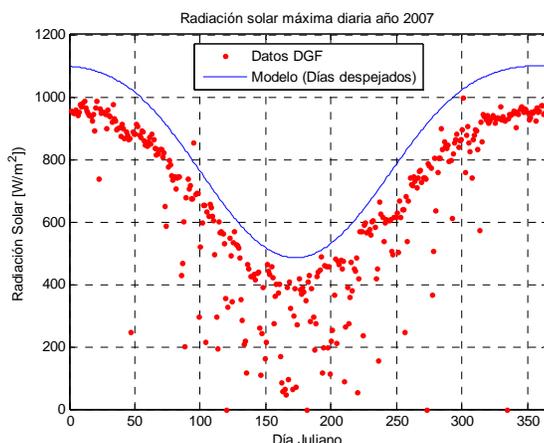


Figura 4.4 Radiación máxima diaria año 2007

Los valores entregados por el modelo en dicha figura se calcularon bajo el supuesto de que todos los días del año estuvieron despejados. Con dicho supuesto, se aprecia que para los días despejados en Santiago de Chile el modelo entrega una radiación de entre 50[W/m^2] y 150[W/m^2] mayor a la medida por el DGF. Dado que Santiago es una ciudad que presenta contaminación ambiental durante todo el año y que el piranómetro del DGF no cuenta con una rutina de limpieza, es esperable la radiación que llegue a Santiago sea menor y que, además, los valores medidos sean un poco menores respecto de la radiación que el modelo estima. Pese a lo anterior, la forma de la curva anual entregada por el modelo sigue la forma de los datos entregados por el DGF para días despejados.

4.3.2 Componente de radiación Directa, Difusa y Global

La cantidad de radiación global horizontal, para un día en particular, varía su magnitud dependiendo de si el día está despejado o cubierto. Además de lo anterior, el porcentaje de las componentes directa y difusa que conforman la radiación global varían considerablemente dependiendo de las condiciones de nubosidad. En la Figura 4.5 se tienen las curvas de las 3 componentes mencionadas para el día 19 de agosto en Santiago, considerando condiciones de día despejado y de cielo cubierto por el modelo, las que corresponden a la presencia de precipitaciones durante los días 18 y 19 de agosto y una oscilación térmica nula durante el día 19 de agosto.

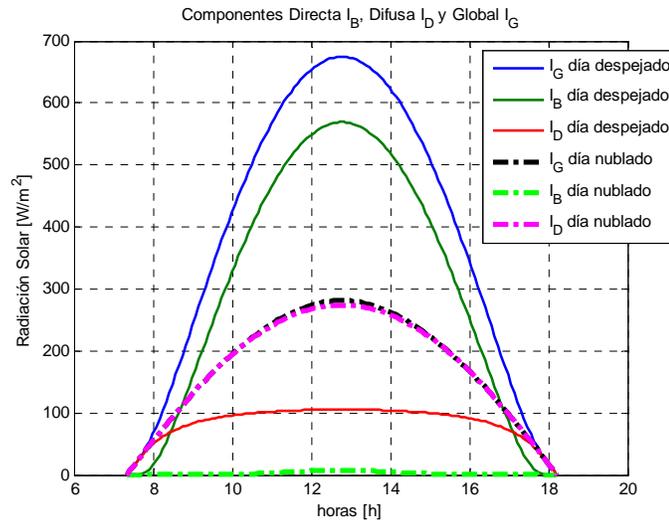


Figura 4.5 Componentes de Radiación Solar, cielo despejado y cubierto, día 231 (19 de agosto)

En la Figura 4.5 se aprecia que para un día despejado, la componente preponderante de la radiación global corresponde a la componente directa. Si bien la componente difusa es menor, su efecto es apreciable en la radiación global. Para este día, ella aumenta la radiación global en alrededor de $100[\text{W}/\text{m}^2]$.

En el caso de un día nublado, se tiene lo contrario: la componente preponderante en la radiación global es la componente difusa, correspondiendo ella casi a la totalidad de la radiación global. El efecto de la radiación directa para un día muy cubierto (como el simulado) es casi nulo, pudiendo despreciarse su efecto en un día muy nublado.

4.3.3 Radiación horizontal diaria

En la Figura 4.6 y en la Figura 4.7 se aprecia la radiación horizontal medida por el DGF y la entregada por el modelo para los días indicados en cada figura. Se ha considerado el cambio horario de los meses de verano para poder contrastar las curvas respecto de las entregadas por el modelo.

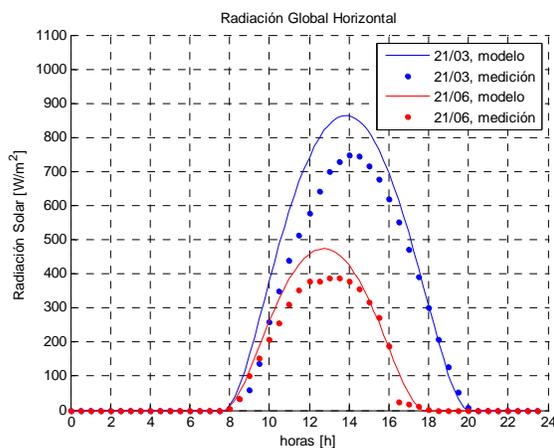


Figura 4.6 Radiación horizontal medida y modelada, distintos días año 2007

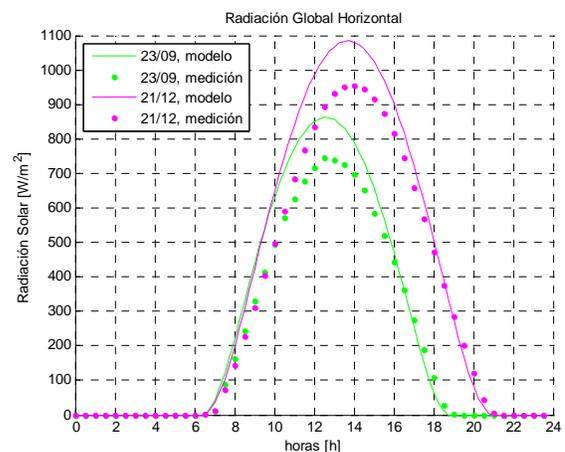


Figura 4.7 Radiación horizontal medida y modelada, distintos días año 2007

Las curvas de radiación diaria entregadas por el modelo, al igual que en el caso de la curva de radiación máxima diaria, presentan una magnitud mayor que las medidas por el DGF lo cual se atribuye tanto a la contaminación en Santiago como a la falta de limpieza del piranómetro. Además, las curvas de la Figura 4.7 han sido calculadas suponiendo días sin lluvia y donde la variación térmica es amplia ($\Delta T > 10 [^{\circ}\text{C}]$), lo que hace que el modelo estime la radiación como si fuera un día despejado.

En la Tabla 4.3 se aprecian las condiciones de interés para el modelo de radiación para los días 13 y 14 de junio de 2007 con las que se estiman condiciones de nubosidad.

Día	13 de junio	14 de junio
Día Juliano	164	165
T _{MAX} [°C]	11,49	9,84
T _{MIN} [°C]	8,51	4,94
ΔT [°C]	2,98	4,9
Precipitaciones día actual	SI	SI
Precipitaciones día anterior	NO	SI

Tabla 4.3 Variables climáticas de interés modelo de radiación solar, días 13 y 14 de junio de 2007

La radiación medida y modelada para dichos días se muestra en la Figura 4.8.

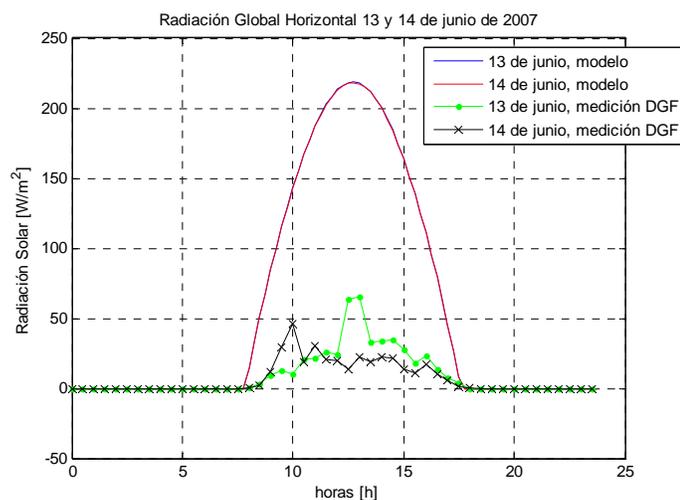


Figura 4.8 Radiación días con precipitaciones y baja amplitud térmica

En los días mencionados en cuestión, debido a la presencia de lluvia, alta nubosidad y combinado con el hecho de que el Sol está cerca de su máxima lejanía de Santiago, la radiación que incide es muy baja. Además, la misma agua de lluvia bloquea en parte la radiación que el piranómetro del DGF recibe. En la Figura 4.9 se aprecia la radiación solar incidente para los mismos días, pero bajo el supuesto de que dichos no presentan nubosidad.

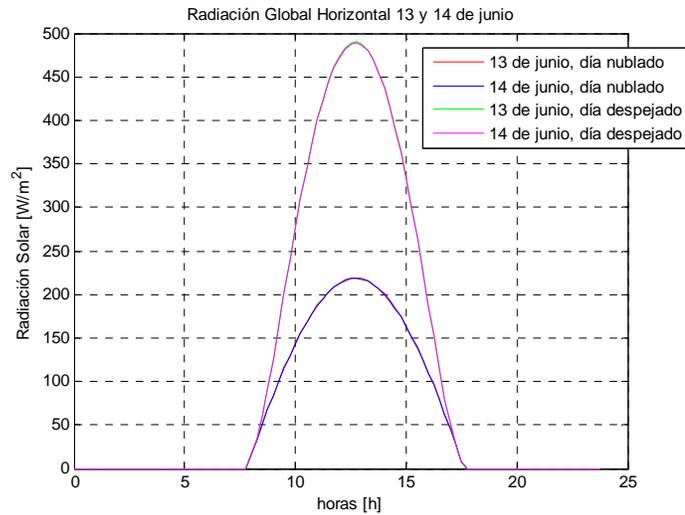


Figura 4.9 Radiación solar modelo, días despejados y nublados

En la Figura 4.9 se aprecia la diferencia en la radiación solar global que entrega el modelo durante días despejados y días nublados. Nuevamente, el modelo entrega una radiación solar mayor respecto de la medida por el DGF, pero sin duda alguna se aprecia que, pese a lo simple de la modelación de la nubosidad realizada por el modelo de Spokas & Forcella, entrega una estimación cercana respecto de lo que ocurre con la radiación durante días nublados.

4.3.4 Radiación sobre planos inclinados

De acuerdo a lo explicado en la sección 4.2.2, el modelo implementado permite el cálculo de la radiación sobre planos inclinados. Para ver el desempeño del modelo, se simulan planos inclinados con diferentes pendientes y azimuts bajo condiciones de cielo despejado entre la Figura 4.10 y la Figura 4.12, sin considerar el cambio horario.

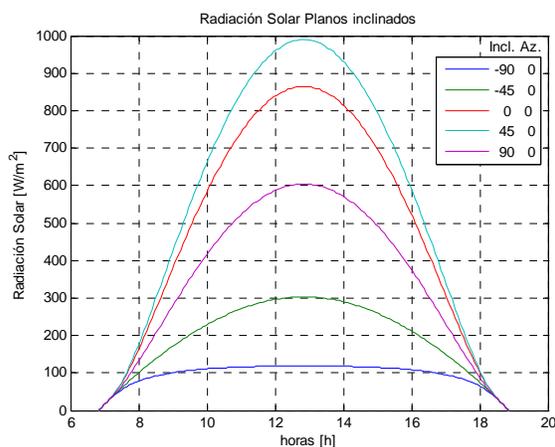


Figura 4.10 Radiación sobre planos inclinados, 21 de marzo

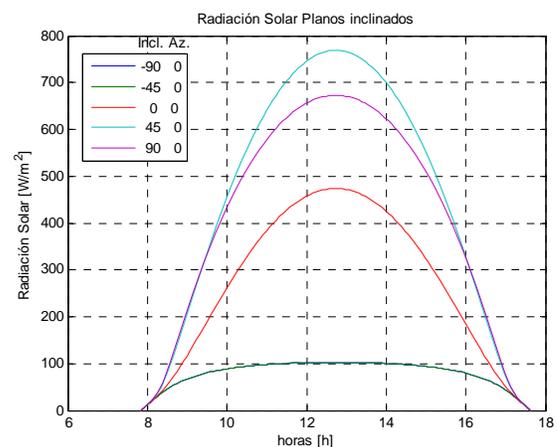


Figura 4.11 Radiación sobre planos inclinados, 21 de junio

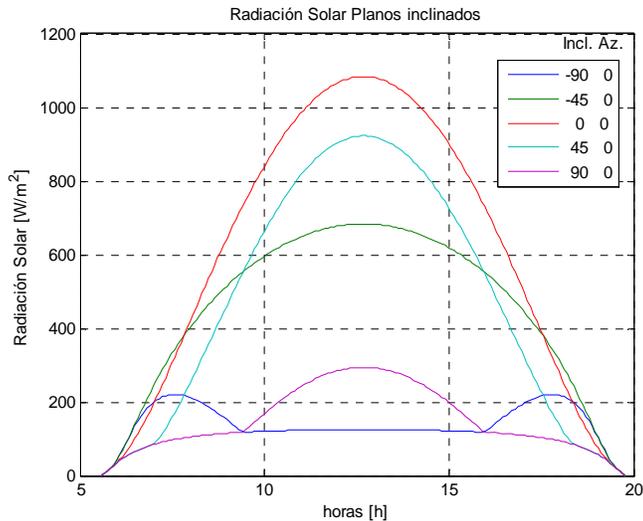


Figura 4.12 Radiación sobre planos inclinados, 21 de diciembre

Desde la Figura 4.10 a la Figura 4.12 se aprecia el efecto del cambio de pendiente de un plano que mira hacia el norte (con azimut nulo). De acuerdo a la época del año, un cambio en la pendiente de un mismo valor genera distintos resultados en la radiación que incide sobre el plano. Ello se debe principalmente a la ubicación del Sol (su declinación) durante dichas épocas. Así, por ejemplo para una inclinación $\beta=45^\circ$ se tiene una radiación incidente sobre el plano mayor que la radiación para el 21 marzo y 21 de junio, pero para el 21 de diciembre, la radiación incidente sobre el plano inclinado 45° es menor que la radiación horizontal. Otro resultado interesante es que para fechas cercanas al solsticio de invierno en el hemisferio sur, un panel con una inclinación de 90° orientado hacia el norte recibe más radiación que un panel horizontal.

Ahora, considerando un cambio en el azimut de un plano con una inclinación conocida, para diferentes días del año, se tiene el comportamiento dado entre la Figura 4.13 y la Figura 4.15.

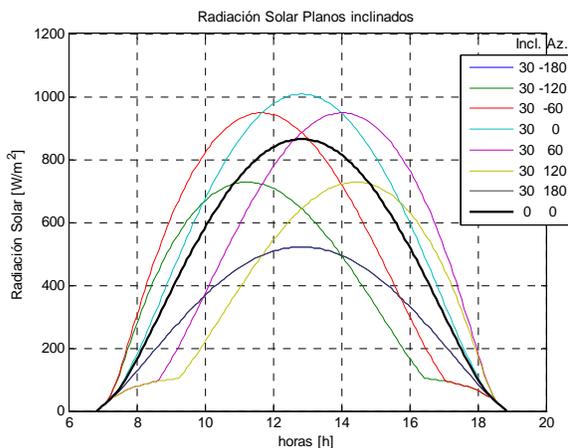


Figura 4.13 Radiación solar sobre planos inclinados, día 80 (21 de marzo)

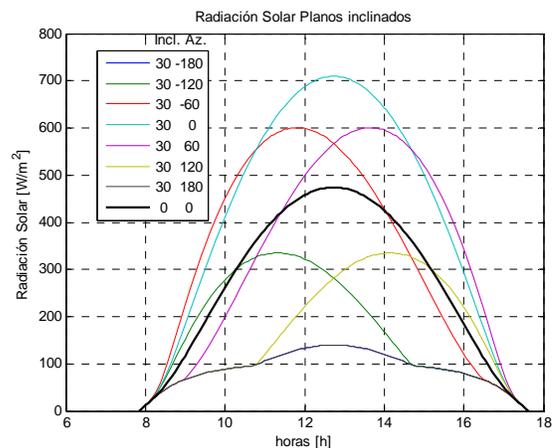


Figura 4.14 Radiación solar sobre planos inclinados, día 172 (21 de junio)

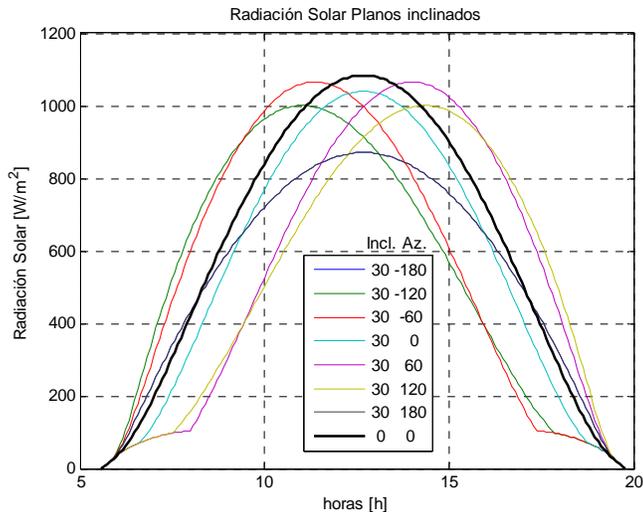


Figura 4.15 Radiación solar sobre planos inclinados, día 355 (21 de diciembre)

El plano considerado en los 3 gráficos previos tiene una pendiente $\beta=30^\circ$, y ha sido dispuesto con los azimuts presentados en cada figura. El efecto de variar el azimut del plano hace que la hora en que la radiación incidente sobre él varíe de acuerdo a dicho azimut, haciendo que se pierda la forma simétrica de la curva de radiación respecto de la orientación $A_{z,p}=0^\circ$ (orientación hacia el norte). Además de lo anterior, el valor de la radiación máxima incidente también varía y se aprecia que existe una simetría respecto de las 12:00 p.m. (hora solar) en la forma de la curva (dicho efecto se aprecia mejor en la Figura 4.16). El plano recibe la menor radiación cuando se encuentra con azimut $A_{z,p}=\pm 180^\circ$ (cuando su inclinación es positiva) debido a que esto corresponde a una orientación del plano en la dirección sur. En el caso de inclinaciones negativas, las curvas de radiación serán de la misma forma y valor, pero considerando un azimut desfasado en 180° respecto del considerado en las 3 figuras previas. Todo lo anterior es válido mientras el Sol circule por el norte del observador. En el caso de que la declinación solar sea menor que la latitud del lugar, se tiene que lo discutido es cierto siempre y cuando se consideren los azimuts de los planos desfasados 180° respecto de lo explicado.

En la Figura 4.16 se presenta un plano con una inclinación $\beta=90^\circ$ el día 17 de octubre en la ciudad de Santiago (sin considerar el cambio de hora). En dicha figura se aprecia el efecto de orientar el plano en la mañana hacia el Este ($A_{z,p}=-90^\circ$) y en la tarde hacia el Oeste ($A_{z,p}=90^\circ$), lo que permite captar una mayor radiación cerca del amanecer y atardecer respectivamente. El valor máximo para dichas orientaciones es menor que el máximo que se obtiene a las 12:00 p.m. (hora solar) debido a que la orientación de $\pm 90^\circ$ no es la óptima para el la puesta y salida del Sol. Además ha de de considerarse el hecho de que la masa de aire es mayor cuando el Sol presenta una menor altura α_s sobre el horizonte. La orientación vertical permite obtener alrededor de $300 \text{ [W/m}^2\text{]}$ extras a las 07:30 a.m. (hora local) respecto de un plano horizontal (curva azul en la Figura 4.16).

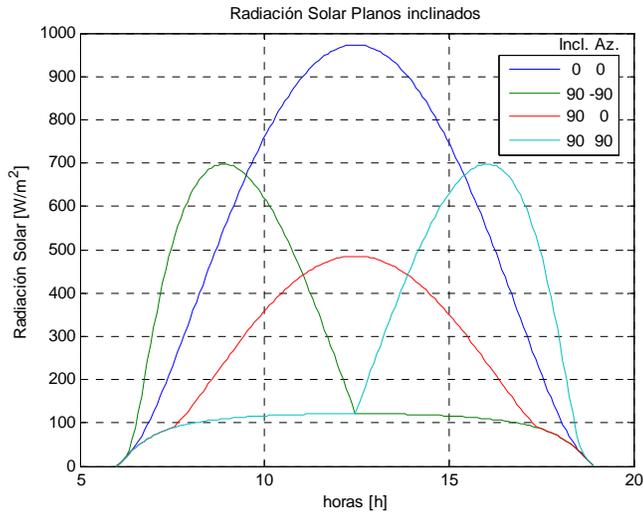


Figura 4.16 Planos verticales, día 290 (17 de octubre)

4.4 Comentarios y Análisis

El modelo implementado de Spokas & Forcella permite estimar la radiación solar incidente en un lugar determinado de la Tierra para un día particular, permitiendo el cálculo de dicha variable con un paso de simulación variable (desde fracciones de segundos hasta horas) durante un intervalo de tiempo deseado. El modelo, para la ciudad de Santiago, entrega valores de radiación mayores a los registrados debido principalmente a la presencia de contaminación en el ambiente. Además, es posible, que los datos registrados por el DGF sean menores a los realmente producidos durante el año 2007.

Dicho modelo permite estimar de manera muy simple la radiación para días nublados, a diferencia de otros modelos que para esto requieren una gran cantidad de datos de entrada. Pese a lo anterior, este modelo no es capaz de modelar durante el día nubosidad parcial, es decir, nubes que ocasionalmente se interpongan entre el Sol y el observador. Para días cubiertos, entrega una estimación promedio de la nubosidad en base a sus variables de decisión (presencia de precipitaciones y oscilación térmica diaria), y en el caso de Santiago sobreestima la radiación solar existente.

El hecho de que el modelo permite calcular la radiación incidente sobre planos inclinados, es muy útil para estudiar el desempeño de paneles de celdas fotovoltaicas (que pueden ser vistos como pequeños planos), aún antes de haberlos instalado, ya que a través del modelo se puede realizar una estimación de la insolación que recibirá una determinada configuración de paneles u otras aplicaciones que funcionen en base a energía solar.

5 Modelamiento Panel Solar

5.1 Modelo celda fotovoltaica

A partir del circuito equivalente de una celda solar presentado en la Figura 2.31 en la sección 2.2.6, y definiendo las referencias asociadas correspondientes que se muestran en la Figura 5.1 se plantean las ecuaciones que modelan el comportamiento de una celda solar.

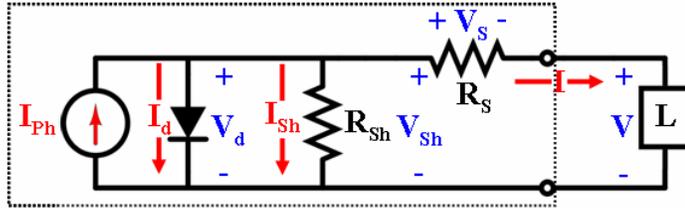


Figura 5.1 Modelo equivalente celda solar y carga L

En base la convención utilizada en la Figura 5.1, planteando LCK y LVK se tienen (5.1) y (5.2) respectivamente.

$$\begin{aligned} I_{ph} &= I_d + I_{sh} + I \\ \Rightarrow I &= I_{ph} - I_d + I_{sh} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} V_{sh} &= V_s + V \\ V_d &= V_{sh} \end{aligned} \quad (5.2)$$

En base a (5.2) y la ecuación de los elementos se tiene (5.3).

$$V_{sh} = R_{sh} \cdot I_{sh} = V_d = V + R_s \cdot I \quad (5.3)$$

La ecuación del diodo viene dada por (5.4).

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_d \cdot q}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (5.4)$$

Reemplazando (5.4) en (5.1) y utilizando las relaciones de (5.3) se tiene (5.5).

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{(V + R_s \cdot I) \cdot q}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (5.5)$$

Donde:

I_{ph} : corriente fotolumínica [A].
 I_d : corriente del diodo [A].

- I_{Sh} : corriente por la resistencia shunt [A].
- V_d : tensión del diodo [V].
- V_{Sh} : tensión en la resistencia shunt [V].
- V_S : tensión en la resistencia serie [V].
- I : corriente de salida de la celda [A].
- V : tensión de la celda [V].
- R_{Sh} : resistencia shunt [Ω].
- R_S : resistencia serie [Ω].
- n : factor de calidad del diodo.
- I_0 : corriente de saturación inversa del diodo [A].
- q : carga del electrón ($1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]).
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/°K]).
- T : temperatura de la celda [°K].

La ecuación (5.5) es la que define la característica I-V de una celda fotovoltaica. Dado que tanto la tensión V como la corriente I de la celda se encuentran dentro del exponente de la función *exponencial*, no es posible escribir una variable en función de la otra, por lo que es necesario aplicar métodos de resolución numérica para describir el comportamiento entre ambas variables.

La corriente fotolumínica I_{Ph} de una celda fotovoltaica es proporcional a la radiación incidente además de aumentar con la temperatura. Puede ser determinada mediante (5.6) [88].

$$I_{Ph} = I_{SCRef} \frac{L}{L_{Ref}} + k_0 \cdot (T - T_{Ref}) \quad (5.6)$$

Donde:

- I_{Ph} : corriente fotolumínica [A].
- I_{SCRef} : corriente de cortocircuito de la celda a temperatura T_{Ref} [A].
- L : radiación solar incidente [W/m^2].
- L_{Ref} : radiación solar de referencia [W/m^2].
- T : temperatura celda [°C] o [°K].
- T_{Ref} : temperatura celda de referencia [°C] o [°K].
- k_0 : coeficiente variación de corriente por temperatura [$A/°C$] o [$A/°K$].

Cuando una celda solar se encuentra cortocircuitada, es posible suponer que el valor de la corriente de cortocircuito es prácticamente igual al valor de la corriente fotolumínica. Es por lo anterior que en (5.6) la constante de proporcionalidad para la corriente I_{Ph} es asumida como I_{SCRef} .

Sólo en la ecuación (5.6) la temperatura puede encontrarse tanto en grados Kelvin como grados Celsius, ya que al sólo haber diferencias de temperaturas, al realizar la conversión entre una escala y otra se obtiene el mismo resultado numérico. Esto no sucede en el resto de las relaciones presentadas y deducidas a lo largo de este capítulo.

La corriente de saturación inversa del modelo I_0 puede ser determinada mediante la ecuación (5.5). A partir de ella, determinando la tensión de circuito abierto ($I=0$) se tiene (5.7).

$$V_{OC} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{Ph}}{I_0} + 1 - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}} \right) \quad (5.7)$$

Despreciando el efecto de la resistencia shunt R_{Sh} [33] en la ecuación (5.7), para determinar la corriente de saturación inversa I_0 se tiene la relación (5.8).

$$I_{Ph} \approx I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V_{OC}}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (5.8)$$

Evaluando para $T=T_{Ref}$ en (5.8) y despejando I_0 se tiene que la corriente de saturación inversa de referencia del diodo I_{0Ref} viene dada por (5.9).

$$I_{0Ref} \approx \frac{I_{Ph}|_{T=T_{Ref}}}{e^{\frac{q \cdot V_{OCRef}}{n \cdot k \cdot T_{Ref}}} - 1} \quad (5.9)$$

Finalmente, la corriente de saturación inversa del diodo I_0 viene dada de acuerdo a la relación (5.10) [33].

$$I_0 = I_{0Ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{Ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{\frac{-q \cdot V_g}{n \cdot k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}} \right)} \quad (5.10)$$

Donde las variables dadas entre las ecuaciones (5.7) y (5.10) son:

- V_{OC} : tensión de circuito abierto [V].
- I_{Ph} : corriente fotolumínica [A].
- R_{Sh} : resistencia shunt [Ω].
- I_0 : corriente de saturación inversa del diodo [A].
- n : factor de calidad del diodo.
- q : carga del electrón ($1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]).
- k : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/°K]).
- T : temperatura de la celda [°K].
- I_{0Ref} : corriente de saturación inversa del diodo a temperatura T_{Ref} [A].
- V_{OCRef} : tensión de circuito abierto a temperatura T_{Ref} [V].
- T_{ref} : temperatura de referencia de la celda [°K].
- V_g : tensión de banda prohibida celda solar [V].

Conociendo la radiación incidente sobre la celda, su temperatura de trabajo y los valores de sus parámetros físicos (n , R_{Sh} , R_S y V_g) y de referencia, su comportamiento queda totalmente descrito por las relaciones presentadas en esta sección, y es posible determinar el comportamiento de una celda solar. Los valores de los parámetros físicos y de referencia son determinados en la sección 5.4 mediante la información provista en las hojas de datos y mediciones empíricas.

Vale la pena notar que, si bien la ecuación (5.5) es la que entrega la característica I-V de una celda solar, es posible realizar en dicha ecuación una corrección por temperatura que permite modelar de mejor manera el comportamiento de la tensión V_{OC} al variar dicha variable. En el **Anexo D** se realiza la deducción correspondiente para dicha corrección por temperatura.

5.2 Modelo panel de celdas fotovoltaicas

La modelación de un panel de celdas fotovoltaicas depende del tipo de conexión de las celdas que lo conforman. A partir de las conexiones serie y paralelo es posible modelar un panel fotovoltaico compuesto por una combinación de las anteriores.

En las secciones 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3 se consideran los supuestos dados por (5.11)

$$\begin{aligned} L_i &\neq L_j & \forall i \neq j & \quad i, j = 1, \dots, m \\ T_i &\neq T_j & \forall i \neq j & \quad i, j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (5.11)$$

Donde:

L_i radiación incidente sobre la i -ésima celda del panel solar.

T_i temperatura de la i -ésima celda del panel solar.

m número de celdas que conforman el panel solar

Las tensiones V_j y las corrientes I_j de cada celda que conforman el panel pueden ser determinadas por el modelo desarrollado en la sección 5.1. En general se tiene que $V_i \neq V_j$ e $I_i \neq I_j$ para $i \neq j$.

5.2.1 Celdas conectadas en serie

Considerando un panel formado por m celdas fotovoltaicas en serie, de acuerdo a las leyes de Kirchoff se tienen (5.12) y (5.13).

$$I_{panel} = I_1 = \dots = I_j = \dots = I_m \quad (5.12)$$

$$V_{panel} = \sum_{j=1}^m V_j \quad (5.13)$$

La corriente del panel queda determinada por aquella celda cuya corriente sea la menor de todas, la que limita la corriente de las celdas del panel. Así, para un panel de celdas en serie se tiene que la corriente y tensión vienen determinadas por (5.14) y (5.15) respectivamente.

$$I_{panel} = \min_{j \in \{1, \dots, m\}} (I_j) \quad (5.14)$$

$$V_{panel} = \sum_{j=1}^m V_j \quad (5.15)$$

En el caso de que todas las celdas que conforman el panel estén a la misma temperatura y reciban la misma cantidad de radiación solar (caso de un panel plano), se tiene que todas las tensiones serán iguales entre sí ($V_j \equiv V$) y que todas las corrientes serán iguales entre sí ($I_j \equiv I$). En dicho caso las ecuaciones (5.14) y (5.15) se reducen a (5.16) y (5.17) respectivamente.

$$I_{panel} = I \quad (5.16)$$

$$V_{panel} = m \cdot V \quad (5.17)$$

5.2.2 Celdas conectadas en paralelo

Considerando un panel formado por m celdas fotovoltaicas en paralelo, de acuerdo a las leyes de Kirchoff se tienen (5.18) y (5.19).

$$V_{panel} = V_1 = \dots = V_j = \dots = V_m \quad (5.18)$$

$$I_{panel} = \sum_{j=1}^m I_j \quad (5.19)$$

La tensión del panel queda determinada por aquella celda cuya tensión sea la menor de todas. Así, para un panel de celdas en paralelo se tiene que la tensión y corriente vienen determinadas por (5.20) y (5.21) respectivamente.

$$V_{panel} = \min_{j \in \{1, \dots, m\}} (V_j) \quad (5.20)$$

$$I_{panel} = \sum_{j=1}^m I_j \quad (5.21)$$

En el caso de que todas las celdas que conforman el panel estén a la misma temperatura y reciban la misma cantidad de radiación solar (caso de un panel plano), se tiene que todas las tensiones serán iguales entre sí ($V_j \equiv V$) y que todas las corrientes serán iguales entre sí ($I_j \equiv I$). En dicho caso las ecuaciones (5.20) y (5.21) se reducen a (5.22) y (5.23) respectivamente

$$V_{panel} = V \quad (5.22)$$

$$I_{panel} = m \cdot I \quad (5.23)$$

5.2.3 Celdas conectadas en serie y paralelo

Considérese un panel formado por p arreglos de celdas, estando dichos arreglos conectados en serie. Cada uno de dichos arreglos está formado por q celdas solares conectadas en paralelo⁴. La tensión y corriente de dicho panel viene dada por (5.24) y (5.25) respectivamente.

$$\begin{aligned} V_{panel} &= \sum_{i=1}^p V_i \\ &= \sum_{i=1}^p \left(\min_{j \in \{1, \dots, q\}} (V_j) \right)_i \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} I_{panel} &= \min_{i \in \{1, \dots, p\}} (I_i) \\ &= \min_{i \in \{1, \dots, p\}} \left(\left(\sum_{j=1}^q I_j \right)_i \right) \end{aligned} \quad (5.25)$$

⁴ Este caso corresponde a los paneles solares Spectrolab DJ ubicados en la cúpula del vehículo solar *Eolian I*.

Ahora, se considera un panel formado por p arreglos de celdas, estando dichos arreglos conectados en paralelo. Cada uno de dichos arreglos está formado por q celdas solares conectadas en serie⁵. La tensión y corriente de dicho panel viene dada por (5.26) y (5.27) respectivamente.

$$V_{panel} = \min_{i \in \{1, \dots, p\}} (V_i) \\ = \min_{i \in \{1, \dots, p\}} \left(\left(\sum_{j=1}^q V_j \right)_i \right) \quad (5.26)$$

$$I_{panel} = \sum_{i=1}^p I_i \\ = \sum_{i=1}^p \left(\min_{j \in \{1, \dots, q\}} (I_j) \right)_i \quad (5.27)$$

5.3 Modelación de la temperatura de una celda solar

La temperatura de trabajo que alcanza una celda solar puede ser modelada por (5.28).

$$T_{celda} = T_{amb} + kte \cdot L \quad (5.28)$$

Donde:

- T_{celda} : temperatura que alcanza la celda [°C].
- T_{amb} : temperatura ambiente [°C].
- kte : coeficiente de transferencia calórico [°C·m²/W].
- L : radiación incidente sobre la celda [W/m²].

El coeficiente de transferencia calórico kte varía entre 0,02 y 0,04 [°C·m²/W] usualmente, dependiendo de la velocidad promedio del viento. Cuando ésta es muy baja, o inexistente, el enfriamiento del panel es pobre o nulo, y kte toma valores cercanos o iguales al máximo. Si la velocidad promedio del viento produce un enfriamiento efectivo del panel, el valor de kte será cercano al mínimo. El producto $kte \cdot L$ representa el incremento de temperatura que sufre una celda por sobre temperatura ambiente.

La radiación solar que no es convertida en electricidad es, en su mayoría, convertida en calor. El calor “saldrá” de la celda a través del material con el que la celda se encuentra encapsulada (sea el que sea) e irá hacia el aire mediante convección y radiación. La relación dada en (5.28) para modelar la temperatura de la celda es una aproximación muy simple de lo que en verdad ocurre ya que los mecanismos mediante los cuales el calor es disipado desde la celda son muy complejos, en particular la convección. Más aún, la temperatura depende del punto de operación de la celda ya que la potencia eléctrica generada fluye desde la celda sin generar pérdidas por calor. Si la celda opera en un punto alejado del punto de máxima eficiencia, la potencia no convertida en electricidad es convertida en calor, haciendo que la celda se vuelva más ineficiente aún.

Le relación presentada en (5.28) es utilizada, por simplicidad, para modelar la temperatura de la celda, y el coeficiente de transferencia calórico kte es determinado experimentalmente para una condición de baja convección forzada (presencia de vientos casi inexistente) en la sección 5.4.

⁵ Este caso corresponde a los paneles SunPower del vehículo solar *Eolian Prototipo*.

5.4 Ajuste de parámetros

Para tener un modelo totalmente definido de una celda solar es necesario conocer tanto sus parámetros físicos como los de referencia, los que se resumen en la Tabla 5.1.

Parámetros físicos	R_{Sh}	resistencia shunt [Ω]
	R_S	resistencia serie [Ω]
	n	factor de calidad del diodo
	$V_g(E_g)$	tensión (energía) de banda prohibida celda solar [V]([eV])
	k_{te}	coeficiente de transferencia calórico [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$]
	k_0	coeficiente variación de corriente por temperatura [$\text{A}/^{\circ}\text{C}$]
	β_V	coeficiente variación de tensión por temperatura [$\text{mV}/^{\circ}\text{C}$]
Parámetros de referencia	I_{SCRef}	corriente de cortocircuito de la celda a radiación L_{Ref} [A]
	L_{Ref}	radiación solar de referencia [W/m^2]
	T_{Ref}	temperatura celda de referencia [$^{\circ}\text{C}$] o [$^{\circ}\text{K}$]
	V_{OCRef}	tensión de circuito abierto a temperatura T_{Ref} [V]

Tabla 5.1 Parámetros físicos y de funcionamiento celda solar

Los parámetros de referencia y los coeficientes de variación por temperatura k_0 y β_V son provistos por los fabricantes en las hojas de datos de las celdas, mientras que el resto de los parámetros, generalmente, no lo es.

Para determinar los parámetros de las celdas usadas en Eolian I, en el caso de las celdas SunPower A300, se realizan mediciones sobre algunas de las celdas del vehículo y sobre celdas de control. Lo anterior es realizado para determinar el estado actual de las celdas sobre el vehículo y contrastarlo con celdas en buen estado.

En el caso de las celdas Spectrolab DJ, sólo se utilizan celdas de control ya que las celdas de Eolian I se encuentran en general dañadas, correspondiendo dicho daño a fracturas sobre las celdas. Con dicho daño, y debido a la forma en que se encuentran conectadas, no es posible realizar mediciones correctas para determinar sus parámetros ya que las celdas dañadas alterarían las mediciones y, por lo tanto, los parámetros que se desea determinar.

Mediante las pruebas realizadas, se obtiene una curva I-V para cada celda (o conjunto de celdas) medida, y a través de dicha curva, se determinan los parámetros físicos y de referencia de acuerdo a la siguiente metodología.

1. Se determinan los parámetros de referencia para cada celda en base a las mediciones realizadas.

2. Los coeficientes de variación por temperatura k_0 y β_V son considerados como los provistos por los fabricantes.
3. La tensión de banda prohibida V_g sólo depende del material de la celda. Se consideran los valores disponibles en la literatura.
4. El coeficiente de transferencia calórico k_{te} es determinado en base a las mediciones de temperatura realizadas sobre las celdas.
5. Los valores de n , R_S y R_{Sh} son determinados mediante la realización de un proceso de ajuste de curva mediante el modelo de la celda implementado en MatLab.

Para realizar el punto 5, en el modelo implementado en MatLab para una celda solar, se ingresan los parámetros determinados en los puntos 1, 2, 3 y 4, y se ajusta la curva que entrega el modelo a la curva medida experimentalmente. Dicho ajuste es realizado encontrando los valores de n , R_S y R_{Sh} del modelo que mejor aproximen ambas curvas.

Así, se tiene un conjunto de valores para cada parámetro de la Tabla 5.1, excepto los determinados en los puntos 2 y 3.

Con dichos valores, se obtiene un promedio para cada uno de los parámetros de las celdas, teniéndose 3 valores promedios para n , R_S y R_{Sh} , y dichos valores son considerados como los valores representativos de dichos parámetros para los 3 tipos de celdas que han sido consideradas para ser analizadas (*SunPower A300 Eolian I*, *SunPower A300 control* y *Spectrolab DJ control*).

5.4.1 Sistema de Medición utilizado

El esquema de medición utilizado es el que se aprecia en la Figura 5.2.

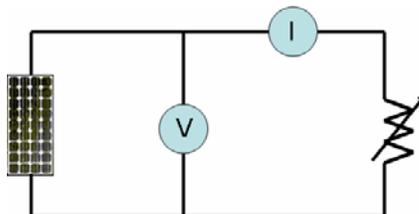


Figura 5.2 Esquema de medición utilizado

Debe recalarse la posición del voltímetro debido a que, dados los bajos niveles de tensión con los que se trabaja, y niveles de corriente de hasta 5[A], la caída de tensión en los cables, y en especial en el amperímetro, puede ser considerable, haciendo que las mediciones de la característica I-V de de la celda se vean afectadas. Realizar la medición de tensión al lado de la carga puede entregar mediciones alteradas. Para minimizar la caída de tensión en los cables, se utilizaron cables tan cortos como fuera posible.

Para realizar las mediciones necesarias se han constuido dos plataformas de pruebas utilizando celdas nuevas y de igual tipo que las presentes sobre Eolian I. Ellas fueron elegidas aleatoriamente entre las celdas disponibles que se encontraban en buen estado. Dichas plataformas se denominan *Plataforma SP* (ver Figura 5.3), y *Plataforma SL* (ver Figura 5.4).

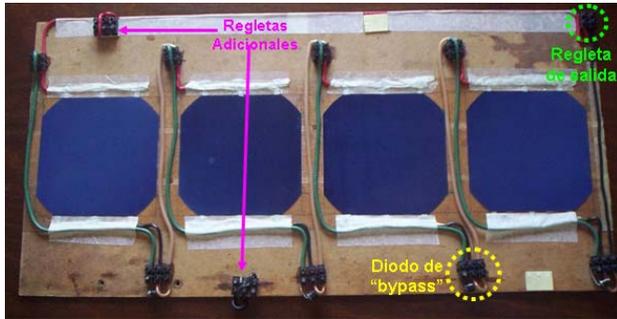


Figura 5.3 Plataforma SP de medición, celdas SunPower A300

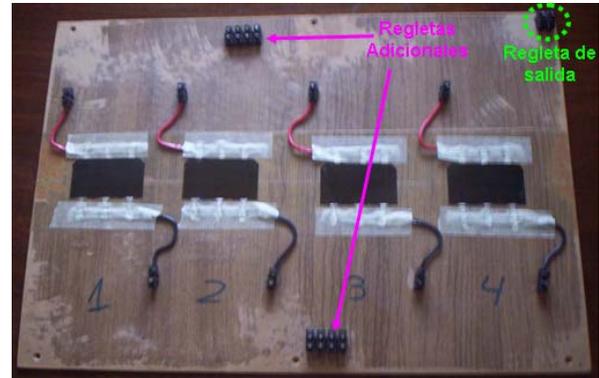


Figura 5.4 Plataforma SL de medición, celdas Spectrolab DJ

Las plataformas de prueba construidas permiten variar el tipo de conexión así como la cantidad (de celdas) que se encuentran conectadas entre sí, para poder estudiar el comportamiento de un panel fotovoltaico en distintas situaciones. Lo anterior es posible debido a que cada terminal de las celdas tiene su salida cableada hasta una regleta de conexión, la que permite de manera simple y flexible intercambiar las conexiones entre las celdas. Además se han dispuesto regletas de conexión adicionales, tanto cerca de los contactos positivos como de los negativos de las celdas, para permitir una fácil realización de conexiones en paralelo, y una regleta de salida en el extremo superior derecho de cada plataforma para mantener organizadas las conexiones.

Para evitar que los cables afecten a la radiación incidente, ellos se encuentran adheridos a la plataforma mediante adhesivo tipo doble contacto. En el caso de cambiar el tipo de conexiones, se encuentra espacio disponible entre las celdas para pasar el cableado, y además es posible realizar las conexiones por la parte inferior de las plataformas en caso de ser necesario.

En la *plataforma SP* se ha dispuesto la presencia de diodos de “bypass”, habiendo uno por cada celda. En la *plataforma SL* no se ha realizado lo anterior ya que la función de diodo de “bypass” viene integrada dentro de la estructura interna de cada celda. En la Figura 5.5 se aprecia en detalle la conexión de un diodo de “bypass”.

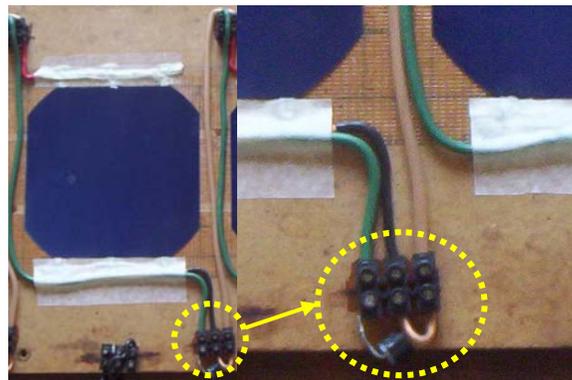


Figura 5.5 Diodo de “bypass” conectado a una celda (izquierda). Detalle regleta y diodo (derecha)

Cada diodo de “bypass” se encuentra conectado a su celda en antiparalelo mediante el cable verde (ver Figura 5.5). El cable negro conectado a la regleta corresponde al negativo de la celda, y el cable transparente corresponde al positivo de la celda contigua (en la Figura 5.5 las celdas Sunponer A300 se encuentran conectadas en serie). En caso de no querer tener el diodo

conectado a la celda basta con desconectar su cátodo desde la regleta como se aprecia en el detalle de la Figura 5.5. También es posible variar las conexiones de los diodos de “bypass” en base al sistema de regletas utilizado en las conexiones.

En el sistema de toma de datos se utilizan los multímetros portátiles que se aprecian en la Figura 5.6. Se han elegido estos multímetros debido a su tamaño, bajo peso y resolución, ya que es necesario contar con instrumentos portátiles para poder realizar mediciones de manera rápida y precisa.



Figura 5.6 Multímetros utilizados en las mediciones

En la Tabla 5.2 se indica la resolución de los instrumentos utilizados, de acuerdo al rango de medición de las variables.

Variable	Límite inferior	límite superior	Resolución
Tensión [V]	0	2	10^{-3}
	2	20	10^{-2}
	20	200	10^{-1}
Corriente [A]	0	10	10^{-2}
	0	0,2	10^{-4}
Temperatura [°C]	0	60	10^0

Tabla 5.2 Resolución instrumentos utilizados

El registro de los valores medidos por los multímetros fue realizado mediante filmaciones de video que, posteriormente, son procesadas para obtener los datos de las curvas medidas. Este procedimiento se ha adoptado por simplicidad.

La carga utilizada en las mediciones consiste de dos reóstatos: uno de $60[\Omega]$ y otro de $4[\Omega]$. Se utilizan estos dos reóstatos para poder obtener medidas con un paso adecuado ya que cerca de la corriente I_{SC} de una celda, una pequeña variación en la carga hace que la variación de corriente sea alta.

Las mediciones eléctricas que se efectúan sobre las distintas celdas y paneles, se realiza de la manera más rápida posible de forma tal que la radiación solar incidente pueda ser considerada constante durante la medición. Los tiempos de medición oscilan entre dos y tres minutos.

Para realizar las mediciones de temperatura sobre las celdas, se utiliza un termocupla conectada a un multímetro de la manera que se aprecia en la Figura 5.7. Las mediciones de temperatura sobre las celdas se efectúan inmediatamente terminadas las mediciones eléctricas respectivas. Dado que la variación de temperatura es un proceso lento, realizar las mediciones de

temperatura con un pequeño desfase temporal no produce un error significativo en las mediciones. Además, de esta manera, se evita sombrear las celdas durante la realización de las mediciones eléctricas.

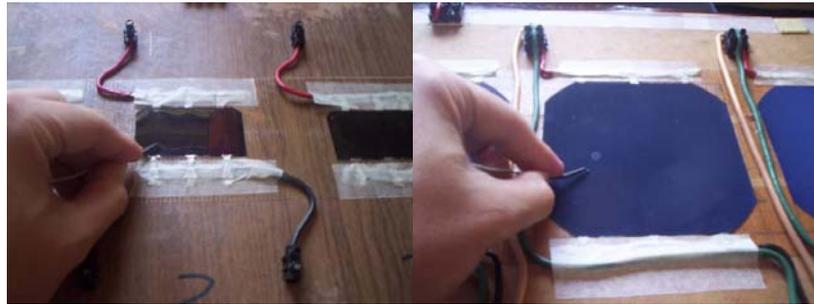


Figura 5.7 Mediciones de temperatura sobre celdas solares

La implementación en terreno del sistema de medición se aprecia en la Figura 5.8.

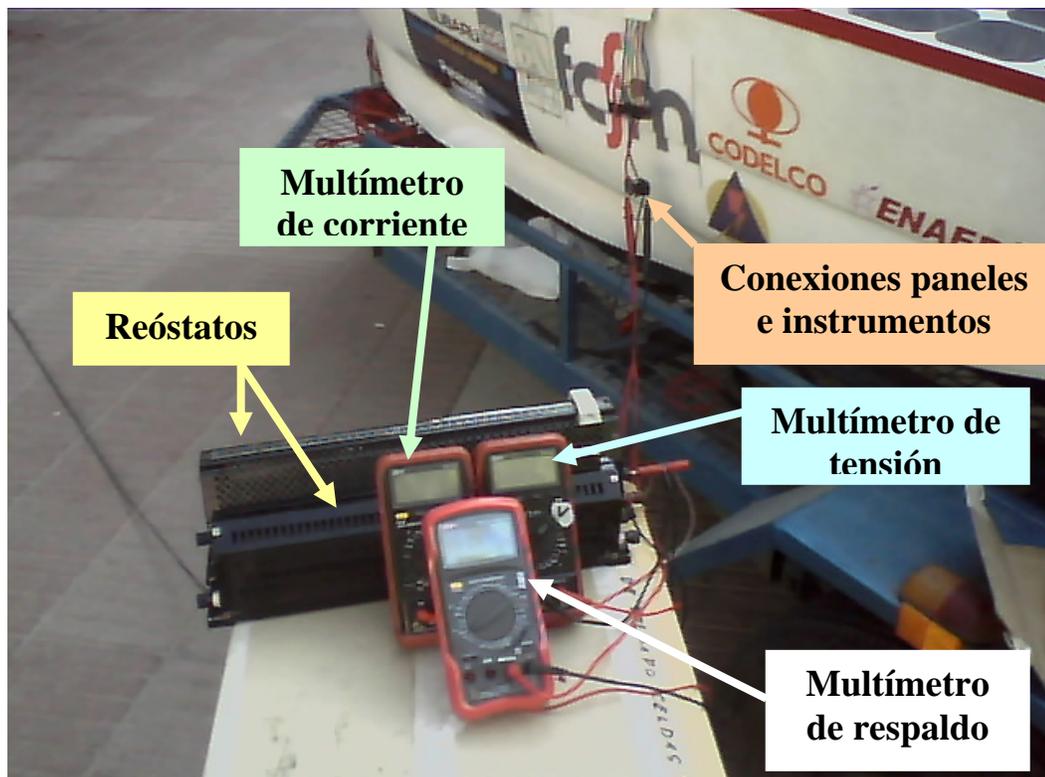


Figura 5.8 Sistema de medición implementado

5.4.2 Celdas SunPower A300 Eolian I

Los paneles solares de Eolian I se encuentran formados por arreglos de 5, 4, 3 y 2 celdas de largo (conectadas en serie). Sólo es posible acceder a dichos arreglos, y no celdas individuales sobre el vehículo, por lo que las mediciones debieron ser efectuadas sobre algunos de dichos arreglos.

Las mediciones realizadas para determinar los parámetros de las celdas SunPower A300 en Eolian I son realizadas utilizando las celdas ubicadas en su apertura. Esto se debe a que:

- La superficie de la apertura es casi horizontal.
- Las conexiones de las celdas de la apertura son de fácil acceso, y es posible llevar de manera simple el cableado desde las celdas hasta los instrumentos del esquema mostrado en la Figura 5.2.
- El casco (mitad superior) de fibra de vidrio de Eolian I que contiene los paneles solares, debido a su tamaño y problemas constructivos, no puede estar un tiempo muy prolongado sin el apoyo proporcionado por la estructura del auto insolándose sin que se deforme debido al incremento de temperatura que se produce. Dicha deformación es altamente perjudicial para las celdas. Para evitar dichos daños se optó por trabajar con el casco de fibra de vidrio sobre el vehículo, permitiendo el acceso sólo a los terminales de las celdas ubicadas en la apertura de Eolian I.

Las mediciones sobre las celdas de Eolian I se han realizado los días 10 y 14 de abril de 2008. Dado que las mediciones realizadas se han hecho sobre arreglos de celdas formados por 3 y 4 celdas conectadas en serie, para encontrar la característica promedio de una celda, suponiendo que las celdas de cada arreglo reciben la misma radiación y están a la misma temperatura, se ha dividido la tensión de salida de cada arreglo por el número de celdas que conforman el arreglo respectivo, obteniéndose la característica que se aprecia en la Figura 5.9.

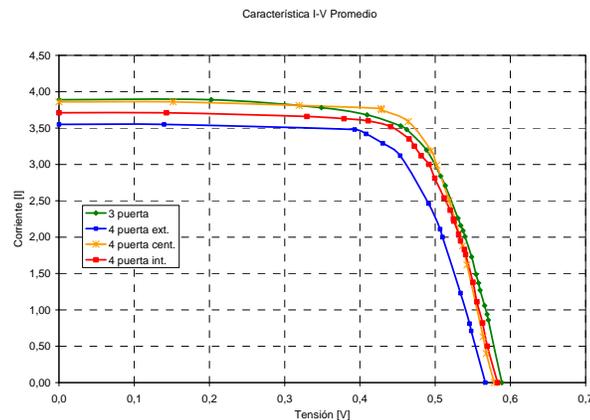


Figura 5.9 Característica I-V promedio, celdas SunPower A300, Eolian I

A partir de las mediciones, se plantea la Tabla 5.3, en donde se tienen los parámetros de referencia propios de cada medición. La radiación solar de esta tabla se estimó mediante el modelo desarrollado ya que si bien se cuenta con datos proporcionados por el DGF, ellos no han sido corregidos como los utilizados en la sección 4.3, por lo que no son del todo confiables.

Nombre medición	Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T _{CELDA} [°C]	I _{SC} [A]	V _{OC} [V]	L [W/m ²]
3 puerta	10 de abril	101	13:19	13:22	45	3,89	0,589	763,921
4 puerta ext.	14 de abril	105	13:23	13:25	50	3,55	0,567	737,005
4 puerta cent.			13:43	13:46	50	3,86	0,579	719,518
4 puerta int.			14:10	14:13	50	3,71	0,583	683,382

Tabla 5.3 Parámetros de referencia propios, celdas SunPower A300 Eolian I

Para obtener los parámetros de referencia comunes de cada celda se aplicaron las transformaciones dadas por (5.29) y (5.30).

$$I_{SC_{Ref}} = I_{SC} \cdot \frac{L_{Ref}}{L} \quad (5.29)$$

$$V_{OC_{Ref}} = V_{OC} - \beta_V \cdot (T - T_{Ref}) \quad (5.30)$$

Donde:

$I_{SC_{Ref}}$: corriente de cortocircuito de la celda a radiación L_{Ref} [A].

I_{SC} : corriente de cortocircuito de la celda.

L_{Ref} : radiación solar de referencia [W/m^2].

L : radiación solar incidente.

$V_{OC_{Ref}}$: tensión de circuito abierto a temperatura T_{Ref} [V].

V_{OC} : tensión de circuito abierto.

β_V : coeficiente variación de tensión por temperatura [$mV/^\circ C$].

T : temperatura celda.

T_{Ref} : temperatura celda de referencia [$^\circ C$].

Para las celdas SunPower A300 de Eolian I se consideran $L_{Ref}=1.000[W/m^2]$, $T_{Ref}=25[^\circ C]$ y $\beta_V=-1,9[mV/^\circ C]$ (ver hoja de datos en **Anexo B**). Los parámetros de referencia comunes determinados para cada medición corresponden a los presentados en la Tabla 5.4.

Nombre medición	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	I_{scRef} [A]	V_{ocRef} [V]
3 puerta	3,89	0,589	5,0921	0,6270
4 puerta ext.	3,55	0,567	4,8168	0,6145
4 puerta cent.	3,86	0,579	5,3647	0,6265
4 puerta int.	3,71	0,583	5,4289	0,6305

Tabla 5.4 Parámetros de referencia comunes, celdas SunPower A300 Eolian I

En la determinación del coeficiente de transferencia calórico k_{te} , se consideran algunas de las mediciones de temperatura realizadas sobre Eolian I durante la realización de la prueba de desempeño de sus paneles. La radiación incidente es estimada en base al modelo desarrollado (datos del DGF no del todo confiables). El coeficiente k_{te} se determina en base a la relación (5.28) para cada medición, lo que es presentado en la Tabla 5.5 (ver estimación de azimut e inclinación celdas en **Anexo D**).

Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T_{CELDA} [$^\circ C$]	$T_{AMBIENTE}$ [$^\circ C$]	L [W/m^2]	Azimut celdas [$^\circ$]	Inclinación celdas [$^\circ$]	k_{te} [$^\circ C m^2/W$]
16-Abr	107	14:29	14:32	49	24,15	637,164	57,0	3,0713	0,0390
		14:44	14:47	45	24,27	605,856			0,0342
		15:26	15:28	40	24,90	470,543	147,0		0,0321
		15:50	15:53	43	24,76	395,817			0,0461

Tabla 5.5 Determinación coeficiente de transferencia calórico k_{te} , celdas SunPower A300 Eolian I

Utilizando los parámetros de referencia propios determinados para cada medición, y el modelo computacional desarrollado, el ajuste de curva realizado entrega, para cada medición, los valores para los parámetros n , R_S y R_{Sh} presentados en la Tabla 5.6.

Celdas medidas	n	R_S [Ω]	R_{Sh} [Ω]
3 puerta	1,544	0,0088	14,0259
4 puerta ext.	1,150	0,0155	302,4571
4 puerta cent.	1,150	0,0111	152,8834
4 puerta int.	1,150	0,0123	8,0741

Tabla 5.6 Parámetros n , R_S y R_{Sh} propios, celdas SunPower A300 Eolian I

Considerando los valores medidos en la Tabla 5.3 y los calculados en la Tabla 5.6, se ha simulado el comportamiento para cada medición realizada, y se han obtenido las características que se presentan en la Figura 5.10

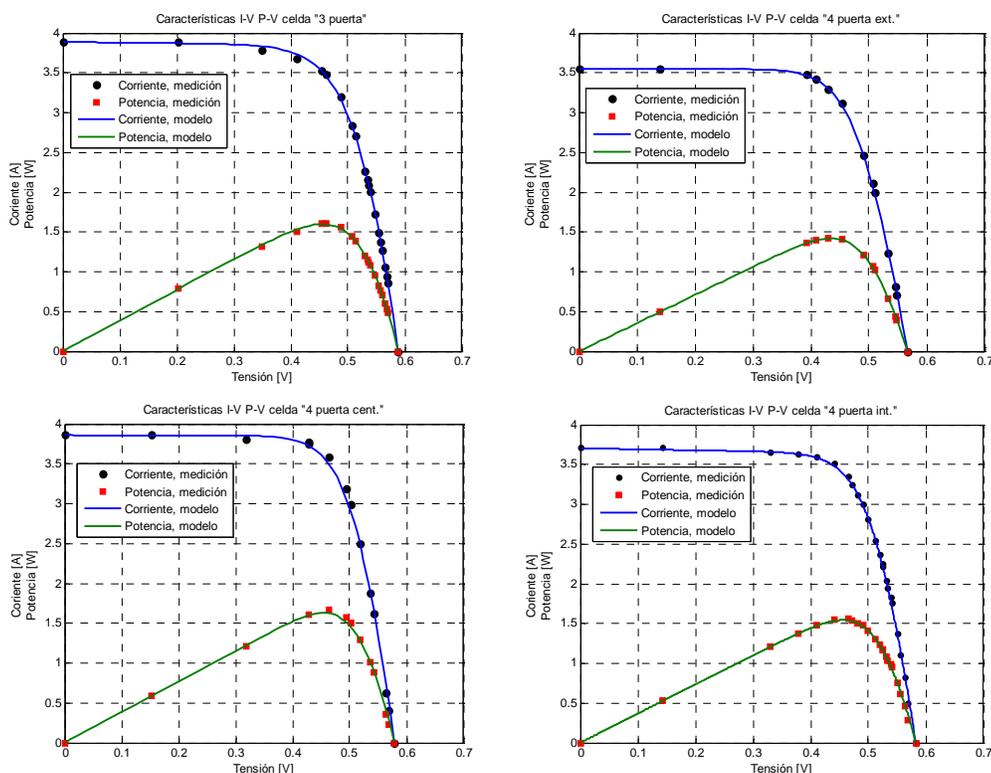


Figura 5.10 Características I-V y P-V celdas medidas y simuladas, SunPower A300 Eolian I

Para los valores R_{Sh} menores a 15[Ω] de la Tabla 5.6, se ha estimado necesario simular el comportamiento de la celda considerando los otros dos parámetros determinados, y variando R_{Sh} hasta 500[Ω], obteniéndose curvas prácticamente similares a las obtenidas con los valores de la Tabla 5.6. A su vez, para los valores R_{Sh} mayores a 15[Ω] de dicha tabla, se realiza el mismo proceso, pero haciendo que R_{Sh} tome valores menores. En este caso, las curvas que se obtienen varían mucho su forma. Luego, para promediar los valores de la Tabla 5.6, sólo se consideran valores mayores a 100[Ω]. Con esta consideración, tomando el promedio sobre los valores respectivos de las tablas correspondientes, se tiene que los parámetros físicos y de funcionamiento de las celdas SunPower A300 de Eolian I son los resumidos en la Tabla 5.7.

Parámetros físicos	R_{Sh}	227,6702 [Ω]
	R_S	0,01195 [Ω]
	n	1,248
	E_{gsi}	1,11[eV]
	kte	0,0378 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$]
	k_0	2,2 [mA/ $^{\circ}\text{C}$]
	β_V	-1,9 [mV/ $^{\circ}\text{C}$]
Parámetros de referencia	I_{SCRef}	5,1756 [A]
	L_{Ref}	1.000 [W/m^2]
	T_{Ref}	25 [$^{\circ}\text{C}$]
	V_{OCRef}	0,625 [V]

Tabla 5.7 Parámetros de referencia y funcionamiento comunes. Celdas SunPower A300 Eolian I

5.4.3 Celdas SunPower A300 control

Para realizar una medición similar a la realizada en las celdas SunPower A300 de Eolian I, las mediciones sobre la *plataforma SP* se realizan ubicándola sobre la apertura de Eolian I, de manera que las celdas de la *plataforma SP* reciban una radiación solar similar a la que reciben las celdas de la apertura. Además, cada medición se realiza con las 4 celdas de la *plataforma SP* conectadas en serie para emular a la conexión de las celdas ubicadas sobre la apertura de Eolian I.

Las mediciones sobre la *plataforma SP* y las celdas de la apertura se realizan de manera intercalada, de forma tal que para cada medición sobre la apertura, haya una medición de celdas de control con una radiación similar. El intervalo de tiempo entre el fin de una medición y el principio de otra se ha intentado que sea el menor posible.

Las mediciones utilizando la *plataforma SP* se han realizado los días 10, 14 y 19 de abril de abril de 2008. Sólo las mediciones efectuadas el día 19 de abril no se han realizado con la *plataforma SP* ubicada sobre la apertura de Eolian I. Al igual que en el caso de las celdas SunPower A300 de Eolian I, se dividió la tensión de salida de cada arreglo por el número de celdas que conforman el arreglo respectivo, obteniéndose la característica que se aprecia en la Figura 5.11.

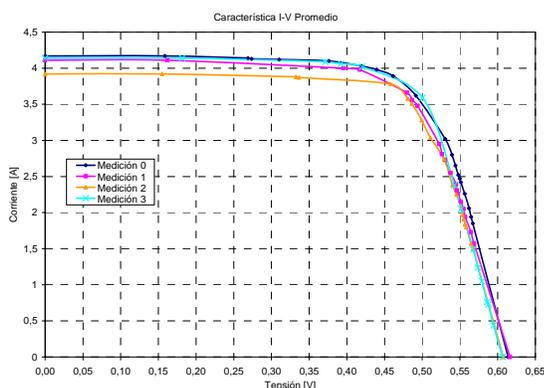


Figura 5.11 Característica I-V Promedio, celdas SunPower A300 control

A partir de las mediciones anteriores, se plantea la Tabla 5.8, en donde se tienen los parámetros de referencia propios de cada medición.

Nombre medición	Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T_{CELDA} [°C]	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	L [W/m ²]
Medición 0	10 de abril	101	13:27	13:30	45	4,17	0,614	758,677
Medición 1	14 de abril	105	13:30	13:33	50	4,11	0,617	731,797
Medición 2			13:52	13:55	50	3,92	0,607	709,050
Medición 3	19 de abril	110	12:37	12:40	48	4,14	0,607	701,679

Tabla 5.8 Parámetros de referencia propios, celdas SunPower A300 control

Considerando $L_{Ref}=1.000[W/m^2]$, $T_{Ref}=25[°C]$ y $\beta_V=-1,9[mV/°C]$ (ver hoja de datos en *Anexo B*) y utilizando las relaciones (5.29) y (5.30), se obtienen los parámetros de referencia comunes de cada celda. Ellos se aprecian en la Tabla 5.9

Nombre medición	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	I_{scRef} [A]	V_{ocRef} [V]
Medición 0	4,17	0,614	5,4964	0,6520
Medición 1	4,11	0,617	5,6163	0,6645
Medición 2	3,92	0,607	5,5285	0,6545
Medición 3	4,14	0,607	5,9001	0,6507

Tabla 5.9 Parámetros de referencia comunes, celdas SunPower A300 control

Para determinar el coeficiente de transferencia calórico k_{te} , a diferencia de las celdas SunPower A300 de Eolian I, sólo se considera la medición de temperatura realizada sobre cada celda de la *plataforma SP* el día 19 de abril. Nuevamente, la radiación incidente es estimada en base al modelo desarrollado, y mediante (5.28), se obtienen los resultados de la Tabla 5.10.

Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T_{CELDA} [°C]	$T_{AMBIENTE}$ [°C]	L [W/m ²]	k_{te} [°Cm ² /W]
19 de abril	110	12:37	12:40	48	26,53	701,6788	0,0306

Tabla 5.10 Determinación coeficiente de transferencia calórico k_{te} , celdas SunPower A300 control

Los coeficientes de transferencia calórico determinados para las celdas SunPower A300 de Eolian I y control no son comparables directamente ya que la disipación de calor de la superficie del vehículo es distinta a la disipación de calor de la plataforma SP.

Para las celdas SunPower A300 de control, el ajuste de curva realizado entrega, los valores para los parámetros n , R_S y R_{Sh} presentados en la Tabla 5.11.

Celdas medidas	n	R_S [Ω]	R_{Sh} [Ω]
Medición 0	1,196	0,0137	9,3122
Medición 1	1,120	0,0197	250,1287
Medición 2	1,120	0,0160	500,7105
Medición 3	1,200	0,0160	260,7374

Tabla 5.11 Parámetros n , R_S y R_{Sh} propios, celdas SunPower A300 control

En la Figura 5.12 se tienen tanto las curvas medidas como las curvas que entrega el modelo a partir de los parámetros estimados.

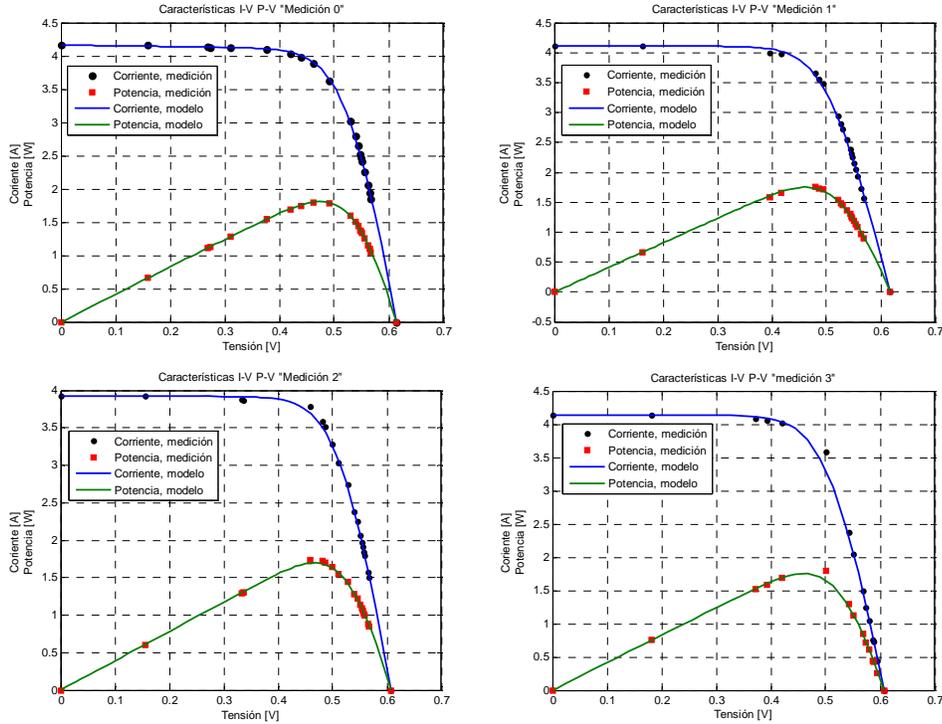


Figura 5.12 Características I-V y P-V celdas medidas y simuladas, SunPower A300 control

Al igual que en el caso de las celdas SunPower A300 de Eolian I, para valores de R_{Sh} menores a $15[\Omega]$ de la Tabla 5.11, se simula el comportamiento de la celda considerando los otros dos parámetros determinados y variando R_{Sh} hasta $500 [\Omega]$, obteniéndose curvas prácticamente similares a las obtenidas con los valores de la Tabla 5.11. A su vez, para los valores R_{Sh} mayores a $15[\Omega]$ de dicha tabla, se efectúa el mismo proceso, pero haciendo que R_{Sh} tome valores menores. En este caso, las curvas que se obtienen varían mucho su forma. Luego, para promediar los valores de la Tabla 5.6, sólo se consideran valores mayores a $100[\Omega]$. Con esta consideración, tomando el promedio sobre los valores respectivos de las tablas correspondientes, se tiene que los parámetros físicos y de funcionamiento de las celdas SunPower A300 de control son los resumidos en la Tabla 5.12.

Parámetros físicos	R_{Sh}	337,1922 [Ω]
	R_S	0,01634 [Ω]
	n	1,159
	E_{gSi}	1,11[eV]
	kte	0,0306 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$]
	k_0	2,2 [mA/ $^{\circ}\text{C}$]
	β_V	-1,9 [mV/ $^{\circ}\text{C}$]
Parámetros de referencia	I_{SCRef}	5,6353 [A]
	L_{Ref}	1.000 [W/m^2]
	T_{Ref}	25 [$^{\circ}\text{C}$]
	V_{OCRef}	0,655 [V]

Tabla 5.12 Parámetros de referencia y funcionamiento comunes, celdas SunPower A300 control

5.4.4 Celdas Spectrolab DJ control

Dado que sólo se consideran las celdas sobre la *plataforma SL*, cada celda es medida de forma independiente, a diferencia de los dos casos anteriores. Las mediciones utilizando la *plataforma SL* se han realizado el día 19 de abril de 2008. En la Figura 5.13 se presentan las curvas obtenidas.

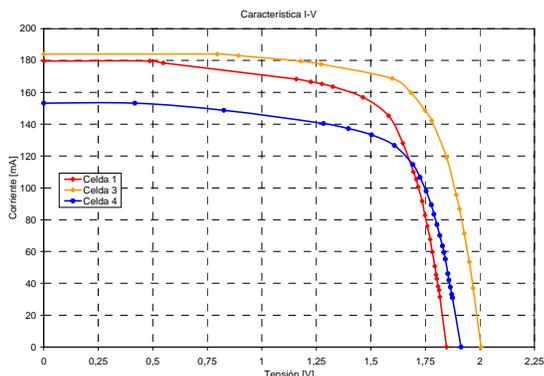


Figura 5.13 Característica I-V, celdas Spectrolab DJ

Utilizando las mediciones anteriores, se plantea la Tabla 5.13, en donde se tienen los parámetros de referencia propios de cada medición.

Nombre medición	Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T _{CELDA} [°C]	I _{sc} [A]	V _{oc} [V]	L [W/m ²]
Celda 1	19 de abril	110	14:23	14:25	40	179,7	1,847	600,913
Celda 3			14:32	14:35	43	184,0	2,005	582,933
Celda 4			14:38	14:40	51	153,2	1,913	570,207

Tabla 5.13 Parámetros de referencia propios, celdas Spectrolab DJ

En el caso de las celdas Spectrolab DJ se considera $L_{Ref}=1.353[W/m^2]$, $T_{Ref}=28[°C]$ y $\beta_V=-4,2[mV/°C]$ (ver hoja de datos en *Anexo B*) y utilizando una vez más las relaciones (5.29) y (5.30), se obtienen los parámetros de referencia comunes de cada celda que corresponden a los dados en la Tabla 5.14.

Nombre medición	I _{sc} [A]	V _{oc} [V]	I _{scRef} [A]	V _{ocRef} [V]
Celda 1	179,7	1,847	404,6076	1,8974
Celda 3	184,0	2,005	427,0677	2,0680
Celda 4	153,2	1,913	363,5163	2,0096

Tabla 5.14 Parámetros de referencia comunes, celdas Spectrolab DJ control

Mediante las mediciones de temperatura realizadas el día 19 de abril, estimando, una vez más, la radiación incidente en base al modelo desarrollado, y mediante la relación (5.28), se obtienen los resultados de la Tabla 5.15.

Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T _{CELDA} [°C]	T _{AMBIENTE} [°C]	L [W/m ²]	k _{te} [°Cm ² /W]
19 de abril	110	14:23	14:25	40	29,90	600,913	0,01681
		14:32	14:35	43	29,92	582,933	0,02244
		14:38	14:40	51	29,94	570,207	0,03693

Tabla 5.15 Determinación coeficiente de transferencia calórico *k_{te}*, celdas Spectrolab DJ control

Para las celdas Spectrolab DJ control, el ajuste de curva realizado, entrega los valores para los parámetros n , R_S y R_{Sh} presentados en la Tabla 5.16.

Celdas medidas	n	R_S [Ω]	R_{Sh} [Ω]
Celda 1	1,99	0,613264	105,1422
Celda 3	1,98	0,701769	317,9304
Celda 4	1,98	0,706894	109,6795

Tabla 5.16 Parámetros n , R_S y R_{Sh} propios, celdas Spectrolab DJ control

En la Figura 5.14 se tienen tanto las curvas medidas como las curvas que entrega el modelo a partir de los parámetros estimados.

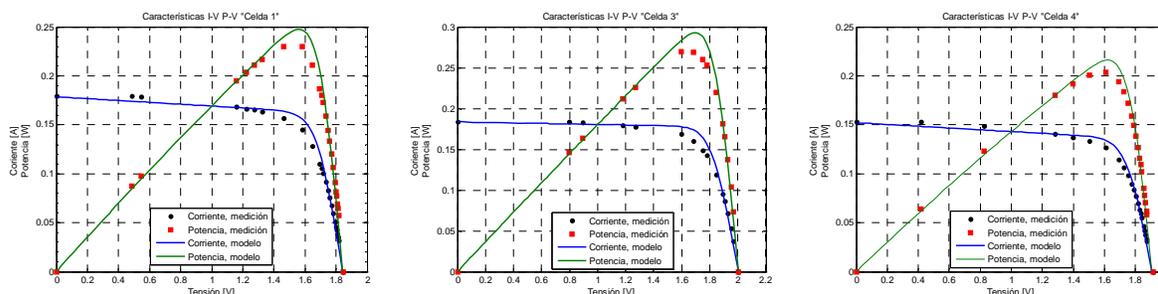


Figura 5.14 Características I-V y P-V celdas medidas y simuladas, Spectrolab DJ

Considerando los valores promedios respectivos para las valores determinados en las tablas correspondientes, se tiene que los parámetros físicos y de funcionamiento de las celdas Spectrolab DJ control son los resumidos en la Tabla 5.17.

Parámetros físicos	R_{Sh}	177,5840 [Ω]
	R_S	0,6740 [Ω]
	n	1,99
	$E_{g_{GaInP_2}}$	1,72[eV]
	$E_{g_{GaAs}}$	1,43[eV]
	kte	0,0254[$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$]
	k_0	269,9 [$\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$]
	β_V	-4,2 [mV/ $^{\circ}\text{C}$]
Parámetros de referencia	I_{SCRef}	398,4 [mA]
	L_{Ref}	1.353 [W/m^2]
	T_{Ref}	28 [$^{\circ}\text{C}$]
	V_{OCRef}	2,000 [V]

Tabla 5.17 Parámetros de referencia y funcionamiento comunes. Celdas Spectrolab DJ control

5.5 Implementación Computacional

Basándose en las ecuaciones descritas en las secciones 5.1, 5.2 y 5.3, y utilizando los parámetros determinados para las celdas (ver sección 5.4), el modelo computacional de una celda fotovoltaica y de un panel de celdas fue implementado utilizando el software *MATLAB Version 7.1.0 (R14) Service Pack 3*. El detalle de los códigos se encuentra en el **Anexo A**.

El algoritmo implementado es capaz de calcular la característica I-V de m celdas solares, para cualquier resolución que se desee, recibiendo como entrada los valores de sus variables físicas y de referencia, la radiación que cada celda recibe (a lo largo de un intervalo de tiempo) y la temperatura ambiente en la que se encuentra cada una de las celdas, además del paso de cálculo deseado. También es posible ingresar directamente la temperatura de las celdas en caso de que ellas sean conocidas. Dado que la ecuación (5.5), la cual entrega la característica I-V de la celda, no puede ser resuelta analíticamente, se aplica un método de resolución numérica para determinar dicha característica. Para resolver dicha ecuación, ella es escrita en la forma mostrada en (5.31).

$$0 = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{(V+R_S \cdot I) \cdot q}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{Sh}} - I \equiv \xi \quad (5.31)$$

La función ξ , por construcción, siempre vale cero. Se utiliza la función *fzero* de MatLab, que permite resolver ecuaciones no lineales del tipo $\xi=0$ con una variable incógnita para encontrar la característica I-V de cada celda. Para ello, el programa a partir del paso de cálculo que el usuario ingrese, crea un vector de tensión con valores ubicados entre $V=0$ y $V=V_{OC}$ para cada celda solar. La cantidad de elementos de cada vector de tensión es la misma para todas las celdas, por lo que el paso de cálculo finalmente utilizado será levemente distinto para cada celda ya que, en general, las tensiones V_{OC} de cada celda son distintas, pero de un valor similar. El algoritmo determina la corriente I para cada tensión V presente en el vector de tensiones, y esto último lo realiza para todas las celdas solares que se estén calculando. Además, el algoritmo determina para cada celda el par (V_{MP}, I_{MP}) , que indica la máxima potencia que ella genera en las condiciones simuladas.

Una vez calculada la característica I-V de cada celda simulada, es posible determinar la conexión de un panel de celdas formado por algunas o todas las celdas calculadas. Para ello, se han implementado dos funciones en MatLab llamadas *serie* y *paralelo* basadas en las relaciones de las secciones 5.2.1 y 5.2.2. Dichas funciones reciben como entrada la radiación solar bajo las cuales han sido determinadas las características I-V de cada celda y un vector que indica qué celdas van interconectadas entre sí. Dichas funciones evalúan la característica I-V de un panel, y además determinan el par (V_{MP}, I_{MP}) para cada hora de de simulación (las que corresponden a las radiaciones simuladas), con lo que es posible encontrar la curva de máxima potencia del panel para las condiciones de simulación, y con ello determinar la energía que el panel es capaz de entregar.

Para determinar los parámetros n , R_S y R_{Sh} utilizando el modelo implementado en MatLab, la función ξ es modificada de forma tal que, para ser evaluada, reciba como datos de entrada un conjunto de tensiones y corrientes (los que corresponden a los obtenidos mediante mediciones) y un vector que contiene los parámetros n , R_S y R_{Sh} que se quieren determinar. El resto de las variables de la función ξ , por simplicidad, se ingresan dentro del cuerpo del programa modificado

(ver *Anexo A*). Luego, se implementa un algoritmo que utilizando la función incorporada de MatLab *lsqcurvefit*, que permite realizar un proceso de ajuste de curva para ecuaciones no lineales, entrega los valores de los parámetros buscados para cada conjunto de mediciones. En la determinación de los parámetros, se ha definido un intervalo de posibles resultados para cada parámetro, de forma tal que su valore tenga sentido físico, de acuerdo a la Tabla 5.18.

Parámetro	Unidad	Límite inferior	Límite superior
n	-	1	2
R_S	$[\Omega]$	10^{-6}	10
R_{Sh}	$[\Omega]$	10	10^5

Tabla 5.18 Límites establecidos parámetros n , R_S y R_{Sh}

Además de lo anterior, el algoritmo implementado grafica las curvas I-V y P-V medidas junto a las que entrega el modelo con los parámetros determinados.

5.6 Validación y resultados del modelo

Para validar el modelo implementado en MatLab, se ha optado por utilizar, en el caso de las celdas SunPower A300, las correspondientes al vehículo *Eolian I*, cuyos parámetros corresponden a los determinados en la sección 5.4.2. A su vez, en el caso de las celdas Spectrolab DJ, se ha elegido utilizar las correspondientes a las celdas de control, cuyos parámetros son los estimados en la sección 5.4.4. La elección de dichos “tipos” de celdas permite, en base al modelo implementado y las mediciones realizadas, estimar el estado del panel de celdas fotovoltaicas de *Eolian I* (ver secciones 7.2 a 7.4).

5.6.1 Variación de la temperatura

Considerando una radiación solar incidente $L=1.000[\text{W}/\text{m}^2]$, y variando la temperatura de funcionamiento de la celda SunPower A300, se obtiene la Figura 5.15, en la que se presentan las características eléctricas ante las distintas condiciones de temperatura simuladas.

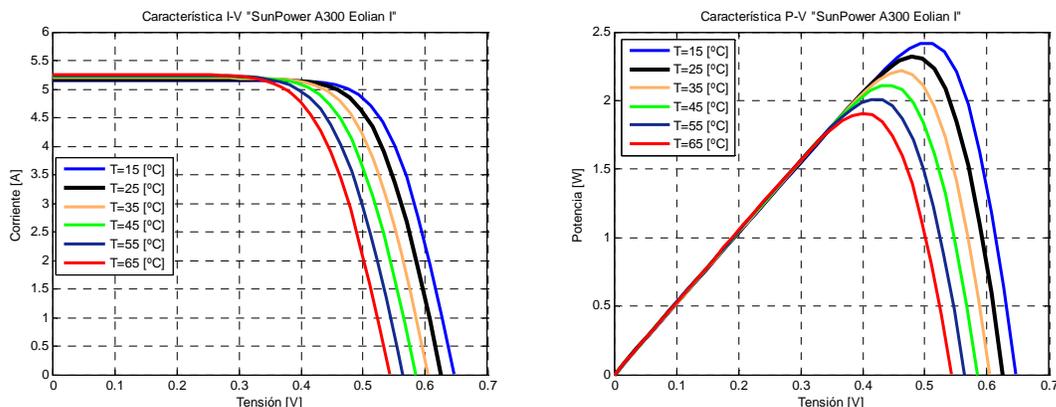


Figura 5.15 Características I-V P-V, celda SunPower A300, $L=1.000[\text{W}/\text{m}^2]$

Mediante las simulaciones presentadas en la Figura 5.15, se tiene la Tabla 5.19, en donde se resume el comportamiento de la celda para las distintas condiciones de operación.

T [°C]	V _{OC} [V]	I _{SC} [A]	V _{MP} [V]	I _{MP} [A]	P _{MP} [W]	Factor de llenado	Eficiencia
15	0,645	5,153	0,503	4,817	2,423	0,73	16,23%
25	0,625	5,175	0,478	4,852	2,319	0,72	15,54%
35	0,605	5,197	0,462	4,795	2,217	0,71	14,85%
45	0,584	5,219	0,438	4,823	2,113	0,69	14,16%
55	0,564	5,241	0,423	4,756	2,010	0,68	13,47%
65	0,543	5,263	0,399	4,776	1,907	0,67	12,78%

Tabla 5.19 Variables de desempeño, celda SunPower A300, L=1.000[W/m²]

Mediante el análisis de la Figura 5.15 y la Tabla 5.19 se aprecia que la tensión de circuito abierto V_{OC} decrece con el aumento de la temperatura, mientras que la corriente de cortocircuito I_{SC} crece con el aumento de ella. La disminución de V_{OC} es mucho mayor en magnitud que el aumento de I_{SC} , lo que hace que la potencia generada decaiga con el aumento de temperatura de la celda. Además, se tiene que la tensión de máxima potencia V_{MP} disminuye a medida que aumenta la temperatura de funcionamiento de la celda.

La disminución de V_{OC} ya es apreciable a una temperatura de operación $T=45[°C]$, la que es fácilmente alcanzada y superada durante la operación normal de un panel de celdas fotovoltaicas.

De acuerdo a la Tabla 5.19, se tiene que el aumento de la temperatura hace que la eficiencia de la celda decaiga, debido a la pérdida de potencia generada por la caída de V_{MP} . A su vez, se tiene que el factor de llenado de este tipo de celdas también cae con el aumento de la temperatura de funcionamiento.

Utilizando las relaciones (5.6) y (5.30) es posible obtener los valores teóricos de V_{OC} e I_{SC} para una celda solar (conociendo sus parámetros β_V y k_0). Así, considerando los valores de V_{OC} e I_{SC} de la Tabla 5.19 entregados por el modelo y mediante las relaciones mencionadas se tiene la Tabla 5.20, en donde se aprecian los valores teóricos (en base a hoja de datos de las celdas) y entregados por el modelo de V_{OC} e I_{SC} .

T [°C]	V _{OC} modelo [V]	V _{OC} data [V]	Diferencia V _{OC} [mV]	I _{SC} modelo [A]	I _{SC} data [A]	Diferencia I _{SC} [μA]
15	0,645	0,644	1,29	5,1534	5,1533	68,87
25	0,625	0,625	0,00	5,1753	5,1753	0,00
35	0,605	0,606	-1,37	5,1973	5,1973	-69,05
45	0,584	0,587	-2,82	5,2192	5,2193	-138,64
55	0,564	0,568	-4,34	5,2411	5,2413	-209,69
65	0,543	0,549	-5,93	5,2630	5,2633	-284,45

Tabla 5.20 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda SunPower A300, L=1.000[W/m²]

Se aprecia de la Tabla 5.20 que tanto la diferencia en V_{OC} como en I_{SC} entre los valores teóricos y simulados es muy pequeña, siendo en el primer caso menor a 10[mV], y en el segundo

menor a 300[μ A], lo que indica que el modelo implementado ante la variación de la temperatura de trabajo de la celda presenta un muy buen desempeño para este tipo de celdas.

En el caso de las celda Spectrolab DJ, se considera una radiación solar incidente $L=1.353[\text{W}/\text{m}^2]$, y variando su temperatura de funcionamiento, se obtiene la Figura 5.16, en la que se presentan las características eléctricas ante las distintas condiciones de temperatura simuladas.

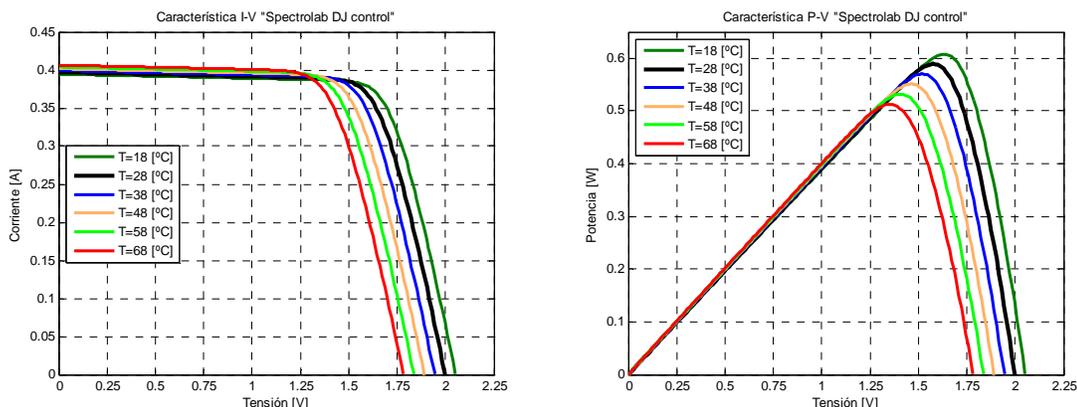


Figura 5.16 Características I-V P-V, celda Spectrolab DJ, $L=1.353[\text{W}/\text{m}^2]$

A través de las simulaciones presentadas en la Figura 5.16, se obtiene la Tabla 5.21, en donde se resume el comportamiento de esta celda para las distintas condiciones de operación simuladas.

T [°C]	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	Eficiencia
18	2,052	0,395	1,631	0,373	0,608	0,75	16,64%
28	1,999	0,397	1,574	0,374	0,589	0,74	16,13%
38	1,945	0,399	1,518	0,376	0,570	0,73	15,62%
48	1,891	0,402	1,463	0,377	0,551	0,73	15,10%
58	1,837	0,404	1,409	0,378	0,532	0,72	14,57%
68	1,783	0,406	1,355	0,378	0,512	0,71	14,03%

Tabla 5.21 Variables de desempeño, celda Spectrolab DJ, $L=1.353[\text{W}/\text{m}^2]$

Mediante el análisis de la Figura 5.16 y la Tabla 5.21, al igual que en el caso de la celda Sunpower A300, se tiene que V_{OC} decrece con el aumento de la temperatura, y que I_{SC} crece con su aumento. También la potencia generada decae con el aumento de temperatura de la celda debido a la disminución de V_{OC} , que es mucho mayor en magnitud que el aumento de I_{SC} . La tensión de máxima potencia V_{MP} también disminuye a medida que aumenta la temperatura de la celda.

Observando la Tabla 5.21, se tiene que la eficiencia y el factor de llenado de la celda decaen con el aumento de la temperatura. El factor de llenado de la celda Spectrolab DJ decae en menor medida que el de la celda SunPower A300 al aumentar la temperatura de trabajo.

Una vez más, mediante las relaciones (5.6) y (5.30) es posible obtener los valores teóricos de V_{OC} e I_{SC} . Así, considerando los valores de V_{OC} e I_{SC} de la Tabla 5.21 determinados mediante

el modelo y, a través de las relaciones mencionadas se tiene la Tabla 5.22, en donde se aprecian los valores teóricos (en base a hoja de datos de las celdas) y entregados por el modelo de V_{OC} e I_{SC} para la celda Spectrolab DJ.

T [°C]	V_{OC} modelo [V]	V_{OC} data [V]	Diferencia V_{OC} [mV]	I_{SC} modelo [A]	I_{SC} data [A]	Diferencia I_{SC} [mA]
18	2,052	2,041	11,76	0,3945	0,3942	0,306
28	1,999	1,999	0,00	0,3969	0,3969	0,000
38	1,945	1,957	-11,83	0,3993	0,3996	-0,306
48	1,891	1,915	-23,72	0,4017	0,4023	-0,611
58	1,837	1,873	-35,67	0,4041	0,4050	-0,917
68	1,783	1,831	-47,68	0,4065	0,4077	-1,222

Tabla 5.22 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda Spectrolab DJ, $L=1.353[W/m^2]$

Se aprecia de la Tabla 5.22 que tanto la diferencia en V_{OC} como en I_{SC} entre los valores teóricos (hoja de datos) y simulados es pequeña, aunque mayor a lo obtenido para la celda Sunpower A300. Para V_{OC} se tiene una diferencia menor a 50[mV] para todos los casos, y para I_{SC} , la diferencia máxima es menor que 2[mA], lo que indica que el modelo implementado ante la variación de la temperatura de trabajo de la celda presenta, al igual que en caso anterior, un muy buen desempeño.

5.6.2 Variación de la radiación solar incidente

En la Figura 5.17 se presenta el comportamiento para una celda Sunpower A300 para distintas condiciones de radiación, considerando una temperatura de trabajo $T=25$ [°C].

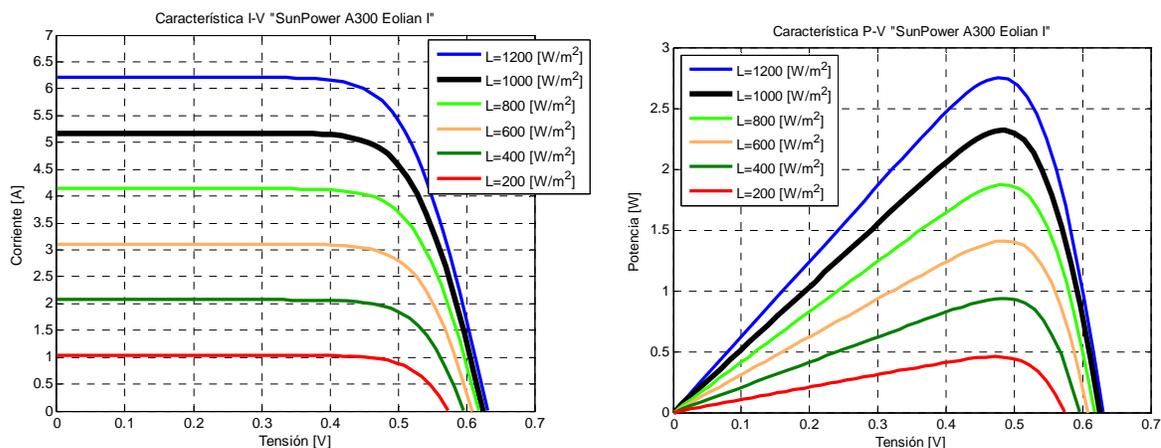


Figura 5.17 Características I-V P-V, celda SunPower A300, $T=25$ [°C]

En base a las simulaciones presentadas en la Figura 5.15, se tiene la Tabla 5.23, en donde se resume el comportamiento de la celda para las distintas condiciones de operación consideradas.

L [W/m ²]	V _{OC} [V]	I _{SC} [A]	V _{MP} [V]	I _{MP} [A]	P _{MP} [W]	Factor de llenado	Eficiencia
1.200	0,631	6,210	0,477	5,773	2,752	0,70	15,36%
1.000	0,625	5,175	0,486	4,771	2,319	0,72	15,54%
800	0,618	4,140	0,481	3,894	1,871	0,73	15,67%
600	0,609	3,105	0,487	2,898	1,411	0,75	15,76%
400	0,596	2,070	0,490	1,913	0,937	0,76	15,69%
200	0,573	1,035	0,471	0,971	0,458	0,77	15,34%

Tabla 5.23 Variables de desempeño, celda SunPower A300, T=25[°C]

En base a la Figura 5.17 y la Tabla 5.23, se aprecia que la tensión de circuito abierto V_{OC} decrece levemente al disminuir la radiación solar incidente sobre la celda, comportamiento que se da hasta un valor intermedio entre los $600[W/m^2]$ y $400[W/m^2]$. A partir de dicho punto, se tiene que V_{OC} comienza a decaer notoriamente más rápido, efecto que se aprecia claramente para $L=200[W/m^2]$. En el caso de la corriente de cortocircuito I_{SC} , de acuerdo a la Tabla 5.23, se tiene que ella es directamente proporcional a la radiación solar incidente dentro de todo el rango de trabajo simulado. A su vez, la corriente de máxima potencia I_{MP} , presenta un comportamiento casi linealmente proporcional con la radiación solar incidente sobre la celda.

La máxima potencia P_{MP} decrece aproximadamente de manera lineal a medida que la radiación solar incidente sobre la celda disminuye. La tensión de máxima potencia V_{MP} para las distintas radiaciones presenta la forma de un parábola cuyos brazos están orientados hacia la izquierda (el valor máximo de V_{MP} para las simulaciones realizadas se da para $L=400[W/m^2]$).

A diferencia de lo que ocurre al variar la temperatura de funcionamiento de la celda, se tiene que el factor de llenado aumenta a medida que la radiación solar incidente disminuye para este tipo de celdas.

La eficiencia de la celda se mantiene más o menos constante al variar la radiación solar que incide sobre ella debido a que todas las variables eléctricas decrecen al disminuir la radiación solar incidente (y viceversa).

En base a la ecuación (5.29) es posible obtener el valor teórico de I_{SC} para una celda solar ante la variación de la radiación incidente. Así, considerando los valores de I_{SC} de la Tabla 5.23 entregados por el modelo y mediante (5.29), se tiene la Tabla 5.24, en donde se aprecian los valores teóricos (hoja de datos) y entregados por el modelo para I_{SC} .

L [W/m ²]	I _{sc} modelo [A]	I _{sc} data [A]	Diferencia I _{sc} [μA]
1.200	6,210	6,210	0,00
1.000	5,175	5,175	0,00
800	4,140	4,140	0,00
600	3,105	3,105	0,00
400	2,070	2,070	0,00
200	1,035	1,035	0,00

Tabla 5.24 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda SunPower A300, T=25[°C]

De acuerdo a la Tabla 5.24, se tiene que no hay diferencia entre la corriente I_{SC} entregada por el modelo y la teórica a nivel de los microamperes. Esto se debe a que la modelación

implementada considera que cuando la celda se encuentra cortocircuitada, es posible suponer que el valor de la corriente de cortocircuito es prácticamente igual al valor de la corriente fotolumínica (ver sección 5.1), razón por la cual el modelo entrega resultados con un error ínfimo para I_{SC} ante una variación de la radiación solar incidente.

En el caso de la celda Spectrolab DJ, para una temperatura de trabajo $T=28[^\circ\text{C}]$, se obtiene la Figura 5.18 en la que se presentan las características eléctricas de esta celda ante las distintas condiciones de radiación solar incidente consideradas.

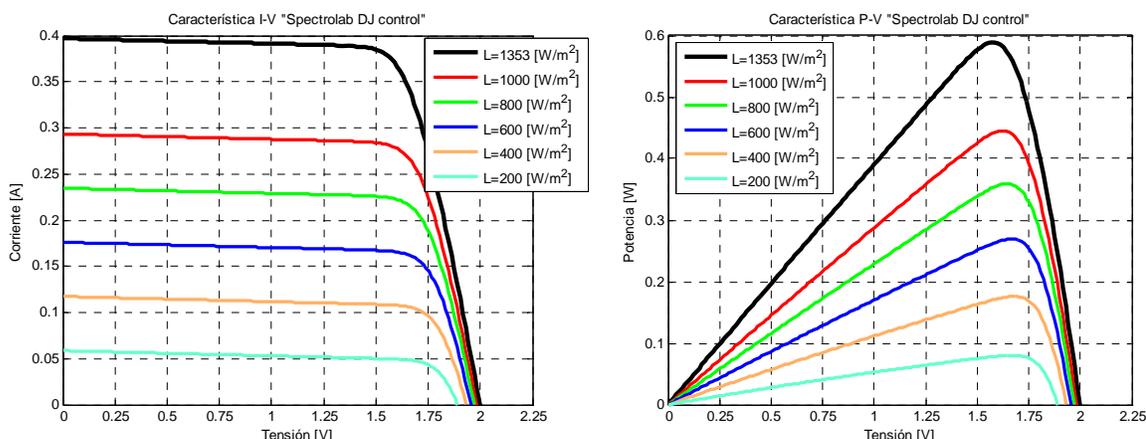


Figura 5.18 Características I-V P-V, celda Spectrolab DJ, $T=28[^\circ\text{C}]$

En base a las simulaciones presentadas en la Figura 5.18, se tiene la Tabla 5.25, en donde se resume el comportamiento de la celda para las distintas condiciones de operación en consideración.

L [W/m^2]	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	Eficiencia
1353	1,999	0,397	1,576	0,374	0,589	0,74	16,13%
1000	1,982	0,293	1,623	0,275	0,446	0,77	16,51%
800	1,982	0,235	1,646	0,218	0,359	0,77	16,64%
600	1,970	0,176	1,666	0,162	0,269	0,78	16,62%
400	1,955	0,117	1,678	0,105	0,176	0,77	16,30%
200	1,932	0,059	1,669	0,048	0,080	0,71	14,87%

Tabla 5.25 Variables de desempeño, celda Spectrolab DJ, $T=28[^\circ\text{C}]$

De acuerdo a las simulaciones realizadas en la Figura 5.18 y la Tabla 5.25, se tiene que para este tipo de celdas la tensión de circuito abierto V_{OC} decrece levemente al disminuir la radiación solar incidente sobre la celda. Este comportamiento se aprecia en todo el rango de simulación, lo que indica que para este tipo de celdas, la tensión V_{OC} debiera decrecer de manera más rápida para valores de radiaciones incidentes inferiores a los $200[\text{W}/\text{m}^2]$. Al igual que en el caso la celda SunPower, la corriente de cortocircuito I_{SC} , de acuerdo a la Tabla 5.25, se tiene que es directamente proporcional a la radiación solar incidente dentro de todo el rango de trabajo simulado, lo que también ocurre para la corriente de máxima potencia I_{MP} en este caso.

La máxima potencia P_{MP} también decrece aproximadamente de forma lineal a medida que la radiación solar incidente solar sobre la celda disminuye. La tensión de máxima potencia V_{MP} , para las distintas radiaciones presenta la forma de una parábola cuyos brazos están orientados hacia la izquierda. Este comportamiento es de la misma forma que el que se da para las celdas

SunPower A300 (el valor máximo de V_{MP} para las simulaciones realizadas se da para $L=400[W/m^2]$).

En cuanto al factor de llenado, se tiene que presenta un máximo en torno a las $600[W/m^2]$, comportamiento distinto respecto del que entrega el modelo para las celdas SunPower.

La eficiencia de la celda se mantiene aproximadamente constante al variar la radiación solar que incide sobre ella hasta un valor de radiación en torno a los $400[W/m^2]$, debido a que todas las variables eléctricas relacionadas decrecen de manera similar al disminuir la radiación solar incidente (y viceversa).

Utilizando (5.29) y con los datos correspondientes a la Tabla 5.25, se plantea la Tabla 5.26, en donde se tiene el valor teórico de I_{SC} y el que da el modelo ante la variación de la radiación incidente.

L [W/m ²]	I _{sc} modelo [A]	I _{sc} data [A]	Diferencia I _{sc} [μA]
1.353	0,397	0,397	0,00
1.000	0,293	0,293	0,00
800	0,235	0,235	0,00
600	0,176	0,176	0,00
400	0,117	0,117	0,00
200	0,059	0,059	0,00

Tabla 5.26 Contraste de V_{OC} e I_{SC} teórico y modelo, celda Spectrolab DJ, T=28[°C]

Al igual que lo apreciado en la Tabla 5.24, de acuerdo a la Tabla 5.26, se tiene que no hay diferencia entre la corriente I_{SC} entregada por el modelo y la teórica a nivel de los microamperes, lo que indica que el modelo entrega resultados con un error ínfimo para I_{SC} ante una variación de la radiación solar incidente, debido al supuesto que considera que el valor de la corriente de cortocircuito es prácticamente igual al valor de la corriente fotolumínica para una celda solar.

5.6.3 Temperatura celda solar

Para validar el modelo que entrega la temperatura de una celda solar, se han considerado dos mediciones de temperatura realizadas en los paneles solares de Eolian I el día 16 de abril de 2008. Dichas mediciones no se realizaron celda por celda, sino que se realizaron mediante una muestra de temperaturas que fueran representativas para el panel, para así minimizar la variación de temperatura debida a la variación de factores climáticos durante la realización de la toma de datos, lográndose que las mediciones fueran realizadas en un intervalo de tiempo menor a 5 minutos para cada panel (conformado por 85 celdas).

En la Figura 5.19 se presenta la radiación incidente sobre las celdas solares del *Panel 1* del vehículo, determinada mediante el modelo de radiación solar implementado, y en la Figura 5.21 la correspondiente al *Panel 4*. A su vez, en la Figura 5.20 y en la Figura 5.22, se tiene la temperatura medida y simulada para las celdas del *Panel 1* y *Panel 4* respectivamente. El detalle de la temperatura por celda de cada panel se encuentra en el *Anexo C*.

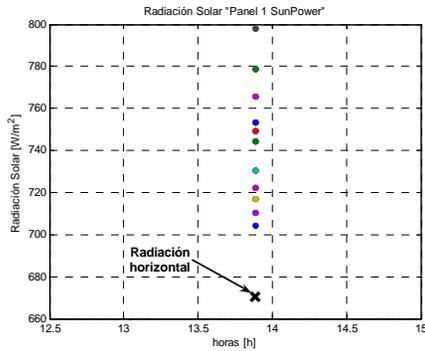


Figura 5.19 Radiación solar incidente celdas *Panel 1* Eolian I

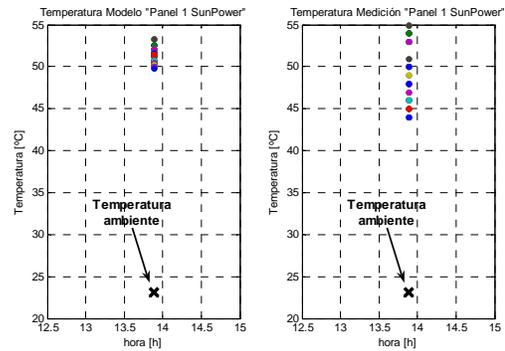


Figura 5.20 Temperatura celdas *Panel 1* Eolian I, modelo (izquierda) y medición (derecha)

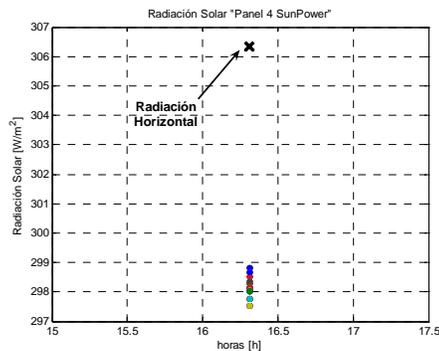


Figura 5.21 Radiación solar incidente celdas *Panel 4* Eolian I

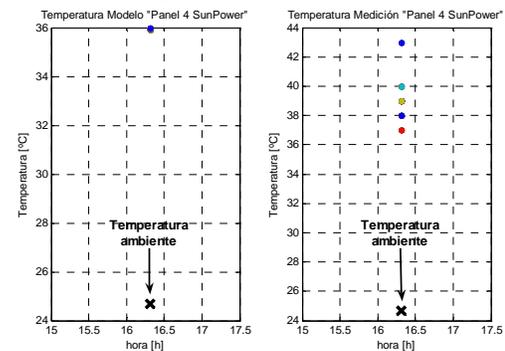


Figura 5.22 Temperatura celdas *Panel 4* Eolian I, modelo (izquierda) y medición (derecha)

En base a las simulaciones y mediciones realizadas, se plantean la Tabla 5.27 y la Tabla 5.28, correspondientes al *Panel 1* y *Panel 4* respectivamente, en donde se contrasta la temperatura dada por el modelo y las mediciones.

Hora inicio	13:49	T_{Prom} Modelo [°C]	51,49
Hora término	13:57	T_{Prom} Medición [°C]	49,44
T_{Max} Modelo [°C]	53,59	Diferencia promedio [°C]	2,79
T_{Max} Medición [°C]	55,00	Diferencia máxima [°C]	7,58
T_{Min} Modelo [°C]	49,92	Diferencia mínima [°C]	0,11
T_{Min} Medición [°C]	44,00	$T_{ambiente}$ [°C]	23,16

Tabla 5.27 Contraste temperatura modelo y medición, celdas *Panel 1* Eolian I

Hora inicio	16:17	T_{Prom} Modelo [°C]	35,95
Hora término	16:20	T_{Prom} Medición [°C]	38,79
T_{Max} Modelo [°C]	35,98	Diferencia promedio [°C]	2,84
T_{Max} Medición [°C]	43,00	Diferencia máxima [°C]	7,05
T_{Min} Modelo [°C]	35,93	Diferencia mínima [°C]	1,05
T_{Min} Medición [°C]	37,00	$T_{ambiente}$ [°C]	24,68

Tabla 5.28 Contraste temperatura modelo y medición, celdas *Panel 4* Eolian I

En base a lo apreciado en la Tabla 5.27 y la Tabla 5.28, se tiene que el error máximo registrado entre las mediciones y la simulación es de 7,58[°C], valor que sugeriría que el modelo utilizado entrega valores alejados respecto de la temperatura real de las celdas, pero de acuerdo a las mismas tablas se tiene que el error promedio es del orden de los 2,8[°C], valor más que tolerable dada la simpleza del modelo utilizado.

En cuando a las temperaturas extremas entregadas por el modelo, se tiene una diferencia de hasta 6[°C] aproximadamente, la que nuevamente se aprecia en el Panel 1. Este panel es el que

presenta la mayor diferencia de inclinación entre las celdas que lo conforman, además de poseer celdas muy alejadas de la cúpula (correspondientes a las de la punta) y otras muy cercanas a dicha cúpula, lo que puede influir en una distinta disipación de calor entre las celdas.

Debe hacerse notar que el modelo implementado no considera la lenta respuesta de los procesos térmicos, que en general presentan una alta inercia térmica, haciendo que las variaciones de temperatura sean lentas (con constantes de tiempo del orden de muchos minutos), y no como la respuesta que entrega el modelo implementado, que es inmediata ante la variación de la radiación solar incidente y de la temperatura ambiente.

Dado que la constante k_{te} se ha determinado con el vehículo quieto, y casi sin la presencia de convección forzada (vientos), el cálculo de temperatura sólo es válido para condiciones similares de ventilación, como lo son el caso del vehículo detenido, moviéndose muy lentamente, o vientos casi inexistentes. Para otras condiciones de ventilación, es necesario volver a determinar el valor del parámetro k_{te} , o estimarlo.

La simplicidad del modelo implementado permite una rápida estimación de la temperatura para un panel solar, con una diferencia entre los valores reales tolerable, pero no pequeña como la que se da en el modelo implementado para una celda fotovoltaica.

5.6.4 Paneles Solares

Tanto para las celdas SunPower A300 como las celdas Spectrolab DJ, se han considerado siete celdas con distintas inclinaciones, de manera tal que tanto la radiación solar incidente como la temperatura de cada una de ellas sean distintas. Con estas siete celdas, se analiza el caso de un panel serie y el de un panel paralelo. Las simulaciones llevadas a cabo se han realizado para el día juliano $n=300$, correspondiente al 27 de octubre (año no bisiesto) durante el medio día solar (12:28 p.m. hora local) en la ciudad de Santiago de Chile. Además se ha supuesto que la temperatura ambiente del lugar durante la simulación toma un valor correspondiente a $T_{Ambiente}=20[^\circ C]$.

Entre la Figura 5.23 y la Figura 5.25, se presentan los resultados de las simulaciones para cada una de las siete celdas SunPower A300 consideradas, y en la Tabla 5.29 se resume el desempeño de cada celda y el desempeño promedio de ellas.

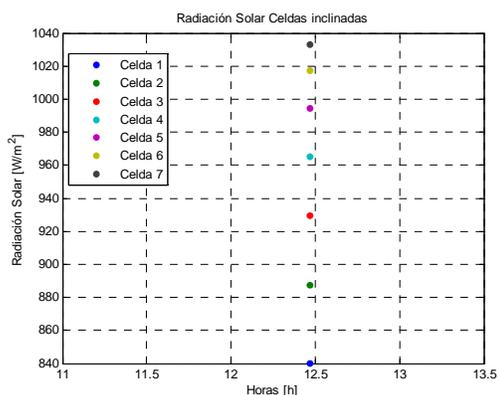


Figura 5.23 Radiación Solar celdas SunPower A300

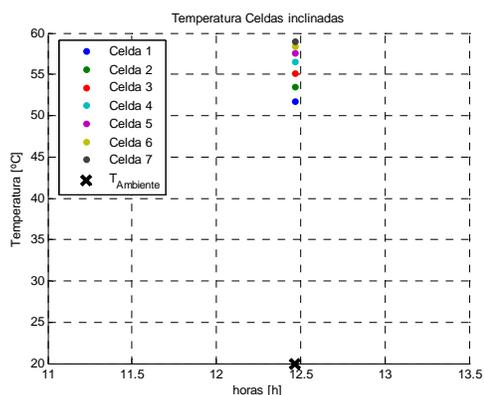


Figura 5.24 Temperatura celdas SunPower A300

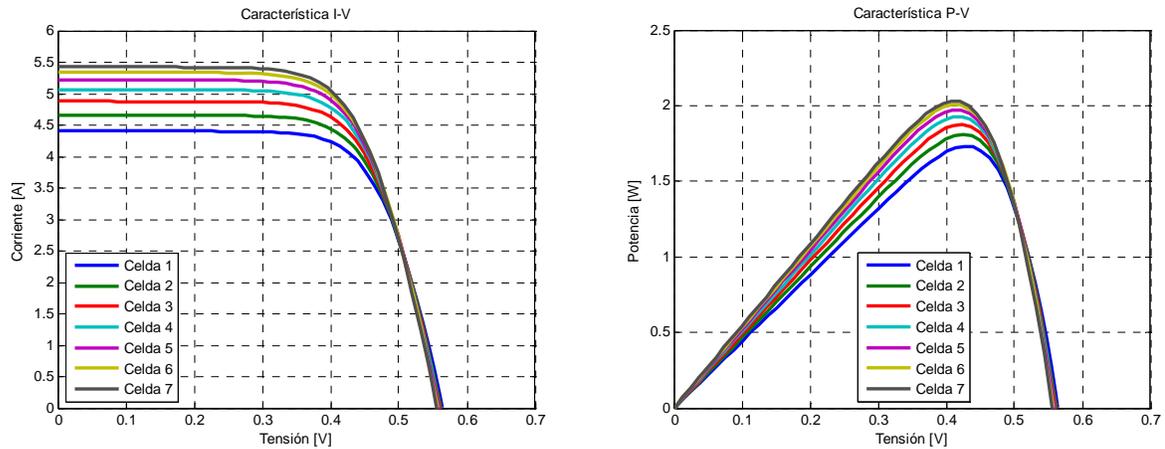


Figura 5.25 Características I-V P-V celdas SunPower A300

Celda	1	2	3	4	5	6	7	Promedio
Inclinación [°]	-15,0	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	0,0
Azimet [°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
L [W/m^2]	840,00	887,76	929,69	965,46	994,80	1017,49	1033,36	952,65
T _{Celda} [°C]	51,75	53,56	55,14	56,49	57,60	58,46	59,06	56,01
V _{OC} [V]	0,564	0,563	0,561	0,559	0,558	0,557	0,556	0,560
I _{SC} [A]	4,406	4,657	4,878	5,066	5,220	5,339	5,423	4,998
V _{MP} [V]	0,426	0,425	0,424	0,423	0,409	0,409	0,408	0,418
I _{MP} [A]	4,062	4,259	4,428	4,565	4,818	4,907	4,972	4,573
P _{MP} [W]	1,732	1,810	1,876	1,929	1,972	2,005	2,029	1,908
Factor de llenado	0,697	0,691	0,686	0,681	0,677	0,674	0,672	0,683
Eficiencia [%]	13,81	13,66	13,52	13,39	13,28	13,20	13,16	13,43

Tabla 5.29 Resumen desempeño celdas SunPower A300

En base a los resultados de la Tabla 5.29, con tan sólo considerar una diferencia de inclinación de 5[°] entre celdas contiguas, se tiene que la diferencia de radiación solar incidente es de casi 200[W/m^2], haciendo que se genere una diferencia de 7,31[°C] entre la celda 1 (la más fría) y la celda 7 (la más caliente). La diferencia de radiación solar entre la celda 1 y celda 7 hace que la diferencia entre sus corrientes I_{MP} e I_{SC} sea del orden de 1[A] respectivamente. La diferencia de tensión que se produce en estas condiciones es sólo del orden de los [mV].

Todo lo anterior hace que la máxima potencia generada por cada celda sea distinta, teniéndose una diferencia máxima de 0,297[W]. Tanto el factor de llenado como la eficiencia de cada celda son diferentes de acuerdo a lo apreciado en la Tabla 5.29.

Entre la Figura 5.26 y la Figura 5.28 se tienen los resultados de las simulaciones para las siete celdas Spectrolab DJ, cuyos desempeños, y el desempeño promedio, se resumen en la Tabla 5.30.

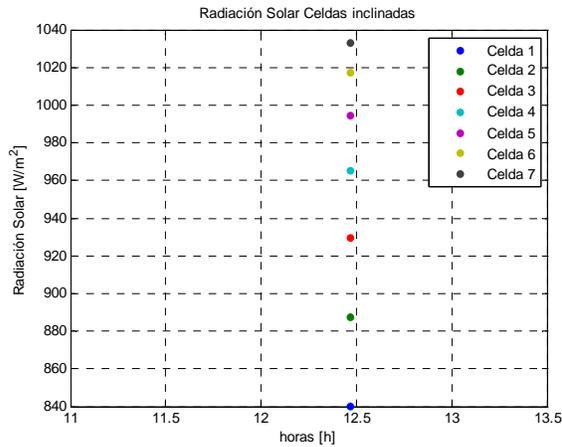


Figura 5.26 Radiación Solar incidente celdas Spectrolab DJ

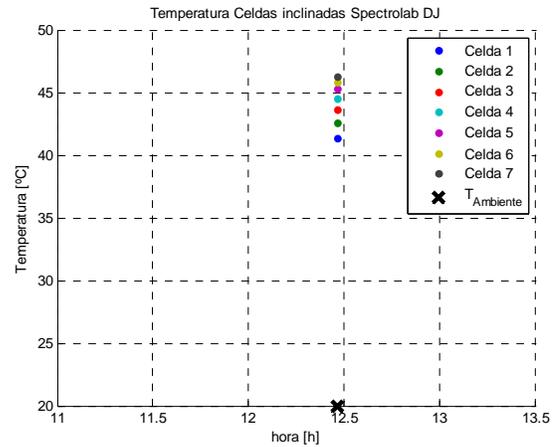


Figura 5.27 Temperatura celdas Spectrolab DJ

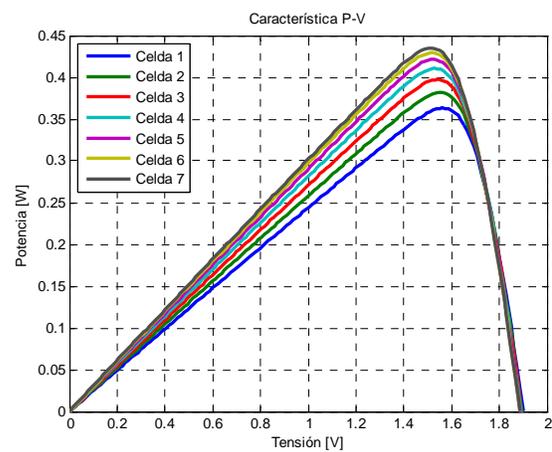
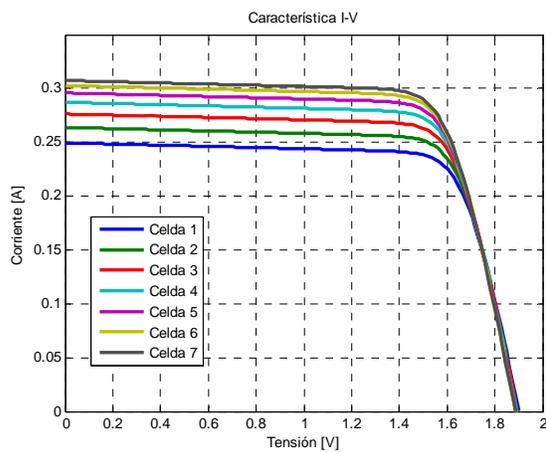


Figura 5.28 Características I-V P-V celdas Spectrolab DJ

Celda	1	2	3	4	5	6	7	Promedio
Inclinación [°]	-15,0	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	0,0
Azimut [°]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
L [W/m ²]	840,00	887,76	929,69	965,46	994,80	1017,49	1033,36	952,65
T _{Celda} [°C]	41,34	42,55	43,61	44,52	45,27	45,84	46,25	44,20
V _{OC} [V]	1,900	1,897	1,894	1,891	1,888	1,887	1,885	1,892
I _{SC} [A]	0,250	0,264	0,276	0,287	0,296	0,303	0,307	0,283
V _{MP} [V]	1,562	1,546	1,543	1,528	1,526	1,512	1,511	1,533
I _{MP} [A]	0,233	0,247	0,258	0,269	0,276	0,284	0,288	0,265
P _{MP} [W]	0,363	0,382	0,397	0,411	0,421	0,429	0,435	0,406
Factor de llenado	0,766	0,762	0,759	0,756	0,754	0,752	0,751	0,757
Eficiencia [%]	16,03	15,93	15,84	15,76	15,69	15,64	15,60	15,78

Tabla 5.30 Resumen desempeño celdas Spectrolab DJ

De acuerdo a los resultados de la Tabla 5.30, en la que se consideran las celdas Spectrolab DJ con las mismas inclinaciones que las celdas SunPower A300, se tiene la misma diferencia de radiación solar incidente, pero la diferencia de temperatura entre la celda 1 (la más fría) y la celda

7 (la más caliente) es sólo de 4,91[°C], lo que se debe al distinto valor del parámetro kte . La diferencia de radiación solar entre la celda 1 y celda 7 hace que la diferencia entre sus corrientes I_{MP} e I_{SC} sea del orden de 60[mA] respectivamente. La diferencia máxima de tensión que se produce en estas condiciones es del orden de los 50[mV], que es mayor a la que se produce para las celdas SunPower A300.

Todo lo anterior hace que la máxima potencia generada por cada celda sea distinta, así como el factor de llenado y la eficiencia de cada celda. Estos dos últimos indicadores son mayores a los de las celdas SunPower A300 simuladas, lo que indica un mejor desempeño individual de estas celdas en las condiciones consideradas.

5.6.4.1 Conexión Serie

En base a las simulaciones realizadas en la sección 5.6.4 se ha obtenido, mediante el modelo propuesto en 5.2.1, las curvas representativas para el panel serie SunPower A300 en la Figura 5.29, y para el panel serie Spectrolab DJ en la Figura 5.30.

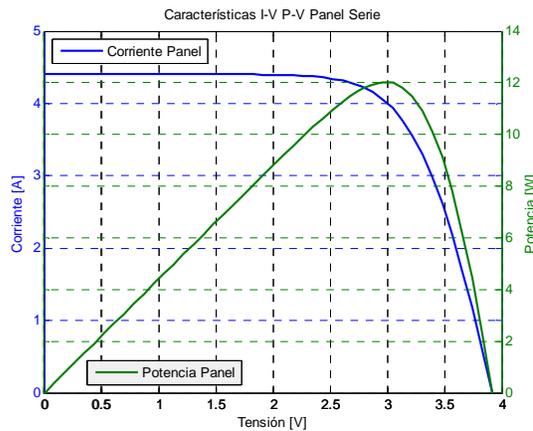


Figura 5.29 Características I-V P-V, Panel serie SunPower A300

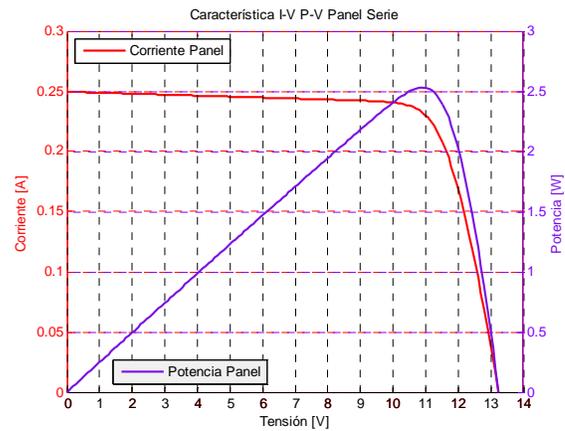


Figura 5.30 Características I-V P-V, Panel serie Spectrolab DJ

En base a las simulaciones previas, se tiene la Tabla 5.31, en donde se resumen las variables que indican el desempeño de la conexión serie de los paneles respectivos.

	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	Eficiencia [%]	Factor de desalineación
SunPower A300	3,919	4,406	2,961	4,063	12,030	0,697	12,09	0,901
Spectrolab DJ	13,242	0,250	10,884	0,233	2,532	0,766	14,07	0,892

Tabla 5.31 Resumen desempeño panel serie SunPower A300 y Spectrolab DJ

De acuerdo a la Tabla 5.31, se tiene que ambos paneles serie presentan una disminución en su potencia de salida debido a que cada celda recibe distintas radiaciones incidentes, las que además hacen que las celdas se encuentren a distintas temperaturas, lo que se aprecia en el factor de desalineación para cada panel, teniéndose que la pérdida de potencia por este concepto es un poco más severa en el caso del panel serie Spectrolab DJ. Pese a lo anterior, se tiene que el panel más eficiente es el recién mencionado, debido principalmente a que la temperatura de sus celdas es menor que la de las celdas SunPower A300.

Se tiene que cada panel serie es más ineficiente que la celda más ineficiente que lo conforma, teniéndose que la eficiencia del panel serie SunPower A300 es 1,07 puntos porcentuales más baja que la de su celda más ineficiente, mientras que en el caso del panel Spectrolab DJ esta diferencia llega a 1,53 puntos porcentuales.

En el caso del factor de llenado, sucede algo distinto. Se tiene que el factor de llenado de cada panel serie es idéntico al de la celda que presenta el mayor factor de llenado, que en ambos casos corresponde a la celda 1 de cada panel.

En cuanto a la corriente I_{SC} para cada panel serie, de acuerdo a lo planteado, viene dada por la de la celda cuya corriente I_{SC} es la menor de todas, y en el caso de la tensión V_{OC} , esta corresponde a la suma de las tensiones de todas las celdas.

5.6.4.2 Conexión paralelo

Utilizando una vez más, las simulaciones realizadas en la sección 5.6.4 se ha obtenido, mediante el modelo propuesto en 5.2.2, las curvas representativas para el panel paralelo SunPower A300 en la Figura 5.31, y para el panel paralelo Spectrolab DJ en la Figura 5.32.

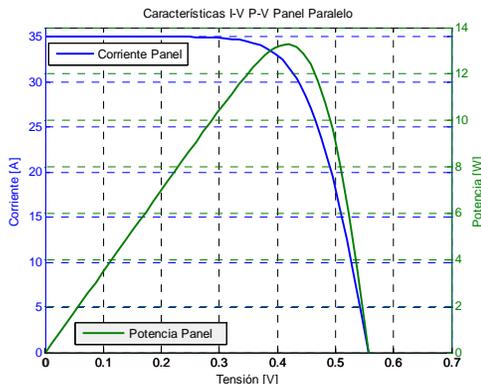


Figura 5.31 Características I-V P-V, Panel paralelo SunPower A300

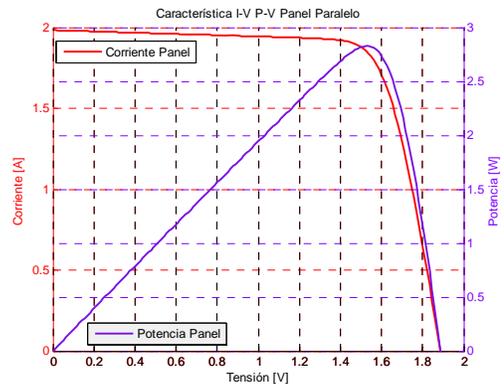


Figura 5.32 Características I-V P-V, Panel paralelo Spectrolab DJ

En la Tabla 5.32 se resumen las variables que indican el desempeño de la conexión paralelo de los paneles respectivos basadas en las simulaciones previas.

	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	Eficiencia	Factor de desalineación
SunPower A300	0,556	34,990	0,420	31,565	13,270	0,682	13,33%	0,994
Spectrolab DJ	1,885	1,983	1,524	1,856	2,827	0,756	15,71%	0,996

Tabla 5.32 Resumen desempeño panel paralelo SunPower A300 y Spectrolab DJ

Se aprecia en la Tabla 5.32 que en el caso de los paneles paralelo, éstos también presentan una disminución en su potencia de salida debido a que cada celda recibe distintas radiaciones incidentes (y con ello se encuentran a distintas temperaturas), pero dicha disminución es ostensiblemente menor que en el caso de los paneles serie. Esto se debe a que las distintas tensiones de las celdas, en comparación con las diferentes corrientes de las celdas, son mucho

más parecidas, haciendo que la pérdida de tensión sea mucho menor en la conexión paralelo que la pérdida de corriente en el caso de una conexión serie de celdas. En este caso, los factores de desalineación son prácticamente iguales.

En cuanto a la eficiencia para el panel paralelo, nuevamente se tiene que el más eficiente corresponde al panel paralelo Spectrolab DJ ya que sus celdas se encuentran a una menor temperatura. Además, respecto de cada panel serie, se aprecia una mejoría en el rendimiento, teniéndose un alza de 1,24 puntos porcentuales para el panel formado por las celdas SunPower A300, y un alza de 1,64 puntos porcentuales para el panel Spectrolab DJ. Cada panel paralelo presenta una eficiencia cercana a la eficiencia promedio mostrada en la Tabla 5.29 y la Tabla 5.30.

En el caso del factor de llenado, sucede algo similar a lo que sucede con la eficiencia de cada panel paralelo. El factor de llenado de cada panel es casi idéntico al factor de llenado promedio indicado en la Tabla 5.29 y la Tabla 5.30, respectivamente.

La corriente I_{SC} para cada panel paralelo, de acuerdo a lo planteado, viene dada por la suma de la corriente I_{SC} de cada celda, y la tensión V_{OC} queda determinada por la celda que presenta la menor tensión V_{OC} , que corresponde a la celda más caliente para los niveles de radicación horizontal considerados.

5.6.5 Efecto sombra

Para estudiar el comportamiento del modelo ante el efecto sombra, se han considerado una serie de mediciones realizadas, tanto sobre celdas SunPower A300 como las Spectrolab DJ. Las mediciones se han realizado el día 19 de abril de 2008, utilizando la *plataforma SP* y la *plataforma SL*, por lo que en esta sección las simulaciones realizadas han sido llevadas a cabo considerando los parámetros de las celdas SunPower A300 de control estimados en la sección 5.4.3.

En el caso de la *plataforma SP*, se realizaron las mediciones con sus 4 celdas conectadas en serie, sombreándose sólo una de las celdas. En la Tabla 5.33 se definen las mediciones realizadas de acuerdo al porcentaje de sombra introducido sobre la celda correspondiente. La radiación solar incidente es estimada en base al modelo de radiación solar implementado. En la Tabla 5.33 I_S corresponde a la radiación incidente sobre la celda sombreada.

Nombre medición	Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T_{CELDA} [°C]	Sombra	I_B [W/m ²]	I_D [W/m ²]	I_G [W/m ²]	I_S [W/m ²]
SS	19 de abril	110	12:37	12:40	48	0%	594,608	107,071	701,679	701,679
MS			12:42	12:45	48	50%	594,707	107,074	701,781	404,427
TS			12:49	12:51	48	100%	594,045	107,056	701,101	107,056

Tabla 5.33 Radiación solar y temperatura sobre celdas SunPower A300, efecto sombra

En base a los datos de la Tabla 5.33, es posible simular el desempeño de la *plataforma SP* para cada una de las mediciones realizadas. En la Figura 5.33 se presentan las simulaciones correspondientes a cada medición, junto con los datos registrados. Además, en la Tabla 5.34 se contrastan las variables de desempeño correspondientes a cada medición respectivamente.

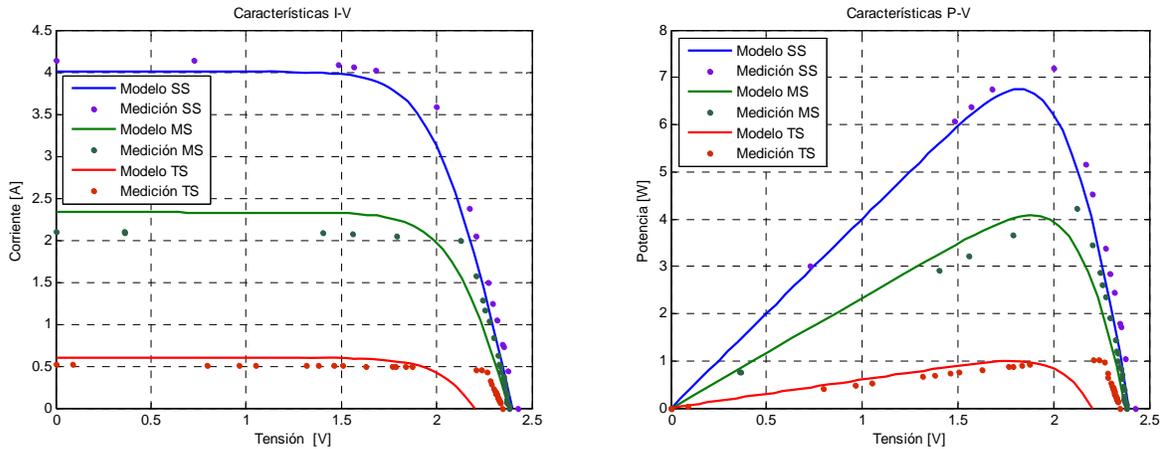


Figura 5.33 Características I-V P-V, mediciones efecto sombra SunPower A300

	Medición	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	Eficiencia [%]
Modelo	SS	2,396	4,004	1,797	3,749	6,738	0,70	16,08
Medición		2,427	4,140	2,002	3,590	7,187	0,72	17,16
Diferencia		-0,031	-0,136	-0,205	0,159	-0,449	-0,01	-1,07
Modelo	MS	2,379	2,329	1,883	2,168	4,082	0,74	10,90
Medición		2,383	2,100	2,125	1,990	4,229	0,85	11,29
Diferencia		-0,004	0,229	-0,242	0,178	-0,147	-0,11	-0,39
Modelo	TS	2,201	0,605	1,810	0,548	0,992	0,75	3,01
Medición		2,347	0,520	2,207	0,460	1,015	0,83	3,08
Diferencia		-0,146	0,085	-0,397	0,088	-0,023	-0,09	-0,07

Tabla 5.34 Contraste modelo y mediciones, efecto sombra SunPower A300

De acuerdo a lo apreciado en la Tabla 5.34, se tiene que al aumentar el porcentaje de sombra sobre sólo una celda del arreglo de la *plataforma SP*, se tiene que la disminución de la potencia de salida no disminuye proporcionalmente con el porcentaje de sombra, sino que se ve reducida mucho más rápidamente como se resume en la Tabla 5.35.

	Modelo	Medición	Modelo	Medición	Modelo	Medición
Medición	SS		MS		TS	
Potencia de salida [%]	100,00	100,00	67,75	65,80	18,69	17,94
Sombra arreglo [%]	0,0	0,0	12,5	12,5	25,0	25,0

Tabla 5.35 Potencia de salida *plataforma SP* según sombreado, efecto sombra

Dado que la celda sombreada reduce la corriente de todo el arreglo, se tiene que la eficiencia de conversión también disminuye muy rápidamente, desde un 17,16% hasta un 11,29% y 3,08% para SS un sombreado de 12,5% y 25% respectivamente (este es uno de los casos más severos de desalineamiento por diferencia de radicación solar incidente que se puede producir).

Para la tensión V_{OC} , se tiene que mientras mayor es el porcentaje de sombreado de la celda considerada, la tensión V_{OC} disminuye, lo que se aprecia claramente en la medición *TS*. Las diferencias entregadas por el modelo son menores a los 35[mV], excepto para la medición *TS*, en donde ella es del orden de los 150[mV], valor considerablemente grande considerando la tensión de trabajo de las celdas SunPower. Esto se debe a que la radiación I_s estimada en dicha medición

corresponde a $I_S=107,056[W/m^2]$, valor para el cual se tiene que la tensión V_{OC} ha disminuido considerablemente de acuerdo a lo presentado en la sección 5.6.2.

La mayor diferencia registrada para la corriente I_{SC} es del orden de 230[mA], valor tolerable dada la corriente de trabajo de la celda SunPower. Además, dado que no ha sido posible contar con mediciones directas de la radiación solar incidente, su estimación mediante el modelo contribuye en otra parte a la diferencia observada.

La mayor variación apreciada se produce en la potencia P_{MP} , teniéndose que el modelo entrega una diferencia de hasta 450[mW], valor que pese a ser el mayor de todos, sólo corresponde a una diferencia del 6,2% respecto del medido, lo que sólo corresponde a una diferencia pequeña.

Tanto en el factor de llenado como en la eficiencia, no se aprecian mayores diferencias entre los valores medidos y entregados por el modelo, lo que indica que la forma de la curva entregada por el modelo es similar a la de las mediciones, es decir, las pendientes de las curvas respectivas no son muy distintas.

A diferencia de lo realizado en las mediciones utilizando la *plataforma SP*, en las mediciones realizadas utilizando la *plataforma SL*, se ha considerado sólo una celda para estudiar el desempeño del modelo ante el efecto sombra para las celdas Spectrolab DJ. Sobre dicha celda (correspondiente a la celda 4 de la *plataforma SL*) se varía el porcentaje de sombra de acuerdo a lo indicado en la Tabla 5.36, en donde además se definen las mediciones realizadas de acuerdo al porcentaje de sombra utilizado. La radiación solar incidente, una vez más, es estimada en base al modelo de radiación solar implementado. En la Tabla 5.36 I_S también corresponde a la radiación incidente sobre la celda sombreada.

Nombre medición	Fecha medición	Día juliano	Hora inicio	Hora término	T _{CELDA} [°C]	Sombra	I _B [W/m ²]	I _D [W/m ²]	I _S [W/m ²]
SS	19 de abril	110	14:38	14:40	51	0%	467,057	103,150	570,21
MS			14:46	14:48	42	50%	449,869	102,523	327,46
TS			14:51	14:52	48	100%	438,537	102,094	102,09

Tabla 5.36 Radiación solar y temperatura sobre celda Spectrolab DJ, efecto sombra

En base a los datos de la Tabla 5.36, es posible simular el desempeño de la *plataforma SL* para cada medición realizada. En la Figura 5.34 se tienen las simulaciones correspondientes a cada medición junto con los datos registrados. Además, en la Tabla 5.37 se realiza el contraste entre las variables de desempeño correspondientes a cada medición, respectivamente.

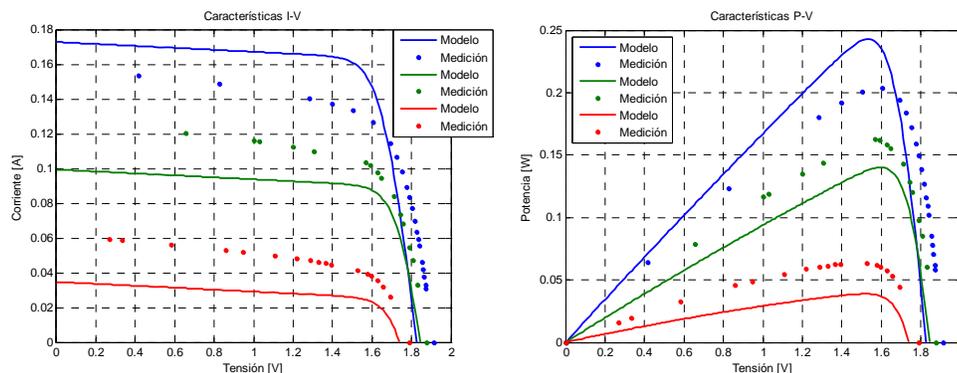


Figura 5.34 Características I-V P-V, mediciones efecto sombra Spectrolab DJ

	Medición	VOC [V]	ISC [A]	VMP [V]	IMP [A]	PMP [W]	Factor de llenado	Eficiencia [%]
Modelo	SS	1,826	0,173	1,538	0,158	0,243	0,77	15,78
Medición		1,913	0,159	1,608	0,127	0,204	0,67	13,23
Diferencia		-0,087	0,014	-0,07	0,031	0,039	0,10	2,56
Modelo	MS	1,843	0,099	1,604	0,087	0,140	0,76	15,84
Medición		1,880	0,120	1,570	0,104	0,162	0,72	18,39
Diferencia		-0,037	-0,021	0,034	-0,016	-0,023	0,04	-2,55
Modelo	TS	1,739	0,035	1,501	0,026	0,039	0,64	14,10
Medición		1,791	0,059	1,526	0,041	0,063	0,60	22,87
Diferencia		-0,052	-0,024	-0,025	-0,015	-0,024	0,05	-8,77

Tabla 5.37 Contraste modelo y mediciones, efecto sombra Spectrolab DJ

Dado que sólo se ha considerado una celda aislada del resto, no es posible determinar el comportamiento ante el efecto sombra de un panel, sino que sólo cómo varía el desempeño de una celda Spectrolab DJ ante distintos sombreados.

Como en este caso sólo se ha medido una celda, se tiene que la eficiencia de conversión es más o menos constante en todas las mediciones, ya que tanto radiación solar incidente como la potencia de salida disminuyen de manera similar. A medida que aumenta el porcentaje de sombreado, se tiene que la diferencia entre la eficiencia medida y modelada aumenta, presumiblemente, debido a que ella ha sido estimada con el modelo y no medida directamente. Durante la realización de las mediciones se observó que el variar la distancia a la cual se realiza el sombreado de la celda, hace que varíe la corriente de salida ante una misma carga de consumo conectada. Esto es debido al hecho de que existe radiación reflejada por los edificios del entorno, en particular, debido al Edificio de Electrotecnologías ubicado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que corresponde al lugar en donde se han realizado las mediciones.

Para la tensión V_{OC} , se tiene que mientras mayor es el porcentaje de sombreado de la celda considerada, la tensión V_{OC} disminuye, lo que se aprecia muy claramente en la medición *TS*. Las diferencias entregadas por el modelo son menores a los 90[mV] en este caso, y como se tiene que la tensión de trabajo de estas celdas es del orden de 2[V], dicha diferencia es aceptable. El modelo subestima en todos los casos V_{OC} .

En cuanto a la corriente I_{SC} , se tiene que la mayor diferencia es del orden de 25[mA], valor tolerable dada la corriente de trabajo de esta celda. Además, dado que no ha sido posible contar con mediciones directas de la radiación solar incidente, su estimación mediante el modelo contribuye a la diferencia observada.

Para esta celda, las diferencias que se producen en las distintas potencias P_{MP} son muy pequeñas, siendo la mayor de ellas 39 [mW].

En el factor de llenado se tienen diferencias considerables, lo que se aprecia en las curvas I-V de la Figura 5.34. En ellas se tiene que la pendiente de la corriente en las mediciones es menor que la pendiente de las curvas correspondientes entregadas por el modelo en la zona ubicada entre 0[V] y 1,5[V] aproximadamente.

En la eficiencia de conversión se tiene la mayor diferencia para la medición TS , en donde la medición indica $\eta_{TS}=22,87[\%]$, lo que supondría que la celda trabaja a una temperatura cercana a los $28[^\circ\text{C}]$, lo que en verdad no sucede. Es posible que una subestimación de la radiación incidente sobre ella sea la causa de esta eficiencia tan elevada. En las otras dos mediciones se tiene que la eficiencia medida y la que entrega el modelo son más cercanas entre sí, aunque se aprecia un error considerable, lo que también es atribuible a una subestimación de la radiación solar incidente.

5.7 Comentarios y análisis

En base a los tres modelos implementados, correspondientes a denominados “Modelo celda fotovoltaica”, “Modelo panel de celdas fotovoltaicas” y “Modelación de la temperatura de una celda solar” se ha desarrollado un modelo (que los agrupa) con el cual es posible determinar el comportamiento eléctrico de un panel de celdas fotovoltaicas, incluso antes de que éste se instale y/o construya, lo cual es determinante para diseñar y construir un sistema fotovoltaico adecuado basado en las necesidades requeridas. El modelo permite estimar con la resolución que se necesite (desde tensiones de ordenes menores que los microVolts hasta tensiones del orden de los Volts o más) el comportamiento eléctrico, correspondiente a las curvas I-V y P-V, además del desempeño de un panel fotovoltaico

Además del desarrollo del modelo principal, se ha propuesto y utilizado una metodología para determinar los distintos parámetros necesarios para implementar el modelo en cuestión, en base a la realización de simples mediciones eléctricas sobre las celdas consideradas. Es más, para un mismo tipo de celdas es posible determinar distintos subtipos de celdas en base al estado de ellas, como se ha realizado con las celdas del vehículo solar *Eolian I*.

En el caso de los parámetros físicos definidos para una celda solar, se tiene que ellos, en general varían cuando cambia el comportamiento de la celda, como es el caso de la resistencia serie y resistencia shunt. La metodología propuesta sugiere, por simplicidad, el utilizar parámetros fijos calculados bajo condiciones de operación normal, y no de laboratorio, para que así el modelo entregue una mejor aproximación del comportamiento real de la celda.

El modelo desarrollado ha sido implementado para dos tipos distintos de celdas solares (correspondientes a las utilizadas sobre el vehículo solar *Eolian I*), y para cada uno de estos tipos de celda se ha determinado el desempeño ante la variación de los distintos factores que inciden en el comportamiento de un panel solar (radiación incidente, temperatura de las celdas, tipo de conexión del panel, sombreado), los que han sido contrastados con las mediciones realizadas, teniéndose que el modelo desarrollado se ajusta muy bien a las observaciones realizadas en distintas condiciones y días.

6 Modelación de la superficie del vehículo

Para poder modelar el comportamiento de un panel de celdas solares ubicado sobre una superficie no plana, es necesario conocer la forma de dicha superficie y cómo están dispuestas las celdas sobre ella, para así determinar tanto la inclinación como el azimut de cada celda solar que conforma el panel. Para validar y estudiar el desempeño del modelo de paneles solares implementado, en este capítulo se modelará la forma del vehículo solar Eolian I, de manera tal que ella pueda ser utilizada para conocer la disposición espacial de las celdas que lo conforman. Eolian I será la plataforma de pruebas utilizada para analizar el desempeño del modelo de paneles solares y radiación solar desarrollados en este trabajo.

La superficie de Eolian I fue diseñada en base a un perfil alar Naca66, mientras que la cúpula fue diseñada en base a la forma de la cabina de un planeador. En la Figura 6.1 y Figura 6.2 se presenta lo anterior.



Figura 6.1 Vehículo Eolian I, vista lateral

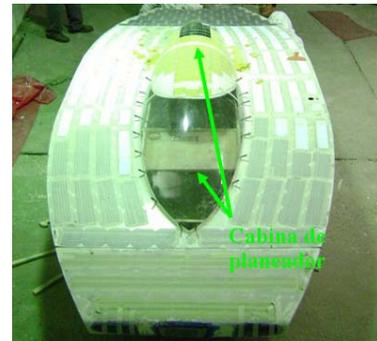


Figura 6.2 Vehículo Eolian I, vista superior

6.1 Procedimiento utilizado e implementación

6.1.1 Discretización del vehículo

Dada la forma del vehículo y la información con la que se cuenta, se ha optado por discretizar su superficie en vez de parametrizarla. Dicha discretización se realiza en base al sistema de cuadernas utilizado para construir el auto, que fue diseñado en el software *Solid Edge*. Cada cuaderna generada en *Solid Edge* es exportada a formato *AutoCAD*. En la construcción y diseño del vehículo se utilizaron 94 cuadernas, separadas cada una por una distancia de 53[mm], desde la punta hasta la cola del vehículo como se aprecia en la Figura 6.3.

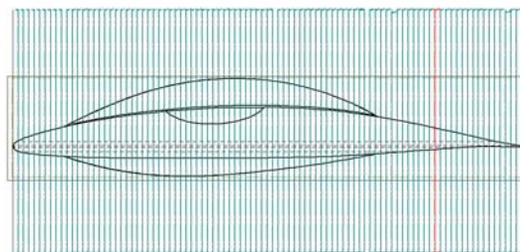


Figura 6.3 Cuadernas de Eolian I, vista lateral

Las cuadernas que definen la forma del auto son de distinto tamaño y forma, lo que hace que cada una de ellas deba ser discretizada por separado para obtener los puntos que la conforman y con ello poder generar un conjunto de puntos en el espacio que indiquen la forma del auto dentro de un sistema de coordenadas. El sistema de coordenadas utilizado es del tipo cartesiano. Las direcciones de los ejes de coordenadas junto con su origen son las indicadas en la Figura 6.4

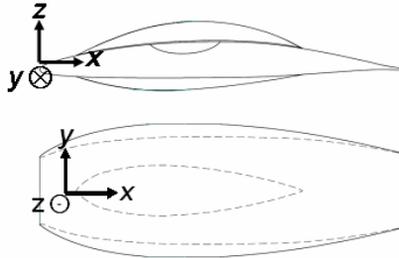


Figura 6.4 Ejes de coordenadas utilizados

Se define como cuaderna 1, llamada *cuaderna A*, a la ubicada en la parte delantera del vehículo. A ella se le asigna una coordenada $x=53$ [mm], y el resto de las cuadernas es numerada en orden secuencial hasta la cola del vehículo, siendo la última de ellas la cuaderna 94, llamada *cuaderna CP*, con una coordenada $x=4.982$ [mm]. La correspondencia entre el número de una cuaderna y su nombre se encuentra en el *Anexo D*.

La coordenada x de cada cuaderna viene dada por la recurrencia (6.1).

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + 53 & i \in [0;93] \\ x_0 &= 53 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Donde:

x_i : coordenada x de la i -ésima cuaderna de Eolian I [mm].

Dentro de las cuadernas de Eolian I se distinguen dos tipos:

- *Cuadernas planas*: son aquéllas que sólo definen el perfil alar Naca66. Van desde la cuaderna 1 a la 9 y desde la 68 a la 94.
- *Cuadernas cúpula*: son aquéllas que definen el perfil alar Naca66 y la cabina del piloto. Van desde la cuaderna 10 a la 67.

Para poder construir el master⁶ del vehículo solar, todas las cuadernas cuentan con un sacado interior por el cual se pasa un perfil cuadrado de hierro que sirve como guía para realizar un ensamblaje alineado de las 94 cuadernas que conforman el master del vehículo. Tomando el punto central superior de dicho espacio como origen de las coordenadas y,z se obtiene una referencia constante para el origen del eje de coordenadas, para las 94 cuadernas.

⁶ El master corresponde a una matriz de igual forma y tamaño que el vehículo, en base a la cual se fabrica el molde con el cual se construye el vehículo.

A partir del origen definido, utilizando el software *AutoCAD 2007*, en las cuadernas cúpula se trazan rayos con una separación angular de $0,5[^\circ]$. La intersección de dichos rayos con la parte superior de la cuaderna genera un conjunto de puntos cuyas coordenadas se obtienen mediante la función *List* de AutoCAD. Dada la simetría de las cuadernas, este proceso sólo se realiza en un lado de cada cuaderna como se aprecia en la Figura 6.5.

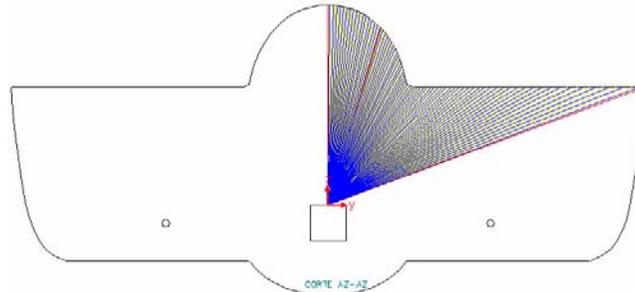


Figura 6.5 Obtención de coordenadas, cuaderna cúpula

En el caso de las cuadernas planas, se realizó el mismo proceso, pero sólo se trazan 2 rayos en cada una de ellas, ya que la altura de cada cuaderna plana es constante. Luego, conociendo el punto central y el punto que define el extremo de cada cuaderna, es posible generar un conjunto de puntos equiespaciados sobre la superficie. En la Figura 6.6 se aprecian los rayos trazados en dos cuadernas planas.

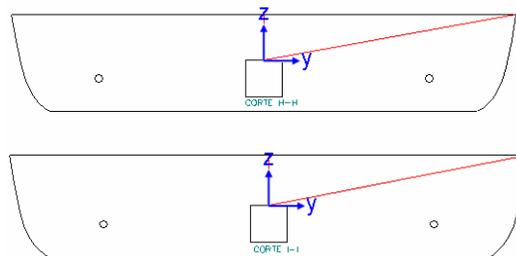


Figura 6.6 Obtención de coordenadas, cuadernas planas

La función *List* de AutoCAD, junto con entregar las coordenadas de los puntos, entrega información que para la discretización de la superficie del vehículo es irrelevante y en un formato que debe ser procesado para poder realizar el manejo numérico de los datos. Un ejemplo del formato de entrega de datos de la función *List* se encuentra en el **Anexo D**. Para poder obtener la información de manera adecuada se ha implementado un algoritmo en *Java* (ver **Anexo A**) que, tomando como entrada cada uno de los archivos generados mediante AutoCAD, obtiene la coordenada z e y de cada punto, además de generar los puntos con coordenada y negativa, para así tener todos los puntos correspondientes a la superficie, almacenando los datos en formato de texto plano. El algoritmo implementado permite obtener los puntos de cada cuaderna cúpula con una resolución de $1[^\circ]$ y $0,5[^\circ]$.

Finalmente se ha utilizado la resolución de $1[^\circ]$, ya que con ella los puntos obtenidos se encuentran separados cada $10[\text{mm}]$ aproximadamente en la mayoría de las cuadernas cúpula que cuentan con celdas. Dicha resolución se considera adecuada para indicar la posición de cada celda sobre la cúpula dado su tamaño.

Una vez generados los datos de los puntos de cada cuaderna, ellos son procesados mediante *Microsoft Office Excel 2003*, realizándose las siguientes operaciones:

- **Ordenamiento de los datos de cada cuaderna:** el algoritmo implementado en *Java* entrega los datos de acuerdo al orden que los entrega la función *List* de AutoCAD. Dicha ordenación fue realizada sobre la coordenada y de los puntos generados.
- **Inclusión de la coordenada x :** en cada archivo formato Excel se agregó dicha coordenada para obtener un conjunto de puntos en el espacio para cada cuaderna. El valor de la coordenada x es el dado por (6.1).
- **Ajuste de la cantidad de puntos:** cada archivo en formato Excel contaba con una cantidad distinta de puntos, los que dependían del ancho de la cuaderna y de la presencia o no de la cúpula en ella. Para facilitar el trabajo posterior, se ha definido una misma cantidad de puntos para todos los archivos, considerándose 169 puntos por cuaderna. Se aprovecha el hecho de que la altura de cada cuaderna no varía en la zona del perfil alar Naca66, con lo que se se pueden agregar o sacar puntos en cada una de ellas sin perder información (se han considerado puntos equidistantes en dicha parte de cada cuaderna).

Una vez obtenidas las versiones finales de cada archivo con los puntos de cada cuaderna, éstas son exportadas a MatLab, en donde finalmente se unen formando una matriz de 15.886x3 elementos, donde cada fila corresponde a un punto de la superficie del auto y las columnas a las coordenadas (x,y,z) de cada punto.

Con los 15.886 puntos generados se cuenta con una discretización de la superficie de Eolian I. El resultado de este proceso se aprecia gráficamente entre la Figura 6.7 y la Figura 6.10.

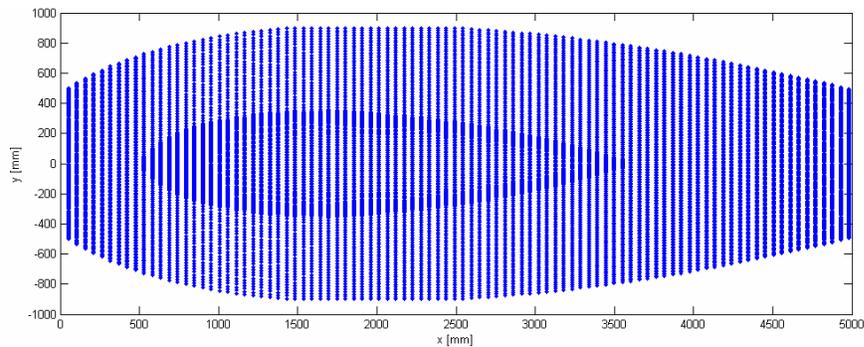


Figura 6.7 Proyección puntos discretización Eolian I, plano x-y

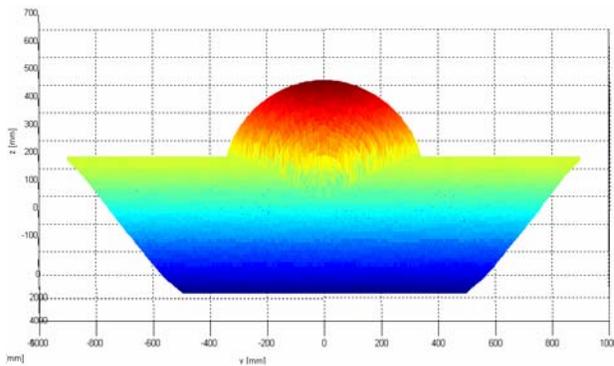


Figura 6.8 Modelo discretizado Eolian I, parte posterior

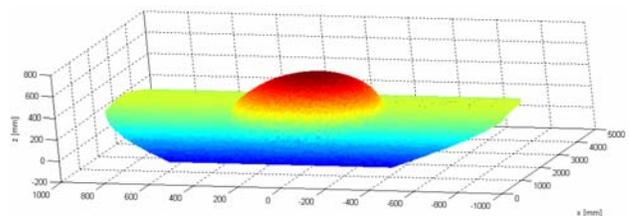


Figura 6.9 Modelo discretizado Eolian I, parte delantera

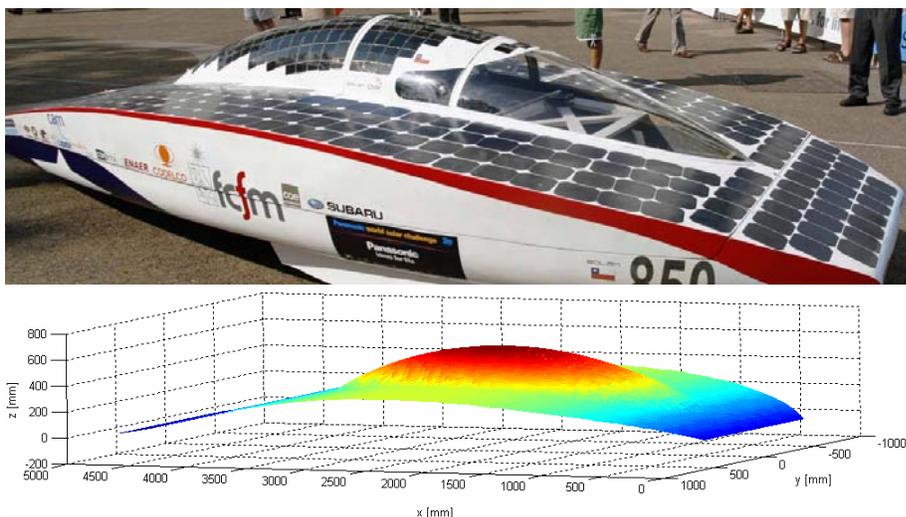


Figura 6.10 Comparación Eolian I real (arriba) y modelo discretizado Eolian I (abajo)

6.1.2 Localización de celdas sobre el vehículo

Una vez determinado el conjunto de puntos que define la superficie de Eolian I, es necesario determinar el subconjunto de puntos que mejor representa la posición de cada celda solar sobre el vehículo. En la Figura 6.11 y la Figura 6.12 se aprecia la disposición de las celdas solares SunPower A300 y Spectrolab DJ sobre el vehículo respectivamente. Las celdas de un mismo color conforman en interconexión un mismo panel.

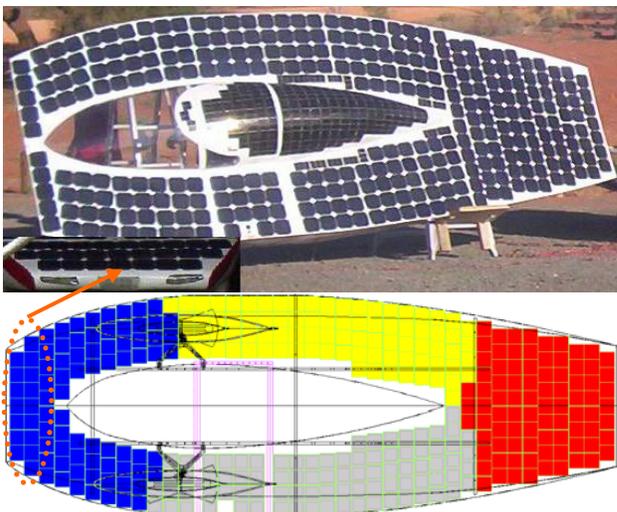


Figura 6.11 Celdas SunPower A300 Eolian I, disposición y real y esquemático

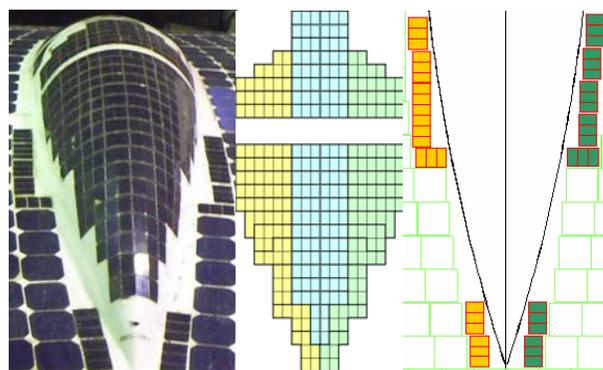


Figura 6.12 Celdas Spectrolab DJ Eolian I, disposición y real y esquemático

Eolian I cuenta con 688 celdas solares en total, las que conforman los 9 paneles solares independientes del vehículo. Ellas se encuentran dispuestas sobre el perfil alar Naca66 y sobre la cúpula de acuerdo a la Tabla 6.1

	SunPower A300	Spectrolab DJ	
Ubicación	Perfil Naca66	Perfil Naca66	Cúpula
Cantidad	340	42	306

Tabla 6.1 Localización de celdas solares sobre Eolian I

En el caso de las celdas ubicadas sobre el perfil Naca66, para encontrar los puntos representativos de cada celda, se superpone mediante AutoCad el conjunto de cuadernas sobre el conjunto de celdas ubicado sobre el perfil Naca66 de acuerdo a lo mostrado en la Figura 6.13.

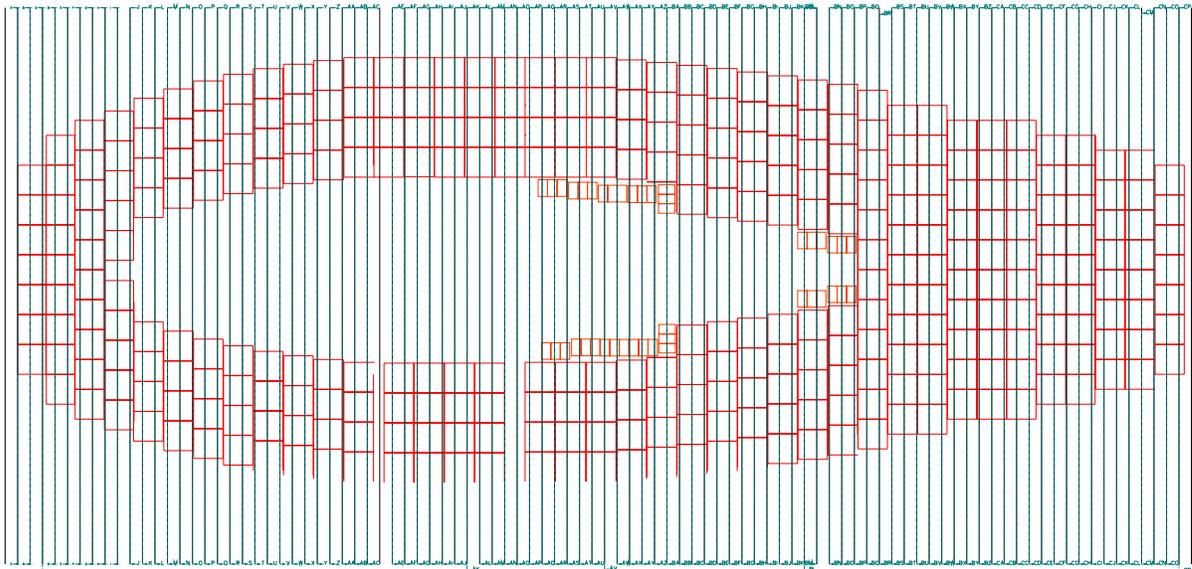


Figura 6.13 Superposición celdas en perfil Naca66 y conjunto de cuadernas

Mediante la superposición realizada se determina para todas las celdas sobre qué cuadernas se encuentran localizadas. En general se ha encontrado que una celda solar se localiza sobre dos cuadernas del vehículo. Dada la disposición de las celdas A300, se ha tomado como supuesto que las celdas de una fila se encuentran alineadas, como lo están en el esquemático de la Figura 6.11. Dicho supuesto se ha corroborado mediante mediciones sobre Eolian I, y se ha verificado que en todas las filas de celdas, por lo menos un 80% de ellas se encuentran alineadas, por lo que es válido aginarles a las celdas de una misma fila, el mismo conjunto de cuadernas. Así, determinando los puntos representativos de una celda en cada fila, se puede obtener el azimut y la inclinación de todas las celdas de dicha fila.

Dado que la altura z de cada cuaderna es constante sobre el perfil Naca66, se tiene que los vectores normales de las celdas ubicadas sobre el perfil Naca66 siempre apuntan hacia la punta o cola del auto, es decir, las celdas sólo se encuentran inclinadas hacia el principio o el final del vehículo.

Luego, considerando 3 puntos de una celda ubicados sobre las cuadernas determinadas, es posible obtener la pendiente y el azimut de cada celda solar. Se define como dirección norte la punta del auto, y se utiliza la convención de la Figura 4.1 para determinar el azimut.

El cálculo es implementado en el software *MATLAB Version 7.1.0 (R14) Service Pack* (ver *Anexo A*). El algoritmo de cálculo recibe como entrada la primera cuaderna donde se encuentra una celda, y sobre cuántas cuadernas dicha celda se encuentra. Con esa información, el algoritmo determina los 3 puntos (de los 15.886) correspondientes y con ellos se calcula tanto el azimut como la pendiente de la celda. La pendiente y el azimut de cada celda ubicada en el perfil Naca66 se resume gráficamente en la Figura 6.14 y la Figura 6.15 respectivamente.

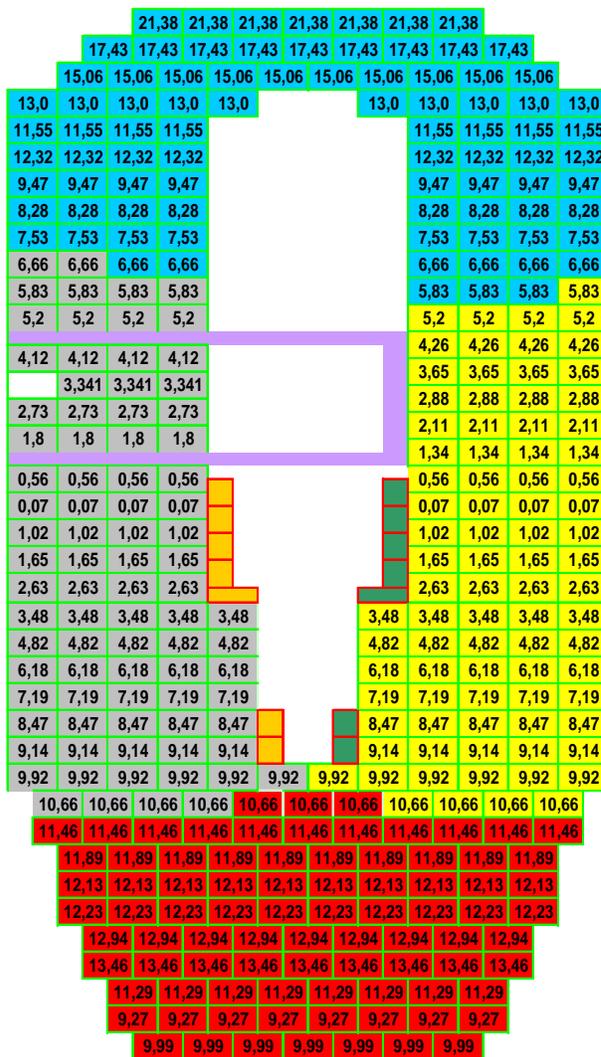


Figura 6.14 Pendientes celdas A300 sobre perfil Naca66 Eolian I

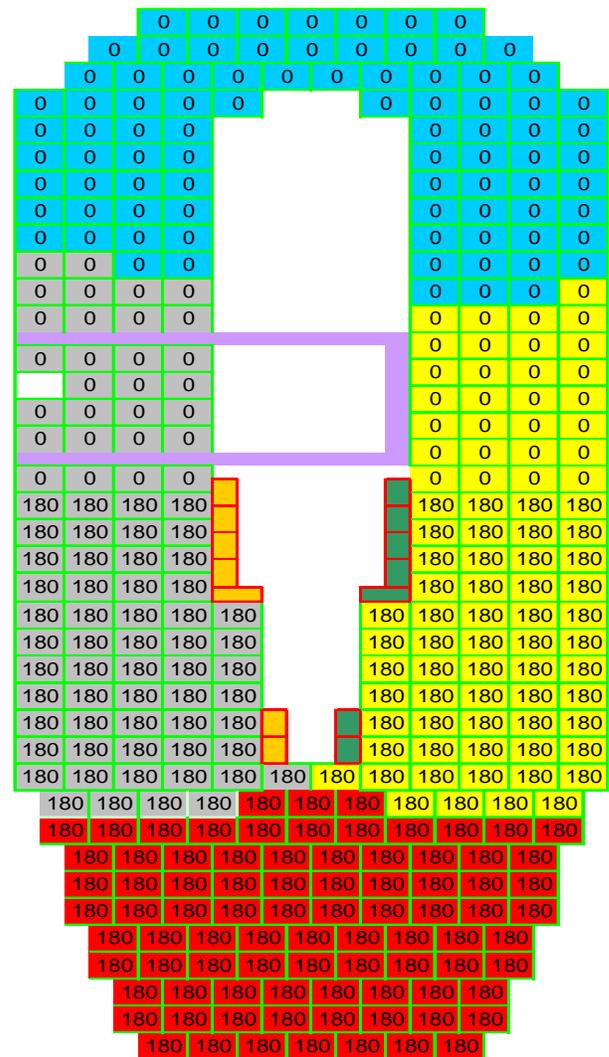


Figura 6.15 Azimuts celdas A300 sobre perfil Naca66 Eolian I

En la Figura 6.14 y la Figura 6.15 se aprecian las celdas Spectrolab DJ ubicadas sobre el perfil Naca66 (en amarillo oscuro y verde). En dichas figuras, cada rectángulo representa 3 celdas Spectrolab DJ. Se considera que las celdas de cada conjunto tienen la misma pendiente y azimut, correspondiendo sus valores a los valores de las pendientes y azimuts de las celdas SunPower A300 contiguas.

Para determinar la posición de las celdas ubicadas sobre la cúpula de Eolian I se realiza un proceso parecido al descrito para las celdas sobre el perfil Naca66. En este caso, se superponen mediante AutoCad el conjunto de cuadernas sobre la vista lateral de Eolian I como se aprecia en la Figura 6.16. En dicha figura, mediante AutoCAD 2007, se dibuja el lado interno de las celdas centrales que pasan por la cresta de la cúpula (en rojo). A través de dicha construcción, se determina la posición del lado interno de las celdas mencionadas, y al igual que en el caso de las celdas ubicadas en el perfil Naca66, se determinan las cuadernas representativas, pero sólo para el lado interno de cada celda, ya que, a diferencia de las celdas sobre el perfil Naca66, las celdas Spectrolab DJ bajan por la cúpula en una fila que no siempre está alineada con las cuadernas, en especial en la parte trasera de la cúpula (ver Figura 6.17)

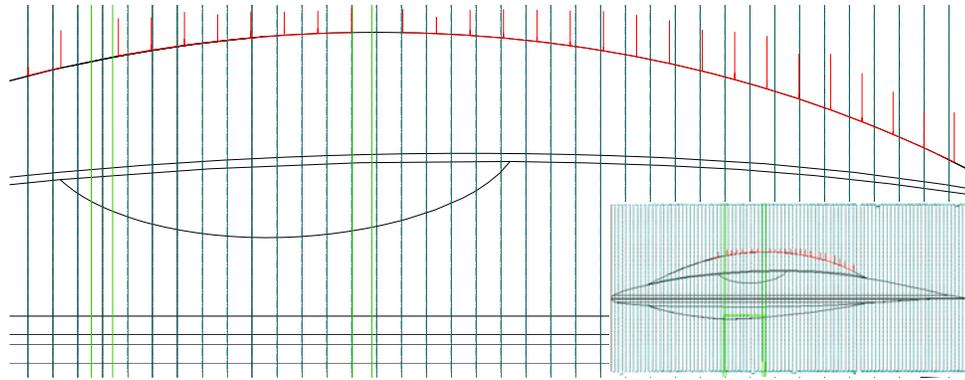


Figura 6.16 Superposición vista lateral Eolian I y conjunto de cuadernas

Para determinar los puntos representativos del resto de las celdas sobre la cúpula, se trazan sobre Eolian I los triángulos que se aprecian en la Figura 6.17, cuyas medidas se utilizan para determinar el ángulo superior de cada uno de ellos. Con dicho ángulo, se calcula el valor de la proyección de los lados de la celda que descienden por la cúpula (los de menor medida) para todas las celdas de una misma fila, teniéndose que las aristas proyectadas de las celdas se encuentran paralelas al conjunto de cuadernas. Se realiza una traslación de las proyecciones hasta la cuaderna más cercana, la que se considera como la determinada inicialmente mediante la Figura 6.16 para cada fila de celdas. El ángulo de proyección considerado para cada fila de celdas corresponde al del triángulo, cuyas aristas superiores están contiguas a la celda inferior de dicha fila. En el caso de las celdas que tienen aristas contiguas de distintos triángulos, el ángulo considerado corresponde al del triángulo más cercano al fin de la cúpula.

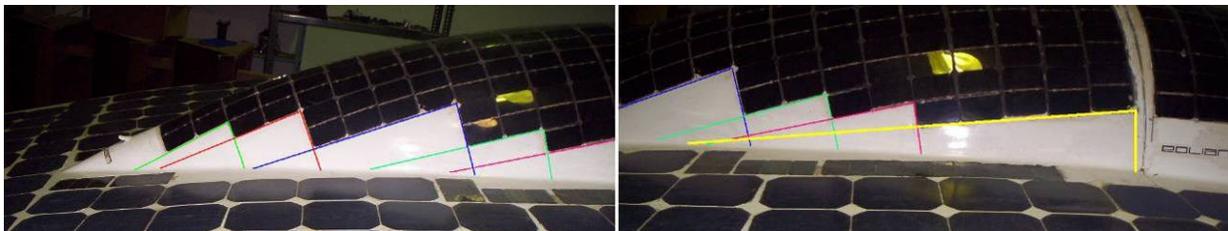


Figura 6.17 Celdas Spectrolab DJ, parte trasera cúpula Eolian I, vista lateral

El proceso no se realiza para las celdas que se encuentran sobre la puerta de Eolian I, y las 5 filas de celdas inmediatamente posteriores a la puerta (triángulo amarillo en Figura 6.17) ya que el ángulo de proyección es muy cercano a 90° , por lo que se puede considerar como una buena aproximación que dichas celdas bajan de forma paralela al conjunto de cuadernas.

Una vez realizado el proceso anterior sobre las 120 celdas posteriores de la cúpula de Eolian I, para cada cuaderna determinada, se encuentra el conjunto de puntos que mejor representa la posición de las celdas sobre la discretización de Eolian I realizada. Lo anterior se realiza mediante AutoCAD 2007, bajando por la superficie de cada cuaderna cúpula, que contiene celdas, desde el punto central (coordenada $y=0$) hacia el lado como se aprecia en la Figura 6.18. El valor de avance de cada celda se consideró como la proyección determinada anteriormente.

7 Modelo Integrado Celda-Superficie-Radiación

En base a la metodología de trabajo propuesta y explicada en el capítulo 3, en este capítulo se utilizan los tres grandes modelos desarrollados, integrándolos en un gran modelo que es el que finalmente entrega el comportamiento de un panel solar cualquiera formado por un tipo específico de celdas solares y de forma irregular. Se utilizan los nueve paneles independientes del vehículo solar Eolian I como el “panel cualquiera” mencionado, para así estudiar tanto el modelo como analizar el comportamiento de dichos nueve paneles vistos como como un gran panel solar formado por celdas fotovoltaicas.

7.1 Resultados del modelo integrado

Se define el ángulo denominado *Azimuth Auto*, abreviado Az_{Auto} , como el ángulo formado entre la dirección norte y el vector que pasa por el centro de un vehículo, teniendo su origen en la parte trasera del vehículo y su final en la parte delantera de éste. Este ángulo se define con la misma convención utilizada para el azimut de un plano (ver Figura 4.1). El ángulo Az_{Auto} indica el giro del vehículo respecto de la dirección norte, como se aprecia en la Figura 7.1.

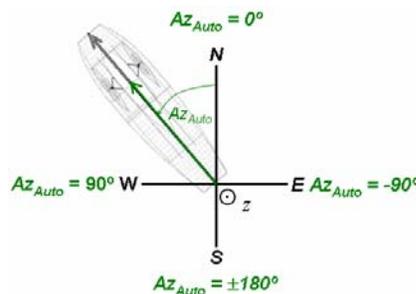


Figura 7.1 Definición ángulo *azimut auto* Az_{Auto}

Las simulaciones llevadas a cabo, se han realizado para el día 27 de octubre de 2007, que corresponde al día juliano $n=300$, suponiendo condiciones de cielo despejado a lo largo de todo el día en la ciudad de Santiago de Chile. La temperatura ambiente de dicho día, en base a la cual el modelo térmico calcula la temperatura de funcionamiento de cada una de las celdas de los paneles del vehículo Solar Eolian I, corresponde a la medida por el DGF en su estación. La simulación de la radiación solar horizontal y los datos de temperatura de dicho día se aprecian en la Figura 7.2.

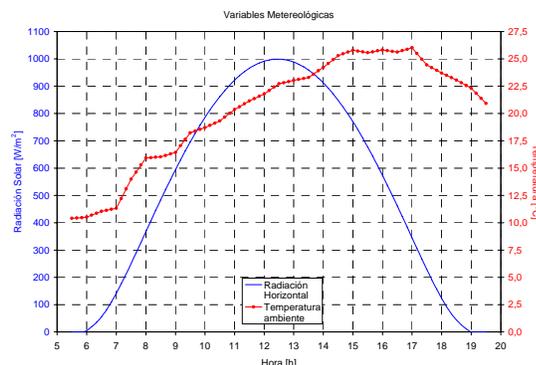


Figura 7.2 Radiación solar horizontal y temperatura, 27 de octubre de 2007, Santiago de Chile

El detalle de la temperatura y de la radiación solar incidente de las celdas de los paneles solares de Eolian I se encuentra disponible en el *Anexo C*.

En la simulación del comportamiento del vehículo a lo largo de del día elegido, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones.

- Se toma como supuesto que los 9 paneles solares de Eolian I no presentan daños. En el caso de los paneles solares formados por las celdas SunPower A300, se han considerado los parámetros determinados en la sección 5.4.2, mientras que para los paneles conformados por celdas Spectrolab DJ se han considerado los parámetros determinados en la sección 5.4.4.
- Se ha supuesto que la altura del horizonte del lugar es de cero grados, con lo que el amanecer se adelanta y el atardecer se atrasa respecto de la hora verdadera en que ocurre cada uno de ellos.
- La simulación se ha realizado entre las 05:30 a.m. y 07:30 p.m. de dicho día, sin considerar el cambio de hora que se aplica en Santiago de Chile para los meses de verano.
- Se ha incluido la resistencia de los cables que interconectan las celdas solares y los paneles (el detalle se encuentra en *Anexo D*).
- El paso temporal de cálculo de todas las variables es de 10 minutos.
- Los datos de temperatura proporcionados por el DGF se encuentran medidos cada 30 minutos. Para generar datos de temperatura cada 10 minutos se ha llevado a cabo una interpolación lineal, generando 2 datos de temperatura adicionales entre cada temperatura medida por el DGF.
- La resolución de tensión utilizada para simular tanto las celdas SunPower A300 de Eolian I como las celdas Spectrolab DJ de control corresponde a 25[mV].
- El auto solar Eolian I se ha orientado hacia el sur, es decir, se ha supuesto $A_{z_{Auto}}=180^\circ$. La elección de esta orientación se debe a que el recorrido que se realiza en el World Solar Challenge va de norte a sur.
- Desde la Figura 7.3 hasta la Figura 7.7 se presentan las curvas para las variables indicadas en cada una de ellas. En el lado izquierdo (de dichas figuras) se presenta el comportamiento de los paneles SunPower A300 y en el lado derecho, el de los paneles Spectrolab DJ. Además, en cada uno de los gráficos se muestra el desempeño de un panel plano de referencia de igual tamaño que los paneles “irregulares” de Eolian I.
- En la tabla asociada a cada gráfico se presentan los valores promedios, máximos⁷, y los correspondientes al medio día solar, momento en el cual la radiación solar horizontal incidente es máxima, de las respectivas variables.

⁷ Valores mínimos en el caso del factor de desalineación.

7.1.1 Curvas de máxima potencia diaria

En la Figura 7.3 se aprecia la curva de máxima potencia diaria para cada uno de los paneles solares de Eolian I.

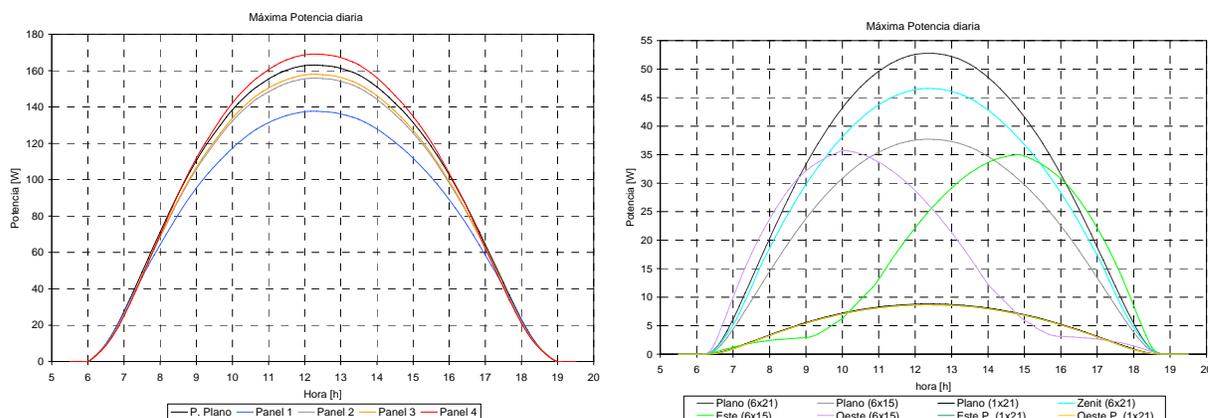


Figura 7.3 Máxima potencia diaria, paneles Eolian I

En la Tabla 7.1, junto con las potencias correspondientes para cada panel, se tiene la energía generada por cada panel, además de la energía perdida (en rojo) respecto del panel plano de referencia respectivo; en el caso de tenerse una mayor cantidad de energía generada, ésta se presenta en color azul.

	Potencia promedio [W]	Potencia máxima [W]	Potencia 12:00 t.s. [W]	Energía [Wh]	Δ Energía [Wh]	Δ Energía [%]
Panel 1	85,141	137,651	137,475	1.121,03	-180,38	-13,86
Panel 2	94,444	155,860	155,662	1.243,51	-57,90	-4,45
Panel 3	95,484	157,987	157,792	1.257,20	-44,21	-3,40
Panel 4	100,661	169,090	168,869	1.325,36	+23,95	+1,84
Panel Plano	98,841	163,030	162,809	1.301,41	0,00	0,00
Plano (1x21)	5,097	8,795	8,790	67,12	0,00	0,00
Plano (6x21)	30,584	52,772	52,739	402,69	0,00	0,00
Plano (6x15)	21,846	37,694	37,670	287,64	0,00	0,00
Este P. (1x21)	4,987	8,653	8,648	65,66	-1,46	-2,17
Oeste P. (1x21)	4,986	8,650	8,645	65,65	-1,47	-2,19
Zenit (6x21)	27,139	46,591	46,567	357,34	-45,35	-11,26
Este (6x15)	15,717	34,992	25,935	206,94	-80,70	-28,06
Oeste (6x15)	15,970	35,669	25,262	210,27	-77,37	-26,90

Tabla 7.1 Resumen desempeño energético paneles Eolian I

De acuerdo a la forma de las curvas de potencia diaria de la Figura 7.3 y los datos de la Tabla 7.1, se aprecia que los paneles SunPower producen una menor energía durante el día respecto de un panel plano, excepto en el caso del *Panel 4*, lo que se debe al hecho de que todas las celdas de este panel tienen un azimut de cero grados en la situación considerada, es decir, orientadas hacia el norte, lo que hace que reciban una radiación solar un poco mayor que las celdas que están orientadas hacia el sur con azimut de 180 grados. Caen en esta categoría aproximadamente la mitad de las celdas del *Panel 2* y *Panel 3* y todas las celdas del *Panel 1*, lo

que hace que este último sea el que genera menos potencia, y por lo tanto una menor energía durante el día.

En la Figura 7.3 se aprecia una leve diferencia en la curva de potencia y la energía diaria generada entre el Panel 2 y el Panel 3, la que se debe principalmente al cableado más largo utilizado en las conexiones del *Panel 2*.

En el caso de los paneles Spectrolab DJ, se tiene que todos los paneles producen una menor energía respecto de un panel plano de iguales dimensiones. Este efecto se acrecenta en los paneles *Este* y *Oeste*, debido principalmente a la gran variación en la inclinación y azimut de sus celdas, las que en la parte delantera del vehículo son casi verticales, mientras que en la parte trasera del vehículo corresponden a celdas mucho más horizontales, haciendo que la variación de radiación solar entre ellas sea más grande. Además debe notarse que sólo en estos dos paneles, de los nueve del vehículo, la curva de potencia no presenta simetría en torno al mediodía solar ya que, dada la orientación del auto considerada, estos dos paneles no reciben una radiación simétrica antes y después del medio día solar, teniéndose que para horas cercanas al atardecer y amanecer estos paneles sólo reciben radiación difusa, lo que hace que la potencia generada en dichos intervalos sea menor. Si se hubiera considerado otro ángulo $A_{z,Auto}$, las curvas no estarían centradas respecto del mediodía solar, pero dicho efecto sería mucho menos notorio debido a que los otros siete paneles del vehículo son mucho más horizontales y planos que los paneles *Este* y *Oeste*.

Dado que la mayor temperatura de las celdas, en general, se produce en el momento del mediodía solar, se tiene que la potencia máxima no coincide con el mediodía solar, sino que se da 10 minutos antes de dicho momento de acuerdo a las simulaciones realizadas, debido a la mayor caída de tensión que contribuye contra el alza de corriente que se produce (al comparar sólo esos dos puntos).

7.1.2 Curvas de tensión diaria

En la Figura 7.4 se presenta tanto la tensión de máxima potencia diaria V_{MP} (líneas continuas), como la tensión de circuito abierto diaria V_{OC} (líneas segmentadas) para los paneles de Eolian I.

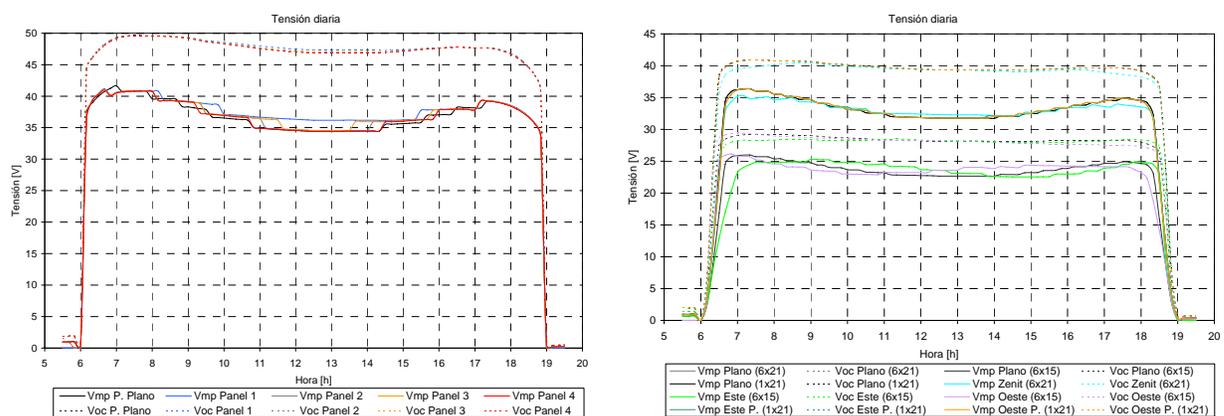


Figura 7.4 Tensiones V_{MP} y V_{OC} diarias, paneles Eolian I

En la Tabla 7.2 se resumen las tensiones V_{MP} y V_{OC} indicadas, a lo largo del día de simulación.

	V_{MP} promedio [V]	V_{OC} promedio [V]	V_{MP} máxima [V]	V_{OC} máxima [V]	V_{MP} 12:00 t.s. [V]	V_{OC} 12:00 t.s. [V]
Panel 1	36,839	46,527	41,151	49,599	36,192	47,328
Panel 2	36,281	46,380	41,047	49,612	34,530	46,961
Panel 3	36,403	46,378	41,045	49,612	34,526	46,956
Panel 4	36,143	46,314	40,964	49,604	34,419	46,810
Panel Plano	36,079	46,386	41,645	49,637	34,429	46,948
Plano (1x21)	31,049	37,539	36,385	40,886	31,760	39,340
Plano (6x21)	31,049	37,539	36,385	40,886	31,760	39,340
Plano (6x15)	22,178	26,814	25,989	29,205	22,686	28,100
Este P. (1x21)	31,036	37,517	36,360	40,866	31,758	39,337
Oeste P. (1x21)	31,027	37,517	36,360	40,866	31,758	39,337
Zenit (6x21)	30,859	37,104	35,289	40,486	32,324	39,327
Este (6x15)	22,107	26,602	25,293	28,506	23,566	28,201
Oeste (6x15)	22,319	26,734	26,129	29,448	23,576	28,214

Tabla 7.2 Resumen desempeño de tensión paneles Eolian I

Se tiene, de acuerdo a la teoría, que la menor tensión se da para el panel más caliente, que de acuerdo al modelo térmico implementado corresponde al que recibe mayor radiación solar, que en el caso de los paneles SunPower A300 corresponde al *Panel 4*, y por el contrario el panel menos caliente, que recibe menos radiación, es el que presenta una tensión levemente mayor, siendo el *Panel 1* en el caso de los paneles SunPower A300. Las mayores tensiones para los paneles SunPower se dan entre las 6:30 a.m. y 7:00 a.m. aproximadamente, momento en el cual ya se cuenta con una radiación suficiente para que las celdas alcancen un adecuado nivel de tensión, pero insuficiente para provocar todavía una baja de tensión por alza de temperatura. En general, se observa una diferencia entre V_{MP} y V_{OC} del orden de 10[V] para los paneles SunPower A300 en promedio, teniéndose que las mayores diferencias entre estas variables se dan para altos niveles de radiación debido a la temperatura de las celdas. En cada unas de las curvas diarias, V_{MP} se presenta en forma escalonada, lo que se debe a que el algoritmo que calcula la máxima potencia determina que es más conveniente aumentar la corriente y bajar la tensión de trabajo en ciertos intervalos, y en otros lo contrario. Además, se aprecia que para una radiación solar incidente nula (antes del amanecer y el después del atardecer en la simulación realizada), el método implementado no se comporta de acuerdo a lo esperado, indicando la presencia de una tensión generada por las celdas que en la realidad no existe. El modelo funciona bien para niveles de radiación de por los menos $5[W/m^2]$ tanto en el caso de las celdas SunPower A300 como en el de las Spectrolab DJ.

En el caso de los paneles Spectrolab DJ, se tiene un comportamiento de iguales características al descrito anteriormente. La diferencia de tensión que se produce entre las curvas respectivas de tensión V_{MP} y tensión V_{OC} , es menor que la de los paneles SunPower A300, fluctuando entre 4 y 6 Volts para los valores promedio. Además se aprecia que la curva de tensión V_{MP} para los paneles *Este* y *Oeste*, presenta valores mayores a los de la curva V_{MP} para un panel plano de las mismas dimensiones, debido a que en general ellos reciben una radiación menor que la del panel horizontal, excepto cuando el Sol se encuentra a bajas alturas sobre el

horizonte (recordar que estos dos paneles presentan celdas dispuestas de una manera “más vertical sobre el auto”). El fenómeno de la presencia de una forma escalonada en las curvas de tensión V_{MP} también se da, pero siendo menos notorio, lo que se atribuye a que el alza, o baja, en corriente que calcula el modelo es de menor magnitud ya que los niveles de corriente son también menores. Además, se aprecia que las distintas y muy variadas orientaciones e inclinaciones de las celdas de estos paneles no hacen que varíen en forma muy apreciable los valores de las curvas V_{MP} y V_{OC} .

7.1.3 Curvas de corriente diaria

De manera análoga a lo realizado en la Figura 7.4, en la Figura 7.5 se presentan tanto la corriente de máxima potencia diaria I_{MP} (líneas continuas), como la corriente de corto circuito diaria I_{SC} (líneas segmentadas) para los paneles de Eolian I.

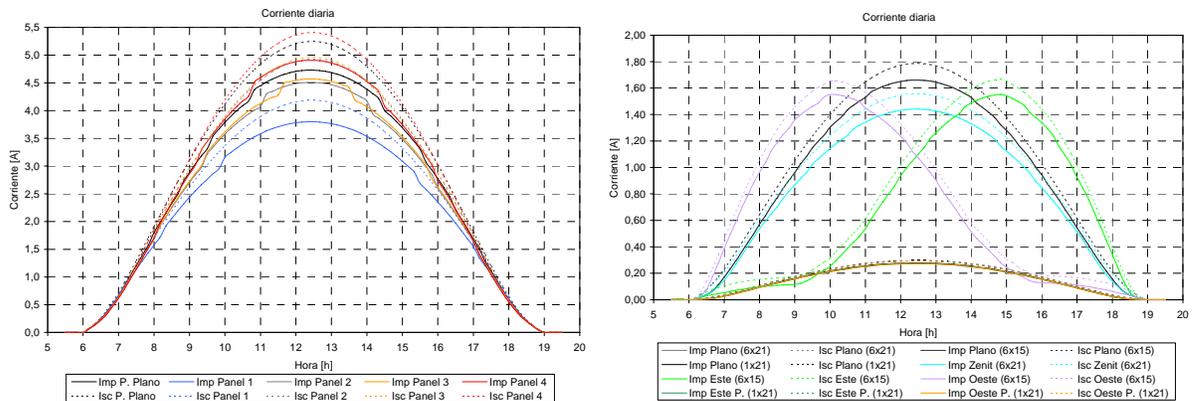


Figura 7.5 Corrientes I_{MP} e I_{SC} diarias, paneles Eolian I

En la Tabla 7.3 se resumen las corrientes I_{MP} e I_{SC} indicadas, durante el transcurso del día considerado.

	I_{MP} promedio [A]	I_{SC} promedio [A]	I_{MP} máxima [A]	I_{SC} máxima [A]	I_{MP} 12:00 t.s. [A]	I_{SC} 12:00 t.s. [A]
Panel 1	2,284	2,482	3,799	4,188	3,799	4,188
Panel 2	2,595	2,827	4,508	4,926	4,508	4,926
Panel 3	2,610	2,842	4,570	4,960	4,570	4,960
Panel 4	2,784	3,035	4,907	5,407	4,906	5,407
Panel Plano	2,739	2,997	4,730	5,248	4,729	5,248
Plano (1x21)	0,155	0,169	0,277	0,298	0,277	0,298
Plano (6x21)	0,933	1,017	1,661	1,787	1,661	1,787
Plano (6x15)	0,933	1,017	1,661	1,787	1,661	1,787
Este P. (1x21)	0,152	0,166	0,272	0,292	0,272	0,292
Oeste P. (1x21)	0,152	0,166	0,272	0,292	0,272	0,292
Zenit (6x21)	0,824	0,905	1,441	1,557	1,441	1,557
Este (6x15)	0,674	0,748	1,553	1,667	1,101	1,200
Oeste (6x15)	0,675	0,748	1,551	1,655	1,072	1,168

Tabla 7.3 Resumen desempeño de corriente paneles Eolian I

En el caso de la corriente de los paneles, se aprecia en la Figura 7.5 una combinación de los efectos descritos para las curvas diarias de tensión y máxima potencia. Dada la forma aproximadamente plana de las curvas de tensión V_{MP} y V_{OC} , se tiene que la forma de la curva de máxima potencia diaria queda determinada principalmente por la forma de las curvas de corriente I_{SC} , las que dan la tendencia de la forma de las curvas I_{MP} . Dado que la corriente que entregan las celdas de los paneles es proporcional a la radiación que incide sobre ellas, se tiene la similitud entre las formas de estas curvas, teniéndose, contrario al caso de la tensión, que los paneles con mayor radiación entregan una mayor corriente. La corriente entregada por los paneles de Eolian I es máxima en el mediodía solar, que es donde incide la mayor radiación sobre los paneles, excepto para los paneles Este y Oeste que dada su orientación no reciben la mayor radiación en el mediodía solar, sino que lo hacen en torno a las 02:45 p.m. y 10:00 a.m. respectivamente.

La diferencia promedio entre las corrientes I_{MP} e I_{SC} de los paneles está relacionada con la corriente de trabajo de los paneles, teniéndose que para los paneles SunPower ésta toma valores entre 200[mA] (*Panel 1*) y 250[mA] (*Panel 4*), y en el caso de los paneles Spectrolab DJ la diferencia considerada toma valores entre 15[mA] y 75[mA], teniéndose este último valor para el panel *Zenit*, que es el que entrega la mayor corriente de los paneles Spectrolab DJ.

De una manera similar a lo que sucede con la tensión V_{MP} , se presenta el fenómeno de escalonado en las curvas I_{MP} , dado por la determinación del punto de máximo potencia que estima el modelo, teniéndose que cuando V_{MP} sube, I_{MP} decae, y viceversa para los nueve paneles del vehículo. Nuevamente este fenómeno es más notorio en los paneles SunPower A300 que en los paneles Spectrolab DJ.

A diferencia de lo que ocurre con las tensiones entregadas por el modelo, se tiene que en el caso de las corrientes I_{MP} e I_{SC} , para una radiación solar incidente nula el modelo entrega correctamente una corriente nula, lo que hace que la potencia P_{MP} diaria de los paneles quede bien modelada pese al error de cálculo que se produce en las tensiones V_{MP} y V_{OC} .

7.1.4 Curva diaria factor de llenado

En la Figura 7.6 se aprecia el factor de llenado de cada panel de Eolian I. En este caso, para las celdas Spectrolab DJ sólo se tiene un factor de llenado de referencia, ya que en el caso de un panel plano, cuyas celdas reciben la misma radiación y se encuentran a la misma temperatura, que es el supuesto considerado, este factor no varía (se tiene que lo mismo sucede con la eficiencia y el factor de desalineación).

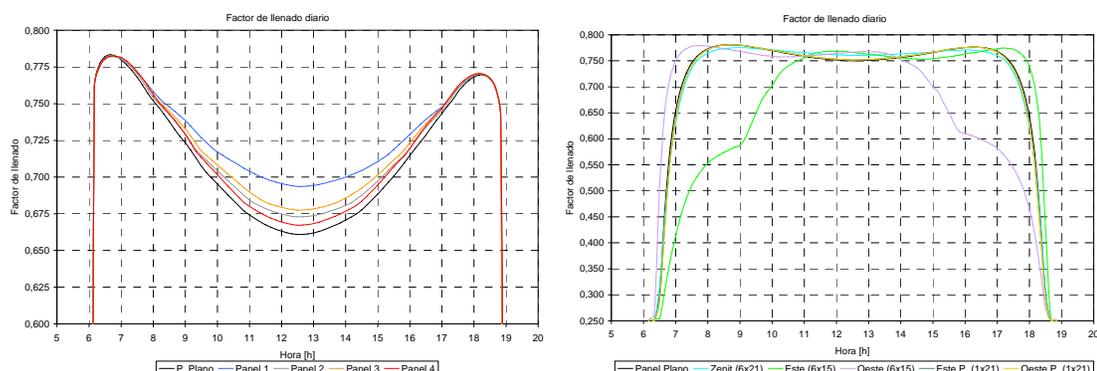


Figura 7.6 Factor de llenado diario paneles Eolian I

En la Tabla 7.4 se presentan los distintos indicadores de factores de llenado considerados.

	Factor de llenado promedio	Factor de llenado máximo	Factor de llenado 12:00 t.s.
Panel 1	0,712	0,782	0,694
Panel 2	0,702	0,782	0,673
Panel 3	0,705	0,782	0,678
Panel 4	0,704	0,782	0,667
Panel Plano	0,700	0,783	0,661
Plano (1x21)	0,689	0,781	0,750
Plano (6x21)	0,689	0,781	0,750
Plano (6x15)	0,689	0,781	0,750
Este P. (1x21)	0,686	0,781	0,752
Oeste P. (1x21)	0,686	0,781	0,752
Zenit (6x21)	0,687	0,776	0,760
Este (6x15)	0,643	0,774	0,766
Oeste (6x15)	0,656	0,779	0,767

Tabla 7.4 Resumen factor de llenado paneles Eolian I

En el caso de los paneles SunPower A300 se observa que mientras más potencia entrega un determinado panel, su factor de llenado es menor. Esto se debe a que la diferencia entre V_{MP} y V_{OC} por un lado, y entre I_{MP} e I_{SC} por otro se acrecenta cuando la potencia entregada por lo paneles es mayor, en especial cuando sobre las celdas incide una gran cantidad de radiación solar (ver secciones 7.1.2 y 7.1.3), haciendo que el cociente que define el factor de llenado disminuya. Además, el factor de llenado promedio para cada panel, es muy similar, situándose entre 0,7 y 0,71. En base a la Figura 7.6 se aprecia que el factor de llenado de cada panel presenta una tendencia similar a la de la curva de tensión V_{OC} , en donde para mayores valores de temperatura se produce una baja en su factor de llenado. Cabe notar que ante el alza de temperatura de una celda, el factor de llenado de ésta se reduce, teniéndose que dicho efecto también se da para el caso de un panel formado por este tipo de celdas.

Para los paneles Spectrolab DJ se observa un comportamiento similar al descrito para los Paneles SunPower A300, pero observándose una diferencia apreciable en las formas de las curvas para los paneles *Este* y *Oeste* debido a su orientación, la que hace que estos dos paneles durante la tarde y la mañana, respectivamente, reciban en una porción de sus celdas sólo radiación difusa, y en la otra tanto radiación difusa como directa, haciendo que sus curvas de corriente respectivas sean las correspondientes a las de la Figura 7.5. En el momento de mayor temperatura (y radiación incidente) para estos dos paneles, que se dan en torno a las 02:45 p.m. y 10:00 a.m. respectivamente, se aprecia una baja en los factores de llenado correspondientes. Sin embargo, la mayor baja es la que se produce cuando se tienen celdas sombreadas dentro del panel, lo que se da después y antes de los dos instantes mencionadas previamente.

7.1.5 Curva de factor de desalineación diaria

El factor de desalineación diario, para cada panel de Eolian I, en base a las simulaciones realizadas, se presenta en la Figura 7.7.

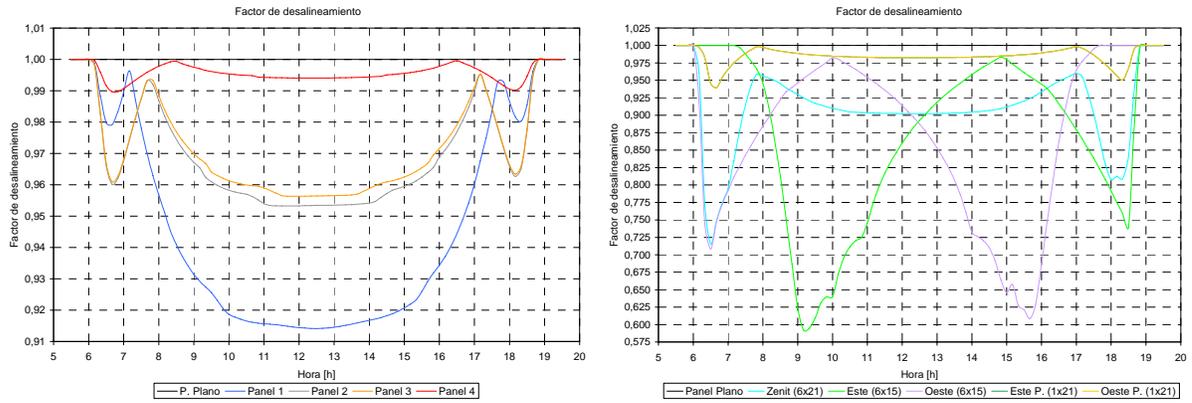


Figura 7.7 Factor de desalineación diario paneles Eolian I

En la Tabla 7.5 se presenta el resumen del factor de desalineación para los paneles solares de Eolian I.

	Factor de desalineación promedio	Factor de desalineación mínimo	Factor de desalineación 12:00 t.s.
Panel 1	0,943	0,914	0,914
Panel 2	0,968	0,953	0,953
Panel 3	0,970	0,956	0,956
Panel 4	0,995	0,990	0,994
Panel Plano	1,000	1,000	1,000
Plano (1x21)	1,000	1,000	1,000
Plano (6x21)	1,000	1,000	1,000
Plano (6x15)	1,000	1,000	1,000
Este P. (1x21)	0,984	0,940	0,982
Oeste P. (1x21)	0,984	0,940	0,982
Zenit (6x21)	0,905	0,715	0,902
Este (6x15)	0,869	0,592	0,893
Oeste (6x15)	0,870	0,608	0,887

Tabla 7.5 Resumen factor de desalineación diario paneles Eolian I

Se aprecia que para los paneles SunPower, el factor de desalineación presenta valores promedio entre 0,94 y 0,99, lo que indica que la forma física del vehículo provoca una pérdida de potencia, y por lo tanto, de energía a lo largo del día, pero ella no es demasiado importante. Además, el *Panel 1*, que corresponde al panel “menos plano” de los paneles SunPower, presenta el menor factor de desalineación, mientras que el resto de los paneles presenta mayores factores de desalineación, siendo el mayor de todos el correspondiente al *Panel 4*, dado que éste panel recibe una radiación más pareja en sus celdas.

Para los paneles Spectrolab DJ, se tienen menores factores de desalineación ya que la forma de estos paneles es menos plana que la de los SunPower A300, y además, las celdas que los conforman presentan mayores diferencias entre sus inclinaciones y azimuts. El peor caso de este efecto se da para los paneles *Este* y *Oeste*, los cuales llegan a tener un factor de desalineación del orden de 0,6, lo que indica la mayor disparidad entre los niveles de radiación solar que inciden sobre sus celdas.

En todos los paneles se aprecia una baja en el factor de desalineación después del amanecer, seguido de una pequeña alza, para luego volver a descender hasta llegar a su mínimo en el día. A partir de dicho momento, se da un comportamiento simétrico hasta que atardece, excepto para los paneles *Este* y *Oeste*, en donde este comportamiento también se da, pero sin ser simétrico en torno a un punto en particular. El efecto descrito se debe al recorrido del Sol en el cielo, lo que incide en la radiación que reciben las distintas celdas, y su variación de temperatura debida a la variación de temperatura diaria y la variación de radiación solar incidente.

7.1.6 Curva de eficiencia diaria

Finalmente, en la Figura 7.8, se presenta el último indicador de desempeño considerado en la modelación realizada, el que corresponde a la curva de eficiencia diaria.

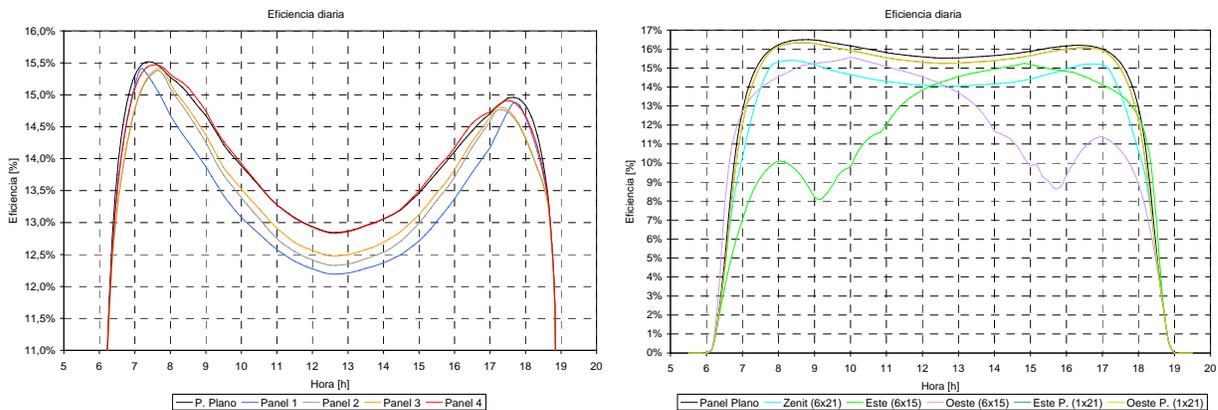


Figura 7.8 Eficiencia diaria paneles Eolian I

Basándose en las curvas obtenidas en la Figura 7.8, se construye la Tabla 7.6 en la que se resume el comportamiento de la eficiencia de cada panel.

	Eficiencia promedio [%]	Eficiencia máxima [%]	Eficiencia 12:00 t.s. [%]
Panel 1	12,98	15,41	12,19
Panel 2	13,13	15,38	12,33
Panel 3	13,23	15,41	12,48
Panel 4	13,52	15,47	12,84
Panel Plano	13,53	15,51	12,85
Plano (1x21)	14,04	16,50	15,52
Plano (6x21)	14,04	16,50	15,52
Plano (6x15)	14,04	16,50	15,52
Este P. (1x21)	13,78	16,33	15,25
Oeste P. (1x21)	13,77	16,33	15,24
Zenit (6x21)	12,74	15,41	14,05
Este (6x15)	11,27	15,24	14,24
Oeste (6x15)	11,68	15,56	14,18

Tabla 7.6 Resumen eficiencia diaria paneles Eolian I

La eficiencia de un panel de celdas fotovoltaicas depende primordialmente de dos factores. El primero de ellos corresponde a la temperatura de sus celdas, y el segundo a la diferencia de radiación que se produce entre ellas, lo que es medido mediante el factor de desalineación. En el caso de los paneles SunPower, se tiene que la menor eficiencia es la correspondiente al *Panel 1*, el que corresponde al panel cuyo factor de desalineación es el menor de todos, ya que tiene una mayor variación de radiación entre sus celdas debido a que las orientaciones correspondientes varían de mayor manera. En el caso del *Panel 4* y el *Panel Plano* (de referencia), se tiene que sus eficiencias diarias son las mayores, ya que en estos paneles el factor de desalineación es menor. Además, se repite la tendencia de que la curva presenta valores menores en torno al mediodía solar.

Para los paneles Spectrolab DJ, los paneles más eficientes corresponden a los paneles *Este P.* y *Oeste P.*, que son los que presentan un mayor factor de desalineación, encontrándose el panel *Zenit* en un punto intermedio entre los recién mencionados y los paneles *Este* y *Oeste*, que son lo más ineficientes dentro de los paneles Spectrolab DJ considerando los valores promedios durante el día. La forma de la curva de eficiencia de estos dos paneles, que difiere de la del resto de los siete paneles que conforman Eolian, se debe principalmente a la forma de la curva de los factores de desalineación correspondientes, observados en la Figura 7.7.

7.2 Estado de las celdas

7.2.1 Celdas SunPower A300

En base a los parámetros determinados en las secciones 5.4.2 y 5.4.3, se resumen en la Tabla 7.7 los parámetros físicos y de referencia para las celdas SunPower A300. Además, en base a su hoja de datos (ver *Anexo B*), se han obtenido los parámetros para la celda de acuerdo a la curva típica entregada por el fabricante para condiciones de laboratorio, los que también se resumen en la Tabla 7.7.

		SUNPOWER A300 EOLIAN I	SUNPOWER A300 CONTROL	SUNPOWER A300 HOJA DE DATOS
Parámetros físicos	$R_{Sh} [\Omega]$	227,6702	337,1922	504,704
	$R_S [\Omega]$	0,01195	0,01634	0,00533
	n	1,248	1,159	1,1189
	$E_{gsi} [eV]$	1,12	1,12	1,12
	$k_{te} [^{\circ}C \cdot m^2/W]$	0,0378	0,0306	-
	$k_0 [mA/^{\circ}C]$	2,2	2,2	2,2
	$\beta_V [mV/^{\circ}C]$	-1,9	-1,9	-1,9
Parámetros de referencia	$I_{SCRef} [A]$	5,1756	5,6353	5,9
	$L_{Ref} [W/m^2]$	1.000	1.000	1.000
	$T_{Ref} [^{\circ}C]$	25	25	25
	$V_{OCRef} [V]$	0,625	0,655	0,67

Tabla 7.7 Parámetros físicos y de referencia celdas SunPower A300

En base a los parámetros anteriores, se tienen las características de cada “tipo” de celda SunPower A300, que se presentan en la Figura 7.9.

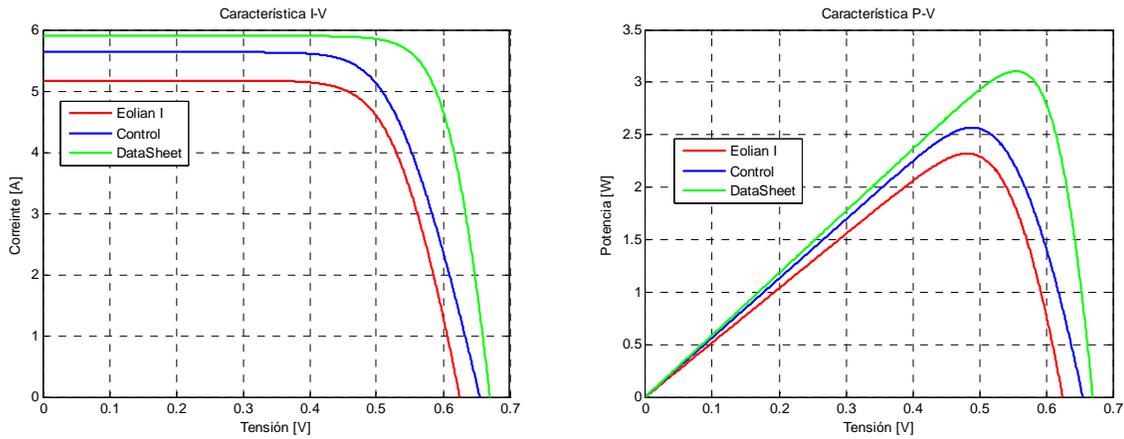


Figura 7.9 Característica I-V P-V, celdas SunPower A300

En base a las curvas de la Figura 7.9, se obtienen las variables características de comportamiento para cada “tipo” de celda, que se resumen en la Tabla 7.8 para las condiciones de prueba estándar.

Tipo de celda	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	η [%]
Eolian I	0,625	5,18	0,48	4,81	2,32	0,72	15,54
Control	0,655	5,64	0,49	5,25	2,57	0,70	17,21
DataSheet	0,670	5,90	0,56	5,59	3,10	0,79	20,80

Tabla 7.8 Variables características de comportamiento, celdas SunPower A300

En base a la Figura 7.9 y la Tabla 7.8 se aprecia que tanto para la celda “Eolian I” como “Control”, las variables V_{OC} e I_{SC} son menores respecto de las de la celda “DataSheet”, lo que conlleva que V_{MP} , I_{MP} y P_{MP} sean menores, teniéndose que la eficiencia de la celda se ve reducida respecto de la teórica correspondiente para la celda “DataSheet”. En cuanto al factor de llenado, éste también disminuye, pero a diferencia del resto de las variables, se tiene que el menor factor de llenado se da para la celda “Control”. En base a la Tabla 7.8, se tiene la Tabla 7.9, en donde se indica la variación de las variables respecto de los valores correspondientes para la celda “DataSheet”. Esta tabla indica el estado de las celdas respecto del teórico

	ΔV_{OC} [%]	ΔI_{SC} [%]	ΔV_{MP} [%]	ΔI_{MP} [%]	ΔP_{MP} [%]	$\Delta F_{Llenado}$ [%]	$\Delta \eta$ [%]
Eolian I	93,28	87,72	86,80	86,09	74,73	91,32	74,7
Control	97,76	95,51	88,11	93,88	82,72	88,60	82,7
DataSheet	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabla 7.9 Variación variables de comportamiento respecto celda “DataSheet”, SunPower A300

Los resultados más llamativos de la Tabla 7.9 son los dados en (7.1), (7.2) y (7.3):

$$I_{SC_{Eolian I}} = 0,88 \cdot I_{SC_{DataSheet}} \quad (7.1)$$

$$V_{OC_{Eolian I}} = 0,93 \cdot V_{OC_{DataSheet}} \quad (7.2)$$

$$P_{MP_{Eolian I}} = 0,75 \cdot P_{MP_{DataSheet}} \quad (7.3)$$

Con los resultados anteriores, se tiene que la mayor razón en la disminución de la potencia de salida, viene dada en su mayoría por la gran baja en I_{SC} , efecto que es apreciable a “simple vista” durante las mediciones realizadas en la secciones 5.4.2 y 5.4.3. Además, la baja de V_{OC} también incide en la pérdida de potencia de la celda. El origen de la disminución de la potencia de salida puede deberse a la suciedad “impregnada” en las celdas, lo que provoca una disminución en la cantidad de radiación solar que efectivamente ella recibe, y/o a daños no apreciables mediante inspección visual, como pérdidas debidas a cortocircuitos entre ánodo y cátodo o trizaduras tampoco apreciables mediante dicho tipo de inspección. Además, es posible que durante el soldado de las celdas, se haya producido una temperatura muy elevada sobre ellas, lo que puede generarles daños irreversibles.

7.2.2 Celdas Spectrolab DJ

Se resumen en la Tabla 7.10 los parámetros físicos y de referencia para la celda Spectrolab DJ. Además, en base a su hoja de datos (ver **Anexo B**), se han obtenido los parámetros para la celda de acuerdo a la curva típica entregada por el fabricante para condiciones de laboratorio, los que también se resumen en la Tabla 7.10.

		SPCTROLAB DJ CONTROL	SPECTROLAB DJ HOJA DE DATOS
Parámetros físicos	$R_{Sh} [\Omega]$	177,584	910,72
	$R_S [\Omega]$	0,674	0,3279
	n	1,99	1,976
	$E_{g_{GaInP_2}} [eV]$	1,72	1,72
	$E_{g_{GaAs}} [eV]$	1,43	1,43
	$k_{te} [^{\circ}C \cdot m^2/W]$	0,0254	-
	$k_0 [\mu A/^{\circ}C]$	269,9	269,9
	$\beta_V [mV/^{\circ}C]$	-4,2	-4,2
Parámetros de referencia	$I_{SCRef} [mA]$	398,4	406,2
	$L_{Ref} [W/m^2]$	1.353	1.353
	$T_{Ref} [^{\circ}C]$	28	28
	$V_{OCRef} [V]$	2,000	2,360

Tabla 7.10 Parámetros físicos y de referencia celdas Spectrolab DJ

En base a los parámetros anteriores, se tienen las características de cada “tipo” de celda Spectrolab DJ, que se presentan en la Figura 7.10.

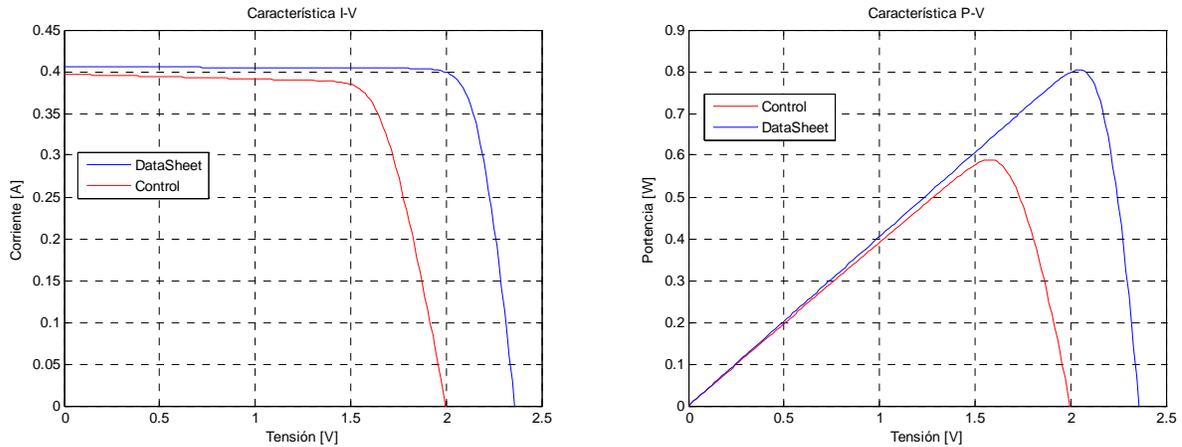


Figura 7.10 Característica I-V P-V, celdas Spectrolab DJ

En base a las curvas de la Figura 7.10, se obtienen las variables características de comportamiento para cada “tipo” de celda, que se resumen en la Tabla 7.11 para las condiciones de prueba estándar de estas celdas.

	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	η [%]
Control	1,999	0,397	1,577	0,374	0,589	0,74	16,13
DataSheet	2,360	0,406	2,041	0,394	0,804	0,84	22,01

Tabla 7.11 Variables características de comportamiento, celdas Spectrolab DJ

En base a la Figura 7.10 y la Tabla 7.11 se tiene que para la celda “Control” las variables V_{OC} e I_{SC} son menores respecto de las de la celda “DataSheet”, lo que hace que las variables de máxima potencia sean menores, teniéndose consecuentemente que la eficiencia de la celda se ve reducida respecto de la teórica, que corresponde a la dada por la celda “DataSheet”. En cuanto al factor de llenado, éste también disminuye. Mediante la Tabla 7.11, se tiene la Tabla 7.12, en donde se indica la variación de las variables respecto de lo valores correspondientes para la celda “DataSheet”.

	ΔV_{OC} [%]	ΔI_{SC} [%]	ΔV_{MP} [%]	ΔI_{MP} [%]	ΔP_{MP} [%]	$\Delta \text{Factor}_{\text{Llenado}}$ [%]	$\Delta \eta$ [%]
Control	84,69	97,74	77,26	94,88	73,31	88,55	73,3
DataSheet	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabla 7.12 Variación variables de comportamiento respecto celda “DataSheet”, Spectrolab DJ

Los resultados más llamativos de la Tabla 7.9 son los dados en (7.4), (7.5) y (7.6):

$$I_{SC_{Eolian I}} = 0,98 \cdot I_{SC_{DataSheet}} \quad (7.4)$$

$$V_{OC_{Eolian I}} = 0,85 \cdot V_{OC_{DataSheet}} \quad (7.5)$$

$$P_{MP_{Eolian I}} = 0,73 \cdot P_{MP_{DataSheet}} \quad (7.6)$$

Con los resultados anteriores, se tiene que la mayor razón en la disminución de la potencia de salida, viene dada en su mayoría por la gran baja en V_{OC} . Además, la baja de I_{SC} también incide en la pérdida de potencia de la celda. Para estas celdas, también se tiene que la potencia de

salida se ve reducida aproximadamente a un 75% del valor teórico indicado en la hoja de datos de la celda, mismo caso que se da con la celda “Eolian I” SunPower A300.

Además en la curva I-V de la Figura 7.10, se aprecia que la pendiente de la corriente de la celda “Control” es menor que la de la celda “DataSheet” en la zona ubicada entre $V=0[V]$ y $V=1,5[V]$ aproximadamente, lo que indica (y confirma) que la resistencia shunt de la celda “Control” es mucho más pequeña que la de la celda “DataSheet”

7.3 Estado paneles solares *Eolian I*

Para determinar el estado de los paneles solares de Eolian I, durante el día 16 de abril se ha realizado la prueba de desempeño, en la cual, en un primer lugar se realizó una inspección visual abarcando todas las celdas del vehículo.

En el caso de los paneles SunPower, no se han encontrado daños significativos mediante inspección visual, por lo que mediante el sistema de medición descrito en la sección 5.4.1, se han efectuado dos mediciones por cada panel, cada una de las cuales fue realizada con el auto orientado en dos direcciones, cada una de ellas desfasadas en 90° respecto de la otra. En el *Anexo D* se indica la determinación y la elección de dichas orientaciones que corresponden a distintos ángulos Az_{Auto} , y en el *Anexo C* se presenta en detalle la radiación solar incidente y la temperatura de las celdas determinadas mediante el modelo.

En el caso de las celdas Spectrolab, en la sección 7.3.5 se detallan las conclusiones obtenidas mediante la inspección visual realizada.

7.3.1 Panel 1 SunPower A300

En la Figura 7.11 y la Figura 7.12 se presentan las mediciones realizadas para el *Panel 1*, junto con el comportamiento esperado que indica el modelo.

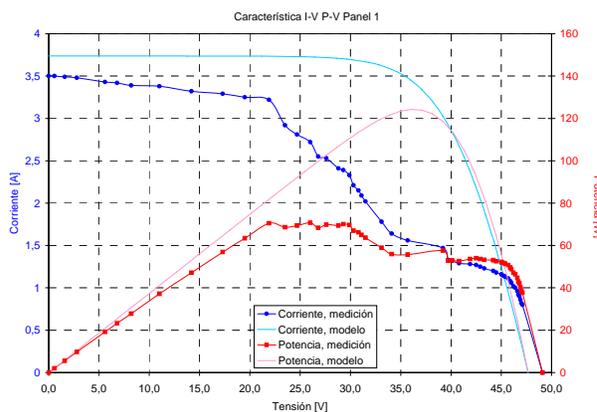


Figura 7.11 Desempeño *Panel 1* Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^\circ$

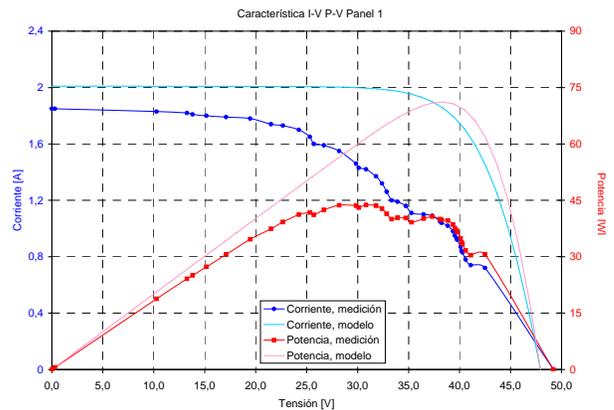


Figura 7.12 Desempeño *Panel 1* Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^\circ$

En base a las curvas de la Figura 7.11 y la Figura 7.12 se obtiene la Tabla 7.13, en donde se contrasta el desempeño real del *Panel 1* con su desempeño teórico dado por el modelo. La eficiencia indicada para la medición se ha estimado mediante la relación (7.7).

$$\eta_{Medición} = \frac{P_{MP_{Medición}}}{P_{MP_{Modelo}}} \cdot \eta_{Modelo} \quad (7.7)$$

	Azimet auto [°]	Hora inicio	Hora término	V _{OC} [V]	I _{SC} [A]	V _{MP} [V]	I _{MP} [A]	P _{MP} [W]	Factor de llenado	η [%]	Factor de desalineación
Medición	57	13:45	13:48	49,10	3,50	26,00	2,72	70,72	0,412	7,41	-
Modelo				47,67	3,74	36,02	3,45	124,2	0,697	13,02	0,954
Medición	147	15:37	15:40	49,20	1,85	30,83	1,42	43,78	0,481	8,54	-
Modelo				47,93	2,01	38,34	1,86	71,17	0,739	13,89	0,950

Tabla 7.13 Contraste desempeño real y teórico *Panel 1* Eolian I

El modelo indica que el *Panel 1* debiera tener una corriente I_{SC} un poco mayor a la medida, lo que es atribuible al hecho de que el modelo de radiación solar entrega una radiación mayor a la verdadera para Santiago. Debido a lo anterior, el modelo térmico entrega una mayor temperatura para cada celda, lo que hace la tensión V_{OC} modelada sea menor que la medida, siendo esta diferencia muy pequeña en cada caso, tomando valores de $16,84 [mV/celda]$ y $14,97 [mV/celda]$ respectivamente.

La forma de las curvas en la Figura 7.11 y la Figura 7.12 sugiere la presencia de algunos diodos de “bypass” encendidos. Este efecto es muy notorio, en particular, en la Figura 7.12, cerca de los 45[V]. El efecto se aprecia en la subida “escalonada” de la corriente en las curvas I-V, y en la presencia de máximos locales en las curvas P-V. La presencia de diodos encendidos (o parcialmente encendidos) indica que este panel posee celdas que reducirían la corriente del arreglo sin la presencia de los diodos. Todo lo anterior se traduce en una importante pérdida de corriente, y con ello de potencia, de este panel, que se hace notoria en la zona determinada entre $V=22[V]$ y $V=45[V]$ aproximadamente (considerando las dos curvas).

También se aprecia que este panel, en conjunto, presenta una disminución en su resistencia shunt R_{SH} , efecto visible en las curvas I-V, en donde se produce una disminución de la pendiente de la curva I-V, en la zona ubicada entre $V=0[V]$ y $V=22[V]$ aproximadamente (considerando las dos curvas). Este efecto es atribuible a daños físicos en las celdas que no han sido apreciables durante la realización de la prueba de inspección visual, como por ejemplo cortocircuitos entre ánodo y cátodo de algunas celdas.

Dado todo lo anterior, el punto de máxima potencia del panel no se encuentra ubicado en la zona “del codo” de la curva I-V, sino que se ubica a una tensión menor. En base a la Tabla 7.13, se tienen las relaciones dadas por (7.8).

$$\begin{aligned} P_{MP_{Medición}} &= 0,569 P_{MP_{Modelo}} & \text{para } Az_{Auto} &= 57 [^\circ] \\ P_{MP_{Medición}} &= 0,615 P_{MP_{Modelo}} & \text{para } Az_{Auto} &= 147 [^\circ] \end{aligned} \quad (7.8)$$

En base a (7.8), se tiene que el *Panel 1* entrega alrededor de un 60% de la potencia que debiera entregar.

7.3.2 Panel 2 SunPower A300

Las mediciones realizadas para el *Panel 2*, junto con el comportamiento esperado que indica el modelo se presentan en la Figura 7.13 y la Figura 7.14.

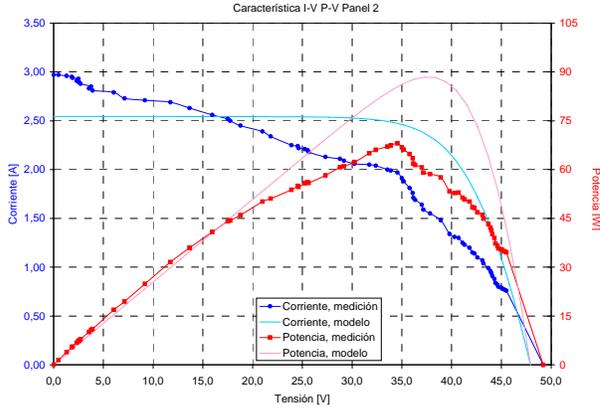


Figura 7.13 Desempeño *Panel 2 Eolian I*, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^\circ$

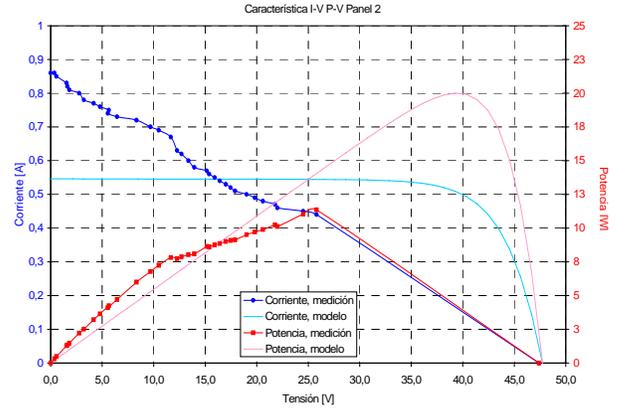


Figura 7.14 Desempeño *Panel 2 Eolian I*, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^\circ$

Debe notarse que durante la medición indicada en la Figura 7.14, algunas celdas SunPower se encontraban total o parcialmente sombreadas. Dicho efecto se ha tomado en cuenta para realizar la simulación correspondiente, introduciendo en el algoritmo de cálculo un vector que contiene el factor de sombra F_{Sombra} , el cual pondera la componente de radiación directa que incide sobre cada celda mediante la relación (7.9) para así incluir el efecto sombra en este panel. En el *Anexo D* se indican el porcentaje de sombra sobre las celdas de este panel.

$$F_{Sombra} = \frac{100 - \% Sombra}{100} \quad (7.9)$$

Basándose en las curvas de la Figura 7.13 y la Figura 7.14 se tiene la Tabla 7.14, en donde se contrasta el desempeño real del *Panel 2* con su desempeño teórico. La eficiencia indicada para la medición se ha estimado también mediante la relación (7.7).

	Azimut auto [°]	Hora inicio	Hora término	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	η [%]	Factor de desalineación
Medición	57	14:29	14:32	49,20	2,97	34,56	1,97	68,08	0,466	9,46	-
Modelo				47,93	2,54	37,28	2,37	88,43	0,725	12,28	0,867
Medición (S)	147	15:26	15:28	47,40	0,86	25,81	0,44	11,36	0,279	2,23	-
Modelo (S)				47,73	0,55	39,24	0,51	20,00	0,767	3,92	0,270

Tabla 7.14 Contraste desempeño real y teórico *Panel 2 Eolian I*

A diferencia del *Panel 1*, se tiene que la corriente I_{SC} modelada para el *Panel 2* es menor que la registrada (de hecho, éste es el único panel Sunpower en donde sucede esto) para ambas mediciones, lo que puede deberse a que los parámetros de las celdas de este panel no sean representados fielmente por aquéllos determinados en la sección 5.4.2. Nuevamente se aprecian diferencias en la tensión V_{OC} , siendo en este caso de $15,00 [mV/celda]$ y $-3,86 [mV/celda]$, efecto

atribuible a la estimación de temperatura de las celdas. En el caso de la medición para $Az_{Auto}=147^\circ$, debido a que algunas celdas se encuentran sombreadas, una menor radiación solar incide sobre ellas y sus tensiones V_{OC} disminuyen, lo que explica la menor diferencia en dicha medición.

Dada la forma de las curvas de la Figura 7.13 y la Figura 7.14, no es posible indicar con certeza si en este panel los diodos de “bypass” se encuentran encendidos o no ya, que si bien se aprecian algunos sectores de la curva con forma “escalonada”, la magnitud del efecto es pequeña, y podría deberse a variaciones en las mediciones registradas por los instrumentos.

En base a la forma de las curvas obtenidas para el *Panel 2*, se observa que la resistencia R_{SH} de éste presenta un valor pequeño, y además que el efecto de la resistencia serie R_S se hace presente de manera notoria al tener ésta un gran valor. La disminución de R_{SH} es atribuible nuevamente a pérdidas de corriente producidas a daños en las celdas, mientras que el aumento de R_S para este panel puede deberse a que las celdas que lo conforman posean una mayor resistencia eléctrica debido a los daños que ellas puedan presentar. Además, el cableado instalado que conecta las celdas del *Panel 2* es el más largo utilizado, lo que aumenta la resistencia a la salida del panel. Esto se debe a que este panel posee una porción de celdas sobre la apertura del vehículo, haciendo necesario que, para que ellas estén conectadas con el resto de las celdas, los cables utilizados sigan caminos “muy largos” permitiendo la funcionalidad de la apertura.

Con todo lo anterior, el punto de máxima potencia del panel nuevamente presenta un corrimiento hacia la derecha respecto del esperado, lo que se acentúa cuando el panel está sombreado. En base a la Tabla 7.14, se tienen las relaciones dadas por (7.10).

$$\begin{aligned} P_{MP_{Medición}} &= 0,770 P_{MP_{Modelo}} && \text{para } Az_{Auto} = 57 [^\circ] \\ P_{MP_{Medición}} &= 0,568 P_{MP_{Modelo}} && \text{para } Az_{Auto} = 147 [^\circ] \end{aligned} \quad (7.10)$$

En base a (7.10), se tiene que el *Panel 2* entrega alrededor de un 77% de la potencia que debiera entregar en condiciones de operación normal, es decir, cuando sus celdas no están sombreadas. En el caso de encontrarse parcialmente sombreado, esta potencia se ha reducido hasta un 57% aproximadamente, lo que indica que en el caso de operación ante sombreado, es muy posible que los paneles solares de Eolian I funcionen entregando aún menos potencia de la que entregan en condiciones normales con baja radiación solar incidente.

7.3.3 *Panel 3 SunPower A300*

En la Figura 7.15 y la Figura 7.16 se encuentran las mediciones realizadas para el *Panel 3* de Eolian I, junto con las curvas entregadas por el modelo respectivamente.

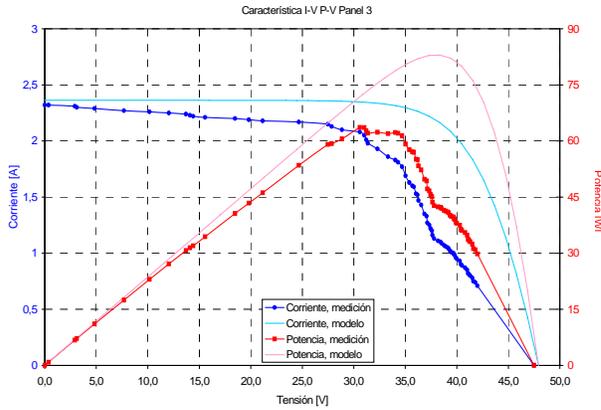


Figura 7.15 Desempeño *Panel 3* Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^\circ$

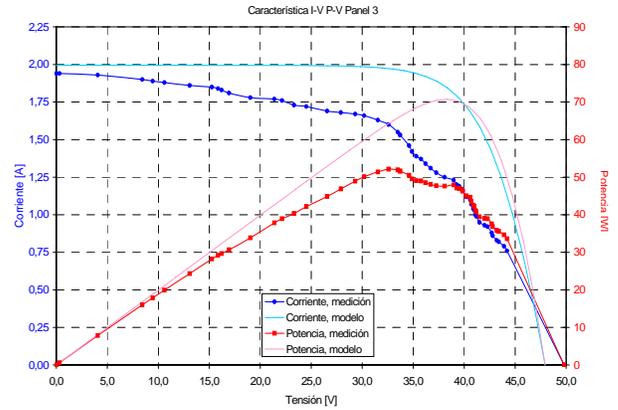


Figura 7.16 Desempeño *Panel 3* Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^\circ$

En la Tabla 7.15 se resume el comportamiento del *Panel 3*, junto con el comportamiento teórico de dicho panel. Una vez más la eficiencia se ha estimado mediante la relación (7.7).

	Azimut auto [°]	Hora inicio	Hora término	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	η [%]	Factor de desalineación
Medición	57	14:44	14:47	47,50	2,32	30,58	2,08	63,61	0,577	9,41	-
Modelo				47,93	2,36	38,34	2,16	82,99	0,732	12,28	0,857
Medición	147	15:50	15:53	49,80	1,94	32,59	1,60	52,14	0,540	10,73	-
Modelo				47,94	2,00	38,35	1,84	70,74	0,739	14,55	0,991

Tabla 7.15 Contraste desempeño real y teórico *Panel 3* Eolian I

En el caso del *Panel 3*, las corrientes I_{SC} son casi iguales (modelo y medición), pese a la sobreestimación sistemática de la radiación solar por parte del modelo, lo que indica una menor pérdida de corriente por celdas conectadas en serie. Nuevamente, se tienen pequeñas diferencia para la tensión V_{OC} , la que en este caso corresponden a $-5,03[mV/celda]$ y $21,91[mV/celda]$ respectivamente.

La forma de las curvas en la Figura 7.15 y la Figura 7.16, sugiere la presencia de algunos diodos de “bypass” encendidos. Este efecto se aprecia dada la existencia máximos locales en las curvas P-V, entre $V=30[V]$ y $V=40[V]$ aproximadamente (considerando ambas curvas).

Además, se repite el fenómeno resistivo apreciado en el *Panel 2*, pero en una medida menor, teniéndose que la resistencia R_{SH} de este panel presenta un valor pequeño, y que la resistencia serie R_S presenta un valor mayor del esperado. Efectos atribuibles a las posibles causas de daños mencionadas.

EL punto de máxima potencia del panel no se encuentra ubicado en la zona “del codo” de la curva I-V, sino que presenta una corrimiento hacia una tensión menor respecto de la indicada por el modelo. En base a la Tabla 7.15, se obtienen las relaciones dadas por (7.11).

$$\begin{aligned}
 P_{MP_{Medición}} &= 0,766 P_{MP_{Modelo}} & \text{para } Az_{Auto} &= 57 [^\circ] \\
 P_{MP_{Medición}} &= 0,737 P_{MP_{Modelo}} & \text{para } Az_{Auto} &= 147 [^\circ]
 \end{aligned}
 \tag{7.11}$$

De acuerdo a (7.11), se tiene que el *Panel 3* entrega alrededor de un 75% de la potencia que debiera entregar en condiciones de operación normal, lo que lo convierte en el panel en mejor estado (considerando el promedio de las ecuaciones (7.8), (7.10), (7.11) y (7.12)) de acuerdo a lo indicado por el modelo (ver en sección 7.3.4 desempeño del *Panel 4*).

7.3.4 Panel 4 SunPower A300

El desempeño registrado para el *Panel 4* de Eolian I se aprecia en la Figura 7.17 y la Figura 7.18, tanto medido como simulado.

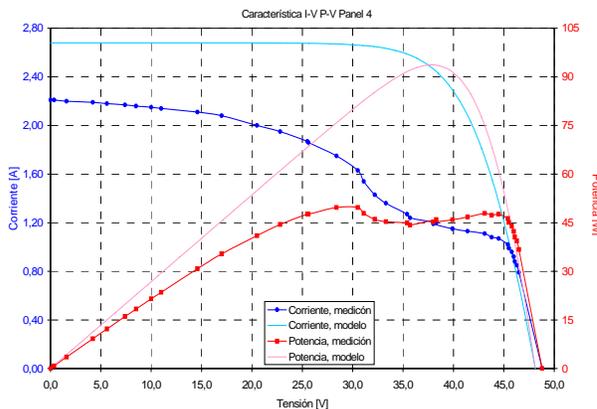


Figura 7.17 Desempeño *Panel 4* Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=57^\circ$

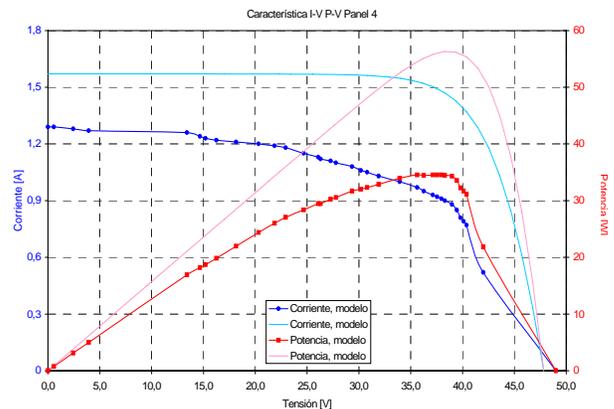


Figura 7.18 Desempeño *Panel 4* Eolian I, medición y modelo, $Az_{Auto}=147^\circ$

Utilizando la información recabada en las dos figuras anteriores, se plantea la Tabla 7.16, que sintetiza el comportamiento del *Panel 4* de Eolian I.

	Azimet auto [°]	Hora inicio	Hora término	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{MP} [V]	I_{MP} [A]	P_{MP} [W]	Factor de llenado	η [%]	Factor de desalineación
Medición	57	14:02	14:04	48,80	2,21	28,40	1,75	49,70	0,461	7,40	-
Modelo				48,14	2,68	37,44	2,50	93,63	0,725	13,94	0,967
Medición	147	16:14	16:16	49,00	1,29	39,46	0,85	33,54	0,531	8,79	-
Modelo				47,85	1,57	38,28	1,47	56,30	0,749	14,75	0,994

Tabla 7.16 Contraste desempeño real y teórico *Panel 4* Eolian I

En el caso del panel 4, el modelo indica que debiera tener una corriente I_{SC} mayor a la medida, dándose para este caso la mayor diferencia registrada en todas las mediciones realizadas respecto del modelo. Como resultado, este panel es el que posee el peor desempeño en cuanto a la corriente que es capaz de entregar. La diferencia registrada para V_{OC} entre los valores medidos e indicados por el modelo, nuevamente es muy pequeña, teniéndose que para este caso es de $7,79[mV/celda]$ y $13,56[mV/celda]$ respectivamente. Estas diferencias se deben, al igual que en los casos anteriores, a las diferencias de temperatura entre la modelada y la que presentan las celdas, durante la realización de la prueba.

La forma de las curvas que se aprecian en la Figura 7.17 y la Figura 7.18, sugieren la presencia de algunos diodos de “bypass” encendidos en este panel, pero lo anterior no es posible ya que este panel se encuentra en la actualidad con sus diodos de “bypass” desconectados. Esto

quiere decir que en este panel existe por lo menos una celda dañada que se encuentra limitando el paso de la corriente dentro de todo el panel. La forma de la curva que se asemeja a la presencia de un diodo de “bypass” encendido, en especial la de la curva I-V de la Figura 7.17, puede ser explicada debido a una celda (o conjunto de celdas) dañada, que limita el paso de la corriente a lo largo del arreglo, en un cierto intervalo de tensión. Después de un determinado umbral, es posible que el conjunto de celdas permita nuevamente el paso de la corriente, pero consumiendo potencia como carga.

Para este panel, también se aprecia una disminución en su resistencia shunt R_{SH} , efecto atribuible a daños físicos en las celdas, como por ejemplo cortocircuitos entre ánodo y cátodo de algunas celdas. En el caso de la resistencia serie, no se aprecia un aumento en ella, pero sí su efecto se hace notable en la Figura 7.18, debido a la baja cantidad de radiación solar incidente durante la realización de dicha medición.

El punto de máxima potencia del panel no se encuentra ubicado en la zona “del codo” de la curva I-V, sino que presenta un corrimiento, pero esta vez hacia una tensión menor y mayor a diferencia de la tendencia que se tiene para los otros 3 paneles. En base a la Tabla 7.16, se tienen las relaciones dadas por (7.12).

$$\begin{aligned} P_{MP_{Medición}} &= 0,531P_{MP_{Modelo}} & \text{para } Az_{Auto} &= 57[^\circ] \\ P_{MP_{Medición}} &= 0,596P_{MP_{Modelo}} & \text{para } Az_{Auto} &= 147[^\circ] \end{aligned} \quad (7.12)$$

Las relaciones de (7.12), indican que el *Panel 4* entrega alrededor de un 55% de la potencia que debiera entregar en condiciones de operación normal, haciendo que en este panel se dé la mayor reducción de potencia de salida respecto de la esperada, haciendo que éste pueda ser considerado como el más dañado de los 4 paneles SunPower que conforman Eolian I.

7.3.5 Paneles Spectrolab DJ

Antes de intentar realizar la prueba de desempeño sobre los paneles formados por las celdas Spectrolab DJ, se ha llevado a cabo la prueba de inspección visual sobre dichas celdas para determinar su estado físico.

En base a la inspección visual realizada se han establecido las siguientes conclusiones respecto su estado.

- Más del 90% de las celdas localizadas sobre la apertura de Eolian I se encuentran trizadas o rotas, lo que hace que toda esa porción de los paneles *Zenit*, *Este* y *Oeste* se encuentren inutilizables.
- Las 6 celdas delanteras del panel *Zenit* no se encuentran conectadas con el resto del Panel, además de encontrarse con significantes daños físicos.
- Tanto en el panel *Este Plano* como *Oeste Plano* se detectaron celdas severamente trizadas, que posiblemente se encuentren rotas o con su ánodo y cátodo cortocircuitados. Como estos corresponden a paneles serie, el daño detectado inutiliza cada panel en su totalidad.

- En la parte posterior a la apertura de Eolian I, se han encontrado algunas celdas rotas y muchas trizadas, lo que hace casi imposible determinar cuáles celdas se encuentran funcionando correctamente en dicha porción de los paneles *Zenit*, *Este* y *Oeste*.
- Además de la inspección visual sobre las celdas, se determinó que la porción trasera de los paneles *Zenit*, *Este* y *Oeste*, se encuentra interconectada entre sí.

En base a las conclusiones obtenidas mediante la prueba de inspección visual, se ha determinado no realizar la prueba de desempeño de estos 5 paneles debido a la seriedad de los daños físicos con los que se encuentran.

7.4 Estado global arreglo paneles solares Eolian I

Para determinar el estado global del arreglo de paneles solares de Eolian I en conjunto, se han considerado las simulaciones presentadas en la sección 7.1, las que en conjunto con los resultados obtenidos en la sección 7.3, permiten estimar la verdadera potencia de salida de los paneles tomando en cuenta todos los daños detectados. A su vez, se han considerado distintas configuraciones de paneles solares para visualizar la caída en la potencia de salida del vehículo debido a los distintos factores que influyen en este fenómeno. Las configuraciones consideradas varían en 3 parámetros, los que se explican a continuación.

- **Tipo de celda:** considera dos valores denotados por *Data* y *Eolian*. El primero considera las celdas solares tipo “DataSheet” (tanto SunPower A300 como Spectrolab DJ) y el segundo valor considera los parámetros de las celdas determinados en las secciones 5.4.2 y 5.4.4 para las celdas SunPower A300 y Spectrolab DJ respectivamente.
- **Temperatura:** considera dos valores que corresponden a *Ref.* y *Real*. El primero supone que las celdas se encuentran funcionando a lo largo del día a una temperatura igual a la correspondiente a la temperatura de pruebas de laboratorio, que corresponden a $T=25[^\circ\text{C}]$ para las celdas SunPower A300 y $T=28[^\circ\text{C}]$ para las celdas Spectrolab DJ. El segundo indica que las temperaturas de las celdas se han estimado en base al modelo térmico desarrollado.
- **Tipo de panel:** acá se consideran 3 valores posibles. El valor *Plano*, como su nombre lo indica, considera 9 paneles planos de igual tipo de conexión y cantidad de celdas que los que conforman Eolian I. El valor *Paneles* considera los 9 paneles montados sobre Eolian I, cuya forma viene dada por los azimuts e inclinaciones determinadas para todas las celdas del vehículo en la sección 6.1.2. Finalmente el valor *P.Escalados* considera la misma forma de los paneles solares que la indicada en *Paneles*, pero además indica que se ha escalado la potencia de salida en base al promedio de las ecuaciones (7.8), (7.10), (7.11) y (7.12), excepto para el *Panel 2*, en donde no se ha considerado la medición para $Az_{Auto}=147[^\circ]$ debido a la presencia de celdas sombreadas. Los resultados se resumen en la Tabla 7.17.

Panel	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Panel 4	Zenit	Este	Oeste	Este P.	Oeste P.
P_{Med}/P_{mod} $A_{zAuto}=57[^\circ]$	0,569	0,770	0,766	0,531	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{Med}/P_{mod} $A_{zAuto}=147[^\circ]$	0,615	0,568	0,737	0,596	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Promedio P_{Med}/P_{Mod}	0,592	0,770	0,752	0,563	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 7.17 Factores de escalamiento paneles solares Eolian I

Dado el daño físico de los cinco paneles Spectrolab DJ, se ha supuesto un factor de escalamiento de valor nulo, lo que indica que ellos no aportan potencia.

En la Figura 7.19 se tiene la potencia de salida para las 6 configuraciones de paneles considerados, que se indican en la Tabla 7.18, en donde además se resume el desempeño energético de dichas configuraciones.

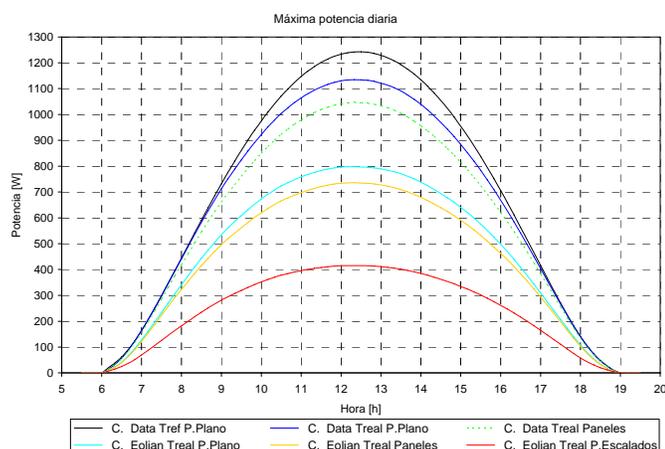


Figura 7.19 Curva de máxima potencia diaria, distintas configuraciones de paneles

Tipo de celda	Temp.	Tipo de panel	Potencia promedio [W]	Potencia máxima [W]	Potencia 12:00 t.s. [W]	Energía [kWh]	Δ Energía [kWh]	Δ Energía [%]
Data	Ref.	Plano	705,28	1242,84	1242,84	9,286	+1,228	+15,24
Data	Real	Plano	660,81	1134,81	1133,98	8,701	+0,642	+7,97
Data	Real	Paneles	612,02	1046,37	1045,70	8,058	0,000	0,00
Eolian	Real	Plano	479,84	797,87	796,89	6,318	-1,740	-21,60
Eolian	Real	Paneles	444,53	735,69	734,85	5,853	-2,205	-27,37
Eolian	Real	P.Escalados	251,61	415,53	415,00	3,313	-4,745	-58,89

Tabla 7.18 Desempeño energético, distintas configuraciones de paneles

En la Tabla 7.18 se ha considerado como caso base el destacado en negrillas (curva verde), el que considera los 9 paneles de Eolian I funcionando a temperatura real con sus 688 celdas (tipo DataSheet) en buen estado. El estado actual de los paneles corresponde al presentado en la curva en roja de la Figura 7.19, que en la Tabla 7.18 corresponde a la última fila.

De acuerdo a lo apreciado en la Figura 7.19 y la Tabla 7.18, se tiene que los paneles solares de Eolian I entregan aproximadamente un 41[%] de la energía esperada para condiciones reales y óptimas de funcionamiento, lo que corresponde una baja de desde 8[kWh] hasta

3,3[kWh]. Esta disminución en la energía generada se debe a dos factores principalmente. El primero de ellos corresponde al estado actual de las celdas (sección 7.2), en donde el hecho de que, en promedio, cada celda entrega aproximadamente el 75[%] de la potencia esperada, hace que la curva de potencia diaria se vea reducida, y que la energía perdida por dicha reducción sea de un 21,6[%]. El segundo, y más gravitante factor, corresponde al hecho de que los paneles SunPower A300 están entregando sólo una fracción de la potencia que debieran entregar, y que los paneles Spectrolab DJ no están entregando potencia alguna debido a la seriedad de sus daños, como se ha explicado en la sección 7.3.

Si la superficie de Eolian hubiera sido plana en su totalidad, la energía generada por los paneles habría sido del orden de un 8% superior, lo que indica que la forma de Eolian I no provoca una pérdida de energía eléctrica tan severa. Esta pérdida es totalmente aceptable y hasta preferible dado que la forma del vehículo minimiza otras pérdidas de energías, en especial la provocada por arrastre aerodinámico [22].

Si además fuera posible hacer operar las celdas a la temperatura indicada en sus hojas de datos, se tiene que se produciría un incremento de energía generada en un 15[%], alcanzándose una potencia máxima de generación de 1,24[kW] contra los 0,42[kW] que en la actualidad Eolian I puede producir.

En la Figura 7.20 se tiene la curva de eficiencia horizontal⁸ diaria obtenida para las mismas configuraciones de paneles considerados previamente. Con ella es posible estimar la eficiencia de conversión de energía solar que presenta Eolian I, además de poder compararla con las otras configuraciones consideradas.

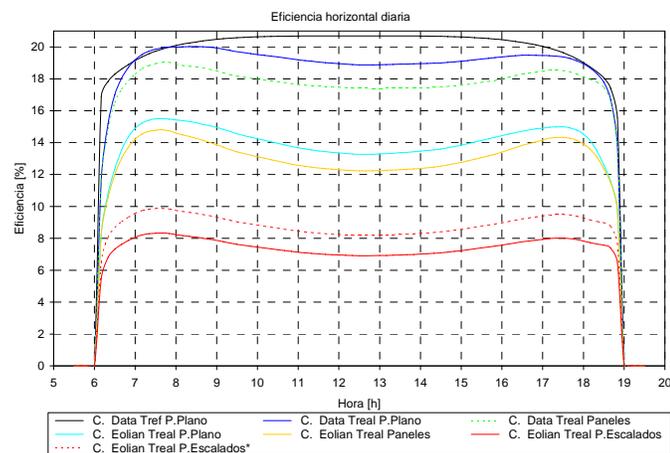


Figura 7.20 Curva de eficiencia diaria, distintas configuraciones de paneles

En base a la Figura 7.20, se construye la Tabla 7.19, en la que se resume la eficiencia horizontal para cada configuración de paneles. En dicha tabla se ha incluido el tipo de panel *P.Escalados**, el que corresponde a *P.Escalados*, pero que no considera la presencia de las celdas Spectrolab DJ sobre el auto, es decir, sólo considera el panel solar de Eolian I formado por 340 celdas SunPower A300 de menor área.

⁸La “eficiencia horizontal” se calcula considerando la radiación solar horizontal incidente sobre cada celda, y no la que efectivamente recibe cada una de ellas de acuerdo a sus inclinaciones y azimuts.

Tipo de celda	Temp.	Tipo de panel	Eficiencia promedio [%]	Eficiencia máxima [%]	Eficiencia 12:00 t.s. [%]
Data	Ref.	Plano	19,54	20,69	20,69
Data	Real	Plano	18,50	20,02	18,88
Data	Real	Paneles	17,31	19,03	17,41
Eolian	Real	Plano	13,61	15,51	13,26
Eolian	Real	Paneles	12,74	14,80	12,23
Eolian	Real	P.Escalados	7,27	8,34	6,91
Eolian	Real	P.Escalados*	8,61	9,88	8,19

Tabla 7.19 Desempeño de eficiencia, distintas configuraciones de paneles

De acuerdo a lo apreciado en la Figura 7.20 y la Tabla 7.19, se tiene que en la hora que la radiación solar horizontal incidente es máxima (mediodía solar), la curva de eficiencia horizontal para las distintas configuraciones consideradas presenta una baja debido al alza de temperatura producida por la mayor radiación solar, excepto en el caso en que se consideran las celdas funcionando a la temperatura indicada en sus hojas de datos.

El alza de temperatura y la forma del vehículo hacen que la eficiencia horizontal promedio del sistema baje desde un 19,54[%] hasta un 17,31[%], valor que sería totalmente admisible para un buen desempeño de los paneles, pero debido a lo explicado a lo largo de este capítulo (estado de las celdas, escalamiento de los paneles SunPower y paneles Spectrolab fuera de funcionamiento), se tiene que la eficiencia horizontal promedio del sistema baja desde un 17,31[%] hasta un 7,27[%], lo que indica la alta ineficiencia del sistema de paneles fotovoltaicos sobre Eolian I en la actualidad. Más aún, considerando el tipo de panel *P.Escalados**, se tiene que para la misma energía generada, la eficiencia del vehículo aumenta desde un 7,27[%] hasta un 8,61[%], valor de eficiencia horizontal aún menor que la mitad del valor promedio que el vehículo debiera presentar.

7.5 Comentarios y Análisis

En base a los distintos modelos desarrollados, se ha implementado el modelo integrado que permite estudiar el comportamiento de un panel de celdas fotovoltaicas cualquiera, y se ha aplicado sobre el panel de celdas fotovoltaicas de Eolian I. A través suyo, y realizando pocas mediciones eléctricas sobre dicho panel, se ha determinado su estado y contrastado respecto del rendimiento esperado que el modelo entrega.

El modelo integrado se ha aplicado sobre los nueve paneles del vehículo solar Eolian I, encontrándose que, en la actualidad, estos paneles presentan graves daños, tanto físicos como funcionales, siendo los daños más graves los ubicados en los paneles Spectrolab DJ, que en la actualidad no permiten su funcionamiento. Además, dada la fragilidad de las celdas y la carencia de celdas de recambio⁹ es muy poco probable recuperar dicho panel, pudiendo sólo aspirar a realizar una reconexión en las celdas que aún funcionan, para lo cual es necesario realizar mediciones sobre todos los arreglos de celdas que no presenten daños físicos severos, apreciables a simple vista.

⁹ Información proporcionada por el equipo constructor y a cargo del mantenimiento de los paneles solares de Eolian I

En el caso de los paneles SunPower A300, se ha establecido que ellos entregan entre un 55[%] y 75[%] de la potencia que debieran entregar, lo que indica daños en dichos paneles. Dado este resultado, y que se cuenta con algunas celdas de recambio⁹, cabe la posibilidad de realizar reparaciones para mejorar el desempeño de los paneles SunPower A300.

8 Conclusiones

En cuanto al objetivo general planteado, se ha propuesto e implementado un modelo para un sistema fotovoltaico móvil, utilizable en aplicaciones de tracción eléctrica, lo que se ha realizado en base a los distintos modelos desarrollados, obteniendo un modelo integrado y modular que permite estudiar el comportamiento de un panel de celdas fotovoltaicas ubicado en cualquier lugar del planeta, y teniendo éste una forma cualquiera, no necesariamente plana.

Por otro lado, se ha realizado una amplia revisión bibliográfica referenciada, principalmente, mediante publicaciones especializadas en los tópicos estudiados, utilizándose apoyo de fuentes de información más recientes y actuales, dado que este tipo de tecnologías se encuentra evolucionando rápidamente hoy en día. En particular, se ha entregado una recopilación de los usos actuales de la energía fotovoltaica en aplicaciones móviles.

El modelo implementado sirve para estudiar el comportamiento de un panel, permitiendo variar todos los factores que repercuten en su desempeño y rendimiento gracias a su modularidad, mediante la cual es posible suponer que algunas variables se comportan de cierta manera particular que sea de interés analizar.

En base al modelo integrado, y realizando pocas mediciones eléctricas sobre un panel fotovoltaico es posible determinar el estado de dicho panel y contrastarlo respecto del rendimiento esperado. Lo anterior es posible realizarlo tanto a nivel de las celdas que lo conforman, como al nivel de un panel. En el caso de que se cuente con varios paneles independientes en el sistema fotovoltaico, es posible analizar el desempeño global del conjunto de paneles de dicho sistema como un todo. Con lo anterior, se tiene una herramienta que permite evaluar paneles solares, y en base a sus resultados, determinar su estado, y de acuerdo a él, establecer si dicho panel se encuentra en condiciones de seguir funcionando, si debe ser reparado, o simplemente reemplazado.

En el desarrollo del modelo integrado, se ha propuesto y utilizado una metodología que permite estimar los parámetros necesarios de éste de manera simple, lo que hace que el tener un modelo genérico, permita la implementación considerando una amplia gama tipo de celdas fotovoltaicas. A modo de ejemplo, en este trabajo se han considerado 2 tipos de celdas fotovoltaicas (SunPower A300 y Spectrolab DJ), para las cuales a su vez se distinguen tres y dos subtipos respectivamente, lo que significa que de manera práctica se haya trabajado con “cinco celdas solares distintas”.

Los distintos modelos desarrollados e implementados se han validado mediante simulaciones, mediciones y pruebas experimentales, cuyos resultados han sido comparados con los arrojados por el modelo, En particular, se ha encontrado que el modelo de radiación solar, sistemáticamente, entrega valores mayores de radiación solar respecto de los medidos en Santiago, teniéndose diferencias entre $50[\text{W}/\text{m}^2]$ y $80[\text{W}/\text{m}^2]$. A su vez, el modelo implementado para un panel solar, entrega resultados con diferencias inferiores al 7% respecto de las medidas en todas sus variables, excepto en el modelo térmico debido principalmente a su simple y pobre modelamiento del comportamiento térmico de un panel de celdas fotovoltaicas, en donde se tienen errores que llegan hasta un 15%, lo cual no repercute mayormente en el modelo integrado ya que el error promedio de dicha modelación es sólo del orden de un 6%.

Los resultados obtenidos mediante el uso del modelo integrado, y la ejecución de pruebas experimentales, indican que los paneles del vehículo solar Eolian I presentan graves daños, que hacen inutilizable los paneles Spectrolab DJ (aproximadamente un sexto de todo el panel). El resto del panel, formado por celdas SunPower A300, también presenta daños importantes, teniéndose que los cuatro paneles independientes entregan un 59%, 76%, 75% y 56% de la potencia esperada. Los daños del sistema de paneles fotovoltaicos hacen que su eficiencia promedio sea sólo de un 7,3%, y que se tenga una pérdida en la generación de energía diaria de un 58,9% en un día con una alta radiación solar incidente. Sin embargo, el modelo desarrollado es capaz de reproducir adecuadamente los resultados obtenidos, por lo que se proyecta como la base de desarrollo de geometrías y agrupaciones de paneles para aplicaciones de tracción móviles.

Entre los trabajos futuros asociados a este trabajo se encuentran los siguientes.

- **Corrección de la radiación solar calculada:** es posible, en base a datos reales medidos de radiación horizontal, considerar una corrección en el algoritmo de cálculo de radiación para planos inclinados. La radiación solar horizontal medida se utilizaría para escalar la radiación que entrega el modelo, para así obtener resultados más exactos.
- **Desplazamiento del panel fotovoltaico:** el cálculo de radiación solar se ha implementado de forma tal que el modelo recibe como entrada la ubicación de un panel solar, pudiendo ser cualquiera en el mundo, pero sólo en un lugar en particular. Se propone adaptar los códigos computacionales implementados de manera que el modelo, no sólo entregue la radiación solar para un panel solar fijo a la Tierra, sino, que lo haga para uno que esté desplazándose sobre la superficie terrestre.
- **Giro espacial del panel fotovoltaico:** se propone implementar en el modelo el cálculo de radiación solar que el panel considerado pueda girar en torno a los tres ejes espaciales, con lo que sería posible estudiar y determinar, por ejemplo, la posición óptima de carga de un panel fotovoltaico irregular durante los instantes cercanos al amanecer y atardecer. En la actualidad este giro sólo se puede realizar en torno al eje zenital.
- **Cálculo automático de sombras:** como se trabaja con paneles fotovoltaicos irregulares, se propone incluir en el modelo una rutina que realice el cálculo automático de sombras sobre el panel, la que considere el punto anterior (giros en el espacio del panel).
- **Diodo de “bypass”:** el modelo integrado desarrollado no se ha implementado con la opción de estudiar el comportamiento de un panel que posea diodos de “bypass”. Se propone integrar al modelo dichos diodos para contar un modelo que caracterice de mejor manera un panel fotovoltaico.

Asimismo, se propone implementar un modelo de optimización que determine, para una distribución dada de celdas, su conexión óptima, ante una radiación solar en particular, en base al modelo integrado desarrollado. Dicha optimización puede ser llevada a cabo, por ejemplo, mediante el uso de algoritmos genéticos.

Bibliografía

- [1] WSC, abril 2008, <http://www.wsc.org.au/>
- [2] EOLIAN – Auto Solar Chile, abril 2008, <http://www.eolian.cl>
- [3] N. Robinson et al, “Solar Radiation”, Elsevier Publishing Company, 1966
- [4] W. B. Stine and M. Geyer, "Power From The Sun" 2001 (a revised and updated (and free!) version of "Solar Energy Systems Design" by W.B.Stine and R.W.Harrigan (John Wiley and Sons, Inc. 1985))
PowerFromTheSun.net website: <http://www.powerfromthesun.net/index.htm>
- [5] R Garreaud y equipo docente, “Clase 3: Transferencia Radiativa”, Curso FG11C “Atmósfera, tiempo y clima”, Semestre Otoño 2007
- [6] M. Villegas Duhau “Diseño y Caracterización a nivel de prototipo del Sistema de Abastecimiento energético de una Plataforma de Telecomunicaciones tipo Globo-Antena”, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, FCFM, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2006.
- [7] B. Sorensen, “Renewable Energy: Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects”, Academic Press, Third Edition, 2004
- [8] Radiación Solar, abril 2008, <http://www.ideam.gov.co/radiacion.htm>
- [9] Rayleigh Scattering, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_scattering
- [10] Coordenadas horizontales, abril 2008,
http://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_horizontales
- [11] Coordenadas horizontales, abril 2008,
http://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_ecuatoriales
- [12] R. Muñoz González, “Búsqueda de una correlación para la radiación solar en base a variables atmosféricas”, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, FCFM, Departamento de Ingeniería Mecánica, 1980.
- [13] R. Garreaud, C. Meruane, “Módulo 2: Balance de Energía Superficial”, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
<http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/meteorologia.html>
- [14] L.T. Wong, W.K. Chow, "Solar radiation model", Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China, 2001.
- [15] ASHRAE Handbook: HVAC applications. Atlanta (GA): ASHRAE, 1999.

- [16] K. Spokas, F. Forcella, "Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data", *Weed Science*, 54: pages 182–189, 2006
- [17] Dirección Meteorológica de Chile, abril 2008, http://www.meteochile.cl/instrumentos/inst_electronico.html
- [18] Equipos e instrumentos, abril 2008, <http://www.labsolar.utfsm.cl/equipos.html>
- [19] J. Nelson, "The Physics of Solar Cells", Imperial College Press, Capítulo 1, London, 2003.
- [20] Panel Fotovoltaico, marzo 2008, http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_fotovoltaico
- [21] Efecto fotoeléctrico, marzo 2008, http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_fotoel%C3%A9ctrico
- [22] D. R. Carroll, "The Winning Solar Car: A Design Guide for Solar Race Car Teams" Sae International, Capítulo 4, 2003.
- [23] Electronic band Structure, marzo 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_band_structure
- [24] D. A. Soto, "Aumento del Rendimiento en un Vehículo Eléctrico, utilizando Celdas Fotovoltaicas". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile, 2002.
- [25] I. E. Pereda, "Celdas Fotovoltaicas en Generación Distribuida". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial Mención Electricidad, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile, 2005.
- [26] D. Yogi Goswami, Frankf Kreith, Jan F. Kreider. "Principles of Solar Engineering", Taylor & Francis, Second Edition
- [27] M.R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press LLC, First Edition, 1999.
- [28] G. J. Aubrecht, "ENERGY: Physical, Environmental, and Social Impact", Pearson Prentice Hall, Third Edition, Extension 21.4: "The Physics of Solar Cells". <http://wps.prenhall.com/wps/media/objects/2513/2574258/pdfs/E21.4.pdf>
- [29] Solar Cell, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell
- [30] Fotovoltaica –Asesolar, abril 2008, <http://www.asesolar.com/fotovoltaica.html>
- [31] J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, W. Shan, J. W. Ager, III, E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, W. K. Metzger, and S. Kurtz, "Superior radiation resistance of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system," *J. Appl. Phys.* 94, 6477 (2003).

- [32] K. Wilson, D. De Ceuster¹, R. A. Sinton, “Measuring the effect of cell mismatch on module output”, SunPower Corp., 3939 North First Street, San Jose, CA 95134 USA, Sinton Consulting, Inc., Boulder, CO 80305 USA
- [33] Y. Yusof et al, “Modeling and Simulation of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaics System”, National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur Malaysia.
- [34] Practical Course: Photovoltaic Energy Systems, abril 2008, <http://emsolar.ee.tuberlin.de/lehre/english/pv1/index.html>
- [35] Tech Tips, abril 2008, http://www.windsun.com/General/tech_tips.htm
- [36] World’s largest photovoltaic systems (range 1-50), abril 2008, <http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>
- [37] Panel Solar, abril 2008, http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_solar
- [38] Grid Tie Inverter, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Grid_tie_inverter
- [39] Grid-tied electrical system, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Grid-tied_electrical_system
- [40] Techno Sun, abril 2008, http://www.technosun.com/es/principal/informacion/conexion_red.htm
- [41] Space Solar Workhop, abril 2008, <http://www.sspi.gatech.edu/photovoltaics2006.pdf>
- [42] Global Medical Systems, abril 2008, <http://www.globalmedical.netfirms.com/page2.html>
- [43] Photovoltaic Array, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_array
- [44] NASA – NSSDC – Spacecraft – Details, abril 2008, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1957-001B>
- [45] NASA – NSSDC – Spacecraft – Details, abril 2008, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1958-002B>
- [46] Basics of Space Flight Section II. Space Flight Projects, abril 2008, <http://www2.jpl.nasa.gov/basics/bsf11-3.html>, abril 2008
- [47] Lunar Prospector Information, abril 2008, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunarprosp.html>
- [48] Magellan at Venus, abril 2008, <http://www2.jpl.nasa.gov/magellan/image1.html>
- [49] Mars Global Surveyor, abril 2008, <http://mars.jpl.nasa.gov/mgs/>

- [50] NASA – NSSDC – Spacecraft – Details, abril 2008, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1992-063A>
- [51] Main Hubble Page, abril 2008, <http://hubble.nasa.gov/>
- [52] ESA – Rosetta, abril 2008, <http://www.esa.int/SPECIALS/Rosetta/index.html>
- [53] Stardust JPL NASA, abril 2008, <http://stardust.jpl.nasa.gov/photo/index.html>
- [54] Shuttle Mission Imagery, abril 2008, <http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-91/html/91727051.html>
- [55] Shuttle Mission Imagery, abril 2008, <http://www.spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-123/html/s123e009269.html>
- [56] 42.8% Efficiency: A New Record for Solar Cells: TreeHugger, abril 2008, http://www.treehugger.com/files/2007/08/428_efficiency.php
- [57] Fresnel Lens, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_lens
- [58] Solar panels on spacecraft, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_panels_on_spacecraft
- [59] Beam it Down, Scotty! , abril 2008, http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast23mar_1.htm
- [60] Vehículo Tríbrido, abril 2008, <http://es.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%ADbrido>
- [61] Operative General Management – Logistics - Trenitalia, abril 2008, http://www.trenitalia.com/en/trenitalia/pvtrain/pvtrain_6/Newsletter1.html
- [62] Automóvil Solar, abril 2008, http://es.wikipedia.org/wiki/Autom%C3%B3vil_solar
- [63] American Solar Challenge – Home Page, abril 2008, <http://americansolarchallenge.org/>
- [64] Nuon Solar Team, abril 2008, <http://www.nuonsolarteam.nl/>
- [65] Aurora Solar Car, abril 2008, <http://www.aurorasolarcar.com/>
- [66] Flickr: Secuencia de fotos de Eolian 2007, abril 2008, <http://www.flickr.com/photos/14643338@N03/>
- [67] Solar Electric Vehicles, abril 2008, <http://www.solarelectricalvehicles.com/>
- [68] Solar Electric Vehicles Products, abril 2008, <http://www.solarelectricalvehicles.com/products.shtml>
- [69] First plug in hybrid solar electric Vehicle in Canada, abril 2008, <http://www.newswire.ca/en/releases/archive/May2007/16/c9889.html>

- [70] Astrolab electro-solar hybrid, abril 2008, <http://www.venturi.fr/electric-vehicules-astrolab-concept.html>
- [71] Venturi Astrolab in Monaco, abril 2008, <http://www.autobloggreen.com/2008/04/01/venturi-astrolab-in-monaco/>
- [72] Eclectic energy-autonomous Vehicle, abril 2008, <http://www.venturi.fr/electric-vehicules-eclectic-design.html>
- [73] PVScooter, abril 2008, <http://www.builditsolar.com/Projects/PV/pvscooter.htm>
- [74] Solar Vehicle, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_vehicle
- [75] Solartaxi, Abril 2008, <http://www.solartaxi.com/>
- [76] Electric aircraft, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_aircraft
- [77] Photovoltaics in transport, abril 2008, http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics_in_transport
- [78] Top 12 Solar Powered Aircrafts – Blazing Wings, abril 2008, <http://www.blazingwings.org/entry/top-12-solar-powered-aircrafts/>
- [79] NASA – NASA Dryden Fact Sheet – Solar Power Research, abril 2008, <http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-054-DFRC.html>
- [80] QinetiQ's Zephyr UAV exceeds official world record for longest duration unmanned flight, abril 2008, http://www.qinetiq.com/home/newsroom/news_releases_homepage/2007/3rd_quarter/qinetiq_s_zephyr_uav.html
- [81] Sky-Sailor: Solar Autonomous Airplane for Mars exploration, abril 2008, <http://sky-sailor.epfl.ch/>
- [82] The story of solar powered boats, abril 2008, <http://www.sunboat.com/history/history.html>
- [83] Solarschiffe für die Expo?, abril 2008, <http://www.umwelteinsatz.ch/IBS/solship2.html>
- [84] Solar Sailor Home, abril 2008, <http://www.solarsailor.com/>
- [85] Concord Monitor - Solar boat rides current, abril 2008, <http://www.concordmonitor.com/apps/pbcs.dll/article?AID=/20070813/REPOSITORY/08130320>
- [86] Welcome SOLAR SPLAH, abril 2008, <http://www.solarsplash.com/>
- [87] Frisian Solar Challenge, abril 2008, <http://www.frisiansolarchallenge.nl/eng/index.php>

- [88] A. Streeter, “Cool Robot” Master of Science thesis, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, 2005.
http://engineering.dartmouth.edu/crobots/papers/pap_index.html

Anexos

A Códigos de Programación

A.1 Radiación Solar

Función: decl.m

Descripción: entrega la declinación del Sol a partir del día juliano

```
function delta = decl(N)
delta=23.45*sind(360*(284+N)/(365));
```

Función: tsolar.m

Descripción: entrega el tiempo solar a partir de la hora local, día juliano, longitud local, longitud de referencia y cambio de hora

```
function ts=tsolar(hora_local, N, long_loc,long_st,D)
LC=(long_st-long_loc)/15; % horas
x=360*(N-1)/365.242; %grados
eot=0.258*cosd(x)-7.416*sind(x)-3.648*cosd(2*x)-9.228*sind(2*x); % minutos

ts=hora_local+eot/60-LC-D;
```

Función: LCT.m

Descripción: entrega la hora local a partir de la hora solar, día juliano, longitud local, longitud de referencia y cambio de hora

```
function treal=LCT(ts, N, long_loc,long_st,D)
LC=(long_st-long_loc)/15; % horas
x=360*(N-1)/365.242; %grados
eot=0.258*cosd(x)-7.416*sind(x)-3.648*cosd(2*x)-9.228*sind(2*x); % minutos

treal=ts-eot/60+LC+D;
```

Función: altura.m

Descripción: entrega la altura del sol a partir de su declinación, latitud del observador y ángulo horario del Sol

```
function alfa=altura(delta,phi,omega)

alfa=asind(sind(delta)*sind(phi)+cosd(delta)*cosd(phi)*cosd(omega));
```

Función: azimut_sol.m

Descripción: entrega el azimut del Sol a partir de su declinación, latitud del observador, ángulo horario del Sol y altura solar

```
function AZs=azimut_sol(delta,phi,omega, alfa)
%{
for(i=1:length(omega))
    if(omega(i)>=0)
        signo(i)=1;
    else
        signo(i)=-1;
    end
end
end
%}
signo=(omega+eps)./abs(omega+eps);

AZs=real(signo.*acosd((sind(delta)*cosd(phi)-cosd(delta)*sind(phi)*cosd(omega))./(cosd(alfa))));%
grados
```

Función: masa_aire.m

Descripción: entrega la masa de aire a partir de la altura del lugar el ángulo zenital del Sol

```
function m=masa_aire(altitud,cenital)
%altitud es numero, cenital puede ser vector

Pa=101.3*exp(-altitud/8200);

largo=length(cenital);
for n=1:largo
    if(abs(cenital(n))>88.7)
        cenital2(n)=88.69;
```

```

        else
            cenital2(n)=cenital(n);
        end
    end
end

m=Pa./(101.3*cosd(cenital2));

```

Función: tau_t.m

Descripción: entrega la transmitividad atmosférica corregida por temperatura a partir de las temperaturas extremas del día y los indicadores de lluvia del día actual y anterior

```

function trans=tau_t(Tmax,Tmin,hoy,ayer)
%si hay lluvia, hoy, ayer son 1
%si no hay lluvia, hoy, ayer son 0
dT=Tmax-Tmin;
if(hoy==0 && ayer==0)
    tau=0.7;
elseif(hoy==0 && ayer==1)
    tau=0.6;
elseif(hoy==1 && ayer==0)
    tau=0.4;
else
    tau=0.3;
end

if(dT>10)
    trans=tau;
else
    trans=tau/(11-dT);
end

```

Función: rad_pos.m

Descripción: entrega el argumento de entrada si éste es positivo, y cero si es negativo. Se utiliza para corroborar que la radiación difusa y global sean positivas

```

function rad=rad_pos(IGlobal);
largo=length(IGlobal);
for n=1:l:largo
    if(IGlobal(n)>=0)
        rad(n)=IGlobal(n);
    else
        rad(n)=0;
    end
end

```

Función: rad.m

Descripción: : entrega la radiación solar de un día en particular medida por el DGF para el año 2007, base de datos previamente importada al workspace de MatLab

```

function rad2=rad(dia)

data=evalin('base','data2');

rad2=data((1:48)+48*(dia-1),7);

```

Función: temp.m

Descripción: entrega temperaturas extremas de un día en particular medidas por el DGF para el año 2007, base de datos previamente importada al workspace de MatLab

```

function [tmax tmin]=temp(dia)

data=evalin('base','data2');

tmax=max(data((1:48)+48*(dia-1),5));
tmin=min(data((1:48)+48*(dia-1),5));

```

Función: lluvia.m

Descripción: entrega los indicadores de lluvia del día actual y anterior, medidos por el DGF para un día en particular para el año 2007, base de datos previamente importada al workspace de MatLab

```

function [ayer hoy]=lluvia(dia)

data=evalin('base','lluvia_2007');

```

```

if (dia>1)

    lluvia_hoy = sum(data((1:96)+96*(dia-1),4));
    lluvia_ayer = sum(data((1:96)+96*(dia-2),4));

    if(lluvia_hoy>0)
        hoy=1;
    else
        hoy=0;
    end

    if(lluvia_ayer>0)
        ayer=1;
    else
        ayer=0;
    end
else
    lluvia_hoy = sum(data((1:96)+96*(dia-1),4));

    if(lluvia_hoy>0)
        hoy=1;
    else
        hoy=0;
    end

    ayer=0;
end

```

Programa: rad_solar_planos.m

Descripción: calcula la radiación solar incidente dentro de un día en particular sobre n planos, con azimut e inclinación conocida para cada uno de ellos

```

beta_planos=0;%a300_p2(1,:);%[10 5 10 5]; %0 vector fila, le trae las inclinaciones de los planos
N_planos=length(beta_planos);
Nceldas=N_planos %N_planos;
AZp_planos=0;%a300_p2(2,:)+57+90;%[0 0 0 0];% le trae los azimuts de los planos

%sombras=vector de N_planosXlength(hora) con porcentajes de sombra

clear('L');

N=293;% dia juliano del año

lat=-33.4577; %-33.38333; %grados (Santiago)
long=-70.6619; %grados (santiago)-77.249 %
%PATIO ESCUELA
long_st=-60; % grados, gmt -4
D=0; %0 invierno, 1 verano
t_sim=1/4;%(1/3); %fracciones de hora*****
disp(['Simulación de radiación cada ', num2str(60*t_sim) , ' minutos']);
disp(' ')

for(i=1:1:N_planos)% iteracion pa todos los planos

    %*****PLANO*****%
    beta=beta_planos(i);%[0;10]; % grados, ángulo inclinación plano
    AZp=AZp_planos(i);%[0 10]; % grados, ángulo azimut plano

    %sombra=columna(i) de sombra traspuesta

    delta=decl(N); %grados,
    omega_0=acosd(-1*tand(delta)*tand(lat)); %grados, -amanecer, atardecer
    hora_am=LCT(12-omega_0/15,N,long,long_st,D);
    hora_at=LCT(12+omega_0/15,N,long,long_st,D);

    pasos=floor((hora_at-hora_am)/(t_sim))+1;

    hora=5.5:1/6:19.5;
    %hora=15.45;%[15.45 15.85]; %[13.400 13.733 14.183];
    %hora=hora_am:(hora_at-hora_am)/pasos:hora_at; % intervalo de sim

    ts=tsolar(hora,N,long,long_st,D); % horas

```

```

omega=15*(ts-12);% grados, angulo horario
alfa=altura(delta,lat,omega); %grados, altura solj
AZs=azimut_sol(delta,lat,omega,alfa); % grados, azimut sol

cos_theta=cosd(beta)*sind(alfa)+sind(beta)*cosd(alfa).*cosd(AZs-AZp); % grados, ángulo entre
normal al plano y sol

% *****ACA EMPIEZA EL SOL*****
cenital=90-alfa; % grados, angulo cenital sol

%[Tmax Tmin]=temp(N);
Tmax=21; % celsius, Tmax aire
Tmin=1; % celsius, Tmin aire

%[ayer hoy]=lluvia(N);
hoy=0; % variable de lluvia, 1 o 0
ayer=0; % variable de lluvia, 1 o 0

%deltaT=Tmax-Tmin;
a=0; %533; %metros, elevación del lugar (santiago app) azotea dgf

I0=1353; % W/m^2, la constante
IE=I0*(1+0.034*cosd(360*N/365.25));

m=masa_aire(a,cenital);
tau=tau_t(Tmax,Tmin,hoy,ayer);
IB=IE.*(tau.^m); %W/m^2, rad directa
ID=0.3*(1-(tau).^m)*IE.*cosd(cenital); %W/m^2, rad directa
Ibeam=rad_pos(IB.*cos_theta);
IG=Ibeam+rad_pos(ID); %W/m^2, RAD GLOBAL
%IG=(100-sombrap2(i))/100.*Ibeam+rad_pos(ID); %W/m^2, RAD GLOBAL
%arriba sería IG=(100-sombra)./100.*Ibeam+rad_pos(ID);

%L(1,:)=hora;
%L(i+1,:)=IG;
L(i,:)=IG;
%plot(hora,IG,hora,ID,hora,Ibeam), grid on
end

%dibuja(L);
plot(hora,L','LineWidth',1.5);grid on;
%plot(hora,L','.', 'MarkerSize',15);grid on;
datos=num2str([beta_planos',AZp_planos']);
%datos=num2str(T);
title('Radiación Solar Celdas Panel Eolian I')
ylabel('Radiación Solar [W/m^2]')
xlabel('horas [h]')
%legend(datos,'Location','Best');%'BestOutside'
%gtext('Incl. Az.')
%hold off
hold on

```

A.2 Celda Solar

Función: Iphoto.m

Descripción: entrega la fotocorriente a partir de la radiación solar, radiación solar de referencia, temperatura de la celda, temperatura de la celda de referencia y coeficiente térmico de corriente de la celda

```

function Iluz=Iphoto(L, Lref, T, Tref, ISCref, k0)
%L y T pueden ser vectores, el resto no
%k0=(I2-ISCref)/(T2-Tref);

if(L>0)
    Iluz=ISCref*L/Lref +k0*(T-Tref);
else
    Iluz=eps;
End

```

Función: Icerero.m

Descripción: entrega la corriente de saturación inversa del diodo a partir de la temperatura de la celda, temperatura de la celda de referencia, V_{oc} de referencia, I_{sc} de referencia, factor del diodo y gap de energía del material

```

function sat_inv=Icerero(T,Tref,VOCref,ISCref,n,Eg)

```

```

%T puede ser vector, el resto números
%EG silicio=1.11
%GaAs=1.43
q=1.6021773*10^(-19); %Coulomb
k=1.380658*10^(-23); %J/K
T_k=T+273.15; %kelvin
Tref_k=Tref+273.15; % kelvin

Icero_ref=ISCref/(exp(q*VOCref/(n*k*Tref_k)) -1);

sat_inv=Icero_ref*(T_k/Tref_k).^(3/n).*exp((-q*Eg/(n*k))*(1./T_k-1/Tref_k));

```

Función: ec_lm

Descripción: define la ecuación que da la característica I-V de una celda solar en función de todos sus parámetros

```

function corr_out=ec_lm(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, V,I , betav)
corriente=I;
q=1.6021773*10^(-19); %Coulomb número
k=1.380658*10^(-23); %J/K número
T_k=T+273.15; %kelvin vector
Tref_k=Tref+273.15; % kelvin número
Isat=Icero(T,Tref,VOCref,ISCref,n,Eg); %NUMERO
Iph=Iphoto(L, Lref, T, Tref,ISCref, k0); %NUMERO
V2=betav*(T - Tref);

corr_out=(Iph-Isat*(exp(q.*(V-V2+Rs.*I)./(n.*k.*T_k))-1)-(V-V2+Rs*I)/Rsh - I);

```

Función: celda.m

Descripción: resuelve la característica I-V de una celda en base a todos sus parámetros y el paso de cálculo de tensión deseado

```

%function [VOC,ISC,VIP,mppt]=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV)
function VIP=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV , betav)

VOC=fzero(@(voc) ec_lm(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, voc, 0 ,
betav),VOCref);
if(VOC<0)
    VOC=eps;
end
ISC=fzero(@(isc) ec_lm(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, 0, isc ,
betav),ISCref);
%V_sim=1/10; %fracciones de volts*****
pasos=ceil((1.1*VOCref)/(pasoV));
V=linspace(0,VOC,pasos)';
I=ones(size(V));
P=ones(size(V));
i_guess=L/Lref*ISCref/2;
Pmppt=0;
Vmppt=0;
Imppt=0;
for(i=1:length(V))
    I(i)=fzero(@(corr) ec_lm(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, V(i), corr ,
betav),i_guess);
    P(i)=V(i)*I(i);
    if(P(i)>Pmppt)
        Pmppt=P(i);
        Vmppt=V(i);
        Imppt=I(i);
    end
end
VIP=[V,I,P;Vmppt,Imppt,Pmppt];

```

Programa: paneles_eolian_a300.m

Descripción: calcula las características I-V de n celdas solares SunPower A300 tipo “Eolian”. Incluye resistencia de los cables de los paneles

```

%PANELES EOLIAN A300!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
[Lx, Ly]=size(L);% viene de la simulacion de los paneles
[Tx, Ty]=size(T);% viene de la simulacion de los paneles

Lref=1000;
Tref=25;
VOCref=0.625; %EOLIAN A300
ISCref=5.1756; %EOLIAN A300
k0=2.2/1000;
n=1.248; %EOLIAN A300

```

```

Rs=0.01195;      %EOLIAN A300
Rsh=227.6702;   %EOLIAN A300
Eg=1.12;        %Silicio
betav=- (1.9-0.36)/1000;

RP1=0.001984852; %ohm/celda
RP2=0.002307592; %ohm/celda
RP3=0.001498437; %ohm/celda
RP4=0.001618312; %ohm/celda

R_prom=(0.000786103+0.001108843+0.000293694+0.000389594)/4;

Rs=Rs+RP1;
area_=6/402;

pasoV=15/1000;%XXXXXXXXXXXXXXXXXX

disp(['Resolución de ', num2str(pasoV*1000), ' [mV] app']);
disp('Calculando los paneles...');
disp(' ')

for(cont1=1:1:Tx)
    for(cont2=1:1:Ty)
        Lcell=L(cont1,cont2);
        Tcell=T(cont1,cont2);
        VIP=celda(Lcell, Lref, Tcell, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV , betav);
        [VIPx VIPy]=size(VIP);
        VIP2=VIP(1:VIPx-1,:);
        eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,1);']);
        eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,2);']);
        eval(['P_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,3);']);

        mppt2=VIP(VIPx,:);%nuevo
        voc=VIP(VIPx-1,1);
        isc=VIP(1,2);
        wa=[voc, isc, mppt2]';
        eval(['z_pmp_',int2str(cont1),':',int2str(cont2),' '=wa;']);

%plot(eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)]),eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)
]));
        %hold on; grid on;

    end

    disp(['Celda ',num2str(cont1),' lista'])
    disp(['Faltan ',num2str(Tx-cont1),' celdas'])
    disp('Paciencia...')
    disp(' ')

end

disp(';;;LISTO!!!')
load handel;
warning off;
yy=y(1:length(y)/4 );
player = audioplayer(yy, Fs);
play(player);
warning on;

%datos=num2str(T);
%legend(datos, 'Location', 'Best');%'BestOutside'

%[voc,isc,volt, corr, power]=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV);
%plot(V,I,V,P), grid on
%xlabel('Tensión [V]')
%ylabel('Corriente [A]')
%title('Característica I-V')

```

Programa: paneles_control_a300.m

Descripción: calcula las características I-V de n celdas solares SunPower A300 tipo "Control". NO incluye resistencia de los cables de los paneles

%PANELES CONTROL A300!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

[Lx, Ly]=size(L);% viene de la simulacion de los paneles
[Tx, Ty]=size(T);% viene de la simulacion de los paneles

Lref=1000;
Tref=25;
VOCref=0.655; %CONTROL A300
ISCref=5.6353; %CONTROL A300
k0=2.2/1000;
n=1.159; %CONTROL A300
Rs=0.01634; %CONTROL A300
Rsh=337.1922; %CONTROL A300
Eg=1.12; %Silicio
betav=-(1.9-0.36)/1000;

area_=6/402;
pasoV=15/1000;%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

disp(['Resolución de ', num2str(pasoV*1000), ' [mV] app']);
disp('Calculando los paneles...');
disp(' ')

for(cont1=1:1:Tx)
    for(cont2=1:1:Ty)
        Lcell=L(cont1,cont2);
        Tcell=T(cont1,cont2);
        VIP=celda(Lcell, Lref, Tcell, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV , betav);
        [VIPx VIPy]=size(VIP);
        VIP2=VIP(1:VIPx-1,:);
        eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,1);']);
        eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,2);']);
        eval(['P_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,3);']);

        mppt2=VIP(VIPx,:);%nuevo
        voc=VIP(VIPx-1,1);
        isc=VIP(1,2);
        wa=[voc, isc, mppt2]';
        eval(['z_pmp_',int2str(cont1),(':',int2str(cont2),' ) =wa;']);

%plot(eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)]),eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)
]));
        %hold on; grid on;

    end

    disp(['Celda ',num2str(cont1),' lista'])
    disp(['Faltan ',num2str(Tx-cont1),' celdas'])
    disp('Paciencia...')
    disp(' ')

end
disp(';;;LISTO!!!')
load handel;
warning off;
yy=y(1:length(y)/4 );
player = audioplayer(yy, Fs);
play(player);
warning on;

datos=num2str(L);
legend(datos, 'Location', 'Best');%'BestOutside'

title ('Características I-V P-V');
%[voc,isc,volt, corr, power]=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV);
%plot(V,I,V,P), grid on

```

Programa: paneles_data_a300.m

Descripción: calcula las características I-V de n celdas solares SunPower A300 tipo “DataSheet”. NO incluye resistencia de los cables de los paneles

```

%PANELES DATA A300!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
[Lx, Ly]=size(L);% viene de la simulacion de los paneles
[Tx, Ty]=size(T);% viene de la simulacion de los paneles

```

```

Lref=1000;
Tref=25;
VOCref=0.67;    %DATA A300
ISCref=5.9;    %DATA A300
k0=2.2/1000;
n=1.1189;      %DATA A300
Rs=0.00533;    %DATA A300
Rsh=504.704;   %DATA A300
Eg=1.12;       %Silicio
betav=-((1.9-0.36)/1000);

area_=6/402;
pasoV=15/1000;%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

disp(['Resolución de ', num2str(pasoV*1000), ' [mV] app']);
disp('Calculando los paneles...');
disp(' ')

for(cont1=1:1:Tx)
    for(cont2=1:1:Ty)
        Lcell=L(cont1,cont2);
        Tcell=T(cont1,cont2);
        VIP=celda(Lcell, Lref, Tcell, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV , betav);
        [VIPx VIPy]=size(VIP);
        VIP2=VIP(1:VIPx-1,:);
        eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,1);']);
        eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,2);']);
        eval(['P_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,3);']);

        mppt2=VIP(VIPx,:);%nuevo
        voc=VIP(VIPx-1,1);
        isc=VIP(1,2);
        wa=[voc, isc, mppt2]';
        eval(['z_pmp_',int2str(cont1),(':',int2str(cont2),' ) =wa;']);

%plot(eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)]),eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)
]));
        %hold on; grid on;

    end

    disp(['Celda ',num2str(cont1),' lista'])
    disp(['Faltan ',num2str(Tx-cont1),' celdas'])
    disp('Paciencia...')
    disp(' ')

end

disp(';;;LISTO!!!')
load handel;
warning off;
yy=y(1:length(y)/4 );
player = audioplayer(yy, Fs);
play(player);
warning on;

datos=num2str(L);
legend(datos, 'Location', 'Best');%'BestOutside'

title ('Características I-V P-V');
%[voc,isc,volt, corr, power]=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV);
%plot(V,I,V,P), grid on

```

Programa: paneles_DJ_control.m

Descripción: calcula las características I-V de n celdas solares Spectrolab DJ tipo "Control". Incluye resistencia de los cables de los paneles

```

%PANELES SPECTROLAB CONTROL!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
[Lx, Ly]=size(L);% viene de la simulacion de los paneles
[Tx, Ty]=size(T);% viene de la simulacion de los paneles

```

```

Lref=1353;
Tref=28;
VOCref=2.000;    %CONTROL DJ

```

```

ISCref=398.4/1000; %CONTROL DJ
k0=269.9/1000000;
n=1.99; %CONTROL DJ
Rs=0.674; %CONTROL DJ
Rsh=177.584; %CONTROL DJ
Eg=1.43+1.72; %GaAs+GaInP_2
betav=-(4.2+1.065)/1000;

RP_cr=0.0013823; %ohm/celda
RP_E=0.0014798; %ohm/celda
RP_W=0.0018213; %ohm/celda
RP_EP=0.0077362; %ohm/celda
RP_WP=0.0092835; %ohm/celda
%R_prom=(0.000786103+0.001108843+0.000293694+0.000389594)/4;

Rs=Rs+RP_WP;
area_=26.99/10000;

pasoV=30/1000;%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

disp(['Resolución de ', num2str(pasoV*1000), ' [mV] app']);
disp('Calculando los paneles...');
disp(' ')

for(cont1=1:1:Tx)
    for(cont2=1:1:Ty)
        Lcell=L(cont1,cont2);
        Tcell=T(cont1,cont2);
        VIP=celda(Lcell, Lref, Tcell, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV , betav);
        [VIPx VIPy]=size(VIP);
        VIP2=VIP(1:VIPx-1,:);
        eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,1);']);
        eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,2);']);
        eval(['P_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,3);']);

        mppt2=VIP(VIPx,:);%nuevo
        voc=VIP(VIPx-1,1);
        isc=VIP(1,2);
        wa=[voc, isc, mppt2, Lcell]';% MODIFICADA
        eval(['z_pmp_',int2str(cont1),':',int2str(cont2),' '=wa;']);

%plot(eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)]),eval(['P_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)
]));
        %hold on; grid on;

    end

    disp(['Celda ',num2str(cont1),' lista'])
    disp(['Faltan ',num2str(Tx-cont1),' celdas'])
    disp('Paciencia...')
    disp(' ')

end

disp(';;;LISTO!!!')
load handel;
warning off;
yy=y(1:length(y)/4 );
player = audioplayer(yy, Fs);
play(player);
warning on;

%datos=num2str(L);
%legend(datos, 'Location', 'Best');%'BestOutside'

%[voc,isc,volt, corr, power]=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV);
%plot(V,I,V,P), grid on

```

Programa: paneles_DJ_data.m

Descripción: calcula las características I-V de n celdas solares Spectrolab DJ tipo "DataSheet". Incluye resistencia de los cables de los paneles

```

%PANELES SPECTROLAB CONTROL!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
[Lx, Ly]=size(L);% viene de la simulacion de los paneles
[Tx, Ty]=size(T);% viene de la simulacion de los paneles

```

```

Lref=1353;
Tref=28;
VOCref=2.360;          %DATA DJ
ISCref=406.2/1000;    %DATA DJ
k0=269.9/1000000;
n=[1.975625652791913;] %DATA DJ
Rs=[0.327883900445636;] %DATA DJ
Rsh=[910.7185572508702;] %DATA DJ
Eg=1.43+1.72;         %GaAs+GaInP_2
betav=-(4.2+1.065)/1000;

RP_cr=0.0013823;      %ohm/celda
RP_E=0.0014798;      %ohm/celda
RP_W=0.0018213;      %ohm/celda
RP_EP=0.0077362;     %ohm/celda
RP_WP=0.0092835;     %ohm/celda
%R_prom=(0.000786103+0.001108843+0.000293694+0.000389594)/4;

%Rs=Rs+RP_WP;
area_=26.99/10000;

pasoV=30/1000;%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

disp(['Resolución de ', num2str(pasoV*1000), ' [mV] app']);
disp('Calculando los paneles...');
disp(' ')

for(cont1=1:1:Tx)
    for(cont2=1:1:Ty)
        Lcell=L(cont1,cont2);
        Tcell=T(cont1,cont2);
        VIP=celda(Lcell, Lref, Tcell, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV , betav);
        [VIPx VIPy]=size(VIP);
        VIP2=VIP(1:VIPx-1,:);
        eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,1);']);
        eval(['I_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,2);']);
        eval(['P_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2) '= VIP2(:,3);']);

        mppt2=VIP(VIPx,:);%nuevo
        voc=VIP(VIPx-1,1);
        isc=VIP(1,2);
        wa=[voc, isc, mppt2, Lcell]';% MODIFICADA
        eval(['z_pmp_',int2str(cont1),':',int2str(cont2),' '=wa;']);

%plot(eval(['V_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)]),eval(['P_',int2str(cont1),'_',int2str(cont2)
]));
        %hold on; grid on;

    end

    disp(['Celda ',num2str(cont1),' lista'])
    disp(['Faltan ',num2str(Tx-cont1),' celdas'])
    disp('Paciencia...')
    disp(' ')

end

disp(';;;LISTO!!!')
load handel;
warning off;
yy=y(1:length(y)/4 );
player = audioplayer(yy, Fs);
play(player);
warning on;

%datos=num2str(L);
%legend(datos, 'Location', 'Best');%'BestOutside'

%[voc,isc,volt, corr, power]=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, n, Eg, Rs, Rsh, pasoV);
%plot(V,I,V,P), grid on

```

Función: ec_I2.m

Descripción: variación de la función ec_I.m, rescrita de forma tal que permite realizar el ajuste de parámetros para definir un tipo de celdas solares.

```
function corr_out=ec_I2(n_Rs_Rsh, VI_data)

%Acá valos valores de las variables con las que se hizo la medición

L=1353;
T=28;

%acá van los valores de los otros parámetros de la celda DE LA MEDICION

VOCref=2.36;
ISCref=0.4061995;

Lref=L;
Tref=T;
k0=269.9*(1E-6);
Eg=1.43+1.72;

V=VI_data(1,:);
I=VI_data(2,:);
%%corriente=I;
q=1.6021773*10^(-19); %Coulomb número
k=1.380658*10^(-23); %J/K número
T_k=T+273.15; %kelvin vector
Tref_k=Tref+273.15; % kelvin número
Isat=Icero(T,Tref,VOCref,ISCref,n_Rs_Rsh(1),Eg); %NUMERO
Iph=Iphoto(L, Lref, T, Tref,ISCref, k0); %NUMERO

corr_out=(Iph-Isat*(exp(q.*(V+n_Rs_Rsh(2).*I)./(n_Rs_Rsh(1).*k.*T_k))-1)-
(V+n_Rs_Rsh(2)*I)/n_Rs_Rsh(3) - I);
```

Función: ortimiza.m

Descripción: determina los parámetros R_s , R_{sh} y n del modelo de la celda en base a un ajuste de parámetros

```
function [a,VIP,mppt]=ortimiza(datos)

clear z VIP mppt a
hold off;

z=zeros(1,length(datos));
a0=[1.5 0.0001 500];
lb=[1.0 0.000001 10];
ub=[5 0.5 1000];

a=lsqcurvefit(@ec_I2,a0,datos,z,lb,ub)

%copiar y pegar los valores de las constantes desde ec_i2

L=1353;
T=28;

%acá van los valores de los otros parámetros de la celda DE LA MEDICION

VOCref=2.36;
ISCref=0.4061995;

Lref=L;
Tref=T;
k0=269.9*(1E-6);
Eg=1.43+1.72;

%fin de copia

VIP=celda(L, Lref, T, Tref, VOCref, ISCref, k0, a(1), Eg, a(2), a(3), 1/1000,0);
mppt=VIP(length(VIP),:);
VIP(length(VIP),:)=[];

PD=datos(1,:).*datos(2,:);
plot(datos(1,:),datos(2,),'k')
hold on;
```

```

plot(datos(1,:),PD,'sr');
dibuja2(VIP);
xlabel('Tensión [V]');
ylabel({'Corriente [A]'; 'Potencia [W]'});
legend({'Corriente, medición', 'Potencia, medición', 'Corriente, modelo', 'Potencia, modelo'})
hold off;
%Características I-V P-V celda"

```

A.3 Panel Solar

Función: serie.m

Descripción: forma un panel serie con las celdas indicadas, calculando su desempeño y rendimiento diario

```

function []=serie(celdas,L)
%celdas es el vecto fila que dice cuáles celdas van en serie
[SLx SLy]=size(L);
nombre = regexprep(int2str(celdas), ' ', '_');
largo=length(celdas);

area2=evalin('base','area_');
L2=evalin('base','L');

for(ky=1:SLy)
    %disp(['L es el N°',num2str(ky)])
    V=zeros(size( evalin('base','V_1_1' ))); %evalin('base','var')
    I=100*ones(size(evalin('base','I_1_1' ))); %evalin('base','var')
    P_MF=0;
    L_=0;

    for(kx=1:largo)
        indice=celdas(kx);
        V=V+evalin('base',[ 'V_',int2str(indice), '_',int2str(ky) ]);
        I=min(I,evalin('base',[ 'I_',int2str(indice), '_',int2str(ky) ]));

        ppmp=evalin('base',[ 'z_pmp_',int2str(indice), '(5,',int2str(ky),') ' ]);
        P_MF=P_MF+ppmp;
        L_=L_+L2(indice,ky);
    end
    P=V.*I;

    [Px Py]=ind2sub(size(P),find(P==max(P)));
    maxV=V(Px,Py);
    maxI=I(Px,Py);
    maxP=P(Px,Py);
    VIPm=[maxV;maxI;maxP];
    mppt_(:,ky)=VIPm;

    vvoc=V(length(V),1);
    iisc=I(1,1);
    MMF=maxP/(P_MF+eps);
    FF=maxP/(vvoc*iisc);
    eff=maxP./(L_*area2);
    VIPm2=[vvoc;iisc;P_MF;FF;eff;MMF];

    indic(:,ky)=VIPm2;

    assignin('base', ['VV_serie_',nombre,'_L',int2str(ky)], V);
    assignin('base', ['II_serie_',nombre,'_L',int2str(ky)], I);
    assignin('base', ['PP_serie_',nombre,'_L',int2str(ky)], P);

    clear('V');
    clear('I');
end

assignin('base', ['mppt_serie_',nombre], mppt_);
assignin('base', ['indic_serie_',nombre], indic);

disp('Serie habemos eficiencia SI sabemos')

```

Función: paralelo.m

Descripción: forma un panel paralelo con las celdas indicadas, calculando su desempeño y rendimiento diario

```
function []=paralelo(celdas,L)
%celdas es el vector fila que dice cuáles celdas van en serie
[SLx SLy]=size(L);
nombre = regexp(int2str(celdas), ' ', '_');
largo=length(celdas);

area2=evalin('base','area_');
L2=evalin('base','L');

for(ky=1:SLy)
    %disp(['L es el N°',num2str(ky)])
    V=100*ones(size( evalin('base','V_1_1' ))); %evalin('base','var')
    I=zeros(size(evalin('base','I_1_1' ))); %evalin('base','var')
    P_MF=0;
    L_=0;

    for(kx=1:largo)
        indice=celdas(kx);
        I=I+evalin('base',[ 'I_',int2str(indice), '_',int2str(ky) ]);
        V=min(V,evalin('base',[ 'V_',int2str(indice), '_',int2str(ky) ]));

        ppmp=evalin('base',[ 'z_pmp_',int2str(indice), '(5,',int2str(ky),') ' ]);
        P_MF=P_MF+ppmp;
        L_=L_+L2(indice,ky);
    end
    P=V.*I;

    [Px Py]=ind2sub(size(P),find(P==max(P)));
    maxV=V(Px,Py);
    maxI=I(Px,Py);
    maxP=P(Px,Py);
    VIPm=[maxV;maxI;maxP];
    mppt(:,ky)=VIPm;

    vvoc=V(length(V),1);
    iisc=I(1,1);
    MMF=maxP/(P_MF+eps);
    FF=maxP/(vvoc*iisc);
    eff=maxP./(L_*area2);
    VIPm2=[vvoc;iisc;P_MF;FF;eff;MMF];

    indic(:,ky)=VIPm2;

    assignin('base', [ 'VV_paral_',nombre,'_L',int2str(ky)], V);
    assignin('base', [ 'II_paral_',nombre,'_L',int2str(ky)], I);
    assignin('base', [ 'PP_paral_',nombre,'_L',int2str(ky)], P);

    clear('V');
    clear('I');
end

assignin('base', [ 'mppt_paral_',nombre], mppt);
assignin('base', [ 'indic_paral_',nombre], indic);

disp('Paralelo tenemos eficiencia SI sabemos')
```

Función: paralelo2.m

Descripción: forma los arreglos en paralelo las celdas indicadas dentro de un panel paralelo serie

```
function []=paralelo2(celdas,L,a)
%esto hace el paralelo de celdas pa pasarselo a serie2 que hace la serie
%entre lo que saca esta cosa.
%celdas es el vector fila que dice cuáles celdas van en serie
[SLx SLy]=size(L);
%nombre = regexp(int2str(celdas), ' ', '_');
largo=length(celdas);

area2=evalin('base','area_');
L2=evalin('base','L');

for(ky=1:SLy)
```

```

%disp(['L es el N°',num2str(ky)])
V=100*ones(size( evalin('base','V_1_1' ))); %evalin('base', 'var')
I=zeros(size(evalin('base','I_1_1' ))); %evalin('base', 'var')
P_MF=0;
L_=0;

for(kx=1:largo)
    indice=celdas(kx);
    I=I+evalin('base',[ 'I_',int2str(indice),'_',int2str(ky) ]);
    V=min(V,evalin('base',[ 'V_',int2str(indice),'_',int2str(ky) ]));

    ppmp=evalin('base',[ 'z_pmp_',int2str(indice),'(5,',' ,int2str(ky),' ) ' ] );
    Lcelda=evalin('base',[ 'z_pmp_',int2str(indice),'(6,',' ,int2str(ky),' ) ' ] );
    P_MF=P_MF+ppmp;
    L_=L_+Lcelda;
    %L_=L_+L2(indice,ky);
end
P=V.*I;

[Px Py]=ind2sub(size(P),find(P==max(P)));
maxV=V(Px,Py);
maxI=I(Px,Py);
maxP=P(Px,Py);
VIPm=[maxV;maxI;maxP];
mppt_(:,ky)=VIPm;

%vvoc=V(length(V),1);
%iisc=I(1,1);
%MMF=maxP/(P_MF+eps);
%FF=maxP/(vvoc*iisc);
%eff=maxP./(L_*area2);
%VIPm2=[vvoc;iisc;P_MF;FF;eff;MMF];
VIPm2=[P_MF;L_];

indic(:,ky)=VIPm2;

assignin('base', [ 'VV_p_',int2str(a),'_L_',int2str(ky)], V);
assignin('base', [ 'II_p_',int2str(a),'_L_',int2str(ky)], I);
assignin('base', [ 'PP_p_',int2str(a),'_L_',int2str(ky)], P);

clear('V');
clear('I');
end

assignin('base', [ 'mppt_pp_',int2str(a)], mppt_);
%assignin('base', [ 'indic_p_',int2str(a)], indic);
assignin('base', [ 'zz_p_',int2str(a)], indic);

disp('Paralelo habemos eficiencia YA sabremos')

```

Función: serie2.m

Descripción: forma un panel paralelo-serie con los arreglos indicados desde la función paralelo2.m, calculando su desempeño y rendimiento diario.

```

function []=serie2(celdas,L)
% esto hace la serie entre arreglos de celdas en paralelo
%celdas es el vector fila que dice cuáles "celdas" van en serie
[SLx SLy]=size(L);
nombre = regexp(int2str(celdas), ' ', '_');
largo=length(celdas);

area2=evalin('base','area_');
L2=evalin('base','L');

for(ky=1:SLy)
    %disp(['L es el N°',num2str(ky)])
    V=zeros(size( evalin('base','V_1_1' ))); %evalin('base', 'var')
    I=100*ones(size(evalin('base','I_1_1' ))); %evalin('base', 'var')
    P_MF=0;
    L_=0;

    for(kx=1:largo)
        indice=celdas(kx);

```

```

        V=V+evalin('base',[ 'VV_p_',int2str(indice),'_L',int2str(ky)]);%aca es de la "celda
grande"
        I=min(I,evalin('base',[ 'II_p_',int2str(indice),'_L',int2str(ky)]));%aca es de la "celda
grande"
        ppmp2=evalin('base',[ 'zz_p_',int2str(indice),'(1,',int2str(ky),' ) ' ]);%aca es de la
celda sola...
        Lcelda2=evalin('base',[ 'zz_p_',int2str(indice),'(2,',int2str(ky),' ) ' ]);%aca es de la
celda sola...
        P_MF=P_MF+ppmp2;
        L_=L_+Lcelda2;
    end
    P=V.*I;

    [Px Py]=ind2sub(size(P),find(P==max(P)));
    maxV=V(Px,Py);
    maxI=I(Px,Py);
    maxP=P(Px,Py);
    VIPm=[maxV;maxI;maxP];
    mppt_(:,ky)=VIPm;

    vvoc=V(length(V),1);
    iisc=I(1,1);
    MMF=maxP/(P_MF+eps);
    FF=maxP/(vvoc*iisc);
    eff=maxP./(L_*area2);
    VIPm2=[vvoc;iisc;P_MF;FF;eff;MMF];

    indic(:,ky)=VIPm2;

    assignin('base',[ 'VV_S_',nombre,'_L',int2str(ky)], V);
    assignin('base',[ 'II_S_',nombre,'_L',int2str(ky)], I);
    assignin('base',[ 'PP_S_',nombre,'_L',int2str(ky)], P);

    clear('V');
    clear('I');
end
assignin('base',[ 'AAA_mppt_SERIE_',nombre], mppt_);
assignin('base',[ 'AAA_indic_SERIE_',nombre], indic);

disp('Paralelo-Serie tenemos eficiencia SI sabemos')

```

A.4 Modelo Térmico Celda Solar

Función: Tcelda.m

Descripción: entrega la temperatura de n celdas solares a partir de la radiación solar, temperatura ambiente y la constante térmica correspondiente

```
function temp=Tcelda(cte,L,Tamb)
```

```
[x,y]=size(L);
```

```
for(fil=1:1:x)
```

```
    Tamb_grande(fil,:)=Tamb;
```

```
end
```

```
temp=Tamb_grande+cte*L;
```

Programa: temp_dia.m

Descripción: calcula la temperatura de n celdas solares de un tipo específico a partir de la radiación solar, temperatura ambiente y la constante térmica asociada al tipo de celda

```
[Tdi Tdj]=size(L);
```

```
%tamb=12+18*sind(0:160/(Tdj-1):160);
```

```
%cte=0.0378; %eolian a300
```

```
%cte=0.0306; %control a300
```

```
cte=0.0254; %control dj
```

```
%tamb=24.90;
```

```
T=Tcelda(cte,L,tamb);
```

```
%hora=12.467;
```

```
plot(hora,tamb,'k','LineWidth',2.5,'MarkerSize',12);
```

```
hold on, grid on;
```

```
%plot(hora,T,'LineWidth',1.5);
```

```

plot(hora,T','.','MarkerSize',15);
title ('Temperatura Panel Eolian I')% "Panel 4 SunPower"')
ylabel('Temperatura [°C]')
xlabel('hora [h]')

```

A.5 Superficie Vehículo

Programa: todos_de_una_var.java

Descripción: genera los puntos espaciales (y,z) que forman una cuaderna en formato de texto simple exportable a Excel y MatLab a partir de los archivos de salida generados por AutoCad

```

import java.io.BufferedReader;
import java.io.FileReader;
import java.io.FileWriter;
import java.io.IOException;
import java.io.InputStreamReader;
import java.io.PrintWriter;

public class todos_de_una_var {
    public static void main (String Args[]) throws IOException{
        BufferedReader in3 = new BufferedReader(new InputStreamReader(System.in));
        System.out.print("Ingrese nombre del archivo con los archivos: ");
        String archivo2 = in3.readLine();
        //String n_corto=archivo2.substring(0, archivo.indexOf("."));
        BufferedReader lector2 = new BufferedReader(new FileReader(archivo2));
        //PrintWriter salida = new PrintWriter(new FileWriter (archivo2+"2.txt"));

        String linea2 = lector2.readLine();

        while(linea2!=null){
            //salida.println("data_cad/"+linea);
            String n_corto=linea2.substring(linea2.indexOf("/")+1, linea2.indexOf("."));
            BufferedReader lector = new BufferedReader(new FileReader(linea2));
            //PrintWriter salida = new PrintWriter(new FileWriter (n_corto+".2excel.txt"));
            PrintWriter salida2 = new PrintWriter(new FileWriter (n_corto+".2excel_med_2.txt"));
            String datos_temp[]=new String[2000];
            int i=0;
            int largo=0;

            String linea = lector.readLine();

            while(linea!=null){
                if (linea.length()==0 || linea.charAt(0)!=' '){
                    //salida.println();
                    linea = lector.readLine();
                }
                else{
                    String sinesp= linea.trim();
                    //salida.println(sinesp);
                    datos_temp[i]=sinesp;
                    i++;
                    linea=lector.readLine();
                }
            }
            //while, esto es pa sacar los espacios, queda en datos_temp[] lleno de nulls al final

            String datos[]=new String[i];
            System.out.println("");
            for (int j=0; j<datos_temp.length; j++){
                if (datos_temp[j]!=null){
                    datos[j]=datos_temp[j];
                    //System.out.println(datos[j]); //linea de debug
                    largo++;
                }
            }
            //for, esto es pa dejar en datos[] lo semiutil sin los nulls del final

            String data[][]=new String[400][3]; //aca tendré lo que de verdad sirve

            int alto=data.length;
            @SuppressWarnings("unused")
            int ancho=data[0].length;

            int l=0; // contador de datos[]

```

```

int k=0; //contador de data[0][], que es el util

String ld=datos[0]; //ld =linea_datos--> nombre muy largo

while(l<datos.length-1){
    if(ld.substring(0,6).equals("Length")){
        data[k][2]=ld.substring(40,46);//angulo
        //k++;
        l++;
        ld=datos[l];
    }
    else{
        if(ld.substring(0,6).equals("Delta ")){
            data[k][0]=ld.substring( 9,18); //x
            data[k][1]=ld.substring(30,39); //y
            k++;
            l++;
            ld=datos[l];
        }
        else{
            l++;
            ld=datos[l];
        }
    }
}
//del while, acá saco los datos útiles y los tiro a la matriz data[][]

data[k][0]=ld.substring( 9,18); //x que queda afuera del ciclo
data[k][1]=ld.substring(30,39); //y que queda afuera del ciclo

// *****LLENADO DEL TXT2EXCEL_MED_2 *****

int    alto_archivo2=0;
int ff2=0; //contador pa la parte negativa
for(int f=0; f<alto;f++){
    /*System.out.print(data[f][0]+ " ");
    System.out.print(data[f][1]+ " ");*/
    //System.out.println(data[f][2]);
    if(data[f][2]!=null && !data[f][2].substring(data[f][2].length()-3, data[f][2].length()).equals(".50")
    && !data[f][2].substring(data[f][2].length()-3, data[f][2].length()).equals(".00")){

        double posx=Double.parseDouble(data[f][0]);
        salida2.print(Double.toString(posx)+ " ");//x

        double posy=Double.parseDouble(data[f][1]);
        salida2.print(Double.toString(posy)+ " ");//y

        double posa=Double.parseDouble(data[f][2]);
        salida2.println(Double.toString(posa)); //angulo

        alto_archivo2++;
        ff2++;
    }
}
//System.out.println("FF antes del segundo for es "+ff);

for(int g=0; g<alto; g++){
    /*System.out.print(data[g][0]+ " ");
    System.out.print(data[g][1]+ " ");
    System.out.println(data[g][2]);*/
    if(data[g][2]!=null && !data[g][2].substring(data[g][2].length()-3, data[g][2].length()).equals(".50")
    && !data[g][2].substring(data[g][2].length()-3, data[g][2].length()).equals(".00") && Double.parseDouble(data[g][0])!=0.0){
        double negx=-1*Double.parseDouble(data[g][0]); // pa hacer el lado neg del perfil
        salida2.print(Double.toString(negx)+ " "); // -x

        double negy=Double.parseDouble(data[g][1]);
        salida2.print(Double.toString(negy)+ " "); //y

        double nega=Double.parseDouble(data[g][2]);
        salida2.println(Double.toString(nega)); //angulo

        alto_archivo2++;
        //String wa=Double.toString(neg);
    }
}

```

```

    }
}
for(int g=0; g<alto; g++){// este for de mierda es pal 90 grados de la wa
if(data[g][2]!=null && Double.parseDouble(data[g][0])==0.0){
double negx=Double.parseDouble(data[g][0]);
salida2.print(Double.toString(negx)+ " ");//x=0

double negy=Double.parseDouble(data[g][1]);
salida2.print(Double.toString(negy)+ " ");//y=algo

double nega=Double.parseDouble(data[g][2]);
salida2.println(Double.toString(nega));//angulo=90

alto_archivo2++;
//String wa=Double.toString(neg);
}
}
//System.out.println("El largo del archivo "+ n_corto+".2excel.txt es "+ alto_archivo1+ " lineas");
System.out.println("");
//System.out.println("LISTO, ARCHIVO GENERADO EN");
System.out.println("El largo del archivo "+ n_corto+".2excel_med_2.txt es "+ alto_archivo2+ " lineas");
lector.close();
//salida.close();
salida2.close();
linea2=lector2.readLine();
}
lector2.close();
//salida.close();
}
}
}

```

Función: planos_planos.m

Descripción: calcula inclinación y azimut de filas de celdas SunPower sobre Eolian I de acuerdo a cuadernas por las que pasan.

```
function [BETA,AZP]=planos_planos(lonjas, anchos)
```

```
clear BETA AZP
```

```
largo=length(lonjas);
```

```
for(i=1:largo)% desde cero hasta 92 las lonjas
```

```
lonja=lonjas(i);
```

```
ancho=anchos(i);
```

```
lonja=lonjas(i);
```

```
ancho=anchos(i);
```

```
auto2=evalin('base','auto');
```

```
a=auto2( (lonja)*169 + 1 ,:);
```

```
b=auto2( (lonja)*169 + 1+1 ,:);
```

```
c=auto2( (lonja+ancho)*169 + i ,:);
```

```
d=auto2( (lonja+ancho)*169 + 1+1 ,:);
```

```
[beta,AZp,area]=angulos(a,b,c);
```

```
 %[beta2,AZp2,area2]=angulos(b,c,d);
```

```
 %betaBET
```

```
 %AZp
```

```
 BETA(i)=beta;
```

```
 AZP(i)=AZp;
```

```
 %disp('sigt plano ahora')
```

```
 %BETA_D(i,lonja+1)=beta2;
```

```
 %AZP_D(i,lonja+1)=AZp2;
```

```
 %{'
```

```
 disp(['Lonja ',num2str(lonja+1),' lista'])BE
```

```
 disp(['Faltan ',num2str(93-lonja),' lonjas'])
```

```
 disp('Paciencia...')
```

```
 disp(' ')
```

```
 %}'
```

```
end
```

```
disp('TAMOS!!!!!!')
```

Función: planos_chuecos.m

Descripción: calcula inclinación y azimut de "filas" de celdas Spectrolab DJ sobre Eolian I de acuerdo a cuadernas por las que pasan y los puntos representativos de dichas cuadernas.

```
function [BETA, AZ]=planos_chuecos(cuad1, cuad2, pcuad1, pcuad2)
```

```

%function [BETA_O, BETA_E, AZP_O, AZP_E]=planos_chuecos(cuad1, cuad2, pcuad1, pcuad2)

%cuad1 y cuad2 son el número de la cuaderna que trae los puntos
% puntoscuad_i son son vectores que traen los puntos de la celda
% en la cuaderna i seguidos. Los puntos son la k-esima intersección desde
% el cad. Van desde cero (cresta de la cuaderna) u hasta +84 (este del
% auto); pal lado oeste hay que restar algo por ahí

clear BETA_E AZP_E BETA_O AZP_O
clear BETA AZ
largo=length(pcuad1);

auto2=evalin('base','auto');
for(i=1:largo-1)

    b=auto2( (cuad1-1)*169 + 85 - pcuad1(i) ,:);
    a=auto2( (cuad1-1)*169 + 85 - pcuad1(i+1) ,:);
    d=auto2( (cuad2-1)*169 + 85 - pcuad2(i) ,:);
    c=auto2( (cuad2-1)*169 + 85 - pcuad2(i+1) ,:);
    [beta,AZp,area]=angulos(a,b,d);
    BETA_E(i)=beta;
    AZP_E(i)=AZp;

    b2=auto2( (cuad1-1)*169 + 85 + pcuad1(i) ,:);
    a2=auto2( (cuad1-1)*169 + 85 + pcuad1(i+1) ,:);
    d2=auto2( (cuad2-1)*169 + 85 + pcuad2(i) ,:);
    c2=auto2( (cuad2-1)*169 + 85 + pcuad2(i+1) ,:);
    [beta2,AZp2,area2]=angulos(d2,b2,a2);
    BETA_O(largo-i)=beta2;
    AZP_O(largo-i)=AZp2;

end

BETA=[BETA_O, BETA_E];
AZ=[AZP_O,AZP_E];

disp('TAMOS!!!!!!')

```

Función: angulos.m

Descripción: calcula el azimut e inclinación de un plano en base a 3 puntos que pertenezcan a él

```

function [incl,giro, area]=angulos(a,b,c)

z_less=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 0 ];
n=cross(b-a,c-a); % normal al plano
n=n*((n(1,3)+eps)/(abs(n(1,3)+eps))); % normal al plano pa arriba
np=n*z_less; %componente de la normal sobre el plano del horizonte
norte=[-1 0 0]; %norte definido
ny=np(1,2)+eps; % el epssilon es por si es cero

signo=ny/abs(ny); %para ver donde cae el azimuth del plano

area=1/2*norm(n);
if(norm(n)==0)
    disp('n es')
    disp(n)
end

incl=90-acosd(dot(n,np)/(norm(n)*norm(np+eps)));
giro=-real(signo*acosd(dot(np,norte)/(norm(np+eps)*norm(norte))));

```

Script: dibuja_auto.m

Descripción: dibuja los puntos (x,y) en un plano y dibuja la versión tridimensional de la superficie de Eolian I en base a las coordenadas (x,y,z) de cada punto

```

tri = delaunay(x_auto,y_auto);
plot(x_auto,y_auto, '.')

h = trisurf(tri, x_auto, y_auto, z_auto);

```

Script: paneles_laterales.m

Descripción: calcula el comportamiento de los paneles laterales de la cúpula de Eolian (*Este y Oeste*)

```

for(i=1:9)

```

```

        paralelo2(6*i-5:6*i,L,i)
        disp(i)
        disp(' ')
    end
    paralelo2([55 56 57 58 59 64],L,10)
    disp(10)
    disp(' ')
    paralelo2([60 61 62 63 67 68],L,11)
    disp(11)
    disp(' ')
    paralelo2([65 66 69 70 71 72],L,12)
    disp(12)
    disp(' ')
    for(i=13:15)
        paralelo2(6*i-5:6*i,L,i)
        disp(i)
        disp(' ')
    end
serie2(1:15,L)

```

Script: posiciones_a300.m

Descripción: calcula los azimuts e inclinaciones de las celdas SunPower A300 sobre Eolian

```
[BETAs, AZPs]=planos_planos([ 1 3 5 8 10 13 15 18 20 22 25 27]-1,[2 2 2 2 3 2 2 2 2 3 2 2 ])
```

```
% anguos puerta
```

```
[BETAs, AZPs]=planos_planos([27 30 33 35 38 ]-1,[2 3 2 2 2 ])
```

```
% angulos lado contrario puerta
```

```
[BETAs, AZPs]=planos_planos([ 30 32 34 37 39]-1,[2 2 3 2 3])
```

```
%el resto del auto hacia atrás
```

```
[BETAs, AZPs]=planos_planos([42 44 47 49 52 54 56 59 61 64 66 68 71 74 76 78 80 83 85 87 90 92]-1,[2 2 2 2 2 3 2 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 ])
```

B Hojas de datos

SUNPOWER

A-300 SOLAR CELL MONO CRYSTALLINE SILICON

Physical Characteristics

Construction:	All-back contact
Dimensions:	125 mm x 125 mm - nominal
Thickness:	270 $\mu\text{m} \pm 40 \mu\text{m}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF TYPICAL CELL AT STANDARD TEST CONDITIONS (STC)

STC is defined as: irradiance of 1000W/m², spectrum AM 1.5g and cell temperature of 25°C

Open Circuit Voltage:	0.670 V
Short Circuit Current:	5.9 A
Maximum Power Voltage:	0.560 V
Maximum Power Current:	5.54 A
Rated Power:	3.1 W
Efficiency:	Up to 21.5 %

Temperature Coefficients

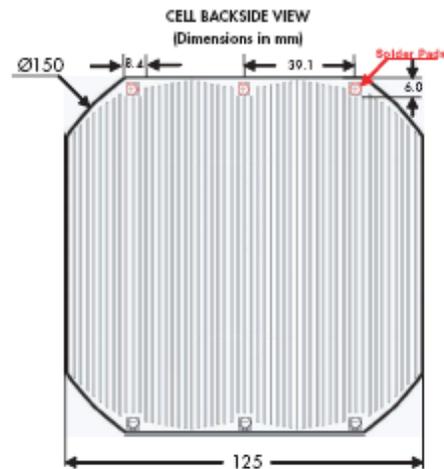
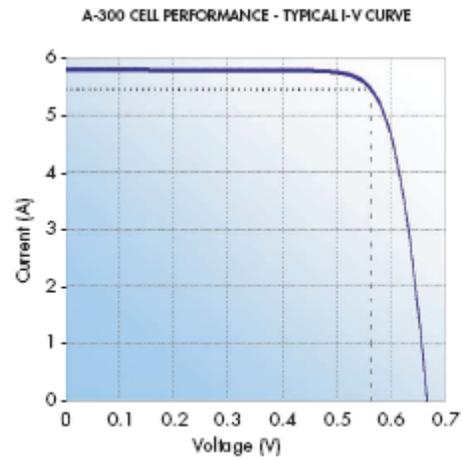
Voltage:	-1.9 mV / °C
Power:	-0.38 % / °C

ATTRIBUTES

- High efficiency reduces module assembly and system installation costs
- Uniform front appearance - no contact grid
- Back contact design simplifies circuit assembly
- Lower temperature coefficient improves energy delivery

PACKAGING

- Cells are packed in boxes of 1000 each; grouped in shrink-wrapped stacks of 50 with interleaving
- Twelve boxes are packed in a water-resistant "Master Carton" containing 12,000 cells suitable for air transportation



©March 2005 SunPower Corporation. All rights reserved. Specifications included in this document are subject to change without notice.

Document# 70-0306 Rev-04

SunPower Corporation®
1.877.786.0123 Email: sales@sunpowercorp.com www.sunpowercorp.com
A Subsidiary of Cypress Semiconductor

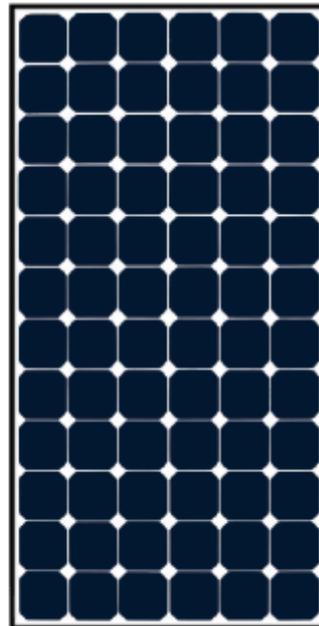
SPR-210 HIGH EFFICIENCY PV MODULE

The SunPower SPR-210 module is designed for use in on-grid residential and commercial systems where the highest module efficiency and energy delivery is critical. Utilizing 72 series-connected A-300 solar cells, the SPR-210 delivers extremely high power density with total module efficiency approaching 17%. Reduced voltage-temperature coefficient, exceptional low-light performance and high sensitivity to light across the entire solar spectrum mean maximum yearly energy harvest.

SunPower modules—innovative design, proven materials, outstanding performance.

FEATURES & BENEFITS

- Unique all-back-contact solar cells with conversion efficiency up to 21.5%
- Low voltage-temperature coefficient enhances high-temperature operation
- Exceptional low-light performance and high sensitivity to light across the entire solar spectrum maximize yearly energy delivery
- Highest quality 4mm-thick high-transmission tempered glass provides enhanced stiffness and impact resistance
- Superior aesthetics - back contact cells with no front side gridlines and a black anodized frame
- Aerospace style cell interconnects with in-plane strain relief provide extremely high reliability
- Advanced EVA encapsulation system with multi-layer backsheet meets the most stringent safety requirements for high-voltage operation
- A sturdy, black anodized aluminum frame allows modules to be easily roof-mounted with a variety of standard mounting systems



SPR-210 HIGH EFFICIENCY PV MODULE
Unprecedented power density and exceptional energy production per peak kW.

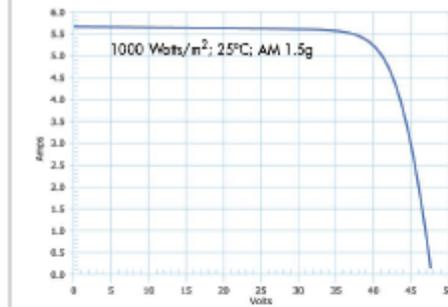
SUNPOWER

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STANDARD TEST CONDITIONS (STC)

STC is defined as: irradiance of 1000W/m², spectrum AM 1.5g and cell temperature of 25°C

Peak Power ^{1,2}	P_{max}	210W
Rated Voltage	V_{mp}	40.0V
Rated Current	I_{mp}	5.25A
Open Circuit Voltage	V_{oc}	47.8V
Short Circuit Current	I_{sc}	5.65A
Series Fuse Rating		15A
Maximum System Voltage		600V (UL)
		1000V (IEC)
Temperature Co-efficients	Power	-0.38%/°C
	Voltage	-136.8mV/°C
	Current	2.2mA/°C
Module Efficiency		16.9%
PTC Rating		190.9W

IV CURVE



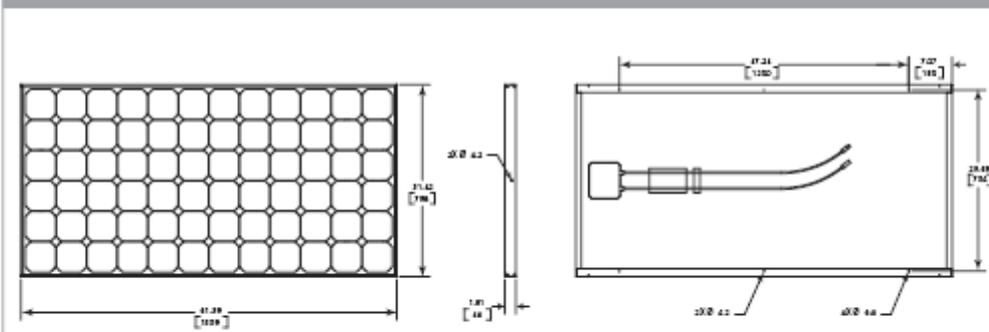
¹Peak Power Tolerance: +/- 5%

²Power guaranteed for 25 years. See SunPower Limited Warranty for details.

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Length (mm) x Width (mm)	1559 x 798
Thickness, including junction box (mm)	46
Weight (kg)	16

DIMENSIONS



© December 2004 SunPower Corporation. All rights reserved. Specifications included in this document are subject to change without notice.

Document# 79-8089 Rev01

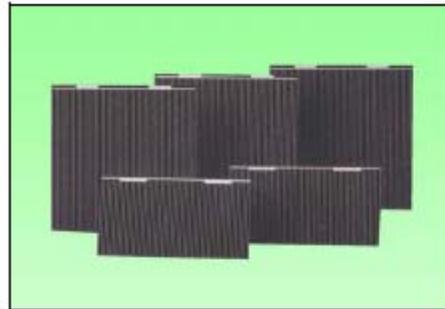
SunPower Corporation®
 1.877.786.0123 Email: sales@sunpowercorp.com www.sunpowercorp.com
 A Subsidiary of Cypress Semiconductor



GalnP₂/GaAs/Ge Dual Junction Solar Cells

Features

- High efficiency n/p design
 - Integral bypass diode protection
 - Transparent insertion into existing systems
- High volume production capability:
 - Currently delivering 21.5% minimum average efficiency solar cells



Product Description

Substrate	Germanium
Method of GaAs Growth	Metal Organic Vapor Phase Epitaxy
Device Design	Monolithic, two terminal dual junction, n/p GalnP ₂ and GaAs solar cells interconnected with a tunnel junction
Sizes	Up To 30 cm ²
Assembly Method	Multiple techniques including soldering, welding, thermocompression, or ultrasonic wire bonding
Integral Diode	Si diode integrated into recess on back side

Note: Other Variations Are Available Upon Request

Heritage

- More than 800 kW of multi-junction cells produced
- More than 225 kW of multi-junction arrays on orbit
- 1 MW annual capacity - cells, panels & arrays
- On orbit performance for multi-junction solar cells validated to ± 1.5% of ground test results

ISO9001:2000
REGISTERED

SPECTROLAB

A BOEING COMPANY

Spectrolab Inc. 12500 Gladstone Avenue, Sylmar, California 91342 USA • Phone: 818.365.4611 • Fax: 818.361.5102

Typical Electrical Parameters (AMO (135.3 mW/cm²) 28°C, Bare Cell)

J_{sc}	= 15.05 mA/cm ²
J_{mp}	= 14.15 mA/cm ²
$J_{sc,1000\text{nm}}$	= 14.20 mA/cm ²
V_{oc}	= 2.350 V
V_{mp}	= 2.085 V
$V_{1000\text{nm}}$	= 2.050 V
CF	= 0.83
ER _{total}	= 21.5%
ER _{sp}	= 21.8%

Radiation Degradation (Fluence 1MeV Electrons/cm²)

Parameters	1x10 ¹⁴	5x10 ¹⁴	1x10 ¹⁵
Imp/Imp ₀	1.00	0.96	0.92
Vmp/Vmp ₀	0.96	0.93	0.91
Pmp/Pmp ₀	0.96	0.89	0.83

Thermal Properties

Solar Absorptance= 0.92 (Ceria Doped Microsheet)
Emissance (Normal)= 0.85 (Ceria Doped Microsheet)

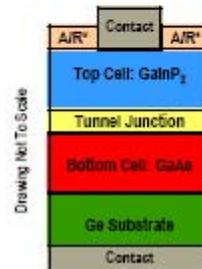
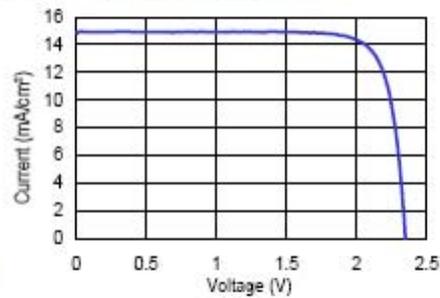
Weight

84 mg/cm² (Bare) @ 140 μm (5.5 mil) Thickness
Thickness of 175 μm typical with weight equivalence of a 140 μm thick cell.

Temperature Coefficients

Parameters	BOL	1x10 ¹⁵ (1 MeV e/cm ²)
Jmp (μA/cm ² /°C)	8	13
Jsc (μA/cm ² /°C)	10	12
Vmp (mV/°C)	-4.6	-5.0
Voc (mV/°C)	-4.2	-4.8

Typical IV Characteristic AMO (135.3 mW/cm²) 28°C, Bare Cell



Drawing Not To Scale

*A/R: Anti-Reflective Coating

ISO9001:2000
REGISTERED
SPECTROLAB

A BOEING COMPANY

The information contained on this sheet is for reference only.
Specifications subject to change without notice. 5/2/2002

Estación Meteorológica DGF

Ubicación actual
Terraza del Departamento de Geofísica / Universidad de Chile
Blanco Encalada 2002. Santiago – Chile
33.452 S / 70.662 W / 533 msnm / 39 mss

1. Estación meteorológica automática
2. Radiómetro multi-espectral e Índice de Radiación Ultravioleta en Santiago

1. Estación meteorológica automática

Intervalo de muestreo: 30 segundos / Intervalo de registro: 30 min

VARIABLES/INSTRUMENTACIÓN

Variable	Instrumento	Marca / Modelo	Observaciones
Temperatura del aire (C)	Higro-termómetro de estado sólido	CS-500 Campbell Sci.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro
Humedad relativa (%)	Higro-termómetro de estado sólido	CS-500 Campbell Sci.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro
Radiación solar (W/m ²)	Piranómetro silicón	LI200X Campbell Sci.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro
Presión atmosférica (hPa)	Barómetro estado sólido	PTA-127 Vaisala	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro
Precipitación (mm)	Pluviómetro de vascula	TE525mm Texas Instruments	Se reporta valor acumulado en el intervalo de registro
Viento (Magnitud en m/s, dirección en grados sex.)	Anemómetro+veleta	03001 Wind Sentry Wind Set, Young.	Se reporta valor promedio dentro de último intervalo de registro
	Almacenamiento y procesamiento inicial de datos	Data-logger CR10X-2M, Campbell SCI	

2. Radiómetro multi-espectral e Índice de Radiación Ultravioleta en Santiago

Intervalo de muestreo/registro: 1 minuto

VARIABLES/INSTRUMENTACIÓN

Variable	Instrumento	Marca / Modelo	Observaciones
Radiación en cuatro canales: 305, 320, 340 y 380 nm	Radiómetro multi-espectral	Biospherical Scientific Instrument Modelo GUV 511.	Ancho nominal de banda: 10 nm 1 nm = 10 ⁻⁹ m

C Simulaciones adicionales

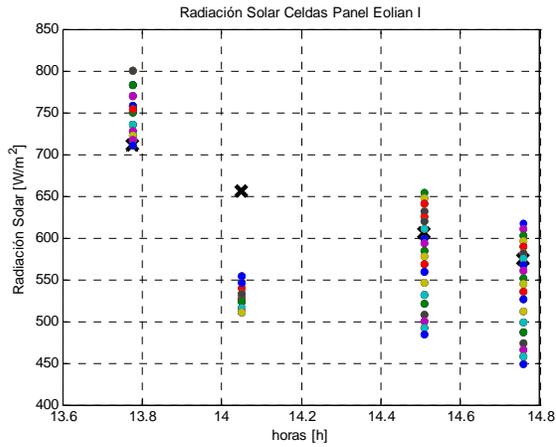
C.1 Simulación de temperatura Sección “5.6.3 Temperatura celda solar” Panel 1, $Az_{Auto}=57^\circ$

Celda	T[°C]			Celda	T[°C]			Celda	T[°C]		
	Mod.	Med.	Dif.		Mod.	Med.	Dif.		Mod.	Med.	Dif.
1	53,39	55,00	-1,61	29	51,74	50,00	1,74	58	50,89	46,00	4,89
2	53,39	55,00	-1,61	30	51,74	50,00	1,74	59	50,89	45,00	5,89
3	53,39	55,00	-1,61	31	51,74	50,00	1,74	60	50,89	46,00	4,89
4	53,39	55,00	-1,61	32	51,74	50,00	1,74	61	50,58	45,00	5,58
5	53,39	55,00	-1,61	33	51,74	50,00	1,74	62	50,58	45,00	5,58
6	53,39	55,00	-1,61	34	51,74	50,00	1,74	63	50,58	48,00	2,58
7	53,39	55,00	-1,61	35	51,74	50,00	1,74	64	50,58	44,00	6,58
8	52,68	54,00	-1,32	36	51,74	50,00	1,74	65	50,58	48,00	2,58
9	52,68	54,00	-1,32	37	51,40	47,00	4,40	66	50,58	48,00	2,58
10	52,68	54,00	-1,32	38	51,40	47,00	4,40	67	50,58	48,00	2,58
11	52,68	54,00	-1,32	39	51,40	49,00	2,40	68	50,58	48,00	2,58
12	52,68	54,00	-1,32	40	51,40	51,00	0,40	69	50,38	45,00	5,38
13	52,68	54,00	-1,32	41	51,40	44,00	7,40	70	50,38	48,00	2,38
14	52,68	54,00	-1,32	42	51,40	46,00	5,40	71	50,38	45,00	5,38
15	52,68	54,00	-1,32	43	51,40	45,00	6,40	72	50,38	45,00	5,38
16	52,68	54,00	-1,32	44	51,40	46,00	5,40	73	50,38	45,00	5,38
17	52,19	53,00	-0,81	45	51,58	44,00	7,58	74	50,38	48,00	2,38
18	52,19	53,00	-0,81	46	51,58	51,00	0,58	75	50,38	48,00	2,38
19	52,19	53,00	-0,81	47	51,58	49,00	2,58	76	50,38	48,00	2,38
20	52,19	53,00	-0,81	48	51,58	51,00	0,58	77	50,15	48,00	2,15
21	52,19	53,00	-0,81	49	51,58	44,00	7,58	78	50,15	48,00	2,15
22	52,19	53,00	-0,81	50	51,58	46,00	5,58	79	50,15	48,00	2,15
23	52,19	53,00	-0,81	51	51,58	45,00	6,58	80	50,15	48,00	2,15
24	52,19	53,00	-0,81	52	51,58	46,00	5,58	81	50,15	48,00	2,15
25	52,19	53,00	-0,81	53	50,89	44,00	6,89	82	50,15	48,00	2,15
26	52,19	53,00	-0,81	54	50,89	47,00	3,89	83	49,92	48,00	1,92
27	51,74	50,00	1,74	55	50,89	49,00	1,89	84	49,92	48,00	1,92
28	51,74	50,00	1,74	56	50,89	51,00	-0,11	85	49,92	48,00	1,92
				57	50,89	44,00	6,89				

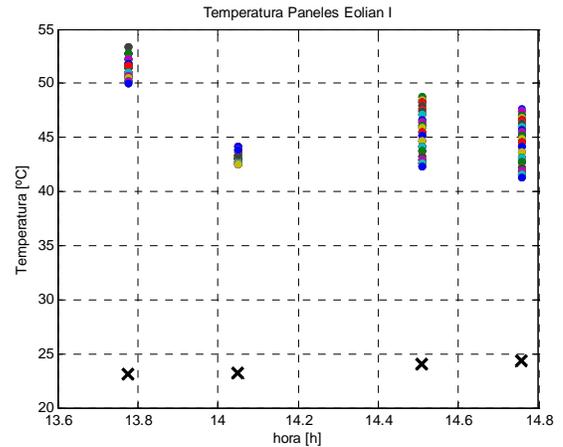
C.2 Simulación de temperatura Sección “5.6.3 Temperatura celda solar” Panel 4, $Az_{Auto}=147^\circ$

Celda	T[°C]			Celda	T[°C]			Celda	T[°C]		
	Mod.	Med.	Dif.		Mod.	Med.	Dif.		Mod.	Med.	Dif.
1	35,96	39,00	-3,04	29	35,95	43,00	-7,05	58	35,93	39,00	-3,07
2	35,96	39,00	-3,04	30	35,95	38,00	-2,05	59	35,93	39,00	-3,07
3	35,96	39,00	-3,04	31	35,95	38,00	-2,05	60	35,93	39,00	-3,07
4	35,96	39,00	-3,04	32	35,95	38,00	-2,05	61	35,93	39,00	-3,07
5	35,96	39,00	-3,04	33	35,95	38,00	-2,05	62	35,93	39,00	-3,07
6	35,96	39,00	-3,04	34	35,95	38,00	-2,05	63	35,96	38,00	-2,04
7	35,96	39,00	-3,04	35	35,95	40,00	-4,05	64	35,96	38,00	-2,04
8	35,96	39,00	-3,04	36	35,95	40,00	-4,05	65	35,96	38,00	-2,04
9	35,96	39,00	-3,04	37	35,95	40,00	-4,05	66	35,96	38,00	-2,04
10	35,96	39,00	-3,04	38	35,95	40,00	-4,05	67	35,96	38,00	-2,04
11	35,96	39,00	-3,04	39	35,95	40,00	-4,05	68	35,96	38,00	-2,04
12	35,96	39,00	-3,04	40	35,95	39,00	-3,05	69	35,96	38,00	-2,04
13	35,96	39,00	-3,04	41	35,95	39,00	-3,05	70	35,96	38,00	-2,04
14	35,96	39,00	-3,04	42	35,95	39,00	-3,05	71	35,98	38,00	-2,02
15	35,95	39,00	-3,05	43	35,95	39,00	-3,05	72	35,98	38,00	-2,02
16	35,95	39,00	-3,05	44	35,95	39,00	-3,05	73	35,98	38,00	-2,02
17	35,95	39,00	-3,05	45	35,94	38,00	-2,06	74	35,98	38,00	-2,02
18	35,95	39,00	-3,05	46	35,94	38,00	-2,06	75	35,98	38,00	-2,02
19	35,95	39,00	-3,05	47	35,94	38,00	-2,06	76	35,98	38,00	-2,02
20	35,95	37,00	-1,05	48	35,94	38,00	-2,06	77	35,98	38,00	-2,02
21	35,95	37,00	-1,05	49	35,94	38,00	-2,06	78	35,98	38,00	-2,02
22	35,95	37,00	-1,05	50	35,94	39,00	-3,06	79	35,97	38,00	-2,03
23	35,95	37,00	-1,05	51	35,94	39,00	-3,06	80	35,97	38,00	-2,03
24	35,95	37,00	-1,05	52	35,94	39,00	-3,06	81	35,97	38,00	-2,03
25	35,95	43,00	-7,05	53	35,94	39,00	-3,06	82	35,97	38,00	-2,03
26	35,95	43,00	-7,05	54	35,93	39,00	-3,07	83	35,97	38,00	-2,03
27	35,95	43,00	-7,05	55	35,93	39,00	-3,07	84	35,97	38,00	-2,03
28	35,95	43,00	-7,05	56	35,93	39,00	-3,07	85	35,97	38,00	-2,03
				57	35,93	39,00	-3,07				

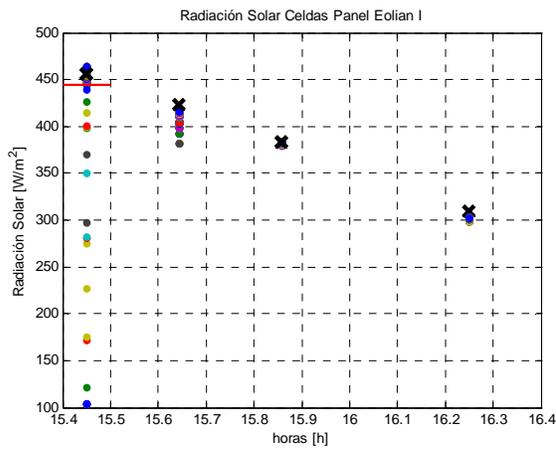
C.3 Simulación paneles Sección “7.3 Estado paneles solares *Eolian P*”



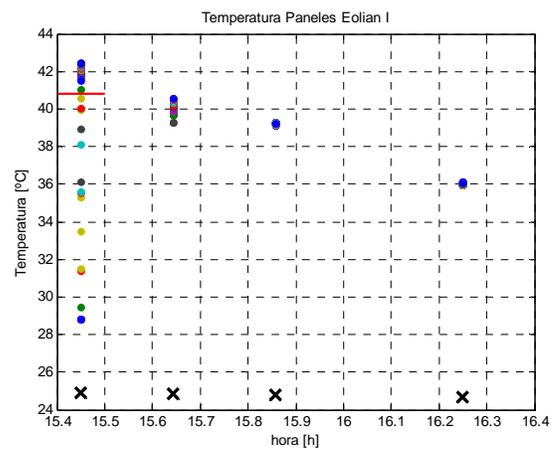
AZIMUT 57



AZIMUT 57

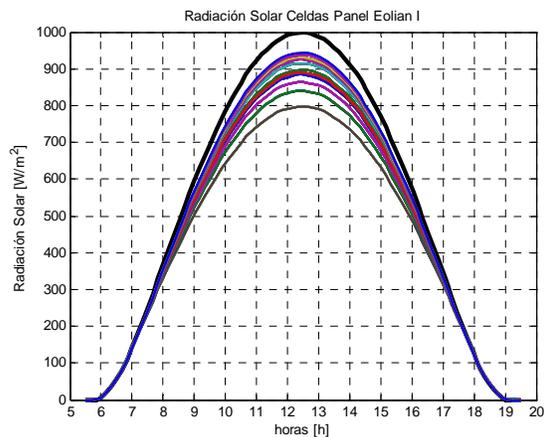


AZIMUT 147

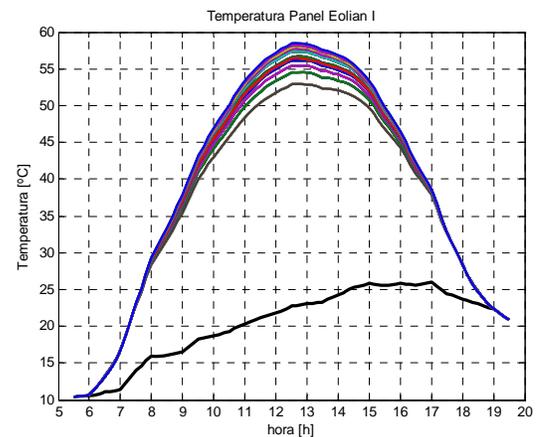


AZIMUT 147

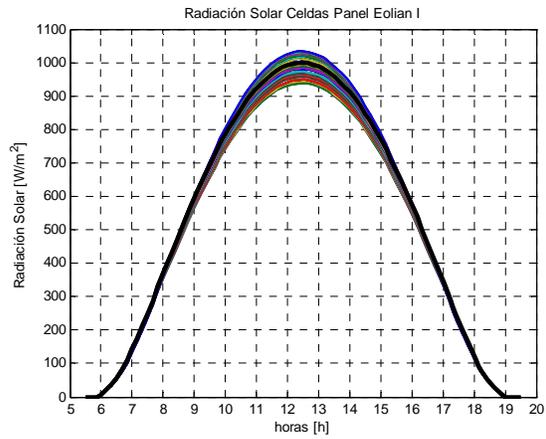
C.4 Simulaciones diarias Sección “7.1 Resultados del modelo integrado”



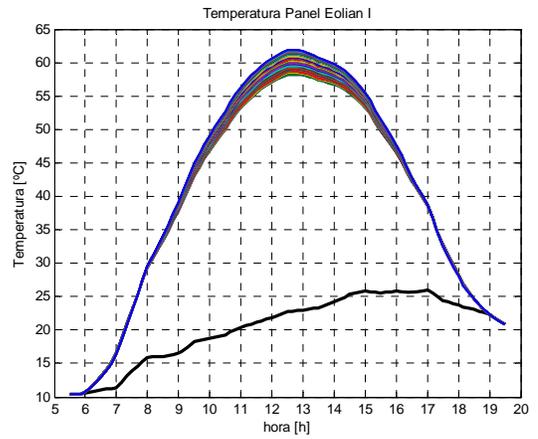
PANEL 1



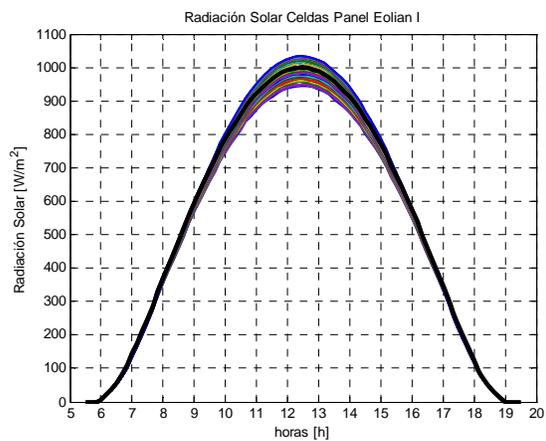
PANEL 1



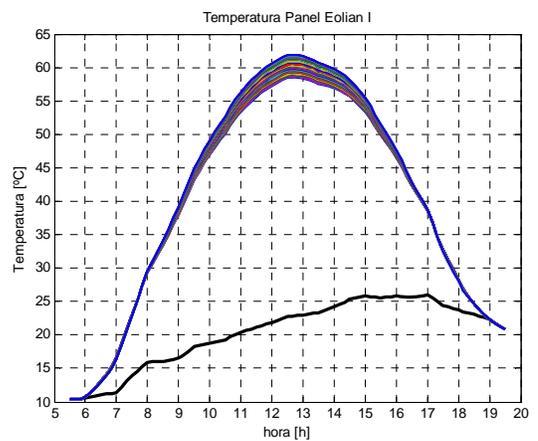
PANEL 2



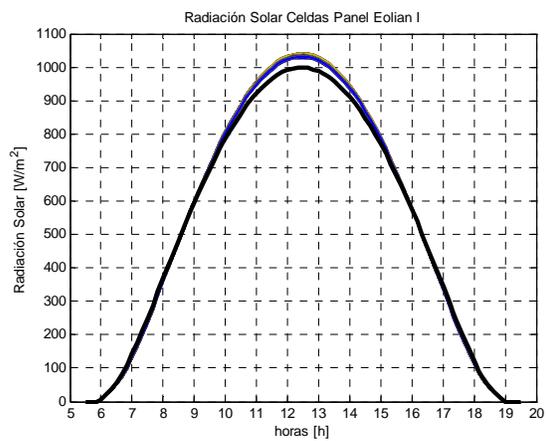
PANEL 2



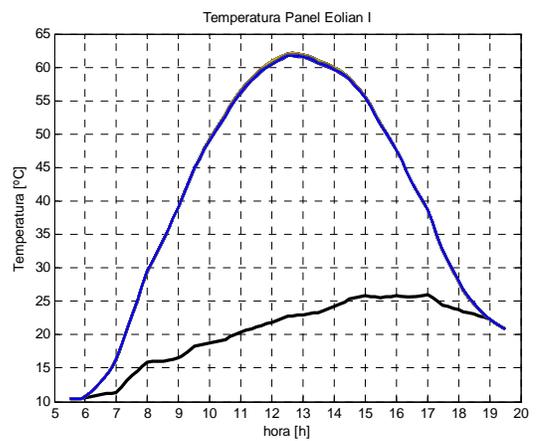
PANEL 3



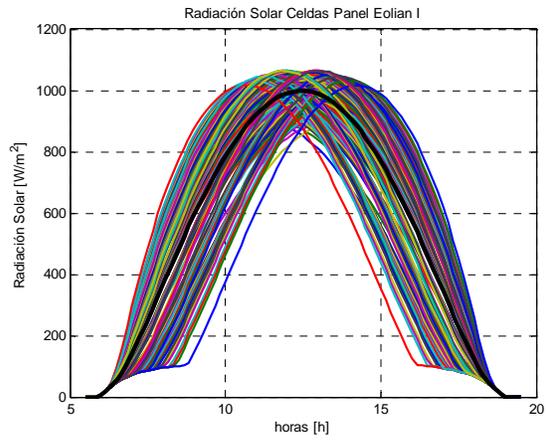
PANEL 3



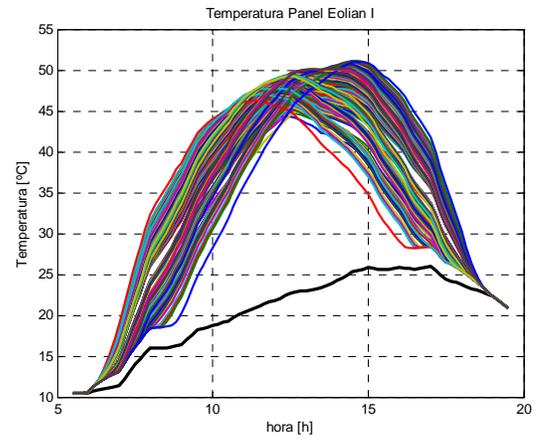
PANEL 4



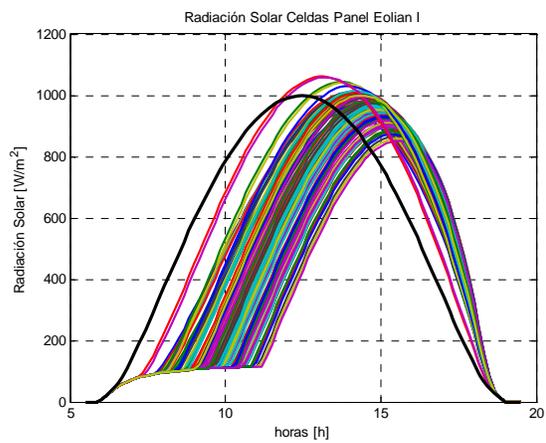
PANEL 4



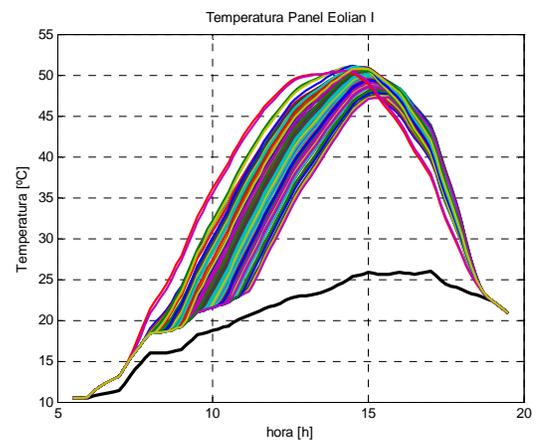
ZENIT



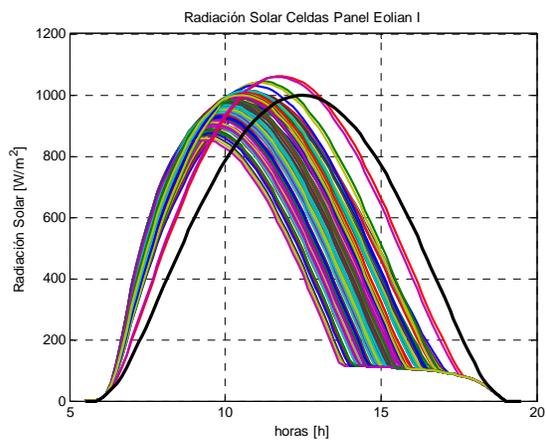
ZENIT



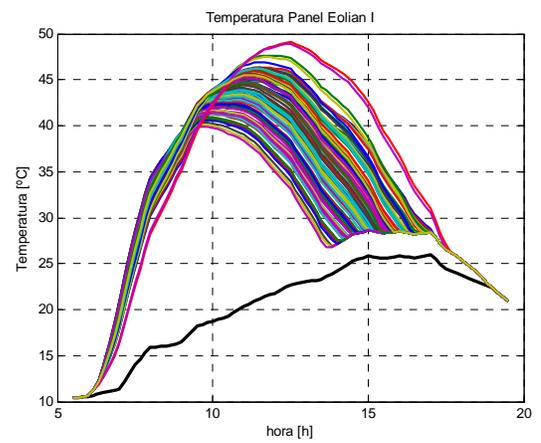
ESTE



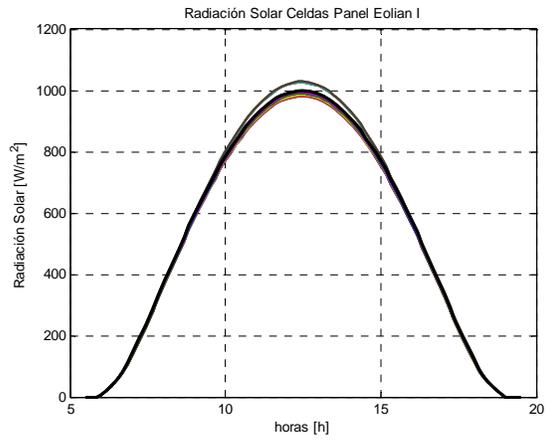
ESTE



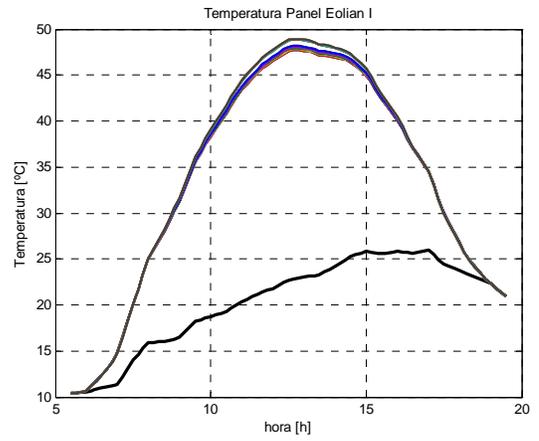
OESTE



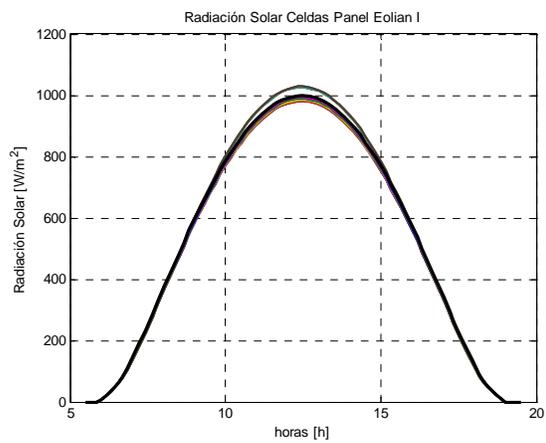
OESTE



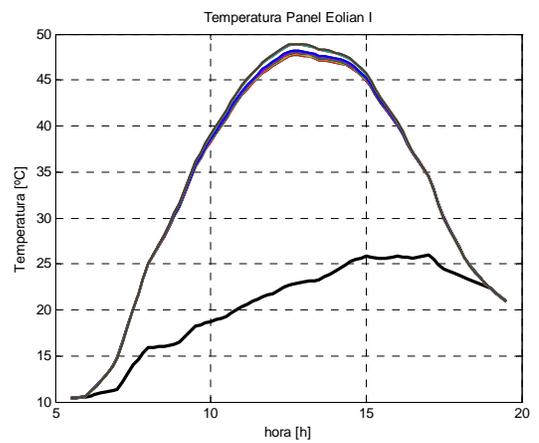
ESTE PLANO



ESTE PLANO



WESTE PLANO



WESTE PLANO

D Otros

D.1 Corrección por temperatura característica I-V celda solar

En base el modelo de una celda solar propuesto en [88], es posible realizar una corrección por temperatura en la ecuación (5.5) que entrega la característica I-V de una celda solar. El autor plantea que la tensión de circuito abierto V_{OC} viene dada por (D.1).

$$V_{OC} = k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{I_{Ph}}{I_0} + 1 \right) + \beta_V \cdot (T - T_{ref}) \quad (D.1)$$

Reordenando los términos de dicha ecuación se tiene (D.2).

$$0 = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{OC} - \beta_V \cdot (T - T_{ref})}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (D.2)$$

Considerando que en la ecuación (D.2), se “deshace” la evaluación para circuito abierto, es decir, se reincorporan en ella los términos que contienen corriente de la ecuación (5.5), se tiene (D.3).

$$I = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{(V + R_S \cdot I) - \beta_V \cdot (T - T_{ref})}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{Sh}} \quad (D.3)$$

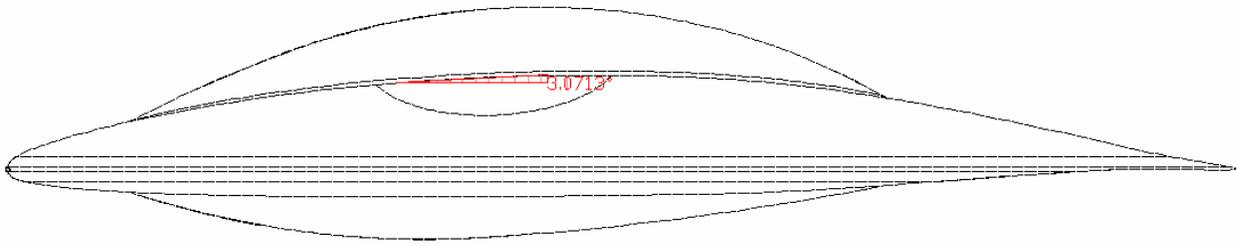
Finalmente, incluyendo el factor de calidad del diodo en la ecuación (D.3), se llega a (D.4), que corresponde a la ecuación (5.5) corregida por temperatura. En rojo se indica la variación respecto de (5.5), que además se presenta una vez más para apreciar el cambio que se ha realizado de manera más clara.

$$I = I_{Ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{(V - \beta_V \cdot (T - T_{ref}) + R_S \cdot I) \cdot q}{n \cdot k \cdot T} - 1} \right) - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{Sh}} \quad (D.4)$$

$$I = I_{Ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{(V + R_S \cdot I) \cdot q}{n \cdot k \cdot T} - 1} \right) - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{Sh}} \quad (5.5)$$

D.2 Inclinación Puerta

En base al modelo en AutoCad de Eolian I se obtiene la siguiente figura, que indica la inclinación de la puerta de Eolian I respecto de la horizontal, teniéndose un ángulo de valor $\beta=3,07^\circ$.



D.3 Correspondencia nombre numérico con nombre algebraico Cuadernas

A 1	T 20	AM 39	BF 58	BY 77
B 2	U 21	AN 40	BG 59	BZ 78
C 3	V 22	AO 41	BH 60	CA 79
D 4	W 23	AP 42	BI 61	CB 80
E 5	X 24	AQ 43	BJ 62	CC 81
F 6	Y 25	AR 44	BK 63	CD 82
G 7	Z 26	AS 45	BL 64	CE 83
H 8	AA 27	AT 46	BM 65	CF 84
I 9	AB 28	AU 47	BN 66	CG 85
J 10	AC 29	AV 48	BO 67	CH 86
K 11	AD 30	AW 49	BP 68	CI 87
L 12	AE 31	AX 50	BQ 69	CJ 88
M 13	AF 32	AY 51	BR 70	CK 89
N 14	AG 33	AZ 52	BS 71	CL 90
O 15	AH 34	BA 53	BT 72	CM 91
P 16	AI 35	BB 54	BU 73	CN 92
Q 17	AJ 36	BC 55	BV 74	CO 93
R 18	AK 37	BD 56	BW 75	CP 94
S 19	AL 38	BE 57	BX 76	

D.4 Ejemplo de salida datos AutoCad

El comando *list* de AutoCad genera archivos de salida con el siguiente formato, los cuales son procesados con la rutina desarrollada en java.

Command: _list
Select objects: 1 found

Select objects: 1 found, 2 total

Select objects:

```

LINE Layer: "med_princ"
  Space: Model space
  Color: BYLAYER Linetype: "CONTINUOUS"
  LineWeight: 0.00 mm
  Handle = 3a6
from point, X= 681.6134 Y= 172.5910 Z= 0.0000
to point, X=1347.9709 Y= 283.6841 Z= 0.0000

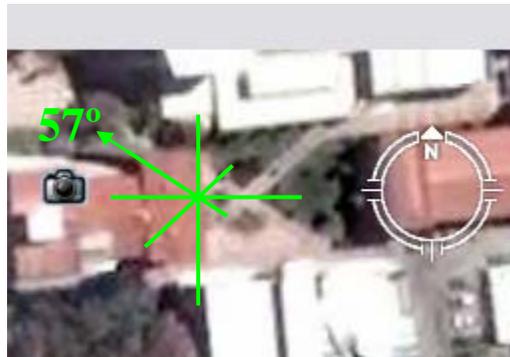
```

Length = 675.5546, Angle in XY Plane = 9.47
 Delta X = 666.3576, Delta Y = 111.0931, Delta Z = 0.0000

LINE Layer: "med_princ"
 Space: Model space
 Color: BYLAYER Linetype: "CONTINUOUS"
 LineWeight: 0.00 mm
 Handle = 3a4
 from point, X= 681.6134 Y= 172.5910 Z= 0.0000
 to point, X= 681.6134 Y= 283.6841 Z= 0.0000
 Length = 111.0931, Angle in XY Plane = 90.00
 Delta X = 0.0000, Delta Y = 111.0931, Delta Z = 0.0000

D.5 Elección y determinación ángulo Az_{Auto}

Mediante el software Google Earth, se ha determinado el azimut del camino ubicado en unos de los patios de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile como se ve en la figura.



Para la realización de las pruebas, el vehículo se ha alineado con el camino, teniendo $Az_{Auto}=57^\circ$. Además, respecto de dicho camino se ha rotado el auto en 90° en sentido antihorario, por lo que también se considera $Az_{Auto}=147^\circ$.

D.6 Largo cables de interconexión paneles Eolian I

Se presenta el largo de los cables de interconexión de los paneles de Eolian en la siguiente tabla, junto con la resistencia asociada a ellos.

Panel	Largo cableado [m]				Resistencia Cable [$m\Omega$]	Resistencia por celda [$m\Omega$ /celda]
	12 AWG	14 AWG	18 AWG	20 AWG		
Panel 1	26,75	4			168,71	1,98
Panel 2	38,5				196,15	2,31
Panel 3	24,9				126,86	1,49
Panel 4	26,5				135,01	1,59
Zenit			8,5		174,17	1,38
Este			6,5		133,19	1,48
Oeste			8		163,92	1,82
Este P.				5	162,46	7,74
Oeste P.				6	194,95	9,28

D.7 Porcentaje de sombra por celda en simulación *Panel 2*

1	2				
3	4	5	6		
7	8	9	10		
11	12	13	14		
	15	16	17		
18	19	20	21		
22	23	24	25		
26	27	28	29		
30	31	32	33		
34	35	36	37		
38	39	40	41		
42	43	44	45		
46	47	48	49	50	
51	52	53	54	55	
56	57	58	59	60	
61	62	63	64	65	
66	67	68	69	70	
71	72	73	74	75	
76	77	78	79	80	81
	82	83	84	85	

Numeración Celdas Panel 2

0	0				
0	0	0	50		
0	0	0	80		
0	0	10	100		
	0	15	100		
0	0	15	100		
0	0	15	100		
0	0	45	100		
0	0	30	100		
0	0	5	95		
0	0	0	65		
0	0	0	50		
0	0	0	25	100	
0	0	0	0	80	
0	0	0	0	50	
0	0	0	0	10	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	

Porcentaje de sombra Celdas Panel 2