



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELAMIENTO TÉRMICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO CON DISIPADOR DE CALOR OPERANDO EN EL NORTE DE CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

SEBASTIÁN ANDRÉS MAGGI SILVA

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN
GUILLERMO JIMÉNEZ ESTÉVEZ

SANTIAGO DE CHILE
2013

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL MECÁNICO.
POR: SEBASTIÁN A. MAGGI S.
FECHA: 12/09/2013
PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN

MODELAMIENTO TÉRMICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO CON DISIPADOR DE CALOR BAJO CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DEL NORTE DE CHILE.

El desarrollo de la conversión de energía desde fuentes renovables no convencionales forma parte fundamental de la investigación y desarrollo de nuestro presente. Una de las tecnologías más utilizadas es la solar fotovoltaica, cuyo objetivo es convertir directamente la energía solar proveniente del sol en energía eléctrica para ser utilizada por sus consumidores. La utilización de módulos fotovoltaicos (PV) para la conversión de energía solar ha sido un gran avance de la ingeniería moderna, pero aún posee importantes puntos pendientes en su desarrollo. La dependencia del rendimiento con la temperatura de la celda, convierte a este parámetro en uno de los más relevantes a la hora de diseñar mejoras en el desempeño de un panel fotovoltaico operando en condiciones reales. Mientras mayor sea la temperatura que alcance el panel, menor será su rendimiento eléctrico final, por lo que es de gran interés poder controlar el desempeño frente a condiciones externas mediante algún tipo de disipador de calor.

El estudio presentado tiene por objetivo general presentar un estudio acerca de la temperatura al interior de un panel fotovoltaico con disipador de calor mediante análisis teórico y simulaciones computacionales para un módulo sometido a condiciones atmosféricas reales del norte de nuestro país. El objetivo principal es analizar la distribución de temperatura en el módulo fotovoltaico y la influencia de la presencia del dispositivo disipador de calor en el aumento de la eficiencia del panel fotovoltaico, mediante la caracterización de la resistencia térmica que posee el conjunto panel-disipador.

Para conseguir el objetivo planteado, se realiza un análisis teórico de la temperatura en el interior del panel fotovoltaico mediante un balance energético (definición de la temperatura de celda en función de la radiación incidente, pérdidas por radiación y convección al ambiente, y pérdidas por disipación de calor y por generación de energía) para un modelo simplificado. A continuación se realizan simulaciones computacionales mediante software especializado en análisis por elementos y volúmenes finitos (ANSYS Mechanical) para poder realizar un análisis térmico en tres dimensiones. Luego de obtener resultados numéricos que permitan caracterizar la temperatura al interior del panel se procede a optimizar el diseño del disipador de calor mediante simulaciones con diseño paramétrico (ANSYS APDL) para poder caracterizar la influencia de la geometría del disipador en la resistencia térmica. Finalmente, se realiza un análisis cuantitativo del incremento en la eficiencia del panel en base a los resultados obtenidos por las distintas simulaciones.

La memoria se desarrolla en el contexto del proyecto FONDECYT N° 11110235 “*Charge carrier flow hydrodynamics in PN junctions with applications to photovoltaic solar cells*” junto con el trabajo de otros memoristas y tesis.

*“No se trata de tener el mundo a tus pies,
Sino de dejar una huella en el mundo”*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y a mis abuelos, porque todo lo que soy y lo que he logrado ha sido gracias a ustedes, a su apoyo y a su amor. La responsabilidad y la constancia, valores que me han permitido llegar hasta este punto en mi vida los aprendí en mi hogar, y ese hogar son ustedes.

A mi profesor guía, Williams Calderón, gracias por la confianza depositada en mí y en mi trabajo; por su valiosa guía y los consejos a lo largo de este año que permitieron desarrollar esta memoria de manera íntegra.

A los profesores del departamento de Mecánica de los cuales fui profesor auxiliar por muchos años, Marco Antonio Béjar, Alejandro Ortiz y Juan Cristóbal Zagal, gracias por creer en mis capacidades y por permitirme ser parte del proceso de aprendizaje de tantos alumnos y compañeros.

A mis amigos y compañeros mecánicos, Rodrigo, Sebastián, Francisco, Luis, Christian, Juan Carlos, Sergio, Valentina, Teresita, Javier, Germán, Joaquín, Alonso, Andrés: Gracias totales cabros! Gracias por la compañía a lo largo de este ciclo, la buena onda, las risas, los carretes, las noches de estudio, estos años de ingeniería mecánica no habrían sido lo mismo sin ustedes. Me llevo valiosos recuerdos de cada uno y les deseo suerte a todos en sus proyectos personales.

Al resto del departamento de Mecánica, amigos de otras generaciones, a mis compañeros de oficina, a los profesores, a los funcionarios, en especial a las secretarias del 4º piso, Maricarmen y María Eugenia, gracias por siempre tener una palabra de aliento, por la compañía a lo largo de este último año, por los cigarros compartidos, por hacer del proceso del trabajo de título un momento agradable y ameno, gracias por los momentos compartidos, mucho éxito en los años venideros y siempre pueden contar conmigo para lo que necesiten.

A mis amigos, mis compañeros de vida, mis amigos del colegio, gracias “Coalición Curicó” por apoyarme desde hace tanto tiempo, a las nuevas amistades que he conocido este maravilloso año 2013, gracias por ser parte importante de mi desarrollo emocional y por dejarme ser parte de sus vidas, para ellos mis más sinceros agradecimientos; nada de lo que escriba en unas líneas puede capturar todo lo que significan para mí. Gracias por el regalo de la amistad.

Por último, quiero agradecer a mis hermanos, Francisco y José, por servirme de inspiración para querer siempre ser una mejor persona, por ellos y para ellos, que sepan que siempre podan contar con su hermano mayor que los ama y que siempre estará ahí para apoyarlos en lo que necesiten a lo largo de sus vidas.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1	Paneles Fotovoltaicos.....	1
1.2	Motivación.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo general.....	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.4	Alcances.....	3
2.	Antecedentes Teóricos.....	4
2.1	Energía Solar.....	4
2.1.1	El Sol.....	4
2.1.2	Espectro solar.....	5
2.1.3	La luz.....	6
2.2	Celdas Solares.....	8
2.2.1	Tecnología.....	8
2.2.2	Tipos de celdas fotovoltaicas.....	9
2.2.3	Paneles Fotovoltaicos.....	9
2.2.4	Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica.....	10
2.2.5	Modelo físico.....	11
2.2.6	Influencia de la temperatura.....	12
2.3	Transferencia de Calor.....	14
2.3.1	Conducción.....	14
2.3.2	Convección.....	14
2.3.3	Radiación.....	19
2.3.4	Resistencia térmica.....	19
2.4	Disipadores de Calor.....	20
2.4.1	Aletas longitudinales de perfil rectangular.....	20
2.4.2	Resistencia térmica de una aleta.....	21
2.4.3	Eficiencia de aleta.....	22

2.4.4	Resistencia térmica del disipador de calor	22
3.	Antecedentes Meteorológicos.....	23
3.1	Condiciones de operación.....	23
3.1.1	Radiación global horizontal.....	24
3.1.2	Velocidad del viento.....	26
3.1.3	Temperatura ambiente	26
4.	Metodología de Trabajo.....	27
4.1	Planteamiento de Modelo	28
4.1.1	Energía incidente	28
4.1.2	Energía eléctrica: Potencia generada.....	28
4.1.3	Energía térmica: Generación interna de calor	28
4.2	Procesamiento de Datos meteorológicos	29
4.3	Datos de catálogo comercial	29
4.4	Resistencia Térmica.....	30
4.4.1	Modelo unidimensional.....	30
4.4.2	Modelo tridimensional.....	31
5.	Resultados.....	33
5.1	Panel Fotovoltaico	34
5.2	Datos Meteorológicos	35
5.3	Coeficiente Convectivo.....	37
5.3.1	Caso sin disipador (caso base).....	37
5.3.2	Caso con disipador de calor.....	37
5.4	Resistencia Térmica.....	40
5.4.1	Modelo teórico.....	40
5.4.2	Modelos tridimensionales.....	41
5.5	Potencia y Eficiencia Eléctrica	49
6.	Discusiones.....	50
6.1	Efecto del Número de Aletas en el Número de Nusselt.....	51
6.2	Efecto del Número de Aletas en la temperatura	53
6.3	Resistencia Térmica Total.....	54
6.4	Efecto de la altura de aleta en la Resistencia Térmica.....	55
6.5	Efecto del espesor de aleta en la Resistencia Térmica.....	56
7.	Conclusiones.....	58
8.	Bibliografía.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Dimensiones del panel fotovoltaico.	34
Tabla 5.2 Espesor y conductividad térmica de las capas del panel fotovoltaico.....	34
Tabla 5.3 Datos de catálogo del panel fotovoltaico.....	34
Tabla 5.4 Datos geográficos de los datos medidos.....	35
Tabla 5.5 Datos meteorológicos utilizados.....	35
Tabla 5.6 Propiedades del aire a temperatura ambiente	37
Tabla 5.7 Coeficiente convectivo – Sin disipador	37
Tabla 5.8 Número de Reynolds – Con disipador.....	37
Tabla 5.9 Número de Nusselt (desarrollado, en desarrollo, ideal y corregido) – Con disipador ..	38
Tabla 5.10 Coeficiente convectivo – Con disipador.....	39
Tabla 5.11 Resistencia térmica de aleta y del disipador de calor	40
Tabla 5.12 Datos de entrada de ANSYS	41
Tabla 5.13 Temperatura de celda y resistencia térmica total – con disipador.....	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1 Curva V-I característica de un panel fotovoltaico y el efecto de la temperatura.	2
Figura 2.1 Radio del Sol y distancia a la Tierra.	4
Figura 2.2 Fracción de radiación solar que llega directo a la Tierra.	5
Figura 2.3 Espectro solar medido en la Tierra.....	6
Figura 2.4 Paneles Fotovoltaicos.....	8
Figura 2.5 Celda fotovoltaica unitaria	8
Figura 2.6 Composición de paneles Fotovoltaicos monocristalinos (Si)	10
Figura 2.7 Modelo eléctrico de un panel fotovoltaico.....	11
Figura 2.8 Curva V-I característica de un panel fotovoltaico y el efecto de la temperatura	11
Figura 2.9 Conducción y Convección para un modelo unidimensional.....	15
Figura 2.10 Flujo paralelo a una placa horizontal (convección forzada)	17
Figura 2.11 Flujo entre placas paralelas	18
Figura 2.12 Aleta rectangular de sección uniforme.....	21
Figura 3.1 Ubicación del sitio seleccionado en el Desierto de Atacama.....	23
Figura 3.2 Ciclo anual de radiación diaria promedio.	24
Figura 3.3 Promedio mensual de la radiación diaria.	24
Figura 3.4 Ciclo diario y estacional de la radiación diaria promedio en W/m^2	25
Figura 3.5 Mapa de radiación solar incidente sobre el desierto de Atacama	26
Figura 4.1 Balance energético en el panel fotovoltaico.....	29
Figura 4.2 Modelo de resistencias térmicas equivalentes.....	30
Figura 4.3 Resistencias conductivas.....	31
Figura 4.4 Condiciones de carga necesarias para el modelo en ANSYS	32
Figura 5.1 Temperatura ambiente en un ciclo diario.....	35
Figura 5.2 Número de Nusselt en función del número de aletas.....	38
Figura 5.3 Número de Nusselt en función del espaciado entre aletas	39
Figura 5.4 Resistencia térmica del disipador de calor en función del número de aletas	41
Figura 5.5 Distribución de temperatura exterior - Sin disipador.....	42
Figura 5.6 Distribución de temperatura interior - Sin disipador.....	42
Figura 5.7 Temperatura de celda en función del número de aletas	44
Figura 5.8 Resistencia térmica total del panel fotovoltaico en función del número de aletas.....	44
Figura 5.9 Distribución de temperatura exterior – Con disipador (n=10).....	45
Figura 5.10 Distribución de temperatura interior – Con disipador (n=10).....	45
Figura 5.11 Distribución de temperatura interior (detalle) – Con disipador (n=10)	46
Figura 5.12 Distribución de temperatura exterior – con disipador (n=100).....	46

Figura 5.13 Distribución de temperatura interior (detalle) – con disipador (n=100)	47
Figura 5.14 Distribución de temperatura exterior – Con disipador (n=200)	47
Figura 5.15 Distribución de temperatura interior – Con disipador (n=200)	48
Figura 5.16 Distribución de temperatura interior (detalle) – Con disipador (n=200)	48
Figura 5.17 Potencia eléctrica máxima generada en función del número de aletas	49
Figura 5.18 Eficiencia eléctrica en función del número de aletas	49
Figura 6.1 Número de Nusselt (Desarrollado, en desarrollo y modelo ideal) en función del número de aletas	51
Figura 6.2 Número de Nusselt (Desarrollado, en desarrollo y modelo ideal) en función del espaciado entre aletas	52
Figura 6.3 Comparación de casos, temperatura de celda	53
Figura 6.4 Resistencia total del panel fotovoltaico y resistencia del disipador de calor	54
Figura 6.5 Efecto de la altura en la resistencia térmica del panel fotovoltaico	55
Figura 6.6 Efecto del espesor de aleta en la resistencia térmica del panel fotovoltaico (numero de aletas)	56
Figura 6.7 Efecto del espesor de aleta en la resistencia térmica del panel fotovoltaico (espaciado de aletas)	57

INTRODUCCIÓN

1.1 PANELES FOTOVOLTAICOS

El desarrollo de nuevos mecanismos de obtención de energía mediante fuentes renovables no convencionales forma parte fundamental de la investigación y desarrollo de nuestro presente, dada la situación energética global, en donde la búsqueda de fuentes de energía alternativas es una de las grandes preocupaciones. Una de las tecnologías más utilizadas y estudiadas es la energía solar fotovoltaica, cuyo principio de funcionamiento se basa en la conversión directa de la energía radiante proveniente del Sol en energía eléctrica para ser utilizada por los consumidores directamente. La utilización de paneles fotovoltaicos (PV) como fuente de energía ha sido un gran avance de la ingeniería moderna, pero aún posee importantes puntos pendientes en su investigación y constante desarrollo. Cualquier mejora que sea conducente a obtener mejores rendimientos o incremento de la vida útil de los módulos fotovoltaicos forma parte importante de su desarrollo y forma parte fundamental de los departamentos de investigación y desarrollo de las empresas productoras de celdas fotovoltaicas a nivel mundial.

Chile posee una posición privilegiada en lo que respecta al potencial energético solar a nivel global, por lo que todo estudio que sea realizado en pos del mejor aprovechamiento de dicho recurso representa siempre un gran avance en nuestro propio beneficio. Sumado a la gran cantidad de proyectos energéticos que están en desarrollo en el norte de Chile, los temas de investigación en torno a materias de energías solar son muy necesarias y cada vez más requeridas tanto por la industria privada como por el sector público.

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile junto a algunos de sus académicos, tesistas y memoristas se hacen parte de esta nueva necesidad, aportando con un creciente número de investigaciones como parte de las nuevas generaciones de profesionales que se interesan por los avances en el desarrollo de temas energéticos a distintos niveles, desde estudios en energías solar fotovoltaica, termosolar, geotérmica, eólica y mareomotriz. Es en este contexto de investigación en desarrollo de energías renovables que se realiza este trabajo de título, que consiste en aportar obtener una mejor performance de los paneles fotovoltaicos desde un punto de vista térmico, pleno dominio de la ingeniería mecánica.

1.2 MOTIVACIÓN

El rendimiento de un panel fotovoltaico representa la razón entre la potencia eléctrica de salida (función del voltaje y la corriente generada) y la radiación incidente proveniente del Sol, es decir, la fracción real de energía que fue convertida por el panel fotovoltaico. Es de gran interés para la industria y para el futuro de esta tecnología siempre ir evolucionando en este aspecto e ir alcanzando cada vez mayores rendimientos. Una estrategia para inducir un aumento en la eficiencia del panel fotovoltaico viene dada por la disminución de temperatura de trabajo de la celda fotovoltaica. La dependencia directa del rendimiento de la temperatura de la celda convierte a este parámetro en uno de los más relevantes a la hora de intentar diseñar y optimizar posibles mejoras en un diseño de un panel fotovoltaico y su desempeño en condiciones reales. A mayor temperatura alcance el panel, menor será su rendimiento eléctrico final, por lo que es de gran interés poder controlar la variable térmica frente a condiciones externas mediante un disipador de calor que aumente el flujo de calor fuera de la celda fotovoltaica, lo que permite disminuir su temperatura.

Para alcanzar óptimos en rendimiento y mayor confiabilidad en el desempeño de los paneles fotovoltaicos es necesario conocer y controlar el parámetro de temperatura en función de las variables externas que condicionan su funcionamiento.

La motivación principal para realizar este estudio viene dada por la necesidad de poder caracterizar la temperatura al interior del panel fotovoltaico para poder tener control sobre sus maneras de disipar el exceso de calor, el cual es nocivo no solo sobre la eficiencia sino también sobre la vida útil de los paneles (efectos de altas temperaturas, fatiga térmica de bajo ciclo) sobre la cual tampoco se tiene mucho control debido a las condiciones extremas de funcionamiento. (1)
(2) (3) (4) (5)

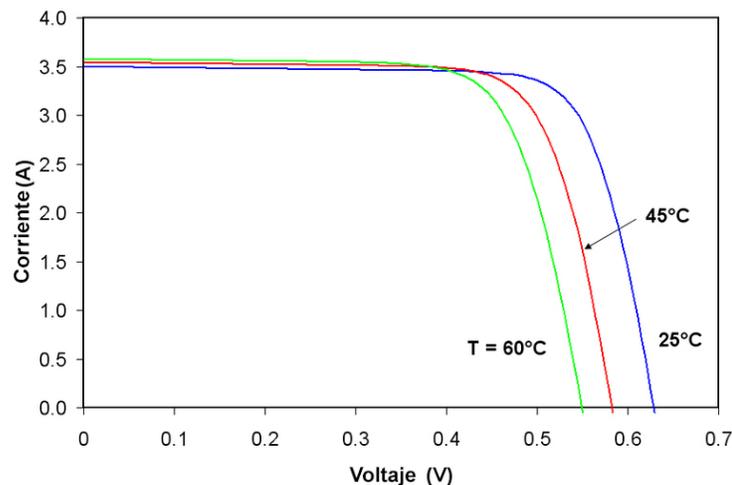


Figura 1.1 Curva V-I característica de un panel fotovoltaico y el efecto de la temperatura.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Determinar la distribución de temperatura al interior de un panel fotovoltaico para diseñar un disipador de calor que permita mejorar su rendimiento.

1.3.2 Objetivos específicos

- *Caracterizar* la distribución de temperatura al interior del panel fotovoltaico producto del balance energético para un modelo unidimensional, relacionando las dimensiones del disipador de calor con la resistencia térmica del panel fotovoltaico en completo.
- *Realizar* simulaciones computacionales para modelos tridimensionales con distintas configuraciones para obtener la distribución de temperatura al interior del panel fotovoltaico.
- *Cuantificar* el incremento de la eficiencia en términos de la disminución de temperatura producto de la presencia del disipador de calor y presentar recomendaciones de diseño al respecto.

1.4 ALCANCES

- Análisis térmico para un panel fotovoltaico comercial de celdas de tipo Silicio monocristalino (Si) expuesto a radiación solar incidente horizontal durante un día de verano bajo condiciones atmosféricas del norte de Chile (Desierto de Atacama) utilizando para ello datos reales extraídos de bases de datos reales presentes en la red.
- Modelación térmica del panel fotovoltaico y su correspondiente disipador de calor, en donde se excluirá el efecto del marco (y otras estructuras externas, como soportes, etc.) y de las interconexiones eléctricas al interior del módulo.

ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 ENERGÍA SOLAR

El Sol es el origen directo o indirecto de todas las fuentes de energía presentes en nuestro planeta. La energía solar aprovecha directamente la energía que recibimos del Sol en forma de radiación electromagnética dando lugar a dos modalidades de aprovechamiento según el tipo de tecnología: **energía solar térmica** y **energía solar fotovoltaica**. La fotovoltaica utiliza la radiación solar para generar electricidad aprovechando las propiedades físicas de ciertos materiales semiconductores y el efecto fotoeléctrico que se produce en su estructura interna. La energía térmica utiliza directamente la energía que recibimos del Sol para calentar un fluido y completar un ciclo térmico para su posterior mediante una turbina.

2.1.1 El Sol

El Sol es la estrella central de nuestro sistema Solar, con un diámetro de 1.392.000 [km] y una masa equivalente a unas 300.000 veces la masa de la Tierra. A la distancia que se encuentra nuestro planeta del Sol (cercana a los 149,5 millones de kilómetros) la energía proveniente de él es calculable analíticamente según modelos de radiación, de la cual solo una parte ingresa directamente a nuestro espacio habitable, debido entre otras cosas a la cantidad de nubes, a la porción de energía absorbida por los gases de la atmósfera y a la reflejada por los océanos. (1)

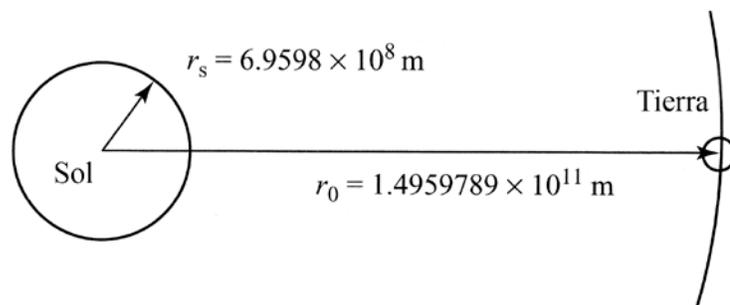


Figura 2.1 Radio del Sol y distancia a la Tierra.

La cantidad de radiación incidente sobre una región es uno de los parámetros fundamentales a la hora de calcular potencia generada en un panel fotovoltaico. Para estos efectos, se tienen datos empíricos obtenidos de la región a calcular, los cuales se verifican con la teoría (en casos extremos, cerca de un 80% de la radiación que ingresa a la atmósfera llega directamente a la superficie terrestre, y que corresponde en este caso a lugares como el desierto de Atacama).

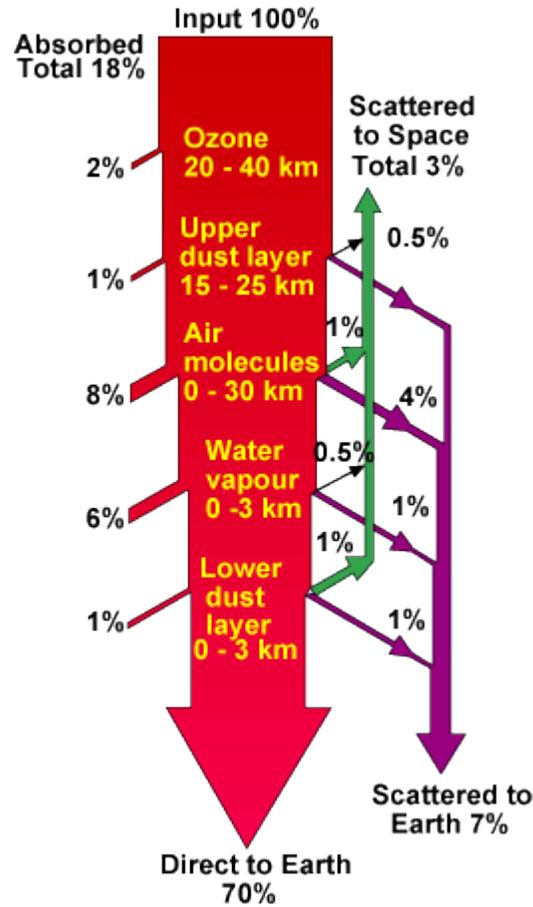


Figura 2.2 Fracción de radiación solar que llega directo a la Tierra.

2.1.2 Espectro solar

La distribución espectral de la radiación emitida por el Sol está determinada por la temperatura de su superficie, la que alcanza aproximadamente los 6.000 [K]. Tres espectros solares estándar son comúnmente medidos en la Tierra y que son comúnmente utilizados en la industria fotovoltaica: AM0, AM1.5G y AM1.5D. El espectro AM0 es medido en el espacio exterior, fuera de la atmósfera terrestre. El espectro AM1.5G es medido en la superficie de la Tierra e incluye el

efecto del aire y la reflexión del suelo, así como la radiación directa. El espectro AM1.5D corresponde solo a la radiación directa recibida a nivel del suelo.

La radiación de cuerpo negro proveniente del Sol es básicamente un modelo del espectro AM0 medido en el espacio, y que al realizar la integración de la curva en todo el ancho de la longitud de onda de radiación proveniente del Sol se obtiene el valor promedio de potencia, o irradiación, cuyo valor corresponde a **1.367 [W/m²]**, conocido como la constante solar. El mismo efecto se produce con los otros espectros, que corresponden a 1.000 [W/m²] (radiación global) y 768 [W/m²] (radiación directa) respectivamente. (6)

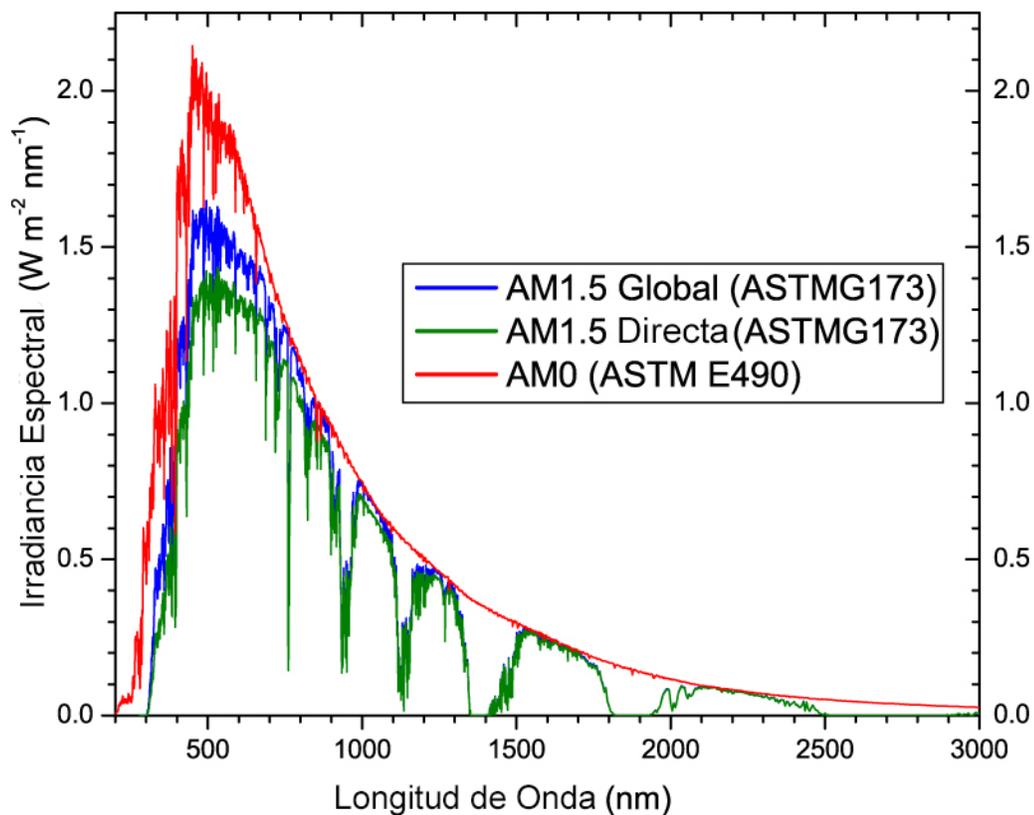


Figura 2.3 Espectro solar medido en la Tierra.

2.1.3 La luz

La luz que nos rodea es conocida por tener una naturaleza dual. El fenómeno de la propagación de la luz puede ser descrito de una buena manera gracias a la teoría de ondas electromagnéticas, mientras que la interacción de la luz con la materia es mejor descrita por los fenómenos de partículas.

Maxwell en el año 1864 demostró teóricamente que las perturbaciones eléctricas debían propagarse en el vacío con una velocidad igual que la de la luz, lo que le da a la luz una naturaleza de ondas electromagnéticas. Estas ondas incluyen a las ondas de radio, los rayos X, las

ondas de televisión, etc. Las ondas electromagnéticas son producidas cuando cargas eléctricas son aceleradas. La luz de la misma manera consiste en oscilaciones eléctricas y campos magnéticos perpendiculares entre sí.

Hertz en el año 1887 fue el primero en observar electrones emitidos por una superficie metálica al ser sometido a una fuente de luz, pero no fue capaz de demostrar el fenómeno con las herramientas de física clásica que tenían en su época; de acuerdo a la teoría clásica, la energía asociada con la radiación electromagnética dependía solo de la intensidad y no de la frecuencia.

La explicación correcta para el fenómeno fotoeléctrico fue descubierta por Einstein en el año 1905, y postulaba que un rayo de luz consiste en pequeños cuantos de energía hoy llamados “fotones”, y que el electrón sobre una superficie metálica absorbe la energía del fotón incidente, la cual es suficiente para que el electrón escape del metal en un proceso de todo o nada; la energía viene en cuantos, que vendría a corresponder a la más pequeña cantidad de energía que puede ser transferida en fenómenos físicos, por lo que el electrón absorbe toda la energía del fotón, ni más ni menos.

La energía de un fotón es proporcional a su frecuencia, ν , tal como se aprecia en la ecuación

$$E_{\text{fotón}} = h\nu \quad (2.1)$$

donde h es la constante de Planck, cuyo valor es de $6,626 \times 10^{-34} [Js]$ y ν es la frecuencia,

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

que a su vez depende de c , la velocidad de la luz, cuyo valor es $3 \times 10^8 [m/s]$ y λ corresponde a la longitud de onda.

El efecto fotoeléctrico sumado a la ecuación (2.1) sugiere que la luz se comporta como partículas (fotones). Bajo la óptica de la teoría de ondas de Maxwell, la luz debe tener una naturaleza dual onda-partícula; se propaga como onda pero se comporta como partícula en la interacción con la materia. (1)

2.2 CELDAS SOLARES

Las celdas solares, llamadas también celdas fotovoltaicas (PV) son dispositivos semiconductores que convierten directamente la luz solar en corriente eléctrica para producir potencia eléctrica utilizable.

En la actualidad la tecnología más desarrollada para la producción de electricidad solar por vía fotovoltaica es la basada en el uso de módulos fotovoltaicos planos, que incorporan células de silicio, ya sea mono o poli cristalinas, o módulos fotovoltaicos de alta concentración, éstos últimos siendo los más modernos y en los que se necesita mucha menos cantidad de silicio para las células. Sin embargo, la tecnología de módulos fotovoltaicos planos se encuentra desarrollada desde hace décadas, ofreciendo en la actualidad un producto comercial que ha ido mejorando sus prestaciones en el tiempo gracias a la libre competencia. Así los fabricantes actuales garantizan sus productos por tiempos superiores a 20 años, obteniendo degradaciones inferiores al 20% durante la vida útil de los módulos.



Figura 2.4 Paneles Fotovoltaicos



Figura 2.5 Celda fotovoltaica unitaria

2.2.1 Tecnología

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el científico francés, Henri Becquerel. Las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880, sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que actualmente dominan la industria fotovoltaica. Las primeras celdas de este tipo tenían una eficiencia de conversión de solo 1%; ya para 1954 se había logrado incrementar la eficiencia al 6% en condiciones normales de operación, mientras en el laboratorio se lograron eficiencias cercanas a 15%. Desde entonces hasta nuestros días la eficiencia en las células no ha mejorado notablemente.

La producción eléctrica está basada en el fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de

unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada de ellas una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente de energía la radiación luminosa. Las células se montan en serie sobre módulos fotovoltaicos o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula.

Generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0,25 y los 0,35mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 mm².

2.2.2 Tipos de celdas fotovoltaicas

Existen diferentes tipos de celdas fotovoltaicas en función de los materiales empleados, los métodos de fabricación que se empleen y la forma final.

- Silicio Monocristalino
- Silicio Poli-cristalino
- Silicio Amorfo
- Otros materiales: Arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio.

Actualmente, el material más utilizado es el silicio monocristalino que tiene prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin. Están basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7% para éste tipo de paneles siendo en los comercializados del 16%.

2.2.3 Paneles Fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos monocristalinos poseen una composición más o menos estándar, en donde los componentes que siempre están presentes son :

- **Vidrio templado**, cuya función es proteger a los materiales del interior de la celda y además de servir de filtro de radiación, dejando fuera por ejemplo a gran parte de la radiación UV. Es un vidrio templado con una baja reflectividad lo que permite absorber la luz a diferencia de otros vidrios utilizados en vivienda.
- **EVA** o etileno vinilo acetato es un polímero termoplástico, que se usa en los módulos fotovoltaicos como encapsulante de las células generadoras. Éstas se conectan entre sí conformando el núcleo fotovoltaico del panel. Se depositan en un soporte cristalino y se encapsulan mediante EVA, para evitar la entrada de aire o humedad.

- **Celda de Silicio**, responsable directa de la conversión de energía lumínica en energía eléctrica gracias a sus propiedades de semiconductor.
- **Tedlar** o fluoruro de polivinilo (PVF), para la parte inferior del panel formada por láminas de Tedlar-Poliéster-Tedlar o Tedlar-Poliéster-EVA. El fin de estas láminas es proteger a las células fotovoltaicas de los efectos degradantes de la radiación ultravioleta y, sirve como aislante eléctrico.

El conjunto es sellado, de modo que, por los laterales no pueda entrar ni humedad ni aire y, se le monta un marco de aluminio para protegerlo y facilitar su manipulación. (6)

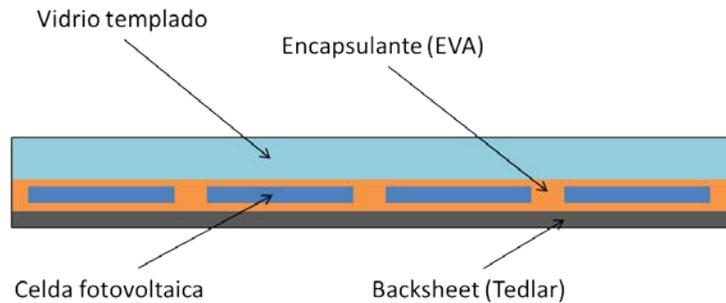


Figura 2.6 Composición de paneles Fotovoltaicos monocristalinos (Si)

2.2.4 Modelo eléctrico de una celda fotovoltaica

El modelo eléctrico teórico para una celda fotovoltaica se representa mediante la llamada ecuación del diodo, expresada en la siguiente ecuación (6)

$$I = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (2.3)$$

Donde:

I	: Corriente de salida	[A]
I_L	: Corriente fotogenerada	[A]
I_0	: Corriente inversa de saturación	[A]
q	: Carga electrón	[C]
V	: Voltaje diodo	[V]
n	: Factor de idealidad	
k	: Constante Boltzmann	[J/K]
T	: Temperatura de celda	[K]

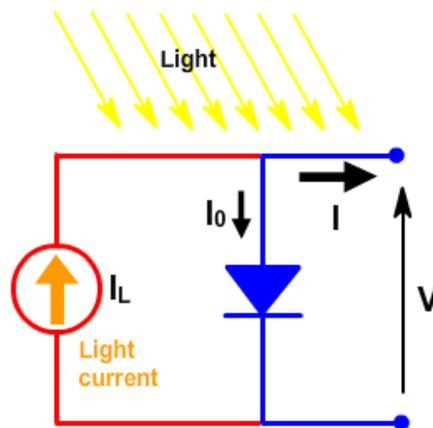


Figura 2.7 Modelo eléctrico de un panel fotovoltaico.

En base a este modelo, se puede relacionar la potencia eléctrica ($P = VI$) con la temperatura de celda mediante la corriente de salida del panel. Esto cuantifica numéricamente que a medida que la temperatura de la celda sea mayor, la potencia eléctrica de salida será menor.

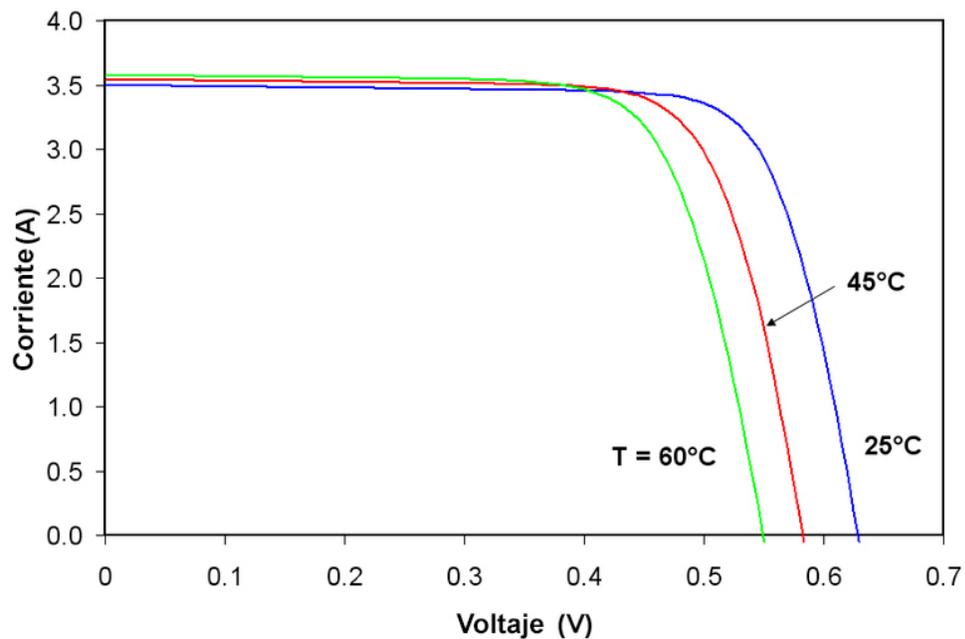


Figura 2.8 Curva V-I característica de un panel fotovoltaico y el efecto de la temperatura

2.2.5 Modelo físico

El efecto físico que este modelo está representando dice relación con el exceso de energía que contienen los electrones liberados de la capa semiconductor producto de la incidencia de

fotones provenientes de la luz, energía que utilizan para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción en el semiconductor. El exceso de energía que no es utilizada por los electrones para saltar de banda, se disipa en forma de calor, y esto trae efectos nocivos a corto y a largo plazo. (1)

2.2.6 Influencia de la temperatura

Los paneles fotovoltaicos presentes en el mercado deben cumplir ciertas normativas (dependiendo del territorio en el que estén) pero un elemento que traen todos sin excepción es una caracterización particular de los datos más importantes a la hora de considerar adquirir uno.

- **Potencia máxima P_{mpp}**
Corresponde a la potencia máxima que es capaz de entregar el panel fotovoltaico, el área más grande bajo la curva de corriente-voltaje.
- **Dimensiones**
Largo, alto, ancho del panel completo, así como las dimensiones de las celdas fotovoltaicas.
- **Tipo**
Celdas de silicio monocristalino, policristalino, etc.
- **Características térmicas**
Coeficientes térmicos (α, β, γ) que cuantifican cuanto varían el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de corto circuito (I_{sc}) y la potencia máxima (P_{mpp}) en función de la temperatura de la celda. Cada panel fotovoltaico cuenta con sus propios parámetros térmicos, y han sido definidos para poder caracterizar su funcionamiento y respuesta (tal como aparece en la Figura 2.8). Su definición es la siguiente (7)

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (2.5)$$

$$\gamma = \frac{\partial P_{mpp}}{\partial T} \quad (2.6)$$

La relación entre la temperatura de la celda fotovoltaica y la potencia de salida está dada por la ecuación:

$$P = P_{mpp} \left(1 + \frac{\gamma}{100} (T_{celda} - 25) \right) \quad (2.7)$$

T_{celda} : Temperatura de la celda [$^{\circ}C$]

γ : Coeficiente térmico de potencia [$\%/^{\circ}C$]

que indica que mientras más baja sea la temperatura de la celda (mientras más cercana sea a los 25 [$^{\circ}C$]) mayor será la potencia nominal de salida. Esto se puede llevar a términos de la eficiencia de conversión del panel fotovoltaico, que es finalmente hacia donde apunta este estudio.

La eficiencia eléctrica de un panel fotovoltaico tiene relación con la fracción de potencia eléctrica generada versus la cantidad de energía solar incidente sobre su superficie.

$$\eta_{el} = \frac{P}{GA} \quad (2.8)$$

A : Área superficial del panel [m^2]

G : Radiación solar incidente [W/m^2]

P : Potencia eléctrica generada [W]

2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

Para analizar el comportamiento de la temperatura al interior de un sistema fotovoltaico hay que reconocer cuales son los mecanismos que tiene la energía para disiparse. Los tipos de transferencia de calor existentes en la naturaleza son tres: **conducción**, **convección** y **radiación**.

2.3.1 Conducción

La conducción corresponde a la transferencia de calor que ocurre en un sólido o en un fluido en reposo mediante movimientos de rotación y vibración a escala molecular. Estos movimientos son más intensos a altas temperaturas por lo que la transferencia de energía ocurre desde zonas de alta a baja temperatura. El físico francés Jean-Baptiste Joseph Fourier describió el flujo de calor como proporcional al gradiente local de temperatura y a la conductividad térmica del material, relación hoy conocida como **Ley de Fourier**.

Si en un medio existe un campo de temperatura $T(x, y, z, t) = T(\vec{r}, t)$, la ley de Fourier expresa los flujos de calor instantáneos por:

$$\vec{q} = k\nabla T \quad (2.9)$$

Donde:

k : Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

\vec{q} : Flujo de calor por unidad de tiempo y área $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

La expresión puede escribirse en sus componentes direccionales tal como sigue:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.11)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.12)$$

Este mecanismo de transferencia de calor permite modelar la transferencia de energía entre capas del módulo fotovoltaico compuesto de distintos materiales, con espesores distintos. (8)

2.3.2 Convección

La convección corresponde a transferencia de calor dentro de un fluido (líquido o gaseoso) que fluye con movimientos macroscópicos, es decir, la transferencia de energía ocurre por la mezcla de porciones de fluido a distintas temperaturas. Este movimiento macroscópico del fluido se conoce como campo de velocidades y es el encargado de generar el traspaso de calor. Se le atribuye a Newton el descubrimiento de la llamada ley de enfriamiento que dice que el flujo de calor de un cuerpo al espacio es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y su

entorno. En este sentido se describe la ecuación para el cálculo del flujo de calor por convección en estado estacionario

$$q_{conv} = h\Delta T \quad (2.13)$$

Donde:

h : Coeficiente convectivo $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

ΔT : Diferencia de temperatura entre el cuerpo y su entorno [$^{\circ}C$ o K]

El cálculo del coeficiente convectivo para las distintas situaciones depende de si se trata de *convección natural* (libre al ambiente) o *forzada* (provocada por un fluido en movimiento). Este tipo de transferencia de calor estará presente tanto en el estudio de pérdidas por convección sobre el panel (contacto al aire que rodea el panel) como en el calor disipado por la aleta (convección libre o forzada).

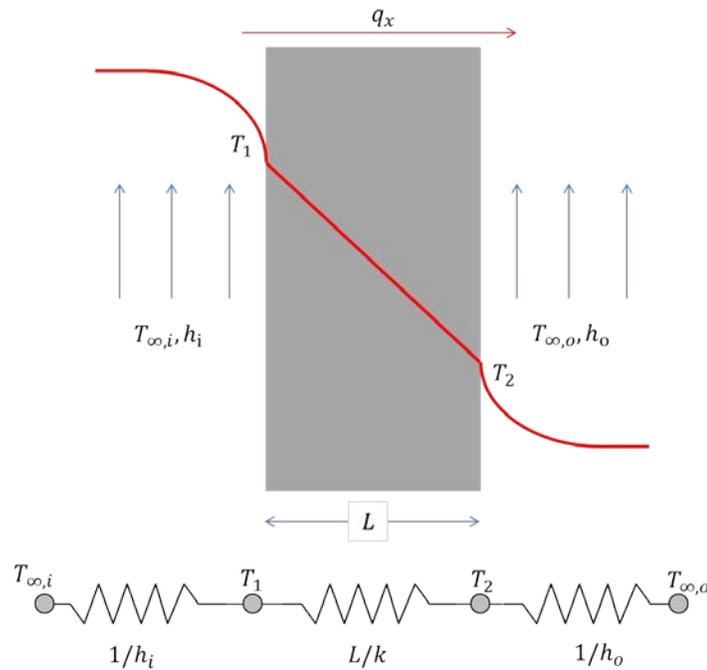


Figura 2.9 Conducción y Convección para un modelo unidimensional

Para caracterizar los coeficientes convectivos respectivos a la geometría de análisis en función de las variables disponibles es necesario contar con la ayuda de algunos números adimensionales, los que permiten caracterizar el comportamiento del flujo de acuerdo al valor que estos toman en situaciones dadas.

2.3.2.1 Número de Reynolds

$$Re = \frac{U_{\infty}L}{\nu} = \frac{U_{\infty}D_h}{\nu} \quad (2.14)$$

U_{∞} : Velocidad del fluido [m/s]

ν : Viscosidad cinemática [m²/s]

L : Longitud característica (largo para placas horizontales, diámetro para ductos)

D_h : Diámetro hidráulico (para canales no circulares) definida como

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2.15)$$

A_c : Área de sección de paso del fluido [m²]

P : Perímetro mojado (perímetro del área de sección) [m]

El número de Reynolds permite distinguir fluidos turbulentos ($Re > 4000$ (*flujo en ductos*), $Re > 5 \times 10^5$ (*flujos paralelos*)) de fluidos laminares ($Re < 2300$ (*flujo en ductos*), $Re \leq 5 \times 10^5$ (*flujos paralelos*)).

2.3.2.2 Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_t} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (2.16)$$

ν : Viscosidad cinemática [m²/s]

α_t : Difusividad térmica [m²/s]

C_p : Capacidad calorífica [J/kgK]

μ : Viscosidad dinámica [kg/ms]

k : Conductividad térmica [W/mK]

Un número de Prandtl bajo indica que la difusión térmica es mayor que la viscosidad, por lo que predomina la transferencia de calor por conducción. Si el número de Prandtl es alto la difusión de momento es más relevante, por lo que predomina la transferencia de calor por convección.

2.3.2.3 Número de Nusselt

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = \frac{hD_h}{k} \quad (2.17)$$

h : Coeficiente convectivo [W/m²K]

x : Distancia [m] o longitud característica (L para placas horizontales, D para ductos)

D_h : Diámetro hidráulico (para canales no circulares)
 k : Conductividad térmica [W/mK]

Permite relacionar los modos de transferencia de calor por convección y por conducción, relacionando sus coeficientes relevantes. Para el cálculo del número de Nusselt existen variadas correlaciones dependiendo de la geometría a analizar; existen dos casos relevantes para este estudio.

2.3.2.3.1 Nusselt para placas horizontales (Flujo laminar) (1)

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.18)$$

Re : Número de Reynolds

Pr : Número de Prandtl

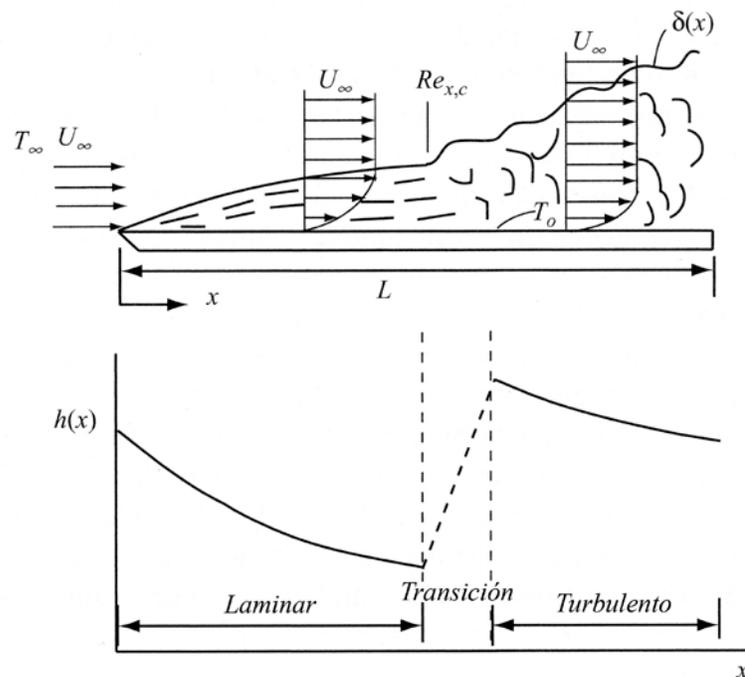


Figura 2.10 Flujo paralelo a una placa horizontal (convección forzada)

2.3.2.3.2 Nusselt para flujo entre placas paralelas

Para caracterizar el flujo de un fluido entre placas paralelas hay que tener en cuenta el hecho de que existe otra variable en juego: la distancia entre las placas (b), y su influencia en que el fluido se desarrolle totalmente (es decir, que adquiera un perfil de velocidad constante a lo largo del canal) o que esté en vías de hacerlo (al que llamaremos, fluido en desarrollo).

La ecuación queda caracterizada entonces como un modelo completo de Nusselt ideal (que incluye el modelo desarrollado como en desarrollo) (9) (10)

$$Nu = \frac{hL}{k} = \left[\left(\frac{1}{Nu_{fd}} \right)^3 + \left(\frac{1}{Nu_{dev}} \right)^3 \right]^{-\frac{1}{3}} \quad (2.19)$$

Nu_{fd} : Número de Nusselt de fluido totalmente desarrollado

Nu_{dev} : Número de Nusselt de fluido en desarrollo

Los cuales quedan caracterizados de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$Nu_{fd} = \frac{1}{2} Re_b \left(\frac{b}{L} \right) Pr = \frac{1}{2} \frac{U_\infty b^2}{L\nu} Pr \quad (2.20)$$

$$Nu_{dev} = 0,664 \sqrt{Re_b \left(\frac{b}{L} \right)} Pr^{\frac{1}{3}} \left(1 + \frac{3,65}{\sqrt{Re_b \left(\frac{b}{L} \right)}} \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

Pr : Número de Prandtl

U_∞ : Velocidad del fluido [m/s]

ν : Viscosidad cinemática [m²/s]

L : Largo del canal [m]

b : Espacio entre placas paralelas [m]

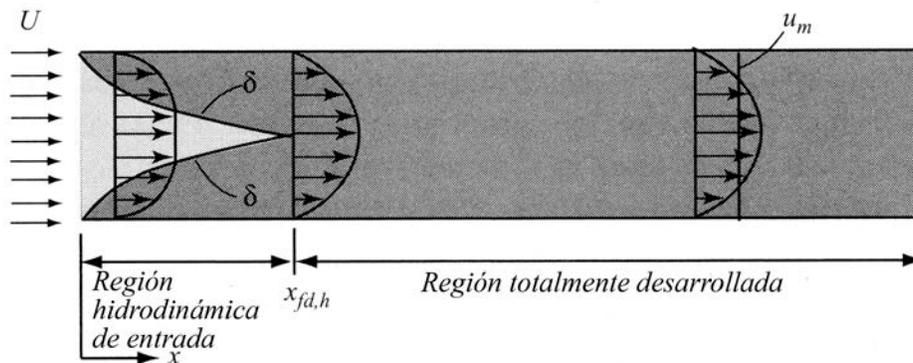


Figura 2.11 Flujo entre placas paralelas

2.3.3 Radiación

El tercer mecanismo de transferencia de calor es la radiación, que no es otra cosa que ondas electromagnéticas propagándose a través de un medio transparente como el aire o por el vacío. El intercambio de calor por radiación entre cuerpos se puede expresar como:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.22)$$

Donde:

- ε : Emisividad del cuerpo 1
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$
- T_1, T_2 : Temperaturas de los cuerpos 1 y 2 respectivamente [K]

Este tipo de transferencia de calor servirá para definir las pérdidas de calor hacia la atmósfera desde el panel fotovoltaico. (1)

2.3.4 Resistencia térmica

Se define la resistencia térmica, como un análogo a una resistencia eléctrica, a la oposición que opone un cuerpo o volumen a que el calor fluya a través de él. Es una propiedad que depende del material del que esté compuesto el cuerpo, del área de intercambio térmico y también de la geometría. La resistencia térmica queda caracterizada por la ecuación del calor (8)

$$Q = UA\Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (2.23)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (2.24)$$

- U : Coeficiente global de transferencia de calor [W/m²K]
- A : Área de intercambio de calor [m²]
- Q : Calor a disipar [W]
- ΔT : Diferencia de temperatura [°C o K]

Quedan caracterizadas así entonces las resistencias de tipo conductivas (unidimensional)

$$R_{cond} = \frac{t}{kA} \quad (2.25)$$

- A : Área de intercambio de calor [m²]
- t : Largo o espesor del cuerpo conductor [m]
- k : Conductividad térmica [W/mK]

Y las de tipo convectivas

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (2.26)$$

- A : Área de intercambio de calor [m^2]
- h : Coeficiente convectivo [W/m^2K]

2.4 DISIPADORES DE CALOR

Un disipador de calor es un dispositivo que absorbe o disipa efectivamente el calor hacia el exterior de un espacio confinado utilizando la extensión del área de contacto entre el sólido y el fluido como principio de funcionamiento. Los disipadores de calor son utilizados en un amplio rango de aplicaciones donde la disipación de calor es requerida, como por ejemplo en procesos de refrigeración, ciclos de calor y enfriamiento de dispositivos electrónicos. El diseño más común utilizado es el disipador de calor consistente en una placa metálica con muchas aletas perpendiculares, a la cual se le denomina arreglo de aletas (*fin array*), muy utilizado en aplicaciones electrónicas como refrigeración de chips y otros dispositivos.

El disipador de calor incrementa su efectividad aumentando ya sea la conductividad térmica de las aletas, el área superficial de las aletas o el coeficiente de transferencia de calor. Los perfiles típicos de disipadores de calor incluyen geometrías de tipo rectangular, triangular y parabólica.

2.4.1 Aletas longitudinales de perfil rectangular

El balance energético en una aleta de perfil rectangular se puede definir por el volumen de control infinitesimal de dimensión $Lt dx$, sobre el cual la ecuación de balance es la siguiente (1)

$$q_x - \left(q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \right) - dq_{conv} = 0 \quad (2.27)$$

La ecuación, luego de reemplazar los términos de acuerdo al tipo de transferencia de calor gobernante en cada caso (conducción o convección) queda en forma de ecuación diferencial.

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c} (T - T_\infty) = 0 \quad (2.28)$$

Definiendo

$$\theta(x) = T(x) - T_\infty \quad (2.29)$$

$$m^2 = \frac{hP}{kA_c} = \sqrt{\frac{h2(L+t)}{kLt}} = \sqrt{\frac{2h}{kt} \left(1 + \frac{t}{L}\right)} \cong \sqrt{\frac{2h}{kt}} \quad (2.30)$$

Se puede evaluar en la ecuación (2.28), quedando

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (2.31)$$

Quedando finalmente la solución luego de imponer las condiciones de borde necesarias según (1),

$$\theta = \theta_b \frac{\cosh m(b-x) + \frac{h_o}{mk} \sinh m(b-x)}{\cosh mb + \frac{h_o}{mk} \sinh mb} \quad (2.32)$$

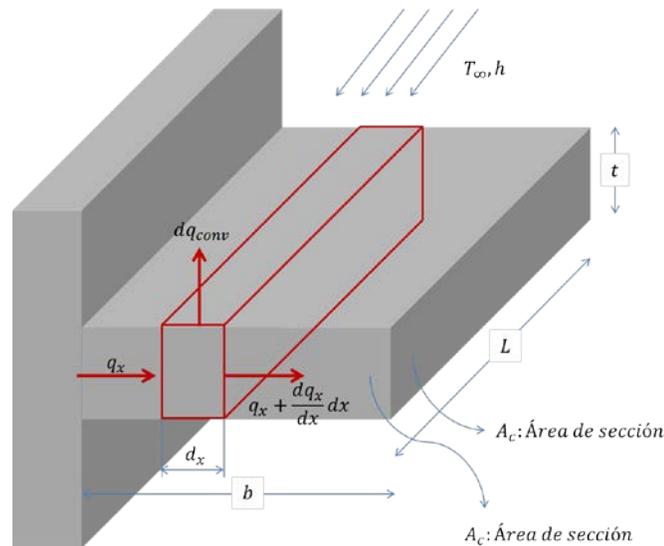


Figura 2.12 Aleta rectangular de sección uniforme

2.4.2 Resistencia térmica de una aleta

Definiendo el calor total que ingresa a la placa del disipador de calor como q_f se tiene que

$$q_f = -kA_c \frac{dT(0)}{dx} = -kA_c \frac{d\theta(0)}{dx} \quad (2.33)$$

Por lo que

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = \theta_b \frac{-m \sinh m(b-x) + \frac{h_o}{mk} (-m) \cosh m(b-x)}{\cosh mb + \frac{h_o}{mk} \sinh mb} \quad (2.34)$$

Evaluando en $x = 0$, se tiene que el calor total que disipa una aleta rectangular se puede definir como

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \frac{\sinh mb + \frac{h_o}{mk} \cosh mb}{\cosh mb + \frac{h_o}{mk} \sinh mb} \quad (2.35)$$

Lo cual se puede aproximar a la expresión, asumiendo que no hay transferencia de calor en el extremo de la aleta ($h_o = 0$). Con esto se tiene que

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \tanh mb \quad (2.36)$$

Por extensión finalmente se tiene que la resistencia térmica de la aleta queda definida como

$$R_{fin} = \frac{1}{\sqrt{hPkA_c} \tanh mb} \quad (2.37)$$

2.4.3 Eficiencia de aleta

Otra medida del desempeño de la aleta es la eficiencia, que se define como la tasa de transferencia de calor que pasa por la aleta en base al máximo calor posible que puede ser disipado. La ecuación queda como sigue luego de evaluar los parámetros de la aleta,

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{max}} = \frac{q_f}{hPb\theta_b} = \frac{\tanh mb}{mb} \quad (2.38)$$

La eficiencia esperada para una aleta debe estar entre los 0,5 y 0,7 para una aleta bien diseñada.

2.4.4 Resistencia térmica del disipador de calor

Para que la transferencia de calor sea efectivamente mucho mayor que la de una superficie normal se realizan los llamados arreglos de aletas múltiples para incrementar el área de transferencia de calor. Al ser un arreglo completo se tiene que la resistencia completa de un disipador de calor queda definida por la resistencia térmica de las aletas y de la resistencia térmica de la base, según la siguiente ecuación (9) (10)

$$R_{sink} = \frac{1}{\left(\frac{n}{R_{fin}}\right) + h(n-1)bL} + \frac{t_{base}}{kWL} \quad (2.39)$$

ANTECEDENTES METEOROLÓGICOS

3.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación del panel fotovoltaico a analizar están directamente relacionadas con la ubicación geográfica de donde estará instalado. En este caso se utilizarán datos medidos en la localidad de San Pedro de Atacama (Latitud 21,23°N, Longitud 68,25°O), ubicado en la Región de Antofagasta, en medio del Desierto de Atacama a una elevación de 2.390 [m]. Los datos relevantes para el análisis serán: *Radiación global horizontal*, *velocidad del viento* y *temperatura ambiental*. Los datos serán extraídos y contrastados de dos fuentes: Explorador solar (Departamento de Geofísica – Universidad de Chile) (11) y Datos solares del Ministerio de Energía.

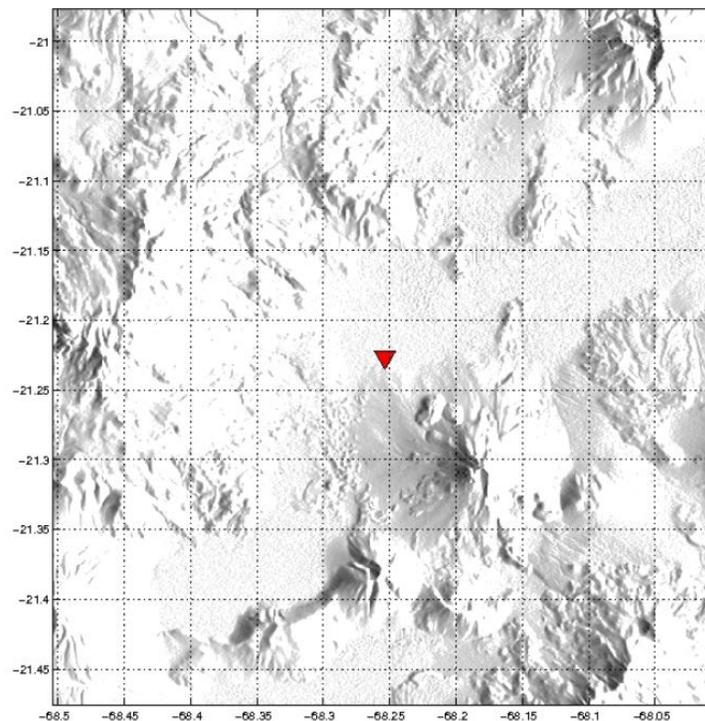


Figura 3.1 Ubicación del sitio seleccionado en el Desierto de Atacama.

3.1.1 Radiación global horizontal

La cantidad de radiación que se recibe en un punto depende del ángulo de incidencia de los rayos con respecto a la superficie receptora. La irradianza global horizontal (GHI) es la radiación que se recibe en una superficie perpendicular al campo de gravedad de la Tierra y por lo tanto va recibiendo con distinto ángulo la radiación directa del Sol a través del día. La GHI es la suma de las componentes directa y difusa de la radiación. Los datos entregados obtenidos fueron los siguientes para la radiación global horizontal promedio.

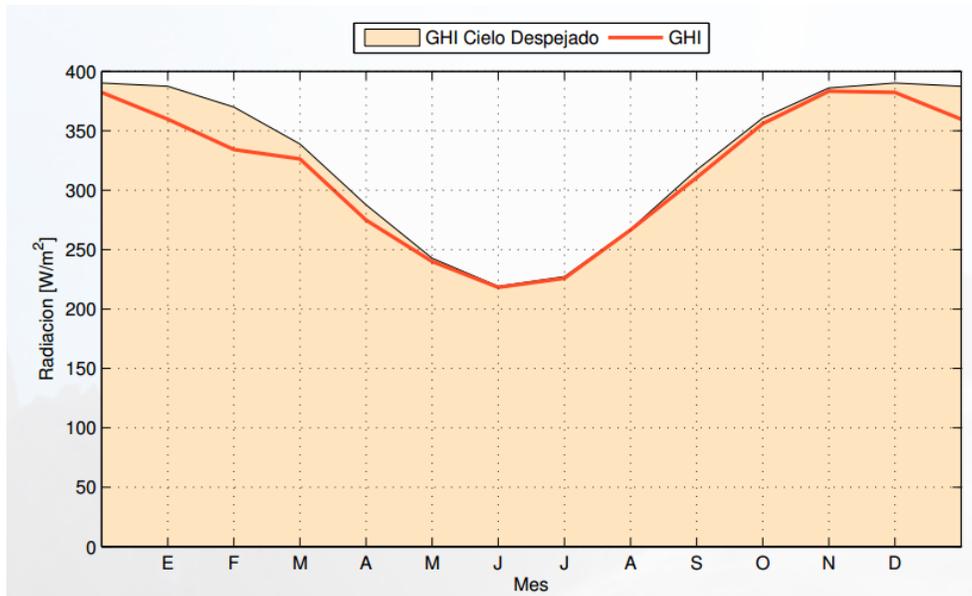


Figura 3.2 Ciclo anual de radiación diaria promedio.

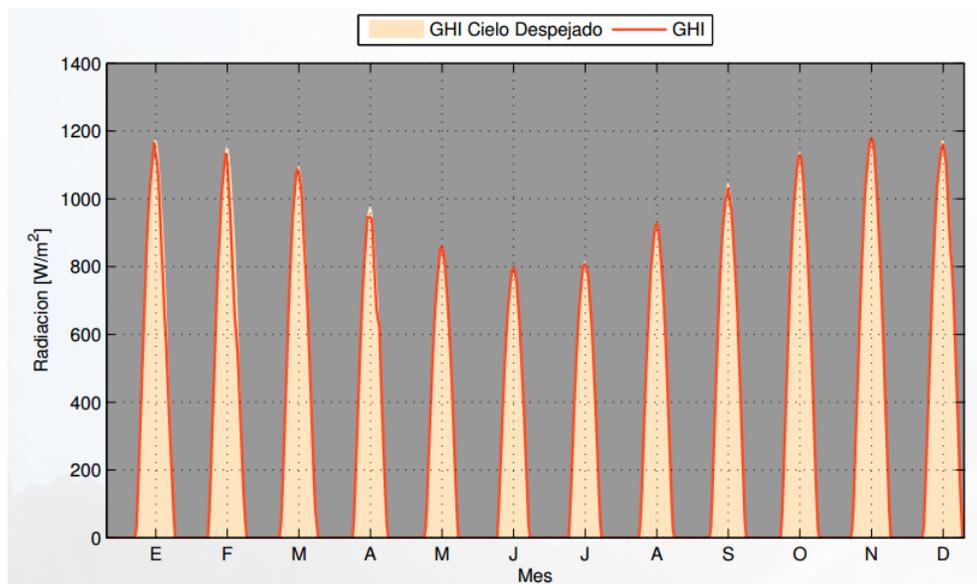


Figura 3.3 Promedio mensual de la radiación diaria.

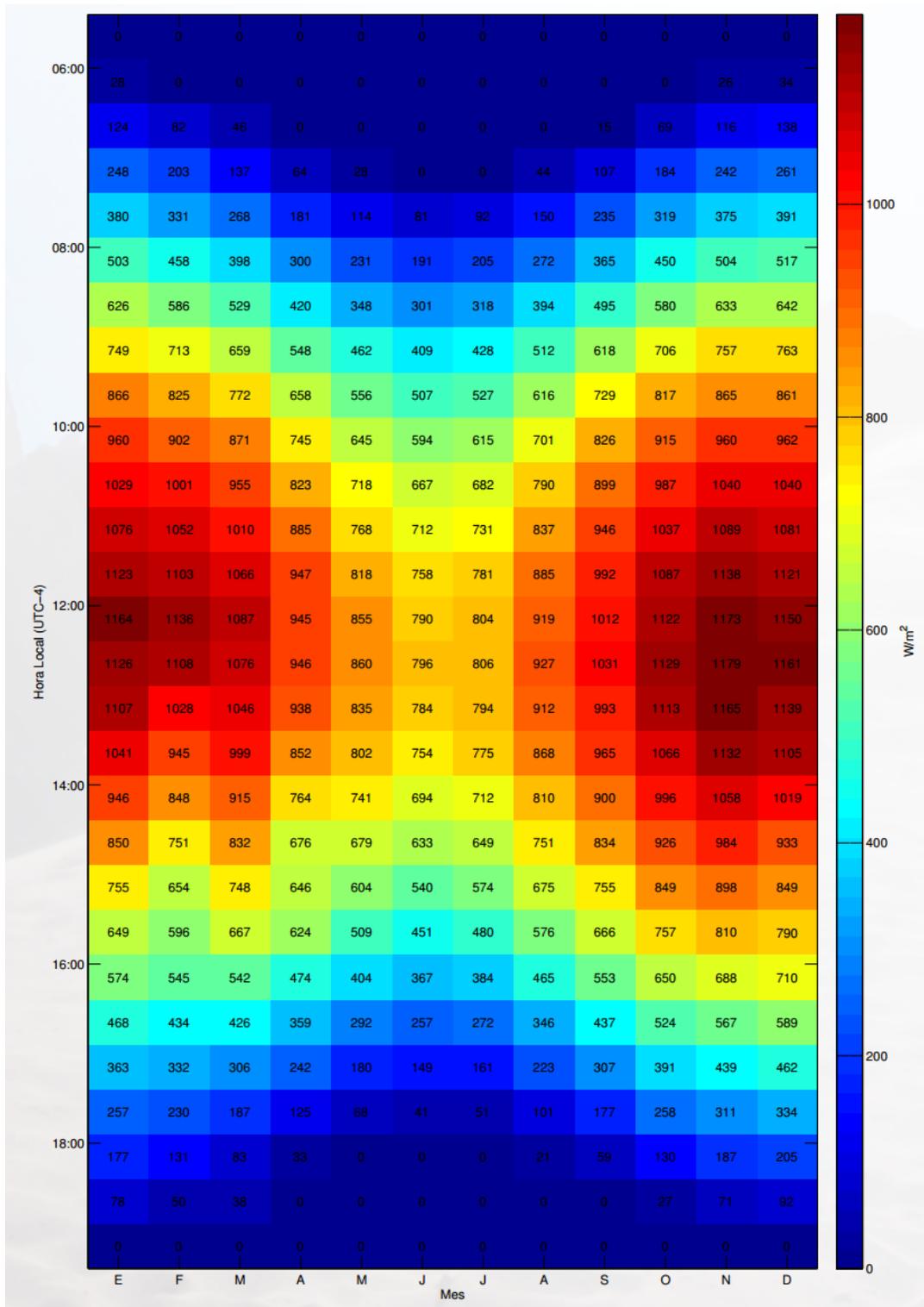


Figura 3.4 Ciclo diario y estacional de la radiación diaria promedio en W/m².

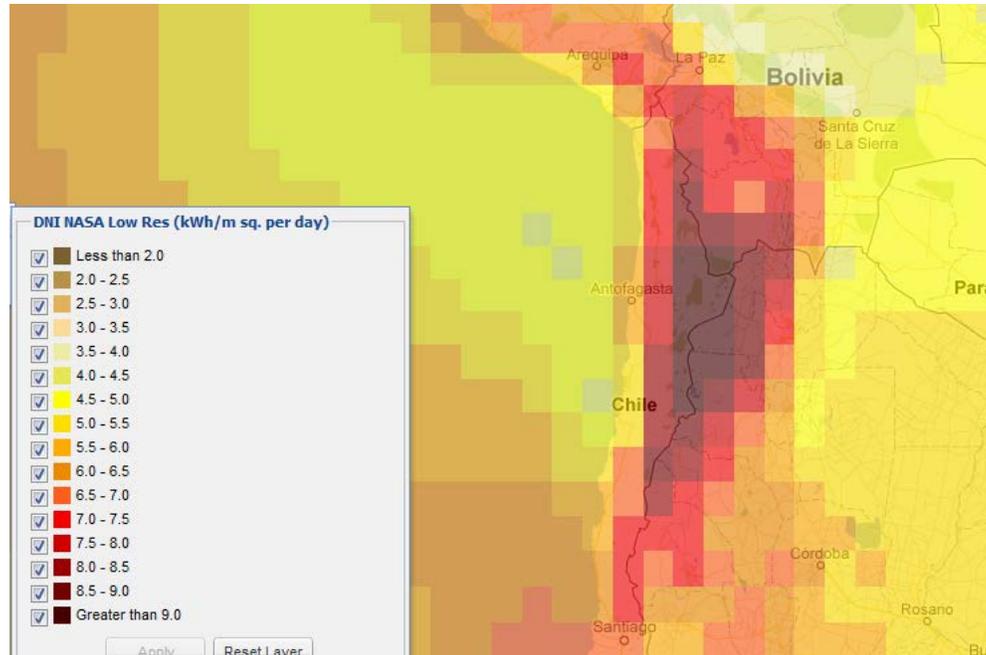


Figura 3.5 Mapa de radiación solar incidente sobre el desierto de Atacama¹

El Desierto de Atacama, tal como lo indican muchos estudios, es uno de los lugares que recibe más radiación durante todo el año (con valores máximos cercanos a los 1.100 [W/m²] como indican los datos obtenidos), así como de uno de los más secos en todo el mundo.

3.1.2 Velocidad del viento

Para la velocidad del viento, se cuenta con el registro cada media hora de la velocidad promedio sobre el nivel del suelo. Por tratarse de un valor altamente aleatorio se tomará un valor constante para propósitos de la modelación correspondiente al promedio u valor tipo a mediodía.

3.1.3 Temperatura ambiente

Por tratarse de efectos de modelación, se utilizará la temperatura máxima detectada para un ciclo diario de estudio, para que sea consistente con las condiciones que más desfavorecen al panel fotovoltaico, sobretodo por la temperatura producida al interior de la celda.

¹ Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Data Set (Jan 2008)

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo incluye los siguientes pasos:

- Planteamiento de modelo y balance energético
 - Energía incidente
 - Energía eléctrica: Potencia eléctrica generada
 - Energía térmica: Generación interna de calor
 - Balance energético
- Procesamiento de datos meteorológicos (datos de entrada)
 - Radiación solar
 - Velocidad del viento
 - Temperatura ambiente
- Modelo térmico
 - Generación interna volumétrica [W/m^3]
- Modelo fluidodinámico
 - Coeficiente convectivo [W/m^2K]

4.1 PLANTEAMIENTO DE MODELO

4.1.1 Energía incidente

La energía incidente, responsable de la generación de electricidad y que le da sentido al panel fotovoltaico, se puede estimar como

$$\tilde{G} = (\alpha\tau)GA \quad (4.1)$$

- $\alpha\tau$: Absortividad y transmisividad del vidrio (estimado como un valor de 0,9)
- G : Radiación incidente [W/m^2]
- A : Área superficial [m^2]

4.1.2 Energía eléctrica: Potencia generada

La energía solar convertida por el panel fotovoltaico y entregada al consumidor en forma de electricidad tiene las siguientes formas

$$P_{el} = VI = \eta_{el}G = P_{mpp} \left(1 + \frac{\gamma}{100} (T_{celda} - 25) \right) \quad (4.2)$$

- V : Voltaje [V]
- I : Corriente [A]
- η_{el} : Rendimiento eléctrico
- G : Radiación incidente [W/m^2]
- A : Área superficial [m^2]
- T_{celda} : Temperatura de la celda [$^{\circ}C$]
- γ : Coeficiente térmico de potencia [$\%/^{\circ}C$]
- P_{mpp} : Potencia máxima [W]

Al conocer la potencia máxima alcanzada por el panel, la potencia eléctrica queda caracterizada totalmente por la temperatura de la celda.

4.1.3 Energía térmica: Generación interna de calor

Lo que no es utilizado para generar electricidad pero que sí fue absorbido por el sistema fotovoltaico, queda al interior en forma de calor (que se debe sacar en forma de flujo de calor mediante la presencia de un disipador inteligente). El balance queda como sigue

$$Q = \frac{T_{celda} - T_{\infty}}{R_{total}} = \tilde{G} - P_{el} \quad (4.3)$$

- T_{celda} : Temperatura de la celda [$^{\circ}C$]
- T_{∞} : Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]
- R_{total} : Resistencia térmica del módulo fotovoltaico completo [$^{\circ}C/W$]

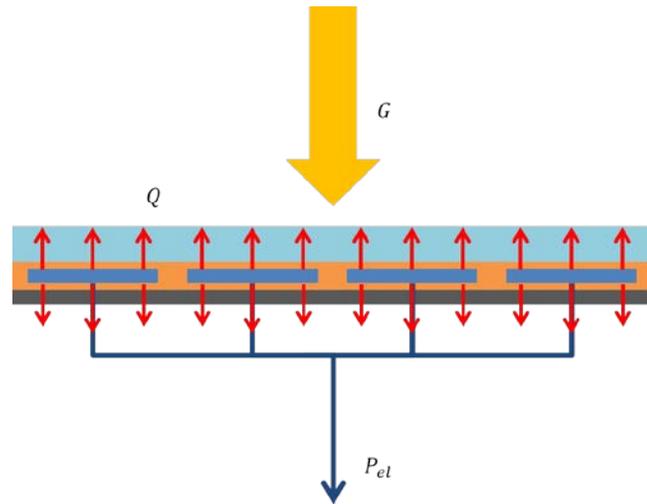


Figura 4.1 Balance energético en el panel fotovoltaico.

4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos obtenidos desde el Ministerio de Energía son procesados y de acuerdo a criterio se seleccionan valores tipo para utilizarlos como datos de entrada para los modelos a analizar, de modo de obtener como valores constantes:

- G : Radiación incidente [W/m^2]
- T_{∞} : Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]
- U_{∞} : Velocidad del viento [m/s]

4.3 DATOS DE CATÁLOGO COMERCIAL

Se utilizan los datos de un catálogo comercial de paneles fotovoltaicos para tener acceso a los valores nominales de potencia, coeficientes térmicos, y además, de sus dimensiones.

- γ : Coeficiente térmico de potencia [$\%/^{\circ}C$]
- P_{mpp} : Potencia máxima [W]
- η_{el} : Rendimiento eléctrico (teórico)

4.4 RESISTENCIA TÉRMICA

4.4.1 Modelo unidimensional

Utilizando las ecuaciones presentadas en los antecedentes, se proceden a calcular las cargas térmicas presentes en el modelo, en base a los espesores y conductividades térmicas. Para el caso de los coeficientes convectivos, es necesario identificar la geometría a la cuál estará asociado y de acuerdo a eso calcular. Para el caso de la convección forzada en la parte superior del panel, es constante para todos los casos de análisis. El coeficiente convectivo para las aletas depende del espaciamiento entre las mismas, y por ello requiere un modelo más elaborado (cuyo valor se utiliza para el modelo unidimensional como para el tridimensional). Una vez acabada la búsqueda de las cargas térmicas, se procede a ensamblar el modelo de resistencias equivalentes.

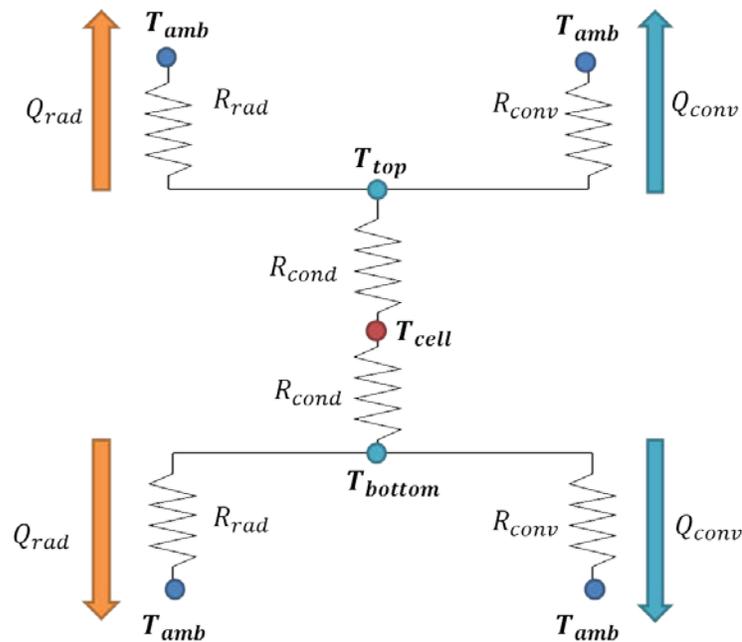


Figura 4.2 Modelo de resistencias térmicas equivalentes.

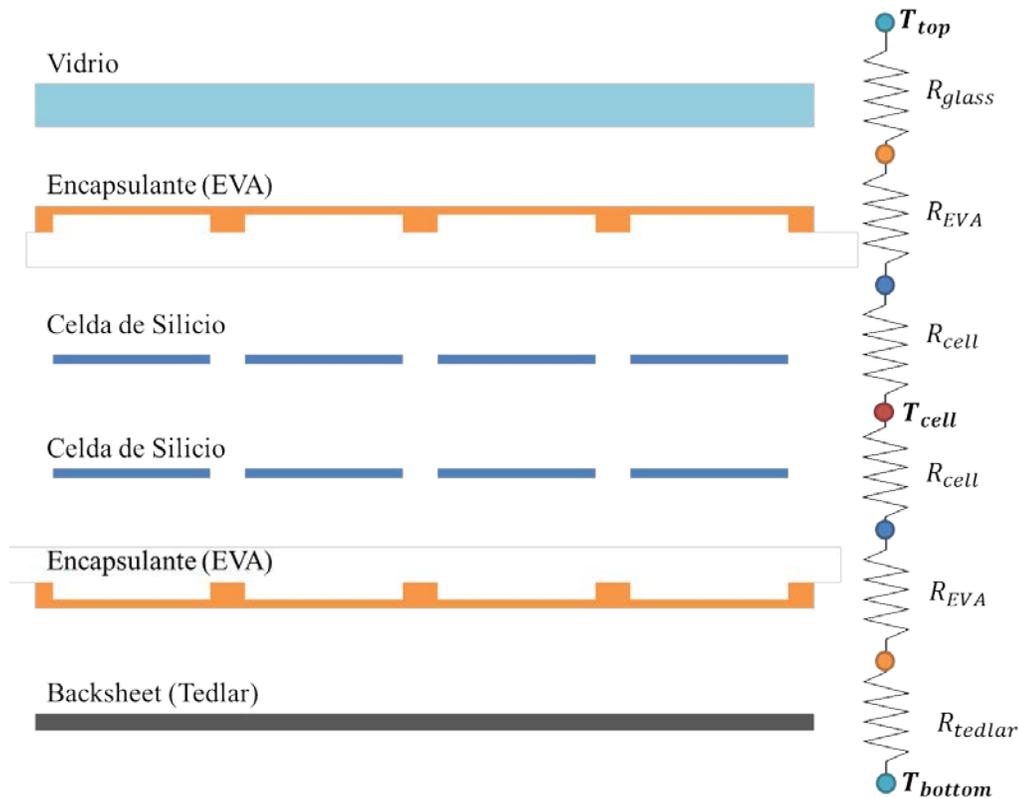


Figura 4.3 Resistencias conductivas

Luego del cálculo de las resistencias térmicas del panel, se procede a calcular la resistencia del disipador de calor, tal como se vio en la sección de fundamentos del disipador de calor.

4.4.2 Modelo tridimensional

El modelo tridimensional se realiza en el software comercial ANSYS®, programa de elementos y/o volúmenes finitos, el cual permite mediante la entrega de un dominio físico (CAD) y variables físicas (cargas externas, propiedades de los materiales), el cálculo de simulaciones y procesos físicos de variado interés científico e ingenieril.

- Una vez dibujada la geometría como CAD 3D, se integra todo el modelo y se le otorgan las propiedades de los materiales correspondientes del panel fotovoltaico.
- Luego se identifican las cargas externas, en este caso: generación interna de calor (Q), convección (h, T_{∞}, G) y radiación (T_{∞}).

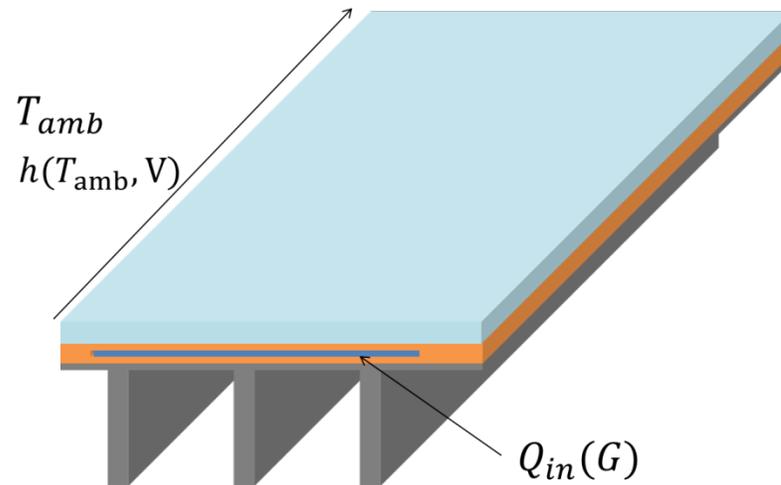


Figura 4.4 Condiciones de carga necesarias para el modelo en ANSYS

Para realizar varios modelos, se hacen seguidas repeticiones de cálculos utilizando el módulo de análisis paramétrico de ANSYS APDL que permite introducir una lista de parámetros, y que el programa ingrese solo a variarlo y mostrar resultados. Los parámetros a variar fueron:

- Número de aletas (n)
- Espesor de aletas (t)
- Alto de aletas (H)

RESULTADOS

Se presentan a continuación los datos numéricos utilizados y los resultados obtenidos luego de las modelaciones y simulaciones contenidas en este estudio. La organización del capítulo corresponde a la siguiente:

- Panel fotovoltaico
 - Dimensiones físicas
 - Variables eléctricas y térmicas

- Datos meteorológicos
 - Temperatura ambiente
 - Velocidad del viento
 - Radiación solar horizontal
 - Resumen de datos utilizados

- Coeficiente convectivo
 - Caso sin disipador de calor (caso base)
 - Casos con disipador de calor

- Resistencia térmica
 - Modelo teórico
 - Modelo tridimensional
 - Caso sin disipador de calor (caso base)
 - Casos con disipador de calor

5.1 PANEL FOTOVOLTAICO

Tabla 5.1 Dimensiones del panel fotovoltaico.

<i>Dimensión</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Largo	L	1	[m]
Ancho	W	1,3	[m]
Área	A	1,3	[m ²]

Tabla 5.2 Espesor y conductividad térmica de las capas del panel fotovoltaico.

	t [mm]	k [W/mK]
Vidrio	3,00	1,8
EVA	0,50	0,35
Silicio	0,23	148
Tedlar	0,10	0,2

Tabla 5.3 Datos de catálogo del panel fotovoltaico

PERFORMANCE BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (STC*)		
Potencia máxima	P_{mpp}	250 [W]
Celdas por módulo		60
Dimensiones de celda		156 [mm]x 156 [mm]
Coefficiente térmico de Potencia	γ	-0,45 [%/K]
Temperatura de operación		-40 [°C] a 85 [°C]

5.2 DATOS METEOROLÓGICOS

Tabla 5.4 Datos geográficos de los datos medidos

Mediciones Solares MINENERGÍA/GIZ	
<i>Nombre Estación</i>	San Pedro de Atacama
<i>Coordenada UTM E</i>	586.094 [m]
<i>Coordenada UTM S</i>	7.458.813 [m]
<i>Huso</i>	19 K
<i>Altitud</i>	2.390 [msnm]
<i>Región</i>	Antofagasta
<i>Provincia</i>	El Loa
<i>Comuna</i>	San Pedro
<i>Fecha medición</i>	01.01.2011

Tabla 5.5 Datos meteorológicos utilizados

<i>Variable</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Radiación solar horizontal	G	1.000	$[W/m^2]$
Temperatura ambiente	T_{∞}	25	$[^{\circ}C]$
Velocidad del viento	U_{∞}	2,5	$[m/s]$

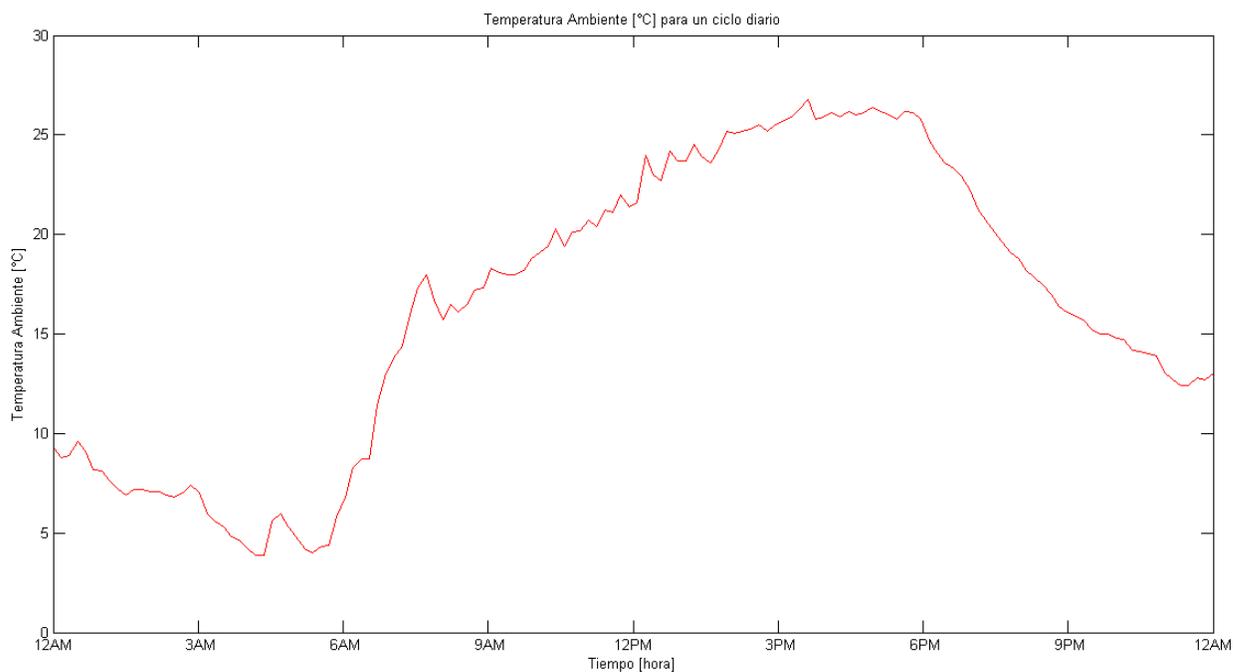


Figura 5.1 Temperatura ambiente en un ciclo diario

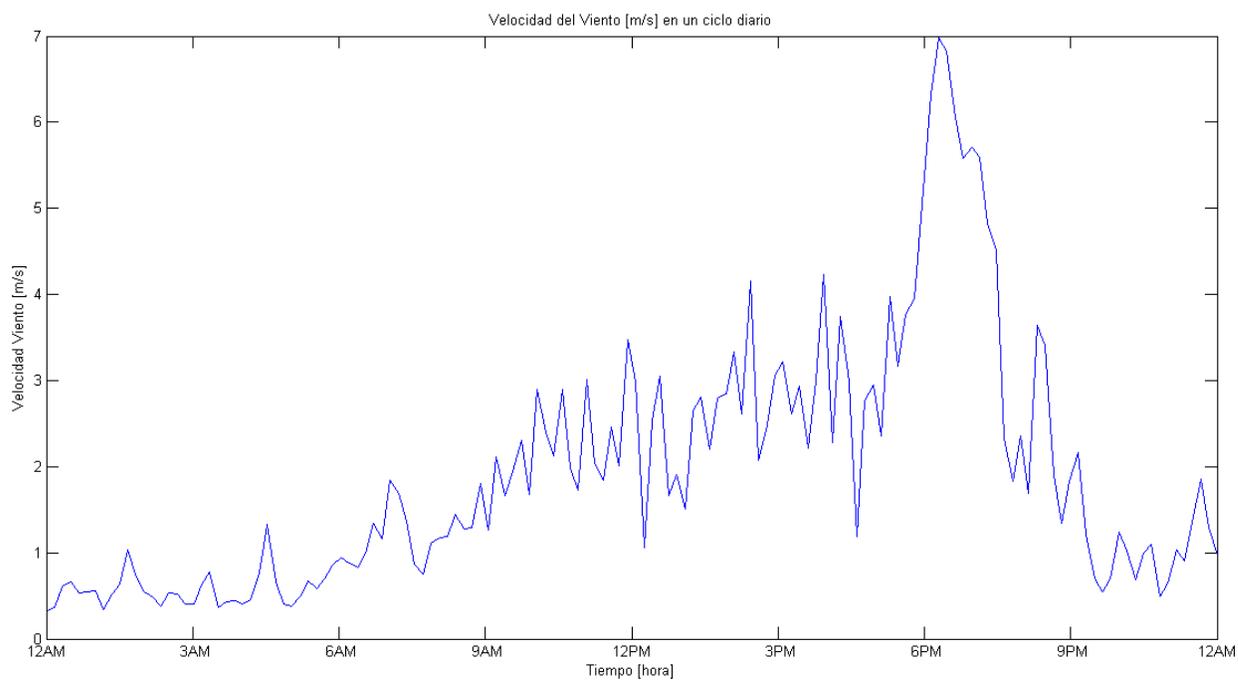


Gráfico 5.1 Velocidad del viento en un ciclo diario

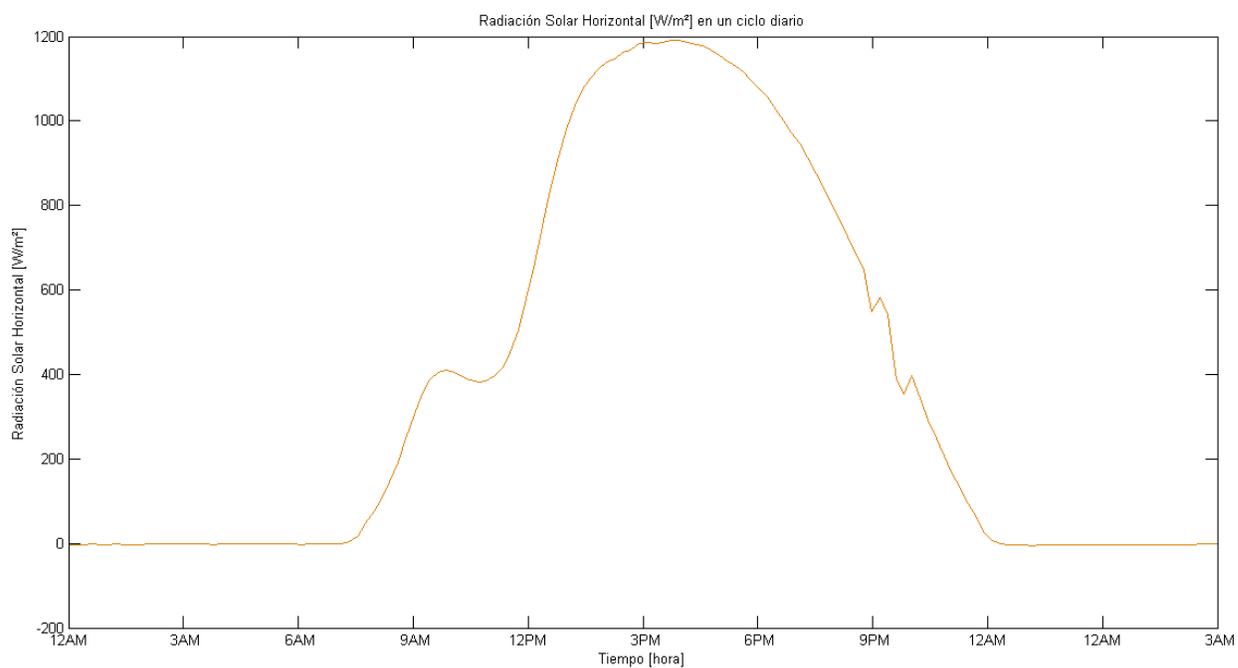


Gráfico 5.2 Radiación solar horizontal en un ciclo diario

5.3 COEFICIENTE CONVECTIVO

Tabla 5.6 Propiedades del aire a temperatura ambiente

<i>Variable</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Viscosidad dinámica	ν	$1,59 \times 10^{-5}$	$[m^2/s]$
Número de Prandtl	Pr	0,707	
Conductividad térmica	k_{air}	0,0263	$[W/mK]$

5.3.1 Caso sin disipador (caso base)

Tabla 5.7 Coeficiente convectivo – Sin disipador

<i>Variable</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Número de Reynolds	Re	157.331,66	
Número de Nusselt	Nu	234,62	
Coeficiente convectivo	h	6,1708	$[W/m^2K]$

5.3.2 Caso con disipador de calor²

Tabla 5.8 Número de Reynolds – Con disipador

<i>Nº de Aletas</i>	<i>b [mm]</i>	<i>Re_b</i>	<i>Re_b[*]</i>
10	141,11	22.201,24	3.132,84
20	65,26	10.267,96	670,12
30	41,72	6.564,53	273,90
40	30,26	4.760,29	144,03
50	23,47	3.692,48	86,66
60	18,98	2.986,63	56,70
70	15,80	2.485,38	39,26
80	13,42	2.111,03	28,33
90	11,57	1.820,80	21,07
100	10,10	1.589,21	16,05
110	8,90	1.400,11	12,46
120	7,90	1.242,79	9,82
130	7,05	1.109,86	7,83
140	6,33	996,06	6,31
150	5,70	897,53	5,12
160	5,16	811,40	4,18
170	4,67	735,46	3,44
180	4,25	668,00	2,84
190	3,86	607,68	2,35
200	3,52	553,43	1,95

² Caso modelo, con una altura de aleta $H = 150 [mm]$ y un espesor de aleta, $t = 3[mm]$.

Tabla 5.9 Número de Nusselt (desarrollado, en desarrollo, ideal y corregido) – Con dissipador

N° de Aletas	Nu_{fd}	Nu_{dev}	Nu_{ideal}	$Nu_{corregido}$
10	1107,460	34,171	34,171	30,662
20	236,887	16,357	16,355	14,629
30	96,823	10,816	10,810	9,639
40	50,914	8,107	8,096	7,196
50	30,634	6,497	6,477	5,739
60	20,042	5,427	5,392	4,764
70	13,879	4,663	4,605	4,058
80	10,013	4,088	3,999	3,516
90	7,449	3,638	3,507	3,078
100	5,675	3,276	3,090	2,709
110	4,404	2,978	2,722	2,387
120	3,470	2,727	2,390	2,098
130	2,768	2,513	2,086	1,835
140	2,229	2,327	1,806	1,595
150	1,810	2,164	1,552	1,377
160	1,479	2,019	1,324	1,182
170	1,215	1,890	1,123	1,009
180	1,003	1,773	0,949	0,857
190	0,830	1,667	0,798	0,726
200	0,688	1,569	0,670	0,613

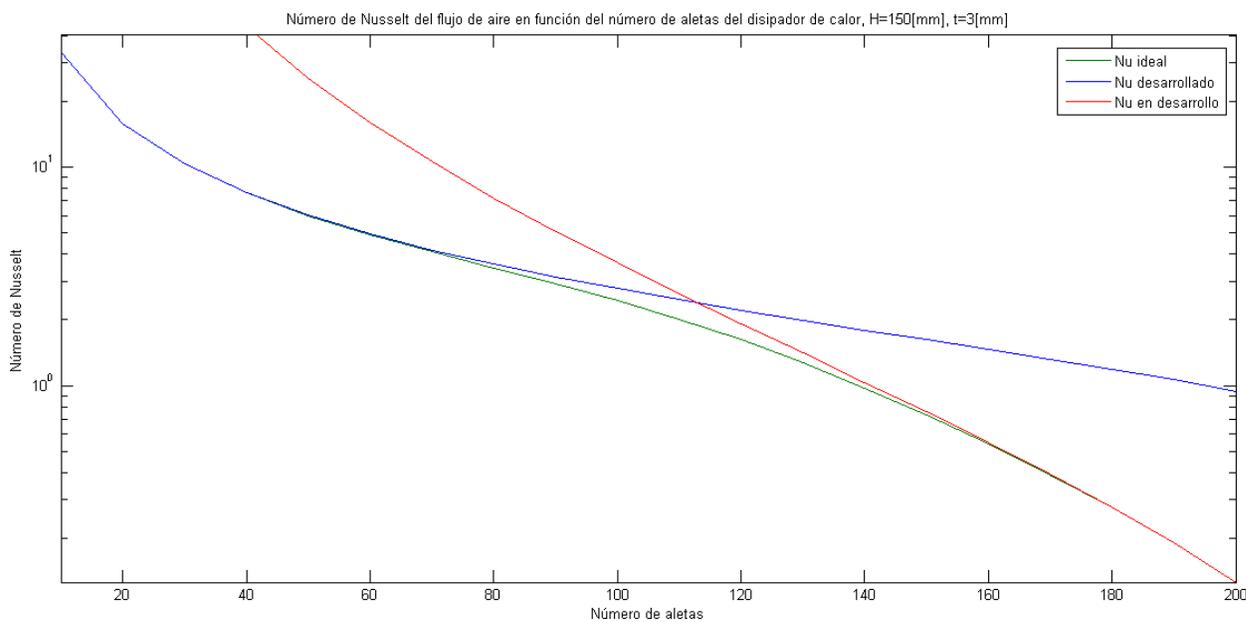


Figura 5.2 Número de Nusselt en función del número de aletas

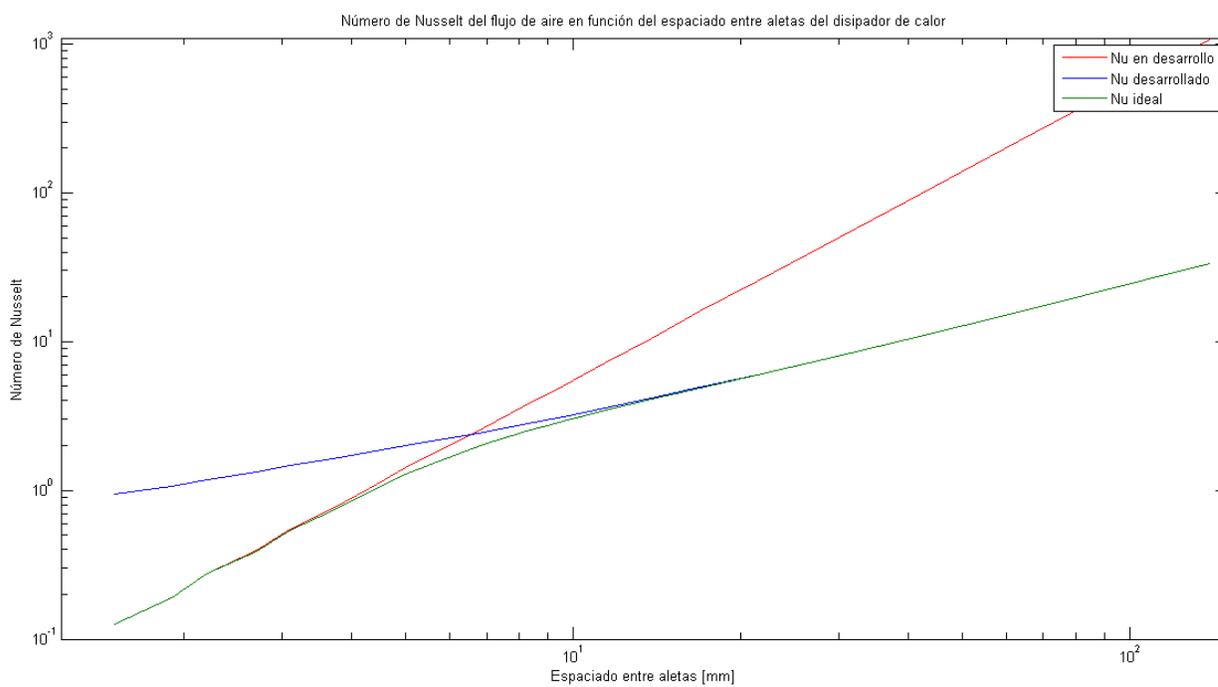


Figura 5.3 Número de Nusselt en función del espaciado entre aletas

Tabla 5.10 Coeficiente convectivo – Con dissipador

<i>Nº de Aletas</i>	<i>h [W/m²K]</i>
10	5,7147
20	5,8952
30	6,0759
40	6,2554
50	6,4316
60	6,6005
70	6,7565
80	6,8914
90	6,9946
100	7,0532
110	7,0538
120	6,9854
130	6,8425
140	6,6274
150	6,3505
160	6,0274
170	5,6754
180	5,3101
190	4,9438
200	4,5853

5.4 RESISTENCIA TÉRMICA

5.4.1 Modelo teórico

Tabla 5.11 Resistencia térmica de aleta y del disipador de calor

<i>N° de Aletas</i>	<i>Coefficiente Convectivo</i> <i>h [W/m²K]</i>	<i>Resistencia de aleta</i> <i>R_{fin}[°C/W]</i>	<i>Resistencia disipador</i> <i>R_{sink}[°C/W]</i>
10	5,7147	0,649	0,0441
20	5,8952	0,631	0,0257
30	6,0759	0,614	0,0178
40	6,2554	0,599	0,0135
50	6,4316	0,584	0,0108
60	6,6005	0,571	0,0089
70	6,7565	0,559	0,0076
80	6,8914	0,549	0,0065
90	6,9946	0,542	0,0058
100	7,0532	0,538	0,0052
110	7,0538	0,538	0,0047
120	6,9854	0,543	0,0044
130	6,8425	0,553	0,0042
140	6,6274	0,569	0,0040
150	6,3505	0,591	0,0039
160	6,0274	0,619	0,0038
170	5,6754	0,653	0,0038
180	5,3101	0,694	0,0038
190	4,9438	0,740	0,0039
200	4,5853	0,793	0,0039

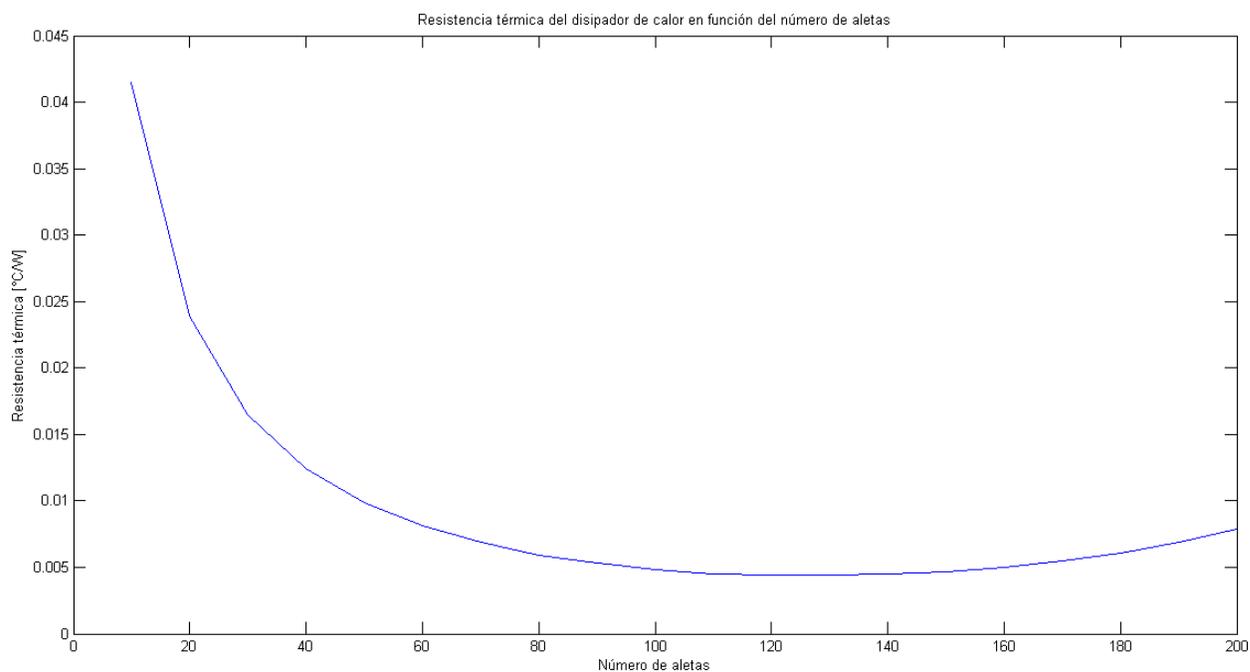


Figura 5.4 Resistencia térmica del dissipador de calor en función del número de aletas

5.4.2 Modelos tridimensionales

Para los modelos tridimensionales, los datos ingresados a ANSYS fueron los siguientes:

Tabla 5.12 Datos de entrada de ANSYS

<i>Variable</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Generación interna de calor	Q	200.000	$[W/m^3]$
Número de Prandtl	Pr	0,707	
Conductividad térmica	k_{air}	0,0263	$[W/mK]$

5.4.2.1 Caso sin disipador (Escala local de colores)

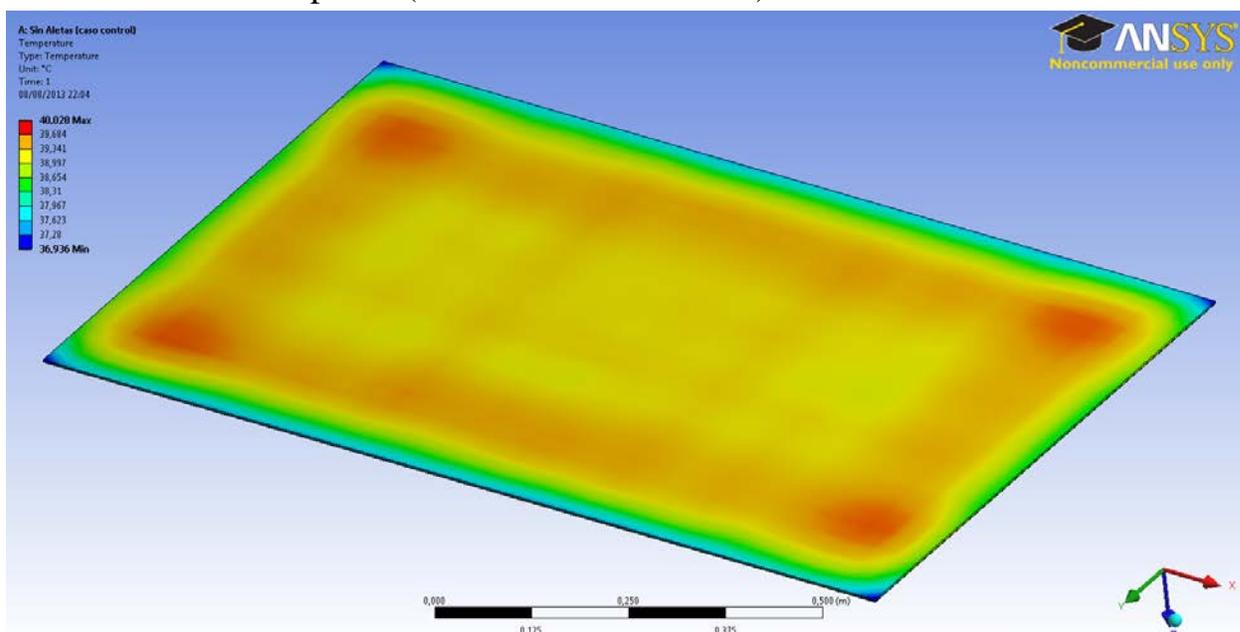


Figura 5.5 Distribución de temperatura exterior - Sin disipador

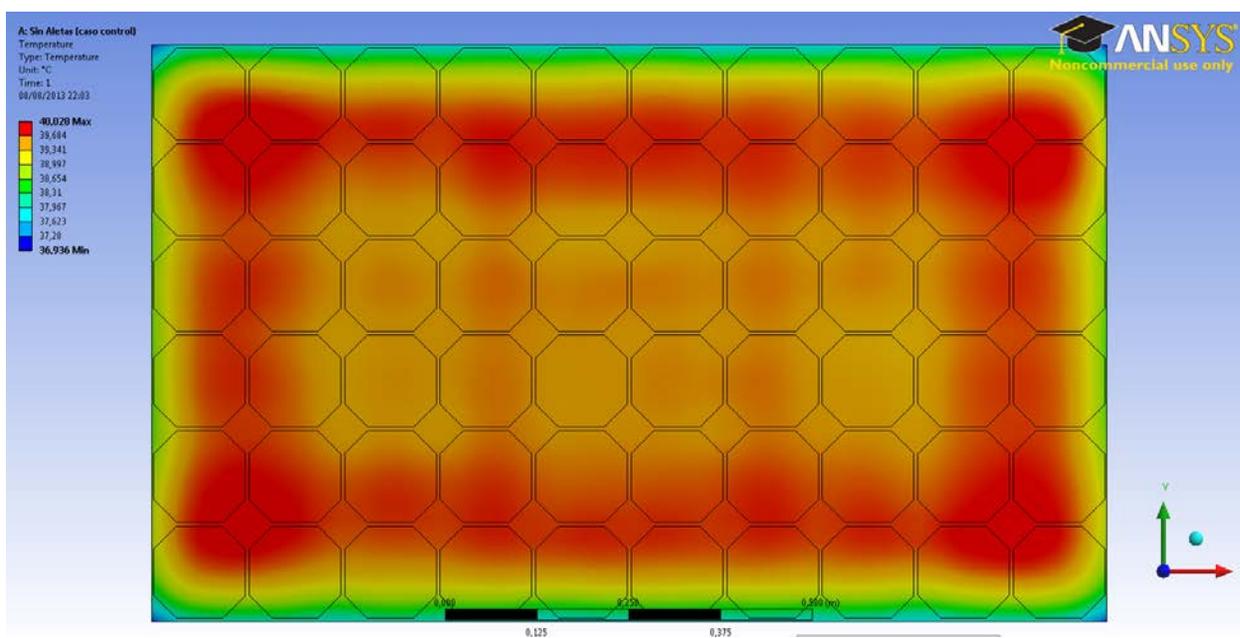


Figura 5.6 Distribución de temperatura interior - Sin disipador

5.4.2.2 Caso con disipador³

Tabla 5.13 Temperatura de celda y resistencia térmica total – con disipador.

<i>N° de Aletas</i>	<i>Temperatura de celda [°C]</i>	<i>Resistencia térmica total [°C/W]</i>
10	38,418	0,0298
20	34,711	0,0216
30	32,578	0,0168
40	31,224	0,0138
50	30,135	0,0114
60	29,457	0,0099
70	28,823	0,0085
80	28,384	0,0075
90	28,056	0,0068
100	27,813	0,0063
110	27,603	0,0058
120	27,451	0,0054
130	27,356	0,0052
140	27,392	0,0053
150	27,465	0,0055
160	27,624	0,0058
170	27,847	0,0063
180	28,013	0,0067
190	28,235	0,0072
200	28,63	0,0081

³ Caso modelo, con alto de aleta $H = 150$ [mm] y espesor de aleta $t = 3$ [mm].

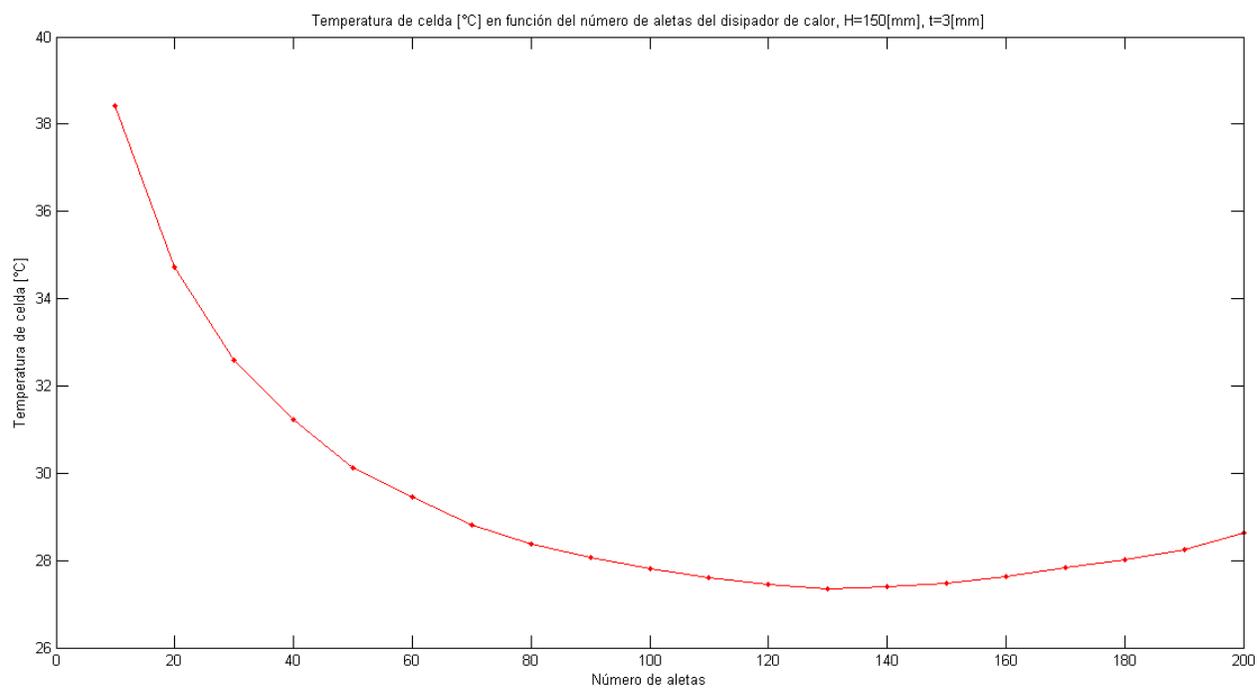


Figura 5.7 Temperatura de celda en función del número de aletas

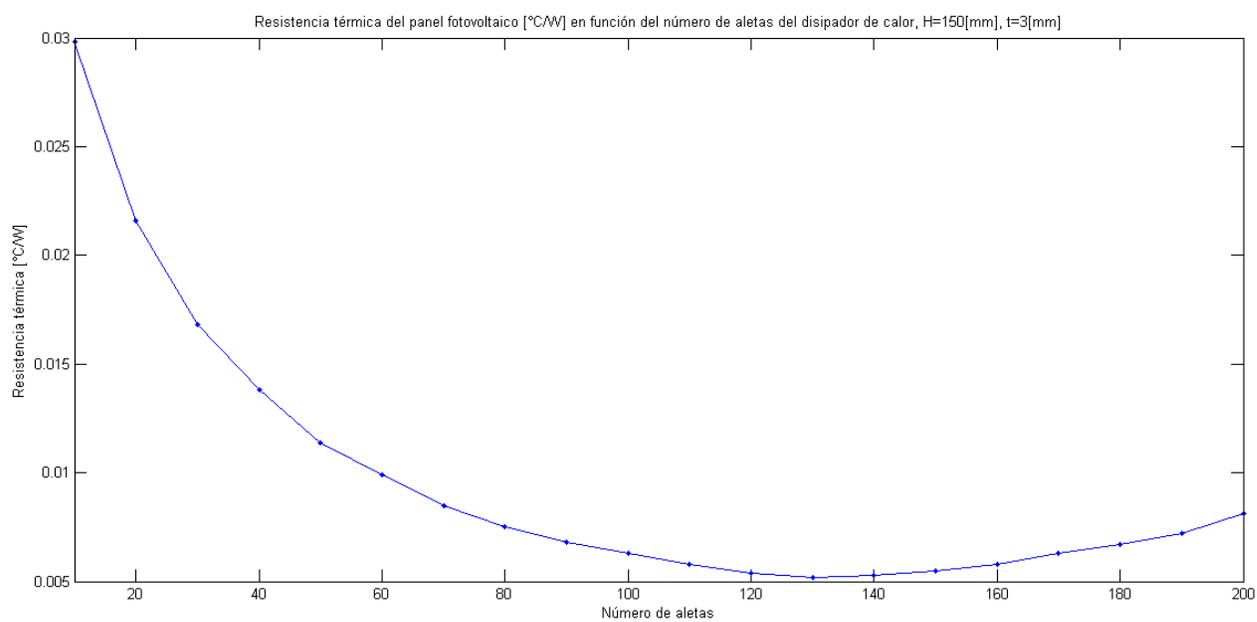


Figura 5.8 Resistencia térmica total del panel fotovoltaico en función del número de aletas

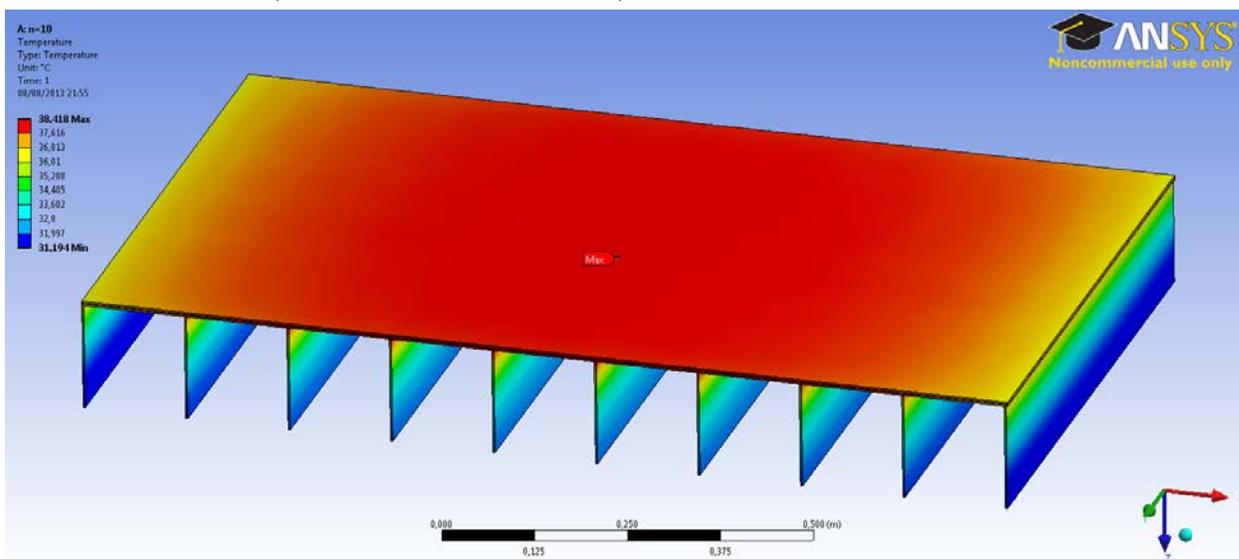
5.4.2.3 $n = 10$ (Escala local de colores)

Figura 5.9 Distribución de temperatura exterior – Con dissipador (n=10)

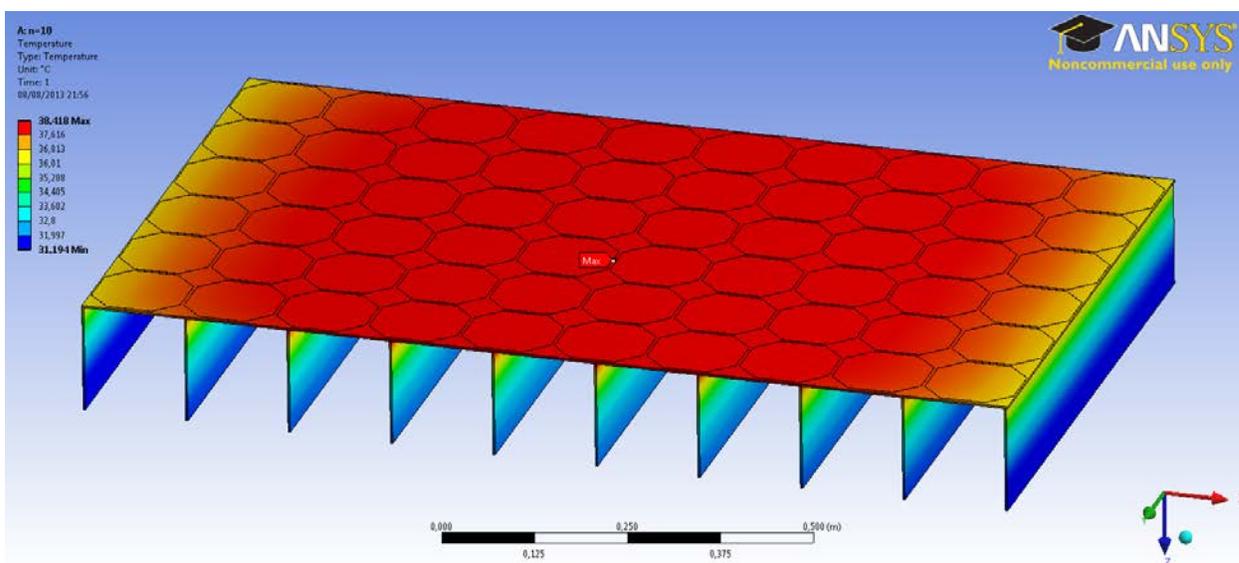


Figura 5.10 Distribución de temperatura interior – Con dissipador (n=10)

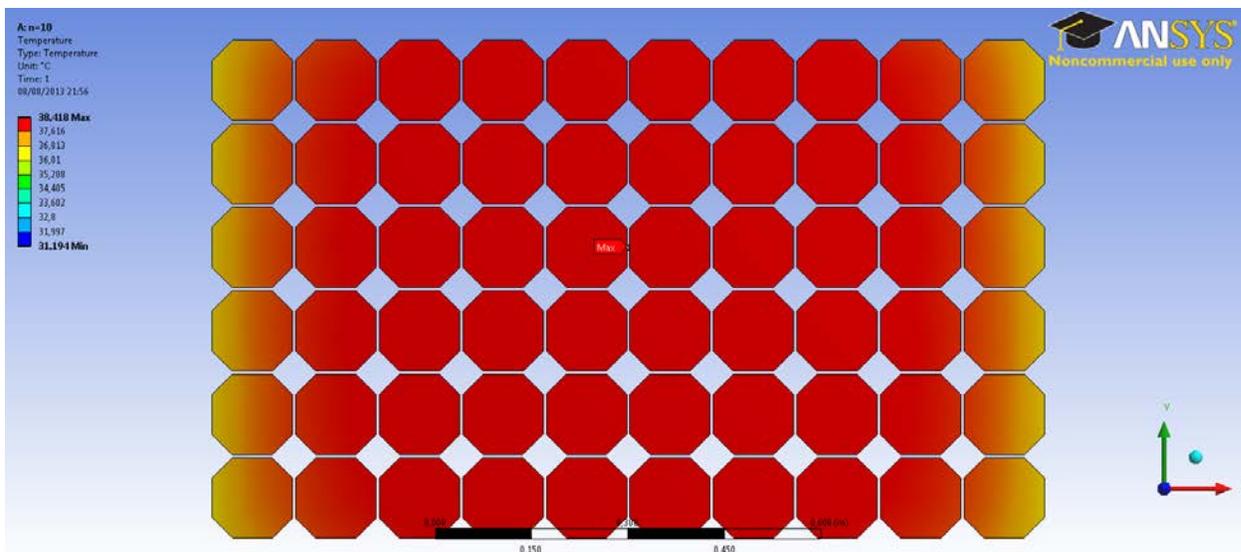


Figura 5.11 Distribución de temperatura interior (detalle) – Con disipador (n=10)

5.4.2.4 $n = 100$ Aletas (Escala local de colores)

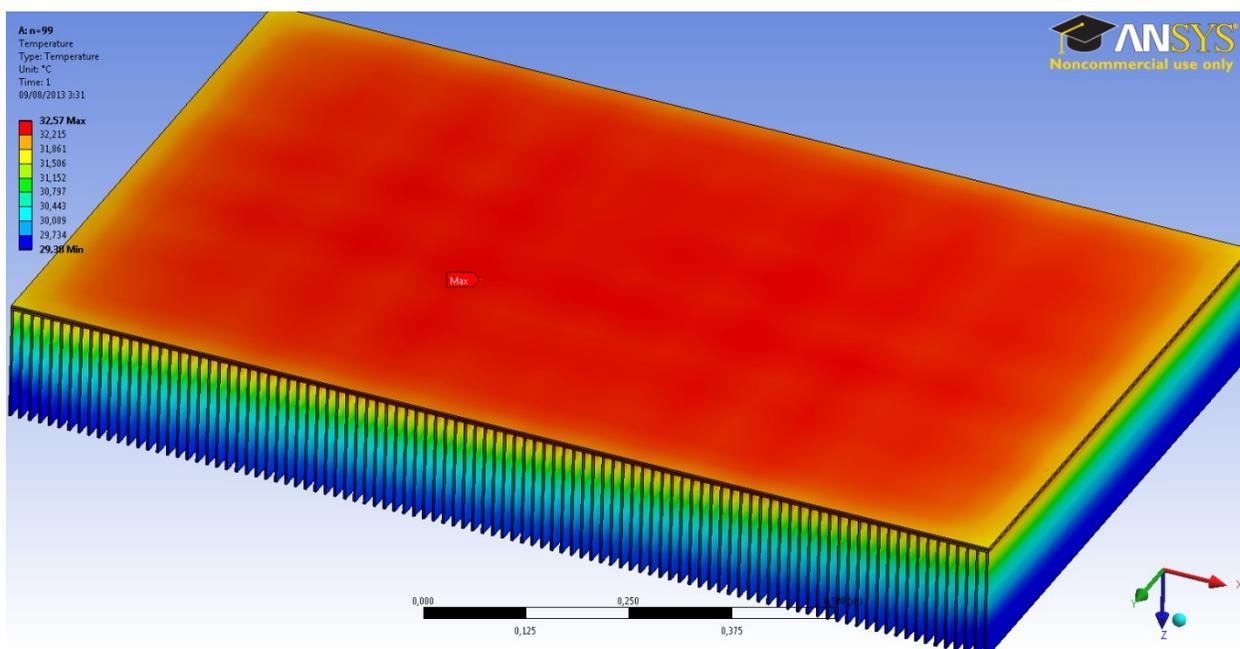


Figura 5.12 Distribución de temperatura exterior – con disipador (n=100)

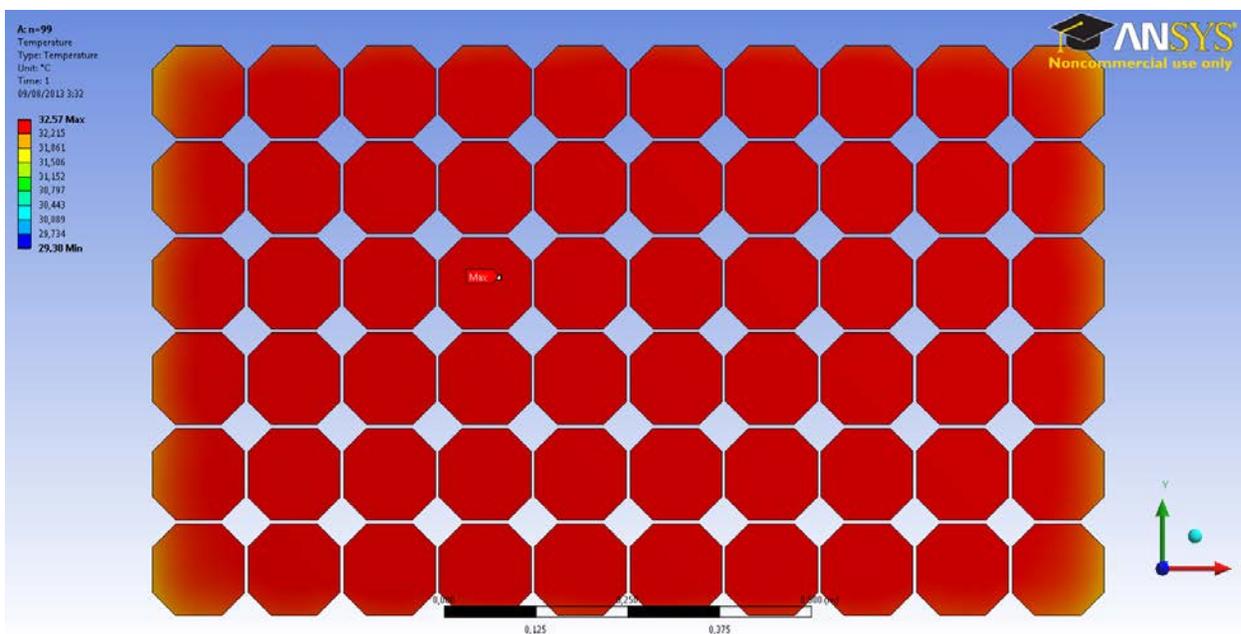


Figura 5.13 Distribución de temperatura interior (detalle) – con disipador (n=100)

5.4.2.5 $n = 200$ Aletas (Escala local de colores)

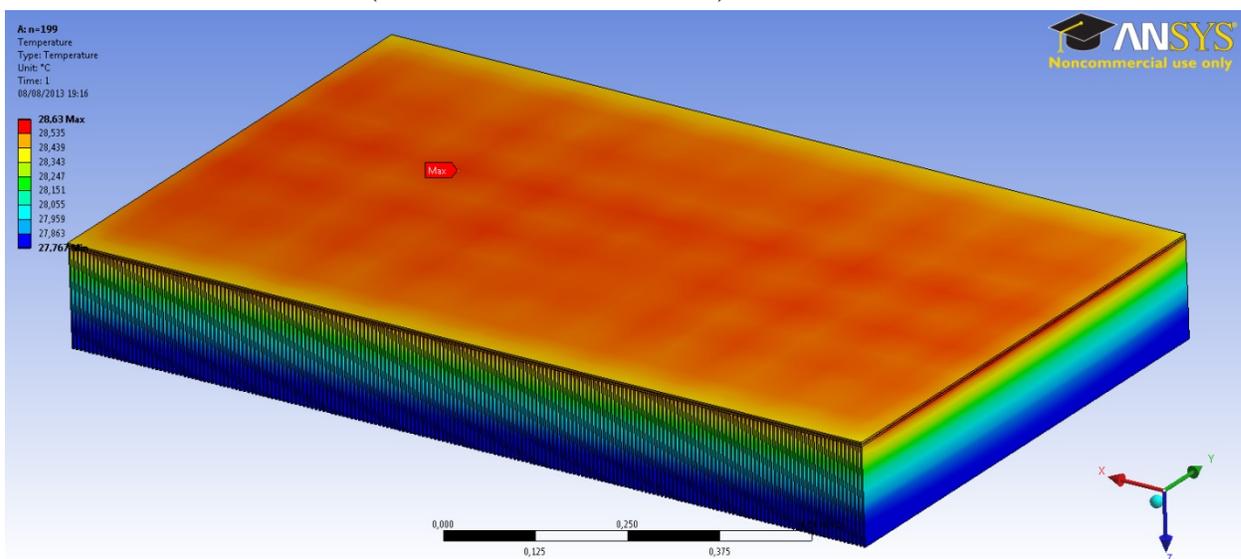


Figura 5.14 Distribución de temperatura exterior – Con disipador (n=200)

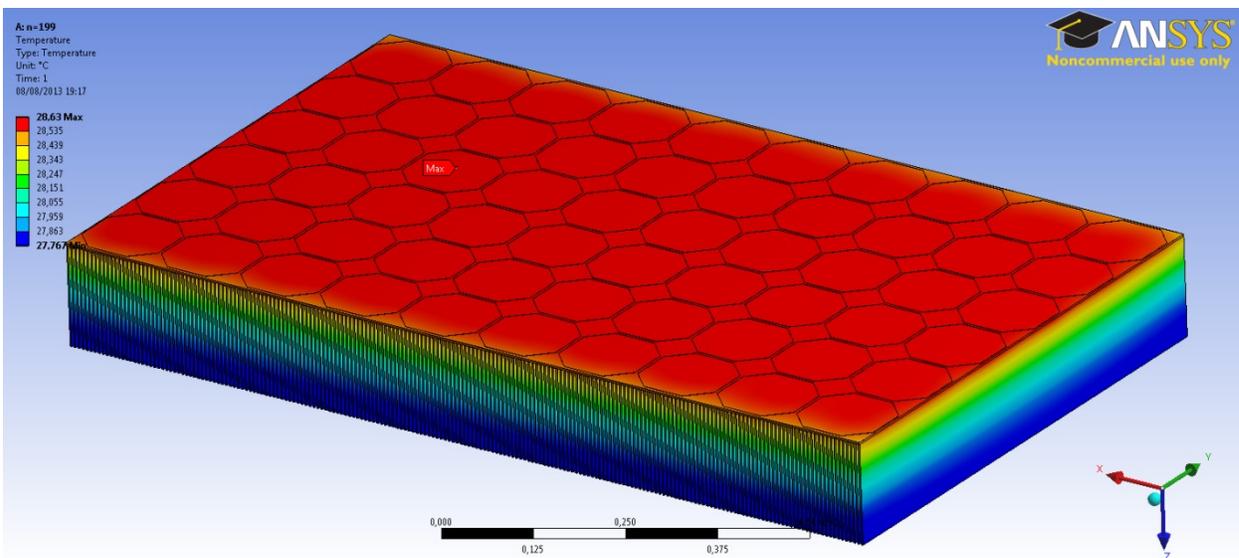


Figura 5.15 Distribución de temperatura interior – Con disipador (n=200)

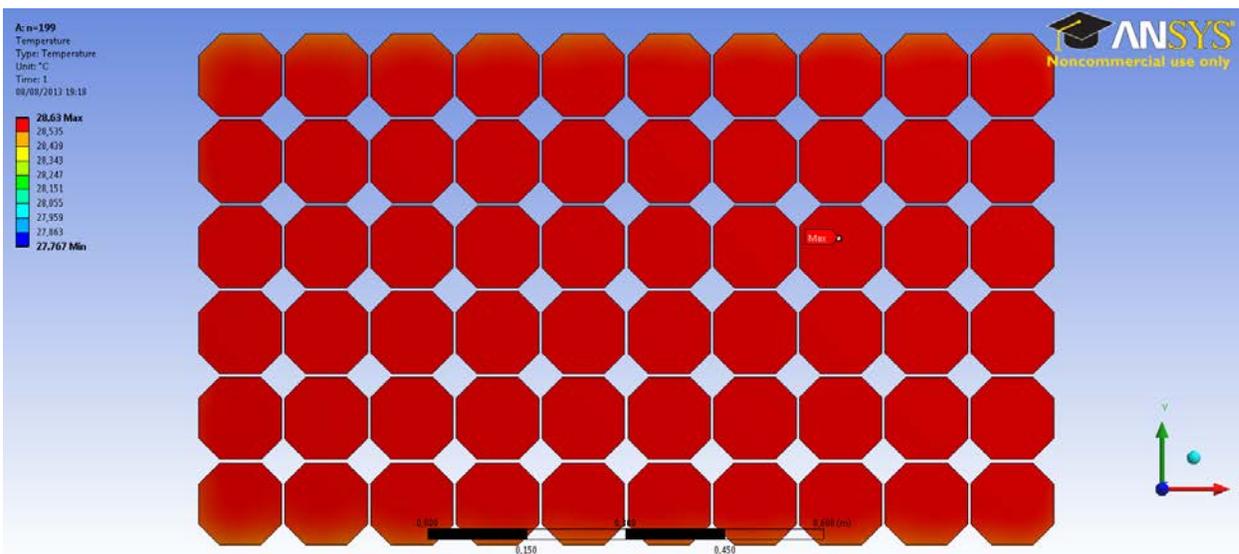


Figura 5.16 Distribución de temperatura interior (detalle) – Con disipador (n=200)

5.5 POTENCIA Y EFICIENCIA ELÉCTRICA

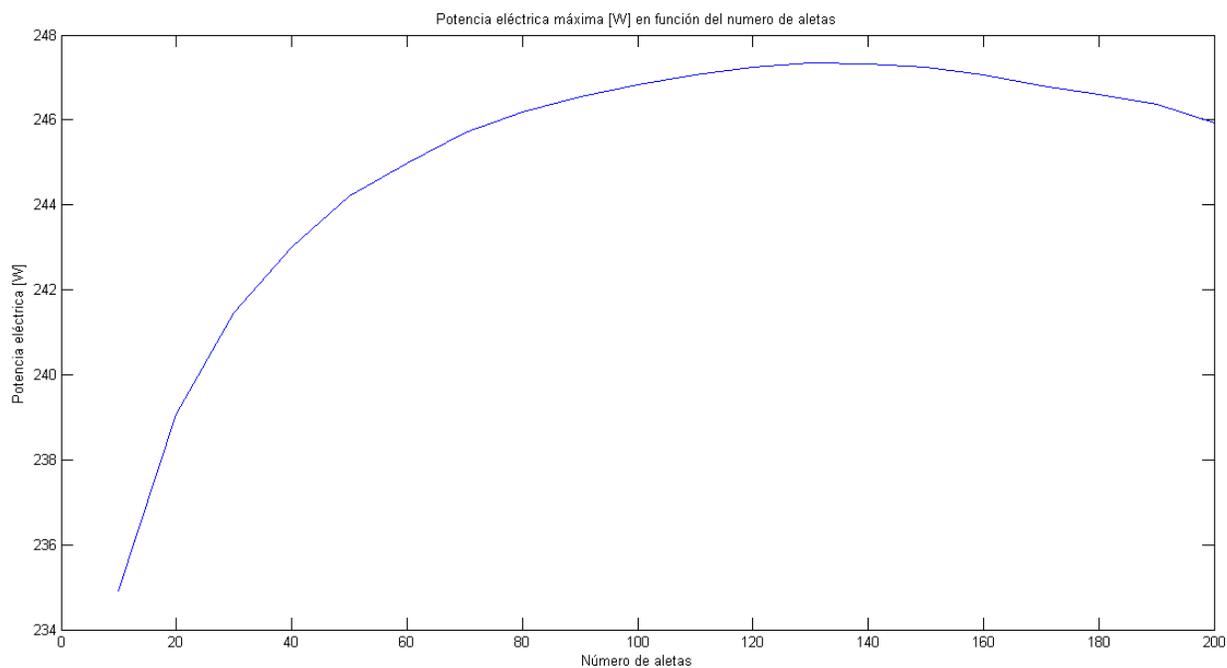


Figura 5.17 Potencia eléctrica máxima generada en función del número de aletas

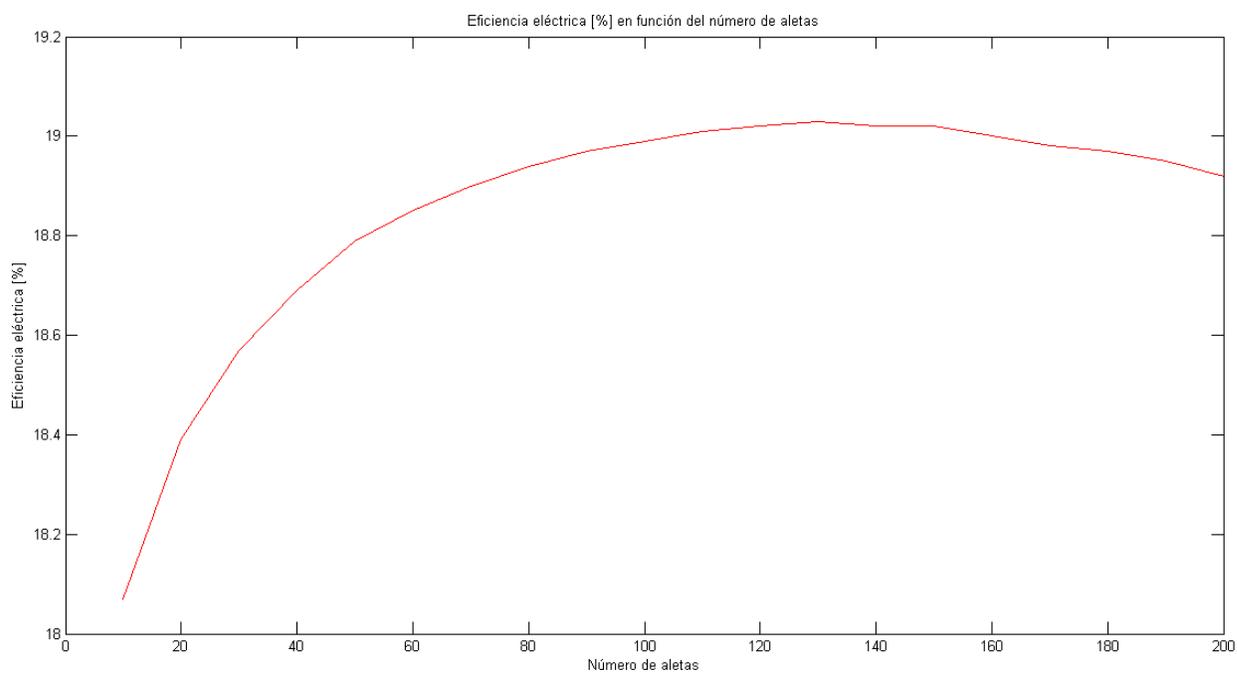


Figura 5.18 Eficiencia eléctrica en función del número de aletas

Las discusiones de esta sección incluyen:

- Efecto del número de aletas en el número de Nusselt.
- Efecto del número de aletas en la temperatura
- Resistencia térmica total
- Efecto de la altura en la resistencia térmica
- Efecto del espesor en la resistencia térmica

6.1 EFECTO DEL NÚMERO DE ALETAS EN EL NÚMERO DE NUSSELT

Una vez realizado el modelo tridimensional, se tuvo que incorporar un modelo que pudiera evidenciar el proceso que ocurre en el flujo entre placas, uno que pudiera modelar el número de Nusselt tanto para flujo desarrollado como para flujo en desarrollo. El modelo incorporado por los autores en (9) y en (10), siendo validado experimentalmente da la confianza suficiente como para utilizarlo sin mayor problema. El efecto directo no es precisamente el aumento de aletas, sino el angostamiento del espaciamiento entre las placas; al tener más la forma de un canal, el flujo se asemeja a un flujo entre placas paralelas infinitas. El fenómeno que ocurre de no desarrollo del flujo de aire va de la mano con un estancamiento de masa de fluido enfrente del dissipador de calor, lo que genera un gran gradiente de presión, lo cual tiene influencia directa en la velocidad al interior del canal.

El efecto es directo, al tener mayor número de aletas, los canales son más angostos, al ser más pequeño el espacio para que circule el aire, éste no se desarrolla completamente, dando paso a que el Nusselt en desarrollo predomine.

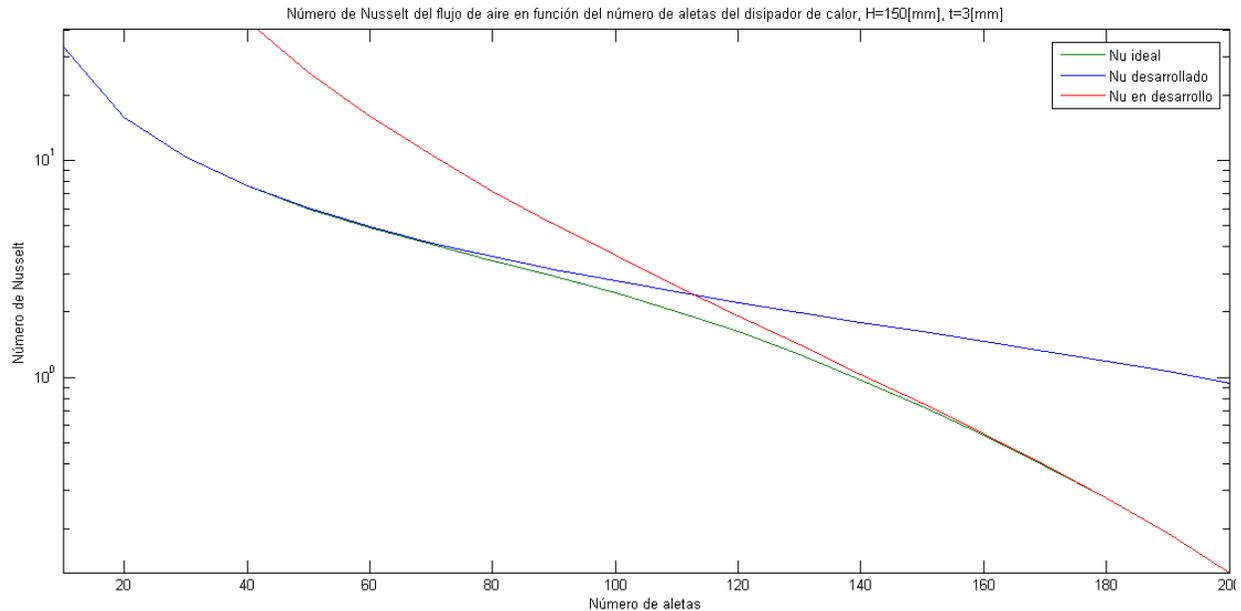


Figura 6.1 Número de Nusselt (Desarrollado, en desarrollo y modelo ideal) en función del número de aletas

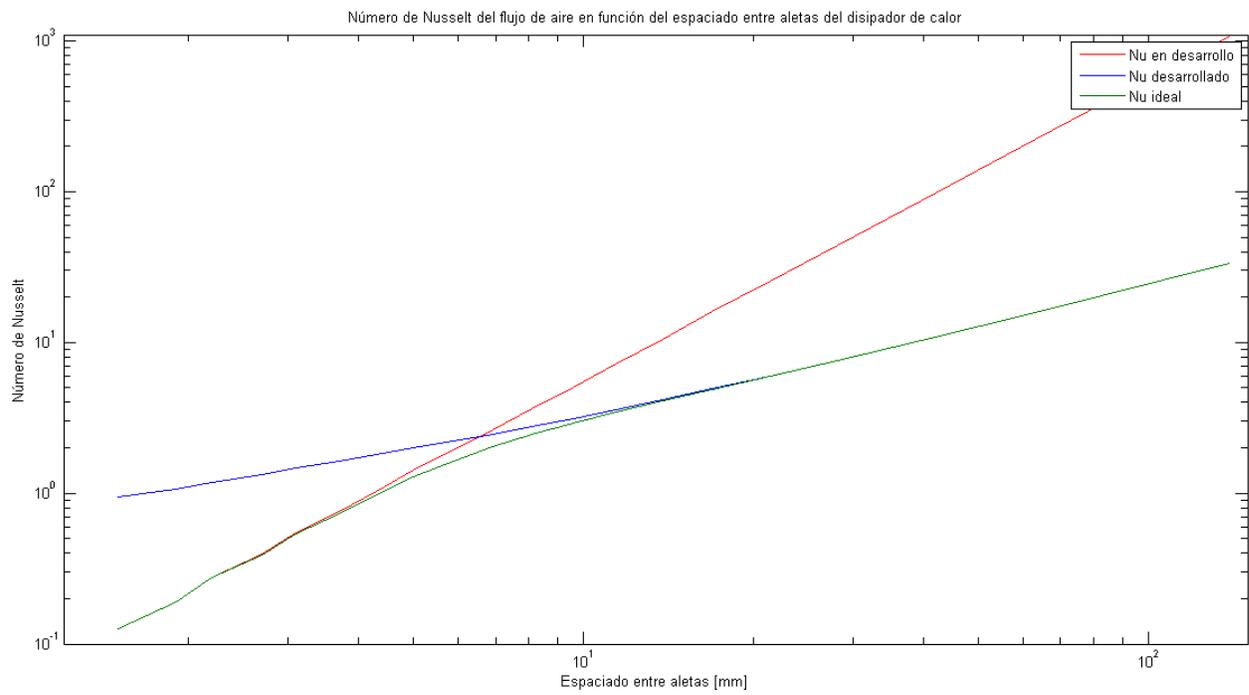


Figura 6.2 Número de Nusselt (Desarrollado, en desarrollo y modelo ideal) en función del espaciado entre aletas

6.2 EFECTO DEL NÚMERO DE ALETAS EN LA TEMPERATURA

Para poder realizar un análisis más visual, se muestran los resultados para la temperatura interior para los casos sin dissipador y con dissipador (10, 50, 100, y 200 aletas), cuya escala será: *Rojo* = 40 [°C], *Azul* = 25 [°C].

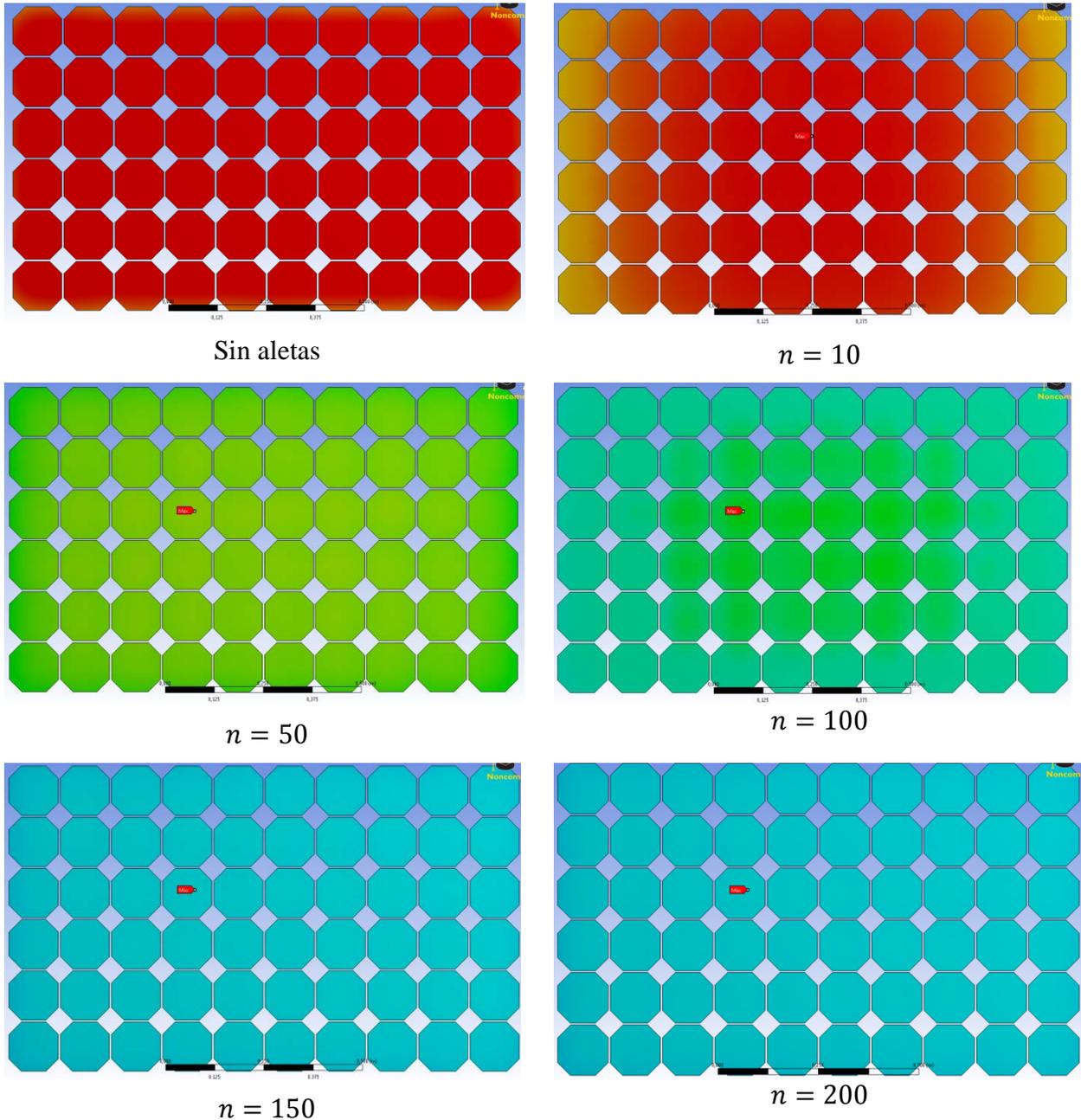


Figura 6.3 Comparación de casos, temperatura de celda

6.3 RESISTENCIA TÉRMICA TOTAL

Un resultado interesante del contraste entre los modelos unidimensional y tridimensional fue la similitud del comportamiento de la resistencia térmica del disipador con la resistencia térmica total del panel, lo cual nos da luces de que las resistencias convectivas y radiativas hacia el ambiente por la parte frontal del panel no tienen mayor influencia en el cálculo final de temperatura de celda. El diseño del disipador de calor da control total sobre la variable térmica, y su optimización permite obtener los resultados esperados, sin necesidad de incluir en los cálculos las resistencias térmicas que no sean del disipador.

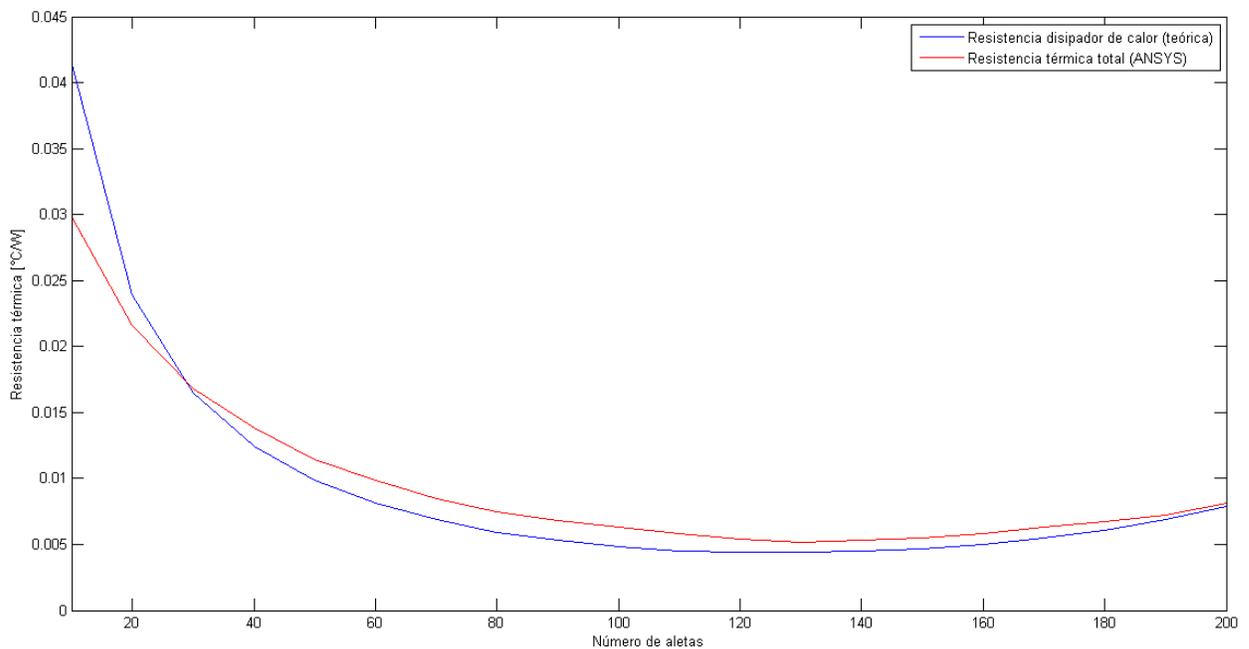


Figura 6.4 Resistencia total del panel fotovoltaico y resistencia del disipador de calor

6.4 EFECTO DE LA ALTURA DE ALETA EN LA RESISTENCIA TÉRMICA

Con motivo de la anterior discusión, cabe destacar que hablar de la resistencia térmica del disipador es a fin de cuentas, hablar de la resistencia térmica total del panel fotovoltaico. Utilizando esta relación directa, se puede caracterizar la variación de la altura de la aleta y cuantificar su influencia directa en la resistencia térmica del conjunto total. El efecto es cada vez menos relevante; mientras más alta sea cada aleta, menos es el peso que aporta a disminuir la resistencia térmica; una aleta entre 150 [mm] y 200 [mm] conseguirá casi los mismos efectos que una de 400 [mm] de alto en términos de temperatura de celda y de resistencia térmica.

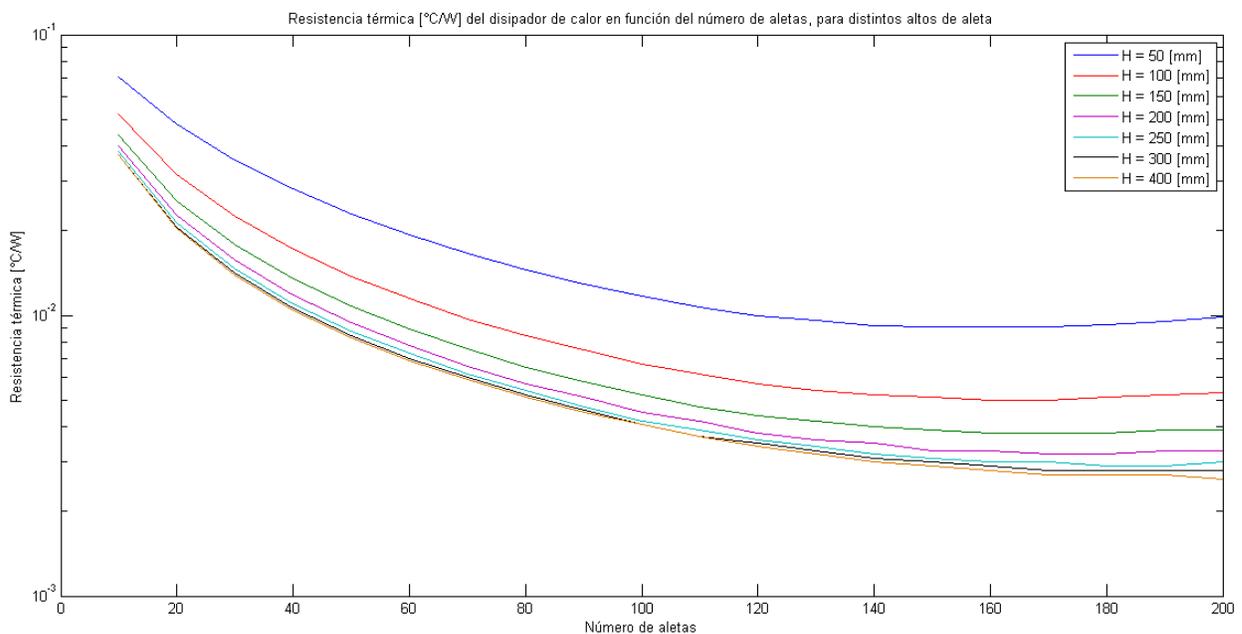


Figura 6.5 Efecto de la altura en la resistencia térmica del panel fotovoltaico

6.5 EFECTO DEL ESPESOR DE ALETA EN LA RESISTENCIA TÉRMICA

Al igual que en la discusión anterior, al momento de hacer variar el espesor de aleta, los resultados sugieren otra conclusión: a medida que se utiliza una aleta más gruesa, el óptimo de temperatura y resistencia térmica mínimas va disminuyendo. Esto tiene sentido, si se piensa de que al aumentar el espesor, para un mismo número de aleta, el espaciado entre placas es cada vez menor, por lo tanto el flujo no se desarrolla mejor al no tener suficiente espacio, produciéndose el efecto citado en la primera discusión. Se preferirá aletas más delgadas que gruesas, tanto por tema de mínimo de resistencia térmica como por disponibilidad del mercado, además de mantener dentro de un rango respetable la eficiencia de aleta (la cual aumenta para aletas más delgadas).

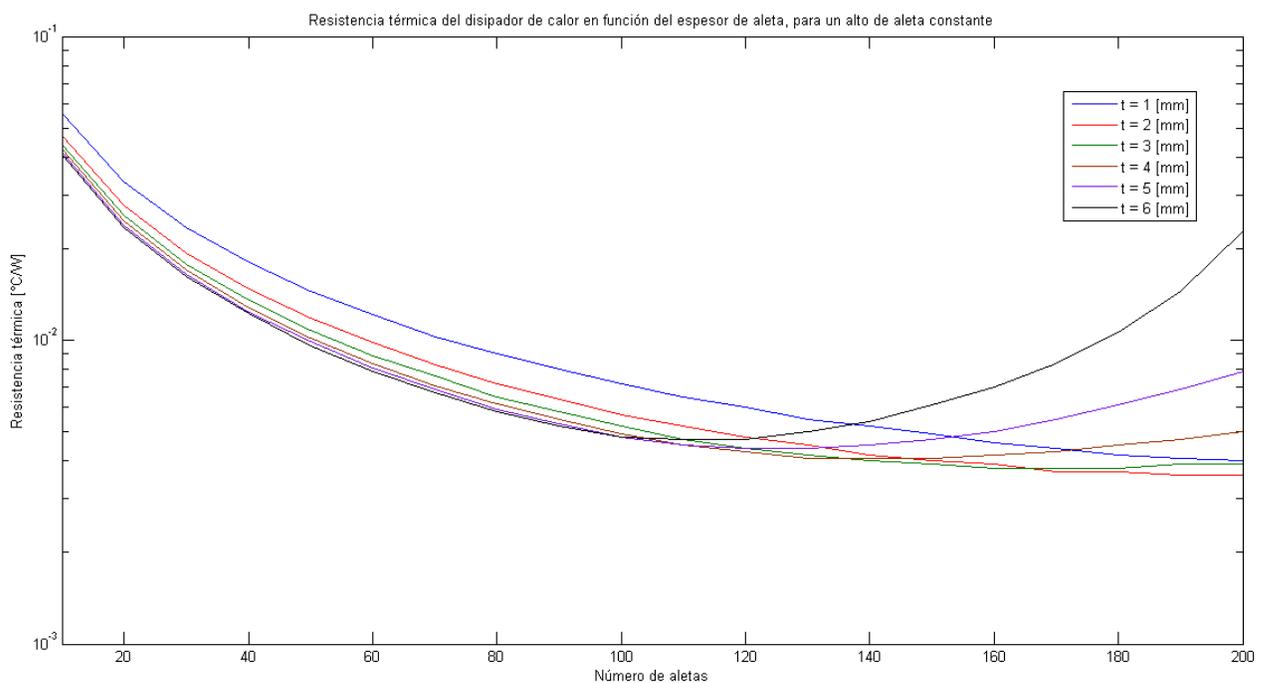


Figura 6.6 Efecto del espesor de aleta en la resistencia térmica del panel fotovoltaico (numero de aletas)

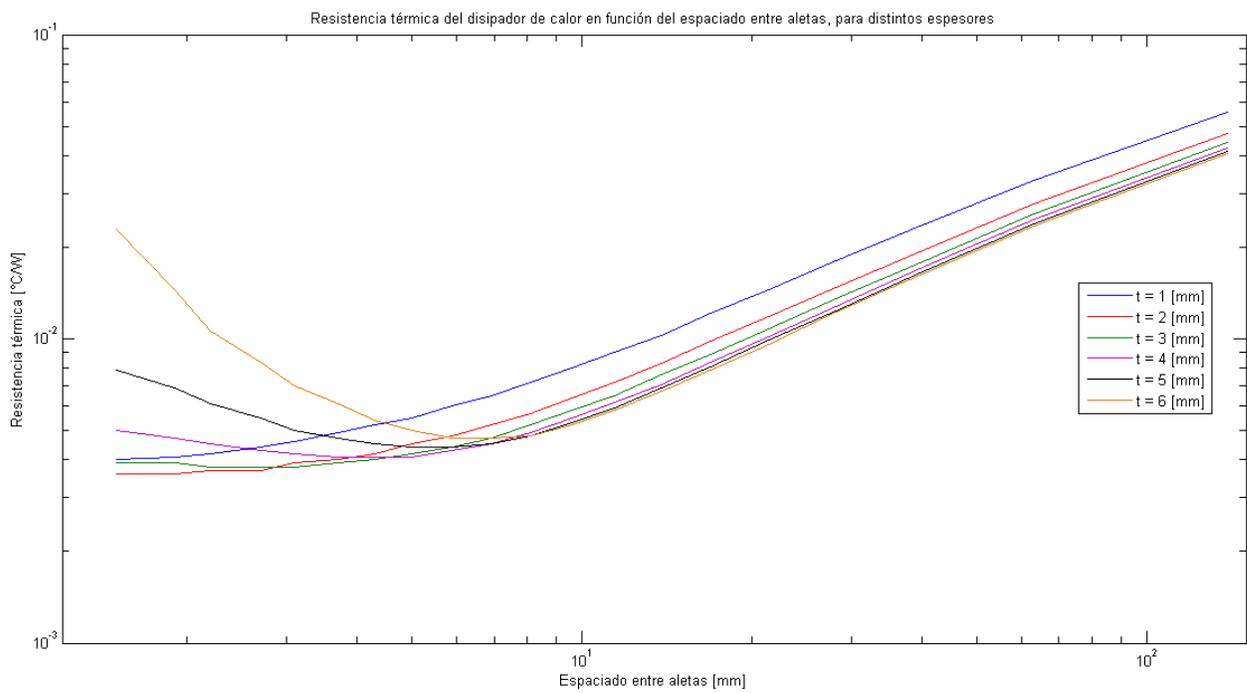


Figura 6.7 Efecto del espesor de aleta en la resistencia térmica del panel fotovoltaico (espaciado de aletas)

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

- El modelo unidimensional de la resistencia térmica del disipador de calor refleja de buena manera lo rescatado en el modelo tridimensional, más completo, y que permite además verificar donde está ocurriendo la temperatura máxima del complejo panel-disipador.
- El modelo presentado por (9) y (10) del cálculo del número de Nusselt, y con ello coeficiente convectivo para flujo en canales, representa de buena manera lo que en la teoría ocurre: al aumentar el área de intercambio de calor al panel fotovoltaico el efecto inmediato es un mayor flujo de calor hacia el exterior y por consiguiente, una disminución inmediata de la temperatura. Pero pasado cierto número de aletas, el efecto de aumento de área no es suficiente, ya que ahora es el coeficiente convectivo el que sufre una disminución producto del no desarrollo del flujo a través de las aletas, en desmedro del flujo de calor hacia afuera, con un consiguiente aumento leve en la temperatura
- Existe un número óptimo de aletas para el disipador de calor para estas condiciones atmosféricas (velocidad de viento, radiación solar, temperatura ambiente). Ese óptimo minimiza también la resistencia térmica del conjunto panel-disipador, por lo que no importan los niveles de radiación (cantidad de calor generada al interior), el óptimo seguirá aportando a conseguir el mínimo de temperatura de celda. Para este análisis, con un alto de 150 [mm] y un espesor de 3 [mm], el número óptimo de aletas es de 130.
- El óptimo de número de aletas está de la mano con la óptima resistencia térmica del disipador de calor (para una altura y espesor constantes). La influencia de estos últimos no es tan relevante como lo es el número de aletas, ya que incide directamente en el espacio que se forma por los canales. De todas maneras, cuantificar el efecto de las tres variables permite optimizar por ejemplo el tema económico, diseñando un disipador de calor lo más viable económicamente y factible de construir, sin descuidar de que debe ser el óptimo.
- La temperatura máxima de la celda sin disipador, sobrepasa los 40 [°C], mientras que con el disipador llega aproximadamente a casi los 26 [°C]. En términos de potencia, significa

un incremento hasta llegar casi a los 247 [W], con una eficiencia casi de 19[%], lo cual significa un aumento aproximado de 3 puntos porcentuales, lo cual es bastante. (Dato de catálogo: 16% (Ver Anexo 1))

- La mejora en temperatura no solo involucra un mejor desempeño, sino también una mayor vida útil del panel en su conjunto, ya que los ciclos de fatiga térmica no serán tan abruptos (al ser menor la diferencia de temperatura).

BIBLIOGRAFÍA

1. **Lee, Ho Sung.** *Thermal Design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells.* New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2010.
2. *An active cooling system for photovoltaic modules.* **Teo, H. G., Lee, P. S. y Hawlader, M. N. A.** Singapore : Elsevier, Applied Energy 90 (2012) 309-315.
3. *General correlation of a natural convective heat sink with plate-fins for high concentrating photovoltaic module cooling.* **Do, K. H. y Kim, T. H.** Korea : Elsevier, 2012, Vols. Solar Energy 86 (2012) 2725-2734.
4. **Duffie, John A. y Beckman, William A.** *Solar engineering of thermal processes, 3rd ed.* Winesconsin : John Wiley & Sons, 1980.
5. *Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions.* **Usama Siddiqui, M., y otros, y otros.** Cambridge - Saudi Arabia : Elsevier, Mayo de 2012, Solar Energy, Vol. 86, págs. 2620-2631.
6. **Honsenberg, Christiana y Bowden, Stuart.** Photovoltaic Education Network. *PVEDUCATION.ORG.* [En línea] <http://www.pveducation.org/>.
7. *NREL - Outdoor PV Module Degradation of Current-Voltage Parameters.* **Smith, Ryan M., Jordan, Dirk C. y Kurtz, Sarah R.** Denver, Colorado : NREL, 2012.
8. **Incropera, Frank P. y DeWitt, David P.** *Fundamentos de Transferencia de Calor, 4a. ed.* México : Prentice Hall, 1999.
9. *"Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization".* **Culham, J Richard y Muzychka, Yuri S.** s.l. : IEEE, 2001.
10. *"Analytical forced convection modeling of plate fin heat sinks".* **Teertstra, P., Yovanovich, M. M. y Culham, J. R.** Ontario, Canada : IEEE, 1999.
11. **Departamento de Geofísica - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.** Explorador de Energía Solar. [En línea] <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>.
12. NREL. *National Renewable Energy Laboratory.* [En línea] <http://www.nrel.gov/>.

ANEXOS

ANEXO 1

SUNMODULE® SOLAR PANEL 250 MONO DS



Sunmodule⁺™

SW 250 mono / Version 2.0 and 2.5 Frame

World-class quality

Fully-automated production lines and seamless monitoring of the process and material ensure the quality that the company sets as its benchmark for its sites worldwide.

SolarWorld Plus-Sorting

Plus-Sorting guarantees highest system efficiency. SolarWorld only delivers modules that have greater than or equal to the nameplate rated power.

25 years linear performance guarantee and extension of product warranty to 10 years

SolarWorld guarantees a maximum performance degradation of 0.7% p.a. in the course of 25 years, a significant added value compared to the two-phase warranties common in the industry. In addition, SolarWorld is offering a product warranty, which has been extended to 10 years.*

*In accordance with the applicable SolarWorld Limited Warranty at purchase.
www.solarworld.com/warranty



SW 250 mono / Version 2.0 and 2.5 Frame

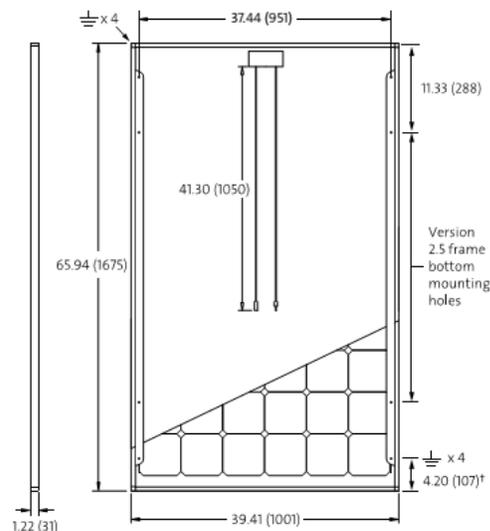
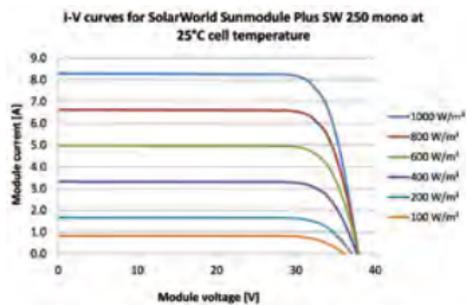
PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*

SW 250		
Maximum power	P_{max}	250 Wp
Open circuit voltage	V_{oc}	37.8 V
Maximum power point voltage	V_{mpp}	31.1 V
Short circuit current	I_{sc}	8.28 A
Maximum power point current	I_{mpp}	8.05 A

*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5

THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	46 °C
TC I_{sc}	0.004 %/K
TC V_{oc}	-0.30 %/K
TC P_{mpp}	-0.45 %/K
Operating temperature	-40°C to 85°C



PERFORMANCE AT 800 W/m², NOCT, AM 1.5

SW 250		
Maximum power	P_{max}	183.3 Wp
Open circuit voltage	V_{oc}	34.6 V
Maximum power point voltage	V_{mpp}	28.5 V
Short circuit current	I_{sc}	6.68 A
Maximum power point current	I_{mpp}	6.44 A

Minor reduction in efficiency under partial load conditions at 25°C: at 200W/m², 95% (+/-3%) of the STC efficiency (1000 W/m²) is achieved.

COMPONENT MATERIALS

Cells per module	60
Cell type	Mono crystalline
Cell dimensions	6.14 in x 6.14 in (156 mm x 156 mm)
Front	tempered glass (EN 12150)
Frame	Clear anodized aluminum
Weight	46.7 lbs (21.2 kg)

SYSTEM INTEGRATION PARAMETERS

Maximum system voltage SC II	1000 V	
Max. system voltage USA NEC	600 V	
Maximum reverse current	16 A	
Number of bypass diodes	3	
UL Design Loads*	Two rail system	113 psf downward 64 psf upward
UL Design Loads*	Three rail system	170 psf downward 64 psf upward
IEC Design Loads*	Two rail system	113 psf downward 50 psf upward

*Please refer to the Sunmodule installation instructions for the details associated with these load cases.

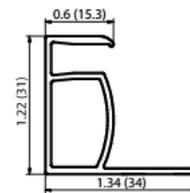
ADDITIONAL DATA

Power tolerance ²⁾	-0 Wp / +5 Wp
J-Box	IP65
Connector	MC4
Module efficiency	14.91 %
Fire rating (UL 790)	Class C



VERSION 2.0 FRAME

- Compatible with "Top-Down" mounting methods
- ⚡ Grounding Locations: 4 corners of the frame



VERSION 2.5 FRAME

- Compatible with both "Top-Down" and "Bottom" mounting methods
- ⚡ Grounding Locations: - 4 corners of the frame - 4 locations along the length of the module in the extended flange¹

1) Sunmodules dedicated for the United States and Canada are tested to UL 1703 Standard and listed by a third party laboratory. The laboratory may vary by product and region. Check with your SolarWorld representative to confirm which laboratory has a listing for the product.

2) Measuring tolerance traceable to TUV Rheinland: +/- 2% (TUV Power Controlled).

3) All units provided are imperial. SI units provided in parentheses.

ANEXO 2

DATOS SOLARES SAN PEDRO DE ATACAMA
MINISTERIO DE ENERGÍA
2011 ENERO-DICIEMBRE

Fecha	Hora	RSGH	RSGS	RSDifS	RSDirS	TEMP	RH	V	Vmin	Vmax	BAT
01.01.2011	00:10	-4	-3	-2	0	9,3	48	0,33	0,32	0,56	12,79
01.01.2011	00:20	-4	-2	-2	0	8,8	49	0,37	0,32	0,71	12,78
01.01.2011	00:30	-3	-2	-1	0	8,9	51,6	0,61	0,32	1,82	12,78
01.01.2011	00:40	-2	-1	0	0	9,6	50,2	0,66	0,32	1,34	12,78
01.01.2011	00:50	-3	-2	-1	0	9,1	48,1	0,53	0,32	1,27	12,77
01.01.2011	01:00	-3	-2	-1	0	8,2	50,9	0,55	0,32	1,11	12,77
01.01.2011	01:10	-2	-2	-1	-1	8,1	53	0,56	0,32	1,27	12,76
01.01.2011	01:20	-3	-2	-1	0	7,6	53,7	0,34	0,32	0,71	12,76
01.01.2011	01:30	-3	-1	0	0	7,2	53	0,52	0,32	1,19	12,75
01.01.2011	01:40	-3	-1	0	0	6,9	55,6	0,64	0,32	1,42	12,75
01.01.2011	01:50	-2	-1	0	0	7,2	55,3	1,04	0,32	2,13	12,74
01.01.2011	02:00	-2	-1	0	0	7,2	54,6	0,71	0,32	1,58	12,74
01.01.2011	02:10	-2	-1	0	0	7,1	54,9	0,54	0,32	0,79	12,74
01.01.2011	02:20	-2	-1	0	0	7,1	55,2	0,48	0,32	1,03	12,73
01.01.2011	02:30	-2	-1	-1	0	6,9	55	0,38	0,32	0,87	12,73
01.01.2011	02:40	-2	-1	-1	0	6,8	55,5	0,53	0,32	0,95	12,73
01.01.2011	02:50	-2	0	0	0	7	56	0,52	0,32	0,79	12,72
01.01.2011	03:00	-2	0	0	0	7,4	54,8	0,4	0,32	0,87	12,72
01.01.2011	03:10	-3	-1	-1	0	7	51,6	0,4	0,32	0,64	12,71
01.01.2011	03:20	-2	-1	-1	0	6	55,8	0,64	0,4	1,11	12,71
01.01.2011	03:30	-2	-1	0	0	5,6	59,8	0,78	0,32	1,42	12,71
01.01.2011	03:40	-2	-2	-1	0	5,3	61,1	0,36	0,32	0,48	12,71
01.01.2011	03:50	-2	-2	-1	0	4,8	62,6	0,43	0,32	0,87	12,7
01.01.2011	04:00	-2	-2	0	-1	4,6	63,2	0,44	0,32	0,87	12,7
01.01.2011	04:10	-2	-1	0	0	4,2	63,7	0,4	0,32	0,95	12,7
01.01.2011	04:20	-2	-1	0	-1	3,9	62,1	0,45	0,32	0,79	12,69
01.01.2011	04:30	-2	-1	0	0	3,9	60,6	0,77	0,32	1,82	12,69
01.01.2011	04:40	-1	0	0	-1	5,6	58,7	1,33	0,71	2,05	12,69
01.01.2011	04:50	-2	-1	0	-1	6	55	0,66	0,32	1,42	12,69
01.01.2011	05:00	-3	-2	-1	0	5,3	57	0,41	0,32	0,71	12,68
01.01.2011	05:10	-2	-2	-1	0	4,8	60,3	0,38	0,32	0,64	12,68
01.01.2011	05:20	-2	-1	-1	0	4,2	59,8	0,49	0,32	0,87	12,68
01.01.2011	05:30	-2	-1	0	-1	4	62	0,68	0,32	1,34	12,68
01.01.2011	05:40	-1	0	0	0	4,3	61,7	0,59	0,32	1,11	12,68
01.01.2011	05:50	0	2	2	0	4,4	61,5	0,7	0,32	1,5	12,67
01.01.2011	06:00	5	9	8	0	5,8	59,9	0,85	0,4	1,58	12,68
01.01.2011	06:10	17	76	72	3	6,8	56	0,94	0,48	1,5	12,68
01.01.2011	06:20	48	335	300	35	8,3	50,9	0,88	0,48	1,5	12,7
01.01.2011	06:30	75	353	317	35	8,7	48,6	0,83	0,32	1,34	12,76
01.01.2011	06:40	108	576	181	394	8,7	49,3	0,99	0,32	2,05	12,84
01.01.2011	06:50	146	660	49	610	11,4	42,9	1,34	0,79	1,82	12,97
01.01.2011	07:00	191	727	50	677	13	38,7	1,16	0,48	2,13	13,13
01.01.2011	07:10	248	787	53	733	13,8	37,9	1,84	0,95	2,76	13,36
01.01.2011	07:20	306	837	57	779	14,4	37,8	1,69	0,4	2,76	13,65
01.01.2011	07:30	353	876	61	815	16	34,6	1,37	0,4	2,61	13,69
01.01.2011	07:40	388	910	65	845	17,3	32,3	0,87	0,32	2,29	13,66
01.01.2011	07:50	406	940	68	871	18	31	0,75	0,32	1,58	13,66
01.01.2011	08:00	410	966	71	894	16,7	33,8	1,11	0,4	2,37	13,63
01.01.2011	08:10	406	989	75	913	15,7	35,9	1,17	0,32	2,45	13,63

01.01.2011	08:20	395	1008	77	930	16,5	34,2	1,19	0,32	2,92	13,61
01.01.2011	08:30	386	1027	79	947	16,1	34,4	1,44	0,48	3	13,6
01.01.2011	08:40	382	1043	80	962	16,5	33,6	1,28	0,32	2,76	13,59
01.01.2011	08:50	385	1057	81	976	17,2	32,1	1,29	0,4	3,79	13,58
01.01.2011	09:00	396	1071	81	989	17,3	32	1,81	0,32	3,95	13,58
01.01.2011	09:10	414	1082	81	1000	18,3	30,1	1,27	0,32	3,31	13,58
01.01.2011	09:20	450	1092	81	1011	18,1	30,5	2,11	0,4	4,81	13,58
01.01.2011	09:30	506	1103	80	1022	18	30,5	1,66	0,32	3,63	13,58
01.01.2011	09:40	580	1111	79	1031	18	30,2	1,95	0,32	6,07	13,57
01.01.2011	09:50	665	1117	79	1038	18,2	29,5	2,3	0,32	6,7	13,57
01.01.2011	10:00	752	1124	79	1044	18,8	28,7	1,68	0,4	6,07	13,57
01.01.2011	10:10	837	1128	78	1050	19,1	27,9	2,9	1,11	5,44	13,56
01.01.2011	10:20	916	1134	77	1056	19,4	27	2,4	0,64	4,65	13,56
01.01.2011	10:30	981	1133	76	1057	20,3	25,9	2,13	0,32	5,76	13,56
01.01.2011	10:40	1037	1139	74	1065	19,4	27,2	2,89	1,19	5,13	13,55
01.01.2011	10:50	1075	1140	72	1067	20,1	26,4	1,99	0,56	4,1	13,56
01.01.2011	11:00	1102	1140	70	1070	20,2	26,2	1,73	0,32	4,97	13,55
01.01.2011	11:10	1125	1144	68	1075	20,7	25,3	3,01	1,03	5,92	13,54
01.01.2011	11:20	1140	1146	67	1078	20,4	25,4	2,04	0,32	4,58	13,53
01.01.2011	11:30	1148	1142	66	1076	21,2	24,4	1,84	0,32	6,39	13,53
01.01.2011	11:40	1162	1146	65	1081	21,1	24,3	2,46	0,48	5,68	13,53
01.01.2011	11:50	1169	1144	63	1081	22	22,9	2,01	0,32	6,23	13,53
01.01.2011	12:00	1183	1152	64	1088	21,4	23,3	3,47	1,03	6,39	13,53
01.01.2011	12:10	1187	1150	63	1087	21,6	23	2,98	0,56	6,23	13,52
01.01.2011	12:20	1184	1143	62	1081	24	20,1	1,06	0,32	2,76	13,52
01.01.2011	12:30	1185	1142	60	1081	23	20,8	2,54	0,48	5,6	13,51
01.01.2011	12:40	1192	1150	62	1087	22,7	20,7	3,05	0,48	7,02	13,51
01.01.2011	12:50	1190	1148	61	1086	24,2	18,9	1,66	0,32	3,63	13,51
01.01.2011	13:00	1187	1147	59	1087	23,7	19,2	1,91	0,32	4,34	13,51
01.01.2011	13:10	1181	1147	59	1087	23,7	18,9	1,51	0,32	4,1	13,5
01.01.2011	13:20	1177	1148	60	1088	24,5	18,2	2,65	0,48	5,6	13,49
01.01.2011	13:30	1169	1149	61	1087	23,9	18,2	2,81	0,64	5,68	13,48
01.01.2011	13:40	1156	1146	63	1082	23,6	18	2,2	0,32	5,28	13,48
01.01.2011	13:50	1142	1144	64	1079	24,2	17,1	2,8	0,32	5,92	13,49
01.01.2011	14:00	1129	1144	68	1076	25,2	15,9	2,85	0,48	6,15	13,49
01.01.2011	14:10	1116	1146	69	1077	25,1	15,6	3,33	0,64	7,65	13,49
01.01.2011	14:20	1097	1145	70	1075	25,2	15,5	2,62	0,56	7,02	13,49
01.01.2011	14:30	1075	1142	71	1070	25,3	15,2	4,15	1,34	7,41	13,49
01.01.2011	14:40	1057	1146	71	1075	25,5	15	2,08	0,4	6,62	13,49
01.01.2011	14:50	1027	1138	72	1066	25,2	14,7	2,49	0,32	5,68	13,49
01.01.2011	15:00	1001	1134	74	1060	25,5	14,3	3,06	0,87	6,55	13,49
01.01.2011	15:10	973	1132	77	1054	25,7	14,2	3,22	0,95	6,94	13,49
01.01.2011	15:20	947	1134	79	1054	25,9	14	2,62	0,4	6,31	13,48
01.01.2011	15:30	914	1127	81	1046	26,3	13,7	2,93	0,48	6,23	13,48
01.01.2011	15:40	876	1116	81	1034	26,8	13,3	2,22	0,4	6,62	13,49
01.01.2011	15:50	841	1110	85	1024	25,8	14,5	3	0,87	6,86	13,49
01.01.2011	16:00	803	1100	88	1012	25,9	14,8	4,23	1,82	8,36	13,48
01.01.2011	16:10	764	1094	91	1002	26,1	14,8	2,28	0,4	7,18	13,48
01.01.2011	16:20	726	1085	96	988	25,9	14,7	3,75	0,95	6,7	13,49
01.01.2011	16:30	686	1076	99	976	26,2	14,6	2,98	0,87	6,55	13,49

01.01.2011	16:40	646	1072	100	971	26	14,5	1,19	0,32	2,84	13,49
01.01.2011	16:50	548	960	93	867	26,1	14,1	2,77	0,64	6,23	13,49
01.01.2011	17:00	582	1074	96	978	26,4	13,8	2,95	0,95	6,31	13,49
01.01.2011	17:10	540	1051	99	951	26,2	13,6	2,36	0,48	5,6	13,49
01.01.2011	17:20	388	778	96	682	26	13,4	3,97	1,74	7,18	13,5
01.01.2011	17:30	354	765	92	672	25,8	13,4	3,17	1,27	6,94	13,51
01.01.2011	17:40	397	928	92	836	26,2	13	3,77	1,66	5,99	13,51
01.01.2011	17:50	343	879	80	798	26,1	13,2	3,95	1,5	8,36	13,53
01.01.2011	18:00	292	827	65	762	25,8	13,4	5,06	1,97	9,7	13,53
01.01.2011	18:10	249	780	55	724	24,7	13,7	6,33	3,16	12,69	13,54
01.01.2011	18:20	206	723	46	677	24,1	13,6	6,98	3,79	12,54	13,54
01.01.2011	18:30	167	659	38	621	23,6	13,3	6,83	3,31	11,2	13,56
01.01.2011	18:40	130	584	31	553	23,3	13	6,06	3,79	10,09	13,57
01.01.2011	18:50	94	489	24	464	22,9	13,1	5,58	3,08	9,54	13,57
01.01.2011	19:00	60	351	18	333	22,2	15,6	5,71	2,45	9,78	13,32
01.01.2011	19:10	25	99	10	88	21,3	18,2	5,59	2,53	8,67	13,05
01.01.2011	19:20	7	20	4	15	20,7	19	4,82	2,61	8,83	12,95
01.01.2011	19:30	0	3	0	2	20,1	22,1	4,51	2,05	7,81	12,92
01.01.2011	19:40	-3	-2	-1	0	19,6	23	2,33	0,64	4,58	12,88
01.01.2011	19:50	-4	-3	-2	0	19,1	23,6	1,83	0,64	5,13	12,9
01.01.2011	20:00	-4	-3	-2	0	18,8	25,5	2,36	0,79	5,28	12,9
01.01.2011	20:10	-5	-3	-2	0	18,2	26,4	1,69	0,56	5,21	12,9
01.01.2011	20:20	-3	-2	-1	0	17,8	29,2	3,64	1,66	7,1	12,89
01.01.2011	20:30	-3	-1	0	0	17,5	29,8	3,41	1,74	5,36	12,89
01.01.2011	20:40	-4	-2	-2	0	17	30,6	1,91	0,32	5,05	12,89
01.01.2011	20:50	-4	-3	-2	0	16,4	32	1,34	0,48	2,84	12,88
01.01.2011	21:00	-3	-3	-2	-1	16,1	32,9	1,83	1,11	4,1	12,88
01.01.2011	21:10	-3	-2	-1	-1	15,9	33,3	2,17	1,03	3,63	12,87
01.01.2011	21:20	-4	-3	-1	-1	15,7	33,8	1,21	0,56	3,08	12,87
01.01.2011	21:30	-4	-3	-2	-1	15,2	34,7	0,7	0,32	1,19	12,87
01.01.2011	21:40	-4	-3	-2	0	15	34,7	0,54	0,32	0,87	12,86
01.01.2011	21:50	-4	-2	-2	0	15	34,7	0,7	0,32	1,97	12,86
01.01.2011	22:00	-3	-2	-1	-1	14,8	35,7	1,24	0,32	3,55	12,85
01.01.2011	22:10	-3	-2	0	-1	14,7	36,1	1,02	0,32	2,45	12,85
01.01.2011	22:20	-4	-3	-2	0	14,2	36,4	0,69	0,32	1,03	12,84
01.01.2011	22:30	-4	-2	-2	0	14,1	36,7	0,99	0,48	1,74	12,84
01.01.2011	22:40	-3	-2	-1	0	14	37,1	1,1	0,32	1,97	12,83
01.01.2011	22:50	-4	-2	-2	0	13,9	37,5	0,49	0,32	1,03	12,83
01.01.2011	23:00	-4	-2	-2	0	13,1	38,8	0,65	0,32	1,5	12,82
01.01.2011	23:10	-3	-2	-1	-1	12,7	39,7	1,04	0,4	1,97	12,82
01.01.2011	23:20	-3	-2	-1	-1	12,4	40,2	0,91	0,32	1,66	12,81
01.01.2011	23:30	-3	-2	0	-1	12,4	40,4	1,35	0,48	2,68	12,81
01.01.2011	23:40	-2	-1	0	-1	12,8	38,9	1,86	1,19	3,24	12,8
01.01.2011	23:50	-2	-1	0	-1	12,7	39,4	1,29	0,56	2,84	12,8
02.01.2011	00:00	-2	-1	0	-1	13	38,1	0,97	0,32	2,61	12,79