



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN DISIPADOR DE CALOR PASIVO PARA UN PANEL
FOTOVOLTAICO INCLINADO OPERANDO EN EL NORTE DE CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CLAUDIO ALEJANDRO CARRASCO OLEA

PROFESOR GUÍA:

WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

SEBASTIÁN MAGGI SILVA

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO.

POR: CLAUDIO A. CARRASCO O.

PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN

DISEÑO DE UN DISIPADOR DE CALOR PASIVO PARA UN PANEL FOTOVOLTAICO INCLINADO OPERANDO EN EL NORTE DE CHILE.

La expansión tecnológica que se vive en estos tiempos, motiva la búsqueda de nuevas energías para poder abastecer el gran consumo de energía que se crea día a día, es por esto, que una de las principales fuentes posibles, es la energía solar, que por medio de los paneles fotovoltaicos se puede convertir en energía eléctrica.

Debido a la poca cantidad de energía solar que logra transformar en energía eléctrica, surge el problema de aumentar la eficiencia de conversión del panel fotovoltaico, donde uno de sus problemas es la elevada temperatura de operación que posee, dado que al ser menor se podría subir la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

El estudio realizado tiene por objetivo general encontrar un disipador de calor de geometría triangular y con aletas, que pueda disminuir la diferencia de temperatura entre el panel fotovoltaico y el ambiente.

Primero se encuentran las líneas de corriente del viento en un campo solar, dadas condiciones existentes en el Desierto de Atacama, luego se determina el coeficiente global de transferencia de varias geometrías de disipador triangular, para determinar la geometría del disipador de calor con mejor transferencia de calor y para finalizar se estudia la variación de aletas evaluando el coeficiente global de transferencia.

Estos estudios se desarrollan por medio de software computacional, en específico, con el software Ansys CFX, un software computacional que puede aproximar las soluciones de ecuaciones de fluido y termodinámica, con las cuales se puede determinar, en un espacio de tres dimensiones, como se comportara el viento impactando el disipador de calor y poder determinar los coeficientes globales de transferencia.

Como resultados obtenidos desde el trabajo realizado, se encuentra que para las geometrías triangulares evaluadas, la geometría de triángulo rectángulo posee el mejor coeficiente de transferencia y para el número de aletas se encuentra un máximo en el coeficiente global de transferencia, el cual maximiza el intercambio térmico existente entre el ambiente y el disipador de calor, el que se encuentra en 222 aletas, que es el que permite el mayor descenso de temperatura entre todos los disipadores evaluados.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis Padres por el apoyo incondicional, el esfuerzo, la perseverancia y por sobre todo, la educación que me entregaron, ya que sin ella no podría haber sido la persona que soy. Además agradezco a mi hermana que es una de las personas más importantes en mi vida y a pesar de que es pequeña y no debiese ser ella la que enseñe sino uno quien debiese guiarla para ser mejor persona, es ella la que a veces te apoya te enseña y te aconseja, son estas tres personas las más importantes ya que sin ellas no sería quien soy.

Agradezco a mi familia, a mis abuelitas y abuelitos, a mis tías y tíos, a mis primos y primas, en especial a los que se han preocupado de mí en algún momento de mi vida como si fuesen mis padres; a mi madrina (Tía Laly), a mi Tía Mary (Q.E:P.D), a mi Tía Lola, a mi Tía Margarita, a mi Tía Myriam y a mi tío Pablo por todo el apoyo y la confianza que me dan y me que dieron, además de agradecer a mi hermano de otra madre y padre, Emilio, ya que fuiste un ejemplo y un apoyo.

Doy gracias a todas las personas que influyeron en mi enseñanza tanto básica, media y universitaria, a mi colegio de básica, donde me dijeron que luchara por lo que quisiera, agradezco al Instituto Nacional, por la enseñanza que me dieron y además por poder optar al privilegio que existe hoy y que será para el futuro, el de una enseñanza digna en la cual no te enseñen para una prueba, sino para la búsqueda de un conocimiento mayor, de una mente más erudita.

Agradezco a mis amistades, a las que salieron por solo jugar un deporte, que para muchos será tirar un balón por sobre un aro, pero para mí y para todos nosotros es mucho más, es respeto, compañerismo, amistad, dolor, sacrificio, humildad y hasta egoísmo en los minutos finales, pero siempre para poder llegar en conjunto a la meta, poder mirarse a la cara y estar orgulloso de lo que se hizo, por eso doy gracias al equipo del Instituto, al equipo de Providencia y al equipo de Ingeniería por esas magnificas mañanas y tarde compartiendo ese amor por el deporte y el apoyo para poder llegar al final de todo.

A las amistades de la universidad, por sobre todo a mi polola, por ese apoyo en los momentos más complicados, esa ayuda incondicional en todo momento y poder retribuir ese apoyo sin esperar nada a cambio, a mis amistades del colegio al glorioso cónclave TT.GG. por esas razones que no existen para juntarse, las locuras que salen sin siquiera ser llamadas, por esas estupideces que solo nosotros encontramos chistosas, gracias a todos y cada uno de ustedes.

“LABOR OMNIA VINCIT”

Vamos Lakers

“Nuestro miedo más profundo
No es que seamos inadecuados.
Nuestro miedo más profundo
Es que somos poderosos sin límite.
Y al liberarnos de nuestro miedo,
Inconscientemente liberaremos a los demás”

TABLA DE CONTENIDO

1	Preliminares.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivo General	2
1.2.1	Objetivos Específicos	2
2	Antecedentes Teóricos	3
2.1	Energía Solar	3
2.1.1	El Sol	3
2.1.2	Radiación Solar	4
2.1.3	Luz Solar	5
2.2	Celdas Solares	6
2.3	Paneles Fotovoltaicos	6
2.4	Campos Solares	8
2.5	Disipadores de Calor	11
2.6	Transferencia de Calor	12
2.6.1	Conducción.....	13
2.6.2	Convección.....	13
2.6.3	Radiación.....	14
3	Metodología	15
3.1	Simulación Campo Solar.....	16
3.2	Simulación del Área del Disipador de Calor.....	19
3.3	Simulación del Número de Aletas.....	24
4	Resultados	25
4.1	Resultados Simulación Campo Solar	25
4.2	Resultados Simulación Área del Disipador de Calor	30
4.3	Resultados de la Simulación del Número de Aletas.....	41
5	Análisis de Resultados	47
5.1	Simulación del Campo Solar.....	47
5.2	Simulación de la Variación del Área.....	49
5.3	Simulación de la Variación del Número de Aletas	52
6	Conclusiones y Recomendaciones	54
7	Bibliografía	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores del panel y generación de calor.....	15
Tabla 2 Condiciones viento Desierto de Atacama ⁷	16
Tabla 3 Valores trabajo de Chuanjin Lan.....	18
Tabla 4 Valores de simulación campo solar.....	18
Tabla 5 Medidas simulaciones geometría horizontal	21
Tabla 6 Medidas simulaciones geometría vertical	22
Tabla 7 Simulación de números de aletas	24
Tabla 8 Condiciones zonas cercanas al panel	28
Tabla 9 Validación resultados campo solar.....	29
Tabla 10 Resultados h variación horizontales	34
Tabla 11 Resultados h variación verticales	38
Tabla 12 Resultados U variación horizontales	39
Tabla 13 Resultados U variación vertical.....	40
Tabla 14 Coeficiente convectivo y global para variación de aletas	44
Tabla 15 Errores ajustes polinómicos	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Potencia en razón de la temperatura de un panel fotovoltaico	1
Ilustración 2 Distancia Sol-Tierra	3
Ilustración 3 Espectro de radiación Solar.....	4
Ilustración 4 Variación radiación Solar.....	5
Ilustración 5 Paneles fotovoltaicos.....	7
Ilustración 6 Composición de un panel fotovoltaico.....	7
Ilustración 7 Cilindros parabólicos	8
Ilustración 8 Discos parabólicos	8
Ilustración 9 Receptores lineales de Fresnel	9
Ilustración 10 Receptores centrales.....	9
Ilustración 11 Disposición de paneles fotovoltaicos individuales.....	10
Ilustración 12 Disposición de paneles fotovoltaicos en grupo	10
Ilustración 13 Disipador de tubos.....	11
Ilustración 14 Disipador de aletas	11
Ilustración 15 Transferencia de calor en un panel fotovoltaico	12
Ilustración 16 Configuración simulación campo solar.....	16
Ilustración 17 Malla campo solar	17
Ilustración 18 Gráfico número de elementos versus valor velocidad campo solar	17
Ilustración 19 Zona de proximidad del panel.....	19
Ilustración 20 Geometría del disipador de calor	19
Ilustración 21 Diseño disipador.....	20
Ilustración 22 Variación horizontal.....	20
Ilustración 23 Variación vertical	21
Ilustración 24 Gráfico número de elementos versus valor coeficiente convectivo	23
Ilustración 25 Mallado disipador de calor.....	23
Ilustración 26 Velocidad en x para el sistema de paneles	25
Ilustración 27 Velocidad en y para el sistema de paneles	26
Ilustración 28 Temperatura para el sistema de paneles.....	26
Ilustración 29 Velocidad en x en la cercanía del panel central	27
Ilustración 30 Zonas de toma de muestras	28
Ilustración 31 Diagrama velocidad incidente horizontal.....	29
Ilustración 32 Coeficiente convectivo área 2.39 m ² variación horizontal.....	30
Ilustración 33 Coeficiente convectivo área 4.31 m ² variación horizontal.....	31
Ilustración 34 Coeficiente convectivo área 6.23 m ² variación horizontal.....	31
Ilustración 35 Coeficiente convectivo área 8.16 m ² variación horizontal.....	32
Ilustración 36 Coeficiente convectivo área 10.08 m ² variación horizontal.....	32
Ilustración 37 Coeficiente convectivo área 11.05 m ² variación horizontal.....	33
Ilustración 38 Gráfico coeficiente h para variación horizontales.....	34
Ilustración 39 Coeficiente convectivo área 2.39 m ² variación vertical	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 40 Coeficiente convectivo área 4.31 m ² variación vertical	36
Ilustración 41 Coeficiente convectivo área 6.23 m ² variación vertical	36
Ilustración 42 Coeficiente convectivo área 8.15 m ² variación vertical	37
Ilustración 43 Coeficiente convectivo área 10.07 m ² variación vertical	37
Ilustración 44 Coeficiente convectivo área 11.03 m ² variación vertical	38
Ilustración 45 Gráfico coeficiente h para variación verticales	39
Ilustración 46 Coeficiente convectivo 10 aletas.....	41
Ilustración 47 Coeficiente convectivo 20 aletas.....	42
Ilustración 48 Coeficiente convectivo 30 aletas.....	42
Ilustración 49 Coeficiente convectivo 40 aletas.....	43
Ilustración 50 Coeficiente convectivo 50 aletas.....	43
Ilustración 51 Número de aletas versus coeficiente global	44
Ilustración 52 Gráfico ajuste polinómico grado 2.....	46
Ilustración 53 Líneas de corriente para el campo solar	47
Ilustración 54 Perfil de velocidad.....	48
Ilustración 55 Variaciones de área	49
Ilustración 56 Líneas de corriente	50
Ilustración 57 Coeficiente global de transferencia para variaciones de área.....	51
Ilustración 58 Coeficiente global de transferencia versus número de aletas.....	52
Ilustración 59 Ajuste polinómico grado 2	53

1 Preliminares

1.1 Introducción

Gracias a la expansión tecnológica que se registra en nuestra época, es necesario aumentar las fuentes de energía para poder abastecer este constante incremento de tecnología, y una de las principales fuentes (por su inagotable energía) es el Sol.

Esta estrella irradia una cantidad impresionante de energía por cada segundo y debido a esto, es necesario poder captar estos rayos solares y transformarlos en energía, para este fin es que se construyeron los módulos fotovoltaicos, que se agrupan en un conjunto para crear los paneles fotovoltaicos, los cuales reciben la radiación del sol y bajo un aumento en la energía de los electrones, producen energía eléctrica.

La eficiencia energética que tiene un panel fotovoltaico es influenciada por la temperatura de trabajo a la cual es sometido el panel, en otras palabras, la eficiencia disminuye con el aumento de la temperatura de trabajo del panel como lo muestra la Ilustración 1.

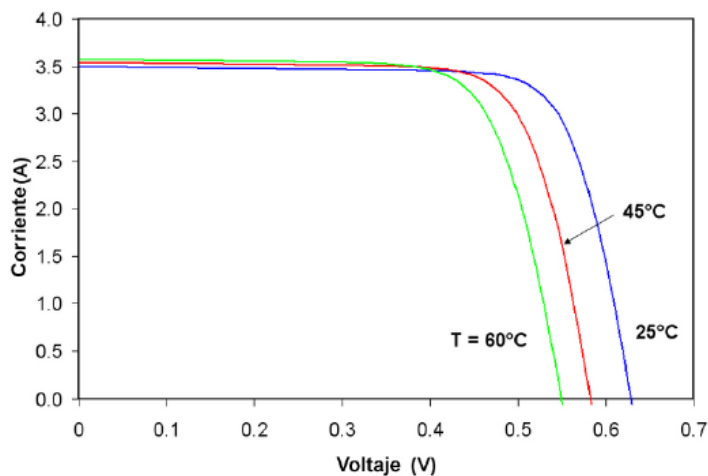


Ilustración 1 Potencia en razón de la temperatura de un panel fotovoltaico¹

Para poder interferir en la eficiencia de un panel fotovoltaico y a la vez poder incrementar la cantidad de energía eléctrica creada, es necesario poder controlar la temperatura de trabajo en los paneles fotovoltaicos, y es esta la principal idea en la que se sustenta la realización de este trabajo de título.

¹ (Maggi Silva, 2013)

1.2 Objetivo General

Encontrar el disipador de calor de geometría triangular que permita la mejor transferencia de calor para un panel fotovoltaico inclinado en la zona del norte de Chile, específicamente en el Desierto de Atacama.

Definiendo la mejor transferencia de calor como el disipador de calor que tenga el mejor coeficiente global de transferencia.

1.2.1 Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la temperatura de su superficie, velocidad y dirección del viento que impacta tanto perpendicular como paralela a un panel fotovoltaico inmerso en un arreglo de paneles fotovoltaicos inclinados.
- Determinar la mejor geometría triangular de las aletas del disipador para la inclinación del panel fotovoltaico.
- Definir el mejor número de aletas para la configuración dada del panel fotovoltaico.

2 Antecedentes Teóricos

2.1 Energía Solar

La energía proveniente del sol hacia nuestro planeta, es la principal fuente tanto directa como indirecta, del abastecimiento de la humanidad. Esta se aprovecha de manera directa, mediante la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica.

2.1.1 El Sol

El sol es una esfera de diámetro estimado en 1.39×10^9 metros la cual se encuentra a aproximadamente a 1.5×10^{11} metros de la Tierra como se puede apreciar en la Ilustración 2 y se compone de material gaseoso a una temperatura de superficie aproximada en $5500 \text{ }^\circ\text{C}$, este cuerpo, al no ser una esfera solida rota con distinta velocidad, donde la zona ecuatorial tarda unos 27 días en dar una rotación, en cambio las zonas polares tardan 30 días en realizar una rotación.

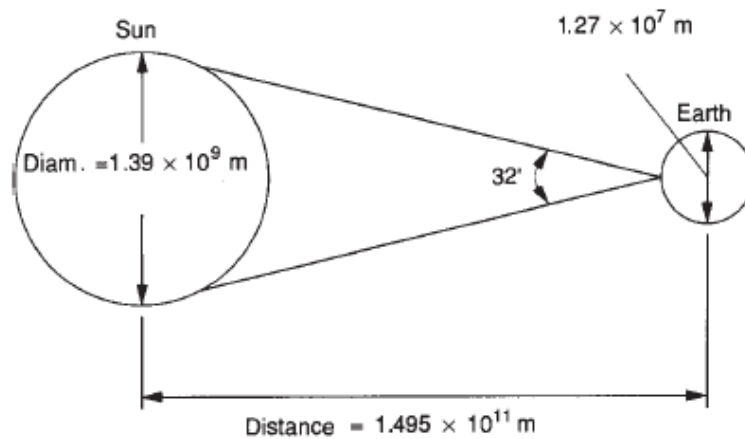


Ilustración 2 Distancia Sol-Tierra²

Esta esfera de material gaseoso es en efecto un reactor de fusión continua, debido a sus gases constituyentes y además debido a su fuerza gravitacional, no se esparcen por el universo, gracias a esta reacción constante entre sus componentes gaseosos, en los cuales se presentan principalmente el gas de Hidrogeno y Helio entre la cual se transforma masa en energía la cual es repartida por el espacio de forma de radiación.

² (John A.Duffie, 2013)

2.1.2 Radiación Solar

Debido a que el espacio exterior es un vacío, el único medio de transferencia de calor es la radiación, es por este motivo que la energía que se libera del sol, es transportada por medio de la radiación solar hacia los cuerpos cercanos, por ejemplo la Tierra.

Esta radiación solar que llega a la tierra tiene una distribución en base a sus longitudes de onda y establecida por la distancia existente entre la Tierra y el Sol, la cual se puede observar en la Ilustración 3.

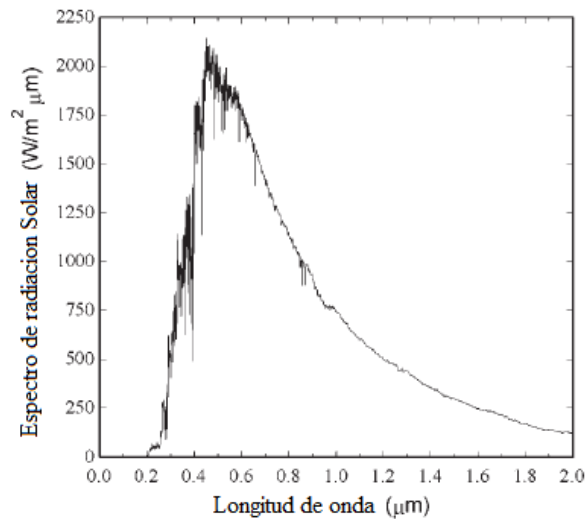


Ilustración 3 Espectro de radiación Solar³

Esta radiación solar, es variable debido a que la distancia existente entre la Tierra y el Sol no es constante como se aprecia en la Ilustración 4, es por esto que existe un valor promedio de radiación incidente que logra traspasar la Atmosfera y llegar a la superficie de la Tierra conocido como constante solar $G_{sc} = 1375$ Watts por metro cuadrado.

³ (John A. Duffie, 2013)

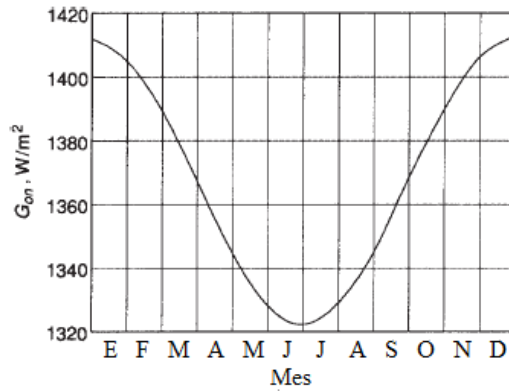


Ilustración 4 Variación radiación Solar⁴

2.1.3 Luz Solar

La luz, es un efecto que solo puede ser descrito de manera dual, es decir de 2 maneras juntas, como partícula y como onda, se comporta como partícula cuando se observa la interacción con la materia y para la propagación de luz se comporta como onda electromagnética.

El fenómeno que describe el transporte de la Luz fue demostrado teóricamente por Maxwell el año 1864, por otro lado la respuesta fotoeléctrica fue descubierta por Einstein el año 1905 postulando que un rayo de luz está compuesto de pequeños cuantos de energía.

En la actualidad, estos cuantos de energía, se denominan fotones y es esta pequeña cantidad de energía la cual beneficia a un electrón en una superficie, el cual absorbe dicha energía para poder salir del nivel en el que se encuentra y subir de nivel o salir del material.

La energía presente en un fotón esta descrita por:

$$E_{foton} = h\nu \quad (ec.1)$$

Donde:

h Constante de Planck, 6.626×10^{-34} [Js].

ν Es la frecuencia que se define por:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (ec.2)$$

c Velocidad de la luz, 3×10^8 [m/s].

λ Longitud de onda.

⁴ (John A.Duffie, 2013)

2.2 Celdas Solares

Las celdas solares o también conocidas como celdas fotovoltaicas (PV), son dispositivos semiconductores que transforman la luz solar en corriente eléctrica, para poder utilizar luego esa energía en un sistema de abastecimiento eléctrico, tanto para la industria como para las personas.

El efecto fotovoltaico consiste básicamente en convertir la luz solar en energía eléctrica mediante dispositivos semiconductores, principalmente de Silicio, con adiciones de ciertas impurezas, entre las cuales se destacan el Boro y el Fósforo.

Este efecto en electrolitos líquidos fue descubierto en 1839 por Henri Becquerel y el primer dispositivo PV funcional fue hecho por Fritts en 1883 usando una lámina de Selenio.

Las celdas solares modernas fueron descubiertas por accidentes en los laboratorios Bell en 1954 por Chapin, estas eran celdas solares tenían un 6% de eficiencia.

Entre los tipos de celdas fotovoltaicas se destacan:

- Silicio Mono-cristalino.
- Silicio Poli-Cristalino.
- Silicio Amorfo.

Como se aprecia el elemento que más se utiliza en las celdas fotovoltaicas es el Silicio en forma mono-cristalina.

2.3 Paneles Fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos como lo muestra la Ilustración 5, son los instrumentos de recepción de los rayos provenientes del Sol, es decir de la radiación que logra pasar las capas de la atmósfera que posee la tierra, para luego mediante una distribución de celdas solares, poder producir energía eléctrica.



Ilustración 5 Paneles fotovoltaicos

Los componentes principales que están presentes en los paneles fotovoltaicos son:

- **Vidrio templado:** el cual protege los elementos al interior del panel, sirve de filtro de radiación y además al ser de baja capacidad reflectora, permite absorber la luz.
- **EVA o etileno vinilo acetato:** polímero termoplástico, para usarse como encapsuladora de las células generadoras, para evitar la entrada de aire o humedad.
- **Celda de Silicio:** es el núcleo del panel fotovoltaico, es el elemento encargado de producir la energía eléctrica a base de la luz solar.
- **Tedlar o fluoruro de polivinilo (PVF):** es la parte posterior de un panel fotovoltaico, y sirve para proteger de los efectos de la luz ultravioleta además de aislante eléctrico.

Estos componentes se pueden observar en la Ilustración 6, la cual explica de manera gráfica la composición de un panel fotovoltaico.

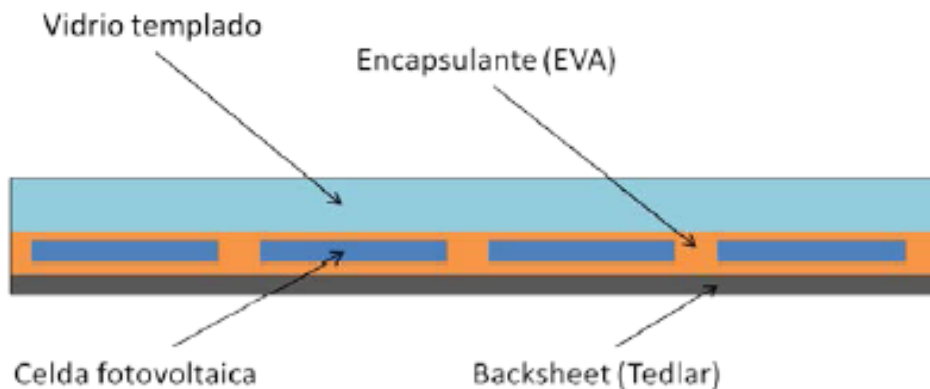


Ilustración 6 Composición de un panel fotovoltaico⁵

⁵ (Maggi Silva, 2013)

2.4 Campos Solares

Los campos solares son un conjunto de instrumentos para absorber la energía del Sol y transformarla en energía eléctrica, estos conjuntos también son denominados, Plantas Solares.

Existen varios tipos de campos solares, específicamente 5 tipos de entre los que se encuentran:

- Cilindros Parabólicos, esta tecnología está compuesta de espejos curvos dispuestos como una “media tubería” para poder concentrar los rayos solares incidentes en un tubo con fluido térmico, como se puede apreciar en la Ilustración 7.



Ilustración 7 Cilindros parabólicos

- Discos Parabólicos, mantienen la misma funcionalidad de los cilindros parabólicos, pero en vez de concentrar la energía solar en un tubo estos la concentran en un punto específico, esto ayuda a la mejora de la eficiencia pero en escalas pequeñas, algunos kW, esta tecnología se puede apreciar en la Ilustración 8.

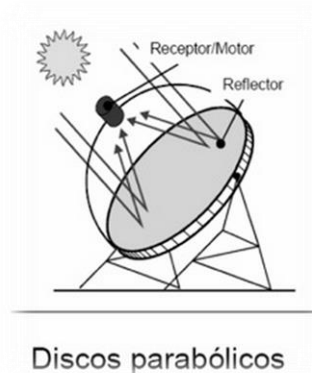


Ilustración 8 Discos parabólicos

- Receptores Lineales de Fresnel, en continuación a los espejos curvos, esta tecnología son espejos curvos que reflejan los rayos solares a un receptor fijo y largo que se encuentra posicionado en el suelo, la diferencia con los cilindros parabólicos, es que en esta tecnología, existe más de 1 espejo por tubo de fluido térmico, como lo muestra la Ilustración 9.

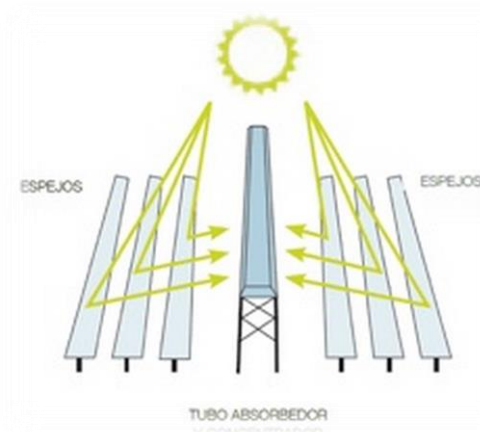


Ilustración 9 Receptores lineales de Fresnel

- Receptores centrales, esta tecnología consta de un conjunto de heliostatos, o reflectores, que concentran la energía de los rayos solares en un solo punto o receptor solar, generalmente compuesto de sales, el cual se encuentra en una torre fija a una altura determinada por la reflexión de los rayos solares ejemplificado en la Ilustración 10.

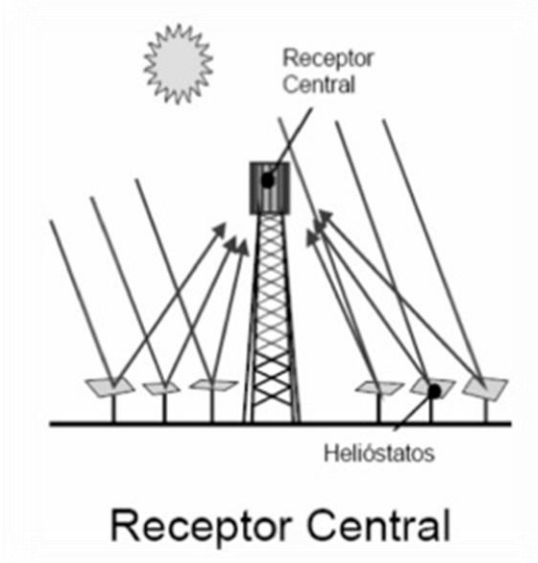


Ilustración 10 Receptores centrales

- Paneles fotovoltaicos, esta tecnología es un conjunto de paneles fotovoltaicos dispuestos sobre el suelo, generalmente en filas de 1 panel o más paneles, dependiendo de las dimensiones de este esta diferencia se pueden apreciar en la Ilustración 11 y la Ilustración 12.



Ilustración 11 Disposición de paneles fotovoltaicos individuales



Ilustración 12 Disposición de paneles fotovoltaicos en grupo

2.5 Disipadores de Calor

Un disipador de calor es un elemento que sirve para poder transmitir el calor generado desde la base hacia el exterior, es decir este elemento sirve para disipar el calor, por medio de un aumento de área entre el sólido y el fluido refrigerante en contacto.

Los disipadores de calor son ocupados en la gran mayoría de los elementos eléctricos, ciclos de calor y en procesos de refrigeración, los principales tipos de disipadores de calor son:

- De tubos, los cuales se definen como un arreglo de tubos para aumentar el área de contacto, como lo muestra la Ilustración 13.

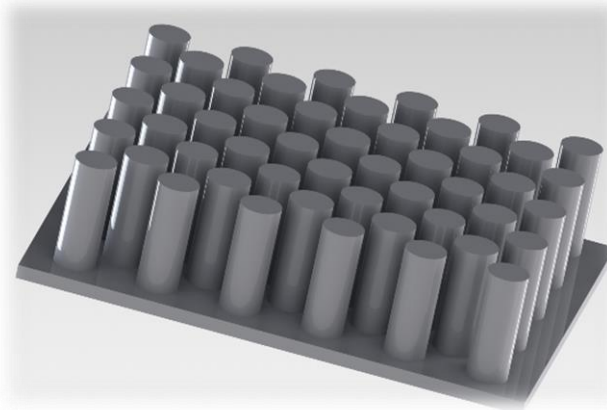


Ilustración 13 Disipador de tubos

- De placas planas, estos son los más utilizados y es el tipo de aletas que se evaluará en este trabajo. El disipador de calor de aletas son extrusiones desde la base de forma plana para el aumento de área de contacto, como se aprecia en la Ilustración 14.

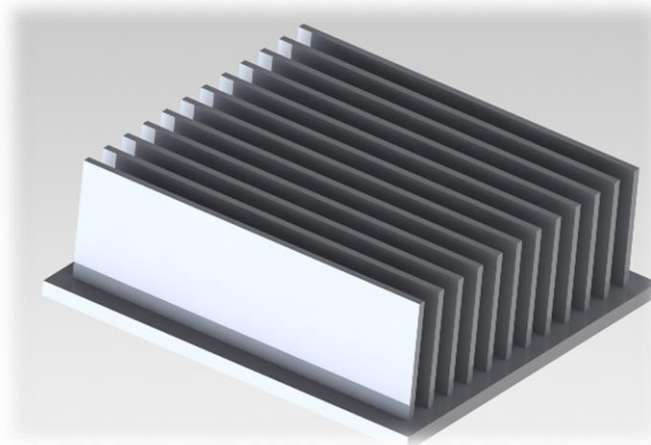


Ilustración 14 Disipador de aletas

2.6 Transferencia de Calor

La transferencia de calor, como lo dice su nombre es el movimiento o desplazamiento de calor de un sector hacia otro. Esto se debe al movimiento macroscópico o microscópico de los materiales, además de las ondas de energía las cuales influyen en el proceso de transferencia de calor.

Para poder manejar la temperatura de un panel fotovoltaico, es necesario conocer los medios que posee dicho panel para subir o bajar la temperatura, que son los 3 métodos de transferencia de calor: Conducción (indicado como las flechas amarillas en Ilustración 15), Convección (explicado en la Ilustración 15 mediante las flechas circulares azules) y Radiación (proceso explicado en la Ilustración 15 mediante las flechas rectas azules).

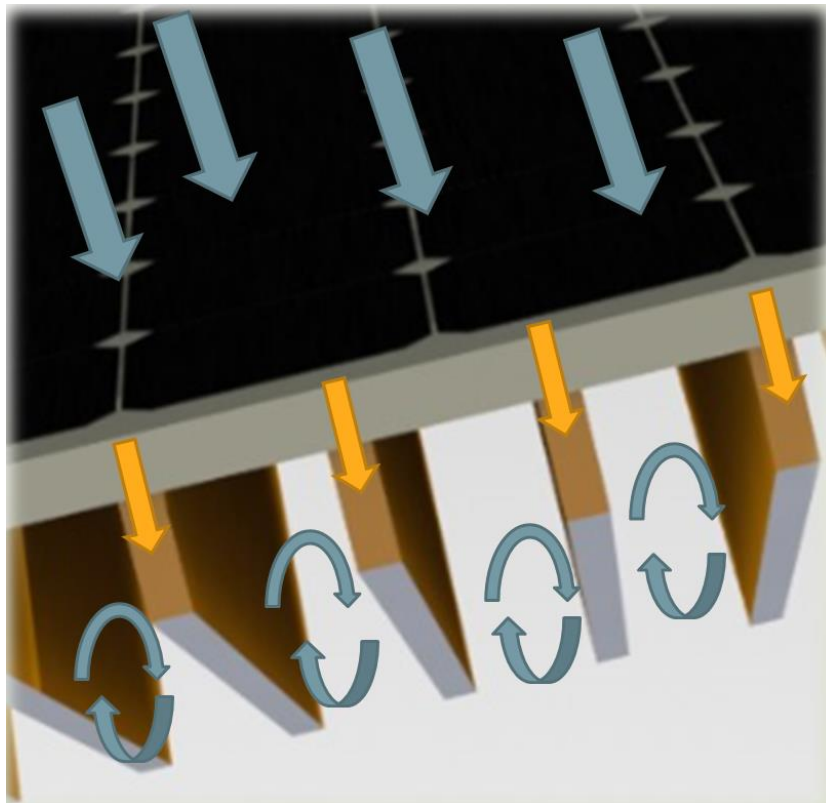


Ilustración 15 Transferencia de calor en un panel fotovoltaico

Estos procesos son los únicos procesos de transferencia de calor y en el caso de un panel fotovoltaico, se observan los 3 procesos en el mismo componente.

2.6.1 Conducción

La conducción es un proceso de transferencia térmica la cual ocurre en un sólido y es representativa de los movimientos de vibración y rotación a escala molecular que se presentan en dicho sólido. Esta transferencia de calor es asociada a la temperatura mediante la ley de Fourier la que explica que la conducción se manifiesta desde un sector de mayor temperatura a uno de menor temperatura, esto multiplicado por una constante de conductividad térmica del material.

$$Q = Ak\nabla T \quad (\text{ec.3})$$

Donde:

Q , Calor transferido principalmente [W].

A , área de intercambio entre el fluido y el sólido [m^2].

k , constante conductiva representativa de un material [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

∇T , diferencial de temperatura, entre los puntos a evaluar en el mismo sólido, este diferencial puede ser en tres dimensiones, evaluada con respecto a la distancia en el eje elegido:

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \quad (\text{ec.4})$$

2.6.2 Convección

La convección es un proceso que ocurre en un fluido en estado líquido o gaseoso en el que se presentan movimientos macroscópicos. Este fenómeno está asociado a la mezcla de pequeñas porciones de fluido a alta temperatura con otras porciones de fluido a bajas temperaturas, en un símil con la conducción, la convección también está asociada a la diferencia de temperaturas existentes entre los distintos cuerpos pero en este caso, existe un coeficiente conectivo que asocia el calor con la diferencia de temperaturas.

$$Q = Ah\Delta T \quad (\text{ec.5})$$

Donde:

Q , Calor transferido principalmente [W].

A , área de intercambio entre el fluido y el sólido en [m^2].

h , constante convectiva representativa del proceso de intercambio de calor en el fluido [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

ΔT , diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido [K].

Donde $Ah = U$ que es el coeficiente global de transferencia de calor.

2.6.3 Radiación

La radiación son ondas electromagnéticas propagándose a través de un medio transparente tanto como el aire o como el vacío, este calor transferido se puede expresar como la diferencia de la cuarta potencia de cada temperatura por una constante y por la emisividad del cuerpo que emite la radiación, en el caso de este trabajo el cuerpo que emite la radiación es El Sol.

$$E = \sigma T^4 \quad (\text{ec.6})$$

Donde:

E , Energía establecida por radiación de un cuerpo negro principalmente [W].

σ , constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

T^4 , Temperatura del cuerpo elevada a su cuarta potencia [K⁴].

3 Metodología

Para la realización del estudio del disipador de calor para un panel fotovoltaico, el trabajo se dividió en 3 partes, identificados por los objetivos establecidos para este trabajo.

En una primera instancia, se simuló y encontró los parámetros de velocidad y temperatura del viento para la cercanía de un panel inserto en un conjunto de paneles.

Luego, se simuló la geometría de un disipador de calor variando el área de intercambio y finalmente se simuló el intercambio de calor efectuado por el disipador de calor variando el número de aletas, para el área con el mejor coeficiente de transferencia global.

Los valores establecidos para el panel fotovoltaico y las condiciones de generación de calor se observan en la Tabla 1.

Tabla 1 Valores del panel y generación de calor⁶

Panel Fotovoltaico	
Alto	1600 mm
Largo	810 mm
Ancho	31 mm
Generación de calor interna	
Generación	1000 W/m ²

⁶ (Maggi Silva, 2013)

3.1 Simulación Campo Solar

La realización de la simulación del campo solar se efectúa realizando una simulación de una fila de 11 paneles que se ven influidos por las condiciones del viento como lo muestra la Ilustración 16 , extraídas desde los datos meteorológicos de la estación San Pedro de Atacama, cooperación entre el MINENERGIA y GIZ⁷.

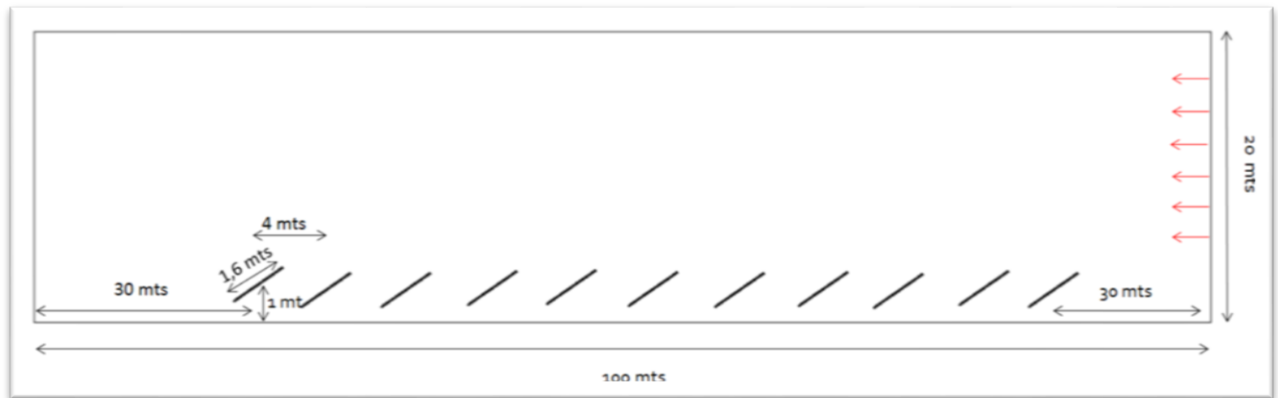


Ilustración 16 Configuración simulación campo solar

En esta etapa se simuló con las condiciones existentes en la zona del desierto de Atacama, extraídas desde los datos meteorológicos de la estación de San Pedro de Atacama desde Enero del 2012 hasta Mayo del 2012, estableciendo los promedios indicados en la Tabla 2 la cual indica las condiciones de velocidad y temperatura para el viento de la zona.

Tabla 2 Condiciones viento Desierto de Atacama⁷

Variable	Valor
Angulo de Inclinación	23.4 °
Velocidad del Viento (mínima)	0.59 m/s
Velocidad del Viento (máxima)	3.36 m/s
Velocidad del Viento (Promedio)	1.98 m/s
Dirección del Viento	Sur-Norte
Temperatura Ambiente (Promedio)	16.3 °C

En una primera instancia se realizó una validación de la malla que se muestra en la Ilustración 17, para tener la certeza de ocupar la malla correcta.

⁷ http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/renovables_noconvencionales/Tipos_Energia/san_pedro/

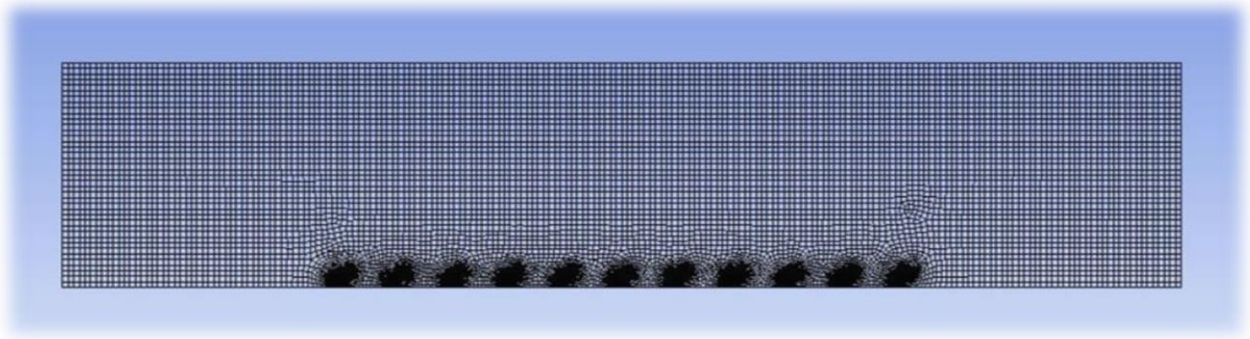


Ilustración 17 Malla campo solar

Esto se ejemplifica estableciendo un valor fijo a evaluar por el número de elementos que existen en el espacio a simular, eligiendo la velocidad incidente en el panel del centro, esta variación se observa en la Ilustración 18.

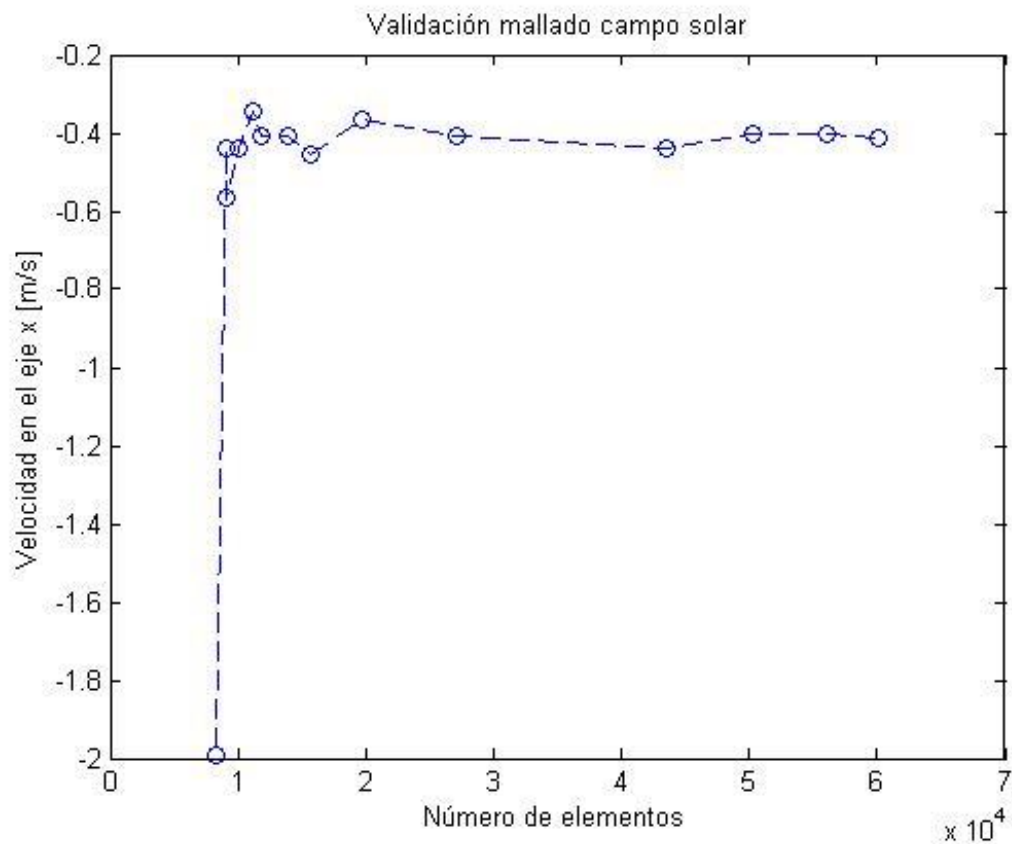


Ilustración 18 Gráfico número de elementos versus valor velocidad campo solar

Gracias a la Ilustración 18 se definió un mallado de la simulación, establecido en un número de elementos de 5×10^4 para poder optimizar el recurso computacional y no sobre evaluar la simulación y ocupar más tiempo en la simulación del necesario.

Para la validación de los resultados, se verificaron los coeficientes de arrastre y sustentación para el primer panel fotovoltaico, comparando con los valores extraídos desde el Trabajo⁸. La comparación entre los valores extraídos desde la simulación y las del trabajo citado mostradas en la Tabla 3 se comparan gracias a la semejanza de los coeficientes adimensionales, que permiten la comparación y validación de los resultados mostrado en la Tabla 4.

Tabla 3 Valores trabajo de Chuanjin Lan⁹

Valor del Angulo de la placa	20°
Valor de G	0.5
Coefficiente de Sustentación	0.4271
Coefficiente de Arrastre	0.1607

Tabla 4 Valores de simulación campo solar

Coefficiente Sustentación	0.4271
Porcentaje de error	2.7%
Coefficiente Arrastre	0.1701
Porcentaje de error	5.8%

⁸ (Wall effect on separate flow around an inclined flat plane at high incidence)

⁹ (Wall effect on separate flow around an inclined flat plane at high incidence)

3.2 Simulación del Área del Disipador de Calor

Simulado el campo solar para los 11 paneles fotovoltaicos, se extraen las condiciones de velocidad y temperatura para la proximidad del panel central como lo indica la Ilustración 19. Con estos valores de temperatura y velocidad del viento, se simulara el panel fotovoltaico inclinado con un disipador de calor de forma triangular similar a la Ilustración 20.

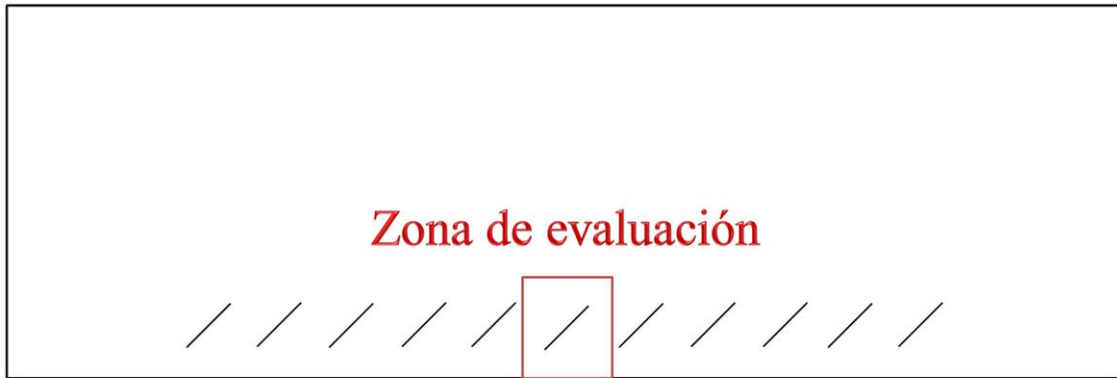


Ilustración 19 Zona de proximidad del panel



Ilustración 20 Geometría del disipador de calor

Estas simulaciones se identifican desde dos puntos de análisis, variando la arista horizontal del triángulo y variando la arista vertical del triángulo ejemplificada en la Ilustración 21, Ilustración 22 e Ilustración 23, simulando los casos establecidos en la Tabla 5 y Tabla 6.

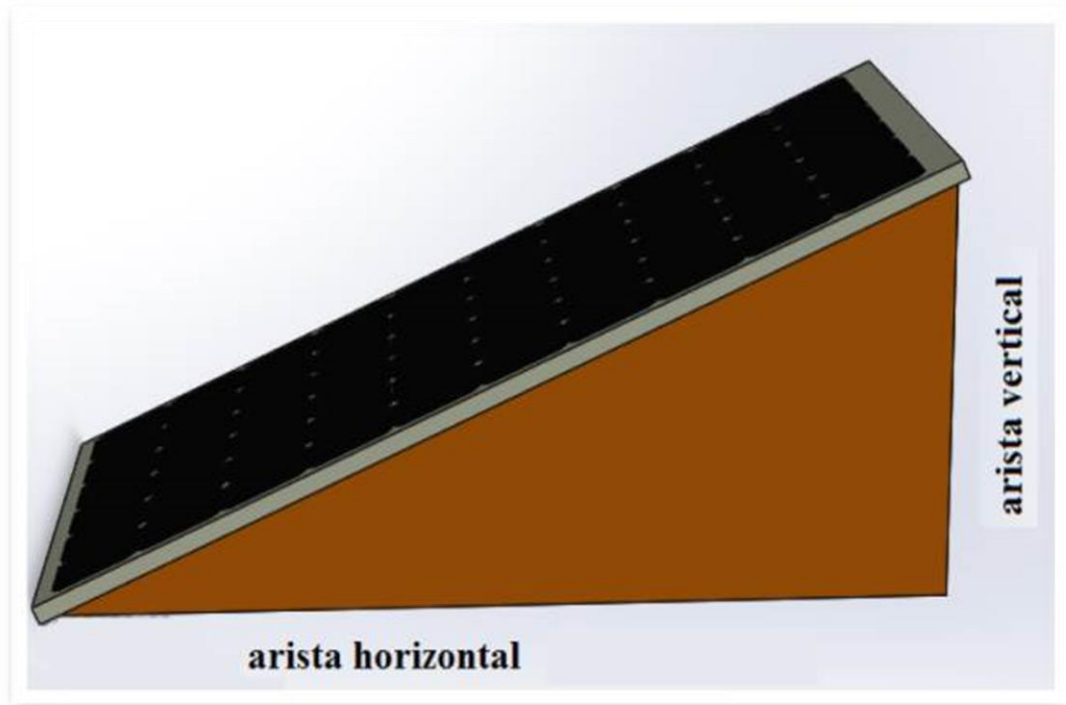


Ilustración 21 Diseño dissipador

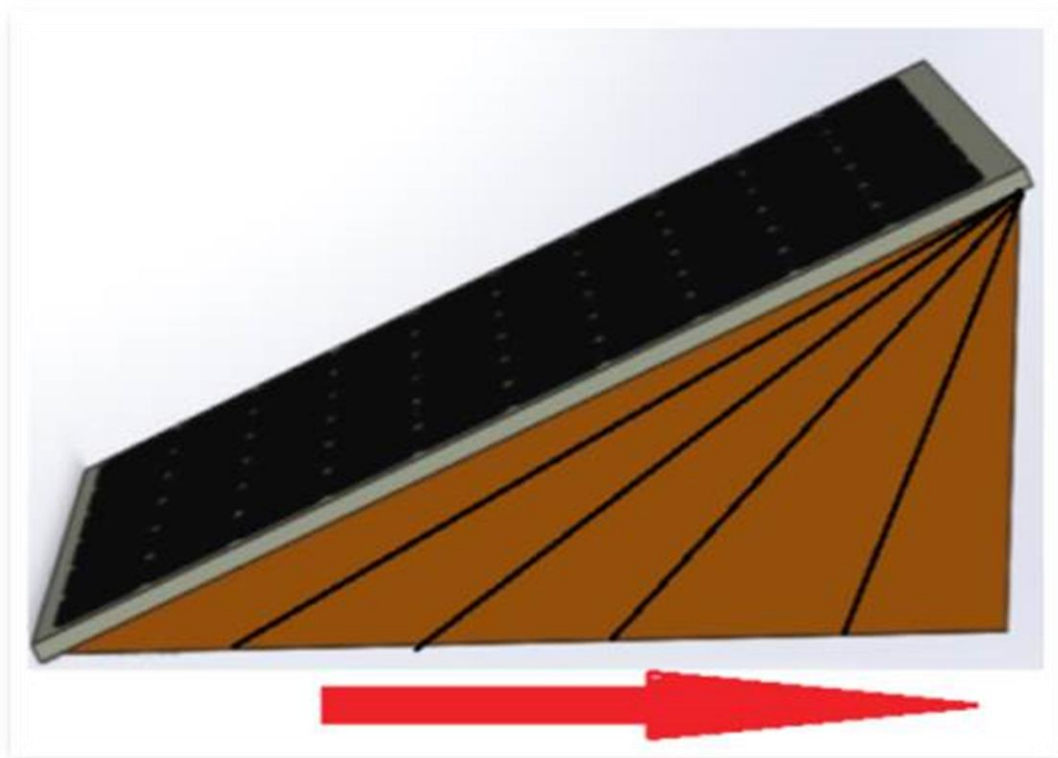


Ilustración 22 Variación horizontal

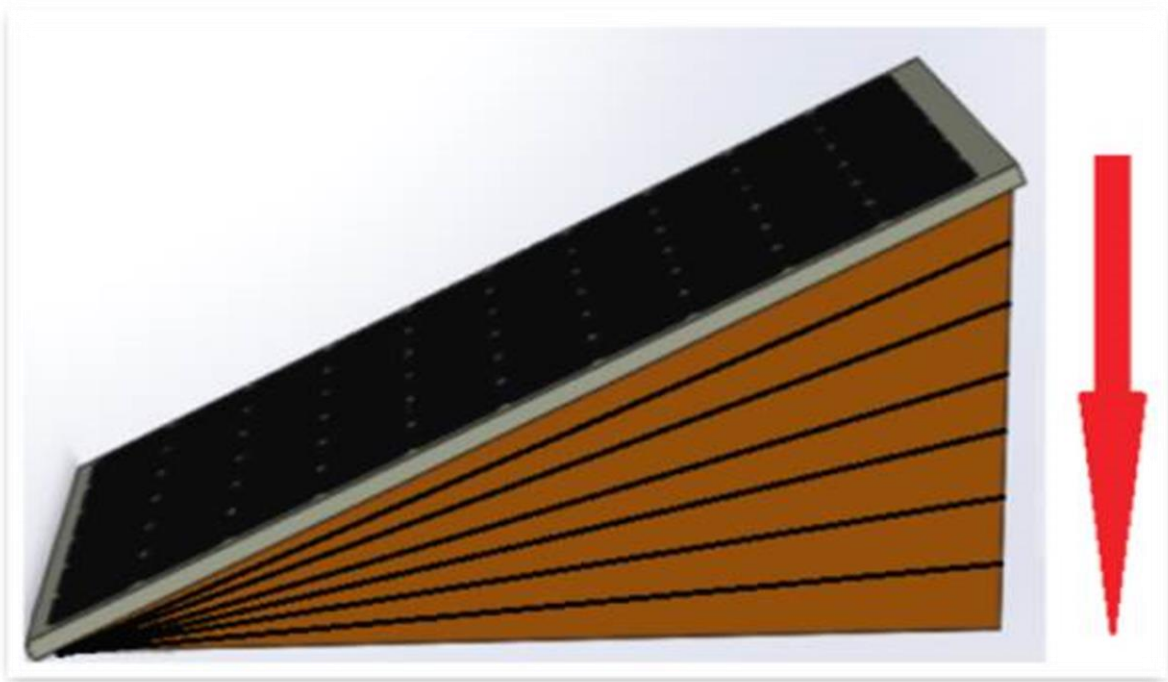


Ilustración 23 Variación vertical

Tabla 5 Medidas simulaciones geometría horizontal

Simulación	Longitud horizontal [mm]	Área [m ²]
1	145	2.39
2	291	3.35
3	437	4.31
4	583	5.27
5	729	6.23
6	874	7.19
7	1020	8.16
8	1166	9.12
9	1312	10.08
10	1458	11.05

Tabla 6 Medidas simulaciones geometría vertical

Simulación	Longitud vertical [mm]	Área [m ²]
11	65	2.39
12	131	3.35
13	197	4.31
14	263	5.27
15	329	6.23
16	395	7.19
17	460	8.15
18	526	9.11
19	592	10.07
20	658	11.03

Antes de proceder a simular las áreas del disipador de calor, se efectúa un análisis de incidencia del número de elementos versus el valor entregado por la simulación, para verificar la validez del resultado, este efecto se aprecia en la Ilustración 24, validando la malla para la simulación del área del disipador de calor en 4 millones de elementos, mallado que se muestra en la Ilustración 25.

Las variables del disipador de calor que no se identifican o no se varían para establecer una mejor configuración, son dos:

- El espesor de la aleta, este valor se considera 3mm, basado en la memoria de Sebastián Maggi¹⁰ donde el encuentra este óptimo.
- El número de aletas a evaluar en un principio es 10, debido a la influencia computacional que existen al variar las aletas, se escoge un número pequeño, pero constante para todas las áreas del disipador evaluadas.

¹⁰ (Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile)

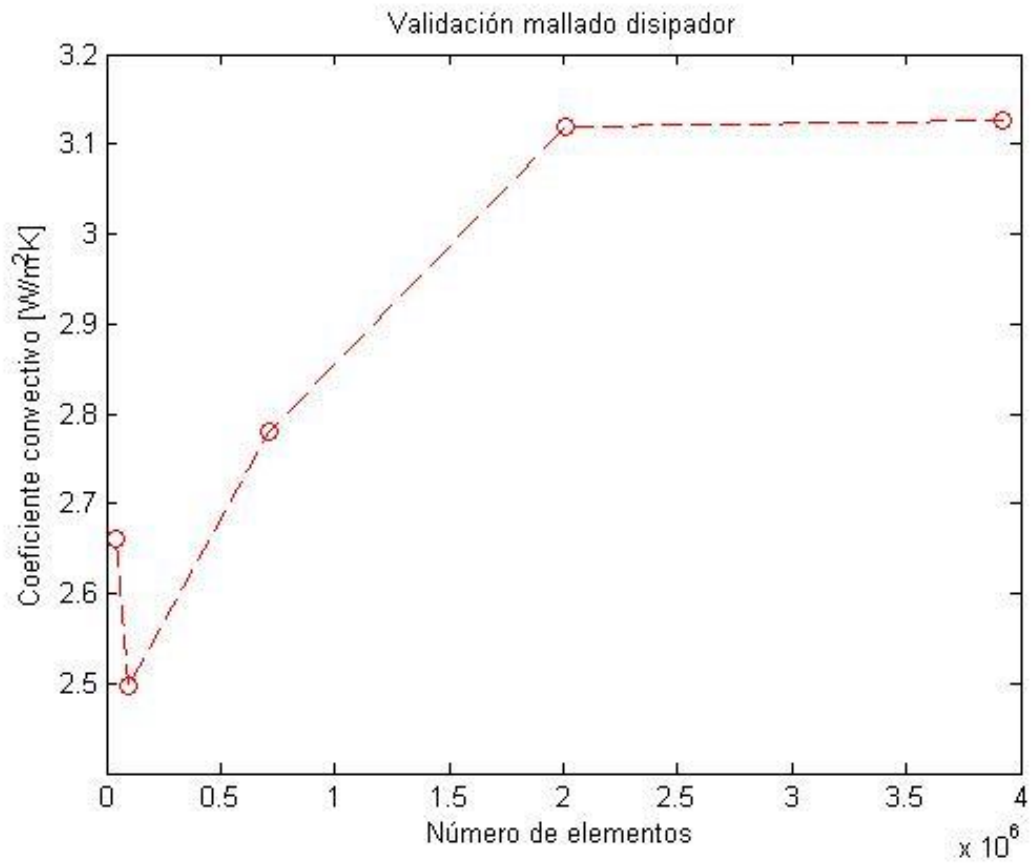


Ilustración 24 Gráfico número de elementos versus valor coeficiente convectivo

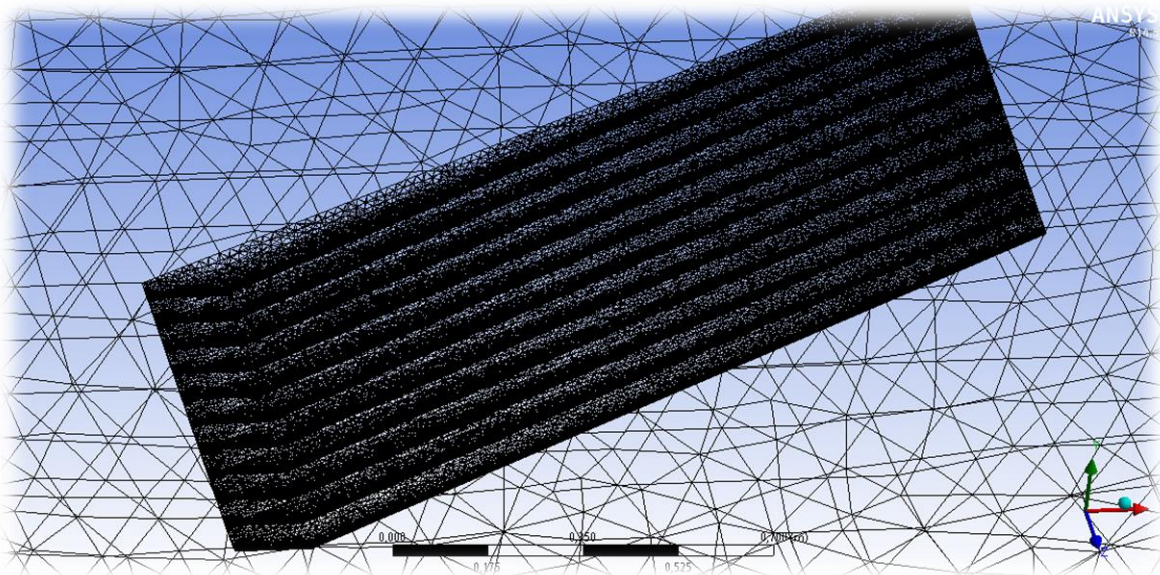


Ilustración 25 Mallado disipador de calor

3.3 Simulación del Número de Aletas

Establecida la mejor geometría para el dissipador de calor, evaluado a partir del coeficiente global de transferencia de calor, se procede a la evaluación de la incidencia del número de aletas, para esto se simulan de la misma forma que en la parte anterior, pero ahora las simulaciones varían el número de aletas con espesor fijo de 3 milímetros, como lo muestra la Tabla 7.

Tabla 7 Simulación de números de aletas

Simulación	Numero de aletas
21	10
22	20
23	30
24	40
25	50

4 Resultados

4.1 Resultados Simulación Campo Solar

Para la simulación del campo solar, se encuentran las condiciones de velocidad además de la temperatura en toda la simulación. Tanto en el eje x, horizontal, como en y, vertical, establecidos por el programa, Ansys 14.5, e identificados en la Ilustración 26 e Ilustración 27 y para la temperatura en la Ilustración 28 respectivamente.

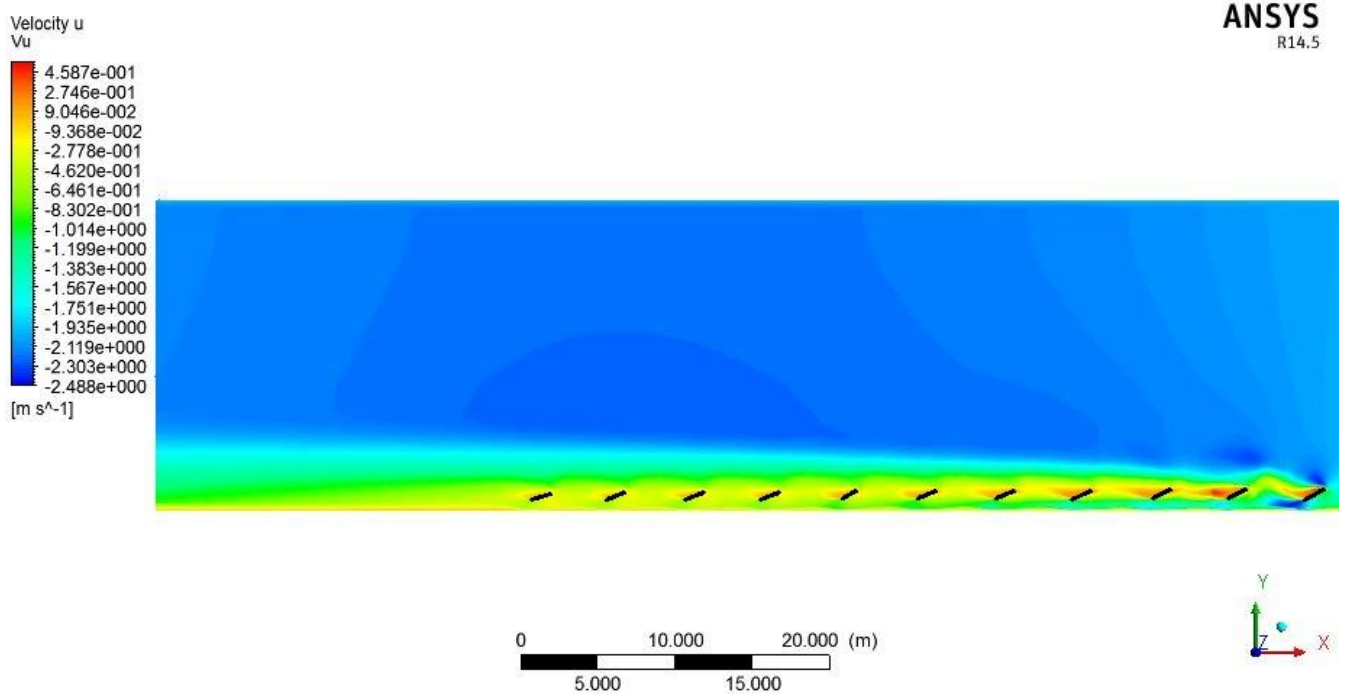


Ilustración 26 Velocidad en x para el sistema de paneles

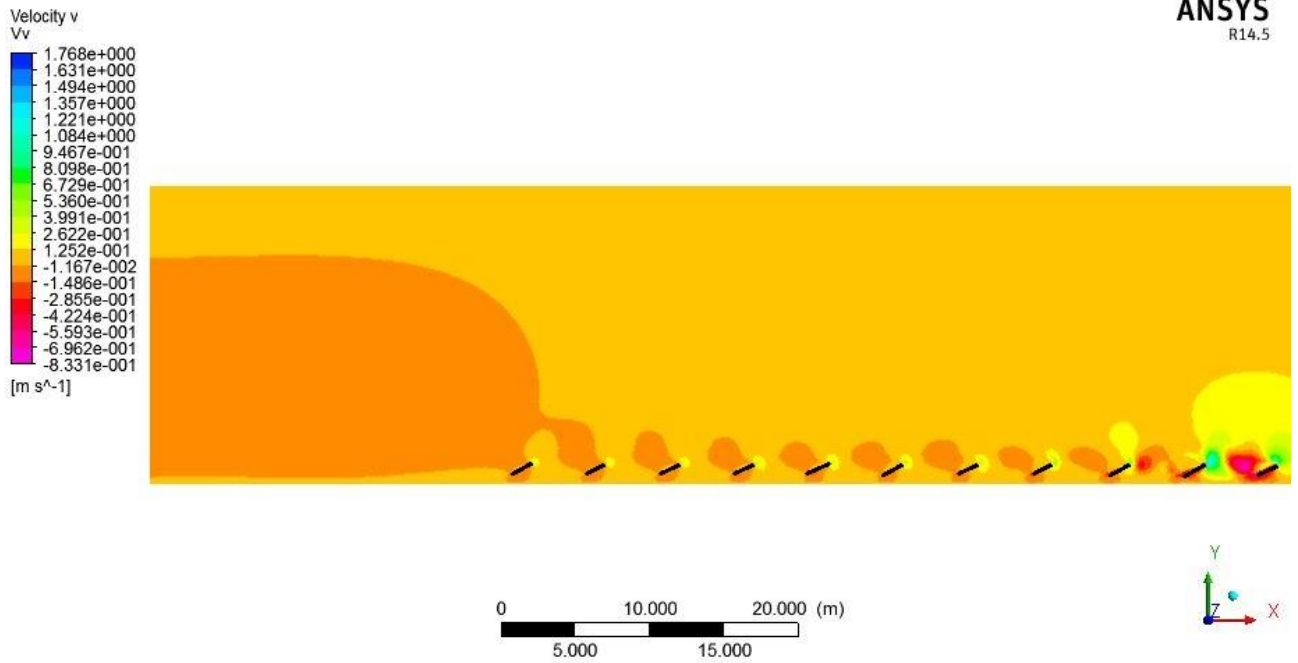


Ilustración 27 Velocidad en y para el sistema de paneles

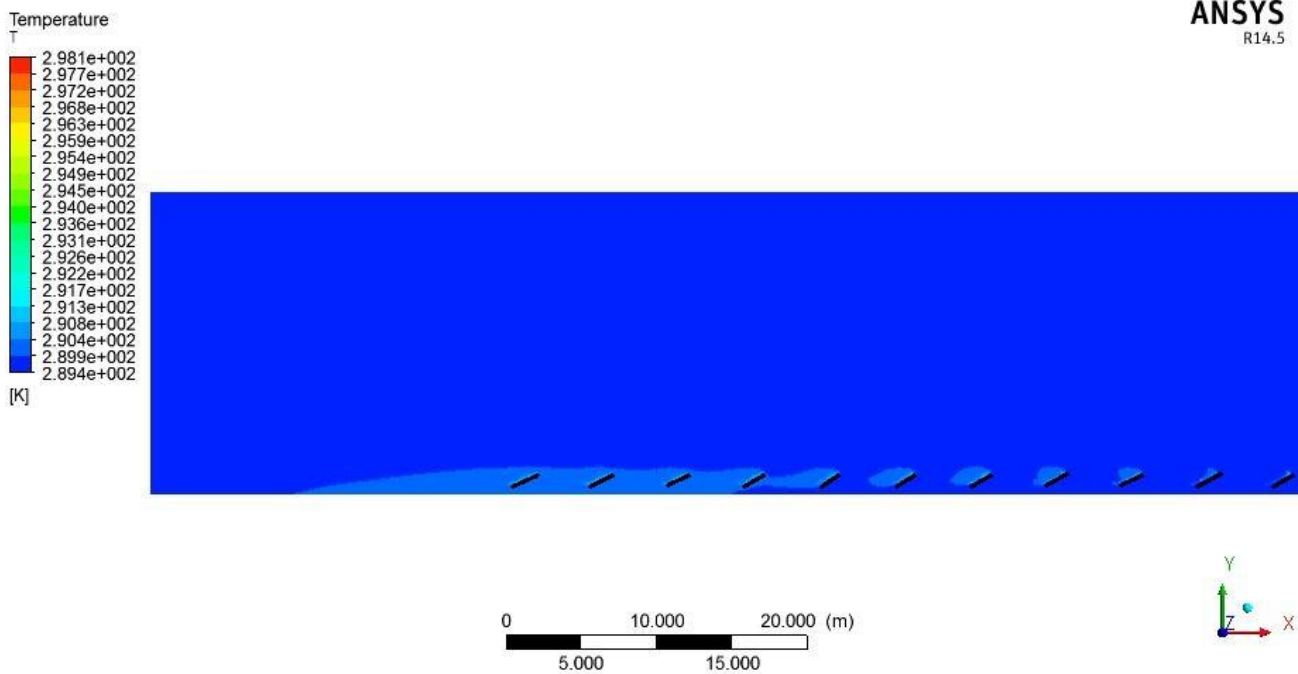


Ilustración 28 Temperatura para el sistema de paneles

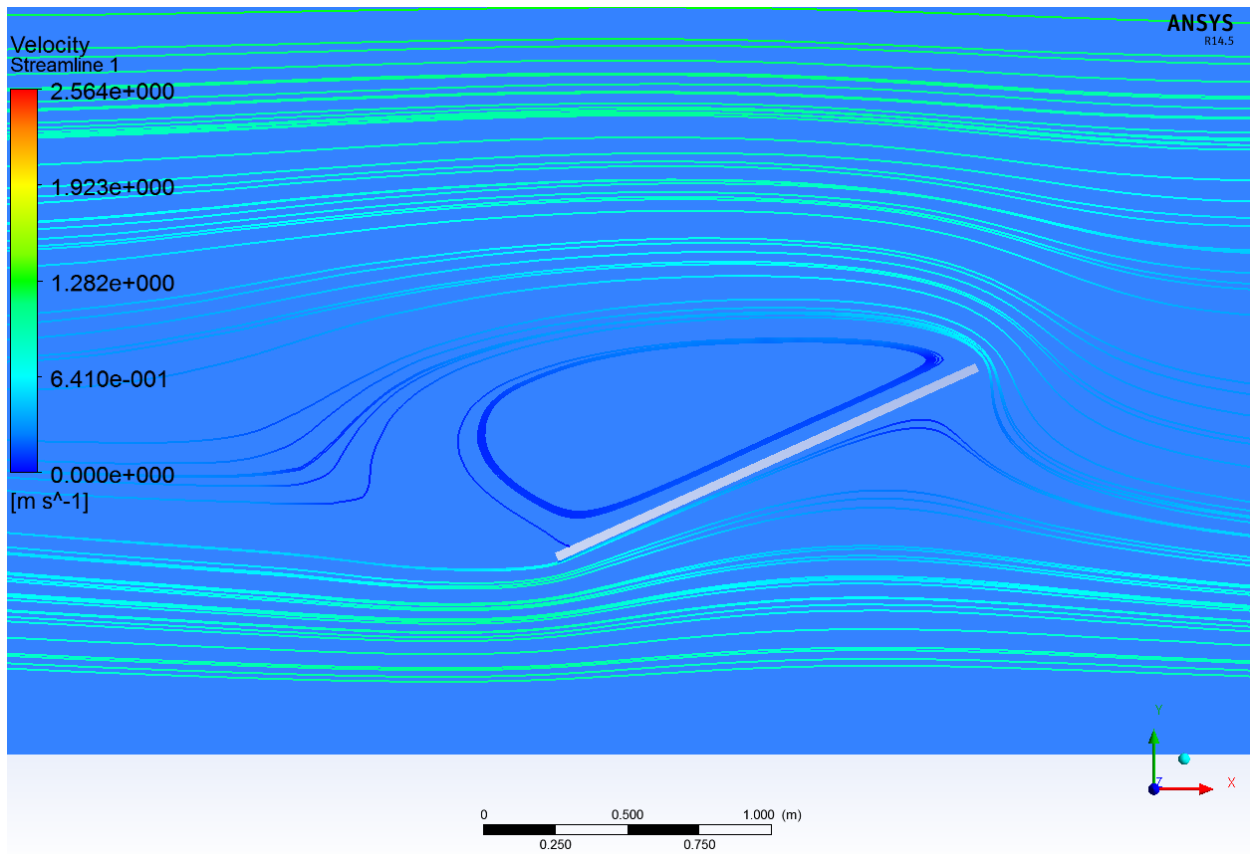


Ilustración 29 Velocidad en x en la cercanía del panel central

Estableciendo las velocidades en el eje x, y en el eje y, además de las temperaturas en las cercanías del panel central, zona de evaluación mostrada en la Ilustración 19.

Se puede apreciar en la Ilustración 29, que se procede a dividir en zonas de flujos similares para poder realizar la segunda parte de la metodología de manera más explícita. Esta división se puede apreciar en la Ilustración 30 la cual muestra 9 divisiones las que son 9 zonas de condiciones de velocidad tanto para la velocidad horizontal, vertical y la temperatura del viento las que se muestran en la Tabla 8.

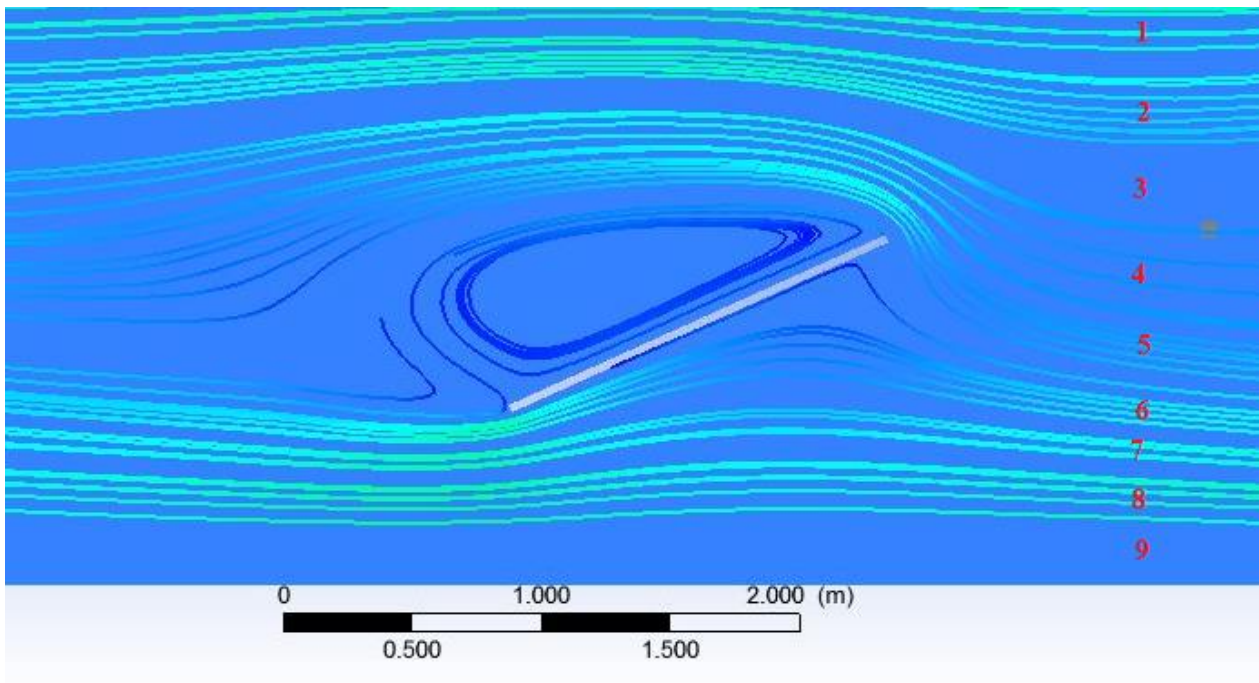


Ilustración 30 Zonas de toma de muestras

Tabla 8 Condiciones zonas cercanas al panel

Zona	Límite superior	Límite inferior	Velocidad en x [m/s]	Velocidad en y [m/s]	Temperatura K
1	0.95 m	0.70 m	-0.6411	-0.0140	289.75
2	0.70 m	0.37 m	-0.4758	-0.0086	289.78
3	0.37 m	0.00 m	-0.3465	0.0224	289.82
4	0.00 m	-0.09 m	-0.4067	0.0460	289.82
5	-0.09 m	-0.23 m	-0.5373	0.0510	289.81
6	-0.23 m	-0.40 m	-0.6891	0.0558	289.79
7	-0.40 m	-0.55 m	-0.7787	0.0497	289.78
8	-0.55 m	-0.76 m	-0.9266	0.0392	289.74
9	-0.76 m	-1.00 m	-0.3900	0.0125	289.71

Para poder observar de mejor manera el cambio provocado por la velocidad horizontal, se muestra un diagrama para ver la forma de la velocidad incidente en la Ilustración 31.

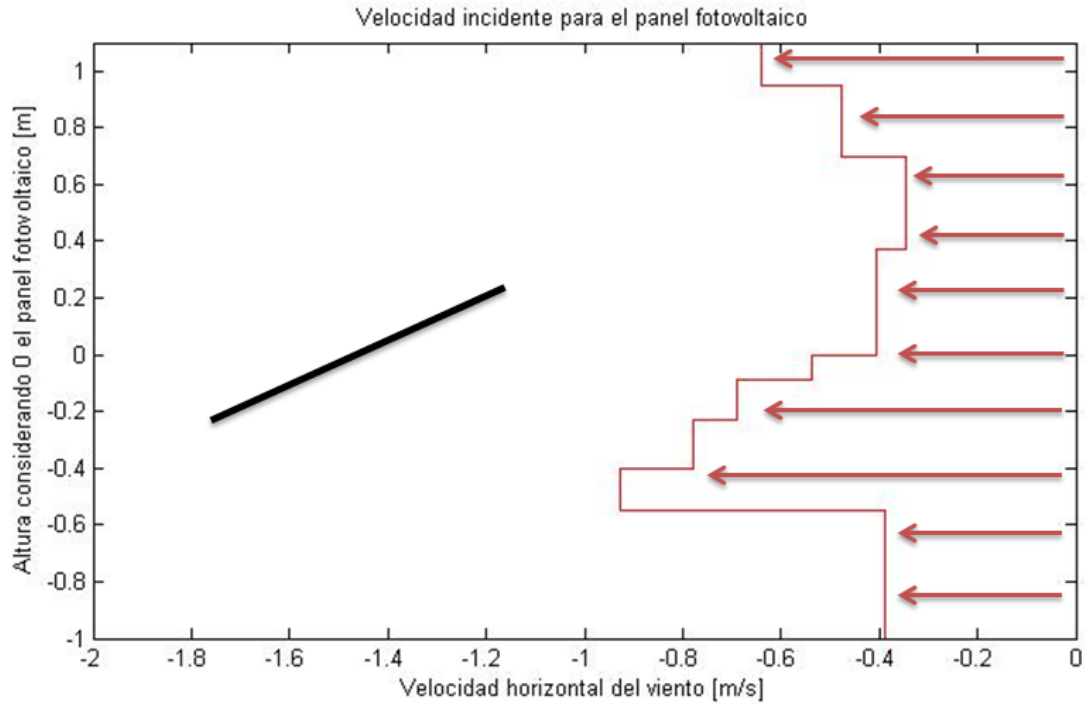


Ilustración 31 Diagrama velocidad incidente horizontal

Finalmente se comparan los resultados de los coeficientes de arrastre de la simulación con los mostrados en la Tabla 3.

Tabla 9 Validación resultados campo solar

Valor	Valor Tabla 3	Valor simulación	Error [%]
Coefficiente arrastre	0.1607	0.1701	5.8
Coefficiente sustentación	0.4271	0.4253	2.7

Con estas condiciones del viento se realizan las simulaciones para encontrar los coeficientes convectivos de transferencia de calor (“h”) para cada tipo de geometría además se establecen los valores del coeficiente global de transferencia tanto para las variaciones horizontales como las verticales.

4.2 Resultados Simulación Área del Disipador de Calor

Encontradas las condiciones para las cercanías del panel fotovoltaico, se procede a simular el panel fotovoltaico con el disipador de calor, variando tanto horizontalmente y verticalmente.

Parte del resultado de estas simulaciones se puede apreciar en las ilustraciones siguientes, para las cuales se muestran primero las variaciones horizontales desde la Ilustración 32 hasta la Ilustración 37.

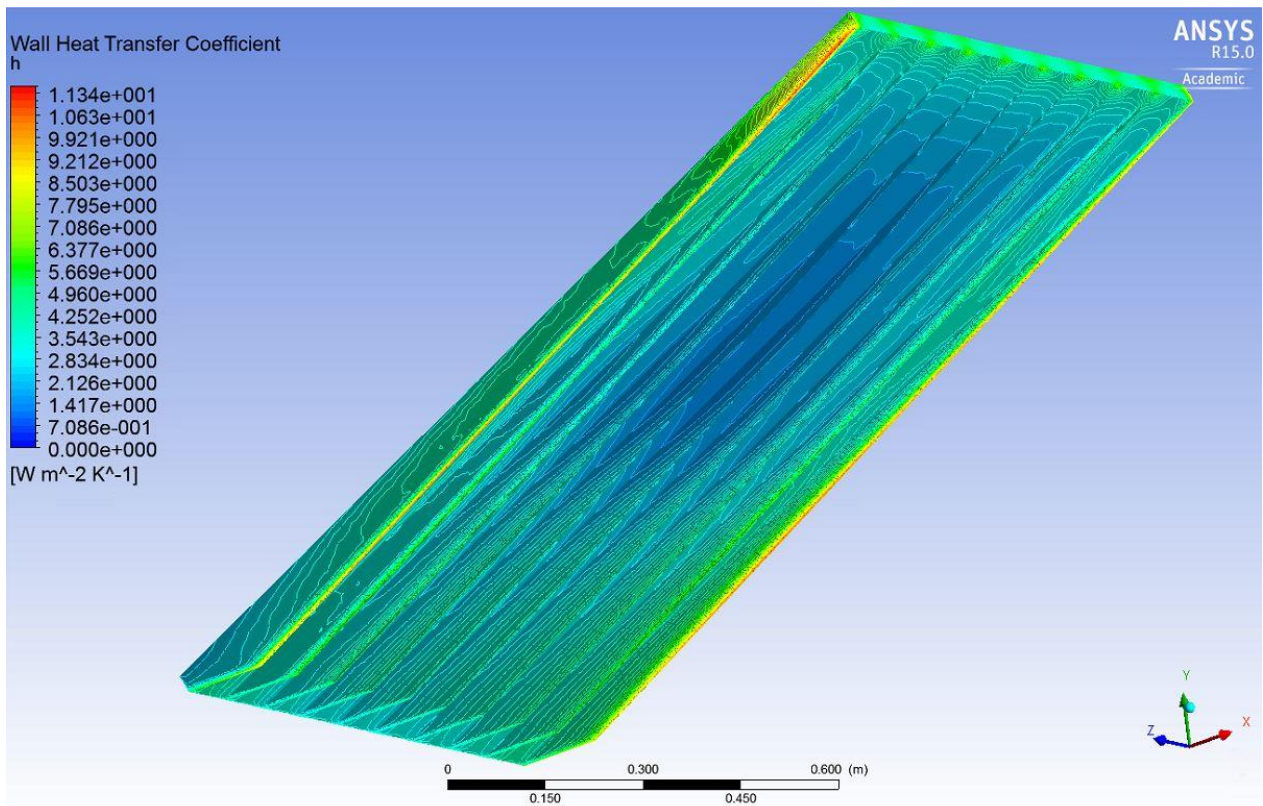


Ilustración 32 Coeficiente convectivo área 2.39 m² variación horizontal

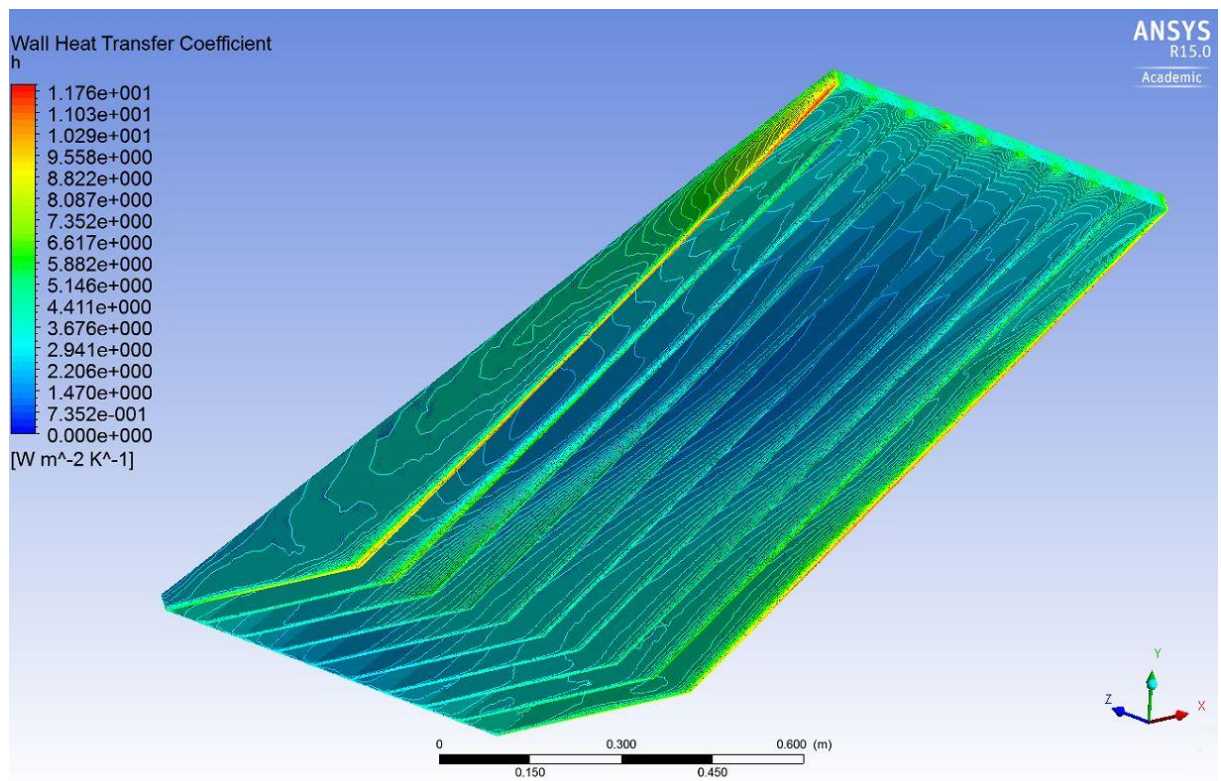


Ilustración 33 Coeficiente convectivo área 4.31 m² variación horizontal

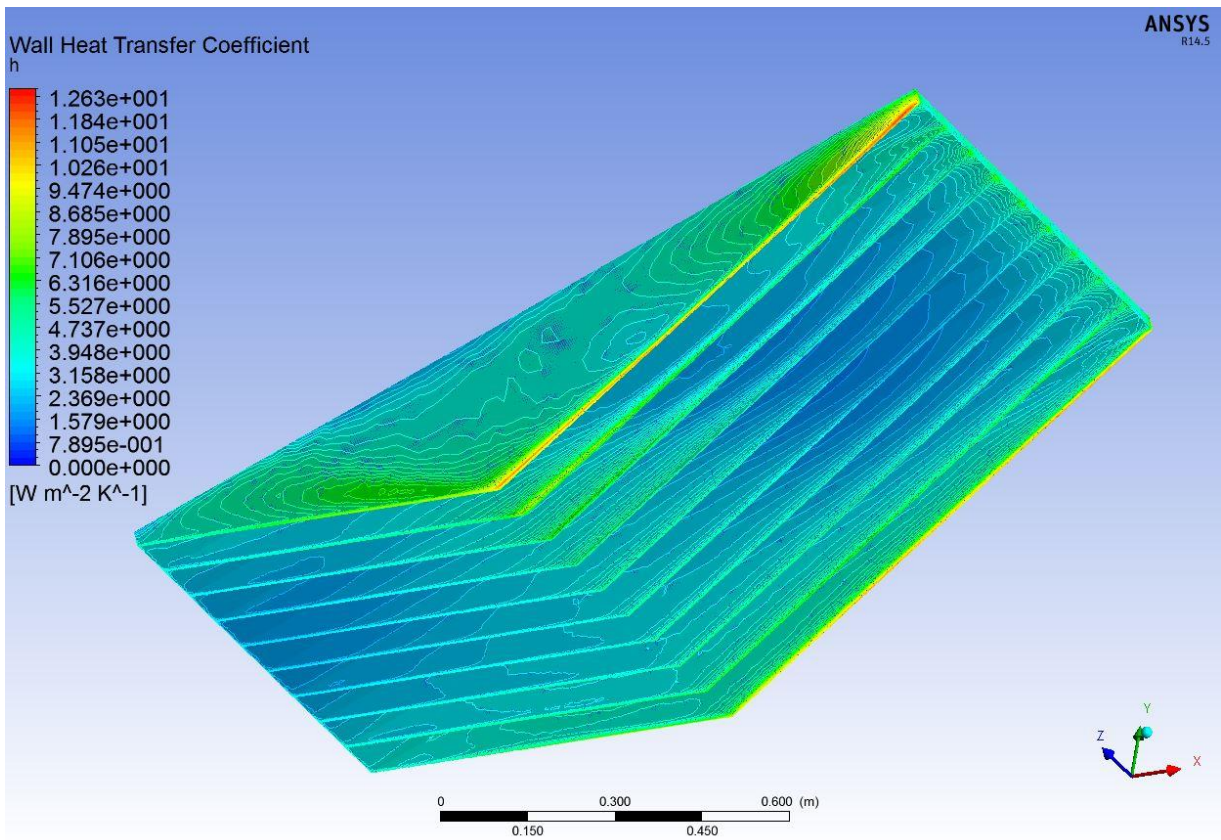


Ilustración 34 Coeficiente convectivo área 6.23 m² variación horizontal

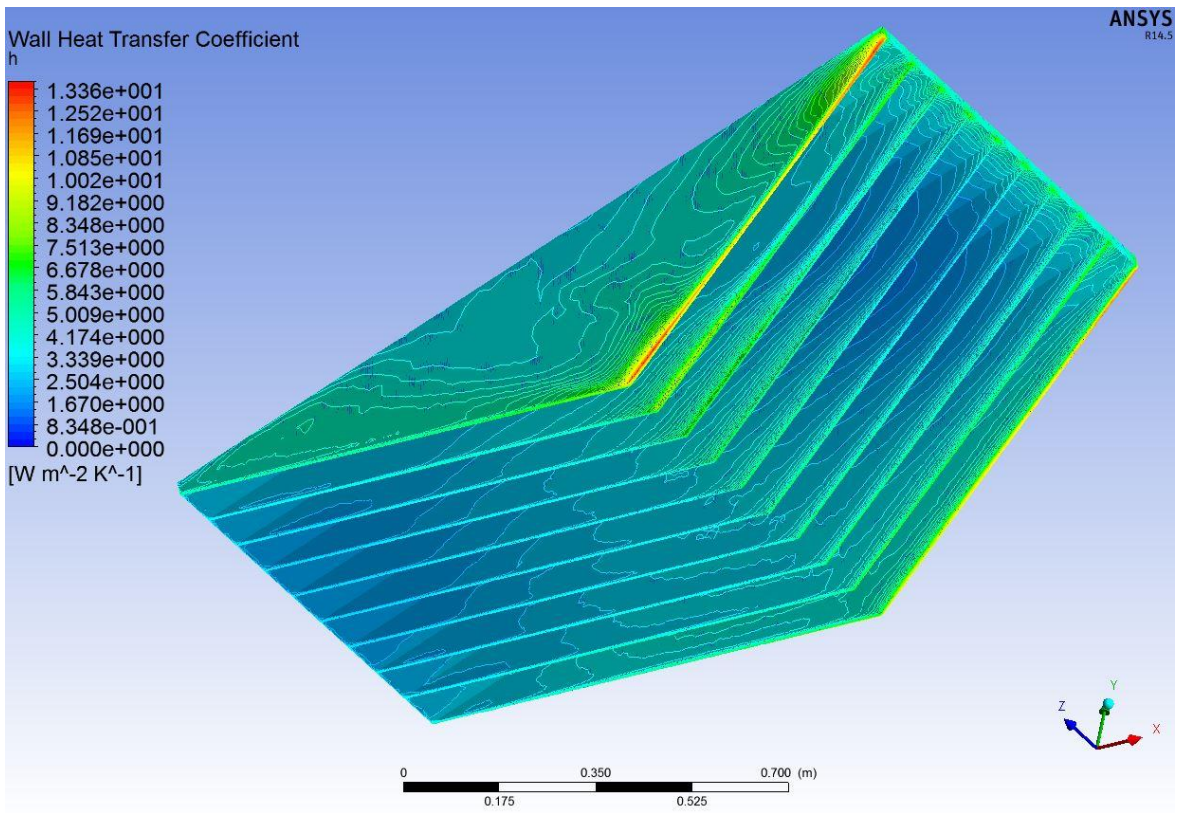


Ilustración 35 Coeficiente convectivo área 8.16 m² variación horizontal

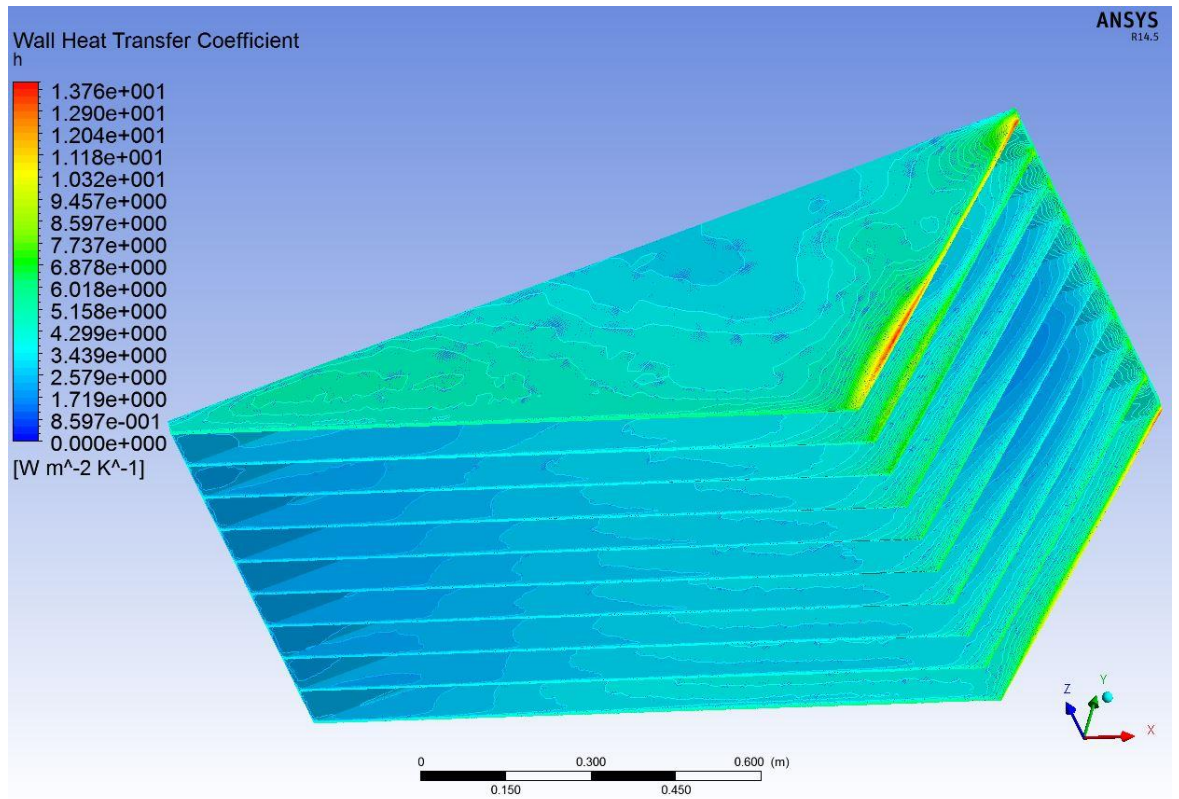


Ilustración 36 Coeficiente convectivo área 10.08 m² variación horizontal

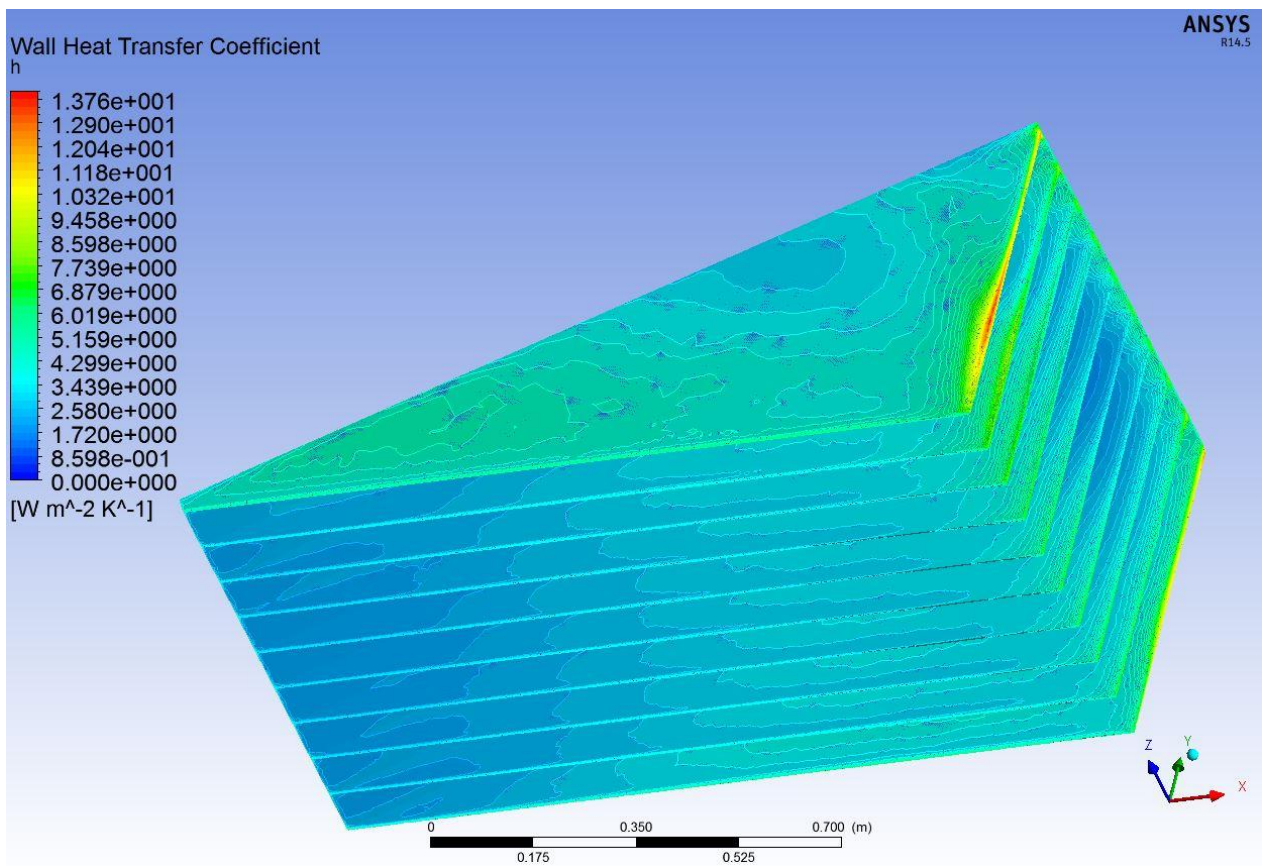


Ilustración 37 Coeficiente convectivo área 11.05 m² variación horizontal

Para los resultados mostrados anteriormente, se extraen los coeficientes de transferencia de cada punto y se promedian para encontrar el coeficiente convectivo del disipador de calor mediante la siguiente formula

$$\bar{h} = \sum_{i \in \text{Disipador}} \frac{A_i h_i}{A_{total}} \quad (\text{ec.7})$$

Donde:

A_i , Área de cada punto de la malla.

h_i . Coeficiente convectivo de cada punto de la malla.

Estos valores se pueden apreciar resumidos en la Tabla 10 y gráficamente en la Ilustración 38.

Tabla 10 Resultados h variación horizontales

Área [m ²]	h [W/Km ²]
2.39	3.2126
3.35	3.0221
4.31	2.9224
5.27	2.9011
6.23	2.9103
7.19	2.8742
8.16	2.8294
9.12	2.7969
10.08	2.7914
11.05	2.8009

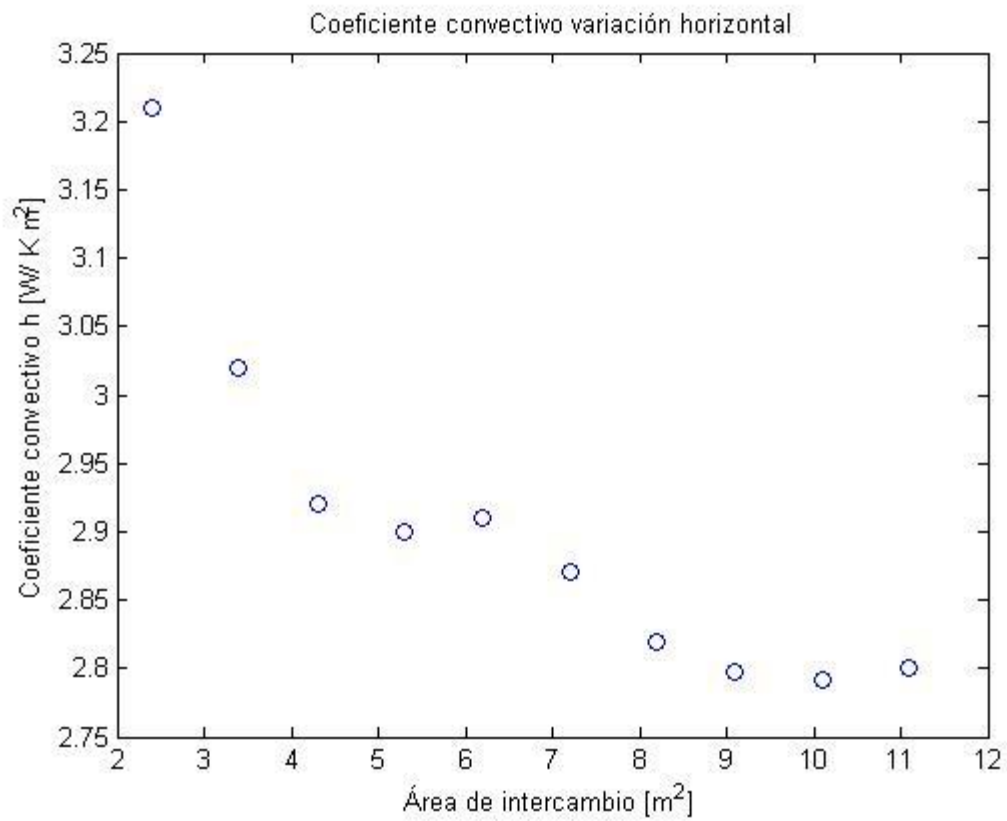


Ilustración 38 Gráfico coeficiente h para variación horizontales

Las simulaciones con variación vertical se pueden ver de la misma forma que las simulaciones para las variaciones horizontales, aunque en el caso de las variaciones verticales estas se muestran desde la Ilustración 39 hasta la Ilustración 44.

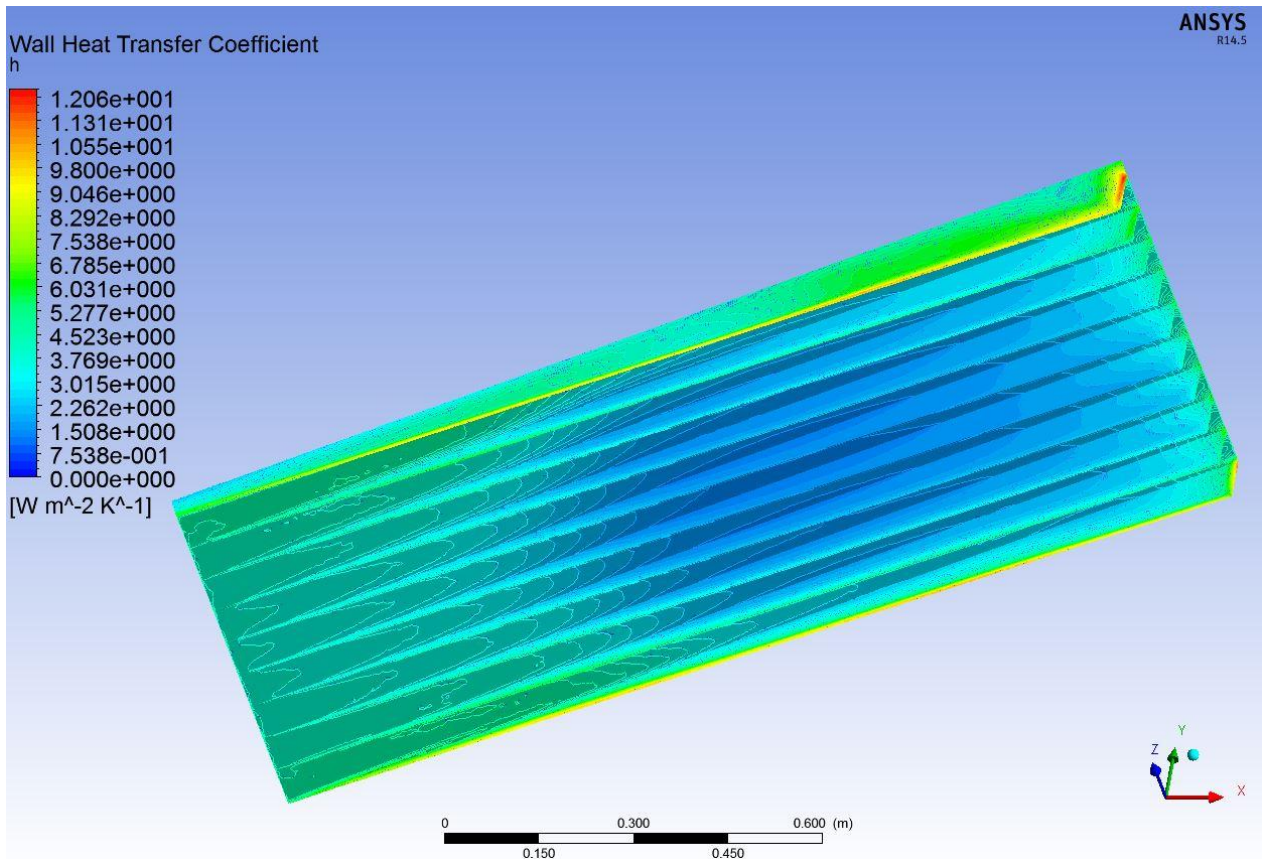


Ilustración 39 Coeficiente convectivo área 2.39 m² variación vertical

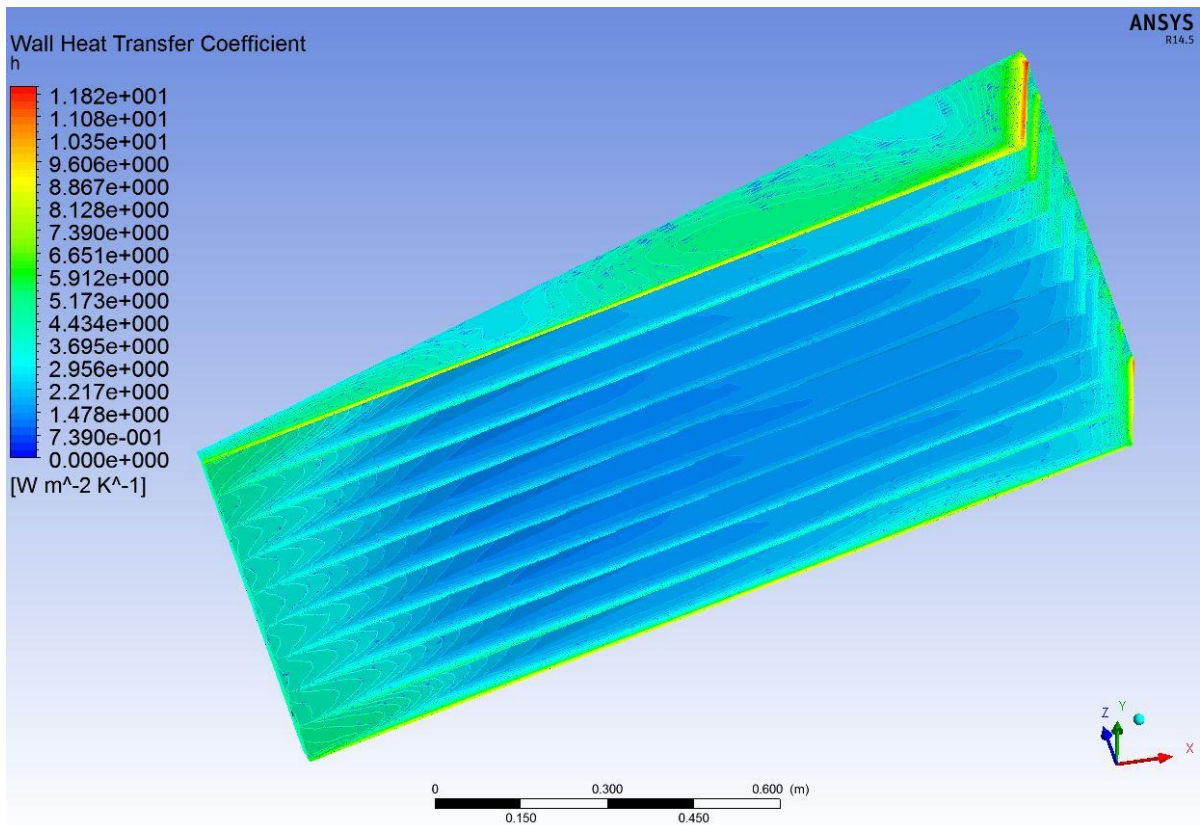


Ilustración 40 Coeficiente convectivo área 4.31 m² variación vertical

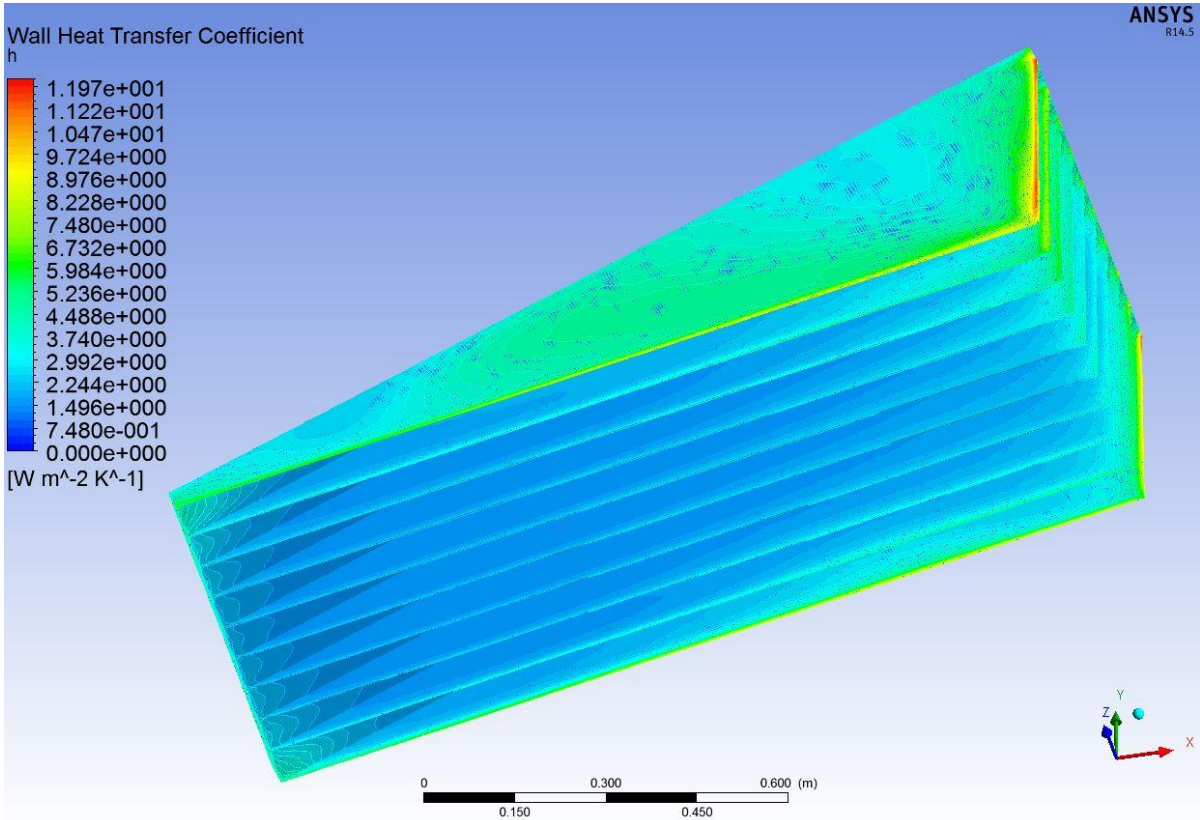


Ilustración 41 Coeficiente convectivo área 6.23 m² variación vertical

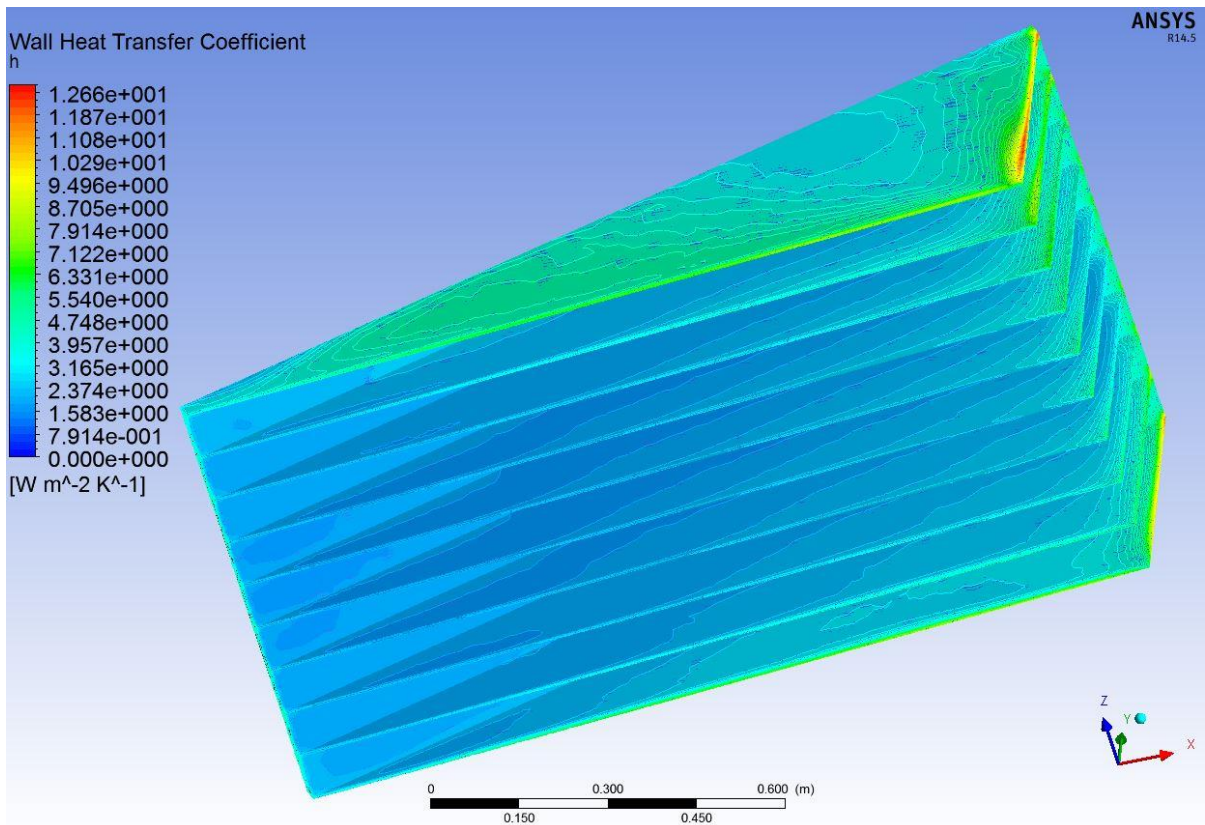


Ilustración 42 Coeficiente convectivo área 8.15 m² variación vertical

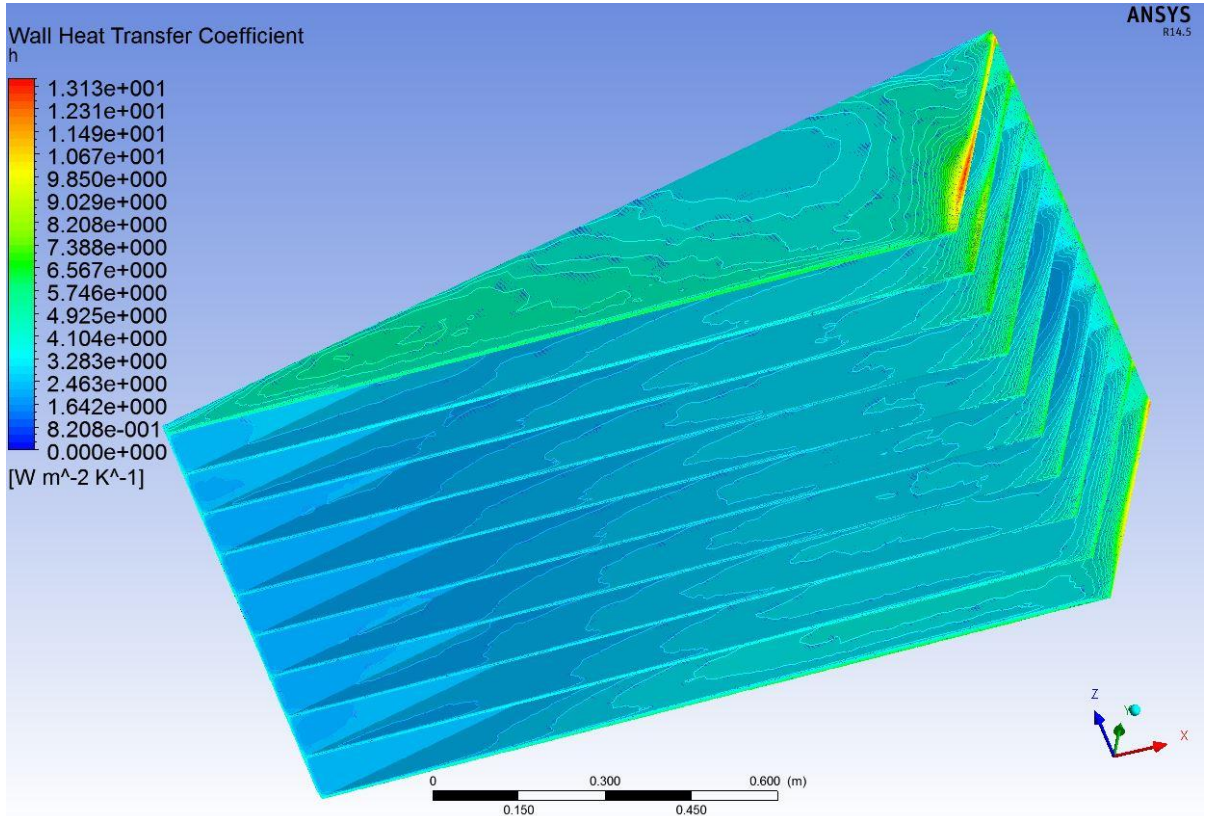


Ilustración 43 Coeficiente convectivo área 10.07 m² variación vertical

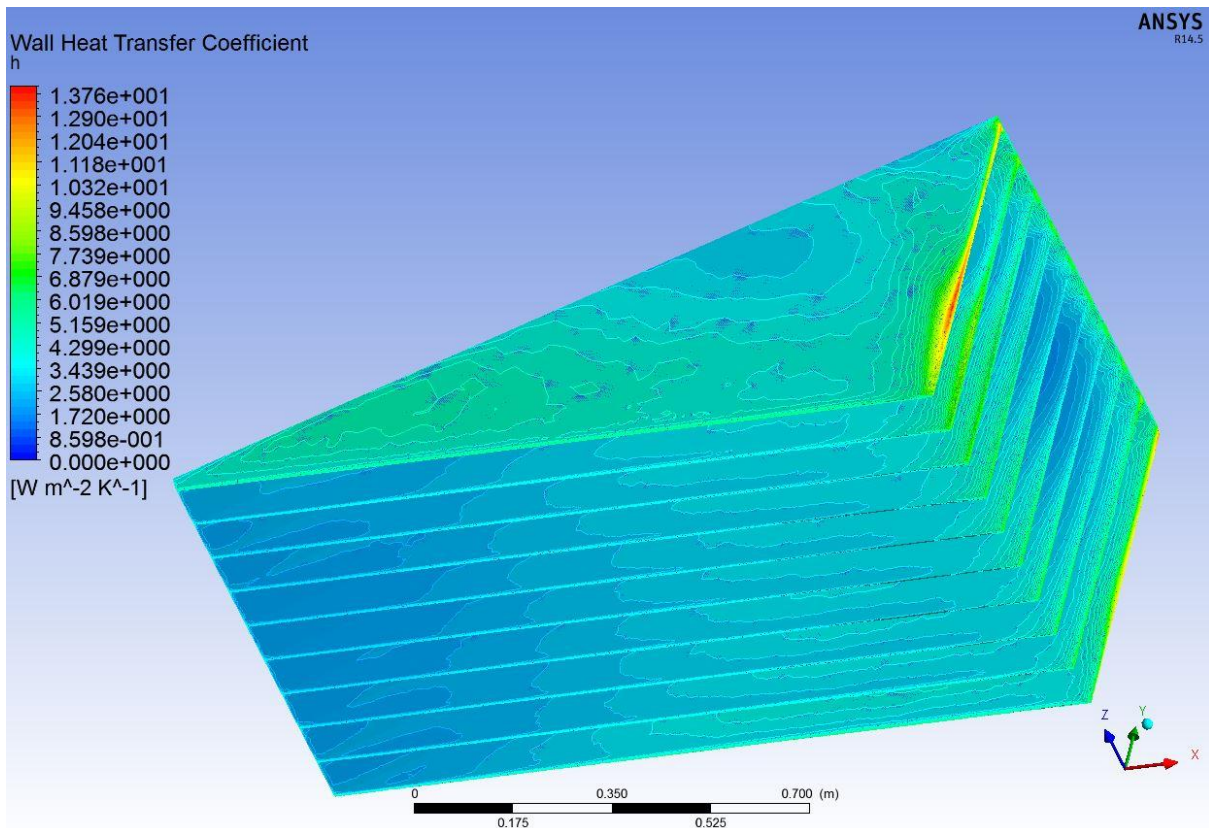


Ilustración 44 Coeficiente convectivo área 11.03 m² variación vertical

Del mismo modo que en las simulaciones para una variación horizontal, para las variaciones verticales se muestra a modo de resumen los coeficientes convectivos para todas las simulaciones en la Tabla 11 y en la Ilustración 45.

Tabla 11 Resultados h variación verticales

Área [m ²]	h [W/Km ²]
2.39	3.0390
3.35	2.6882
4.31	2.4707
5.27	2.3719
6.23	2.3417
7.19	2.3807
8.15	2.4506
9.11	2.5450
10.07	2.6650
11.03	2.8009

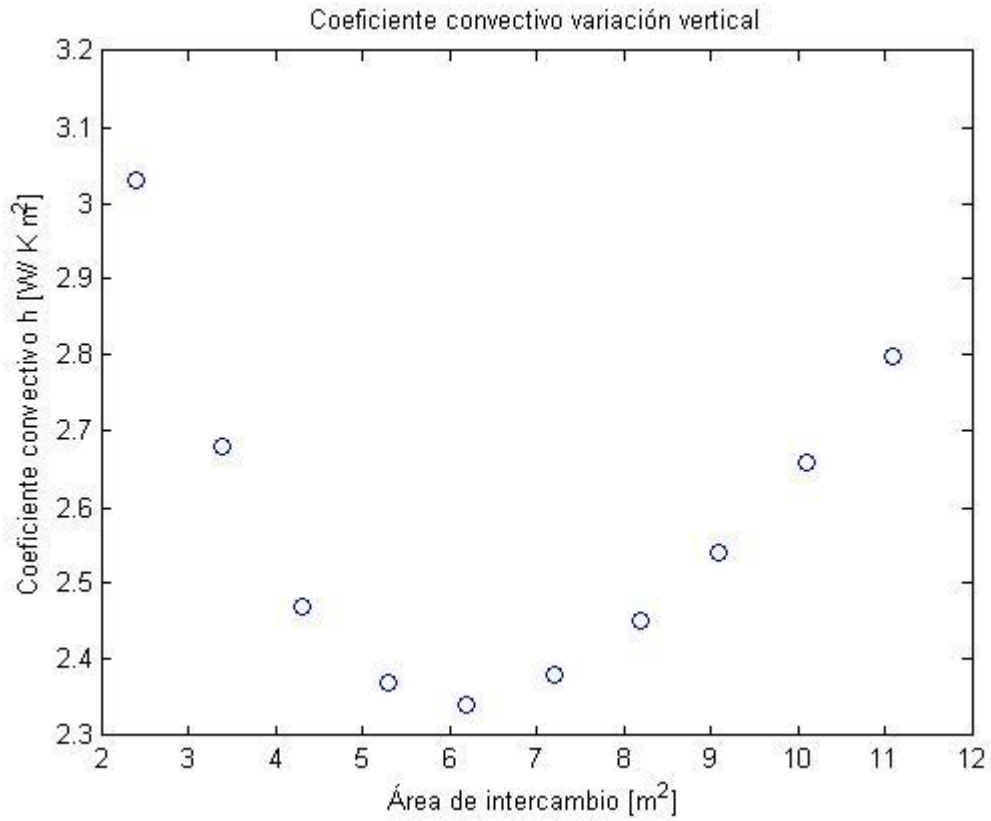


Ilustración 45 Gráfico coeficiente h para variación verticales

Finalmente, se evalúa el coeficiente global de transferencia para cada una de las variaciones, observando estos resultados en las Tabla 12 y Tabla 13 para variaciones horizontales y verticales respectivamente.

Tabla 12 Resultados U variación horizontales

Área [m ²]	U [W/K]
2.39	7.6759
3.35	10.1241
4.31	12.5981
5.27	15.2936
6.23	18.1396
7.19	20.6780
8.16	23.0748
9.12	25.5039
10.08	28.1423
11.05	30.9382

Tabla 13 Resultados U variación vertical

Área [m ²]	U [W/K]
2.39	7.2617
3.35	9.0095
4.31	10.6564
5.27	12.5107
6.23	14.6036
7.19	17.1365
8.16	19.9963
9.12	23.2151
10.08	26.8733
11.05	30.9382

Luego de establecidos los valores para las áreas de intercambio del disipador de calor, se encuentra en las simulaciones, que el disipador de calor que tiene la mejor efectividad, mayor coeficiente de transferencia global, es el de mayor área, el de área igual a 11.05 metros cuadrados.

Por lo tanto, para este disipador de calor, área 11.05 m², se efectuaran las simulaciones del efecto provocado por el aumento del número de aletas, establecidos en la Tabla 7.

4.3 Resultados de la Simulación del Número de Aletas

Encontrada la geometría que tiene un coeficiente de transferencia global más alto, se procede a simular cómo se comporta el disipador de calor con la variación del número de aletas, basándose en la Tabla 7, se obtienen los resultados mostrados a continuación:

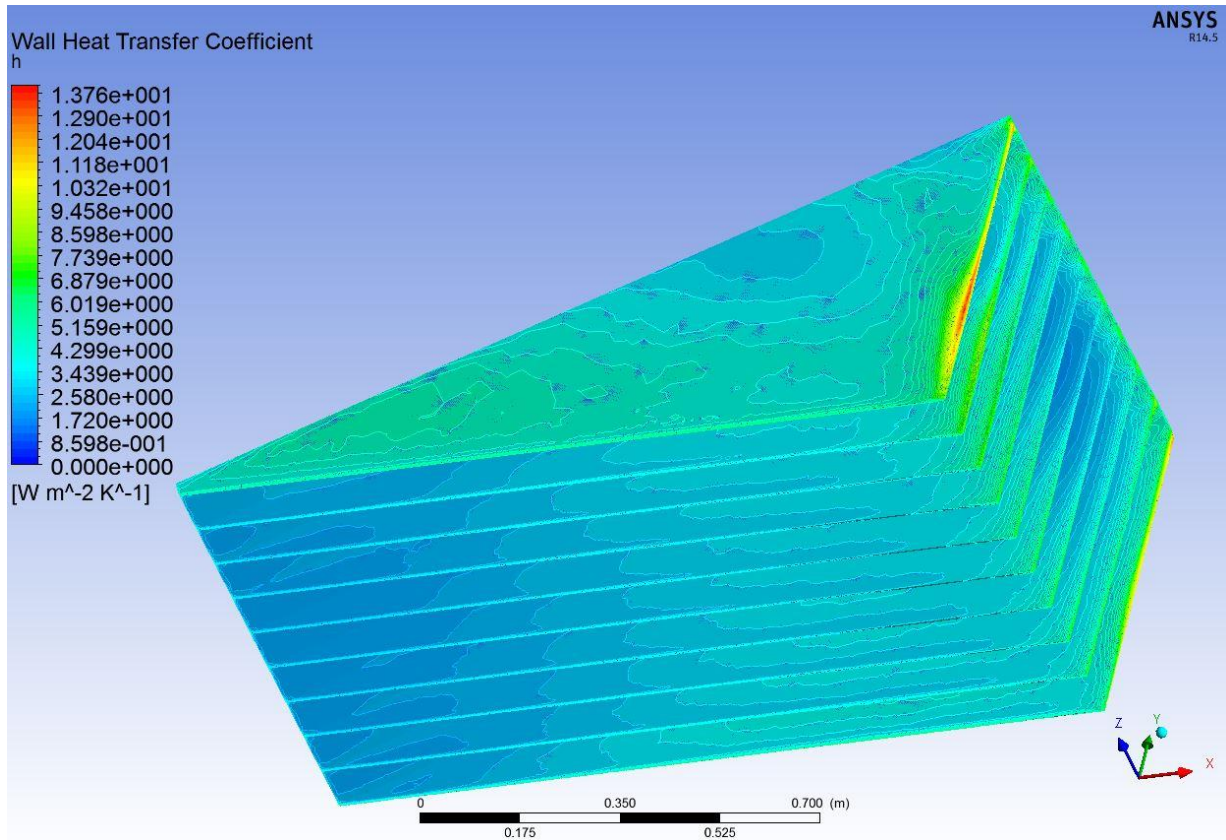


Ilustración 46 Coeficiente convectivo 10 aletas

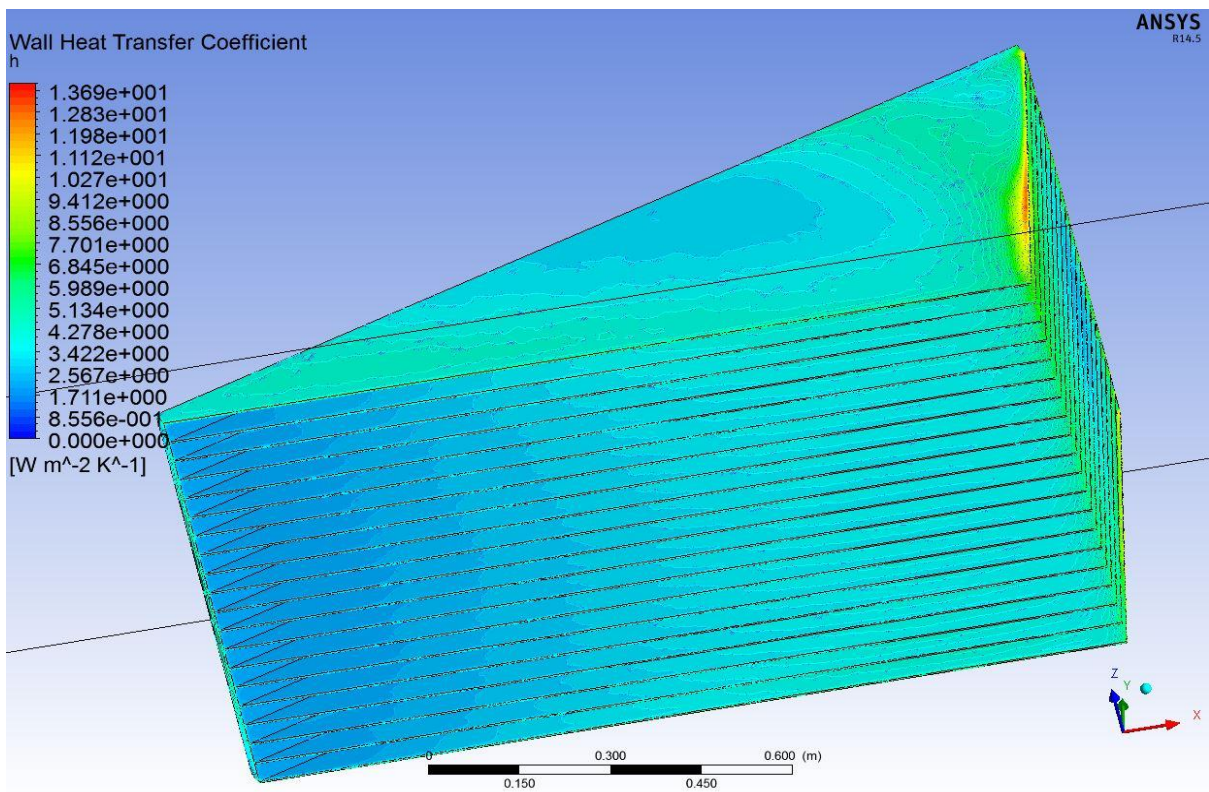


Ilustración 47 Coeficiente convectivo 20 aletas

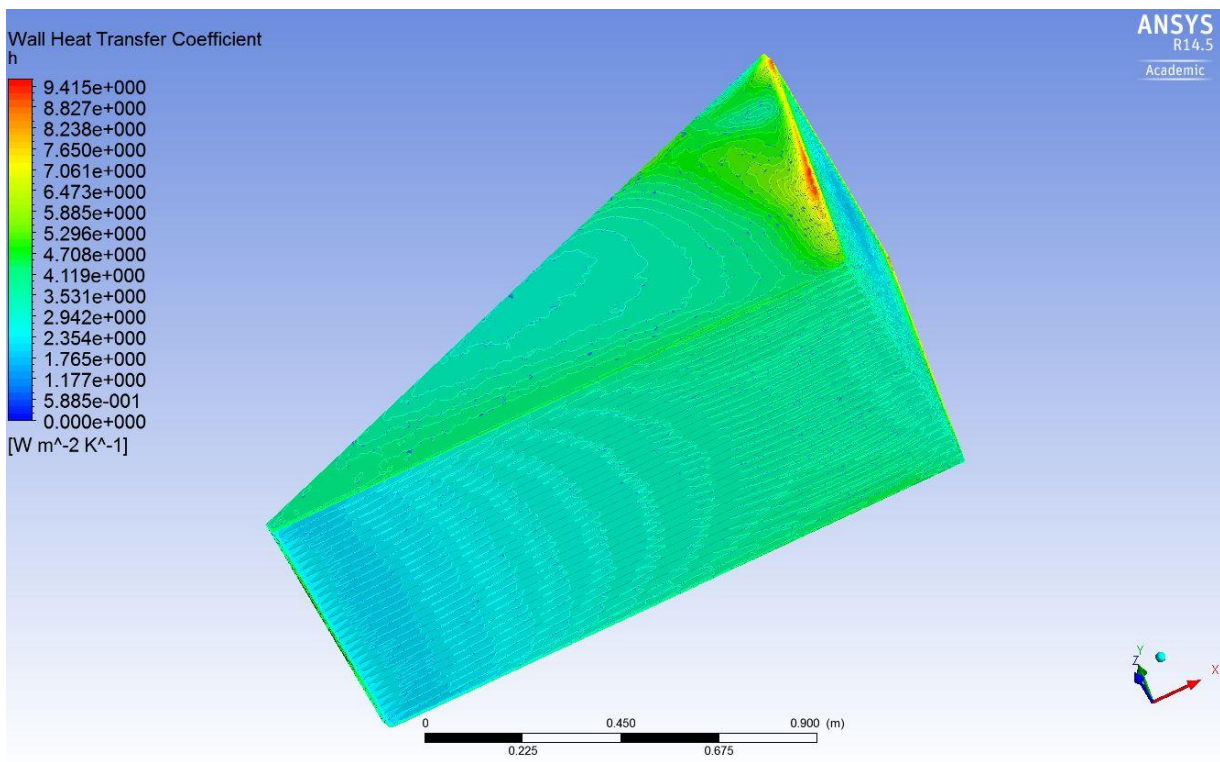


Ilustración 48 Coeficiente convectivo 30 aletas

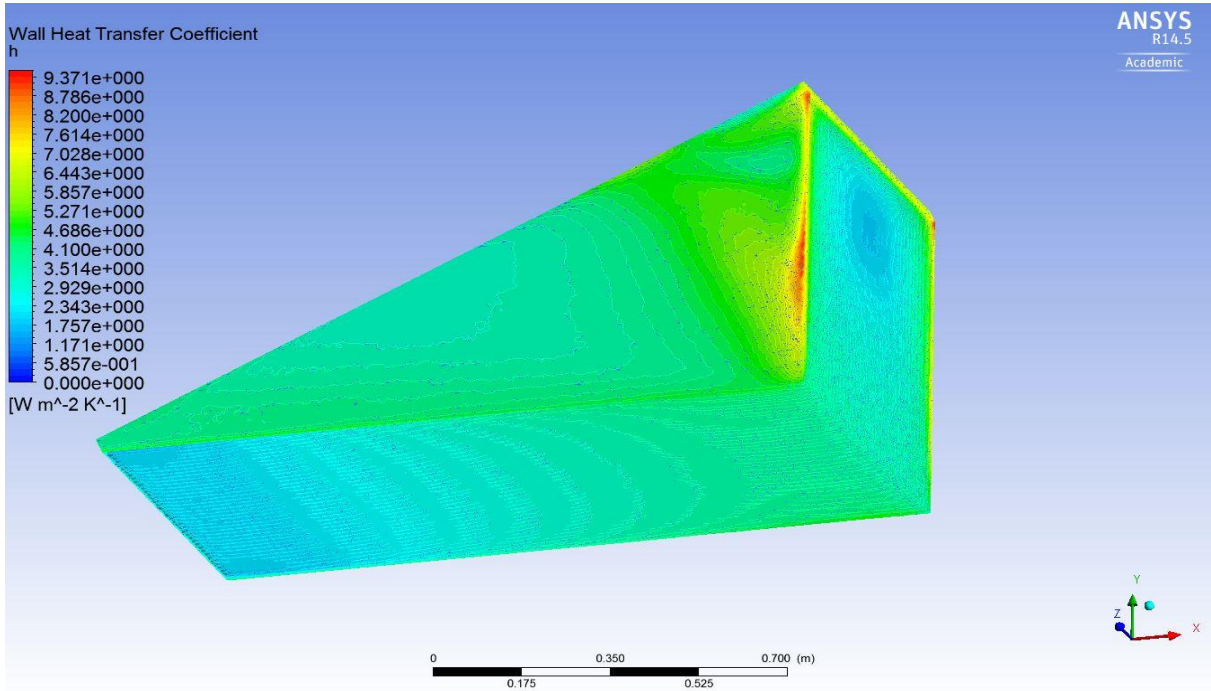


Ilustración 49 Coeficiente convectivo 40 aletas

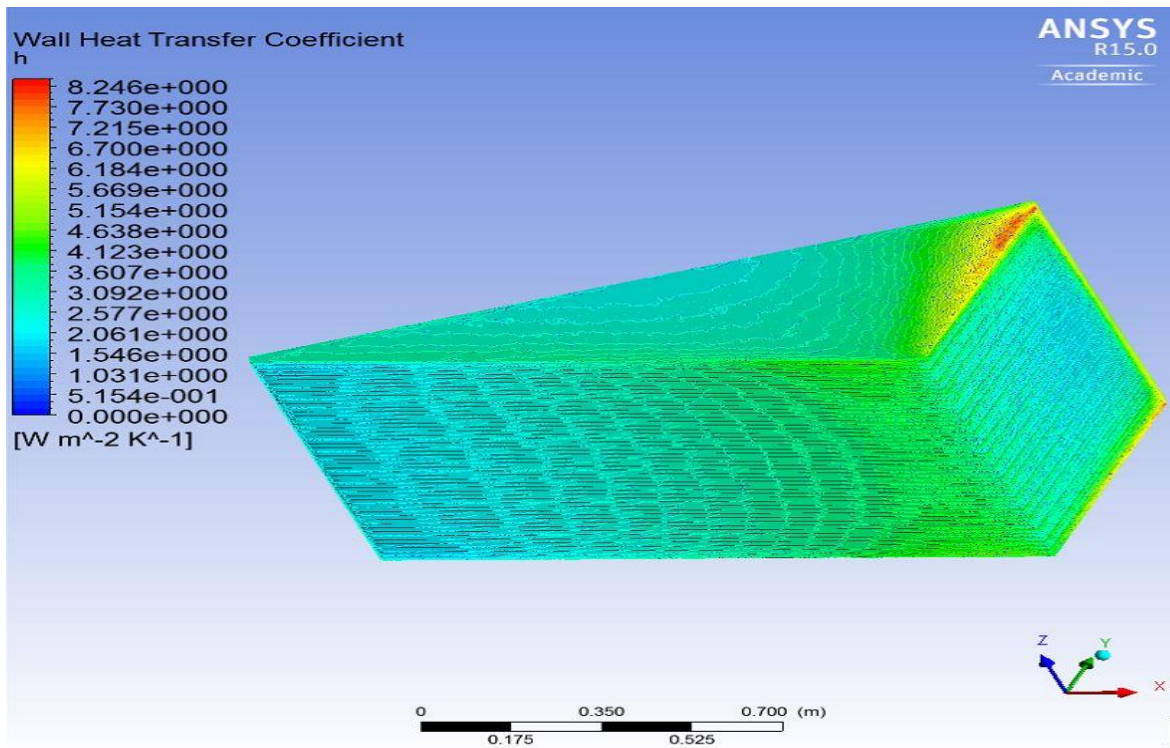


Ilustración 50 Coeficiente convectivo 50 aletas

Al igual que se realizó con las variaciones de área, para las variaciones de aletas también se calcularon los coeficientes convectivos y el coeficiente global de transferencia para el disipador de calor, mostrados en la Tabla 14 y la Ilustración 51.

Tabla 14 Coeficiente convectivo y global para variación de aletas

Numero de aletas	Coeficiente convectivo [$\frac{W}{Km^2}$]	Coeficiente global de transferencia [$\frac{W}{K}$]
10	2.8009	30.9382
20	2.7238	56.2818
30	2.6348	79.7799
40	2.6015	103.7894
50	2.5167	124.6106

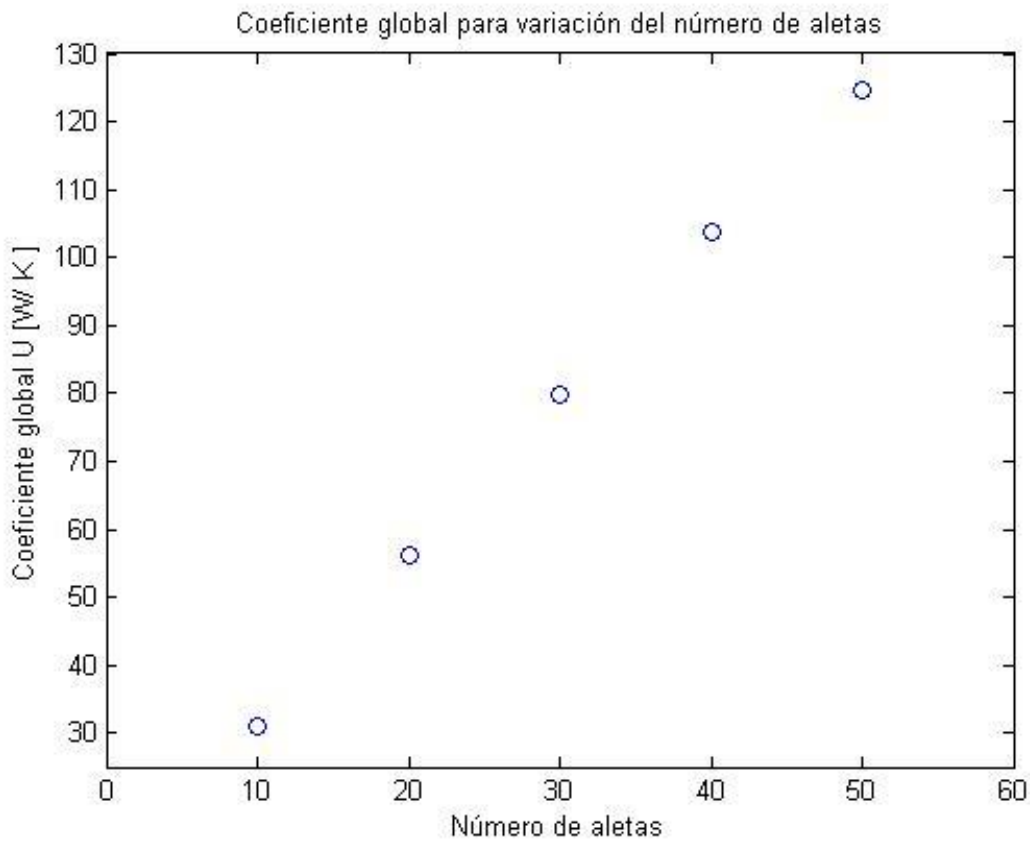


Ilustración 51 Número de aletas versus coeficiente global

Finalmente, al observar el acotado número de simulaciones realizadas por falta de insumo computacional, se propone un ajuste polinómico hacia el coeficiente global de transferencia de calor con el número de aletas como el valor polinómico a evaluar.

Buscando el polinomio que mejor se asemeje a los valores entregados, se obtienen:

- Polinomio de grado 1

$$U(a) = 2.3485a^1 + 8.6243 \quad (\text{ec.8})$$

- Polinomio de grado 2

$$U(a) = -0.0061a^2 + 2.7142a^1 + 4.3576 \quad (\text{ec.9})$$

- Polinomio de grado 3

$$U(a) = -0.0001a^3 + 0.0040a^2 + 2.4502a^1 + 6.2375 \quad (\text{ec.10})$$

- Polinomio de grado 4

$$U(a) = -0.000025a^4 + 0.0029a^3 - 0.1211a^2 + 4.5051a^1 - 4.6646 \quad (\text{ec.11})$$

Dónde:

$U(a)$, Coeficiente global de transferencia polinómico.

a , numero de aletas.

Para poder evaluar el mejor ajuste, se calcula el error porcentual para cada punto de la simulación, esto se observa en la Tabla 15.

Tabla 15 Errores ajustes polinómicos

Polinomio	10 aletas	20 aletas	30 aletas	40 aletas	50 aletas	Promedio
Grado 1	3.78%	1.22%	0.87%	1.17%	1.15%	1.64%
Grado 2	0.15%	0.13%	0.65%	0.59%	0.17%	0.34%
Grado 3	0.27%	0.61%	0.65%	0.33%	0.06%	0.38%
Grado 4	29.63%	16.29%	11.49%	8.83%	7.35%	14.72%

Se observó que el mejor ajuste es el cuadrático o de grado 2, al poseer el menor error porcentual. Para este ajuste mostrado en la Ilustración 52 se puede apreciar que tiene un máximo, el cual se encontró mediante la derivación e igualación a cero de la ecuación del ajuste polinómico.

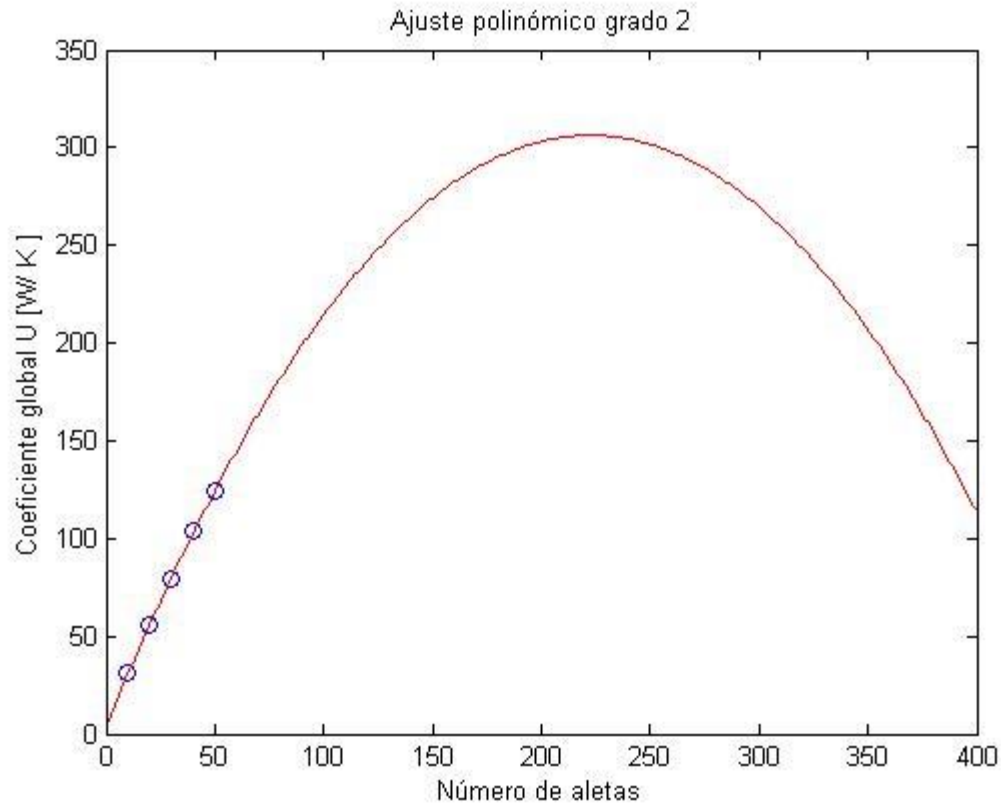


Ilustración 52 Gráfico ajuste polinómico grado 2

Derivando la ecuación del ajuste se logra obtener el número de aletas que cumplen con el máximo desempeño, propuesto para el disipador de calor y finalmente obtener el mayor descenso de la temperatura del disipador.

$$U(a) = -0.0061a^2 + 2.7142a^1 + 4.3576 \quad (\text{ec.9})$$

$$\frac{dU(a)}{da} = -0.0122a^1 + 2.71426 = 0 \quad \Rightarrow \quad a \approx 222 \quad (\text{ec.10})$$

Por lo que se obtiene, potencialmente, que el máximo valor del coeficiente de transferencia $U = 306.5 \text{ [W/K]}$, con esto se obtiene una diferencia de temperatura con el ambiente, aproximadamente en 17°C , de 3.3 grados, es decir se logra tener el disipador de calor en aproximadamente 20°C .

5 Análisis de Resultados

5.1 Simulación del Campo Solar

En la simulación del campo solar se aprecia una variación importante desde la velocidad incidente al campo solar, hasta la velocidad incidente horizontal que afecta al panel fotovoltaico del centro, una variación desde 1.98 m/s hasta 0.4 m/s en los peores casos.

Este efecto se debe a la interferencia de los paneles fotovoltaicos anteriores que provoca la desviación del aire tanto por su parte inferior como por la parte superior de este, pero no todo el fluido que se ve direccionado hacia arriba o hacia abajo se devolverá al espacio posterior que deja el panel fotovoltaico y es gracias a esto que se disminuye el módulo de la velocidad incidente.

Por otro lado, se aprecia una continuidad de la forma de las líneas de corriente en la Ilustración 53 mientras se avanza en la fila de paneles fotovoltaicos, lo que permite predecir un comportamiento similar para filas de paneles fotovoltaicos más grandes que la simulada en este trabajo.

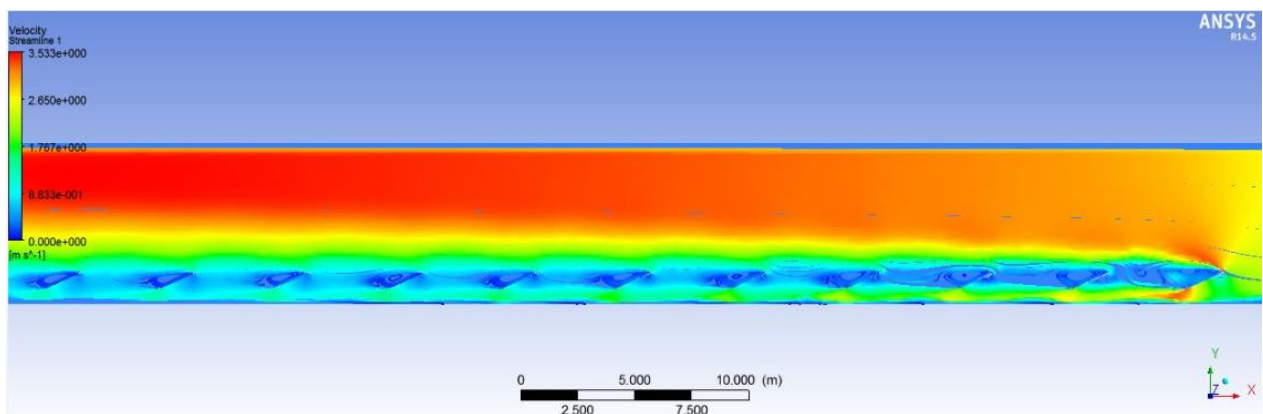


Ilustración 53 Líneas de corriente para el campo solar

El perfil de velocidades mostrado para el panel fotovoltaico muestra la desviación que provoca el panel anterior, dado que en la zona en la cual se encuentra el panel es la que recibe la velocidad más suave del viento, por el contrario, en las zonas inferiores y superiores donde no se encuentra el panel, son las que reciben la velocidad más rápida ejemplificado en la Ilustración 54.

Mencionado anteriormente el efecto provocado por el panel anterior a la zona de evaluación permite que el viento tenga este perfil de incidencia frente al panel fotovoltaico, el cual es muy distinto a un perfil lineal o constante.

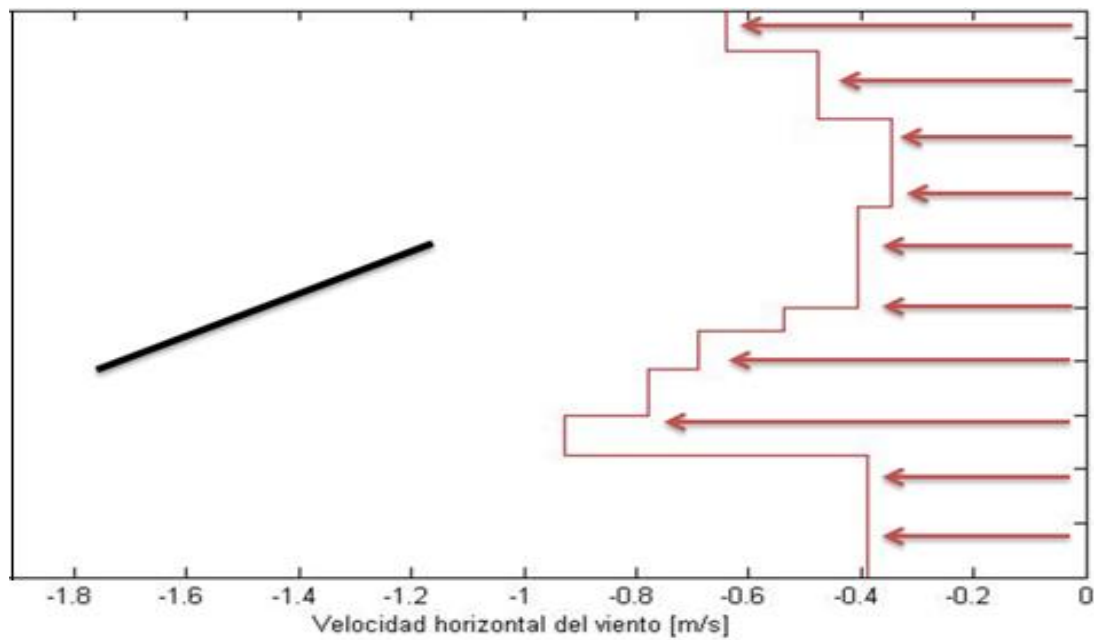


Ilustración 54 Perfil de velocidad

5.2 Simulación de la Variación del Área

Al efectuar la variación del área en las simulaciones se observa una constante la cual es la mayor transferencia de calor en las aletas más a la orilla del dissipador de calor, esto se debe gracias a que el fluido al desviarse por el dissipador que se encuentra en el camino prefiere desviarse hacia los lados que hacia abajo.

Este efecto provoca otro suceso en cadena, que en la superficie más próxima al panel fotovoltaico en el dissipador de calor se observa una disminución de la transferencia de calor, encontrando los puntos mínimos de transferencia como se aprecia en Ilustración 55.

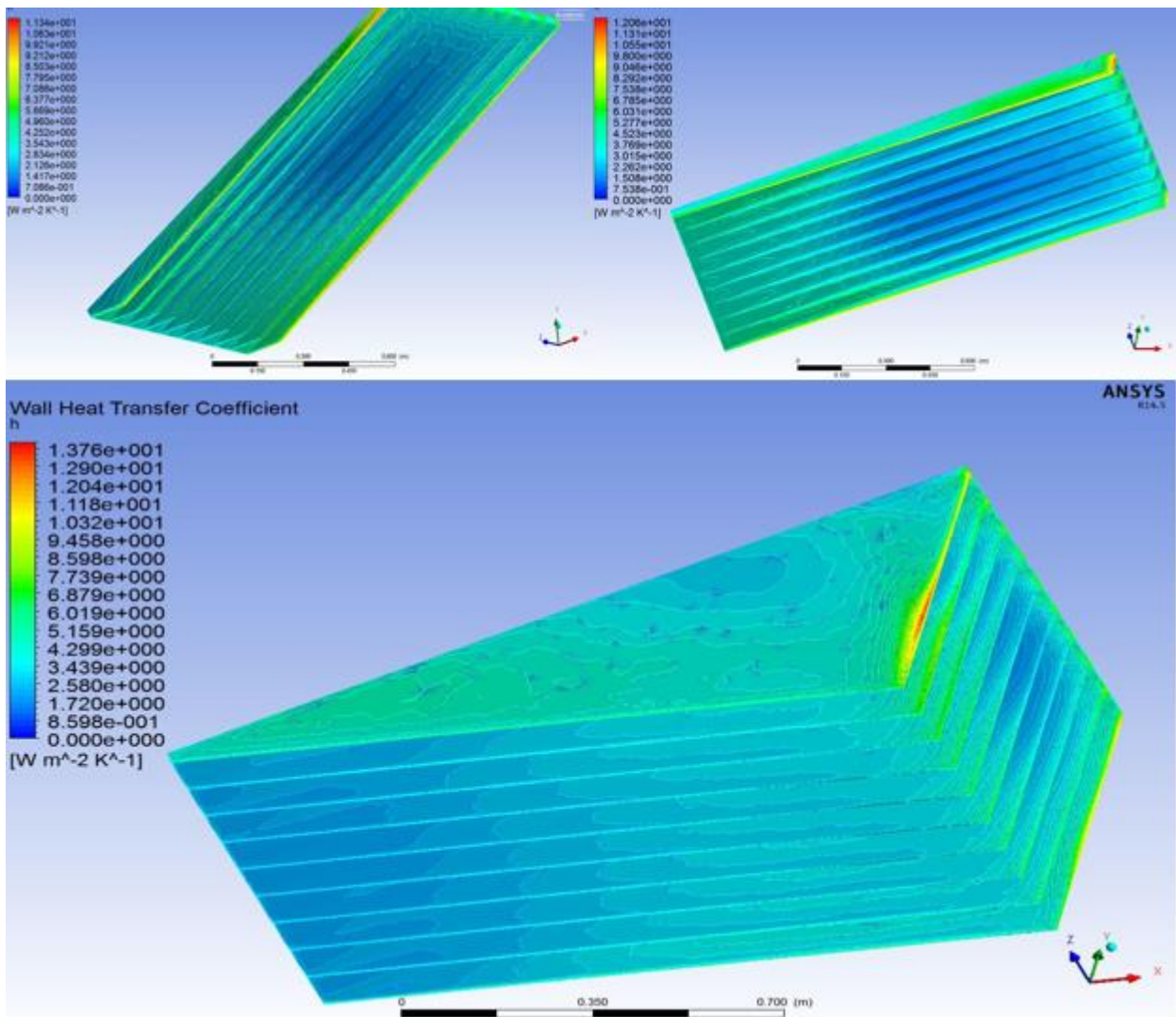


Ilustración 55 Variaciones de área

Debido a la poca proporción de fluido que se introduce por las aletas del disipador de calor, en relación al viento que se aproxima al disipador como se observa en la Ilustración 56, se puede observar una variación en la transferencia de calor, en relación a la forma del disipador de calor.

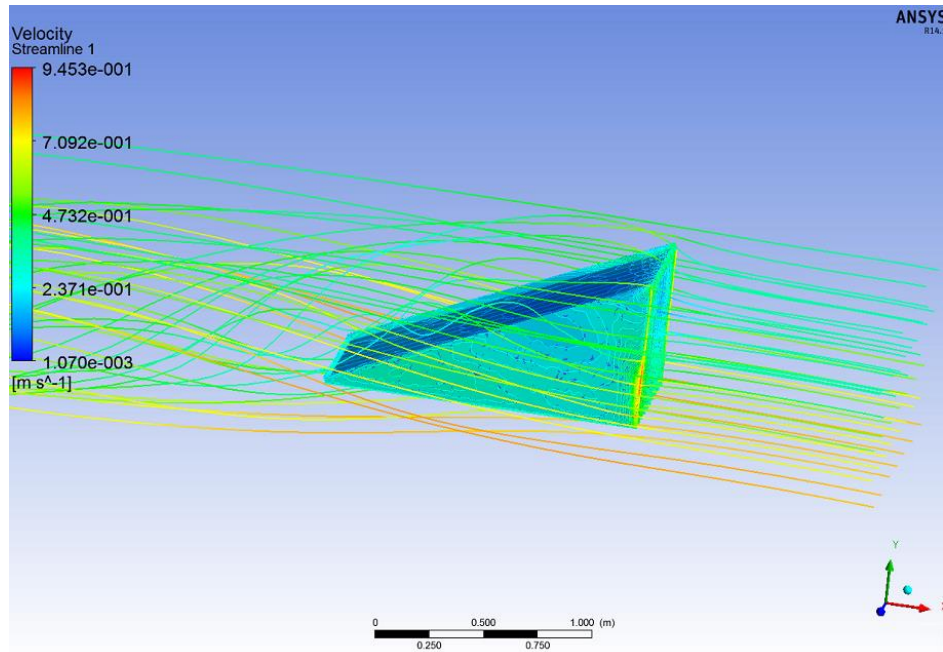


Ilustración 56 Líneas de corriente

Esto se observa al evaluar una variación horizontal versus una variación vertical de la misma área de intercambio como se aprecia en la Ilustración 57 con lo cual se aprecia que al varía horizontalmente, se obtiene una transferencia de calor de mayor proporción que al variar verticalmente el área.

Este efecto se produce por la forma en la cual enfrenta el disipador de calor al viento, dado que al variar horizontalmente el disipador tiene una geometría más aerodinámica debido a que la pared cercana al fluido no es vertical y tiene una inclinación que ayuda a direccionar el viento más suavemente para que logre introducirse en los intersticios que existen entre aletas.

Por otro lado al variar verticalmente el disipador tiene una geometría menos aerodinámica dado que presenta una pared vertical frente al fluido lo que direcciona el fluido más bruscamente y evita que se introduzca entre las aletas y solamente recorra el disipador por los costados.

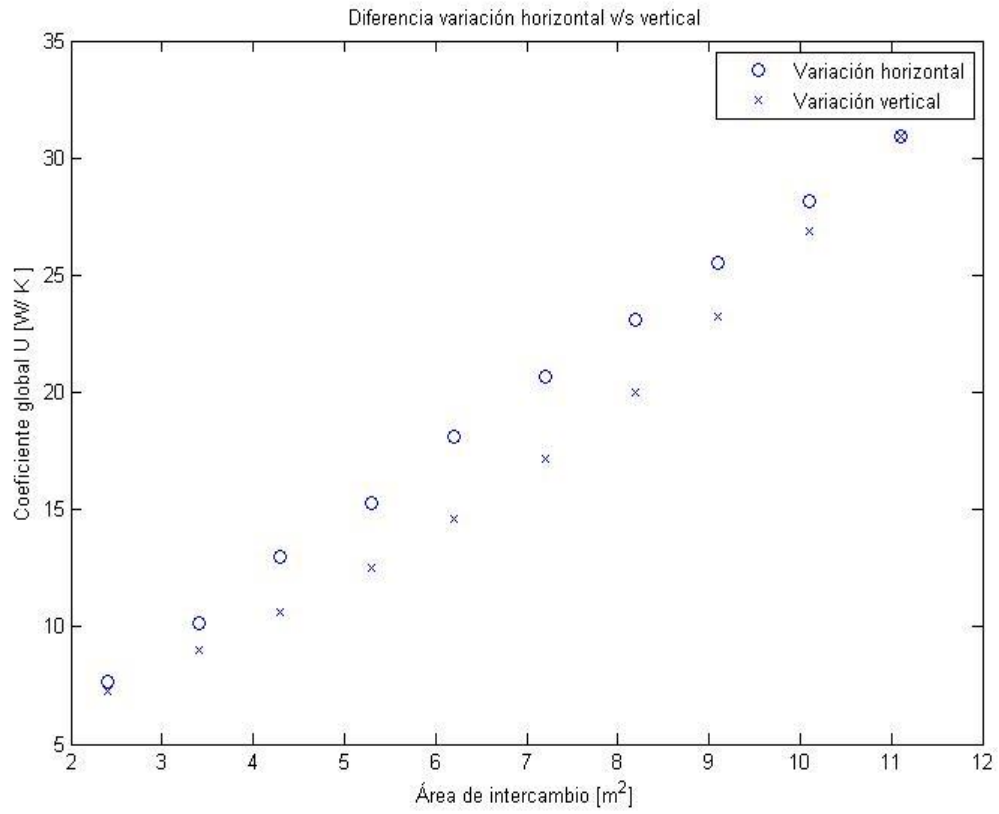


Ilustración 57 Coeficiente global de transferencia para variaciones de área

5.3 Simulación de la Variación del Número de Aletas

La simulación del número de aletas entrega resultados que se describen al observar que la transferencia de calor por convección depende del área de intercambio térmico que se tiene, como se muestra anteriormente en la variación del área del disipador, dado que al agrandar el número de aletas también crece el área de intercambio.

Al variar en número de aletas se observa en una primera instancia una variación lineal del coeficiente global de transferencia como se puede apreciar en la Ilustración 58, pero luego de realizar un ajuste lineal, se puede apreciar que en realidad es más un ajuste polinómico.

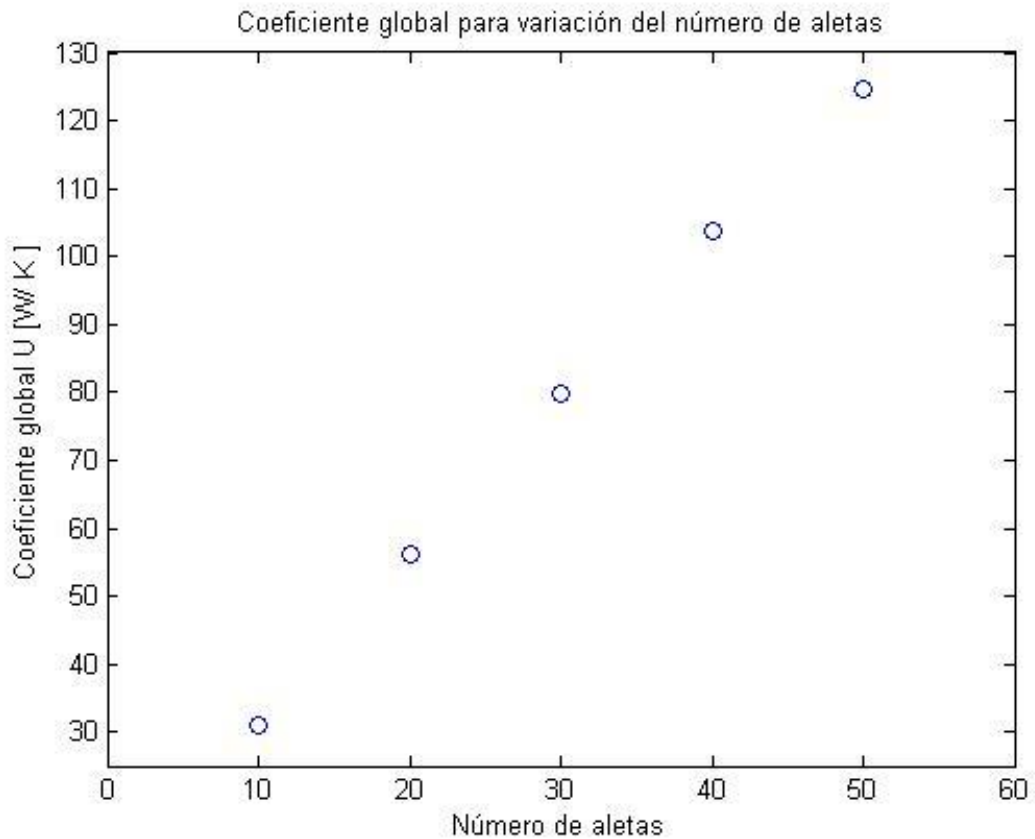


Ilustración 58 Coeficiente global de transferencia versus número de aletas

Con este resultado, se propone un ajuste polinómico, entre los cuales el ajuste que produce el menor error es el ajuste de grado 2 mostrado en la Ilustración 59, con lo que se puede proponer, que existe un máximo en el coeficiente global de transferencia de calor y por ende un disipador que permite la mayor transferencia de calor.

Este resultado se deja a verificación posterior, ya que solo se propone un disipador de calor con 222 aletas, debido a que se extrae de un ajuste polinómico y finalmente un área del disipador que no es rectangular, pero si es un triángulo rectángulo.

Finalmente encontrados los mejores valores de geometría triangular y número de aletas para el disipador de calor, se calcula la diferencia de temperatura existente entre el disipador y el viento presente en la zona, evaluado en 3.3°C .

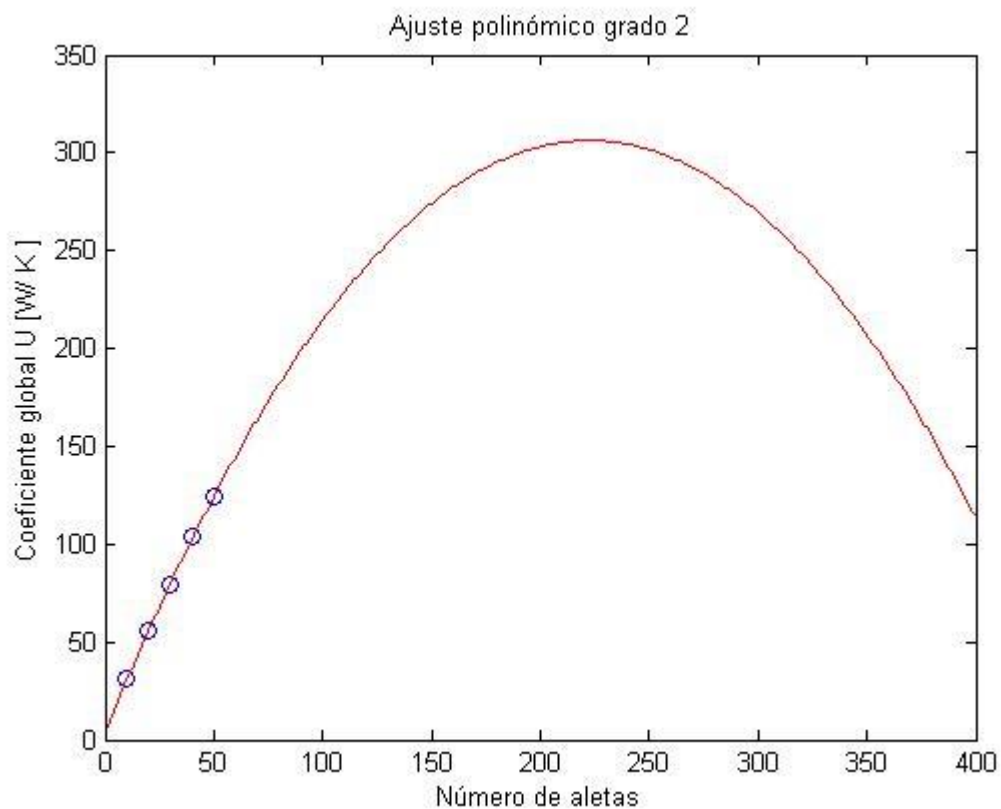


Ilustración 59 Ajuste polinómico grado 2

6 Conclusiones y Recomendaciones

Las conclusiones que se extraen desde el trabajo realizado se describen a continuación, detallado punto a punto y en similitud a la forma de separar la metodología de este trabajo, por lo que en primera instancia se encuentran las conclusiones para el campo solar:

- Al simular el campo solar se observa que el viento promedio en la zona, se ve disminuido, en las cercanías de los paneles fotovoltaicos centrales debido al efecto de los paneles fotovoltaicos anteriores.
- Las líneas de corriente del viento mantienen una forma continua y similar mientras se avanza en la línea de los paneles fotovoltaicos, con lo que se puede proyectar que los resultados para un mayor número de paneles sería similares.

Las conclusiones para las variaciones de área del disipador de calor son las siguientes:

- Las simulaciones de la variación de área del disipador de calor muestran que al crecer el área de intercambio, la transferencia de calor será mayor independiente de cómo se cambie el área, a mayor área mayor transferencia de calor.
- Al variar de manera horizontal el área del disipador de calor se obtiene una mejor transferencia de calor que al variar de manera vertical, aunque las dos variaciones llegan a la misma área, se observa una mejor transferencia de calor al variar horizontalmente el área que al variar verticalmente, debido a la forma de enfrentar el viento.

Finalmente la conclusión para la variación del número de aletas es:

- En las simulaciones del número de aletas, se puede observar un comportamiento polinómico, que se propone cuadrático, con lo que se puede observar un máximo en 222 aletas.
- Finalmente, el disipador de calor buscado es de geometría triangular rectangular, de espesor de 3 milímetros y de 222 aletas paralelas.

Las recomendaciones para futuros trabajos a realizarse en el mismo campo que este, se pueden identificar en:

- Continuar la búsqueda de un disipador de calor que favorezca la disminución de temperatura de trabajo de los paneles fotovoltaicos, pero en diferencia con el trabajo realizado en esta memoria, buscando una uniformidad en la temperatura en todo el panel, además de mantener las condiciones de inclinación y cambios en el viento realizados en este trabajo, dado que estos cambios se acercan aún más a la realidad.
- Tratar de corroborar el número de aletas encontrado en este trabajo, dado que computacionalmente es difícil, sería de más ayuda una corroboración experimental
- Del mismo modo que el punto anterior, para poder corroborar experimentalmente los trabajos realizados tanto por el señor Sebastián Maggi y por Claudio Carrasco.

7 Bibliografía

- Chuanjin Lan, L. J. (s.f.). Wall effect on separate flow around an inclined flat plane at high incidence. *IMECE2013*.
- H.G.Teo, P. L. (2010). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*.
- John A.Duffie, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*.
- Jong Pil Kim, H. L. (2010). Numerical analysis on the thermal characteristics of photovoltaic module with ambient temperature variation. *Solar Energy Materials & Solar Cells*.
- K.R. Ullah, R. H. (2013). A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Lee, H. (2010). *Thermal Design: Heat Sink, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*.
- Maggi Silva, S. (2013). Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile. Santiago, Chile.
- Mohd Nazari Abu Bakar, M. O. (2013). Design concept and mathematical model of bi-fluid photovoltaic/thermal solar collection. Malasia.
- Sabir Rustemli, F. D. (2012). The analysis on sun tracking and cooling system for photovoltaic panels. Turquía.
- Tood Otanicar, R. A. (2011). Prospects for solar cooling-An economic and environmental assessment. *Solar Energy*.
- Y.L. Tsay, J. C. (2011). Characteristics of heat dissipation from photovoltaic cells on the bottom wall of a horizontal cabinet to ambient natural convective air stream. *Energy*.
- Y.N. Wang, T. L. (2012). Numerical investigation of high-concentration of photovoltaic module heat dissipation. *Renewable Energy*.