



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

MODELAMIENTO TÉRMICO DE UNA GRANJA SOLAR FOTOVOLTAICA DESDE LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS CIBERFÍSICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

RODRIGO NICOLÁS CORDERO PÉREZ

PROFESOR GUÍA:

WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

BENJAMÍN HERRMANN

JOSEFA IBACETA JAÑA

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

POR: RODRIGO N. CORDERO P.

PROF GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN

MODELAMIENTO TÉRMICO DE UNA GRANJA SOLAR FOTOVOLTAICA DESDE LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS CIBERFÍSICOS

La crisis mundial medioambiental actual ha llevado a diversas naciones a masificar el uso de energías renovables no convencionales – como la solar – con tal de purificar su matriz energética.

Los gradientes de temperatura entre las distintas celdas que conforman un módulo fotovoltaico, provocan ineficiencias en el comportamiento, debido a que se produce un efecto denominado “dispersión de parámetros”. Lo anterior, se traduce en un perjuicio en la potencia de salida y del rendimiento, luego es necesario disminuir la temperatura de operación de las celdas.

El objetivo de la presente memoria es definir el comportamiento de la temperatura al interior de la granja solar en función de la radiación incidente, pérdidas por radiación, convección y conducción, tras variar parámetros atmosféricos, como velocidad del viento y temperatura ambiente, además de parámetros geométricos, como el distanciamiento entre paneles. Tras determinar los parámetros anteriores, se procede a simular el modelo planteado en el software ANSYS FLUENT 18.1 para posteriormente realizar el análisis térmico transiente del panel fotovoltaico. Finalmente se encuentran relaciones para poder determinar la temperatura más elevada en las celdas y el distanciamiento promedio que debe tener una granja con tal de optimizar la eficiencia de esta, así poder tener inputs para un posterior desarrollo de un sistema ciberfísico.

La simulación consiste en sólo una fila de 30 paneles de una granja fotovoltaica, cada panel de la marca Hareon genera 320 W por ende la cantidad evaluada generaría en condiciones óptimas 9,6 kW lo que se considera aceptable para una fila de paneles. La metodología ocupada es la siguiente: a) se realizan simulaciones para distintos casos hipotéticos de funcionamiento y distribución de los paneles en el modelo; b) se analizan que los parámetros de coeficiente de arrastre y de sustentación sean acordes a la bibliografía, así como encontrar un mallado adecuado que logre validar el modelo; c) se estudia el efecto de las variables climáticas y de la posición de los paneles en la temperatura del arreglo; d) se define una ecuación que optimice la eficiencia del arreglo sirviendo como input para el desarrollo de un posterior sistema ciberfísico.

Los resultados obtenidos demuestran la importancia que tiene la temperatura ambiente o de ráfaga en el enfriamiento de los paneles, obteniendo que una diferencia de 4°C signifique un cambio de hasta 2% en la eficiencia de la granja solar. Además, se logra encontrar una relación que permite determinar el distanciamiento eficiente en una granja en función de su eficiencia y con parámetros atmosféricos extremos, obteniendo un máximo de 13% con un distanciamiento mínimo de 0,975 m entre paneles.

Agradecimientos

Agradezco a la ciudad que me vio crecer, mi querido Chillán, la cual ha sido una forjadora de carácter y espiritualidad, enseñándome a apreciar las cosas simples de la vida y al mismo tiempo entendiendo que nacen de una complejidad inherente a su belleza.

Una de mis frases favoritas es “*militia est vita hominis super terram*”, “la vida del hombre en la tierra siempre es lucha”. Fueron mis padres, en quienes observé esta lucha, inculcándome el valor de luchar por mis sueños y derechos, a no darme por vencido, demostrando que con determinación, tesón e inteligencia se puede salir de los problemas más asfixiantes. Pese a no siempre estar de acuerdo en puntos importantes de la vida, siempre han sido un apoyo incondicional desde pequeño, gracias.

Les doy las gracias a mis tíos y tías que siempre preguntaron por mí y a mis amigos y amigas que sin pedírselo eran capaces de generarme una sonrisa en momentos de dificultades que enfrentaba en silencio en la Universidad. No creo que haya una manera de poder expresar la gratitud que siento por haber soportado mi inexpresivo silencio en respuesta a los problemas que enfrentaba.

Les ofrezco tributo y admiración a OIKOS, que mucho más que grupo, pasó a formar parte de mi familia. Una familia muchas veces vista como hippie, que eran tan “volados” que desarrollaron proyectos que no tienen nada que envidiar a la mejor postulación CORFO, todo esto mientras aún estaban en la universidad.

Nunca podré dedicarle suficientes palabras o brindar el respeto necesario a quien para mí ha sido la representación viva de la “Pacha Mama”, Camila, quien fue un bastión en mis momentos más oscuros y felices, con quien trabajamos palmo a palmo levantando la sustentabilidad en Beauchef siendo miembros fundadores de una de las comisiones más prolíferas de la facultad, la Comisión de estudiantes por la sustentabilidad. Pese a que tomamos rumbos distintos, tengo plena confianza de que aún transitaremos en la calle de la sostenibilidad.

Quisiera dar las gracias a Patricio Jorquera, Viviana Meruane, Williams Calderón, Felipe Díaz, Rosa Leal, Benjamín Herrmann, Josefa Ibaceta y Claudia Mac-Lean, que nunca dejaron de creer en mí y formaron parte importante de mi formación académica y humana. Comprendo que debo agradecer a mucha gente más, pero éstas saben quiénes son pues se las he dado de manera personal.

Finalmente, darle las gracias: a mi hermana Magdalena, quien ha tenido que soportar mi desorden; a Param, quien durante el último año con sus sonrisas, paciencia y amor, ha sido mi mayor fuente de alegría y energía para enfrentar los desafíos emprendidos en paralelo; y a Fundación Chile, en particular a Andrea Cino, quien pese a yo no tener experiencia ha apostado por mí y además, pese a lo apretada de la agenda que se debe cumplir, ha sido de mucho apoyo para que pueda terminar esta memoria.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	i
1.1	Antecedentes Generales	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos específicos:	3
1.3	Alcances	3
2	Metodología.....	4
3	Antecedentes específicos	5
3.1	Elementos que integran un panel fotovoltaico	5
3.2	Cálculo de la distancia mínima entre paneles según Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA)	6
3.2.1	Cálculo de la distancia mínima en superficies inclinadas.....	6
3.3	Efecto de la temperatura en la eficiencia	7
3.3.1	Eficiencia.....	8
3.3.2	Potencia de salida	8
3.4	Transferencia de calor.....	9
3.4.1	Conducción.....	9
3.4.2	Convección.....	9
3.4.3	Radiación.....	14
3.5	Modelamiento	15
3.6	Simulación de la granja solar	16
3.7	Parámetros atmosféricos y propiedades de los paneles	20
3.7.1	Configuración 1:	20
3.7.2	Configuración 2:	21
3.7.3	Configuración 3:	22
3.7.4	Configuración 4:	22
3.8	Análisis económico para la configuración 1 y 2.....	23
4	Resultados	24
4.1	Resultados Simulación Granja Solar	24

4.2	Resultados térmicos	25
4.2.1	Configuración 1:	25
4.2.2	Configuración 2:	25
4.2.3	Configuración 3:	26
4.2.4	Configuración 4:	27
5	Análisis de resultados	41
5.1	Simulación de la granja solar	41
5.2	Configuración 1	41
5.3	Configuración 2	41
5.4	Configuración 3	41
5.5	Configuración 4	41
6	Conclusiones y recomendaciones	43
7	Bibliografía.....	45

Índice de Tablas

Tabla 1 Valores trabajo de Chuanjin Lan (10)	20
Tabla 2 Valores de simulación granja solar	20
Tabla 3. Características atmosféricas y georeferenciales comunes a todas las configuraciones.	20
Tabla 4. Características del panel para configuración 1	21
Tabla 5. Condiciones atmosféricas para configuración 1 y 2.....	21
Tabla 6 Características del panel para configuración 2	21
Tabla 7. Condiciones atmosféricas para configuración 3.	22
Tabla 8. Distanciamiento entre paneles 16, 17 y 18.	22
Tabla 9. Resultados termodinámicos para Configuración 1.....	25
Tabla 10. Resultados termodinámicos para Configuración 2.....	26
Tabla 11. Resultados termodinámicos Configuración 3.	27
Tabla 12. Resultados termodinámicos para todos los paneles de la Configuración 2.	27
Tabla 13. Resultados térmicos y dinámicos Configuración 4.	33
Tabla 14. Resultados temperatura panel según distancia entre paneles.....	33
Tabla 15. Resultados temperatura panel según velocidad de entrada a paneles	35
Tabla 16. Resultados temperatura panel según variación en temperatura ambiente.	36
Tabla 17. Errores ajustes polinómicos	37
Tabla 18. Errores ajustes polinómicos	38
Tabla 19. Errores ajustes polinómicos	38
Tabla 20. Porcentaje de error asociado a Ec. 4.14.....	39
Tabla 21. Porcentaje de error asociado a Ec. 4.14 para valores de T viento sobre 302 K y Ec. 4.8 bajo 30	39

Índice de Ilustraciones

Figura 3.1: Efecto de la temperatura en los parámetros de la celda (2)	8
Figura 3.2. Convección natural en placa vertical(5)	13
Figura 3.3: Interacción de la energía incidente con un panel i de una granja (Fuente: Elaboración propia modificado de (4).	15
Figura 3.4: Modelo térmico de un panel fotovoltaico(4)	16
Figura 3.5. Configuración simulación campo solar	17
Figura 3.6. Configuración simulación del granja solar. Vista en detalle 1 panel solar.	17
Figura 3.7. Procedimiento para calcular puntos de Temperatura y Velocidad en Configuración 4.	18
Figura 3.8. Gráfico número de elementos vs temperatura crítica del panel N° 17,	18
Figura 3.9. Malla granja solar.....	19
Figura 3.10. Malla granja solar. Vista en detalle de tres paneles.	19
Figura 3.11. Calidad del mallado.....	19
Figura 4.1. Temperatura para el sistema de paneles.	24
Figura 4.2. Velocidad x para el sistema de paneles.	24
Figura 4.3. Velocidad en x en la cercanía del panel N° 17. Vorticidad.....	24
Figura 4.4. Temperatura en panel N°17 para Configuración 2.	29
Figura 4.5 Temperatura en panel N°17 para Configuración 2. Aproximación del centro... ..	29
Figura 4.6. Perfil de Velocidad en X en panel N°17 para Configuración 2.....	30
Figura 4.7. Temperatura en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 1 m de separación.....	30
Figura 4.8. Perfil de Velocidad en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 1 m de separación.	31
Figura 4.9. Temperatura en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 0,6 m de separación.....	31
Figura 4.10. Temperatura en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 0,3 m de separación.....	32
Figura 4.11. Vórtice formado en proximidad del panel 17 para Configuración 4 con 0,3 m de separación.	32

1 Introducción

1.1 Antecedentes Generales

Dadas las condiciones ambientales actuales, ya no es posible hablar de un desarrollo humano como el de la revolución industrial, es necesario entender de que la especie humana no vive sola en el planeta, además, hay que pensar en las futuras generaciones. Por lo tanto, es vital utilizar los recursos de una manera eficiente y consciente, para preservar la Tierra y dejar un futuro a las generaciones venideras, es decir, impulsar un desarrollo sostenible. No obstante, es fundamental cuestionar como se sustentará este desarrollo, en el Informe sobre Desarrollo Humano 2015¹ se aprecia con claridad que el desarrollo energético presenta una curva exponencial frente al índice de desarrollo humano, por ende, la generación de energía es vital en este punto.

La incorporación de fuentes de Energía Renovable No Convencionales (ERNC) en la matriz eléctrica chilena, ha tomado más fuerza durante los últimos años, en particular la solar. El año 2015 la capacidad instalada fue de 17,028 MW, donde un 4,56% corresponde a solar fotovoltaica², además, el norte de Chile posee la facultad para producir cerca de 2000 KWh/m² al año dada la intensa radiación solar de ese sector. El potencial de desarrollo en esta tecnología es abismal pero con muchas tareas que realizar, una de estas es realizar un estudio sobre cómo las condiciones únicas e intrínsecas del país – como el calor y polvo excesivo del norte – afectan el rendimiento de una granja solar fotovoltaica, y dar soluciones a estas.

En la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile se ha trabajado en diversas memorias y tesis acerca de cómo mejorar el rendimiento de un panel fotovoltaico, sin embargo, no se ha estudiado bajo la mirada de un sistema complejo. Este último punto se asocia a la perspectiva de un sistema ciberfísico. En la figura 1.1 se puede observar un esquema simple de cómo funcionan estos sistemas: un controlador (sistema cibernético) recibe información (un estímulo) proveniente de sensores, y es capaz de procesar la data verificando que para ciertas condiciones es necesario incitar una reacción en, este caso, una granja solar (sistema físico).

El rendimiento de un panel fotovoltaico es la razón entre la potencia eléctrica de salida y la radiación incidente del sol. Actualmente el rendimiento promedio de un panel fotovoltaico policristalino es aproximadamente de un 20%(1), este valor disminuye a medida que aumenta la temperatura en la celda, esto es, mientras mayor sea la temperatura en la celda, menor será el rendimiento alcanzado. Una estrategia para inducir el aumento de rendimiento en la celda es la de reducir su temperatura de trabajo. Es por estas razones que resulta fundamental conocer y controlar la temperatura dentro de una celda fotovoltaica en función de las condiciones en las que funciona.

Otro tema importante es la falta de claridad científica a la hora de instalar un arreglo de paneles solares. La distancia entre paneles está definida de manera geométrica con tal de

¹ Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), “Informe sobre Desarrollo Humano 2015”.

² Comisión Nacional de Energía, “Capacidad Instalada”, <http://energiaabierta.cl>

no causar sombra en el panel que lo antecede, sin embargo, no está estudiado el efecto térmico que un panel aporta a su vecino.

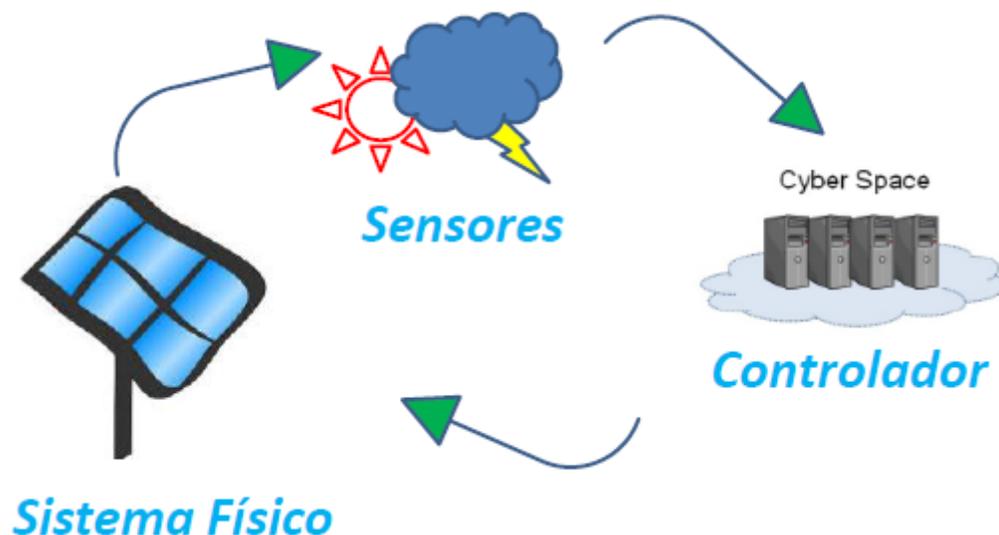


Figura 1.1: Esquema general Sistema Ciberfísico. (Elaboración propia),

La motivación principal para realizar este estudio, es la de poder caracterizar la temperatura al interior de una granja fotovoltaica, con el fin de entregar una herramienta de cálculo rápido que sirva para optimizar el diseño de una granja fotovoltaica en Chile que tome en cuenta las variaciones de los parámetros de operación en un día. Para ello se elige el día 28 de enero y se considera la locación de San Pedro de Atacama que presenta las condiciones de mayor temperatura en verano³ y al mismo tiempo de mayor velocidad de viento⁴.

³ Explorador de Energía Solar, Herramienta Computacional, DGF, Universidad de Chile.

<http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>

⁴ <http://agromet.inia.cl/estaciones.php>

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar el desempeño térmico de una granja fotovoltaica usando como base un modelo transiente unidimensional y simulaciones CFD.

1.2.2 Objetivos específicos:

Los objetivos específicos son:

- Determinar el efecto del distanciamiento entre paneles de la granja en la eficiencia entregando dos gráficos: distancia de paneles vs temperatura de la granja y distancia de paneles vs eficiencia de la granja.
- Utilizando condiciones extremas determinar cómo la velocidad del viento y temperatura ambiente afectan en el enfriamiento de la granja entregando un gráfico velocidad del viento vs temperatura de la granja, usando una temperatura ambiente constante.
- Evaluando tanto las condiciones atmosféricas como de distribución entre los paneles de la granja plantear una relación que sirva como insumo técnico en el desarrollo de un sistema ciberfísico para mejorar la eficiencia de la granja.

1.3 Alcances

Este estudio contempla el análisis de un modelo térmico unidimensional y transiente de un panel solar para una implementación en una granja considerando las siguientes condiciones de operación: temperatura, parámetros atmosféricos y dinámicos del viento y radiación. Se incluye la validación del modelo planteado en base a datos obtenidos de paneles fotovoltaicos ya instalados además de la comparación de modelos ya reportados en la literatura. Este trabajo contempla el estudio del efecto de las variables climáticas sobre la temperatura de la granja, además de la evaluación del diseño y alteración de parámetros (cómo ángulo incidente) con tal de optimizar un arreglo fotovoltaico. Finalmente servir como punto de partida para lograr mejorar la respuesta de la granja ante ciertos parámetros caracterizados para distintas zonas de Chile desde la perspectiva de sistemas ciberfísicos.

2 Metodología

Se utilizará la siguiente metodología.

1. Revisión de antecedentes.
2. Planteamiento del modelo, validación del modelo en un arreglo de 2 paneles y adaptación a lo requerido.
3. Adaptación del modelo a un arreglo de 30 paneles.
 - Ajustar parámetros para una modelo de 30 paneles.
 - Verificar si existe una diferencia sustancial entre los coeficientes convectivos de cada panel de la granja para una simulación base. De encontrar una diferencia significativa se procederá a iterar. De no encontrar una diferencia significativa se procede al siguiente paso.
 - Simular para distintas distancias de separación de panel, distintas velocidades de viento, distintas temperaturas y diferentes configuraciones de los paneles.
4. Determinar diseño de la granja para lograr una optimización de la eficiencia utilizando lo ya mencionado. Entregando gráficos de: distancia de los paneles vs temperatura de la granja, distancia de paneles vs eficiencia de la granja y velocidad del viento vs temperatura de la granja.
5. Proponer una solución para lograr optimizar la eficiencia de una granja de paneles sentando las bases para un sistema ciberfísico.

3 Antecedentes específicos

3.1 Elementos que integran un panel fotovoltaico

Con el fin de asegurar una gran vida útil de las celdas, estas tienen que estar protegidas de las condiciones medioambientales en las cuales va a operar. La humedad puede oxidar los contactos de metal y afectar la superficie anti-reflectante del panel, lo que conlleva a un menor desempeño de la celda. Los elementos que integran un panel fotovoltaico son:

Vidrio templado: Tiene como función la de proteger los materiales al interior de la celda y además de servir de filtro de radiación, dejando fuera a gran parte de la radiación UV. Es un vidrio templado de baja reflectividad lo que permite absorber la luz a diferencia de los vidrios utilizados comúnmente en las casas.

Celdas fotovoltaicas (PV): Son obleas de silicio policristalino o monocristalino.

Capa de EVA: Las celdas de silicio son encapsuladas en una capa de EVA para fijar las celdas fotovoltaicas a la cubierta de vidrio y al material de encapsulamiento en la parte de atrás para así proporcionar resistencia a la humedad y aislación eléctrica.

Capa polimérica de Tedlar: Esta capa está hecha de fluoruro de polivinilo (PVF) y tiene como función la de proporcionar un aislamiento adicional y protección contra la humedad a las celdas PV.

En la Figura 3.1 se puede observar la composición estándar de los paneles fotovoltaicos

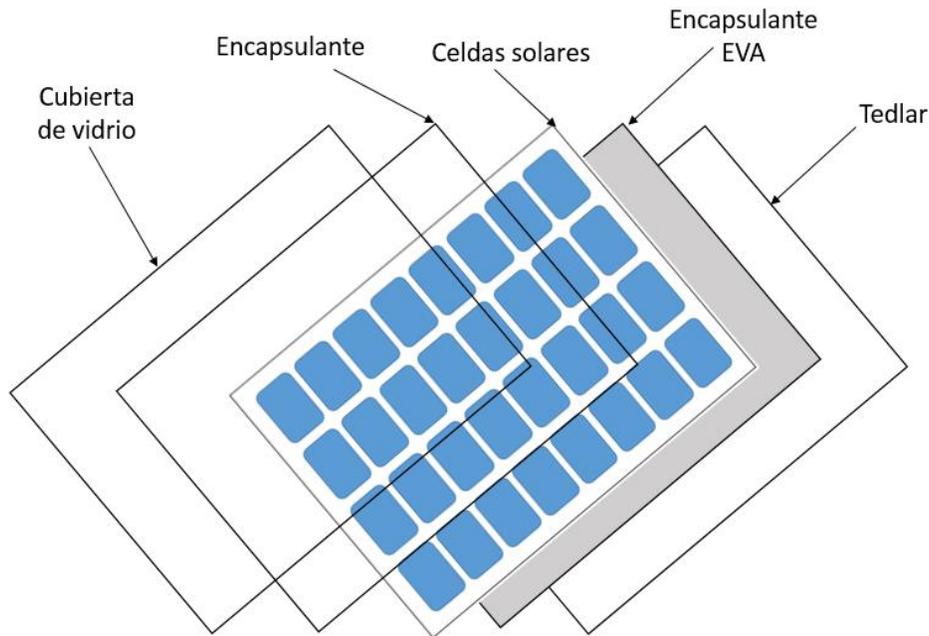


Figura 3.1: Elementos de un módulo fotovoltaico. (Fuente: [4])

3.2 Cálculo de la distancia mínima entre paneles según Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA)

El IDEA en su Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red, establece una fórmula sencilla para calcular la distancia mínima. Según éste, la distancia mínima deberá garantizar un mínimo de 4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno. La distancia mínima “d” deberá ser superior al valor obtenido por la Ec. 3.1:

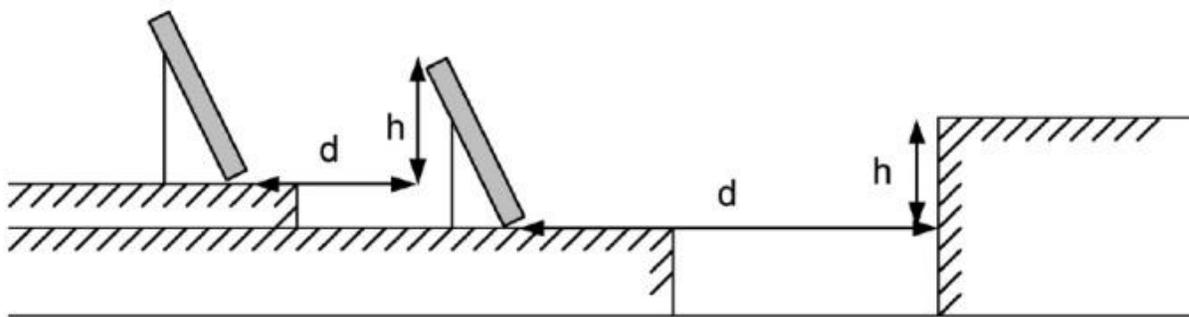


Figura 3.2: Distancia mínima entre paneles solares fotovoltaicos⁵

$$d = \frac{h}{\operatorname{tg}(61^\circ - \phi)} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

- h = la altura de la placa respecto a la horizontal.
- ϕ = Latitud del lugar.
- d = distancia mínima.

Sólo es válida para superficies planas u horizontales y cuyo azimut no difiera mucho de 0° .

3.2.1 Cálculo de la distancia mínima en superficies inclinadas.

A continuación se puede observar en la Figura 3.4Ec. 3.3 la representación geométrica de placas fotovoltaicas continuas, la cual es descrita por la Ec. 3.2.

⁵ Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). <http://www.idae.es>

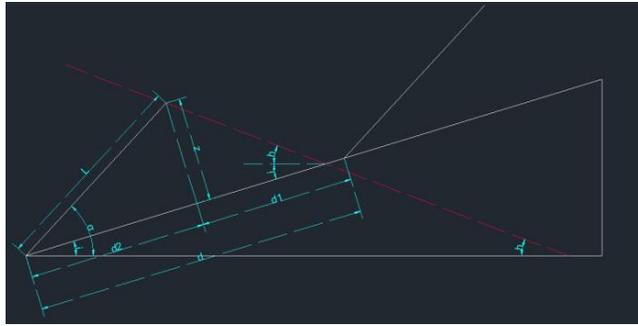


Figura 3.3: Representación geométrica de un Panel inclinado⁶

$$d = 1,25 * (d_1 \cdot d_2) \cdot 1,25 \cdot L \cdot \left(\frac{\text{sen}(\alpha - i)}{\text{tg}(h - i)} \cdot \cos(\alpha - i) \right) \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

- L = longitud de la placa
- α = inclinación óptima de la placa respecto a la horizontal.
- i = inclinación de la superficie.
- h = altura solar.
- d = es la distancia mínima para que no se proyecten sombras en el día más desfavorable del mes.

La altura h depende de la latitud del lugar y la declinación solar. Ésta se calcula mediante la Ec. 3.3.

$$h = (90^\circ \cdot \phi \cdot \delta) \quad \text{Ec. 3.3}$$

Siendo:

- ϕ = latitud del lugar
- δ = declinación solar.

3.3 Efecto de la temperatura en la eficiencia

Las celdas solares solamente convierten una pequeña porción de la radiación incidente en electricidad, el resto es disipado en forma de calor lo que se traduce en un aumento de temperatura de la celda. El calor reduce la brecha de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia, aumenta la energía absorbida, lo que se traduce en un aumento de la corriente de cortocircuito. El calentamiento de la celda tiene un efecto perjudicial sobre el voltaje de circuito abierto.

Existen muchos parámetros que son afectados con el aumento de la temperatura de la celda, por lo que es difícil caracterizar el efecto neto del aumento de la temperatura. Sin embargo, se puede simular computacionalmente el efecto de la temperatura en los parámetros mencionados anteriormente (FF, I_{sc} y V_{oc}). Con el aumento de la temperatura,

⁶ Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). <http://www.idae.es>

I_{sc} aumenta linealmente y V_{oc} decrece linealmente, lo que se traduce en un decaimiento de la eficiencia de conversión como se muestra en la Figura 3.1.

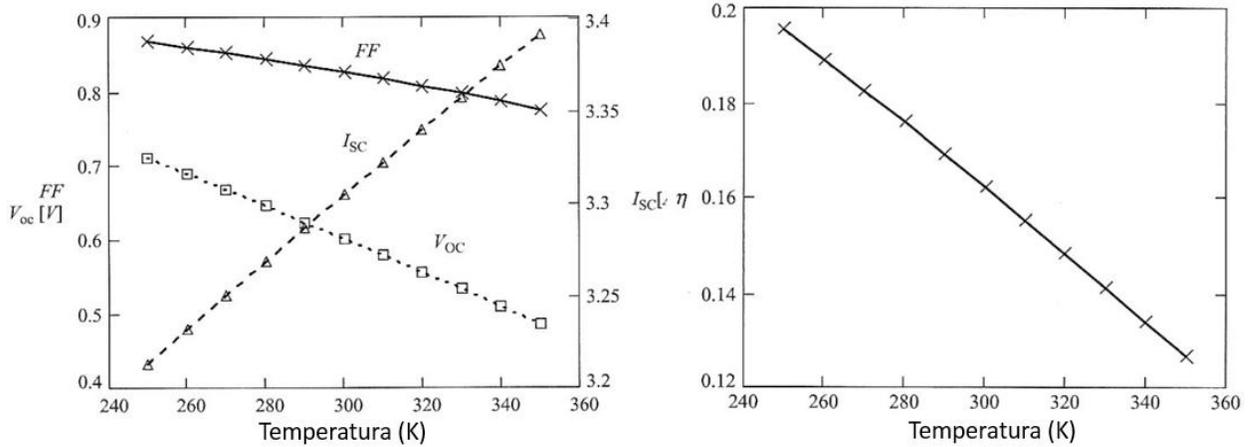


Figura 3.1: Efecto de la temperatura en los parámetros de la celda (2)

3.3.1 Eficiencia

La eficiencia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada. La máxima potencia de salida alcanzable de una celda es p_m y la potencia de entrada es la potencia entregada por la radiación solar p_{rad} . Generalmente los fabricantes entregan los datos de eficiencia de referencia del módulo fotovoltaico en condiciones STC (Standard Test Conditions), es decir, a 1000 W/m^2 , 25°C y AM 1,5. La eficiencia de la celda es baja debido a una serie de pérdidas definidas anteriormente. La eficiencia de referencia se puede expresar como se muestra en la Ec. 3.4.

$$\eta_{ref} = \frac{p_m}{p_{rad}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.3.2 Potencia de salida

El flujo de salida corresponde a la potencia eléctrica de salida producida por las celdas fotovoltaicas. Esta potencia se puede estimar como se aprecia en la Ec. 3.5.

$$P_{PV} = \eta \phi_{solar} A \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde ϕ_{solar} es la radiación incidente en la celda, A es el área en la que incide la radiación y η es la eficiencia eléctrica de la celda. Esta eficiencia depende de la temperatura de operación de la celda y de la radiación incidente según se muestra en la Ec. 3.6 Ec. 3.10 (3).

$$\eta = \eta_{ref} [1 + \gamma(T_{PV} - T_{ref}) + \phi \text{Log}_{10} \phi_{solar}] \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde T_{PV} es la temperatura de la celda, η_{ref} es la eficiencia eléctrica medida en condiciones STC. Esto es a una temperatura ambiente de 25°C (T_{ref}), con una radiación incidente de 1000W/m², y a condiciones de masa de aire AM 1,5. Usualmente se considera que el último parámetro (φ) no influye considerablemente en el desempeño de la celda por lo que se considera nulo ($\varphi = 0$).

El término γ (Ec. 3.7) representa la variación del punto de máxima potencia con la temperatura y usualmente este valor es entregado por el fabricante.

$$\gamma = \frac{\partial P_{mpp}}{\partial T} = \frac{\partial \eta}{\partial T} \quad \text{Ec. 3.7}$$

3.4 Transferencia de calor

Para analizar el comportamiento de la temperatura al interior del panel fotovoltaico es necesario conocer los mecanismos de transferencia de calor entre unas capas y otras y del panel con el medio ambiente. Los tres tipos de mecanismos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación (4).

3.4.1 Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor que ocurre en un sólido o en un fluido que están en reposo, cuando entran en contacto con otro que está a una temperatura distinta. Esta transferencia de calor se realiza a escala microscópica cuando los movimientos de rotación y vibración de las moléculas del cuerpo producen y traspasan su energía a otro cuerpo de menor temperatura.

El flujo de calor por conducción (Ec. 3.8) es proporcional al gradiente de la temperatura y la conductividad térmica del material, esta relación se conoce como Ley de Fourier.

$$\dot{q} = -k\nabla T \quad \text{Ec. 3.8}$$

Donde:

k : Conductividad térmica (W/mK)

\dot{q} : Flujo de calor por unidad de tiempo y área (W/m²)

3.4.2 Convección

Este mecanismo corresponde al de transferencia de calor dentro de un fluido (líquido o gaseoso) que ocurre por la mezcla entre porciones de fluidos a distinta temperatura. La convección se produce por movimiento macroscópico del fluido que

produce un campo de velocidades en éste. La transferencia de calor por convección se expresa en la ley de enfriamiento de Newton como en la Ec. 3.9.

$$\dot{q} = h\Delta T \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde:

h : Coeficiente convectivo ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

ΔT : Diferencia de temperatura entre el cuerpo y su entorno ($^{\circ}\text{C}$)

El valor del coeficiente convectivo depende de la situación en la que se esté realizando la transferencia de calor. Puede ser convección forzada causada por fuentes de energía externa o convección natural causada por empuje en el interior del fluido. El mecanismo de transferencia de calor por convección en el modelo está presente en la parte frontal y trasera del panel (contacto entre el panel y el aire).

Para saber qué tipo de convección domina la transferencia de calor con el aire, se definen una serie de números adimensionales que permiten caracterizar el comportamiento del flujo del aire que pasa por el panel.

Numero de Reynolds

Este número representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas del fluido y depende de la configuración geométrica de la superficie, la aspereza superficial, la velocidad del flujo y el tipo de fluido. Este número se expresa como se aprecia en la Ec. 3.10.

$$Re = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido (Kg/m^3)

V es la velocidad del fluido (m/s)

L_c es la longitud característica que en nuestro caso es el largo de la placa (m)

μ es la viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

El número de Reynolds nos puede ayudar a distinguir si nos encontramos en presencia de un flujo laminar o un flujo turbulento. Para placas planas se habla que el flujo es laminar cuando $Re \leq 5 \times 10^5$ y de flujo turbulento cuando $Re > 5 \times 10^5$ en placas planas.

Número de Prandtl

Este número ayuda a describir el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica. Se define como el cociente entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor. Si el número de Prandtl es bajo significa que predomina la transferencia de calor por conducción; si es grande la difusión por movimiento es mayor, por lo que predomina la transferencia de calor por convección.

El número de Prandtl se determina como se aprecia en la Ec. 3.11.

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\mu C_p}{k} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Donde:

C_p es la capacidad calorífica

k la conductividad térmica

Número de Grashof

Este es un número adimensional que se utiliza en mecánica de fluidos para representar la razón entre la fuerza de empuje y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido. Este número proporciona el criterio principal en la determinación de si el flujo del fluido es laminar o turbulento en la convección natural. Por ejemplo, para las placas verticales se observa que el número crítico de Grashof es alrededor de 10^9 .

El número de Grashof se determina como se muestra en la Ec. 3.12.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Donde:

g : Aceleración gravitacional en m/s^2 ($9,8m/s^2$)

β : Coeficiente de expansión volumétrica, $1/K$ ($\beta=1/T$ para los gases ideales)

T_s : Temperatura de la superficie, $^\circ C$

T_∞ : Temperatura del fluido lejos de la superficie, $^\circ C$

L_c : Longitud característica de la configuración geométrica, m

ν : Viscosidad cinemática del fluido, m^2/s

La multiplicación del número de Prandtl con el número de Grashof da lugar al número de Rayleigh, que se determina como se muestra en la Ec. 3.13.

$$Ra_L = Gr_L Pr \quad \text{Ec. 3.13}$$

Número de Nusselt

Este número de cuenta la relación entre la transferencia de calor por convección con respecto a la conducción. Entre mayor será el número de Nusselt, más eficaz será la convección. El número de Nusselt se expresa como en la Ec. 3.14.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \text{Ec. 3.14}$$
$$h_{free} = \frac{kNu}{L}$$

3.4.2.1 Convección Forzada

El número de Nusselt para una configuración geométrica dada se puede expresar en términos del número de Reynolds (Re), el número de Prandtl (Pr). A menudo, los datos experimentales para la transferencia de calor se presentan con una precisión razonable mediante una simple relación de la ley de las potencias, apreciable en la Ec. 3.15.

$$Nu = CRe_L^m Pr^n \quad \text{Ec. 3.15}$$

El Nusselt promedio sobre una placa horizontal expuesta a convección forzada se puede expresar como (5). Ambos casos se determinan en la Ec. 3.16 y Ec. 3.17, respectivamente.

$$\text{Laminar:} \quad \overline{Nu} = \frac{hL}{k} = 0,664Re_L^{0,5} Pr^{1/3} \quad Re_L < 5 \times 10^5 \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$\text{Turbulento:} \quad \overline{Nu} = \frac{hL}{k} = 0,037Re_L^{0,8} Pr^{1/3} \quad \begin{matrix} 0,6 \leq Pr \leq 60 \\ 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \end{matrix} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Los valores anteriores fueron obtenidos experimentalmente en condiciones controladas en túnel de viento, a menudo no representan las condiciones reales de funcionamiento de una placa horizontal expuesta a viento. Normalmente el Nusselt es mayor debido a factores externos como por ejemplo turbulencias en el flujo de aire producidas por los bordes del panel y/u otros elementos fuera del panel como pueden ser árboles, etc.

Existen numerosas investigaciones que se han encargado de investigar el efecto del viento en el panel fotovoltaico en condiciones reales de funcionamiento. Para este trabajo se utilizará la relación dada por Test (6) que predice el coeficiente convectivo dado por la convección forzada mostrada en la Ec. 3.18.

$$h_{forced} = 2,56w + 8,55 \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde w es la velocidad del viento en m/s.

3.4.2.2 Convección natural

El mecanismo de transferencia de calor con el ambiente a través de convección natural se da cuando no existe velocidad del fluido como en caso de convección forzada. Esta transferencia de calor se produce por gradientes de densidad del fluido, producidos por diferencias de temperatura, que producen una fuerza de empuje que induce corrientes de convección. Como estas corrientes producidas por cambios de densidad son muy pequeñas en comparación con la convección forzada, el coeficiente de transferencia de calor también es pequeño.

Para una superficie vertical expuesta a un fluido inactivo (velocidad nula) de temperatura T_∞ como se observa en la Figura 3.2, el Número de Nusselt depende de los números adimensionales de Prandtl y Rayleigh como se muestra en la Ec. 3.19.

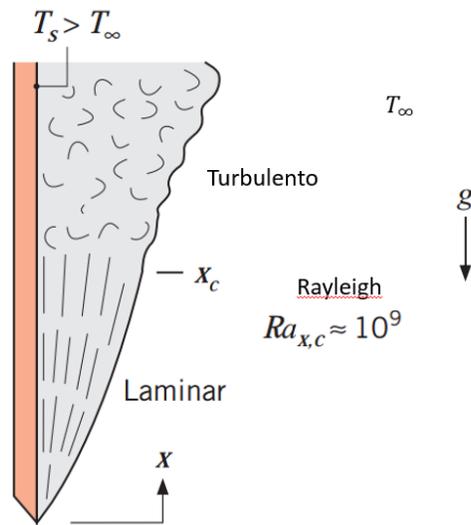


Figura 3.2. Convección natural en placa vertical(5)

$$\overline{Nu} = \left[0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right] \quad \text{Ec. 3.19}$$

Se puede demostrar que para una superficie plana inclinada en un ángulo θ con respecto a la vertical, el número de Nusselt es el mismo dado en la Ec. 3.19, con la salvedad de que el término de la aceleración de gravedad dada en el número de Grashof (Ec. 3.12) cambia de g a $g \cos\theta$.

Como se puede ver el cálculo del coeficiente convección natural puede ser un proceso tedioso y complicado, pues como se puede ver en la Ec. 3.19 el número de Nusselt depende del número de Rayleigh y este a la vez depende de la temperatura de la superficie. Por lo que para encontrar el valor correcto del coeficiente convectivo requiere de iteración hasta cumplir con la ecuación de calor.

Se puede aproximar una expresión para el número de Nusselt de la superficie superior de un panel fotovoltaico inclinado en un ángulo θ con la vertical(7) según la Ec. 3.20.

$$\overline{Nu} = 0,14[(GrPr)^{1/3} - (Gr_{cr}Pr)^{1/3}] + 0,56(Gr_{cr}Pr\cos\theta)^{1/4} \quad \text{Ec. 3.20}$$

Para $10^{-5} < GrPr\cos\theta < 10^{11}$ y $15^\circ < \theta < 75^\circ$. El Gr_{cr} corresponde al valor para el cual el número de Nusselt comienza a desviarse de su comportamiento laminar. Para valores de θ igual 15° , 30° , 60° y 70° , el número de Gr_{cr} es aproximadamente 5×10^9 , 2×10^9 , 10^8 y 10^6 respectivamente (7).

Para superficies inclinadas planas que están mirando hacia abajo, la expresión de la ecuación Ec. 3.20 cambia a la expresión dada en la Ec. 3.21(7).

$$\overline{Nu} = 0,56(Gr \cdot Pr \cos\theta)^{1/4} \quad \text{Ec. 3.21}$$

Para $10^5 < Gr \cdot Pr \cos\theta < 10^{11}$ y $\theta < 88^\circ$.

El coeficiente de convección efectivo para la parte frontal del panel fotovoltaico viene dado por la combinación de la convección forzada y la convección natural. Esta combinación se estima como se ve en la Ec. 3.22(8).

$$h_{front} = \sqrt[3]{h_{forced}^3 + h_{free}^3} \quad \text{Ec. 3.22}$$

3.4.3 Radiación

Este mecanismo corresponde a la transferencia de calor de las ondas electromagnéticas propagándose a través de un medio transparente como el aire o el vacío. El intercambio de calor entre dos cuerpos por radiación se puede expresar como se aprecia en la Ec. 3.23.

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Ec. 3.23}$$

Donde:

ε : Emisividad del cuerpo 1

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K}$)

T_1 y T_2 : Temperatura de los cuerpos 1 y 2 respectivamente (K)

En muchas aplicaciones de transferencia de calor, esta expresión es inconveniente debido a que el término de la temperatura está elevado a la cuarta potencia. Es por esto que es necesario linealizar la Ec. 3.23 para escribirla de la forma de la Ec. 3.24.

$$q_{rad} = h_r A(T_1 - T_2) \quad \text{Ec. 3.24}$$

Donde h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación y se puede escribir como en la Ec. 3.25.

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_1 - T_2)(T_1^2 + T_2^2) \quad \text{Ec. 3.25}$$

Para diferencias de temperaturas pequeñas (del orden de $\Delta T = T_1 - T_2 = 10K$) el coeficiente de transferencia de calor por radiación (7) se puede escribir tal como la Ec. 3.26.

$$h_r = 4\varepsilon\sigma(T_1 T_2)^{3/2} \quad \text{Ec. 3.26}$$

3.5 Modelamiento

Los modelos térmicos simples asumen que el tiempo de medición de la potencia de salida del módulo es mucho más grande que la respuesta térmica del módulo. En condiciones estacionarias normalmente se calcula una temperatura promedio; en cambio para condiciones transientes se debe considerar que la respuesta del panel en el tiempo es significativa en comparación al tiempo de medición. Un modelo térmico estacionario no se puede utilizar en periodos en que la irradiancia en un determinado lugar fluctúe con el tiempo, como por ejemplo en periodos de rápido movimiento de nubes

El modelo de temperatura se estima considerando el intercambio de energía térmica del módulo fotovoltaico con el ambiente a través de los distintos mecanismos de transferencia de calor. Además, se debe considerar la energía que es transformada en electricidad. En la Figura 3.3 se muestra los caminos que sigue la energía incidente en su contacto con el módulo.

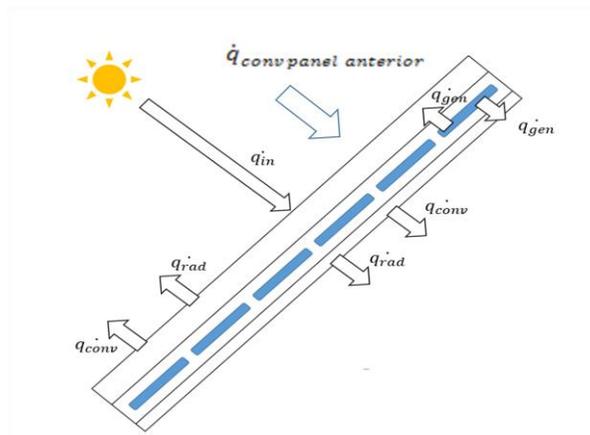


Figura 3.3: Interacción de la energía incidente con un panel i de una granja (Fuente: Elaboración propia modificado de (4)).

Generalmente se considera que la energía que escapa del sistema por radiación y por convección es considerable, mientras que la energía que escapa por los contactos de la estructura del módulo es despreciable debido a la baja área de contacto con el módulo.

Se puede derivar una ecuación que describe la temperatura del panel en función de la capacidad calorífica de esta y la transferencia de calor con el ambiente (Ec. 3.27).

$$C_{\text{modulo}} \frac{dT}{dt} = q_{\text{rad}} + q_{\text{conv}} - P_{\text{out}} \quad \text{Ec. 3.27}$$

Donde C_{modulo} es la capacidad calorífica promedio del módulo (J/kgK), q_{rad} y q_{conv} es el calor transferido a través de radiación y convección respectivamente (W) y P_{out} es la potencia eléctrica generada por el módulo (W).

Para modelar térmicamente un panel fotovoltaico se deben calcular las cargas térmicas presentes en el panel fotovoltaico, considerando espesores y conductividades térmicas. Para el caso de los coeficientes convectivos, es necesario identificar la geometría a la cual estará asociada y de acuerdo a eso calcular.

Un panel fotovoltaico se puede modelar como una serie de resistencias térmicas en serie y paralelo como se muestra en la Figura 3.4, en donde cada resistencia representa la resistencia al flujo de calor, y que depende del espesor y conductividad térmica de cada capa (Ec. 3.28), y las capacitancias representan la capacidad del material de absorber y almacenar el calor, que depende de la densidad, calor específico, el área transversal y el espesor de cada capa (Ec. 3.29).

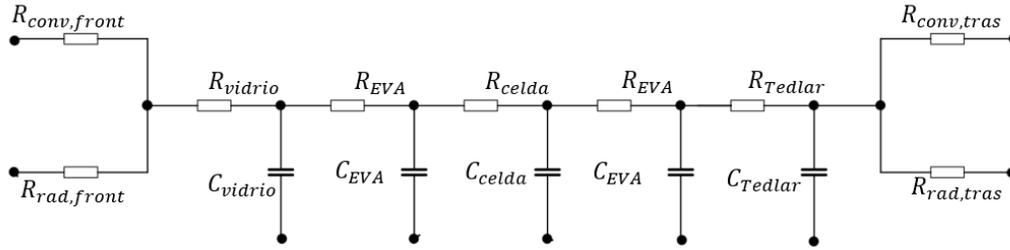


Figura 3.4: Modelo térmico de un panel fotovoltaico(4)

$$R = \frac{t}{kA_s} \quad \text{Ec. 3.28}$$

$$C = \rho c A_s t \quad \text{Ec. 3.29}$$

Donde t es el espesor del material (m); k es la conductividad térmica del material (W/m²K); A_s es la superficie del panel (m²); ρ es la densidad del material (Kg/m³); C es la capacidad calorífica del material (J/kg K).

La ecuación básica que describe el intercambio de calor entre las distintas capas del encapsulamiento viene dada por la ecuación de transferencia de calor en un dominio sólido dado por la Ec. 3.30.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot k \nabla T + Q \quad \text{Ec. 3.30}$$

3.6 Simulación de la granja solar

La realización de la simulación del granja solar se efectúa realizando una simulación de una fila de 30 paneles que se ven influidos por las condiciones del viento, extraídas desde los datos meteorológicos de la estación San Pedro de Atacama (9), como lo muestra la Figura 3.5 y Figura 3.6..

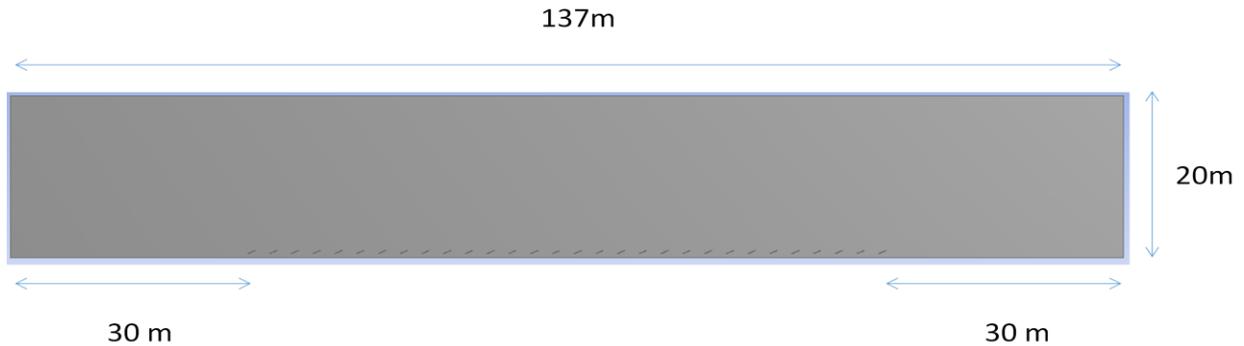


Figura 3.5. Configuración simulación campo solar

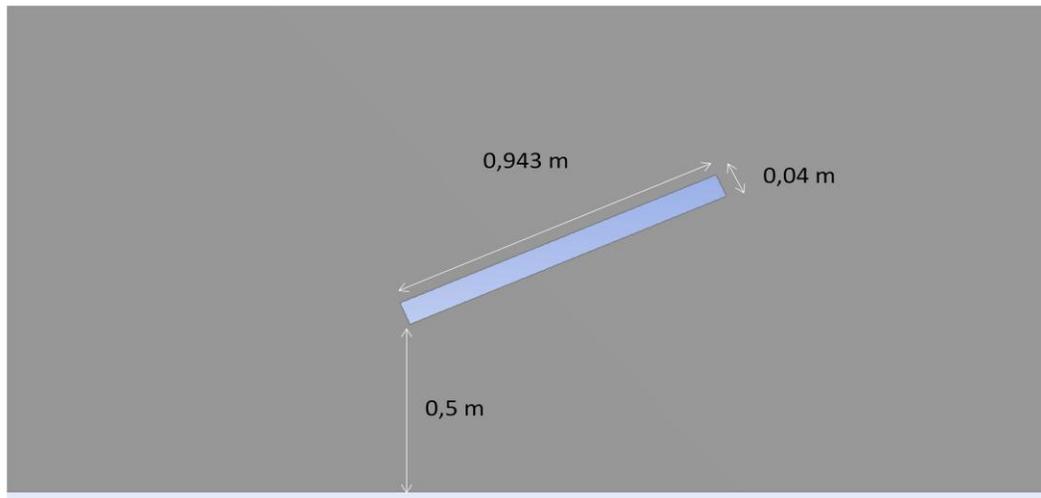


Figura 3.6. Configuración simulación del granja solar. Vista en detalle 1 panel solar.

Para poder analizar las temperaturas en detalle de los paneles observados en la Configuración 4 se tomaron tres puntos de los paneles observados en la Figura 3.7, éste procedimiento se efectuó para las distintas distancias. Los puntos rojos denotan las mediciones de temperatura dentro del panel, mientras que los puntos verdes las de la velocidad de viento de entrada al panel a una distancia igual a la mitad de la separación entre paneles. Al mismo tiempo se midió la temperatura del viento – o ambiente - en los mismos puntos verdes. Una vez identificado la zona y la temperatura más alta dentro del panel se utiliza la velocidad ubicada en línea a este punto para realizar los cálculos de las secciones posteriores, tal como se muestra en la Figura 3.7.

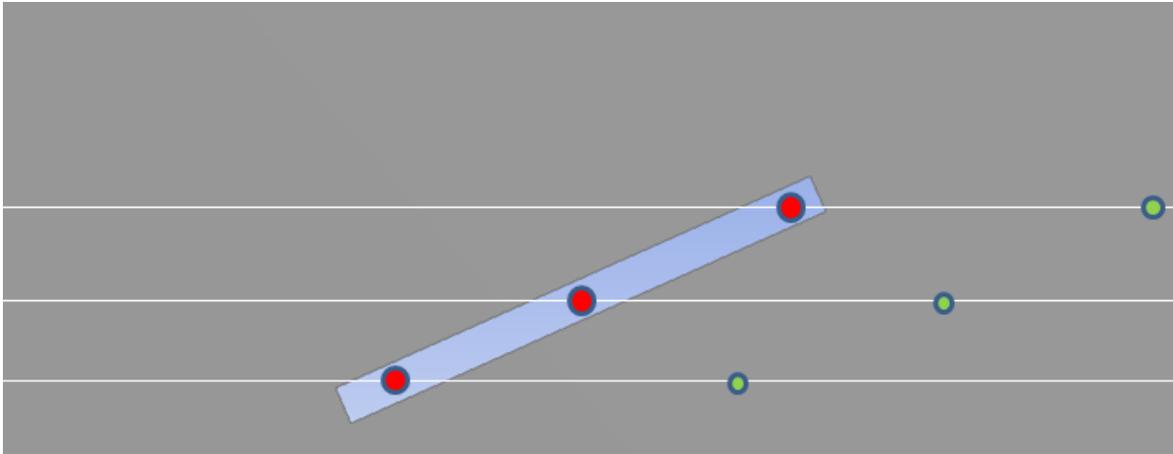


Figura 3.7. Procedimiento para calcular puntos de Temperatura y Velocidad en Configuración 4.

De acuerdo a la metodología del apartado 2 en una primera instancia se realizó una validación de la malla estableciendo un valor fijo a evaluar por el número de elementos que existen en el espacio a simular, eligiendo la temperatura en el punto rojo más alejado del suelo de la Figura 3.7 del panel N°17, esta variación se observa en la Figura 3.8, para tener la certeza de ocupar la malla correcta.

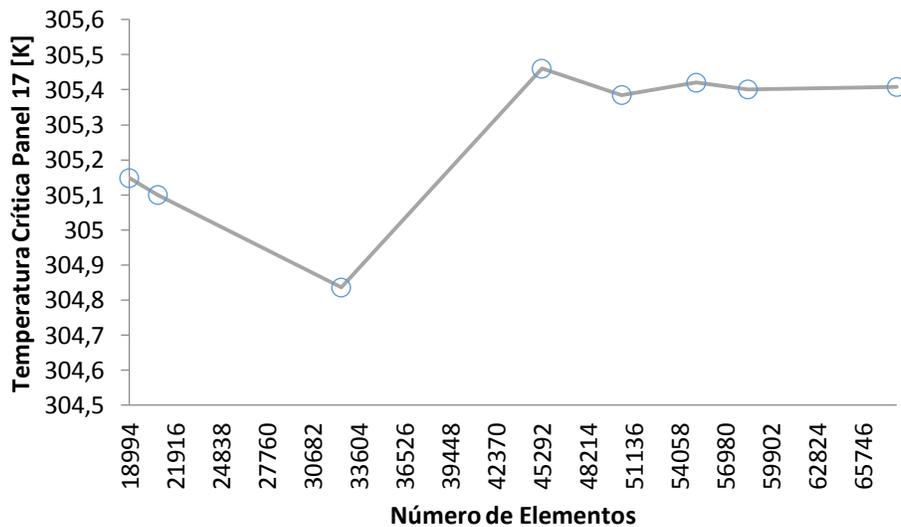


Figura 3.8. Gráfico número de elementos vs temperatura crítica del panel N° 17,

Luego para evaluar la calidad del mallado se realiza un análisis de calidad de la malla del sistema de 30 paneles como se aprecia en la Figura 3.9 y Figura 3.10. En la Figura 3.11 se aprecia que la mayor cantidad de elementos cercanos a 1 (el óptimo), se encuentra rodeando a los paneles, por lo que se estima que se determina que la malla está correcta dando un total de 575.540 elementos.

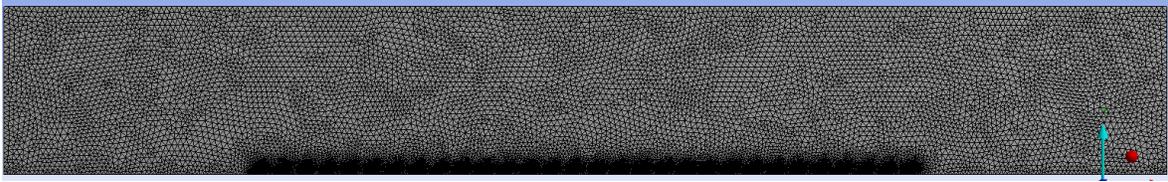


Figura 3.9. Malla granja solar.

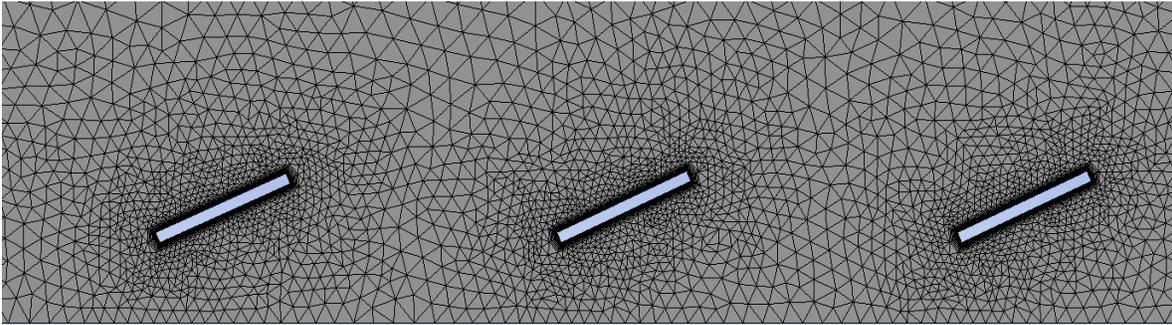


Figura 3.10. Malla granja solar. Vista en detalle de tres paneles.

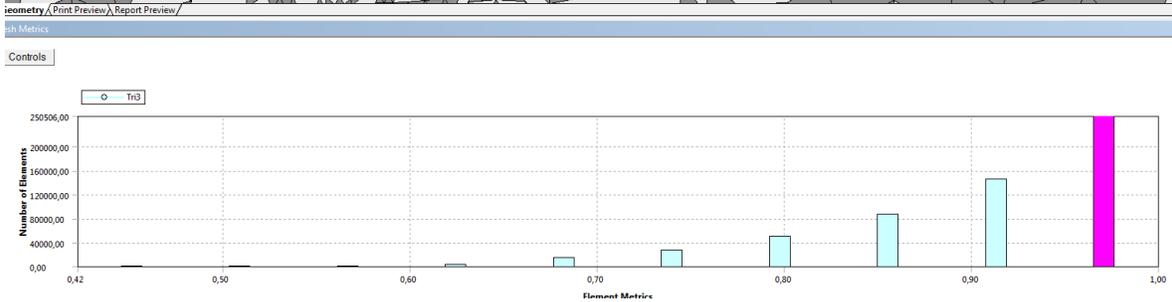
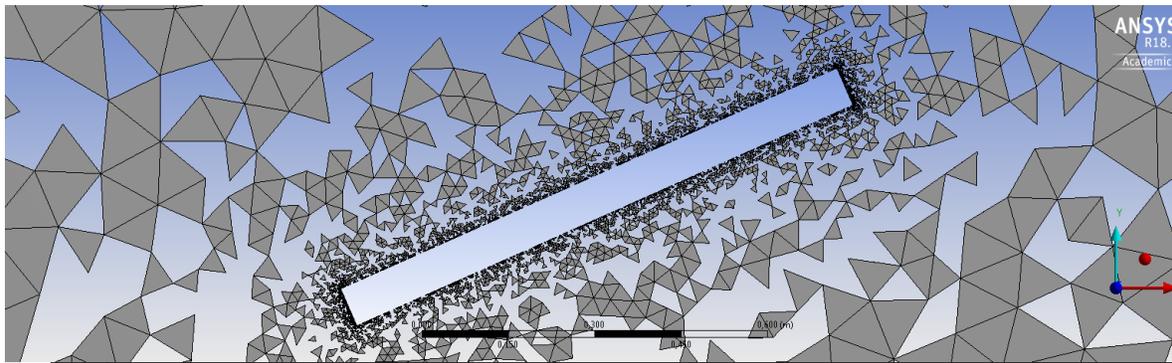


Figura 3.11. Calidad del mallado.

Finalmente, para la validación de los resultados, se verifican los coeficientes de arrastre y sustentación para el primer panel fotovoltaico, comparando con los valores extraídos desde el trabajo de Chuanjin Lan (10) tras realizar una interpolación lineal acorde al ángulo utilizado en la presente memoria. La comparación entre los valores extraídos desde la simulación y las del trabajo citado, mostrada en la Tabla 1 se comparan gracias a la semejanza de los coeficientes adimensionales, que permiten la comparación y validación de los resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 1 Valores trabajo de Chuanjin Lan (10)

Valor del Ángulo de la placa	24
Valor de G	0,5
Coefficiente de Arrastre	0,30406
Coefficiente de Sustentación	0,61074

Tabla 2 Valores de simulación granja solar

Coefficiente de Arrastre	0,3071
Porcentaje de error	0,98%
Coefficiente de Sustentación	0,58675
Porcentaje de error	4,08%

3.7 Parámetros atmosféricos y propiedades de los paneles

Siguiendo la metodología descrita en el apartado 2, se realizó un análisis para distintos tipos de configuraciones. Sin embargo, algunas variables climatológicas y georeferenciales son análogas a todos los análisis, éstas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Características atmosféricas y georeferenciales comunes a todas las configuraciones.

Variable	Valor
Longitud	-68.22 22° 55' Sur
	-68.12 Oeste
Latitud	-229.167
Ángulo de Inclinación	24
Azimut	4°
Dirección del viento	Noreste
Radiación Solar	1071,5 W/m ²
Patm	770,7 mbar

Además para todas las configuraciones que se definen a continuación se toma como punto de evaluación la temperatura más alta para cada panel en estudio. Esta temperatura es obtenida tras las simulaciones en Ansys Fluent 18.1.

A continuación se especifican las condiciones para cada una de las simulaciones realizadas:

3.7.1 Configuración 1:

Para esta configuración se utilizó los siguientes valores establecidos para cada panel fotovoltaico y las condiciones de generación de calor que se observan en la Tabla 4, además en la Tabla 5 se observan las distintas condiciones atmosféricas obtenidas para el día 28 de

enero del presente⁷ en la estación San Pedro de Atacama (9), para las distintas pruebas de temperatura realizadas.

Tabla 4. Características del panel para configuración 1

Características Panel PV	
Largo	1965 mm
Ancho	943 mm
Espesor	40 mm
Distanciamiento entre paneles	3,2 m
Generación de calor interna	
Generación	1000 W/m ²

Tabla 5. Condiciones atmosféricas para configuración 1 y 2

Variable	Valor
Velocidad del viento entrada	1,805 m/s
Temperatura atmosférica 1 (mín)	29,9 °C
Temperatura atmosférica 2 (promedio)	30,6 °C
Temperatura atmosférica 3 (máx)	31,3 °C

Cabe destacar que el distanciamiento de 3,2 m entre cada panel fue obtenido de la Ec. 3.2 e indica el distanciamiento mínimo entre dos panel sucesivos para que no se produzca sombra entre las horas de mayor radiación solar.

3.7.2 Configuración 2:

Para esta configuración se utilizó los siguientes valores establecidos para cada panel fotovoltaico y las condiciones de generación de calor que se observan en la Tabla 6, además en la Tabla 5 se observan las distintas condiciones atmosféricas obtenidas para el día 28 de enero del presente en la estación San Pedro de Atacama (9), para las distintas pruebas de temperatura realizadas.

Tabla 6 Características del panel para configuración 2

Características Panel PV	
Largo	943 mm
Ancho	1965 mm
Espesor	40 mm
Distanciamiento entre paneles	1,8 m
Generación de calor interna	
Generación	1000 W/m ²

⁷ Se escogió este día pues presentó la radiación y las temperaturas más altas del verano para esa zona.

Cabe destacar que el distanciamiento de 1,8 m entre cada panel fue obtenido de la Ec. 3.2 e indica el distanciamiento mínimo entre dos paneles sucesivos para que no se produzca sombra entre las horas de mayor radiación solar.

3.7.3 Configuración 3:

A diferencia de las configuraciones 1 y 2, en ésta se simula de acuerdo a la velocidad de viento máxima (ráfaga) registrada el día 28 de enero del presente en la estación San Pedro de Atacama (9), con su respectiva temperatura ambiental. Las características del panel para este caso corresponden a la misma que en la configuración 2 (Tabla 6), la justificación tras esta decisión se explica en el apartado 4. Las condiciones atmosféricas para esta configuración se aprecian en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones atmosféricas para configuración 3.

Variable	Valor
Velocidad del viento entrada	4 m/s
Temperatura atmosférica	28,5 °C

3.7.4 Configuración 4:

En esta última configuración se utilizan las características de panel de la configuración 2 (Tabla 6) y las condiciones atmosféricas de la configuración 1 tomando en cuenta sólo la temperatura ambiente promedio (Tabla 5), sin embargo, se varía el distanciamiento entre paneles, la velocidad de entrada del viento y la temperatura de entrada ambiente del viento, cada uno por separado. Para poder realizar este análisis de manera eficaz, se consideró el panel número 17 (siguiendo la dirección del viento) y los paneles anterior y posterior a éste. La elección de este panel se debe a que presenta una de las temperaturas más elevadas (ver apartado 4). En la Tabla 8 se encuentran las distancias para las cual se realizaron las simulaciones.

Tabla 8. Distanciamiento entre paneles 16, 17 y 18.

Distancias [m]
2,3
1
0,6
0,3

Tras conocer los resultados de cada uno de estos parámetros se procede a encontrar una relación que involucre todas estas variables con tal de poder identificar la temperatura máxima que puede alcanzar un panel dentro de una configuración y posteriormente determinar la distancia mínima a la que debe separarse los panales con tal de optimizar la eficiencia del campo solar.

3.8 Análisis económico para la configuración 1 y 2

Para poder determinar cuál de las dos configuraciones es la más idónea para el desarrollo de una granja solar, uno de los factores tomados en cuenta fue el económico. La utilización de terreno tiene un costo, por lo que la disposición de los paneles es fundamental para disminuir los costos del proyecto. Según la página “Económicos del mercurio”⁸, el valor de 1,28 hectáreas es de 95.000.000 CLP.

Por ende bajo el supuesto de mantener la misma generación de energía, de acuerdo a la Configuración 1 la separación entre paneles es 1,77 veces a la Configuración 2, así, de elegir la Configuración 1 costaría 168.150.000 CLP más caro, es decir, estamos ante una opción inverosímil, que sin embargo, servirá para el análisis físico.

⁸ <https://www.economicos.cl/propiedades/vendo-terreno-en-san-pedro-de-atacama-codAAKFCGQ.html>

4 Resultados

4.1 Resultados Simulación Granja Solar

Para la simulación de la granja 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 18.1. Sin embargo, para los efectos de esta memoria, solo consideraremos la velocidad en el eje x, según los resultados entregados por las memorias que anteceden a este informe (4)(11). En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se tiene la temperatura y las condiciones de velocidad en x para la Configuración 2, respectivamente.

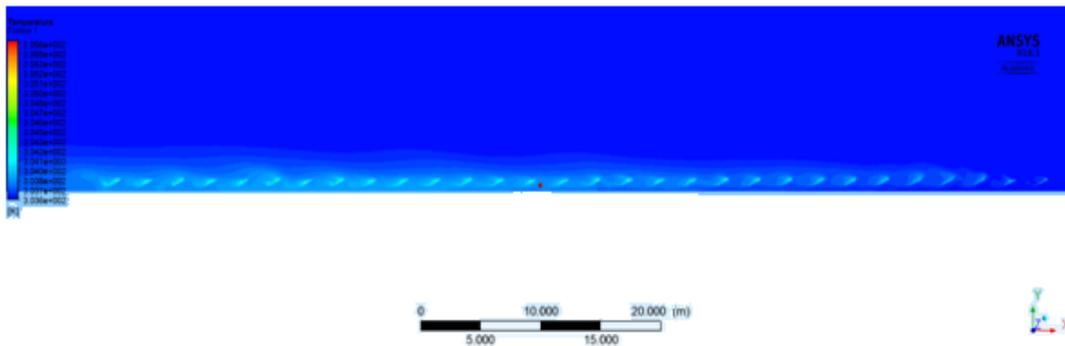


Figura 4.1. Temperatura para el sistema de paneles.

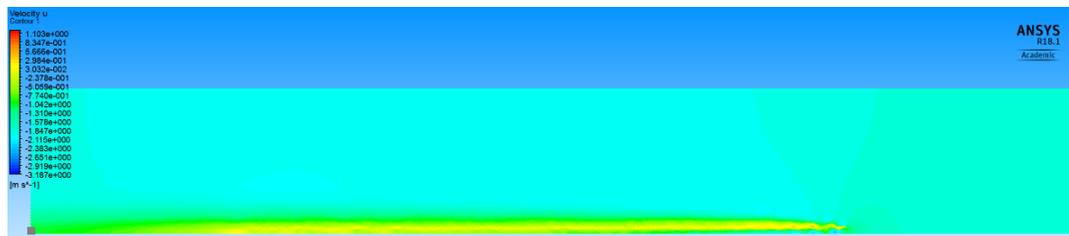


Figura 4.2. Velocidad x para el sistema de paneles.

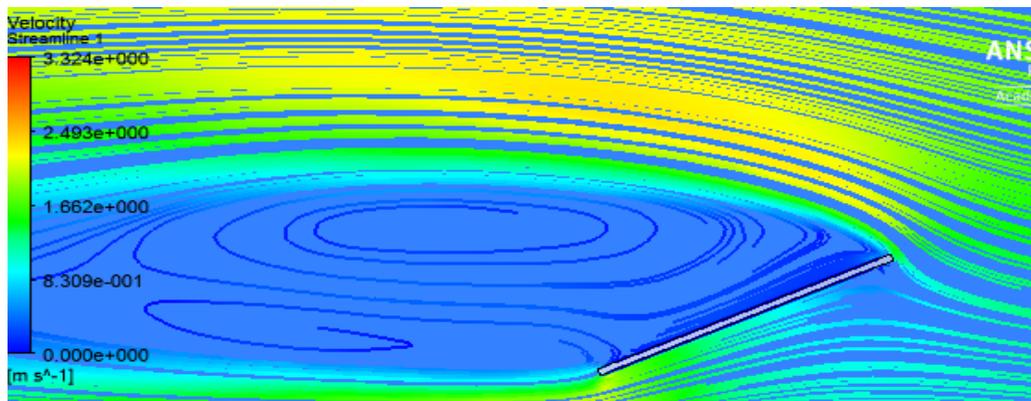


Figura 4.3. Velocidad en x en la cercanía del panel N° 17. Vorticidad.

4.2 Resultados térmicos

4.2.1 Configuración 1:

Los resultados que se presentan a continuación son los obtenidos para la Configuración 1 para tres paneles representativos de la fila de 30 paneles, estos son: 1, 11 y 28. La velocidad estudiada es de 1,805 [m/s] a una separación de paneles de 3,2 [m]. Los datos fueron obtenidos según lo mencionado en la Figura 3.7.

La finalidad tras estas mediciones es observar si existe un cambio comparable entre sus temperaturas de inicio y término medidas en el segundo 2 y 120 de la simulación, respectivamente.

Tabla 9. Resultados termodinámicos para Configuración 1.

Tambiente [K]	Tiempo [s]	# Panel	Tpanel [K]	V Viento panel [m/s]
304,3	0,2	11	305,598	0,24
	120	11	306,155	1,637
	0,2	1	305,601	1,71021
	120	1	306,045	1,47066
	0,2	28	305,78	1,11699
	120	28	306,149	0,207702
302,9	0,2	1	304,208	1,7168
	120	1	304,626	1,4796
	0,2	11	304,206	1,627
	120	11	304,768	0,262187
	0,2	28	304,179	1,618
	120	28	304,749	0,0472411
303,6	0,2	1	304,907	1,72572
	120	1	305,296	1,509
	0,2	11	304,907	1,6139
	120	11	305,437	0,206
	0,2	28	304,907	1,571
	120	28	305,355	-0,311

4.2.2 Configuración 2:

Los resultados que se presentan a continuación son los obtenidos en la Configuración 2 para tres módulos representativos de la fila de 30 paneles, estos son: 1, 11 y 28. La velocidad estudiada es de 1,805 [m/s] a una separación de paneles de 1,8 [m]. Los datos fueron obtenidos según lo mencionado en la Figura 3.7.

La finalidad tras estas mediciones es observar si existe un cambio comparable entre sus temperaturas de inicio y término medidas en el segundo 2 y 120 de la simulación, respectivamente.

Tabla 10. Resultados termodinámicos para Configuración 2.

Tambiente [K]	Tiempo [s]	# Panel	Tpanel [K]	V Viento panel [m/s]
304,3	0,2	1	305,878	1,442
	120	1	305,549	1,68047
	0,2	11	305,858	0,009
	120	11	305,378	1,601
	0,2	28	306,081	0,1991
	120	28	305,557	1,615
302,9	0,2	1	304,2	1,72716
	120	1	304,554	1,514
	0,2	11	304,205	1,593
	120	11	304,618	0,0631
	0,2	28	304,305	1,612
	120	28	304,721	0,228
303,6	0,2	1	304,899	1,7398
	120	1	305,247	1,5692
	0,2	11	304,9	1,5893
	120	11	305,122	0,016
	0,2	28	304,898	1,59145
	120	28	305,383	1,086

4.2.3 Configuración 3:

Los resultados que se presentan a continuación son los obtenidos en la Configuración 3 para tres módulos representativos de la fila de 30 paneles, estos son: 1, 11, 17 y 28. La velocidad estudiada es de 4 [m/s] a una separación de paneles de 1,805 [m]. Los datos fueron obtenidos según lo mencionado en la Figura 3.7. La temperatura en esta Configuración varía con respecto a las otras mediciones, ya que se trata de una ráfaga.

La finalidad tras estas mediciones es observar si existe un cambio comparable entre sus temperaturas de inicio y término medidas en el segundo 2 y 120 de la simulación, respectivamente.

Tabla 11. Resultados termodinámicos Configuración 3.

Tambiente [K]	Tiempo [s]	# Panel	Tpanel [K]	V Viento panel [m/s]
301,5	0,2	1	302,363	3,80781
	120	1	302,631	3,48
	0,2	11	302,529	2,92204
	120	11	302,519	0,053068
	0,2	17	302,353	2,96503
	120	17	302,794	0,162119
	0,2	28	302,453	2,9768
	120	28	302,717	0,47417

4.2.4 Configuración 4:

Como se especificó en el apartado 3.8, tras realizar un sutil análisis económico se descarta de inmediato la configuración 1, por lo que se centran los esfuerzos en la Configuración 2. En la Tabla 12 se pueden observar los resultados obtenidos tras obtener información térmica de tres puntos del panel, así como la velocidad y temperatura del viento (Figura 3.7), se toma en consideración el valor más elevado de los puntos estudiados. Utilizando la Ec. 3.22 se observa que el coeficiente convectivo H del primer panel da con una exactitud de 99.999% al utilizado en la inicialización del software Ansys 18.1, esto confirma que los parámetros y modelos ingresados fueron los correctos.

Tabla 12. Resultados termodinámicos para todos los paneles de la Configuración 2.

N°Panel	Referencia [m]	T. Promedio Panel [K]	V. Promedio Aire [m/s]	T. Promedio Aire [K]	H convectivo [W/m2k]
1	30	305,164	1,805	303,599	13,17080315
2	0,9	304,956	0,5959	303,64	10,07556454
3	0,9	305,039	-0,3322	303,647	7,699676109
4	0,9	305,135	-0,2908	303,683	7,805660593
5	0,9	305,058	-0,1214	303,699	8,239308744
6	0,9	304,997	-0,1	303,703	8,294088221
7	0,9	305,055	-0,0256	303,723	8,484550154
8	0,9	305,157	0,03498	303,731	8,639636216
9	0,9	305,076	0,01104	303,736	8,578347059
10	0,9	305,058	-0,0094025	303,745	8,526014004
11	0,9	305,113	0,0522	303,751	8,683715632
12	0,9	305,178	0,0852832	303,765	8,768409293
13	0,9	305,14	0,103949	303,789	8,816190055
14	0,9	305,249	0,048	303,799	8,672967837

N°Panel	Referencia [m]	T. Promedio Panel [K]	V. Promedio Aire [m/s]	T. Promedio Aire [K]	H convectivo [W/m ² k]
15	0,9	305,272	0,0599	303,792	8,703432603
16	0,9	305,309	0,101	303,815	8,808647112
17	0,9	305,308	0,975	303,83	11,04605494
18	0,9	305,307	0,1302	303,833	8,883396791
19	0,9	305,263	0,0947	303,835	8,79251649
20	0,9	305,342	0,1371	303,844	8,901061469
21	0,9	305,343	0,12654	303,858	8,874027816
22	0,9	305,242	0,1753	303,851	8,998847115
23	0,9	305,352	0,156	303,858	8,949444363
24	0,9	305,324	0,157	303,862	8,952002971
25	0,9	305,321	0,3246	303,83	9,381052677
26	0,9	305,303	0,1409	303,872	8,91078642
27	0,9	305,323	0,3012	303,838	9,321149431
28	0,9	305,365	0,1189	303,862	8,854470572
29	0,9	305,256	0,234615	303,844	9,150691762
30	0,9	305,259	0,163726	303,869	8,969218142

En la Tabla 12 se muestran seis variables: N° Panel, que representa la disposición de los paneles con respecto a la entrada del viento, siendo 1 el más próximo al inicio; Referencia, que indica en metros la distancia en la que se tomó la medición de las propiedades del viento, yendo de izquierda a derecha (Figura 3.7); Temperatura (T.) Promedio Panel, esta variable indica el promedio de los tres puntos tomados para cada panel en Kelvin; Velocidad (V.) Promedio Aire, representa la velocidad promedio en m/s del aire tomada en los puntos de referencia, cabe destacar que los valores negativos son producto de los vórtices que se forman como se aprecia en la Figura 4.3; Temperatura (T.) Promedio Aire, al igual que la variable anterior, esta temperatura promedio es tomada de los puntos de referencia; Coeficiente (H) Convectivo, finalmente, esta variable es importante pues sirve para conocer si efectivamente existe una interferencia térmica desde un panel a otro y que tan significativa es.

El panel N°17 presenta un H convectivo más alto por lo que se estudia en detalle. Los resultados de temperatura y perfil de velocidad en x para el panel N° 17 son apreciables en la Figura 4.4 y Figura 4.6.

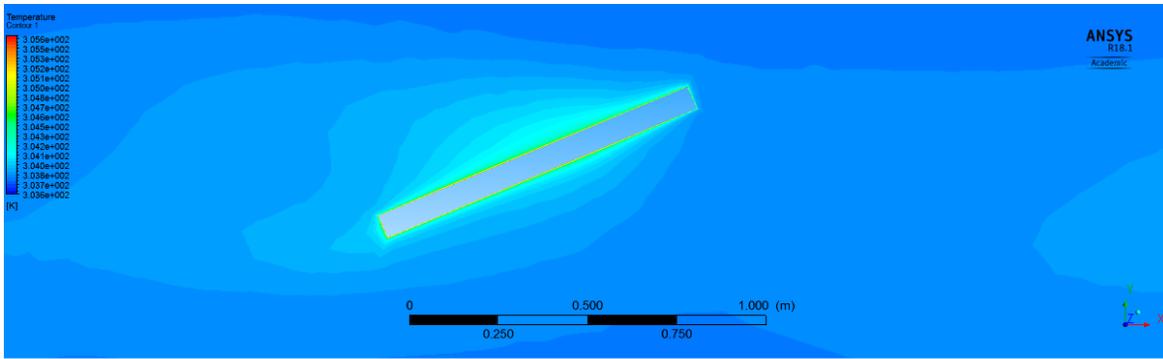


Figura 4.4. Temperatura en panel N°17 para Configuración 2.

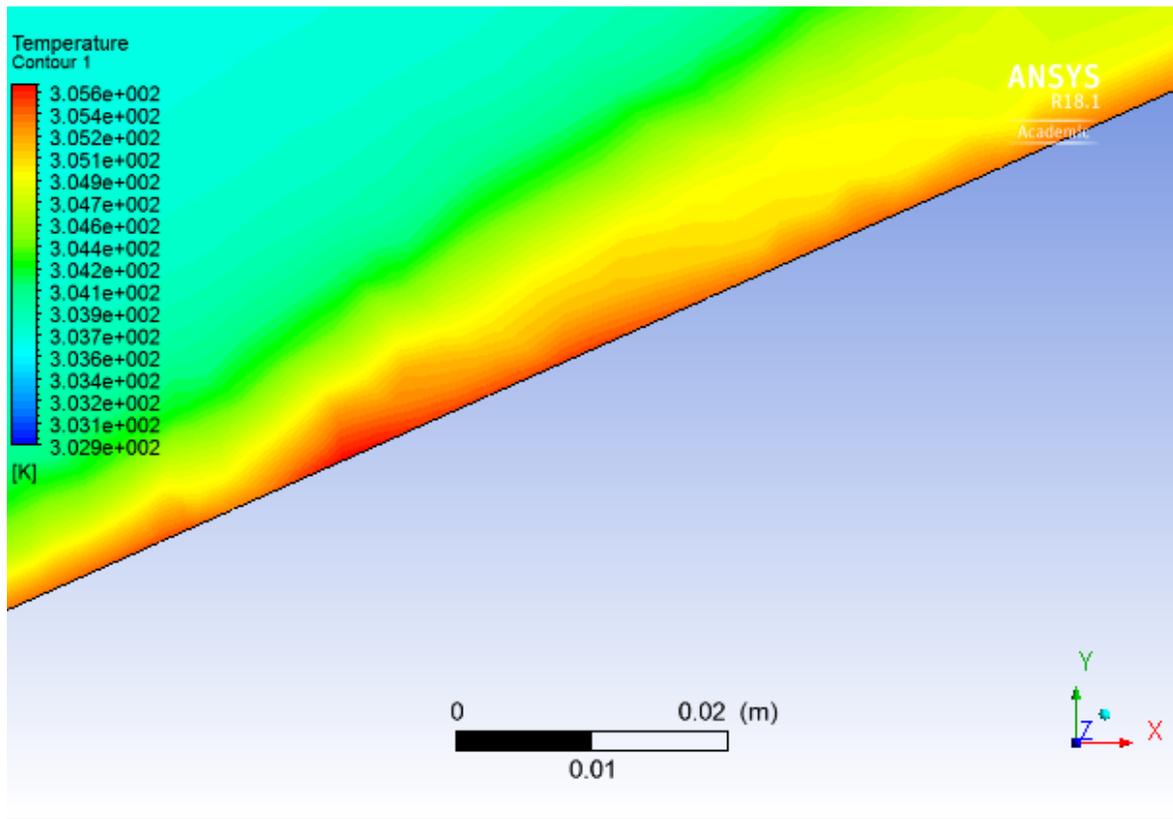


Figura 4.5 Temperatura en panel N°17 para Configuración 2. Aproximación del centro.

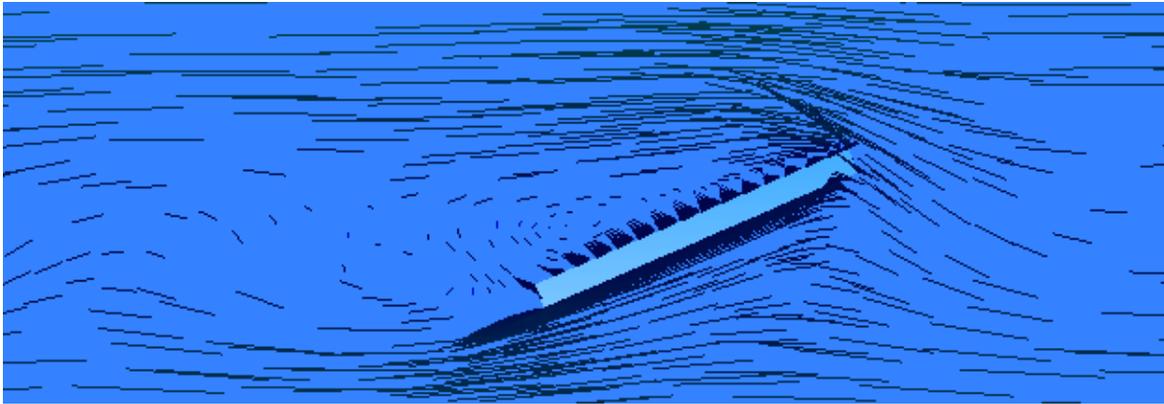


Figura 4.6. Perfil de Velocidad en X en panel N°17 para Configuración 2.

Debido a lo descrito en el apartado 4.2.1, la evaluación de “panel por panel” se ha realizado en la Configuración 2, en donde destaca el panel central que presente un H convectivo más elevado, como se aprecia en la Tabla 12 en color rosado. Es el panel número 17 que presenta estas condiciones.

Tras realizar un análisis para distintas distancias, velocidades de entrada del viento y temperaturas ambiente en los paneles número 16, 17 y 18, según la Figura 3.7, se obtienen los siguientes resultados apreciables en la Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11 y la Tabla 13.

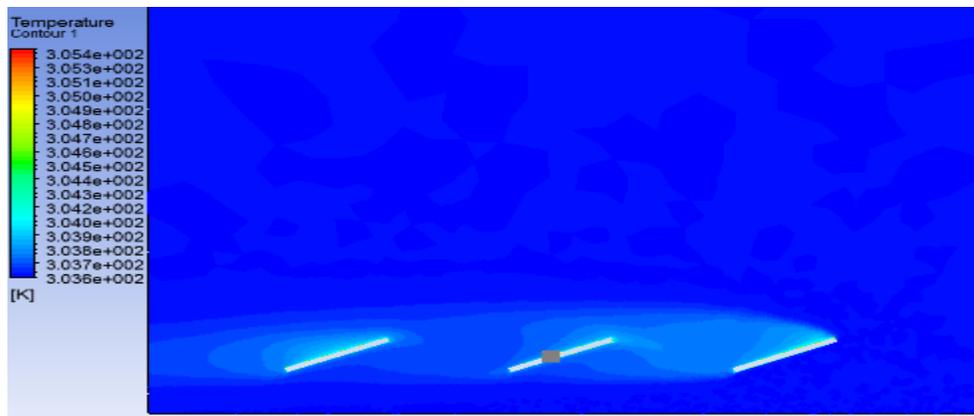


Figura 4.7. Temperatura en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 1 m de separación.

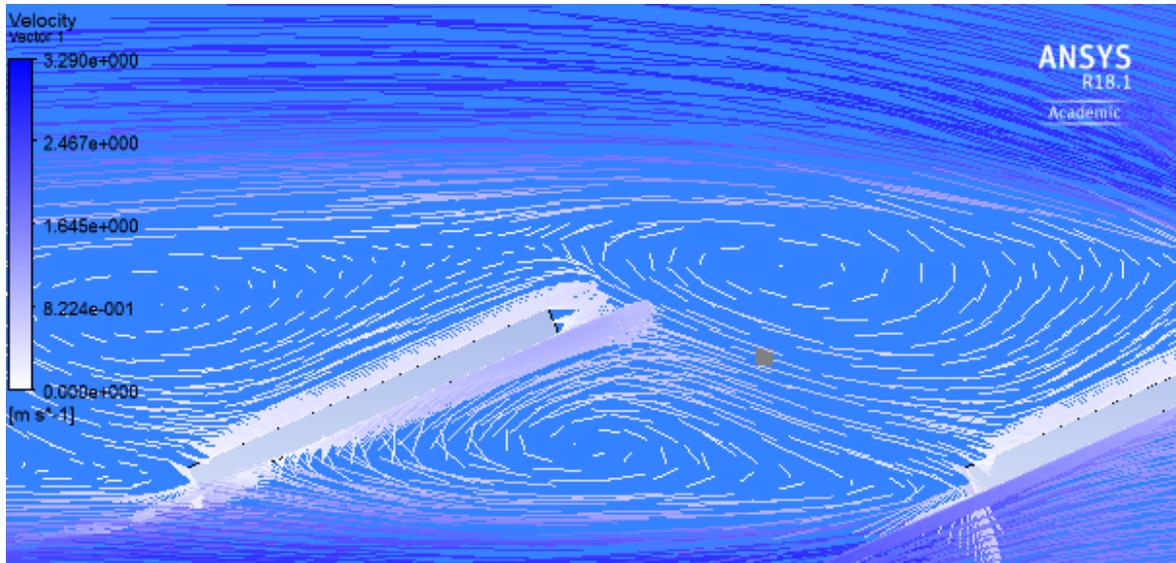


Figura 4.8. Perfil de Velocidad en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 1 m de separación.

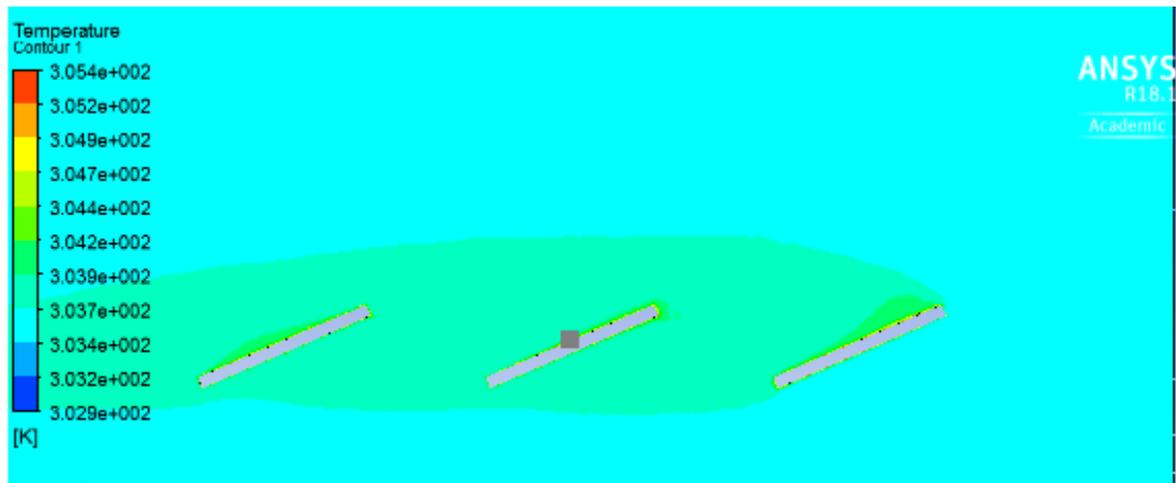


Figura 4.9. Temperatura en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 0,6 m de separación.

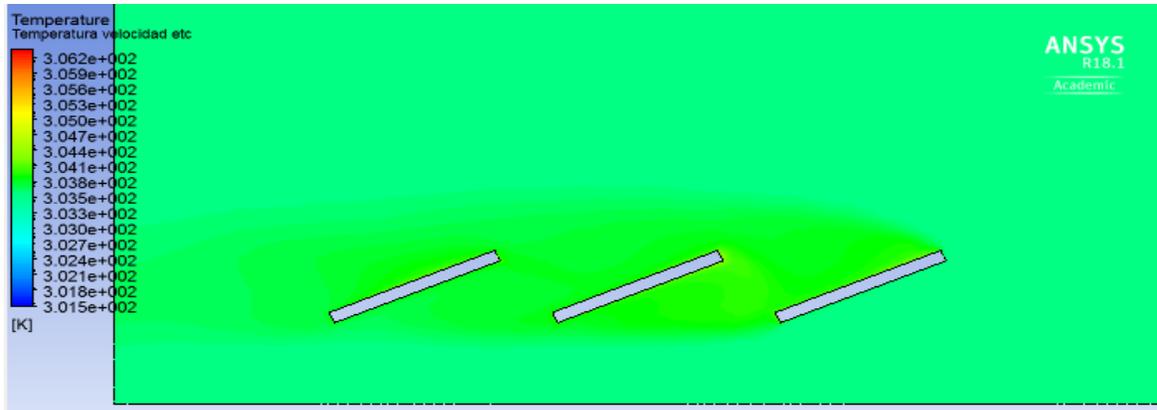


Figura 4.10. Temperatura en X en panel N°16, 17 y 18 para Configuración 4 con 0,3 m de separación.

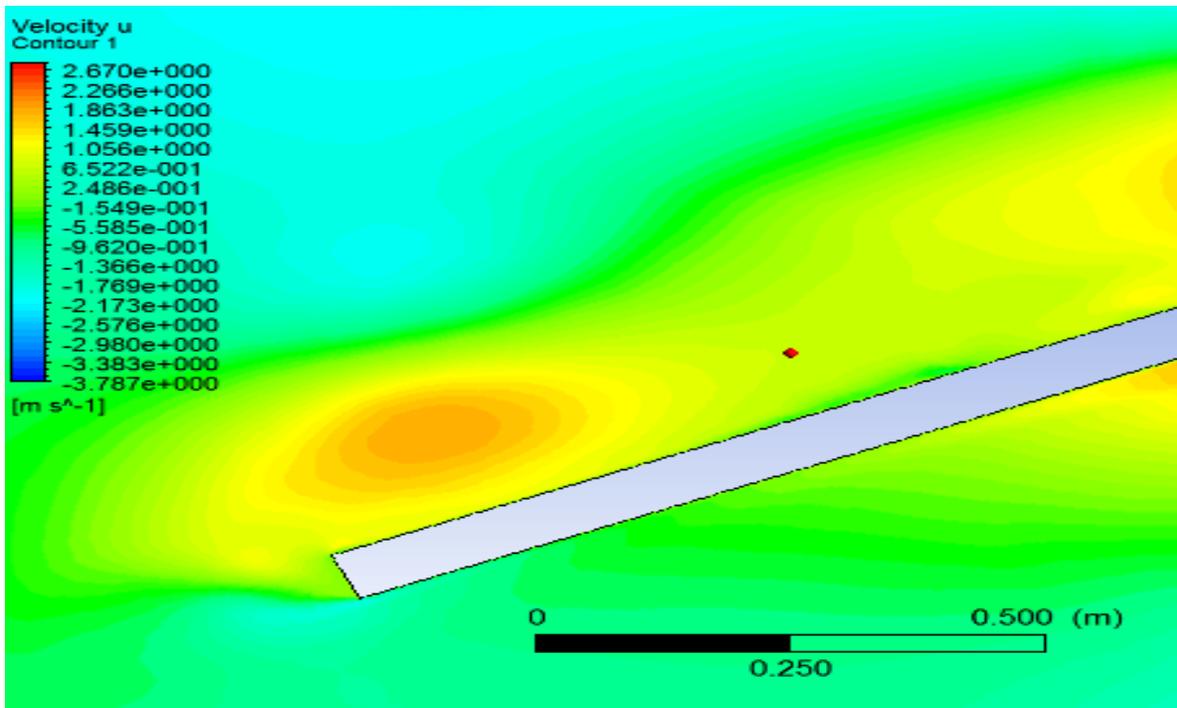


Figura 4.11. Vórtice formado en proximidad del panel 17 para Configuración 4 con 0,3 m de separación.

Tabla 13. Resultados térmicos y dinámicos Configuración 4.

Distancia [m]	Tiempo [s]	# Panel	Tpanel [K]	V Viento panel [m/s]
2,3	0,2	16	304,89	1,677
	120	16	305,31	0,101
	0,2	17	304,89	1,646
	120	17	305,33	0,243
	0,2	18	304,84	1,641
	120	18	305,31	0,130
1	0,2	16	304,88	1,800
	120	16	305,14	1,800
	0,2	17	304,90	1,294
	120	17	304,96	-0,623
	0,2	18	304,88	1,320
	120	18	305,16	-0,200
0,6	0,2	16	304,90	1,640
	120	16	305,07	1,640
	0,2	17	304,80	1,050
	120	17	305,08	-0,340
	0,2	18	304,88	0,900
	120	18	305,17	-0,225
0,3	0,2	16	304,90	1,638
	120	16	305,17	1,641
	0,2	17	304,80	1,060
	120	17	305,25	-0,305
	0,2	18	304,88	0,971
	120	18	305,23	-0,640

En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos de distancia entre paneles y como varían en el panel N°17 tanto la temperatura, la eficiencia.

Tabla 14. Resultados temperatura panel según distancia entre paneles.

Distancia [m]	Tpanel 16 [K]	Tpanel 17 [K]	Tpanel 18 [K]	Eficiencia Panel N°17
2,3	305,31	305,33	305,31	12,87
1,805	305,31	305,31	305,31	12,88
1	305,14	305,09	305,16	12,99
0,6	305,07	305,11	305,17	12,98
0,3	305,17	305,22	305,23	12,93

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla 14 se grafica para temperatura de los paneles 16, 17 y 18 con respecto a la distancia (Gráfico 1) y eficiencia del panel N°17 respecto a la distancia (Gráfico 2).

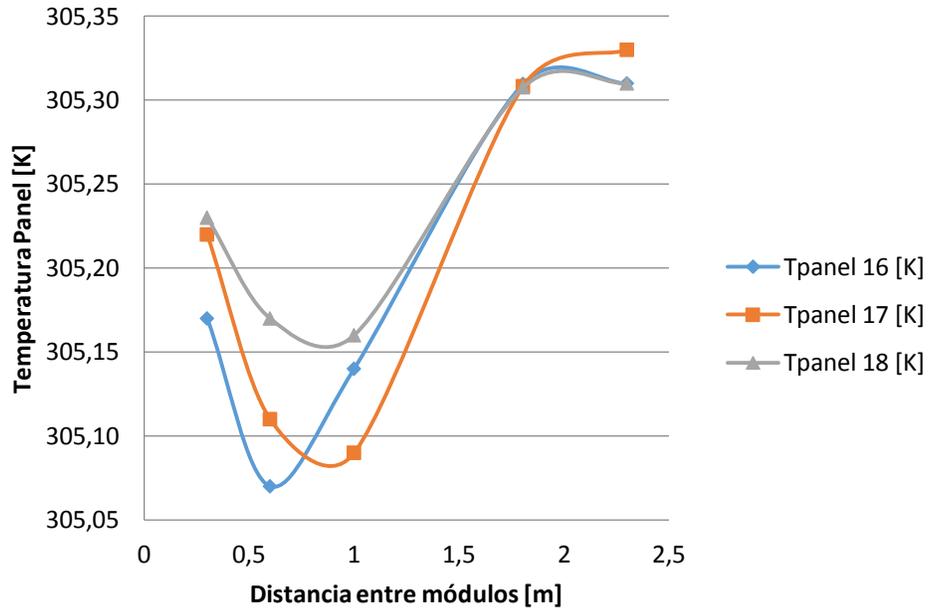


Gráfico 1. Temperatura de Panel con respecto a la distancia entre módulos para paneles 16, 17 y 18.

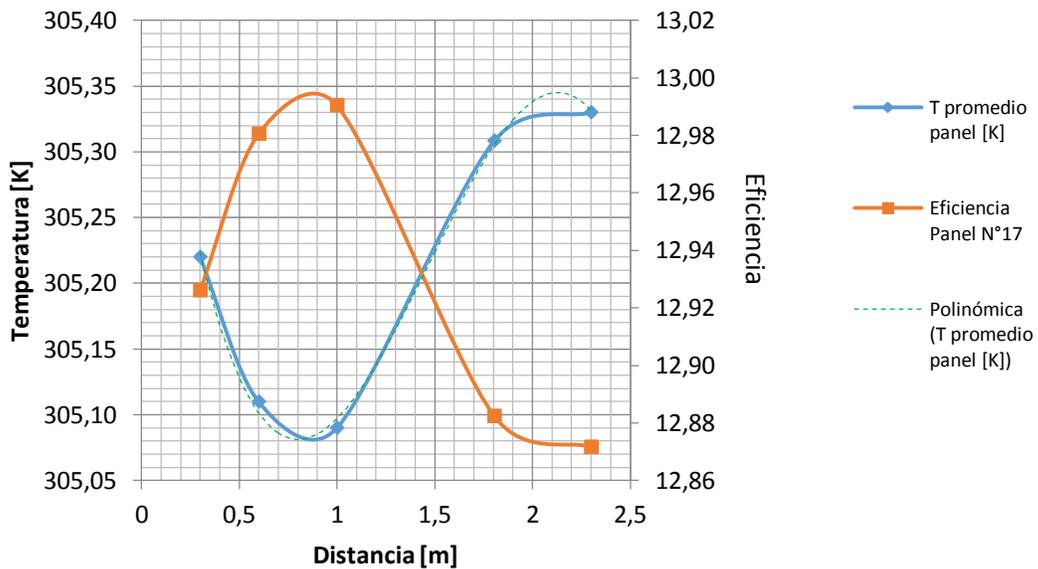


Gráfico 2. Temperatura y eficiencia promedio con respecto a la distancia.

En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos de como varía la eficiencia y la temperatura del panel N°17 con respecto a la velocidad de entrada del viento para distancias de 0,3 y 0,6 [m], respectivamente.

Tabla 15. Resultados temperatura panel según velocidad de entrada a paneles

Distancia entre paneles [m]	Velocidad V [m/s]	Tpanel 16 [K]	Tpanel 17 [K]	Tpanel 18 [K]	Eficiencia Panel N°17
0,3	1,64	305,17	305,25	305,31	12,92
0,3	2,27	304,93	305,18	305,05	13,01
0,3	2,84	304,82	304,83	304,96	13,1
0,6	1,64	305,07	305,08	305,17	12,98
0,6	2,27	304,93	304,98	305,02	13,05
0,6	2,89	304,89	305,05	304,83	13,07

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla 15 se grafica para temperatura de los paneles 16, 17 y 18 con respecto a la velocidad del viento (Gráfico 3).

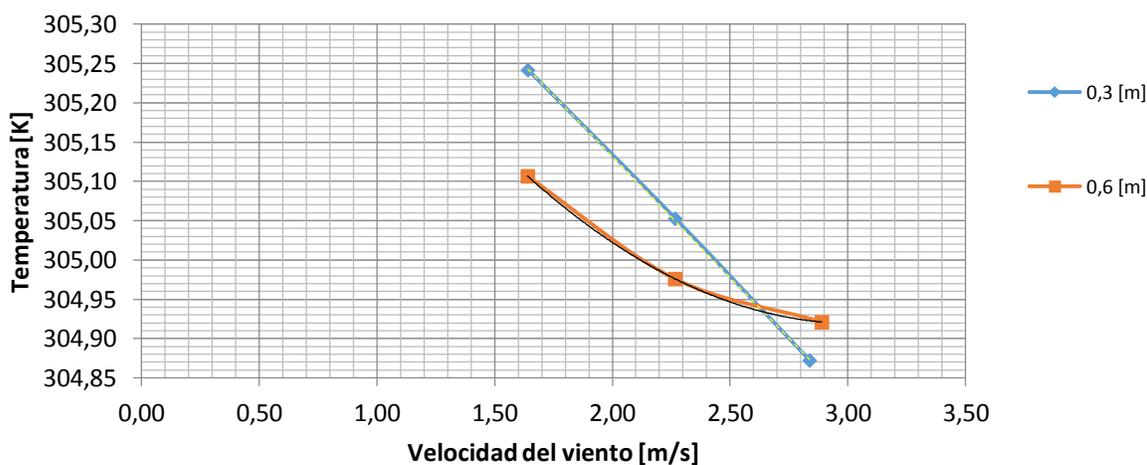


Gráfico 3. Resultados temperatura panel según variación en velocidad del viento de ingreso a los paneles.

Finalmente en la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos de como varía la eficiencia y la temperatura del panel N°17 con respecto a la temperatura ambiente diferentes distancias.

Tabla 16. Resultados temperatura panel según variación en temperatura ambiente.

Distancia entre paneles [m]	T rafaga [K]	Tpanel 16 [K]	Tpanel 17 [K]	Tpanel 18 [K]	Eficiencia panel N°17
1 m	299,77	301,31	301,45	301,40	14,82
1 m	303,6	305,07	305,08	305,17	12,98
0,6m	299,77	301,32	301,50	301,26	14,84
0,6m	303,6	305,07	305,08	305,17	12,98
0,3 m	299,77	301,25	301,33	301,27	14,88
0,3 m	303,6	305,17	305,25	305,23	12,93
1,8 m	301,5	302,79	302,79	302,79	14,13
1,8 m	303,6	305,31	305,31	305,31	12,88

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla 16 se grafica para temperatura de los paneles 16, 17 y 18 con respecto a la velocidad del viento (Gráfico 4).

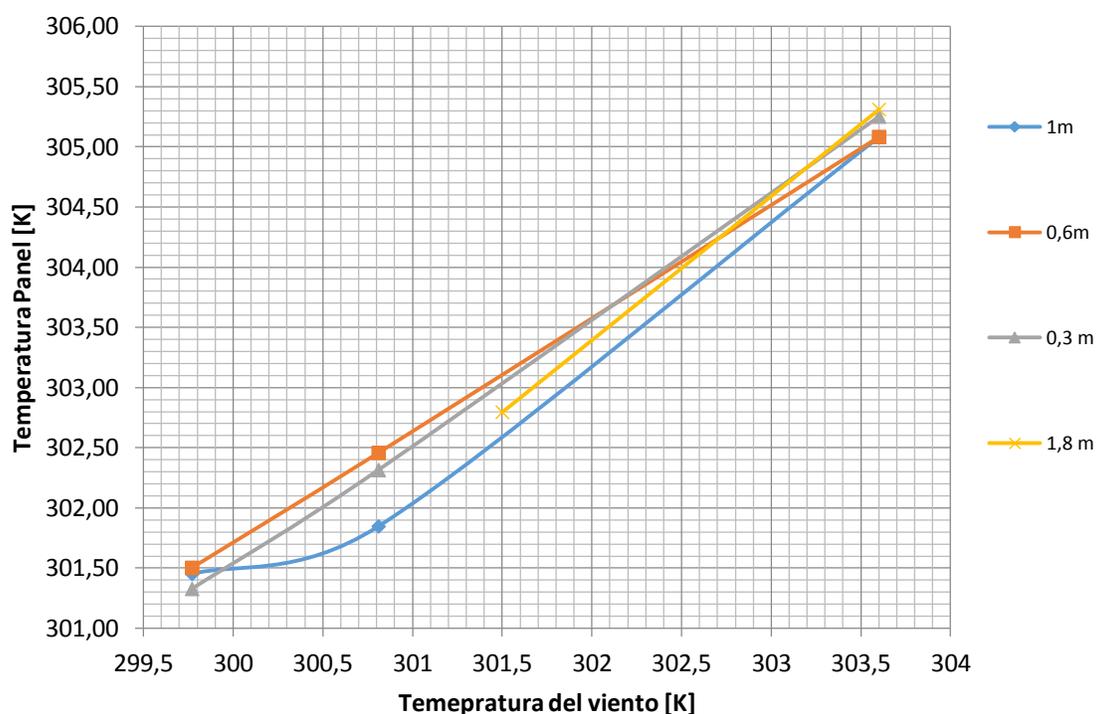


Gráfico 4. Resultados temperatura panel según variación en temperatura ambiente.

Al observar el acotado número de simulaciones realizadas por falta de insumo computacional, se propone un ajuste polinómico para encontrar la temperatura promedio en una granja solar fotovoltaica en función del distanciamiento entre paneles, la velocidad de entrada del viento y la temperatura ambiente.

I) Variación en distanciamiento:

Buscando el polinomio que mejor se asemeje a los valores entregados según el Gráfico 2, se obtienen:

Grado 1	$f(d) = 0,0925d + 305,1$	<i>Ec. 4.1</i>
Grado 2	$f(d) = 0,1155d^2 - 0,2095d + 305,23$	<i>Ec. 4.3</i>
Grado 3	$f(d) = -0,2374d^3 + 1,0303d^2 - 1,1889d + 305,49$	<i>Ec. 4.2</i>

Dónde:

$f(d)$, Temperatura promedio de la granja [K].

d , distancia entre paneles [m]

Para poder evaluar el mejor ajuste, se calcula el error porcentual con respecto a los valores de la Tabla 12.

Tabla 17. Errores ajustes polinómicos

Polinomio	Porcentaje de error
Ec. 4.1	0,000135523
Ec. 4.3	0,000262685
Ec. 4.2	4,00785E-05

Así, según la Tabla 17, la mejor opción es la Ec. 4.2.

II) Variación en velocidad del viento:

Distancia 0,6 [m] (D 0,6)	$f(v) = 0,0964v^2 - 0,5854v + 305,81$	<i>Ec. 4.4</i>
Distancia 0,3 [m] (D 0,3)	$f(v) = -0,3086v + 305,75$	<i>Ec. 4.5</i>
Suma	$f(v) = [(D 0,6) + (D 0,3)]/2$	<i>Ec. 4.6</i>
Multiplicación (Multi)	$f(v) = \sqrt{[(D 0,6)(D 0,3)]}$	<i>Ec. 4.7</i>

Dónde:

$f(v)$, Temperatura promedio de la granja [K].

v , velocidad del viento [m/s]

Para poder evaluar el mejor ajuste, se calcula el error porcentual con respecto a los valores de la Tabla 12.

Tabla 18. Errores ajustes polinómicos

Polinomio	%error
D 0,6	0,018
Suma	0,026
Multi	0,004

Así, según la Tabla 18, la mejor opción es la Ec. 4.7.

III) Variación en temperatura ambiente:

Distancia 0,3 [m] (D' 0,3)	$f(t) = 1,0303t - 7,5645$	Ec. 4.8
Distancia 0,6 [m] (D' 0,6)	$f(t) = 0,9357t + 20,993$	Ec. 4.9
Distancia 1 [m] (D' 1)	$f(t) = 0,9556t^{1,0087}$	Ec. 4.10
Distancia 1,8 [m] (D' 1,8)	$f(t) = 1,1974t - 58,224$	Ec. 4.11
Suma	$f(t) = [(D'0,6) + (D'0,3) + (D' 1) + (D' 1,8)]/4$	Ec. 4.12
Multiplicación (Multi)	$f(t) = \sqrt[4]{[(D'0,6)(D'0,3)(D' 1)(D' 1,8)]}$	Ec. 4.13

Dónde:

$f(t)$, Temperatura promedio de la granja [K].

t , temperatura ambiente [K]

Para poder evaluar el mejor ajuste, se calcula el error porcentual con respecto a los valores de la Tabla 12

Tabla 19. Errores ajustes polinómicos

Polinomio	% Error
D 0,3	0,209
Suma	0,229
Multi	0,229

Así, según la Tabla 19, la mejor opción es la Ec. 4.8.

Sin embargo, lo que se desea maximizar es la eficiencia, por ende utilizando la Ec. 3.6, Ec. 4.2, Ec. 4.7 y Ec. 4.8 se propone la siguiente relación representada en la Ec. 4.14.

$$\frac{((-0,2347d^3 + 1,0303d^2 - 1,1889d + 305,49) + (((0,0964v^2 - 0,5854v + 305,81) * (-0,3086v + 305,75))^{(1/2)} + (1,0303t - 7,5645)))/3}{Ec. 4.14}$$

De la Tabla 20 se obtienen los rangos de porcentaje de error en la Ec. 4.14 según distintos parámetros evaluados.

Tabla 20. Porcentaje de error asociado a Ec. 4.14.

Distancia [m]	Tviento [K]	Vviento [m/s]	% Error Ec. 4.14
2,30	303,60	1,81	0,34
1,80	302,90	-0,06	1,76
1,80	302,90	1,81	1,64
0,30	299,77	-0,82	10,43
1,80	303,83	0,98	0,16
1,80	303,87	0,14	0,55
2,30	303,60	0,24	0,17
0,60	299,77	1,64	8,74
1,80	301,50	4,00	6,99

Se aprecian en colores que para las temperaturas bajo 302 K el error se incrementa, por lo que se propone utilizar la Ec. 4.8 a partir de esa temperatura hacia abajo. En el apartado 5 se profundizará más sobre este fenómeno. Por ende, en la Tabla 21 se aprecia que al utilizar la Ec. 4.8 para temperaturas de viento inferiores a 302 K y la Ec. 4.14 para rangos superiores, los porcentajes de error asociados son lo suficientemente bajos y acordes a los resultados obtenidos.

Tabla 21. Porcentaje de error asociado a Ec. 4.14 para valores de T viento sobre 302 K y Ec. 4.8 bajo 302 K

Distancia [m]	Tviento [K]	Vviento [m/s]	% Error Multi
2,30	303,60	1,81	0,34
1,80	302,90	-0,06	1,76
1,80	302,90	1,81	1,64
0,30	299,77	-0,82	0,06
1,80	303,83	0,98	0,16
1,80	303,87	0,14	0,55
2,30	303,60	0,24	0,17
0,60	299,77	1,64	0,11
1,80	301,50	4,00	0,91

Finalmente considerando variables atmosféricas ideales se utiliza la distancia como variable para poder optimizar la eficiencia de la granja en función de esta, se utiliza la Ec. 4.2 y se obtiene la Ec. 4.15.

$$Max Ef = Max Ef_{ref} * [1 + y * (-0,2347d^3 + 1,0303d^2 - 1,1889d + 305,49 - T_{ref})]$$

Ec. 4.15

$$s. a. x \geq 0,3$$

$$Ef \leq 0,165$$

Luego, el mínimo valor de distanciamiento promedio entre paneles en una granja solar fotovoltaica es 0,9576 [m], con esto se obtiene una eficiencia de 0,13 de 0,165 nominal con una temperatura ambiente promedio de 30,6°C con velocidad de viento de 1,805 [m/s].

5 Análisis de resultados

5.1 Simulación de la granja solar

La velocidad como se aprecia en la Figura 4.2 varía desde 1,805 m/s en la entrada a valores de 0,0522 m/s en su peor caso. Además como se muestra en la Figura 4.3 se generan vorticidades que invierten el flujo. La disminución en magnitud de la velocidad se debe a la interferencia que provocan los paneles y no todo el flujo que pasa por arriba o debajo de los módulos entra al siguiente, es por esto que se va perdiendo momentum.

5.2 Configuración 1

Los resultados de la configuración 1 sirven como referencia para observar que no hay cambios apreciables de temperatura entre los paneles una vez que estos comienzan a operar y al momento en que el viento ya ha atravesado el campo solar, independiente de las temperaturas de entrada del viento. Sin embargo, hay que destacar que evidentemente a menor temperatura ambiente, menor es la temperatura del panel, no obstante, al ser evaluado para un día de máxima temperatura y radiación en la zona de estudio los paneles son sometidos a condiciones extremas que no se ven en muchos lugares del mundo.

Esta configuración no se estudia en detalle puesto a la evaluación económica del apartado 3.8.

5.3 Configuración 2

La configuración 2 presenta una disposición de los paneles más económica que la configuración 1 como se aprecia en el apartado 3.8, sin embargo, se aprecia nuevamente que no hay un cambio significativo de temperatura desde el inicio hasta el final de la simulación, el panel aumenta dos grados Celsius respecto a la temperatura ambiente inicial, como se muestra en la Tabla 10.

5.4 Configuración 3

La configuración 3 muestra el caso extremo de ráfaga de viento de 4 [m/s]. En la Tabla 11 claramente se aprecia que el efecto de la temperatura en el enfriamiento de los paneles es fundamental, teniendo en este caso una baja significativa con respecto a las configuraciones anteriores. Es más, la temperatura de los paneles con respecto a la temperatura ambiente solo sube 1,2 grados Celsius en el peor de los casos. Cabe mencionar que el efecto de la ráfaga es una cualidad importante en una zona de tan altas temperaturas y radiación, ya que ayuda significativamente a enfriar los paneles y por ende aumentar su eficiencia promedio.

5.5 Configuración 4

En esta configuración se varían las distancias de los paneles, la velocidad de entrada del viento y la temperatura ambiente para estimar cuál es la interferencia existente entre los paneles en cuanto a transferencia térmica de uno a otro. Los resultados de la Tabla 12 concluyen que el coeficiente convectivo más elevado se encuentra en el centro de la fila de la granja, en particular, en el panel N°17. Tras estudiar el comportamiento de la transferencia de calor entre los paneles 16, 17 y 18 para las distancias 2,3, 1, 0,6 y 0,3 metros, se llega a la conclusión de que en las últimas 3 distancias existe un aumento de la temperatura a medida que se acercan los paneles, que sin embargo, no es significativo dado a que si bien los paneles están más próximos, el efecto del viento es mayor, pues debe recorrer menor distancia para alcanzarlos perdiendo menos momentum (Tabla 13). En el caso del distanciamiento de 2,3 m, se observa que el viento pierde efectividad en el enfriamiento de los paneles dado el distanciamiento que se propuso.

Dicho lo anterior, se decide evaluar el comportamiento de la temperatura en el panel N° 17 para las distintas distancias, velocidades de viento y temperatura ambiente en la configuración 4, así como obtener las eficiencias respectivas en el panel observado según el cambio de las variables mencionadas. En el Gráfico 1, se aprecia que cercano a 1 metro se encuentra la temperatura mínima de la configuración, por ende, la eficiencia máxima debiera estar cercana, en el Gráfico 2 se aprecia que efectivamente es donde ocurre la eficiencia máxima.

Tras obtener distintas relaciones para el comportamiento de la temperatura con respecto a las variables mencionadas anteriormente, se procede a estimar una ecuación general que logre determinar la temperatura crítica en el panel en cuestión. Se observa que la Ec. 4.14 entrega porcentajes de errores aceptables, 1,76 en el peor de los casos. Sin embargo, para temperaturas que están bajo 302 K, por lo que se utiliza la Ec. 4.8 para estos casos entregando un porcentaje de error de 0,91 en el peor de los casos. Esto se ve reflejado en los resultados exhibidos en la Tabla 16 donde se aprecia claramente que es la temperatura ambiente que tiene mayor incidencia en la variabilidad de temperatura de la granja solar.

Para poder encontrar una distancia promedio mínima que maximice la eficiencia se realiza un ajuste polinómico donde el más adecuado es la Ec. 4.2, según la Tabla 17, que luego de utilizar los valores de temperatura ambiente promedio 30,6 °C y velocidad del viento promedio 1,805 m/s, resulta en que la distancia promedio mínima que maximiza la eficiencia ocurre con 0,957 m de distanciamiento entre paneles. Esto se ve reflejado en el Gráfico 1 donde para valores inferiores a 0,5 m de separación entre paneles, se producen vórtices muy cercanos al panel (Figura 4.11) que aumentan la velocidad del flujo de viento en esa área aumentando la energía cinética que se traduce en una temperatura más elevada. Caso distinto sucede para valores más altos que 1,2 m, donde la separación entre paneles es lo suficientemente distante para que la temperatura del viento entre paneles tienda a la temperatura ambiente ya que el momentum del viento decae considerablemente como se aprecia en la Tabla 12.

Con la Ec. 4.15 se puede determinar cuándo distanciar paneles dentro de una granja solar fotovoltaica de manera automática, sirviendo como input para una futura configuración automatizada basada en sistemas ciberfísicos.

6 Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones que se extraen desde el trabajo realizado se describen a continuación, detallado punto a punto, en similitud con los objetivos y metodología descritas con anterioridad en el documento.

Para la simulación de la granja solar la conclusión más importantes es:

- Se logra identificar que la disposición de los paneles dentro de una granja solar fotovoltaica es significativa en cuanto al valor del proyecto en general. Esto sumado a que el distanciamiento entre paneles es mayor lo que causa que la velocidad del viento decae a medida que avanza en la configuración perdiendo efectividad en el enfriamiento de la granja.

Para los cambios de temperatura ambiente en las configuraciones:

- Si bien existe un aumento de temperatura entre los paneles de entrada y de salida, no existe un cambio significativo que afecte la eficiencia global. Sin embargo, existe un cambio sustancial con respecto a una diferencia de 4 °C aumentando la eficiencia en casi 2%.
- La temperatura de ráfaga es importante en la disminución de temperatura del panel, es aquí donde existe una oportunidad para la instauración de sistemas ciberfísicos, ya que se encuentra una disminución de hasta 3 grados Celsius con respecto a las temperaturas promedio, máximo y mínima de la configuración 2. De esta manera, se podría variar el distanciamiento hacia el óptimo para que el efecto de la temperatura del viento sea mayor.

Para los cambios de velocidad del viento en las configuraciones:

- Al igual que en el punto anterior, existe un aumento de temperatura entre los paneles de entrada y de salida, sin embargo, el cambio no es sustancial en la eficiencia global de la granja solar.

Para los cambios de distanciamiento entre paneles:

- Tras probar con simulaciones para diferentes distancias se determina que si bien existe un cambio de la eficiencia con los respectivos distanciamientos, tampoco es muy significativo, encontrándose un rango de 0,5 y 1,5 metros como un óptimo. Como el mínimo para la configuración dos es de 1,8 metros, se concluye que es suficiente para tener una buena eficiencia promedio durante las horas operativas de la granja, no obstante, con un aumento significativo de distanciamiento se encarecerá el proyecto como se muestra en el apartado 3.8.

En cuanto a las relaciones Ec. 4.8 y Ec. 4.14 el porcentaje de error es lo suficientemente bajo (1,76% máximo), por lo que son capaces de predecir la temperatura máxima que puede alcanzar un panel tras contar con la información atmosférica pertinente (velocidad del viento, temperatura ambiente y distanciamiento entre módulos).

Finalmente las recomendaciones para futuros trabajos a realizarse en el mismo campo que este, se puede identificar en:

- Realizar el análisis con datos en terreno y para distintas direcciones. Dado que computacionalmente es difícil trabajar con la turbulencia, sería de más ayuda una corroboración experimental.
- Determinar para un número mayor a 30 paneles, y dispuestos de forma más cercana a una planta solar fotovoltaica, qué sucede con la anomalía en los paneles centrales, pues de persistir esa anomalía, a través de sistemas ciberfísicos puede determinarse y recomendar distanciamientos entre paneles con tal de optimizar la eficiencia. Además de realizar un estudio económico para determinar la factibilidad de implementación.

7 Bibliografía

1. *A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions.* **Armstrong, S. y Hurley, W.G.** 2010, Applied Thermal Engineering, Vol. 30, págs. 1488-1495.
2. **Solanki, Chetan Singh.** *Solar Photovoltaic: Fundamentals, Technologies and Applications.* 2015.
3. *Modelling of a double-glass photovoltaic module.* **Notton, G., y otros.** 2005, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, págs. 2854-2877.
4. **Moya, Cristobal.** *Modelamiento Térmico Unidimensional y Transiente de un Panel Fotovoltaico.* Santiago : DIMEC, Universidad de Chile, 2016.
5. **Incropera, Frank P. y Dewitt, David P.** *Introduction to Heat Transfer 6ta ed.* s.l. : John Willey & Sons, 2011.
6. *Heat transfer during wind flow over rectangular bodies in the natural environment.* **Test, F. L., Lessman, R. C. y Johary, A.** 103, 1980, Journal of Heat Transfer, Vol. 2, págs. 262-267.
7. **Began, A. y Kraus, A.D.** *Heat Transfer Handbook.* s.l. : Wiley-IEEE, 2003.
8. *A comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and free convection.* **Churchill, S.W.** 1, 1976, Journal of American Institute of Chemical Engineers, Vol. 23, págs. 10-16.
9. **INIA.** Red Agrometeorológica de INIA. [En línea] <http://agromet.inia.cl/estaciones.php>.
10. *Wall effect on separate flow around an inclined flat plane at high incidence.* **Chuanjun Lan, L. J. (s.f.).** IMECE2013.
11. **Carrasco, Claudio.** *Diseño de un disipador de calor pasivo para un panel fotovoltaico inclinado operando en el norte de Chile.* Santiago : DIMEC, Universidad de Chile, 2015.
12. **Callister, William.** *Ciencia e Ingeniería de los materiales Tomo 2.* Barcelona : Reverté S.A., 1996.
13. **Yogesh, Jaluria y Torrance, Kenneth.** *Computational Heat Transfer 2a ed.* s.l. : Taylor & Francis, 2003.
14. **Mathew, John H. y Kurtis, D. Fink.** *Métodos Numéricos con MATLAB.* Madrid : Prentice Hall, 2000.
15. **Lee, HoSung.** *Thermal Design, Heat Sink, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells.* New Jersey : John Willey & Sons, 2010.

16. *An active cooling system for photovoltaic modules.* **Teo, H.G., Lee, P.S. y Hawlader, M.N.A.** 2012, Applied Energy, Vol. 90, págs. 309-315.
17. *A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting.* **Skoplaki, E., Boudouvis, AG y Palyvos, JA.** 2008, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 92, págs. 1393-1402.
18. *Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation.* **Schwingshackl, C., y otros.** 2013, Energy Procedia, Vol. 40, págs. 77-86.
19. *Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering.* **Koehl, M., y otros.** 2011, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, págs. 1638-1646.
20. *Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance.* **Mattei, M., y otros.** 2006, Renewable Energy, Vol. 31, págs. 553-567.
21. *Evaluation of high-temperature exposure of rack-mounted photovoltaic modules.* **Kurtz, S., y otros.** 2009, IEEE photovoltaic Specialist Conference, Vol. 34, págs. 2399-2404.
22. *Complete PV model considering its thermal dynamics.* **Tsai, H. L.** 36, 2013, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 1082, pág. 1073.
23. *A PSO algorithm for the calculation of the series and shunt resistances of the PV panel one-diode model.* **Sachez Barroso, J.C. , y otros.** 2014, Proceedings of the 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), págs. 1-6.
24. *Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile.* **Urrejola, Elias, y otros.** 2015, Energy Conversion and Management, Vol. 114, págs. 338-347.
25. **Universidad de Chile.** Explorador Solar. [En línea] [Citado el: 24 de Julio de 2016.] <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>.
26. **Comisión Nacional de Energía.** *Reporte Mensual Sector Energético Agosto 2016.* 2016.

