



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

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ENTRE UN PANEL FOTOVOLTAICO Y UNA  
TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL EN UN ENTORNO URBANO MEDIANTE  
SIMULACIONES CFD

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

VICENTE FELIPE SAAVEDRA FERRADA

PROFESOR GUÍA:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
BENJAMÍN HERRMANN PRIESNITZ  
JUAN OSSES MARQUEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2018

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ENTRE UN PANEL FOTOVOLTAICO Y UNA  
TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL EN UN ENTORNO URBANO MEDIANTE  
SIMULACIONES CFD

En el contexto de que el mundo esta optando por desechar la producción de energía mediante combustibles fósiles, irrumpen las energías renovables no convencionales dentro de las cuales la solar fotovoltaica y la eólica han tenido el mayor crecimiento en los últimos años. Estas energías se caracterizan por ser aprovechadas en grandes espacios abiertos los cuales son cada vez más escasos y por lo que en los últimos años los estudios van de la mano de la implementación de estas tecnologías en espacios urbanos, de lo que nace la necesidad de evaluar su desempeño bajo estas condiciones ambientales.

El presente trabajo se enfoca en el estudio de un panel fotovoltaico y una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius en el mismo espacio urbano como podría ser el techo de un edificio donde se reúnen condiciones para un buen desempeño de estas tecnologías. El principal punto a observar es la interacción entre la estela producida por el funcionamiento de la turbina, la cual acelera el viento incidente en dos zonas de vórtices de alta velocidad, y la instalación de un panel fotovoltaico en estas zonas, ya que el aumento de la velocidad del viento produce un medio de refrigeración natural para el panel fotovoltaico.

Se realizan simulaciones CFD en Ansys Fluent en 2 dimensiones para obtener el perfil de velocidades promedio en las zonas de vórtices de alta velocidad producidos aguas abajo de la turbina para 5 velocidades distintas en la zona urbana y 4 posiciones distintas en la estela. Posteriormente estos perfiles son usados como condiciones de borde para un modelo en 3 dimensiones del panel fotovoltaico, de manera de comparar la temperatura promedio de celda del panel por si solo con la de un panel aguas abajo de la turbina eólica. El panel fotovoltaico es simulado mediante la implementación de una fuente de calor en el volumen de la celda, la cual es calculada mediante el balance de la energía utilizada y no utilizada al producir energía según condiciones medioambientales del lugar.

Los resultados muestran que la temperatura del panel disminuye al aumentar la velocidad del viento y que al ser puesto en las zonas aprovechables aguas abajo de la turbina eólica de eje vertical la disminución de la temperatura es mayor con respecto a la del panel instalado sin turbina. Este resultado se traduce en un aumento de la eficiencia del panel fotovoltaico al ser implementado en las zonas de mayor velocidad aguas abajo de la turbina, lo que genera un aumento de la potencia generada por el panel que va desde un 0,58 % hasta un 2,95 % dependiendo de la velocidad del viento.

El trabajo demuestra como la implementación de un sistema con las dos tecnologías estudiadas puede mejorar el desempeño del panel fotovoltaico. La factibilidad queda sujeta a un análisis del objetivo de implementación de las tecnologías, como a un análisis económico respecto a la potencia generada por el espacio usado.



*Welcome my son,*

*Welcome... to the machine*



# Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo al profesor Williams por todo este tiempo que hemos trabajado juntos, estos años me han ayudado mucho a crecer como profesional y nunca voy a olvidar todas las conversaciones y las risas en su oficina. Gracias por estar siempre cuando era necesario para resolver la infinidad de problemas que me encontré en este proceso. Agradecer también a Benjamín que durante este tiempo siempre me dio apoyo cuando lo necesitaba y me iluminó en las situaciones que estaba estancado. Y a Juan Osses que aunque nos vimos pocas veces su consejo siempre fue un aporte para este trabajo.

Agradecer a todas las amistades que he forjado en la U durante estos años, los cabros del almuerzo: Feña, Mati, Hugo, Tata, Ale, Arturo y Tuti. También Esteban y Diego por todas esas historias dignas de recordar. A Diego Cortínez que me ha acompañado desde el principio de este camino. Al Tata y Arturo nuevamente, ahora por todo el apañe en formar bandas que sólo fracasaron pero que siempre ayudaron a liberar energía y pasarlo bien durante estos años.

De mecánica quiero agradecer el apañe de todos los cabros de MiercolesyJueves, siempre dispuestos a “estudiar” o conversar para distender el ambiente universitario. A Seba Hurtado, por siempre estar cuando lo necesitaba, por todas esas conversaciones y por todo el aguante y ayuda durante todos estos años. Y a Joaco, Massa, Juaco, Salinas y Lukas, por todas las partidas que se jugaron este año y las risas en discord.

Quiero agradecer a Zole, mi amiga más duradera, por todo el apoyo y la confianza que ha tenido en mí siempre. A mi amigo Hugo por todo el apañe y por siempre estar para una conversación nocturna y reírse un rato del mundo. A mi bro Danilo por todo el apoyo durante estos años en mecánica, y por la tremenda amistad que ha sido fundamental durante este proceso de mi vida.

A mi familia Morán-Zuñiga por siempre confiar en mí, por el cariño y por darme ánimo para terminar este proceso. Al papá Vicho, el Tata y la Abu por lo que me enseñaron de la vida. A mi tío Loco y Fer, por su constante preocupación, cariño y apoyo en mi formación como su colega. A mi Abuela y mi tía Paty, por siempre estar ahí para lo que necesitara y porque simplemente no sería nada sin ellas.

Finalmente agradecer a mi familia mona por el apoyo incondicional y por ser el pilar fundamental en mi vida, Foster y Kika, mi Papá Mono por todo lo que ha hecho por mí, por quererme, por apoyarme y creer en mí, por la paciencia que siempre me ha tenido, por todas las conversaciones y las risas, y por todo lo que me ha enseñado para ser una buena persona en este mundo. Y a mi Mamá por siempre creer que yo podía más, por apoyarme en todas mis decisiones, por el amor y por todo lo que se ha esforzado por darme lo mejor en la vida, por cada sermón y cada risa, y por ser la mejor mamá y el mejor modelo a seguir que se puede tener.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Turbinas eólicas de eje vertical . . . . .	3
2.1.1. Turbinas tipo Savonius . . . . .	4
2.2. Coeficientes adimensionales para VAWT . . . . .	4
2.3. Emplazamiento de turbinas . . . . .	5
2.4. Energía solar . . . . .	6
2.5. Radiación solar en la tierra . . . . .	6
2.6. Paneles fotovoltaicos . . . . .	7
2.7. Generación de calor en paneles fotovoltaicos . . . . .	7
2.8. Efecto de la temperatura en paneles fotovoltaicos . . . . .	8
2.9. Transferencia de calor . . . . .	9
2.9.1. Conducción . . . . .	9
2.9.2. Convección . . . . .	10
2.9.3. Radiación . . . . .	12
2.10. Efecto de la velocidad del viento en paneles PV . . . . .	12
2.11. Efecto estela (Wake) en VAWT . . . . .	13
2.12. Transferencia de calor en un panel fotovoltaico . . . . .	13
2.13. Modelo de predicción de la temperatura de la celda . . . . .	14
2.14. Potencia generada y eficiencia de un panel fotovoltaico . . . . .	15
2.15. Antecedentes de la localización . . . . .	15
2.15.1. Radiación . . . . .	16
2.15.2. Velocidad del viento . . . . .	17
<b>3. Metodología y procedimiento</b>	<b>18</b>
3.1. Estudio bibliográfico y reconocimiento del software ANSYS Fluent . . . . .	18
3.2. Definición del problema . . . . .	18
3.3. Simulación VAWT 2D . . . . .	19
3.4. Simulación panel fotovoltaico 3D . . . . .	19
3.5. Análisis de resultados . . . . .	20
<b>4. Simulaciones VAWT</b>	<b>21</b>
4.1. Modelo . . . . .	21
4.2. Independencia de malla y validación . . . . .	23
4.3. Resultados . . . . .	26
4.3.1. Velocidad y energía cinética turbulenta . . . . .	26

4.3.2. Perfiles de velocidad obtenidos . . . . .	32
<b>5. Simulaciones Panel Solar PV</b>	<b>35</b>
5.1. Modelo . . . . .	35
5.2. Independencia de malla y validación . . . . .	37
5.3. Resultados . . . . .	40
5.3.1. Perfiles de velocidad uniforme . . . . .	40
5.3.2. Perfiles de velocidad generados por VAWT . . . . .	43
5.3.3. Comparación de resultados en la celda fotovoltaica . . . . .	51
<b>6. Análisis y discusión de resultados</b>	<b>56</b>
6.1. Modelo turbina eólica y obtención de perfiles . . . . .	56
6.2. Modelo del panel fotovoltaico . . . . .	57
6.2.1. Resultados para velocidad uniforme . . . . .	57
6.2.2. Resultados para velocidad afectada por la VAWTV . . . . .	58
6.3. Implementación de ambas tecnologías . . . . .	59
<b>Conclusión</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>
<b>Anexos</b>	<b>64</b>
A. Lado retorno del álabe a 2 [m] de distancia del panel . . . . .	i
B. Lado avance del álabe a 2 [m] de distancia del panel . . . . .	v

# Índice de Tablas

4.1.	Dimensiones de la turbina Savonius utilizada en el estudio. . . . .	21
4.2.	Número de elementos para las distintas mallas simuladas. . . . .	23
4.3.	Resultados obtenidos para el coeficiente de potencia a distintos valores de $TSR$ para $v = 7[m/s]$ . . . . .	25
4.4.	Valor de la velocidad de rotación para las distintas velocidades de flujo libre $v_\infty$	26
5.1.	Dimensiones volumen de control para modelo del panel. . . . .	35
5.2.	Materiales del estudio junto con sus dimensiones y propiedades. . . . .	37
5.3.	Resumen datos y resultados para validación de mallado . . . . .	37
5.4.	Comparación entre las temperaturas obtenidas en la celda del panel y la bibliografía. . . . .	39
5.5.	Temperaturas promedio en las distintas capas del modelo. . . . .	42
5.6.	Resumen resultados para la temperatura promedio en las distintas capas del panel a distintos perfiles de velocidad aguas abajo de la VAWT . . . . .	51
5.7.	Comparación entre la temperatura promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV. . . . .	53
5.8.	Comparación de la temperatura máxima en la parte inferior de la celda del panel PV. Elaboración propia. . . . .	53
5.9.	Comparación entre la eficiencia promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV. . . . .	54
5.10.	Disminución de la temperatura promedio de celda para las distintas configuraciones con respecto al panel sin interacción con la turbina. . . . .	55
5.11.	Aumento de la potencia generada por el panel para las distintas configuraciones con respecto al panel sin interacción con la turbina. . . . .	55

# Índice de Ilustraciones

2.1. Clasificación principal de turbinas eólicas de eje vertical. . . . .	3
2.2. Principio de funcionamiento rotor Savonius . . . . .	4
2.3. Distintas configuraciones de BAWT . . . . .	5
2.4. Capas de un panel solar . . . . .	7
2.5. Relación entre la eficiencia de operación y de referencia con la temperatura de operación de distintos paneles PV . . . . .	8
2.6. Evolución del factor de pérdidas térmicas de un panel fotovoltaico según la velocidad del viento. . . . .	12
2.7. Efecto de estela producido por una VAWT tipo Savonius. . . . .	13
2.8. Representación de los mecanismos de transferencia de calor en el panel fotovoltaico. . . . .	14
2.9. Zona donde se obtienen las condiciones ambientales para el problema. . . . .	15
2.10. Radiación incidente promedio en un plano inclinado a $33^\circ$ para distintas horas y meses de un año en la localidad estudiada. . . . .	16
2.11. Ciclo medio de velocidad del viento en la localidad estudiada. . . . .	17
3.1. Diagrama del problema a simular. Elaboración propia. . . . .	19
4.1. Turbina Savonius usada en el modelo 2D en ANSYS Fluent. . . . .	21
4.2. Dimensiones en mm del volumen de control usado en las simulaciones. . . . .	22
4.3. Identificación de las distintas condiciones de borde del modelo. . . . .	22
4.4. Resultados del coeficiente de potencia para las distintas mallas estudiadas. . . . .	24
4.5. Mallado para el número de elementos seleccionado. . . . .	24
4.6. Gráfico comparativo entre los valores del coeficiente de potencia obtenidos y la bibliografía. . . . .	25
4.7. Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para velocidad de flujo libre 1m/s. . . . .	27
4.8. Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para velocidad de flujo libre 2m/s. . . . .	28
4.9. Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para velocidad de flujo libre 3m/s. . . . .	29
4.10. Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para velocidad de flujo libre 5m/s. . . . .	30
4.11. Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para velocidad de flujo libre 7m/s. . . . .	31
4.12. Detalle de los puntos generados en el dominio para obtener mediciones. . . . .	32
4.13. Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con velocidad de flujo libre 1m/s	33
4.14. Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con velocidad de flujo libre 2m/s	33
4.15. Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con velocidad de flujo libre 3m/s	33
4.16. Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con velocidad de flujo libre 5m/s	34
4.17. Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con velocidad de flujo libre 7m/s	34

5.1. Modelo para las simulaciones del panel PV. . . . .	35
5.2. Detalle condiciones de borde del modelo. . . . .	36
5.3. Modelo de PV simplificado usado en la bibliografía. . . . .	36
5.4. Detalle del panel solar generado para el modelo. . . . .	37
5.5. Gráfico de los valores de la temperatura promedio de celda en función del número de elementos del modelo. Elaboración propia. . . . .	38
5.6. Mallado del panel solar generado para el modelo con el número de elementos seleccionado. . . . .	38
5.7. Puntos de medición usados en la metodología experimental de Nizetic y Cabo. . . . .	39
5.8. Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	40
5.9. Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	41
5.10. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 1m/s$ . Elaboración propia. . . . .	41
5.11. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 2m/s$ . Elaboración propia. . . . .	41
5.12. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 3m/s$ . Elaboración propia. . . . .	42
5.13. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 5m/s$ . Elaboración propia. . . . .	42
5.14. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 7m/s$ . Elaboración propia. . . . .	42
5.15. Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	43
5.16. Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	44
5.17. Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	44
5.18. Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	45
5.19. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 1m/s$ . Elaboración propia. . . . .	45
5.20. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 2m/s$ . Elaboración propia. . . . .	45
5.21. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 3m/s$ . Elaboración propia. . . . .	46
5.22. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 5m/s$ . Elaboración propia. . . . .	46
5.23. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 7m/s$ . Elaboración propia. . . . .	46
5.24. Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	47
5.25. Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	48
5.26. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_{\infty} = 1m/s$ . Elaboración propia. . . . .	49

5.27. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 2m/s$ . Elaboración propia. . . . .	49
5.28. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia. . . . .	49
5.29. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia. . . . .	50
5.30. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia. . . . .	50
5.31. Distribución de la temperatura en la parte inferior de la celda fotovoltaica para distintas configuraciones y $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia. . . . .	52
5.32. Distribución de la temperatura en la parte inferior de la celda fotovoltaica para distintas configuraciones y $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia. . . . .	52
5.33. Comparación entre la temperatura promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV. Elaboración propia. . . . .	53
5.34. Comparación de la eficiencia promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV. Elaboración propia. . . . .	54
A.1. Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	i
A.2. Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	ii
A.3. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia. . . . .	iii
A.4. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 2m/s$ . Elaboración propia. . . . .	iii
A.5. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia. . . . .	iii
A.6. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia. . . . .	iv
A.7. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia. . . . .	iv
B.1. Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	v
B.2. Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia. . . . .	vi
B.3. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia. . . . .	vii
B.4. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 2m/s$ . Elaboración propia. . . . .	vii
B.5. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia. . . . .	vii
B.6. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia. . . . .	viii
B.7. Distribución de la velocidad alrededor del panel para $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia. . . . .	viii

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto y Motivación

En la actualidad y debido al constante crecimiento de la población y de la industria, la necesidad energética a nivel mundial sólo ha ido en alza. Junto con esto el precio de producir energía a base de combustibles fósiles ha aumentado debido al conocido agotamiento gradual de estos. Es por esto y por los efectos negativos que tiene producir energía utilizando este tipo de combustibles que el desarrollo a nivel mundial ha optado por opciones sustentables a largo plazo, como son las energías renovables no convencionales (ERNC). En Chile, según datos del Ministerio de Energía, al 2014 un 59 % de la producción de energía eléctrica se basa en combustibles fósiles, principalmente carbón (41 %), gas natural (11 %) y derivados del petróleo (7 %). Este alto porcentaje tiene altos costos ambientales y económicos, ya que Chile importa alrededor del 90 % de los productos antes mencionados [1]. Debido a esto Chile ha optado por no quedar atrás en temas del desarrollo de un futuro sustentable, existen diversas políticas energéticas que apuntan a un desarrollo del país a base de energía renovables, entre estas se encuentra “Energía 2035” y “Energía 2050” que tienen como meta principal en estos años que Chile tenga una matriz eléctrica compuesta al menos en un 60 % y 70 % de energías renovables respectivamente [1]. Los avances tecnológicos han permitido el crecimiento de las ERNC a nivel mundial y según la International Energy Agency (IEA) las fuentes con el crecimiento más alto son principalmente la energía solar fotovoltaica (PV, en inglés photovoltaic) y la energía eólica [2][3]. Según el “Reporte del Sector Energético - Octubre 2017” en Chile la capacidad instalada neta de ERNC asciende a 18 % que equivalen a 4037 MW. La energía eólica junto con la energía solar PV son las que tienen mayor cantidad de MW en construcción, en total son 758 MW que equivalen a un 82,7 % de los proyectos de ERNC [4]. Otra tendencia importante a nivel mundial son los llamados “Zero Energy Buildings” (ZNE), los cuales básicamente se caracterizan por un consumo energético neto cero para la red, esto lo logran generando su propia energía de manera renovable [5]. Entre las maneras de generar esta energía se encuentra la implementación de paneles solares PV en los techos (Rooftop PV) y pequeñas turbinas eólicas [6][7], para de esta manera aprovechar la radiación incidente y las corrientes que se forman en altura. Debido a todo el acontecer actual parece una buena oportunidad integrar más de una tecnología en un sólo lugar, plantas híbridas solar PV y eólicas son una combinación común y es por esto que parece una buena idea instalar ambas tecnologías en el techo de un edificio. Una pregunta interesante que surge es si tiene alguna ventaja o desventaja la interacción de dos tecnologías en un espacio reducido como es el techo de un edificio, esto principalmente debido a que la eficiencia de un panel está estrictamente relacionada con su temperatura y las turbinas eólicas generan fenómenos en su estela que cambian la transferencia de calor en el medio, por lo que esto podría afectar en la eficiencia en un sistema híbrido. Es por esto que el siguiente estudio abarca la integración de ambas

tecnologías en un espacio, generando simulaciones en base a condiciones ambientales con el fin de encontrar la temperatura de celda de un panel PV que se encuentra aguas abajo de una turbina eólica de eje vertical, para así obtener la eficiencia del panel.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Estudiar el impacto de una turbina eólica de eje vertical en el desempeño de un sistema híbrido de panel fotovoltaico y VAWT ubicado en el techo de un edificio bajo distintas configuraciones, usando como criterio la eficiencia del panel.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Generar un modelo del problema para realizar simulaciones en el software CFD ANSYS.
- Estudiar los casos con y sin turbina eólica a modo de comparar la temperatura del panel mediante las simulaciones en el software CFD.
- Mejorar la eficiencia del panel PV mediante la variación de la posición relativa entre el panel PV y la VAWT iterando en el software CFD.
- Determinar si la hibridación posee ventajas sobre la implementación de una sola tecnología en el espacio reducido del techo de un edificio.

## **1.3. Alcances**

El presente trabajo de título abarca la generación de un modelo 2D de una VAWT para obtener el perfil de velocidad aguas abajo de esta y usarlo como condición de borde en un modelo 3D de un panel fotovoltaico, con el fin de obtener la temperatura de celda de este al ser sumergido en el flujo de una turbina eólica y compararla con la del panel sin turbina. Por otro lado, el estudio abarca cambiar la posición relativa entre el panel PV y la VAWT para distintas velocidades de viento, de manera de mejorar la eficiencia del panel y observar cómo cambia esta junto con la temperatura de celda del panel fotovoltaico al implementar ambas tecnologías en un mismo espacio.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Turbinas eólicas de eje vertical

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT, por su nombre en inglés Vertical Axis Wind Turbine) son un tipo de aerogenerador que se caracteriza por tener el eje del rotor en dirección transversal a la dirección del viento, además de ubicar la mayoría de sus componentes en la base de la estructura.

La principal ventaja que tienen respecto a las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine) es que son omnidireccionales, es decir, no requieren una dirección del viento específica para funcionar, por lo que tampoco necesitan sensores para ajustar la orientación. Otras de las ventajas es que pueden aprovechar flujo turbulento, pueden estar más cerca unas de otras en comparación con las HAWT y, debido a la distribución de sus componentes son de más fácil mantención.

A pesar de que estas turbinas presentan distintas formas, la mayoría se puede clasificar en uno de dos grupos: las tipo Savonius que trabajan principalmente con la fuerza de arrastre que provoca el fluido al impactar los álabes, o las tipo Darrieus que trabajan con la fuerza de sustentación que provoca el fluido.



(a) Turbina Darrieus

(b) Turbina Savonius

Figura 2.1: Clasificación principal de turbinas eólicas de eje vertical. [8]

### 2.1.1. Turbinas tipo Savonius

Las turbinas tipo Savonius consisten en dos o más álabes de forma cilíndrica o elíptica puestos en forma de 'S' como se observa en la Figura 2.2. Estas basan su funcionamiento en el principio de arrastre debido a que en distintos instantes de tiempo el coeficiente de arrastre de la superficie que enfrenta al viento de manera cóncava es mayor que la que lo enfrenta de manera convexa, lo que produce la rotación de la turbina. Debido al funcionamiento en base a fuerza de arrastre, este tipo de turbinas poseen un bajo coeficiente de potencia que sólo llega a valores del orden de 25 % a 35 % y no alcanzan mayores velocidades tangenciales que el viento incidente, por lo que trabajan a bajos *tip speed ratio* (*TSR*) alcanzando óptimos de eficiencia entre 0.8 y 1 [8].

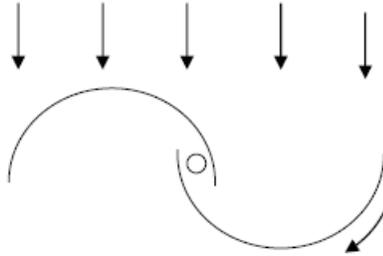


Figura 2.2: Principio de funcionamiento rotor Savonius.[8]

## 2.2. Coeficientes adimensionales para VAWT

La eficiencia de las turbinas eólicas puede ser caracterizada usando dos coeficientes adimensionales: el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) y el coeficiente de torque ( $C_t$ ) [8].

El coeficiente de potencia se puede definir como la razón entre la potencia desarrollada por el rotor y la potencia disponible en el recurso eólico. Se define

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho H D v_\infty^3} \quad (2.1)$$

donde  $P_t$  corresponde a la potencia desarrollada por la turbina,  $\rho$  a la densidad del viento,  $v_\infty$  a la velocidad de flujo libre del viento,  $H$  a la altura y  $D$  al diámetro del rotor de la turbina.

Por otro lado el coeficiente de torque es la razón entre el torque desarrollado por la turbina con respecto al máximo torque que podría desarrollar según las condiciones del recurso. Se define

$$C_t = \frac{4T}{\rho H v_\infty^2 D^2} \quad (2.2)$$

donde  $T$  corresponde al torque desarrollado por la turbina.

Otro parámetro utilizado en el contexto de turbinas eólicas es el *tip speed ratio* (*TSR*, velocidad de punta de álabes) el cual relaciona la velocidad de la punta del álabes con la

velocidad incidente que enfrenta la turbina. Se define

$$TSR = \frac{\omega D}{2v_{\infty}} \quad (2.3)$$

donde  $\omega$  corresponde a la velocidad de rotación de la turbina.

De esta última relación se desprende que:

$$C_p = C_t \cdot TSR \quad (2.4)$$

### 2.3. Emplazamiento de turbinas

La velocidad del viento se ve afectada en espacios urbanos debido a que las construcciones en estos actúan como obstáculos para el flujo de viento, es por esto que se provoca una aceleración que implica una mayor velocidad aprovechable por las turbinas eólicas de eje vertical en un espacio urbano, debido a la posibilidad de implementarlas en espacios más reducidos que el campo abierto como podría ser el techo de un edificio. El concepto de emplazar las turbinas en estas zonas para aprovechar el aumento de la velocidad se ha denominado Building Augmented Wind turbines (BAWT).[9]

Dentro de las posibles configuraciones de las turbinas en espacios urbanos se encuentran

- Techos o bordes de edificios
- Entre edificios
- A través de edificios

como se puede observar en la Figura 2.3.

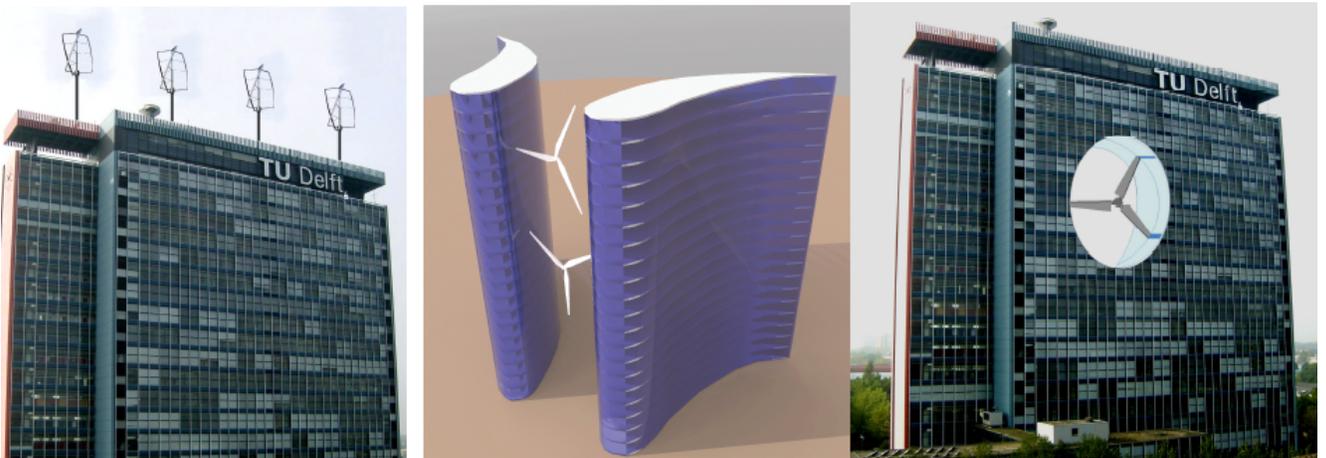


Figura 2.3: Distantes configuraciones de BAWT, de izquierda a derecha: techos o bordes de edificios, entre edificios y a través de edificios.[9]

## 2.4. Energía solar

La energía solar es una importante fuente de energía renovable que se caracteriza por aprovechar la energía proveniente del Sol en forma de radiación electromagnética mediante el uso de diversas tecnologías. Dependiendo de la tecnología usada existen al menos dos ramas características del uso de esta energía para la producción de energía eléctrica, estas son la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica. La primera se enfoca en el uso de la radiación solar para calentar un fluido para su uso en ciclo térmico con el fin producir electricidad, mientras que la segunda utiliza la radiación en una forma más directa mediante el uso de la tecnología de *celdas solares*, las cuales aprovechan las propiedades de materiales semiconductores para, mediante el *efecto fotoeléctrico*, producir energía.

## 2.5. Radiación solar en la tierra

El Sol, la estrella central de nuestro sistema planetario, posee un núcleo en constante proceso de fusión, lo que provoca que su temperatura superficial sea de alrededor de  $5700^{\circ}K$  y que se emita energía en forma de radiación electromagnética hacia el espacio. Esta radiación se caracteriza por llegar a la tierra en la banda espectral de  $0,3$  a  $2,5 \mu m$  cubriendo parte del espectro de radiación ultravioleta (UV), el espectro de radiación visible y parte del de luz infrarroja. Este flujo de radiación fuera de la atmósfera terrestre es del orden de  $1367 [W/m^2]$  y se conoce como constante solar.

La radiación solar terrestre se ve afectada por distintos factores que disminuyen su potencial entre el espacio y el suelo, entre ellos se encuentran efectos atmosféricos como la absorción, la dispersión (*scattering*) y la variación de condiciones locales como nubosidad y contaminación, además de la posición espacial que se caracteriza para estos casos con la latitud terrestre. Los efectos incluyen variaciones de la energía recibida, como también del contenido en el espectro de luz y el ángulo en el que se recibe de forma directa la radiación. Debido a los efectos que produce la atmósfera terrestre en la radiación solar proveniente del espacio es que es necesario definir una serie de conceptos.

- **Radiación solar directa:** Corresponde a la fracción de la radiación solar que no se ve afectada por la atmósfera.
- **Radiación solar difusa:** Es la fracción de la radiación solar que se ve afectada por los factores anteriormente mencionados, principalmente por el scattering lo que provoca que su trayectoria se desvie.
- **Albedo:** Es la fracción de radiación reflejada por el suelo terrestre.
- **Radiación Total:** Suma entre la radiación solar directa y la radiación solar difusa.
- **Irradiancia:** Radiación total incidente en un área y se mide en  $[W/m^2]$ , el valor de este parámetro es fundamental para los cálculos en torno a la energía solar y usualmente se obtiene mediante mediciones en terreno acompañadas de modelos de predicción.

## 2.6. Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos son equipos capaces de transformar energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, el cual fue observado por el físico francés A. E. Becquerel en 1839. El efecto que observó fue que al exponer al sol dos placas de metal sumergidas en una solución se producía una corriente eléctrica, posteriormente esto fue explicado de manera que la luz absorbida causa una excitación de un portador de carga a un estado de energía más elevado, lo que produce un potencial eléctrico.

El componente fundamental de los paneles fotovoltaicos es la celda fotovoltaica, dentro de un panel existe un arreglo de estas celdas el cual permite convertir la energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica. Las celdas fotovoltaicas están compuestas por materiales semiconductores (principalmente silicio) los cuales permiten desarrollar el efecto fotovoltaico para la conversión de energía.

Para asegurar la vida útil de las celdas solares, éstas son protegidas de las condiciones medioambientales por distintos materiales, usualmente un panel solar está compuesto por cinco capas, las cuales en orden son: Vidrio templado, capa encapsulante EVA, celdas fotovoltaicas, otra capa encapsulante EVA y finalmente una capa polimérica de Tedlar.

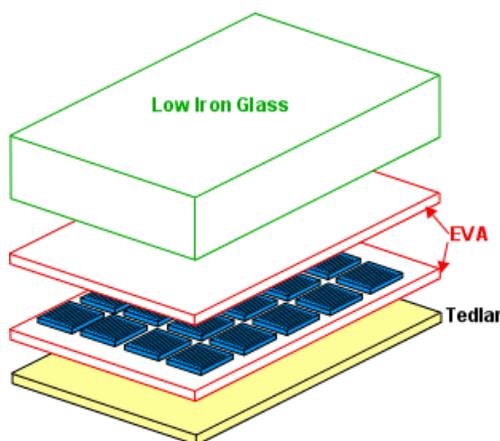


Figura 2.4: Distintas capas que componen un panel solar.[10]

## 2.7. Generación de calor en paneles fotovoltaicos

Debido a que no toda la energía puede ser absorbida o transformada por el panel, se producen diversas pérdidas, las cuales en su mayoría se transforman en calor, produciendo un aumento en la temperatura de las celdas del panel. Entre las pérdidas que producen calor se encuentran las nombradas a continuación [11]:

- **Pérdidas por absorción incompleta:** Debido a que las celdas tienen un límite de grosor de la capa de semiconductores, por lo que tienen un límite de absorción y el resto de la energía se pierde en calor.

- **Pérdidas por falta o exceso de energía de fotones incidentes:** Principalmente porque los semiconductores trabajan en una banda de energía particular, por lo que cualquier fotón con energía fuera de esta es perdido.
- **Pérdidas por absorción en otros materiales:** No todo el panel PV está compuesto de celdas fotovoltaicas, por lo que parte de la energía es absorbida por el resto de los materiales en forma de calor.
- **Pérdidas eléctricas:** debido a los límites de conductividad se producen pérdidas resistivas.

## 2.8. Efecto de la temperatura en paneles fotovoltaicos

La eficiencia de un panel fotovoltaico comercial usualmente está especificada para condiciones estándar del fabricante, la operación en condiciones reales usualmente está afectada por el ambiente (radiación solar, velocidad del viento, etc) y por la propia generación de calor del panel debido a sus características y a las distintas pérdidas ya mencionadas.

En la Figura 2.5 se observa como para varios tipos de paneles fotovoltaicos con celdas a base de Silicio el aumento de la temperatura de operación del panel disminuye la relación entre la eficiencia a la temperatura de operación  $\eta_T$  y la eficiencia a la temperatura de referencia del panel  $\eta_{T_{ref}}$ . Por lo tanto, a mayor temperatura de operación del panel con respecto a la temperatura de referencia, menor es la eficiencia del módulo.

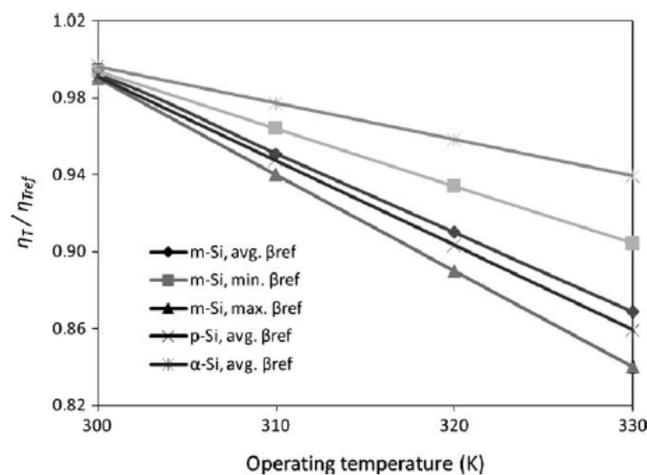


Figura 2.5: Relación entre la eficiencia de operación y de referencia con la temperatura de operación de distintos paneles PV.[12]

## 2.9. Transferencia de calor

Para conocer la temperatura de pared y de celda del panel es necesario conocer los fenómenos de transferencia de calor involucrados entre el panel fotovoltaico y el ambiente, y entre las distintas capas de material que posee. La transferencia de calor ocurre mediante tres mecanismos: **conducción, convección y radiación.**

### 2.9.1. Conducción

La conducción corresponde al mecanismo de transferencia de energía entre partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, resultado de interacciones microscópicas. La conducción tiene lugar en sólidos como también en fluidos en reposo, lo primero mediante la combinación de las vibraciones moleculares y el transporte de energía por electrones libres, y en fluidos ocurre debido a las colisiones y la difusión que ocurren dentro del movimiento aleatorio de sus moléculas.

La tasa en la que ocurre la conducción de calor esta sujeta a propiedades intrínsecas del medio como también a su configuración geométrica, su espesor y a la diferencia de temperatura a través del medio. De estas propiedades se desprende la conductividad térmica del material en un proceso unidimensional ( $k$ ), que corresponde a una medida de la capacidad de un material para conducir calor. Con estos conceptos se define el flujo de calor por unidad de área, mediante la Ley de Fourier:

$$\dot{q} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

donde  $\dot{q}$  corresponde al flujo de calor en el material en  $[W/m^2]$ ,  $k$  se encuentra en unidades de  $[W/m^2K]$  y  $dT/dx$  corresponde al gradiente de temperatura en la dirección  $x$ .

Para el caso transiente de una pared que además genera calor, la ecuación de calor unidimensional en régimen transitorio queda:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

donde  $\dot{e}_{gen}$  corresponde al flujo de energía generado por el material en unidades de  $[W/m^2]$ ,  $\frac{\partial T}{\partial t}$  corresponde al gradiente de temperatura en el tiempo, y  $\alpha [m^2/s]$  es la difusividad térmica del material que representa la velocidad a la que se propaga el calor a través de este y se define como sigue:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} \quad (2.7)$$

donde  $\rho$  corresponde a la densidad del material y  $C$  a su calor específico.

## 2.9.2. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de energía que se produce entre una superficie sólida y un fluido adyacente en movimiento, y en el cual mientras mayor sea la rapidez del fluido, mayor será la de transferencia de calor por este mecanismo. Este fenómeno comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos que se ven generados por la interacción de un fluido en movimiento con una pared sólida de distinta temperatura. La ecuación que rige el fenómeno de convección es la **ley de Newton del enfriamiento**, que por unidad de área se expresa

$$\dot{q}_{conv} = h\Delta T \quad (2.8)$$

donde  $h$  corresponde al coeficiente de transferencia de calor por convección que se mide en  $[W/m^2]$  y  $\Delta T$  corresponde a la diferencia entre la temperatura del cuerpo sólido y la temperatura del fluido en movimiento. El coeficiente convectivo  $h$  es un parámetro que se determina en forma experimental y depende de la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, su velocidad y sus propiedades intrínsecas.

El fenómeno de convección se puede dividir en dos casos particulares: la **convección forzada** es aquella donde el fluido es forzado a fluir sobre la superficie sólida mediante condiciones externas, ya sea un ventilador, una bomba, o el viento. Mientras que la **convección natural** es causada por las fuerzas de empuje que se producen en el fluido debido a las diferencias de densidad por variación de temperatura.

Para entender mejor estos fenómenos que afectarán la temperatura del panel se definen los siguientes números adimensionales:

### Número de Nusselt

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (2.9)$$

donde  $L_c$  representa la longitud característica del problema estudiado.

Este número adimensional representa el aumento que introduce la convección a la transferencia de calor a través de una capa de fluido en relación con la conducción a través de la misma. De manera que si  $Nu > 1$  la transferencia de calor es mejorada por la convección en el sistema, mientras que si  $Nu = 1$  el problema es netamente de conducción.

### Número de Prandtl

Este número compara el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica, mediante la difusividad molecular de cantidad de movimiento que corresponde a la capacidad del fluido de transmitir el momento, y por ende relacionada con la convección, y la difusividad molecular del calor que tiene que ver con la conducción del material. Se define entonces

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.10)$$

donde  $\mu$  corresponde a la viscosidad dinámica del fluido en unidades de  $[kg/ms]$ .

### Número de Reynolds

El número de Reynolds corresponde a la razón entre las fuerzas de inercia en un fluido con

las fuerzas viscosas, de manera que

$$Re = \frac{\rho_f V L_c}{\mu} \quad (2.11)$$

donde:

$\rho_f$  : densidad del fluido [ $kg/m^3$ ]

$V$  : velocidad del fluido libre [ $m/s$ ]

$L_c$  : longitud característica de la configuración geométrica [ $m$ ]

La transición de un flujo laminar a un flujo turbulento depende de su configuración geométrica, su aspereza superficial, la velocidad del fluido, su temperatura y sus propiedades, el número de Reynolds resume estas propiedades y con el se puede caracterizar en que estado se encuentra el fluido dependiendo de su configuración geométrica.

### Número de Grashof

El número de Grashof corresponde a la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre un fluido en el régimen de convección natural. Se define

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (2.12)$$

donde:

$g$  : aceleración gravitacional [ $m/s^2$ ]

$\beta$  : coeficiente de expansión volumétrica [ $1/K$ ]

$T_s$  : temperatura de la superficie [ $^{\circ}C$ ]

$T_\infty$  : temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie [ $^{\circ}C$ ]

$L_c$  : longitud característica de la configuración geométrica [ $m$ ]

$\nu$  : viscosidad cinemática del fluido [ $m^2/s$ ]

### Convección forzada y natural combinadas

Debido al efecto que puede tener la convección natural en situaciones en las que existen convección forzada a bajas velocidades, se desarrolla un criterio para considerar la convección natural en la transferencia de calor en un caso en el que exista también convección forzada. El criterio queda especificado por el número adimensional  $Gr/Re^2$ , el cual representa la importancia de la convección natural en el caso de convección combinada.

Para  $Gr/Re^2 < 0,1$  la convección natural pasa a ser despreciable, mientras que para  $Gr/Re^2 > 10$  la convección forzada puede ser despreciada. En el caso que  $0,1 < Gr/Re^2 < 10$  ambos tipos de convección deben ser considerados en el análisis del problema de transferencia de calor [13].

### 2.9.3. Radiación

La radiación es el mecanismo de transferencia de calor producido por la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas. A diferencia de los otros dos medios de transferencia de calor este mecanismo no requiere un medio para funcionar y no sufre atenuaciones en el vacío. De esta manera la energía producida por el sol llega a la tierra y es el principal componente de la producción de energía en los paneles fotovoltaicos. Se presenta la ecuación que rige el intercambio de energía mediante radiación

$$Q_{rad} = \varepsilon A_s \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.13)$$

donde:

$\varepsilon$  : emisividad de la superficie

$A_s$  : área del cuerpo en que ocurre la transferencia de calor

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann  $5,67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$

$T_{1-2}$  : temperatura de la superficie de los cuerpos  $[^\circ K]$

### 2.10. Efecto de la velocidad del viento en paneles PV

En la Figura 2.6 se observa una serie de medidas in situ tomadas a paneles fotovoltaicos en el sur de Grecia. En estas se aprecia que al aumentar la velocidad del viento el factor de pérdidas térmicas tiende a aumentar en el panel, es decir al aumentar la velocidad del viento al que está sometido un sistema de paneles PV, la transferencia de calor hacia el ambiente, principalmente por convección forzada, mejora. Por lo tanto, se crea una especie de sistema de refrigeración gracias al efecto del aumento de la velocidad del viento. Debido a este fenómeno es interesante estudiar el efecto que tiene la estela (o Wake) de una VAWT en la temperatura del panel.

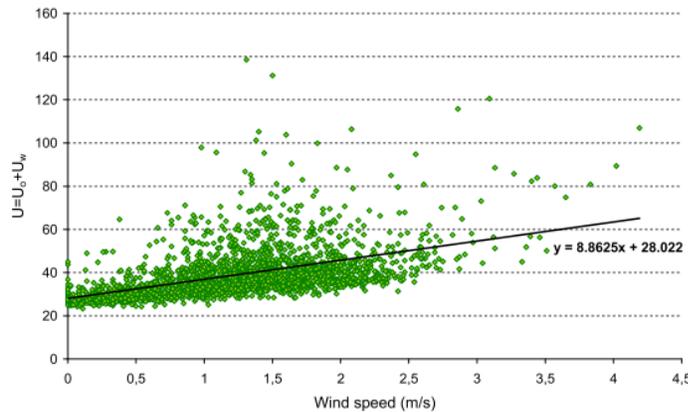


Figura 2.6: Evolución del factor de pérdidas térmicas de un panel fotovoltaico según la velocidad del viento.[14]

## 2.11. Efecto estela (Wake) en VAWT

En la Figura 2.7 se puede observar el modelo 2D de una VAWT tipo Savonius y el efecto de estela que produce después de utilizar la energía del viento, en la zona posterior a la turbina se encuentra una zona de desprendimiento de vórtices en la cual se producen dos zonas de alta velocidad, una en el lado del álabe que retorna y otra del lado del álabe que avanza, y una zona de baja velocidad justo detrás de la turbina. El efecto producido por estas zonas está medianamente estudiado y cuantificado en el trabajo de Zhang[15] de forma de obtener arreglos de turbinas eólicas eficientes y que no interfieran de manera negativa el funcionamiento de las turbinas aguas abajo en una granja eólica.

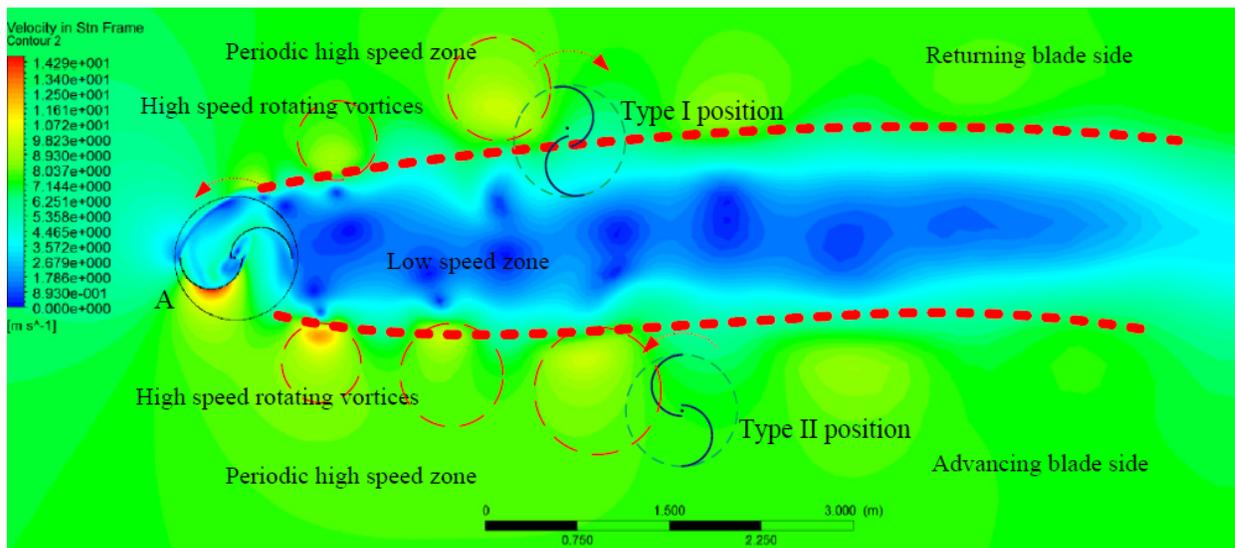


Figura 2.7: Efecto de estela producido por una VAWT tipo Savonius.[15]

Por otro lado, estas zonas de alta velocidad constituyen un recurso aprovechable como mecanismo de refrigeración mediante convección forzada y lo interesante para el presente estudio es observar el efecto que tiene este fenómeno en la temperatura de pared de un panel PV ubicado posterior a la VAWT, y por lo tanto, el efecto que tiene este fenómeno en la eficiencia del panel PV.

## 2.12. Transferencia de calor en un panel fotovoltaico

En un panel PV en funcionamiento se pueden apreciar todos los mecanismos de transferencia de calor, todo parte por la radiación que llega del sol hacia el panel la que produce el aumento de la temperatura de este debido a las pérdidas mencionadas en la sección 2.7 y a la generación de calor que se presenta en el panel, dentro de este mismo ocurre conducción entre las diversas capas sólidas que posee y además el panel libera calor hacia el ambiente por radiación y convección con el aire, de manera natural si es que no hay movimiento o forzada si existe velocidad del viento a su alrededor.

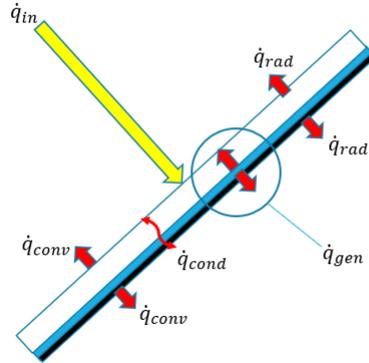


Figura 2.8: Representación de los mecanismos de transferencia de calor en el panel fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia

Debido al efecto que produce la turbina eólica de eje vertical oponiéndose al movimiento del aire, se producen fuerzas de sustentación y de arrastre que son la base de la generación de la energía eléctrica, pero también producen cambios en la transferencia de calor del sistema. Estos cambios se ven reflejados principalmente en el número de Nusselt ( $Nu$ ). Estos cambios debido a la velocidad del viento generan el fenómeno de convección forzada que provoca el efecto de refrigeración que se habló en el punto anterior. El panel PV se ve sometido a este efecto junto con el de la radiación solar incidente, los que conllevan al cambio en su eficiencia de operación.

## 2.13. Modelo de predicción de la temperatura de la celda

Debido a la dependencia de la eficiencia con respecto a la temperatura de celda del panel, se han estudiado diversos modelos matemáticos de manera de estimar este parámetro de una manera inicial, para así obtener a grandes rangos la eficiencia de un módulo fotovoltaico. Una aproximación inicial, la cual no considera la velocidad del viento en la estimación, es la ecuación desarrollada por C. S. Solanki para determinar la temperatura de la celda  $T_c$  [16].

$$T_c = T_a + \frac{I}{I_{NOCT}}(T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \quad (2.14)$$

donde:

- $T_a$  : temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]
- $I$  : radiación incidente sobre el panel [ $W/m^2$ ]
- $I_{NOCT}$  : radiación incidente NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)  $800[W/m^2]$
- $T_{NOCT}$  : temperatura NOCT a  $I_{NOCT} = 800[W/m^2][^{\circ}C]$
- $T_{a,NOCT}$  : temperatura ambiente NOCT [ $^{\circ}C$ ]

## 2.14. Potencia generada y eficiencia de un panel fotovoltaico

La energía generada por un panel fotovoltaico se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$P_{el} = P_{mpp}(1 + \frac{\gamma}{100}(T_c - 25)) \quad (2.15)$$

donde:

- $P_{mpp}$  : potencia máxima del panel fotovoltaico [W]
- $\gamma$  : coeficiente térmico de potencia del panel [%/°C]

Con la ecuación 2.15 es posible determinar la eficiencia de la conversión de energía del panel fotovoltaico mediante

$$\eta = \frac{P_{el}}{GA} \quad (2.16)$$

donde  $G$  corresponde a la radiación incidente recibida por el panel en [ $W/m^2$ ] y  $A$  corresponde al área frontal del panel en [ $m^2$ ]

## 2.15. Antecedentes de la localización

Con el fin de obtener condiciones de borde para el problema del panel fotovoltaico y la turbina eólica de eje vertical, se selecciona un entorno urbano donde es posible aplicar estas tecnologías en escala pequeña. Debido al atractivo explicado de instalar estas tecnologías en edificios se selecciono la zona entre el Metro el Golf y Alcántara en Santiago (coordenadas 33,41S, 70,59O), una zona con una alta densidad de edificios y de las que se cuenta con datos de radiación y velocidad del viento.

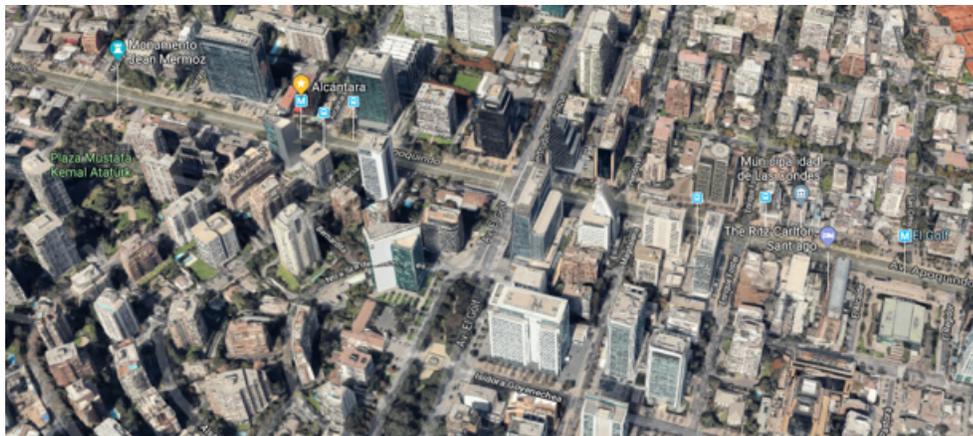


Figura 2.9: Zona donde se obtienen las condiciones ambientales para el problema. Fuente: Google Maps

Es importante considerar que los datos obtenidos mediante los exploradores solar y eólico que se exponen en este trabajo son obtenidos en su mayoría mediante modelos matemáticos que permiten aproximar las condiciones ambientales en el lugar.

### 2.15.1. Radiación

Las condiciones de radiación para las distintas horas y meses del año se pueden observar en la Figura 2.10, esta se caracteriza por el aumento en la radiación en los meses de verano en Chile y donde las más altas radiaciones ocurren entre el mediodía y las 14 horas.

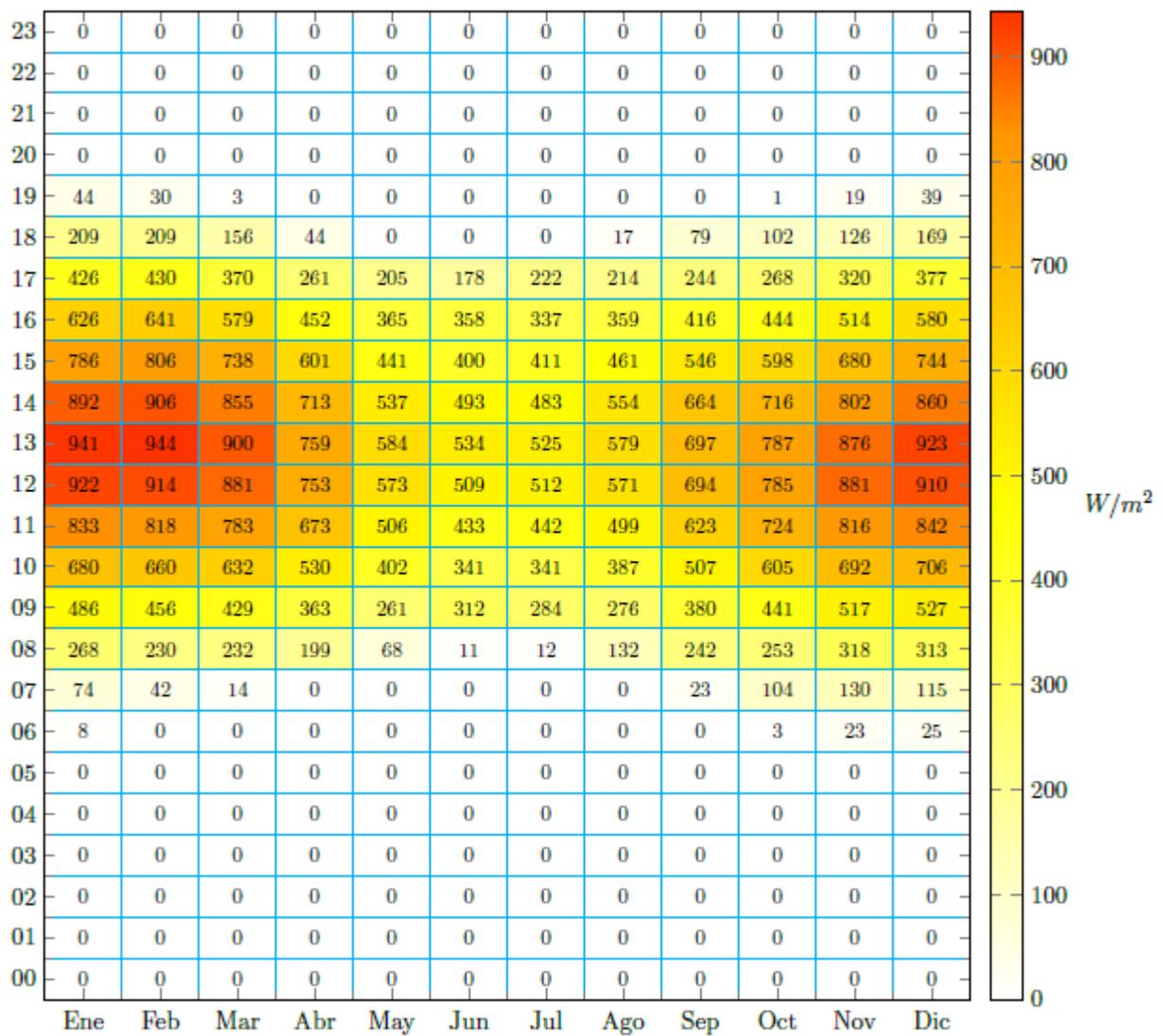


Figura 2.10: Radiación incidente promedio en un plano inclinado a 33° para distintas horas y meses de un año en la localidad estudiada. Fuente: Explorador Solar del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

## 2.15.2. Velocidad del viento

La velocidad del viento en la zona estudiada varía en gran medida dependiendo de la época del año, en la Figura 2.11 se puede observar un promedio de esta para las distintas horas del día donde según el modelo fluctúa, en las horas que hay radiación según la Figura 2.10, entre 1 y 3  $[m/s]$ .

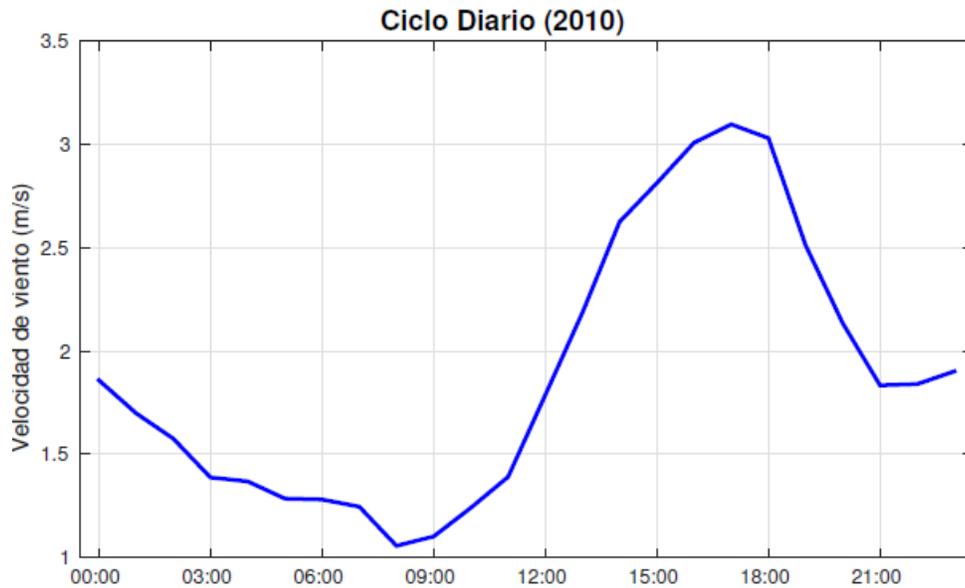


Figura 2.11: Ciclo medio de velocidad del viento en la localidad estudiada.. Fuente: Explorador de Energía Eólica del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

Además se observa en el Explorador de Energía Eólica que los máximos diarios rondan los 5  $[m/s]$ .

# Capítulo 3

## Metodología y procedimiento

Debido a que este trabajo de título presenta una serie de subsistemas a analizar para cumplir su objetivo principal, se hace necesario detallar los aspectos importantes de la metodología a utilizar para lograr este objetivo.

### 3.1. Estudio bibliográfico y reconocimiento del software ANSYS Fluent

Se realiza un estado del arte para comprender el funcionamiento de las turbina eólicas de eje vertical y todos los fenómenos involucrados en el desarrollado del perfil de velocidades aguas abajo de la turbina. Además se estudia el fenómeno de transferencia de calor mediante convección forzada por fuera del panel y conducción en el interior de este, para así lograr un modelo capaz de reproducir las condiciones a analizar en este trabajo de título. Por otro lado, se realizan tutoriales del software ANSYS Fluent para familiarizarse con el entorno de trabajo de la memoria, ya que el estudiante no ha trabajado con el software mencionado.

### 3.2. Definición del problema

Se selecciona el modelo de turbina eólica de eje vertical a utilizar junto con el panel fotovoltaico a simular. Por otro lado se selecciona una localización adecuada para analizar el problema de transferencia de calor junto con las condiciones de radiación y velocidad del viento para el desarrollo de los modelos, condiciones que también serán usadas para calcular la generación de calor producida por las celdas fotovoltaicas.

Un diagrama del problema puede ser observado en la Figura 3.1 donde se muestran paneles fotovoltaicos aguas abajo de la turbina eólica de eje vertical, específicamente ubicados en las zonas donde se produce un aumento de velocidad con respecto a la velocidad de entrada, lo que es el objeto de estudio debido a la posibilidad de mejorar la refrigeración de los paneles fotovoltaicos.

Debido a la cantidad de tiempo necesario para simular ambas tecnologías en el mismo modelo 3D el problema es subdividido en dos partes: simulaciones de la turbina eólica de eje vertical en dos dimensiones, y simulaciones del panel fotovoltaico en tres dimensiones.

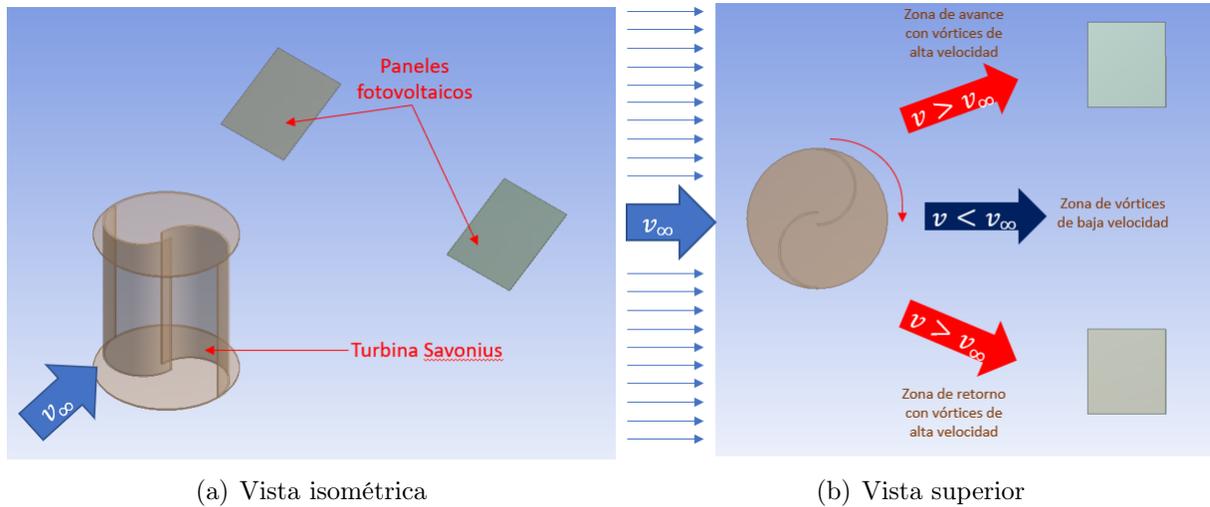


Figura 3.1: Diagrama del problema a simular. Elaboración propia.

### 3.3. Simulación VAWT 2D

Luego de seleccionar la tecnología de VAWT a estudiar, se desarrolla el modelo a trabajar en ANSYS Fluent mediante el uso de la bibliografía estudiada con el fin de comparar con otros estudios para validar el modelo estudiado. Los resultados a obtener de estas simulaciones son los perfiles de velocidad en las zonas de interés comentadas en la Sección 2.11 los cuales serán utilizados como condición de borde en la entrada para el modelo 3D del panel fotovoltaico. El procedimiento a seguir para obtener los resultados esperados se detalla a continuación.

- **Comparación de TSR**

Con el fin de validar el modelo 2D desarrollado se estudia el valor del coeficiente de potencia  $C_p$  para distintos  $TSR$  de la turbina, estos se comparan con los obtenidos en el modelo CFD de Zhang [15] y con valores experimentales dentro de este mismo estudio.

- **Generación de perfiles de velocidad en zonas de interés**

Posterior a la validación se estudian casos a distintas velocidades del viento y se obtienen los perfiles de velocidad en las zonas en las que se ubicará el panel para comparar los cambios en la temperatura de este y por ende en su eficiencia.

### 3.4. Simulación panel fotovoltaico 3D

Con el panel PV seleccionado se procede a obtener el valor de la generación de calor de este para las condiciones de la localización. Por otro lado se desarrolla un modelo 3D con el fin de validar los resultados mediante la comparación con las temperaturas obtenidas en el estudio de Nizetić y Grubišić [17]. Posterior a la validación del modelo se cambia la inclinación del panel para ajustarla al caso que se quiere estudiar y se desarrollan modelos a distintas velocidades, como se describe a continuación

- **Simulaciones con perfil de velocidad constante**

Con la finalidad de comparar el caso en que la tecnología es instalada por si sola, se desarrollan simulaciones estacionarias para obtener la temperatura del panel fotovoltaico cuando este es sumergido en un perfil de velocidad constante y uniforme.

- **Simulaciones con perfil de velocidad desarrollado por turbina**

Se desarrollan simulaciones con los distintos perfiles de velocidad obtenidos mediante las simulaciones de la VAWT para las zonas de interés, esto con el fin de obtener la temperatura del panel en el caso de que este fuera instalado junto con esta otra tecnología.

### 3.5. Análisis de resultados

Finalmente con los resultados anteriores se comparara el aumento o disminución de la eficiencia del panel en el caso de estar instalado sin una VAWT o aguas abajo de una. Además se comparan los perfiles de temperatura del panel fotovoltaico para ambos casos y los fenómenos que provocan las diferencias entre estos.

# Capítulo 4

## Simulaciones VAWT

### 4.1. Modelo

La turbina seleccionada es de tipo Savonius clásica, como la que se observa en la Figura 4.1, las medidas de esta se encuentran en la Tabla 4.1 , esta turbina fue la estudiada por Zhang [15] en su publicación respecto al aprovechamiento de las zonas generadas en la estela de una turbina, de manera de hacer uso efectivo de la energía en granjas de turbinas eólicas, trabajo que sirve de inspiración a esta memoria. En este estudio se realizan simulaciones CFD y se comparan los valores con datos experimentales [18] para distintos TSR entre 0,7 y 1,2.

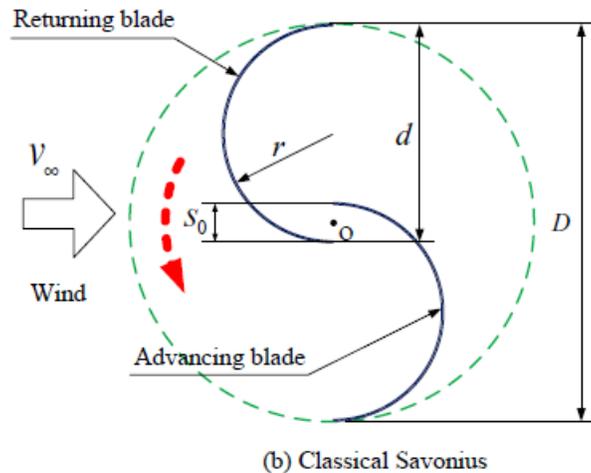


Figura 4.1: Turbina Savonius usada en el modelo 2D en ANSYS Fluent.[15]

Tabla 4.1: Dimensiones de la turbina Savonius utilizada en el estudio.[15]

Parámetro	Dimensiones [m]
D	0,909
d	0,5
r	0,25
$S_0$	0,091

El volumen de control desarrollado para el modelo de la turbina Savonius cumple con las recomendaciones estipuladas por el manual de usuario de ANSYS Fluent [19], y se presentan sus medidas en la Figura 4.2.

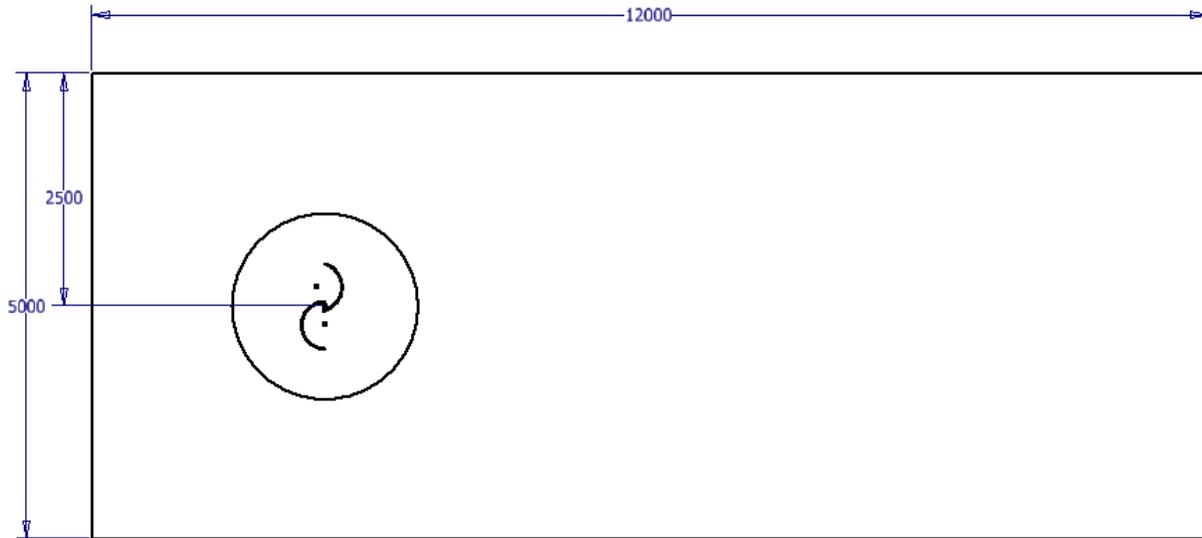


Figura 4.2: Dimensiones en  $[mm]$  del volumen de control usado en las simulaciones. Elaboración propia.

Las simulaciones de la turbina eólica de eje vertical en 2D se realizan mediante el modelo de turbulencia  $k - \omega SST$ , el cual es usado en la bibliografía [15][17] y es usado regularmente en problemas en los que la interacción de fluidos con regiones cercanas a muros de un modelo son importantes y se necesita una resolución correcta de ellos, además se hace fundamental usar el modelo en zonas de esfuerzo de corte turbulento cercano a muros [19]. En la Figura 4.3 se diferencian las zonas de interés debido a las condiciones de borde.

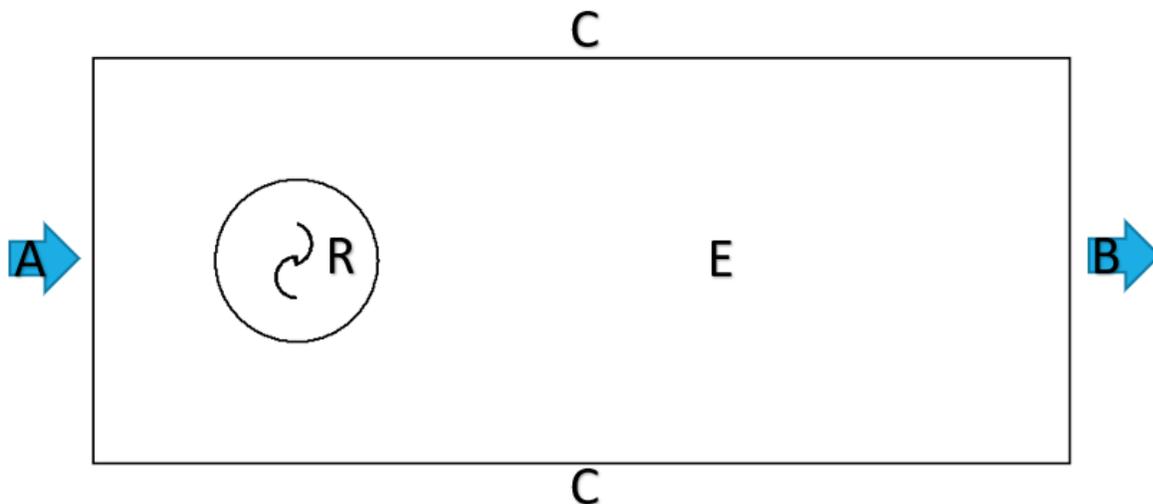


Figura 4.3: Identificación de las distintas condiciones de borde del modelo. Elaboración propia.

En la zona A se impone una condición de borde de velocidad del viento uniforme de 7  $[m/s]$ , la zona B es la salida del viento y se impone la condición de presión medida 0 debido a que en las condiciones de operación del modelo se establece la presión del sistema como 101.325  $[Pa]$  (atmosférica), además en ambas zonas la condición de intensidad de turbulencia

es de 5% considerada media-alta debido al flujo que se produce en las zonas con edificios; la condición en C corresponde a simetría debido a que no se pretende estudiar la interferencia de paredes en un modelo al aire libre.

El modelo es desarrollado como en el estudio de Zhang [15] mediante el uso de un dominio rotacional R y un dominio estacionario E, al dominio rotacional se le impone la velocidad de rotación en  $[rad/s]$  utilizando los distintos TSR y la velocidad de entrada del viento junto con la ecuación 2.4. Es importante notar que la zona R es del doble del tamaño que el rotor estudiado, esto principalmente para que el giro de la malla no cree problemas o efectos no deseados en la zona de interés. Finalmente los álabes que se observan en la figura son vacíos en el dominio a los que se les impone una condición de borde de pared para reproducir el efecto deseado en el dominio fluido.

Con estas condiciones se establecen simulaciones transientes para observar la estela producida por la VAWT Savonius, estas simulaciones son desarrolladas con un timestep de  $t=0,001[s]$  con el fin de discretizar el efecto completo de la rotación de la turbina y asegurar la convergencia.

## 4.2. Independencia de malla y validación

Posterior a la realización del modelo 2D de la turbina se pasó a verificar la independencia de malla de las simulaciones, proceso que consiste en crear distintos mallados del problema de manera de verificar que los resultados no estén cambiando al disminuir o aumentar el tamaño de los elementos que componen la malla. Para comprobar esto se realizaron 4 simulaciones con distintos tamaños de elementos y se compararon los valores de  $C_p$ .

Tabla 4.2: Número de elementos para las distintas mallas simuladas.

Refinado de malla	Número de elementos
0	46765
1	60892
2	74745
3	107377

Los resultados obtenidos se observan en la Figura 4.4, en la que se observa que el valor de  $C_p$  deja de variar considerablemente entre las transiciones de malla 1-2 y 2-3, el error entre estas es menor al 0,5% comparado con el 1% de error que existe entre la malla 0 y la 1, es por esto que se decide usar la malla 1 con 60.892 elementos como el mallado final a estudiar, para así privilegiar los menores tiempos de simulación.

El mallado final se puede observar en la Figura 4.5 en este se puede observar como la zona rotacional del modelo tiene un tamaño de elementos basado en un círculo de influencia igual al tamaño de la zona rotacional, en esta zona los elementos son de  $10[mm]$  y van creciendo hasta  $100[mm]$  a medida que se alejan de esta hasta llegar a los extremos del dominio. Además para un buen desarrollo de los efectos en la capa límite de los álabes, se usa un método de inflación en las paredes de estos con 20 capas. El mallado cumple con las condiciones de calidad de elemento y Skewness recomendadas en la bibliografía [19].

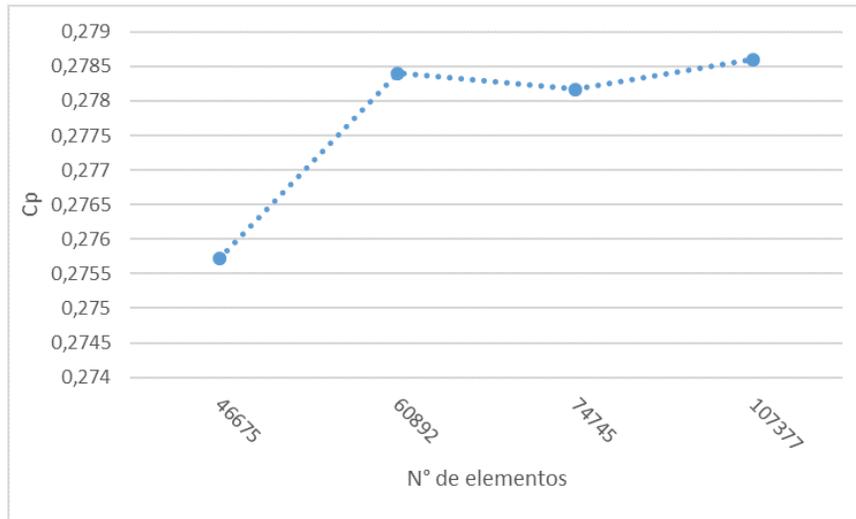


Figura 4.4: Resultados del coeficiente de potencia para las distintas mallas estudiadas. Elaboración propia.

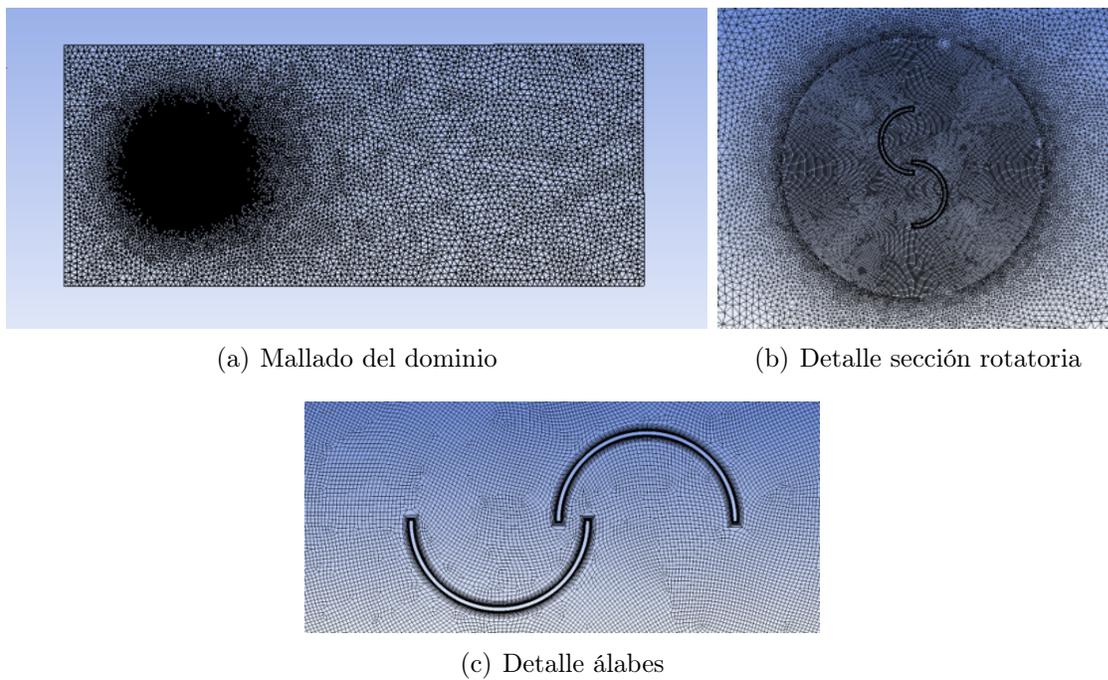


Figura 4.5: Mallado para el número de elementos seleccionado.

Con este modelo de malla se procede a validar los resultados comparandolos con los de la bibliografía de Zhang[15] y Sheldahl[18]. La validación se lleva a cabo variando la velocidad de rotación del dominio de la turbina para una velocidad de viento fija a 7 [m/s], esto con el fin de obtener los valores de  $C_p$  para distintos  $TSR$ . Los distintos  $TSR$  estudiados con su respectiva velocidad de rotación se pueden observar en la Tabla 4.3 junto con los resultados obtenidos para  $C_p$ .

Tabla 4.3: Resultados obtenidos para el coeficiente de potencia a distintos valores de  $TSR$  para  $v = 7[m/s]$

TSR	Velocidad [rad/s ]	$C_p$	Error experimental [%]	Error simulaciones [%]
0,7	10,78	0,2693	12,47	11,83
0,8	12,32	0,2765	13,07	12,05
0,9	13,86	0,2784	11,78	12,40
1	15,4	0,2751	11,66	13,18
1,1	16,94	0,2663	11,51	10,80
1,2	18,48	0,2554	13,58	13,31

En la Tabla 4.3 se observa que existen diferencias de entre un 11 y un 13% con los resultados obtenidos mediante las simulaciones de la bibliografía y los datos experimentales, a pesar de esto como se observa con mayor claridad en la Figura 4.6 que los valores obtenidos para  $C_p$  siguen la misma tendencia que los valores obtenidos en la bibliografía, es por esto, y debido a que el modelo desarrollado en esta memoria no cuenta con toda la información necesaria para reproducir las condiciones medioambientales con exactitud, que se decide considerar como validado el modelo y continuar con el estudio.

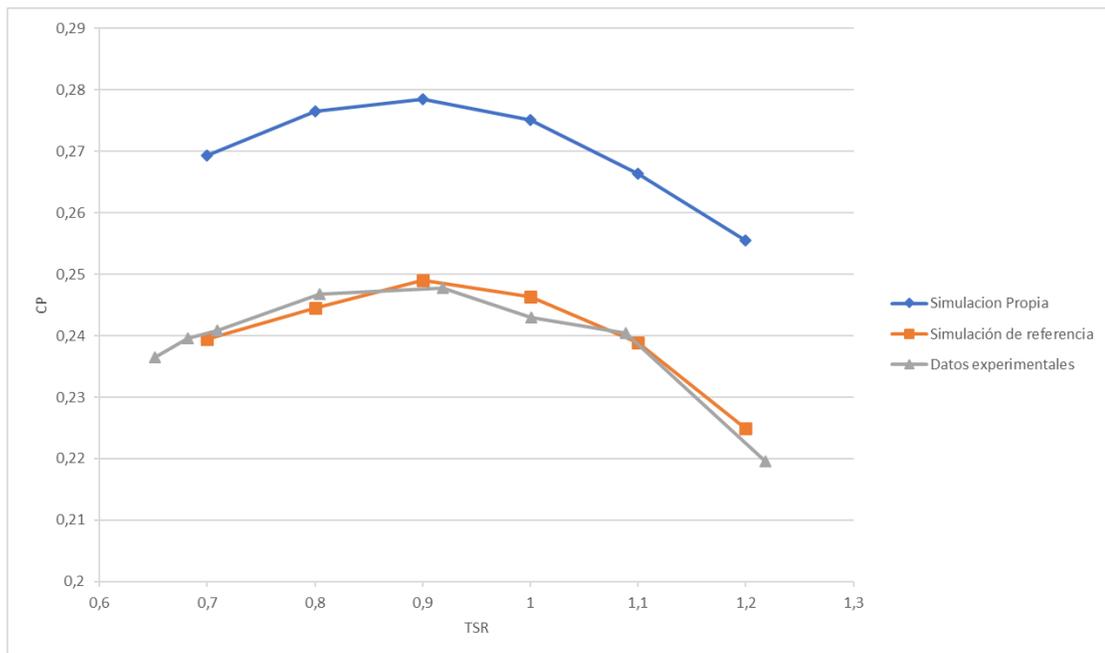


Figura 4.6: Gráfico comparativo entre los valores del coeficiente de potencia obtenidos y la bibliografía.

### 4.3. Resultados

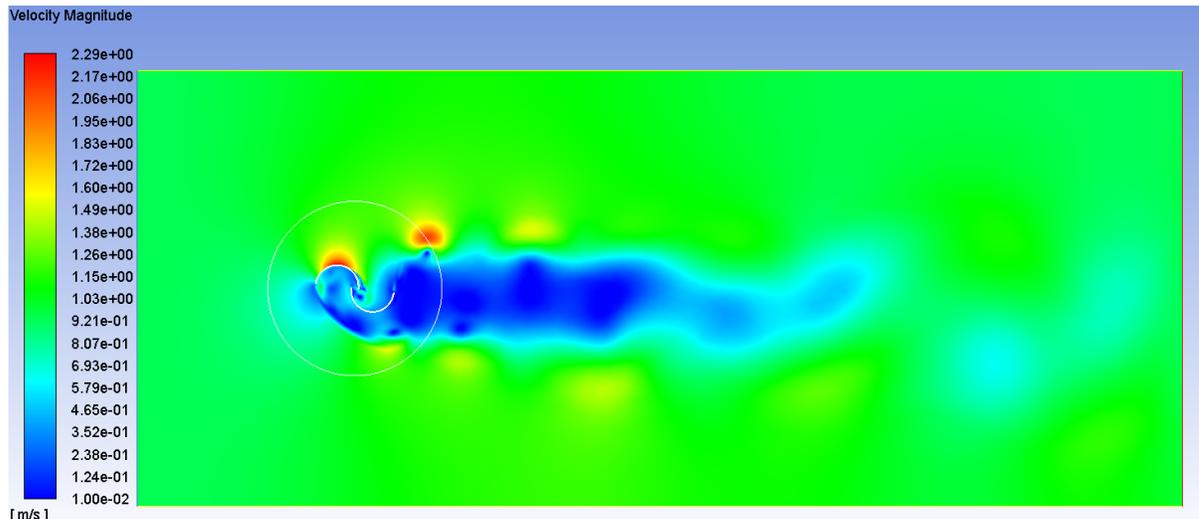
Finalmente con la independencia de malla desarrollada y el modelo considerado como válido, se pasa a obtener los resultados que serán condición de borde en las simulaciones del panel. Debido a lo observado en la Sección 2.15.2 y los máximos encontrados en los informes del Explorador Eólico, se establece que las velocidades a analizar para la localización son **1**, **2**, **3** y **5** [ $m/s$ ], además se observará lo que sucede a la velocidad de **7** [ $m/s$ ] como se estudia en la bibliografía, además como se observa en la Figura 4.6 los máximos coeficientes de potencia se obtienen a un valor de  $TSR$  igual a 0,9, es por esto como condición de borde se impone la velocidad de rotación de la turbina considerando su punto de mayor eficiencia mediante el uso de la ecuación 2.4. Considerando esto se obtienen las velocidades de rotación para las distintas condiciones de perfil de velocidad de viento uniforme (velocidad en flujo libre  $v_\infty$ ) observados en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Valor de la velocidad de rotación para las distintas velocidades de flujo libre  $v_\infty$

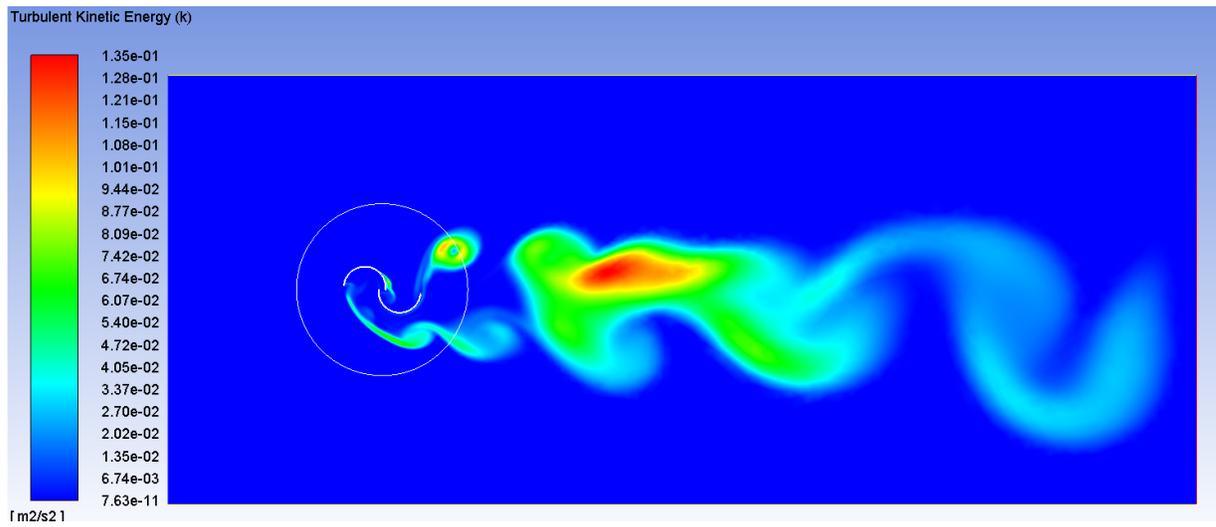
$v_\infty$	Velocidad rotación [ $rad/s$ ]
1	1,98
2	3,96
3	5,94
5	9,90
7	13,86

#### 4.3.1. Velocidad y energía cinética turbulenta

De las simulaciones propuestas se muestran los campos de velocidades y de energía cinética turbulenta en el dominio del modelo trabajado, para instantes de tiempo en los que se pueden observar mejor los resultados importantes para este trabajo. Es posible observar en todas las figuras que se generan dos zonas de alta velocidad como se muestra en el estudio de Zhang[15] y una zona de baja velocidad. Estas zonas se caracterizan por la presencia de vórtices de alta y baja velocidad respectivamente que se pueden apreciar en la energía cinética de turbulencia en ambas zonas, la cual se va disipando principalmente en las zona de baja velocidad debido a las recirculaciones. Es importante observar que en todos los gráficos de velocidad, las zonas de vortices de alta velocidad se caracterizan por una velocidad marcada en color amarillo que es superior a la velocidad  $v_\infty$  por lo que estas zonas potencialmente podrían mejorar la convección forzada en una placa inclinada como el panel PV.

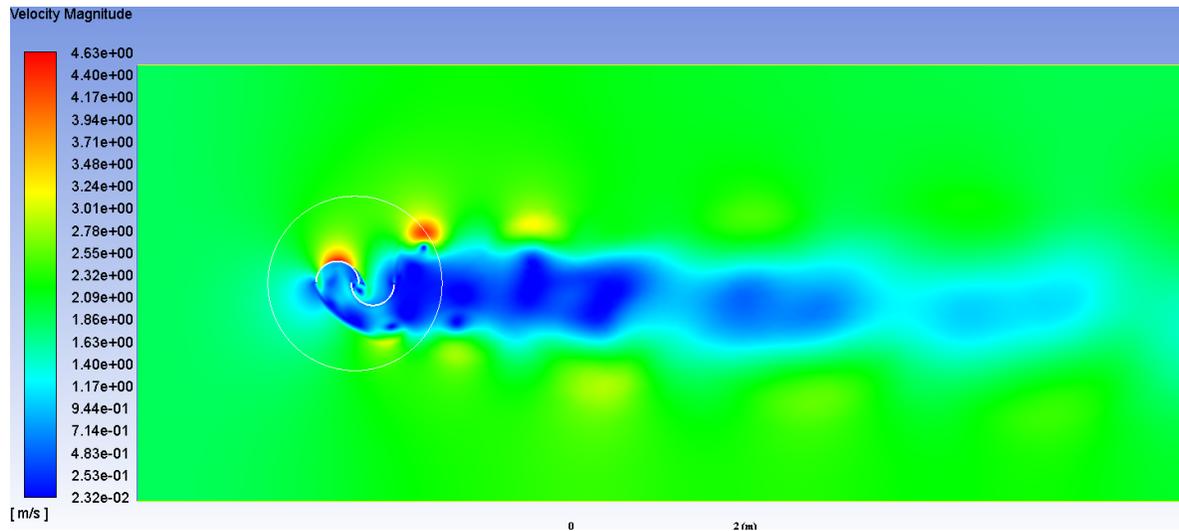


(a) Velocidad del viento

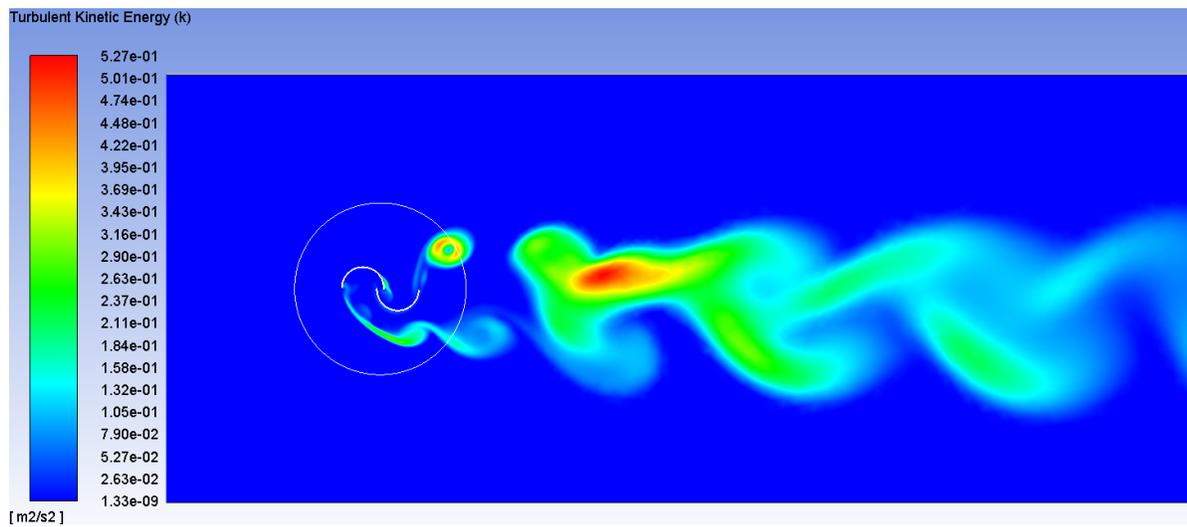


(b) Energía cinética de turbulencia

Figura 4.7: Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para  $v_\infty = 1[m/s]$ .

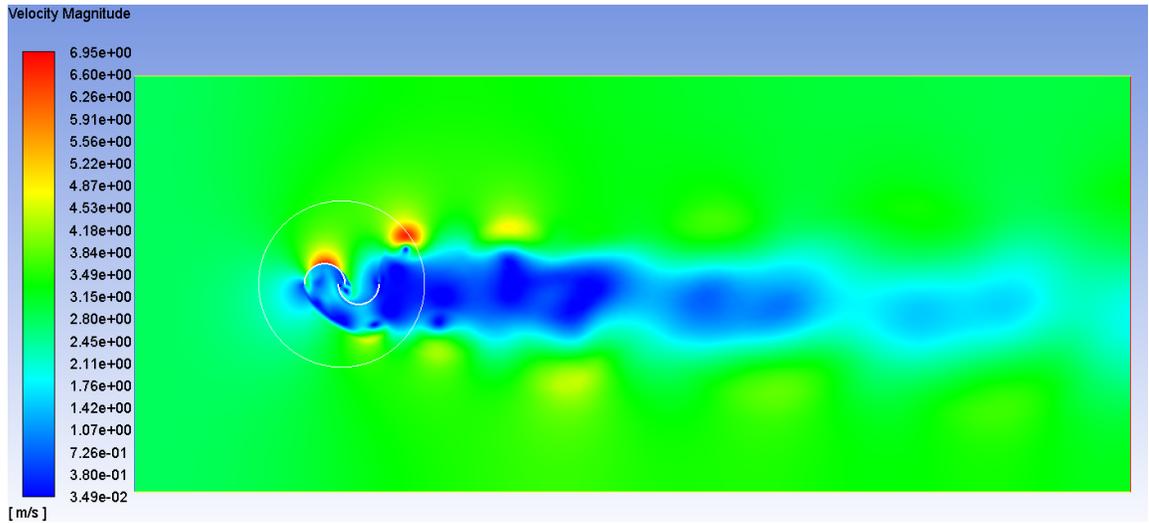


(a) Velocidad del viento

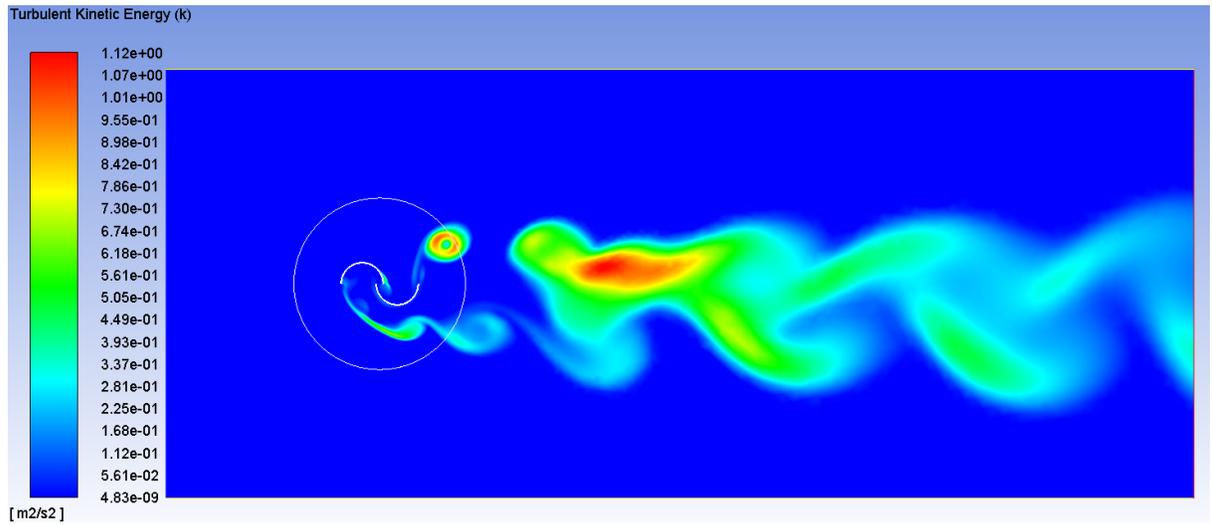


(b) Energía cinética de turbulencia

Figura 4.8: Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para  $v_\infty = 2[m/s]$ .

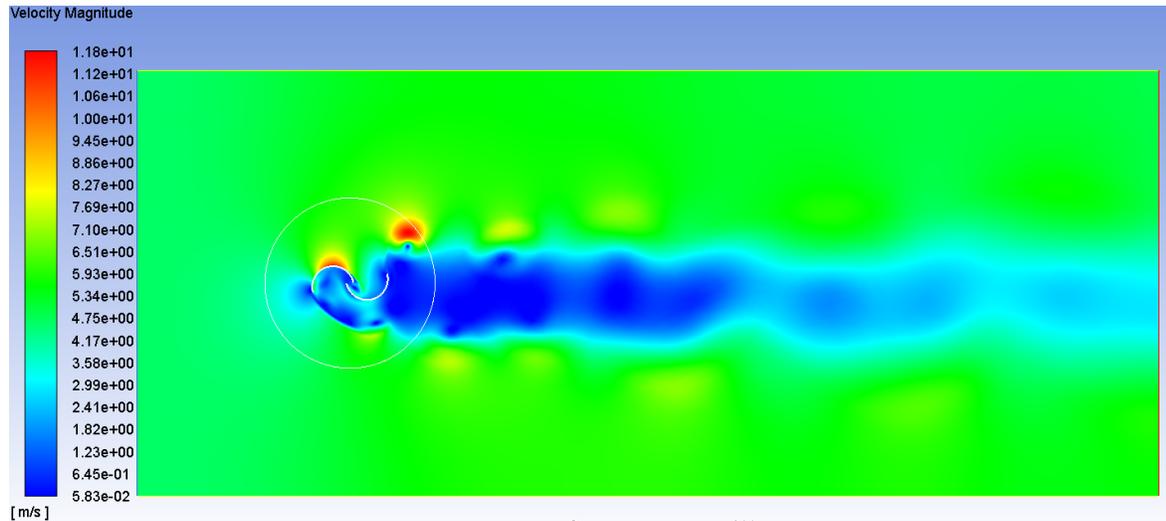


(a) Velocidad del viento

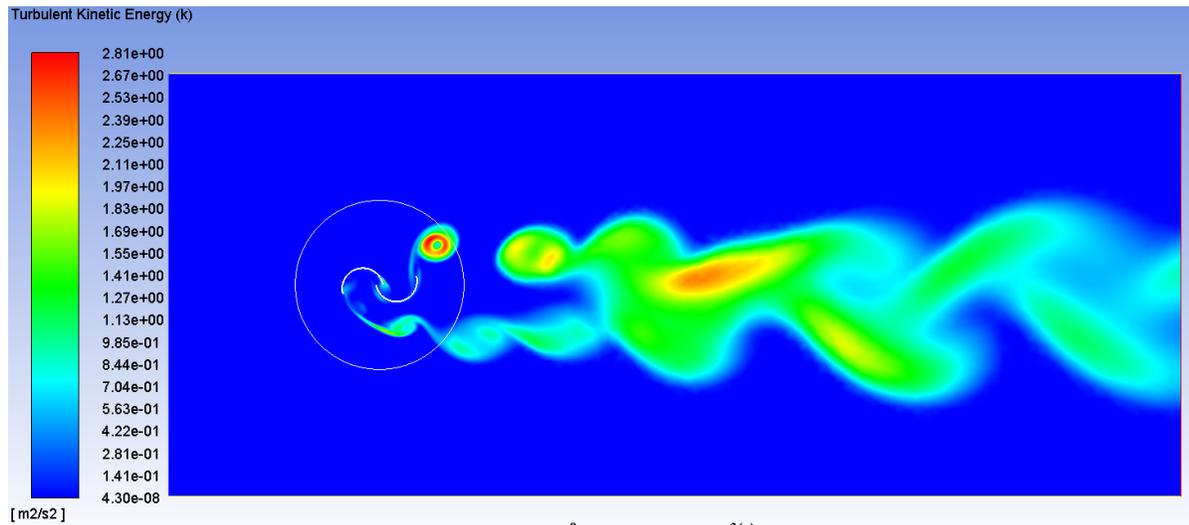


(b) Energía cinética de turbulencia

Figura 4.9: Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para  $v_\infty = 3[m/s]$ .

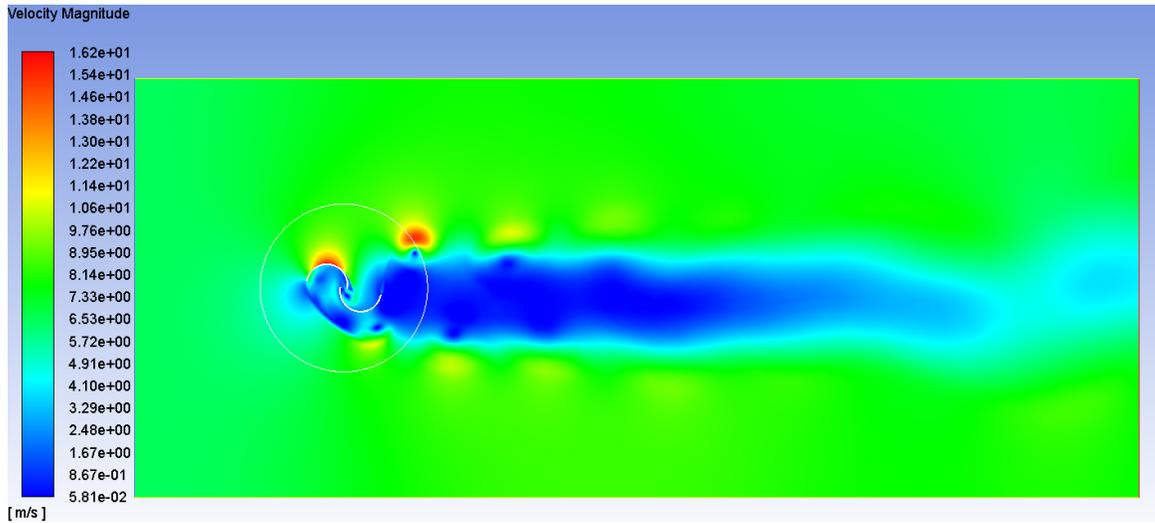


(a) Velocidad del viento

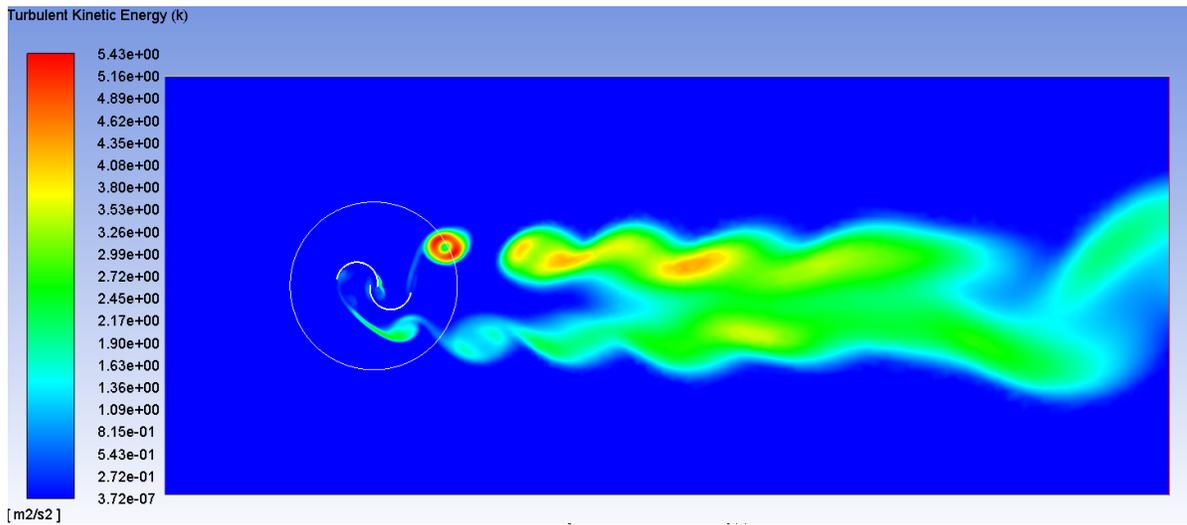


(b) Energía cinética de turbulencia

Figura 4.10: Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para  $v_{\infty} = 5[m/s]$ .



(a) Velocidad del viento

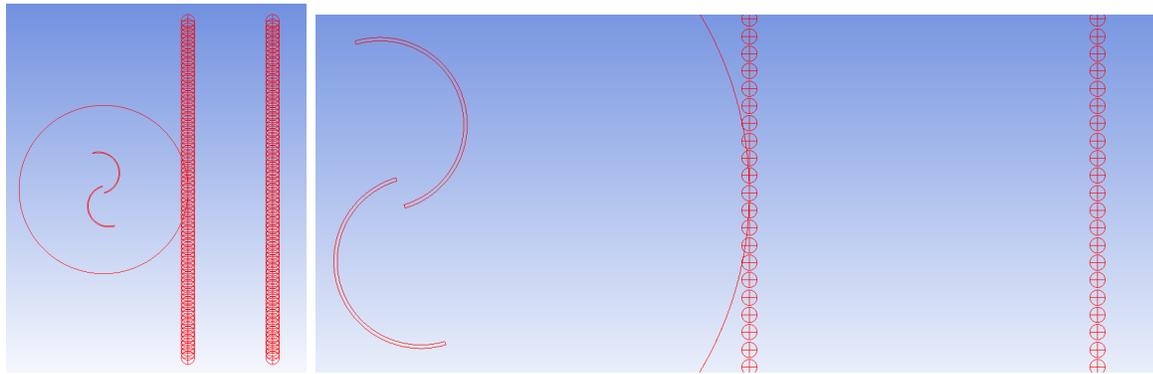


(b) Energía cinética de turbulencia

Figura 4.11: Perfiles de velocidad y energía cinética de turbulencia obtenidos en las simulaciones para  $v_\infty = 7[m/s]$ .

### 4.3.2. Perfiles de velocidad obtenidos

Finalmente y luego de observar que los gráficos correspondían con la bibliografía estudiada y se generan las zonas de interés deseadas para este estudio, se procedió a tomar medidas para obtener las condiciones de borde que serán ingresadas al modelo 3D del panel, el procedimiento consistió en generar puntos en líneas de 1 y 2 [m] aguas abajo de la turbina, dentro de la zona de interés. Para obtener una densidad suficiente para la creación de los perfiles de velocidad a estudiar se tomaron 80 medidas en cada espacio entre -2 y 2[m] del centro del dominio, estos puntos como se puede observar en la Figura 4.12, los cuales fueron separados por una distancia de 5 [mm].



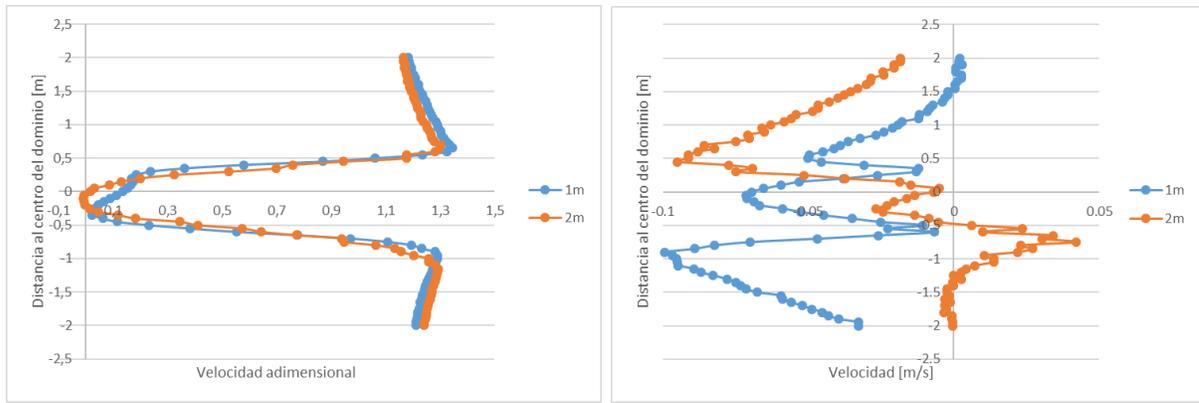
(a) Puntos generados en el dominio

(b) Detalle de los puntos de medición

Figura 4.12: Detalle de los puntos generados en el dominio para obtener mediciones.

En estos puntos se obtuvieron los valores de la velocidad en la dirección X e Y del dominio 2D a lo largo de la simulación, con el fin de obtener una buena densidad de datos se usó un intervalo de tiempo de 0,001[s] entre cada medición. Estas mediciones fueron posteriormente promediadas para cada punto para así obtener el perfil medio en cada uno y generar perfiles de velocidad lo más similares posibles al flujo turbulento para simulaciones de estado estacionario en los paneles PV, simulaciones que han mostrado buenos resultados para predecir la temperatura de celda al compararlas con simulaciones transientes[17] [20].

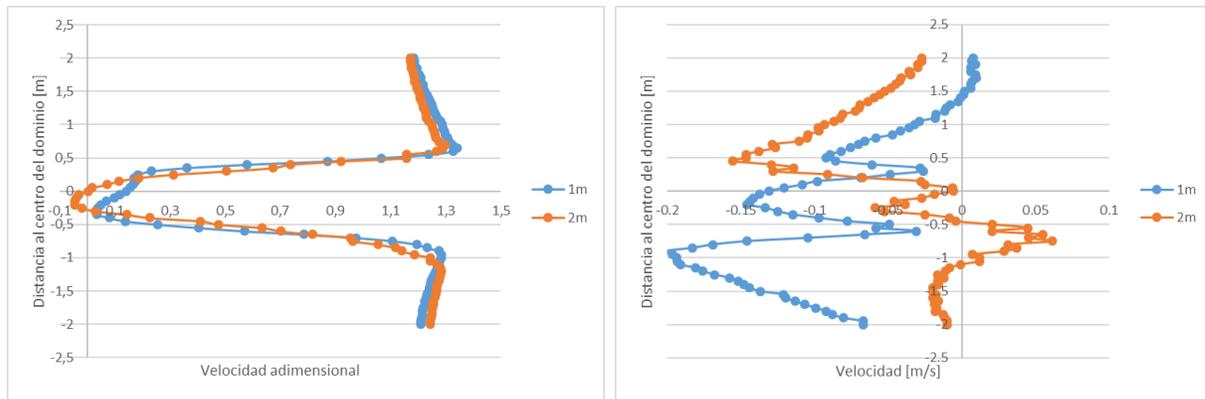
Los perfiles de velocidad obtenidos a lo largo de las líneas a 1 y 2 [m] de distancia aguas abajo de la turbina se muestran a continuación, donde la velocidad adimensional para el caso de los perfiles  $v_x$  corresponde a  $u/v_\infty$ , donde la velocidad  $u$  es aquella tomada en los distintos puntos de medición.



(a) Perfil  $v_x$

(b) Perfil  $v_y$

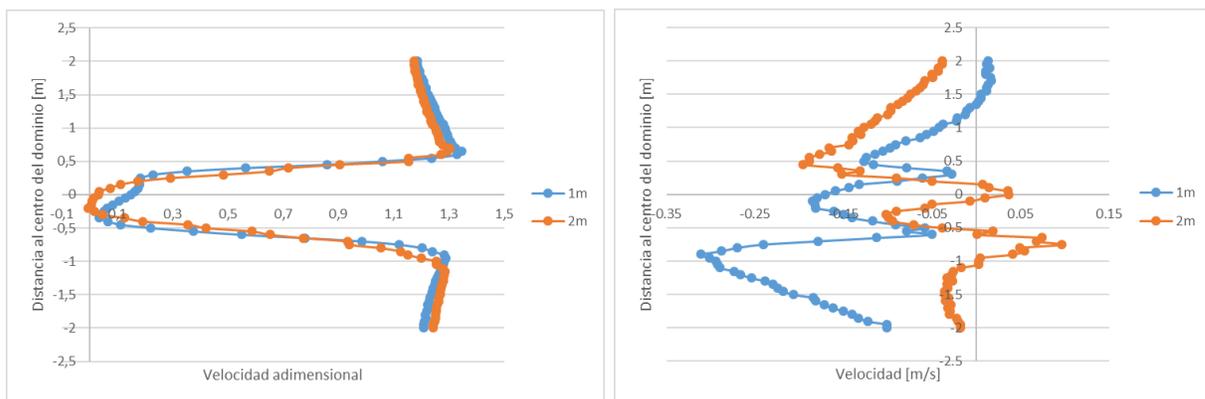
Figura 4.13: Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con  $v_\infty = 1[m/s]$



(a) Perfil  $v_x$

(b) Perfil  $v_y$

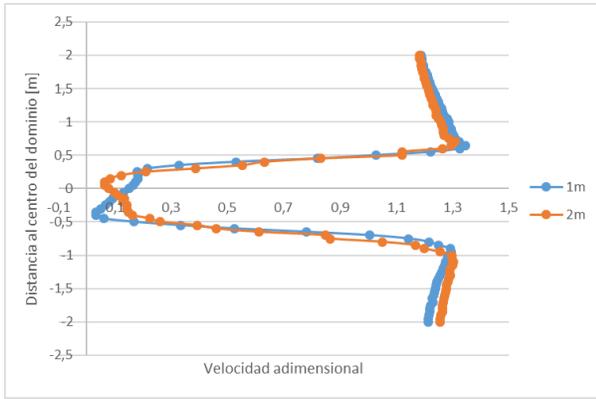
Figura 4.14: Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con  $v_\infty = 2[m/s]$



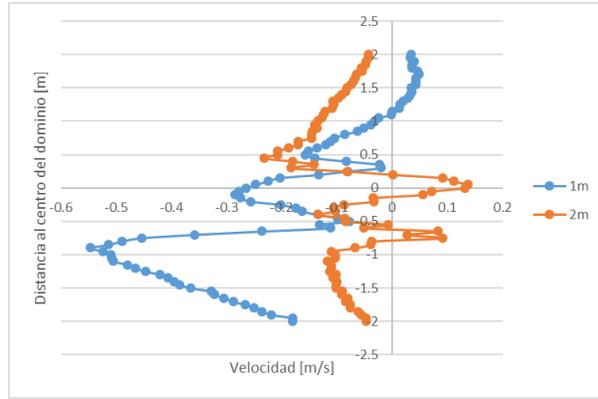
(a) Perfil  $v_x$

(b) Perfil  $v_y$

Figura 4.15: Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con  $v_\infty = 3[m/s]$

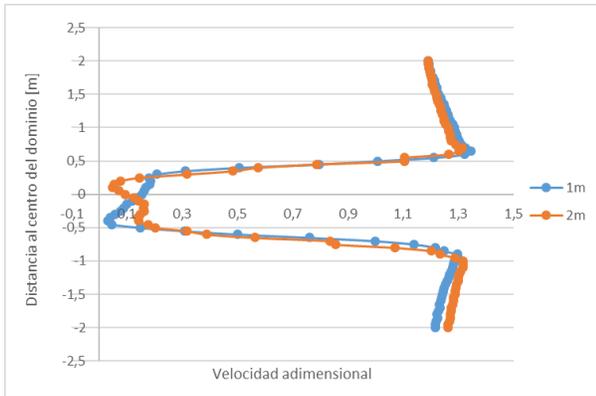


(a) Perfil  $v_x$

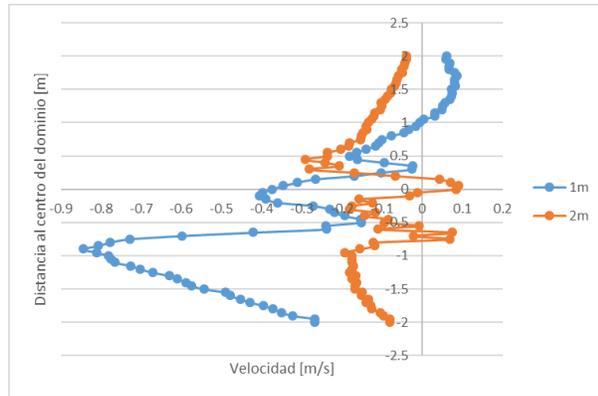


(b) Perfil  $v_y$

Figura 4.16: Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con  $v_\infty = 5m/s$



(a) Perfil  $v_x$



(b) Perfil  $v_y$

Figura 4.17: Perfiles de velocidad aguas abajo de la turbina con  $v_\infty = 7[m/s]$

En las Figuras 4.13 a 4.17 es posible observar que efectivamente las velocidades medias en x e y son superiores a la velocidad impuesta como condición de borde en cada caso. Es por esto que se usarán los perfiles en las zonas superior e inferior aguas abajo de la turbina para ser usados como condiciones de borde de las simulaciones 3D del panel PV. Por otro lado, se decide omitir las simulaciones para la parte central de cada perfil de velocidad ya que el objetivo de esta trabajo busca mejorar la eficiencia de un panel PV y al usar una zona de menor velocidad que la impuesta como condición de borde se esta potencialmente reduciendo la transferencia de calor por convección forzada, y por tanto empeorando la temperatura de celda y la eficiencia del panel PV.

# Capítulo 5

## Simulaciones Panel Solar PV

### 5.1. Modelo

El panel seleccionado para el desarrollo de este trabajo es el mismo utilizado en los trabajos de Nizetic y Cabo [17][20], de medidas 0,55x0,6[m] con una potencia máxima de trabajo de 54[W] este panel es simulado en un amplio volumen de control para evitar problemas de convergencia y recirculación en las soluciones. El modelo a usar para la resolución del problema en Ansys Fluent es nuevamente  $k - \omega SST$  por las mismas razones que en el caso de la turbina. El dominio es mostrado en la Figura 5.1 y sus medidas mostradas en la Tabla 5.1, en este el panel se encuentra a 2[m] de la cara inferior y a 2 metros de la cara de entrada de viento.

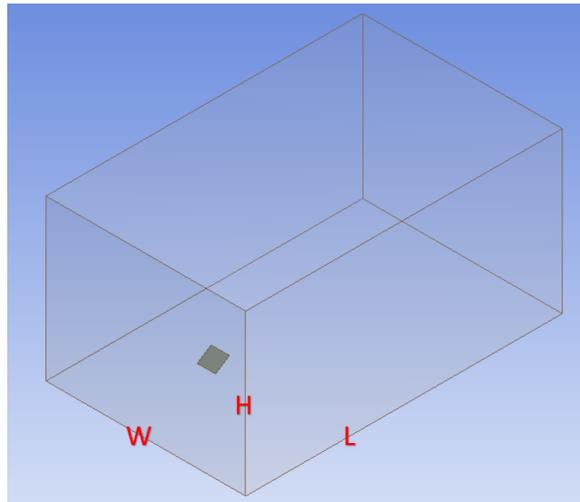


Figura 5.1: Modelo para las simulaciones del panel PV. Elaboración Propia.

Tabla 5.1: Dimensiones volumen de control para modelo del panel.

Parámetro	Largo [m]
H	5
L	10
W	6

La condición de borde (Figura 5.2) en  $A$  es de entrada de viento donde se impone la velocidad de entrada junto con una intensidad de turbulencia del 5% igual que en el modelo de la turbina, y en  $B$  se impone la salida a 0[Pa] debido a que se especifica la presión de

operación como en el caso de la VAWT. El resto de las caras del volumen de control se caracterizan por simetría debido a que no es clara la altura que tendrá el panel en el sistema respecto a la turbina en el entorno urbano, por lo que no se considera el efecto del suelo.

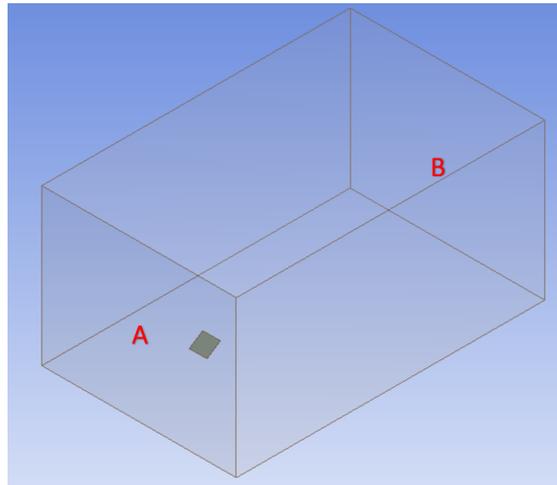


Figura 5.2: Detalle condiciones de borde del modelo. Elaboracion propia.

Por otro lado, el panel se modela como un sólido de 3 capas como se presenta en la bibliografía (Figura 5.3) de manera de simplificar las simulaciones, el detalle se puede observar en la Figura 5.4 y el espesor junto con las propiedades de cada capa en la Tabla 5.2. Para las condiciones de borde del panel se aplica generación de calor en el dominio del interior de la celda  $C$  esto de manera de simular las pérdidas por energía no aprovechada que saldrían del balance de energía. Esto se realizó mediante el cálculo de la temperatura de celda con la ecuación 2.14 y finalmente la potencia mediante la ecuación 2.15 (usando  $\gamma = 0,45\%/^{\circ}K$ ) para luego realizar el balance de energía y aplicar una carga igual a la energía no aprovechada en la celda  $C$  como fuente de calor. Además a todas las interfaces sólido-sólido entre los distintos materiales del panel y las interfaces sólido-fluido entre los materiales y el aire, se les fue impuesta la condición de borde de acople térmico para generar de manera correcta las interacciones en los distintos fenómenos de transferencia de calor.

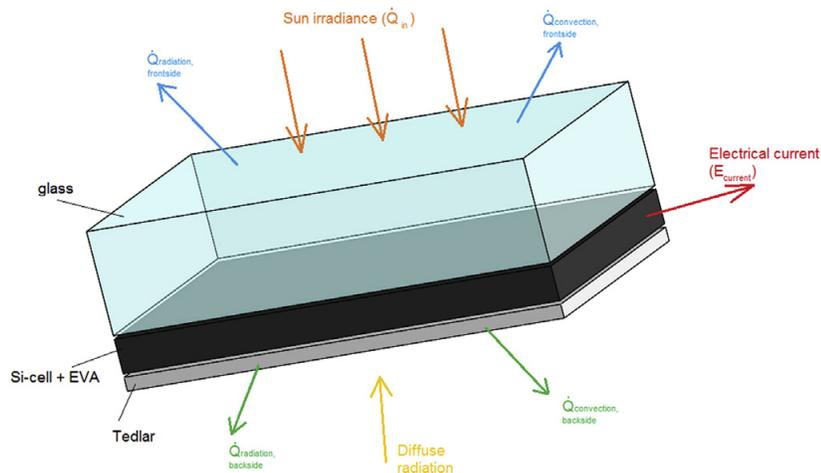
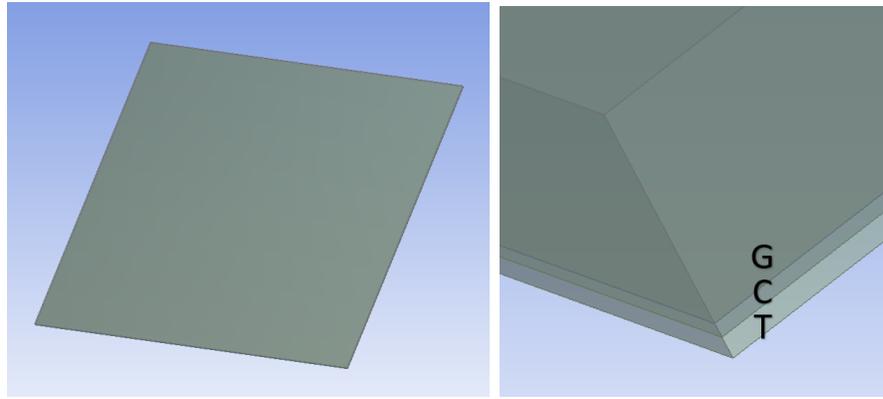


Figura 5.3: Modelo de PV simplificado usado en la bibliografía.[17]



(a) Panel solar modelado

(b) Detalle capas panel solar

Figura 5.4: Detalle del panel solar generado para el modelo. Elaboración propia.

Tabla 5.2: Materiales del estudio junto con sus dimensiones y propiedades.[17]

Parámetro	Material	Espesor [mm]	Densidad [ $kg/m^3$ ]	Conductividad térmica [ $W/mK$ ]	Capacidad calorífica [ $J/kgK$ ]
G	Vidrio	3	2530	0,8	800
C	Celda solar	0,2	1000	150	700
W	Tedlar	0,3	800	0,35	800

## 5.2. Independencia de malla y validación

La independencia de malla se desarrolla utilizando el panel PV con una inclinación de  $20^\circ$ , con una velocidad de entrada de  $2,7[m/s]$  y al cual se le aplica una generación de calor a la celda equivalente a  $650[W/m^2]$  como se detalla en el trabajo de Nizetic y Cabo[17]. La independencia se revisa comparando la temperatura promedio de celda al ser refinado el tamaño de los elementos del dominio, cercanos al panel y dentro de este. Los resultados se puede observar a continuación.

Tabla 5.3: Resumen datos y resultados para validación de mallado

Malla	# de elementos	Temperatura promedio celda [ $^\circ K$ ]
0	369546	331,20
1	759944	323,49
2	1075078	319,96
3	1654109	319,84
4	2432909	319,63

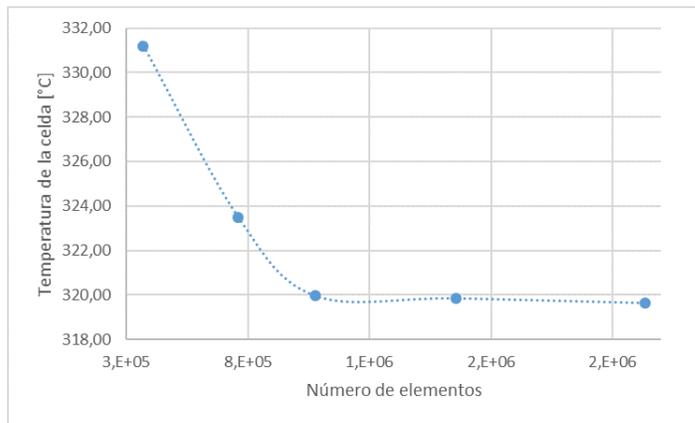


Figura 5.5: Gráfico de los valores de la temperatura promedio de celda en función del número de elementos del modelo. Elaboración propia.

La transición entre las mallas 2 y 3 y las mallas 3 y 4, muestran errores menores al 1% por lo que se selecciona la malla 2 para las simulaciones con el fin de tener tiempos de simulaciones más cortos sin afectar tanto los resultados. La malla seleccionada se puede observar en la Figura 5.6, los elementos en el volumen de control van de los 350[mm] a los 4[mm] en las cercanías del panel PV, se realiza inflación (I) para mejores resultados en la capa límite y los elementos del panel sólido son de 4[mm] con un Sweep (S) realizado para tener 4 elementos por cada material para estudiar la conducción.

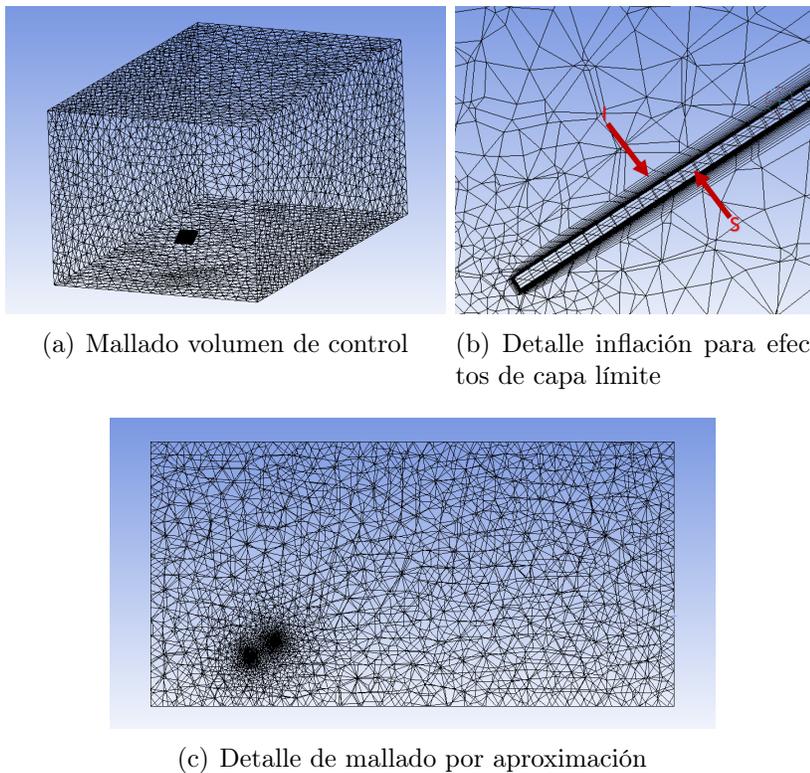


Figura 5.6: Mallado del panel solar generado para el modelo con el número de elementos seleccionado.

Luego de validar el modelo se compara con los resultados obtenidos en la bibliografía, esto se realiza tomando la medida de la temperatura en 4 puntos equidistantes en la parte posterior de la celda fotovoltaica como se muestra en la Figura 5.7 (Puntos TC Cell #). Los resultados muestran que el error no supera el 1,33% y la tendencia sigue la misma obtenida por Nizetic y Cabo[17] los cuales atribuyen las diferencias con la temperatura tomada en medidas experimentales se deben a la dirección de la velocidad del viento en la toma de muestras.

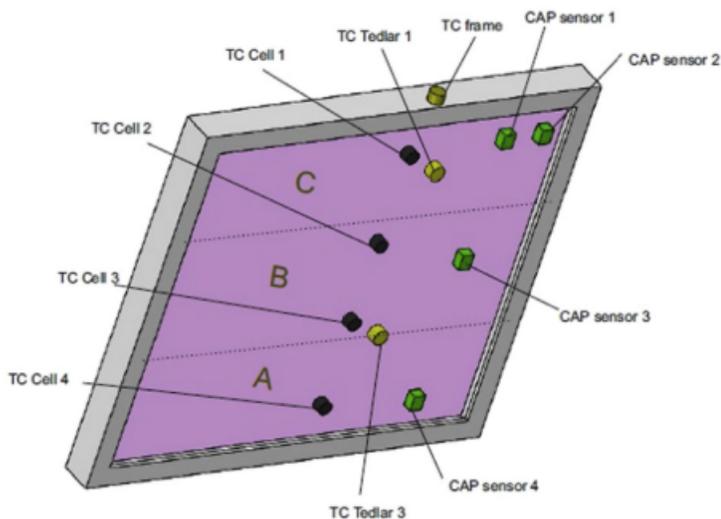


Figura 5.7: Puntos de medición usados en la metodología experimental de Nizetic y Cabo.[17]

Tabla 5.4: Comparación entre las temperaturas obtenidas en la celda del panel y la bibliografía.

	TC Cell 1 [°K]	TC Cell 2 [°K]	TC Cell 3 [°K]	TC Cell 4 [°K]
<b>Datos experimentales</b>	314	317	318	322
<b>Simulaciones Nizetic y Cabo</b>	315	316	318	316
<b>Resultados memoria</b>	318,19	319,8	321,1	319,9
<b>Error c/r a datos experimentales [%]</b>	<b>1,33</b>	<b>0,88</b>	<b>0,97</b>	<b>0,65</b>
<b>Error c/r a simulaciones [%]</b>	<b>1,01</b>	<b>1,20</b>	<b>0,97</b>	<b>1,23</b>

Dado esto, el modelo se considera validado y se procede con las simulaciones del caso con condiciones en el entorno urbano de Santiago.

### 5.3. Resultados

En esta sección se cambia la inclinación del panel a  $33^\circ$  donde se puede aprovechar mejor la energía para la localización, según lo que se observa en 2.15.1 se usa como condición de borde la mayor radiación observada que ocurre en el mes de Febrero alrededor de las 13 horas, con una radiación de  $944[W/m^2]$ , lo que luego del balance de energía equivale a  $681,9[W/m^2]$  siendo generados en la celda. Por otro lado, como se comento en la sección anterior los valores de la velocidad del viento a usar como condición de borde son 1, 2, 3, 5 y 7 [m/s] para los casos de velocidad uniforme, y los perfiles obtenidos en la sección anterior para los casos en que se considera que el panel esta aguas abajo de la turbina eólica de eje vertical.

#### 5.3.1. Perfiles de velocidad uniforme

Los resultados para los perfiles de velocidad uniforme se pueden observar a continuación.

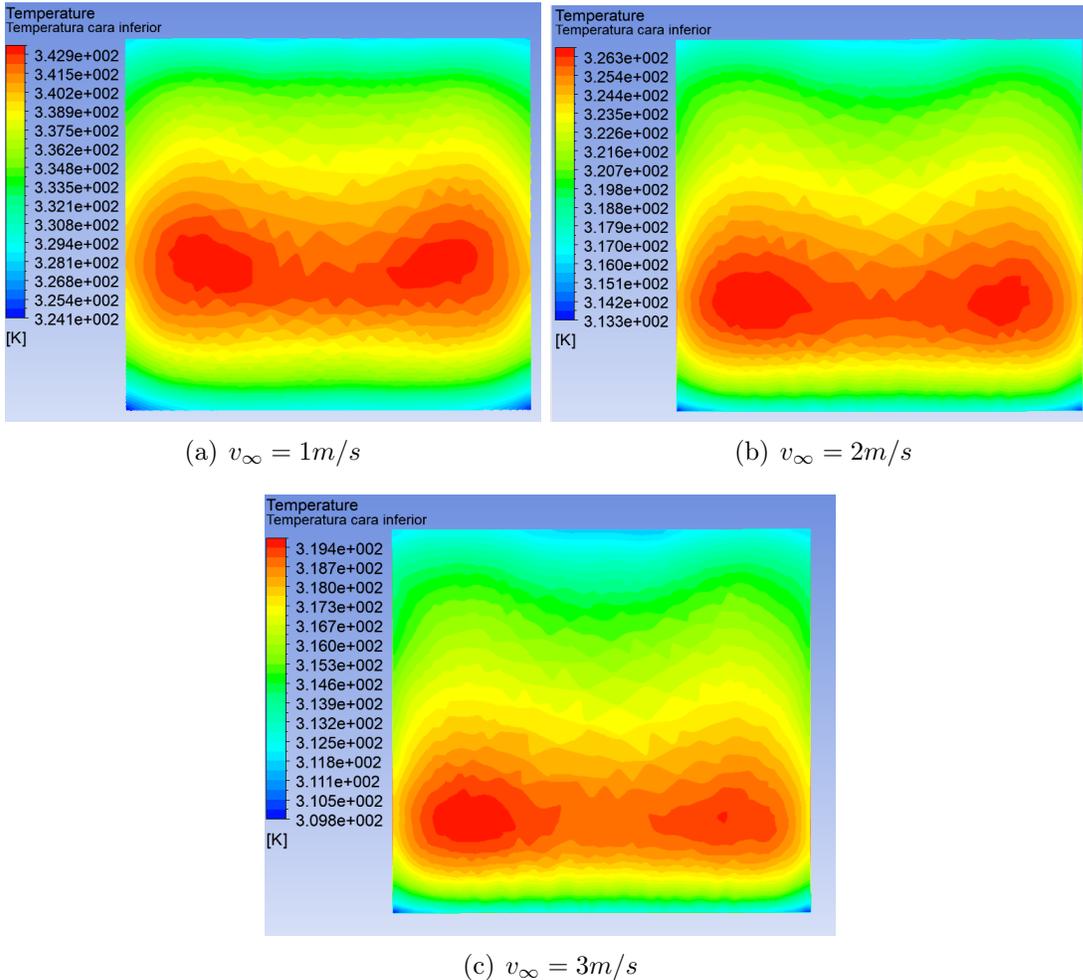
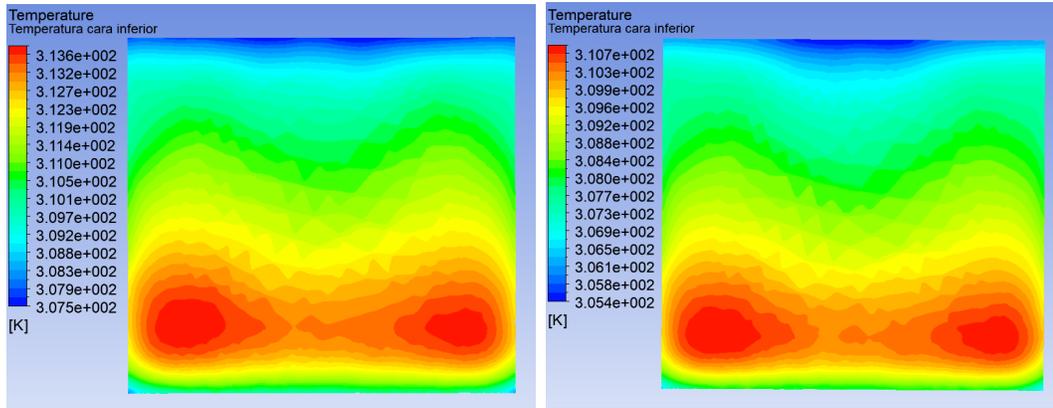


Figura 5.8: Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

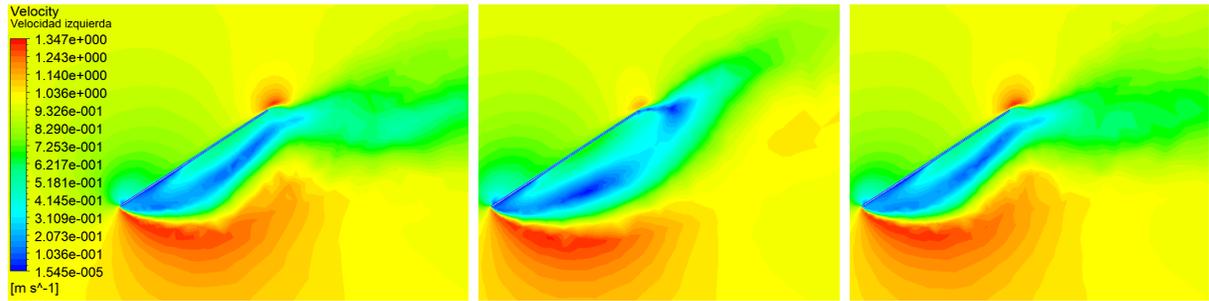


(a)  $v_\infty = 5m/s$

(b)  $v_\infty = 7m/s$

Figura 5.9: Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

Debido a la forma en que se distribuye la temperatura, se muestran también las distribuciones de velocidad en planos perpendiculares a la cara del panel, esto para observar como la velocidad influye en los puntos a mayor temperatura del panel. En la descripción de los gráficos  $y$  representa la distancia al centro del panel.

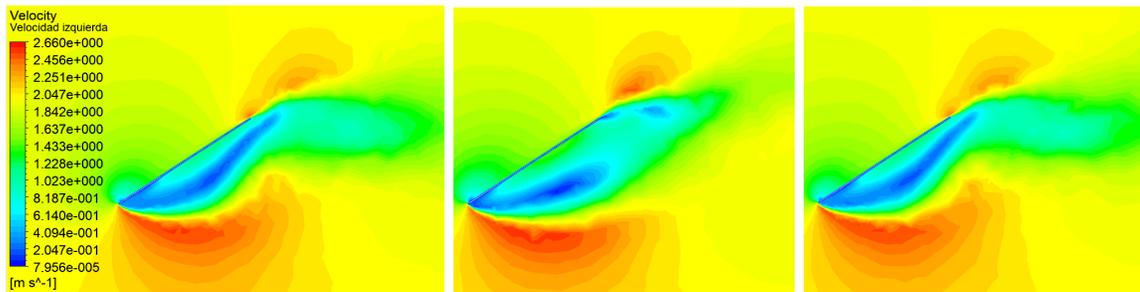


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.10: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia.

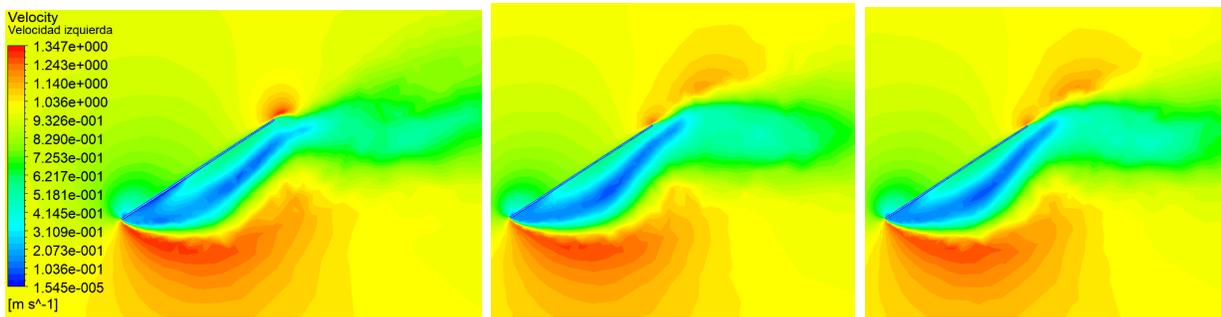


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.11: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 2m/s$ . Elaboración propia.

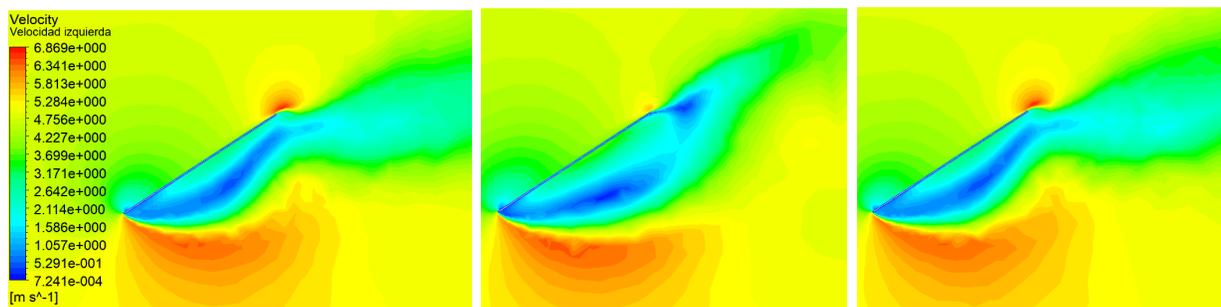


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.12: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia.

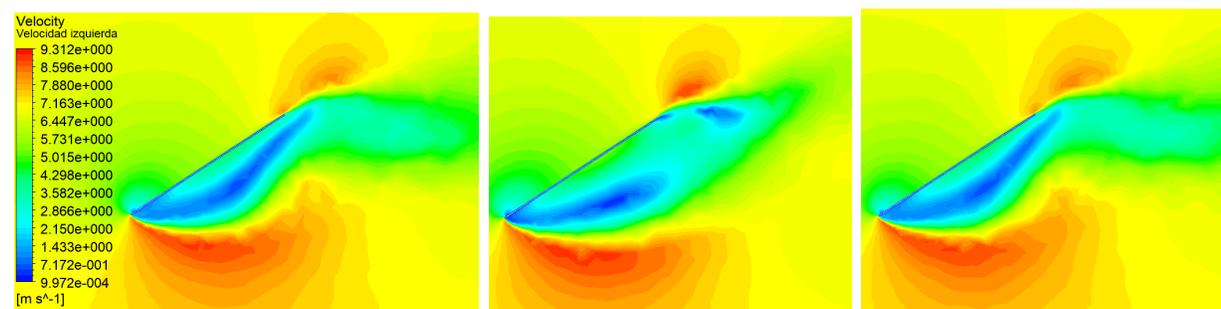


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.13: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia.



(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.14: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia.

Tabla 5.5: Temperaturas promedio en las distintas capas del modelo.

Velocidad viento [m/s]	Temperatura vidrio [°K]	Temperatura celda [°K]	Temperatura tedlar [°K]
1	337,62	338,08	337,95
2	323,03	323,47	323,34
3	316,79	317,23	317,10
5	311,18	311,62	311,49
7	308,53	308,96	308,85

### 5.3.2. Perfiles de velocidad generados por VAWT

Las simulaciones de esta sección se dividen en dos grupos: las del lado de retorno del álabe y las del lado de avance del álabe de la VAWT, cada una de estas dividida dependiendo de la distancia relativa entre el panel y la turbina (1 y 2 metros). Usando los perfiles obtenidos en la sección 4.3.2, y como se observó que los perfiles de velocidad para los lados de avance y retorno del álabe son distintos, se crearon condiciones de borde de velocidad que fueron aplicadas en la cara A del dominio simulado (Figura 5.4), de manera de que el perfil obtenido como resultado de las simulaciones de la VAWT se encuentra en el centro de la cara A y que el panel se encuentre totalmente sumergido por este perfil. El resto de los valores de la condición de borde corresponden a  $v_\infty$  tal como si la velocidad del viento no fuera afectada por la VAWT. Los distintos resultados obtenidos para la velocidad y la temperatura en las distintas capas del panel para los perfiles obtenidos a una distancia de 1 y 2 [m] aguas abajo de la turbina se muestran en las siguientes secciones y en la sección de Anexos.

#### Lado retorno del álabe a 1 [m] de distancia del panel

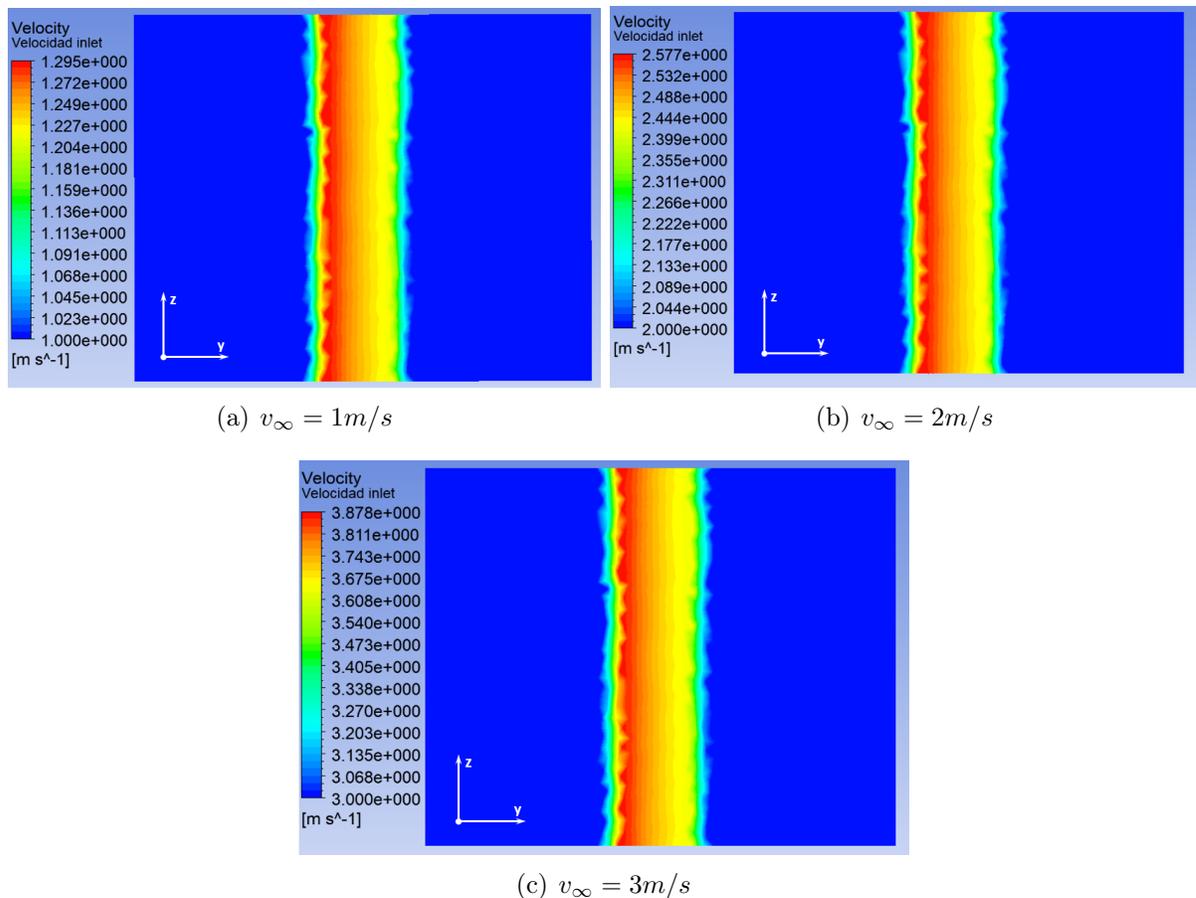


Figura 5.15: Perfiles de velocity usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

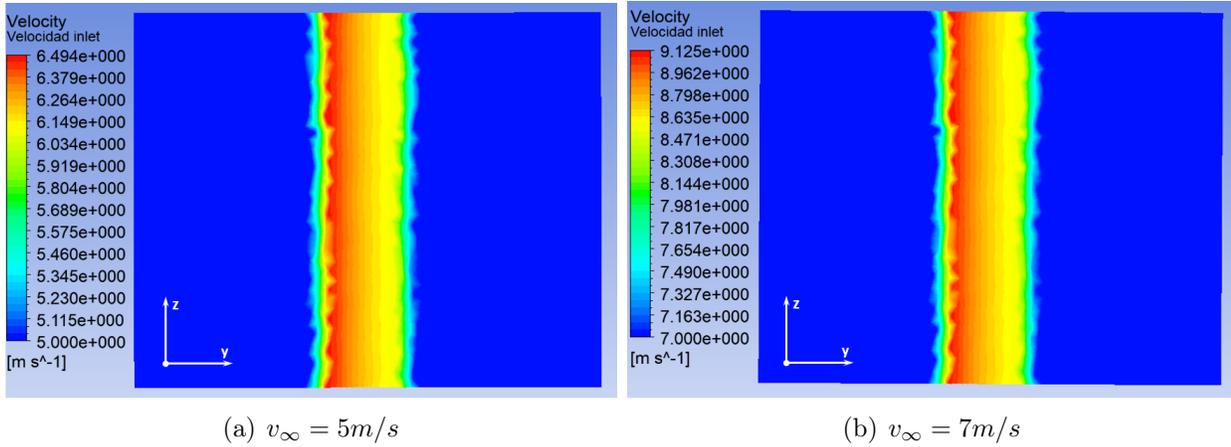


Figura 5.16: Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

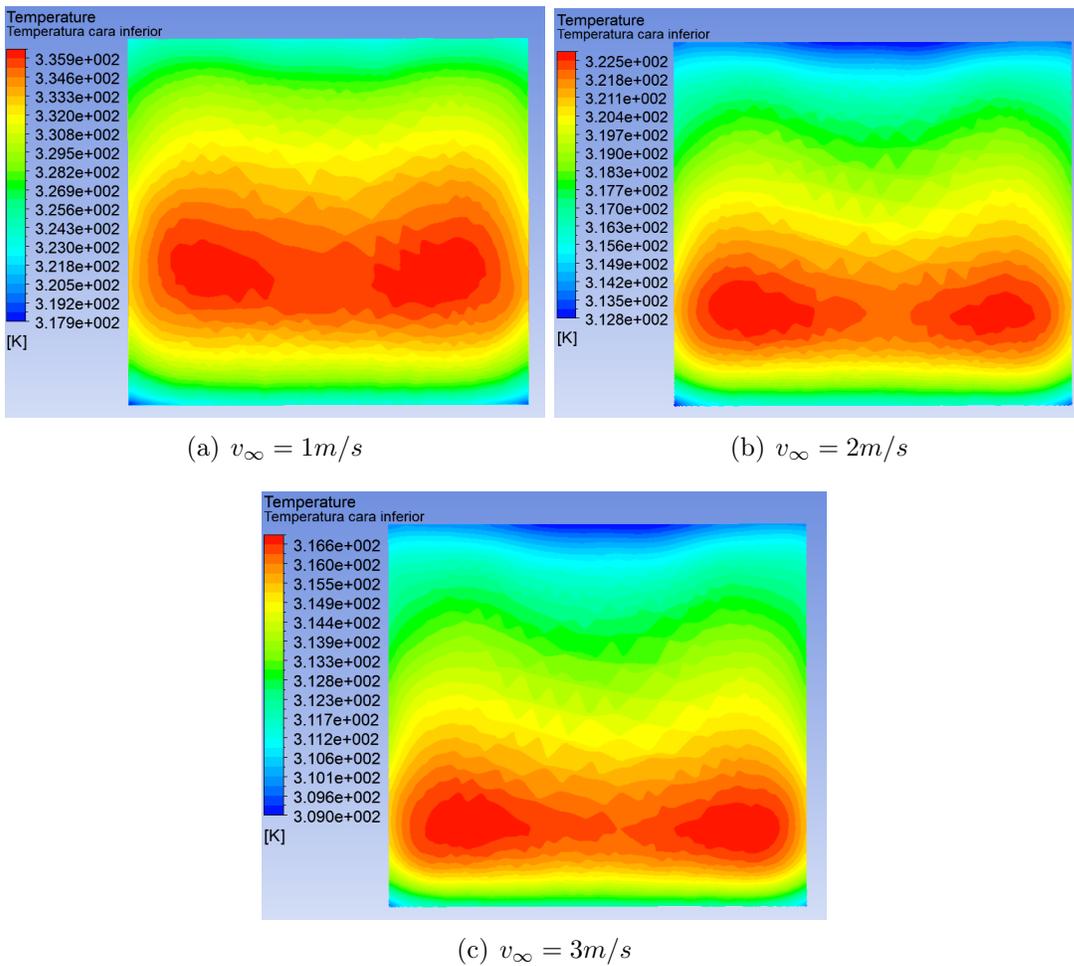


Figura 5.17: Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

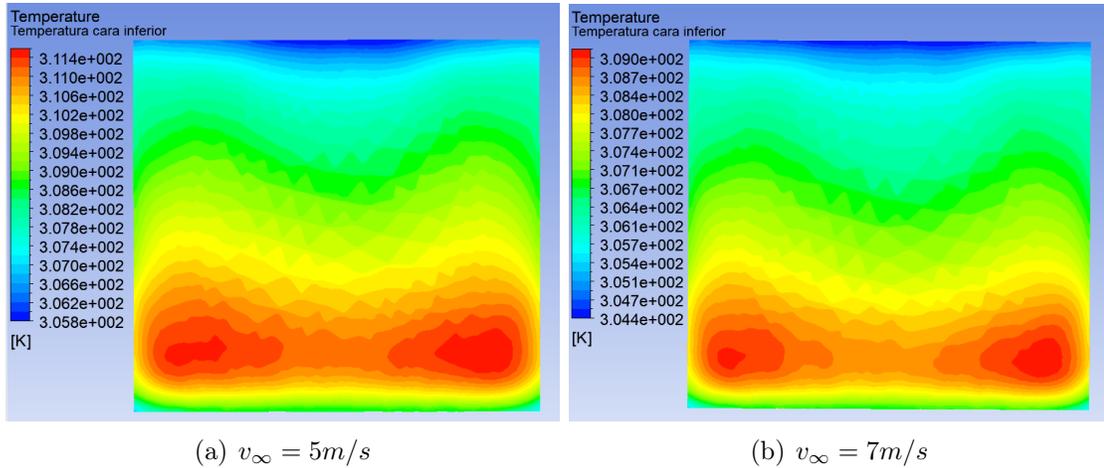


Figura 5.18: Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

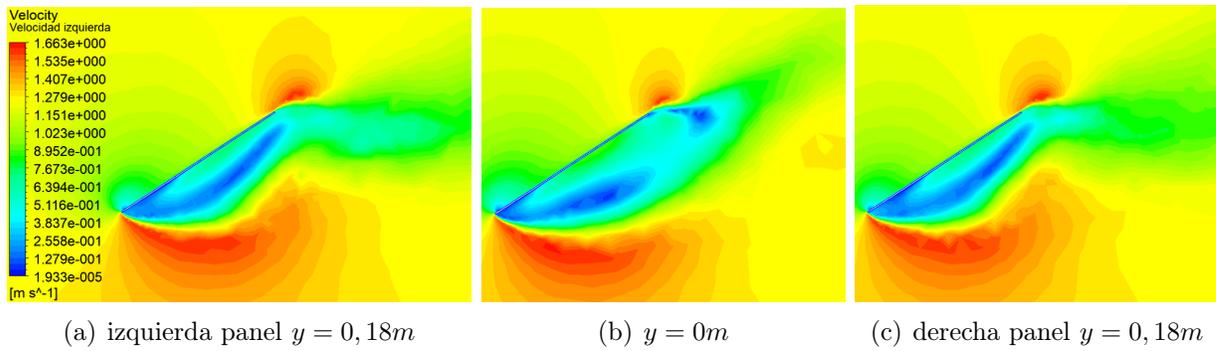


Figura 5.19: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_{\infty} = 1\text{ m/s}$ . Elaboración propia.

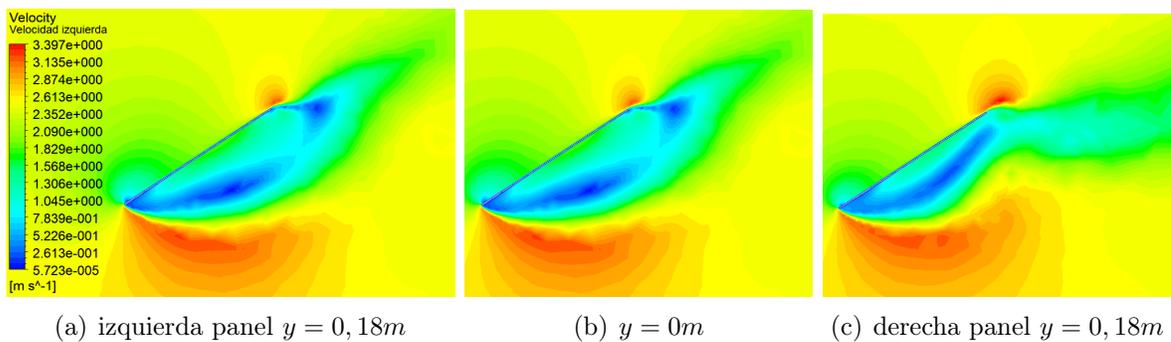


Figura 5.20: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_{\infty} = 2\text{ m/s}$ . Elaboración propia.

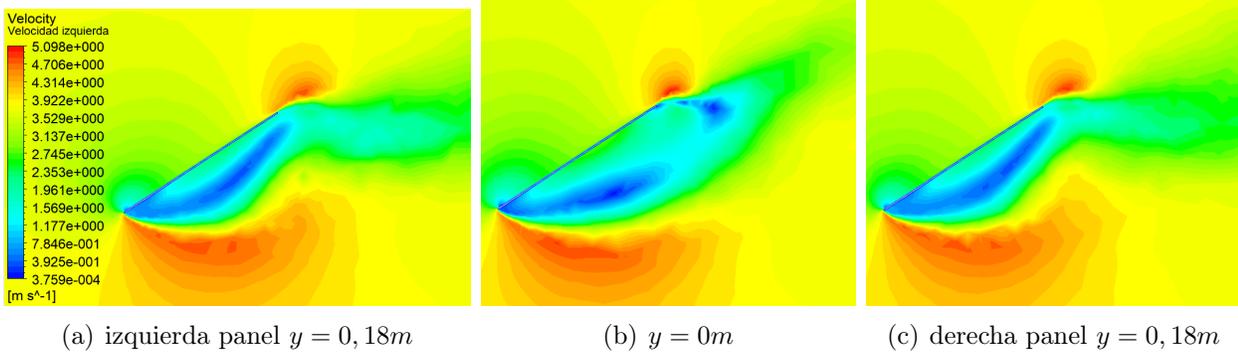


Figura 5.21: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia.

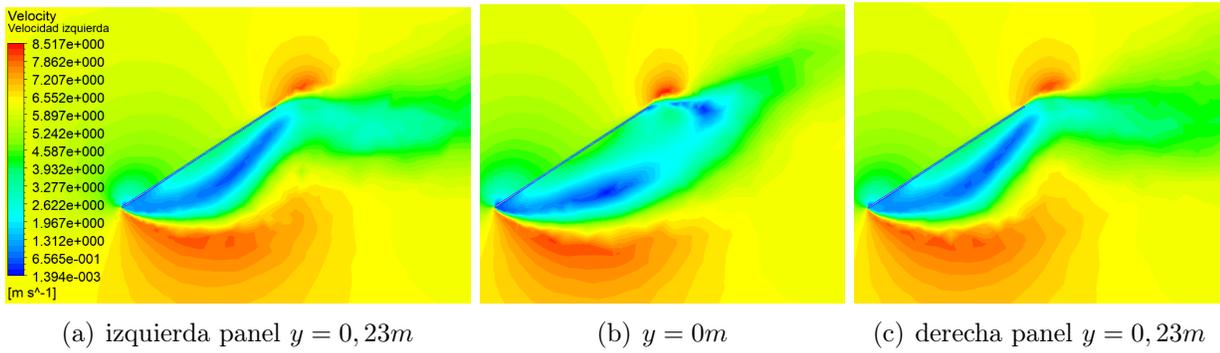


Figura 5.22: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia.

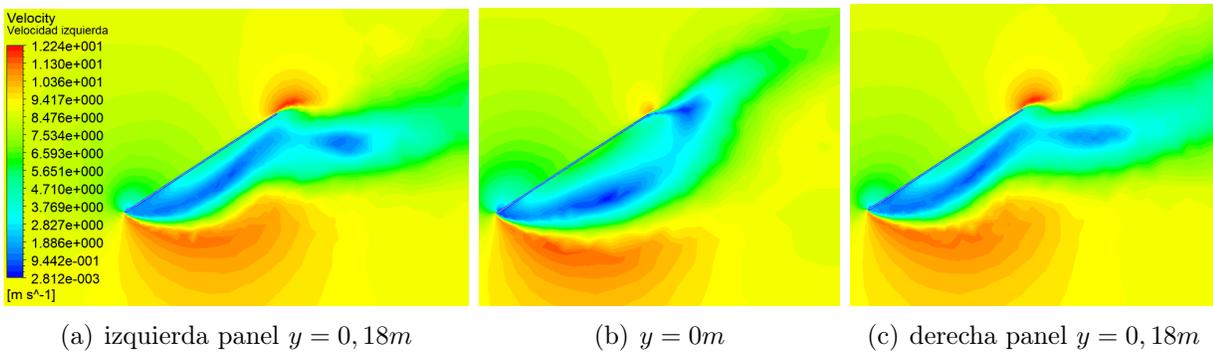


Figura 5.23: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia.

Lado avance del álabo a 1 [m] de distancia del panel

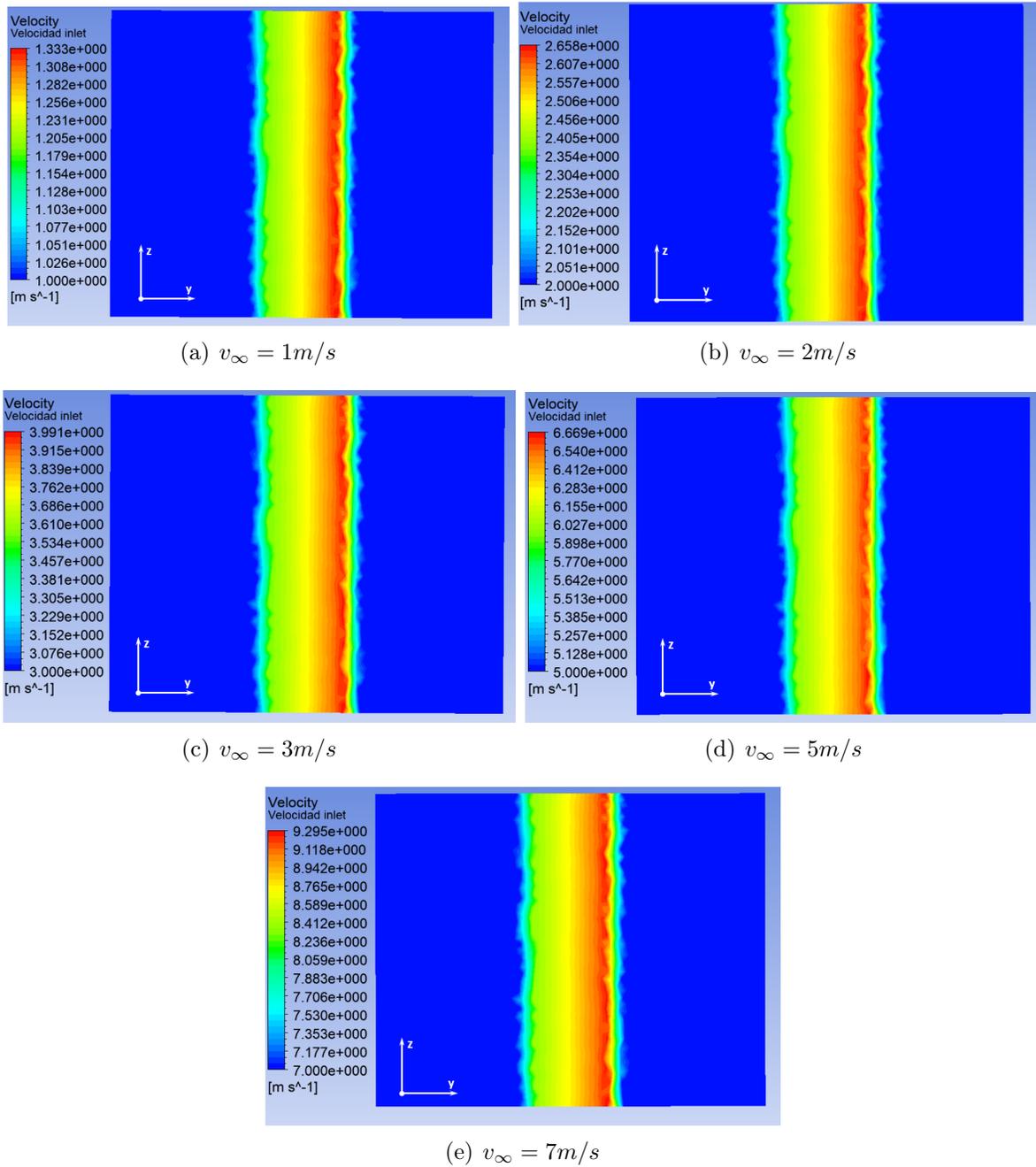
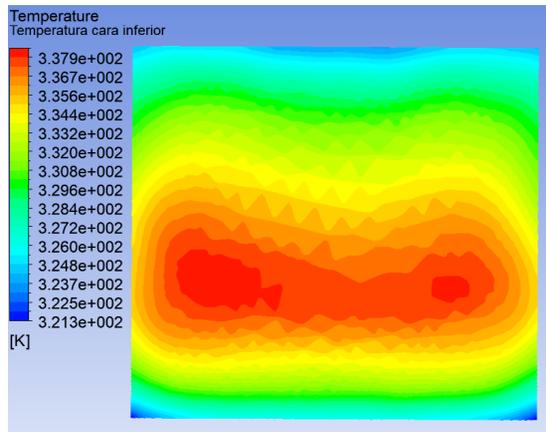
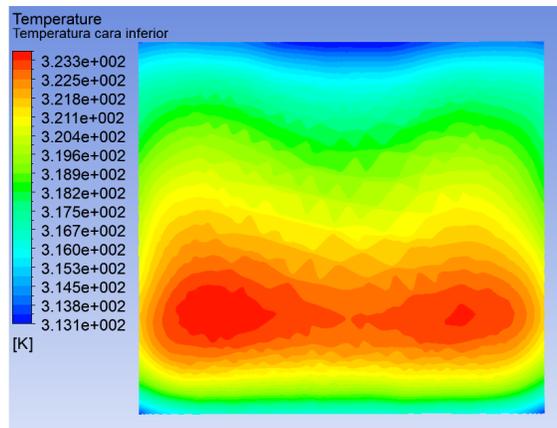


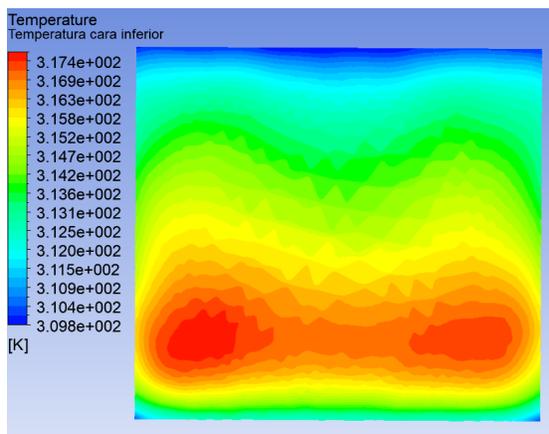
Figura 5.24: Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.



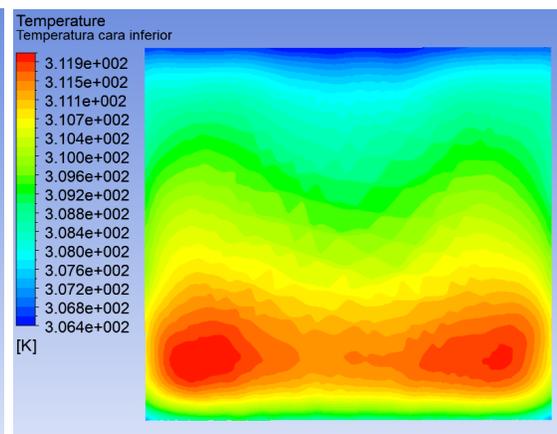
(a)  $v_{\infty} = 1\text{ m/s}$



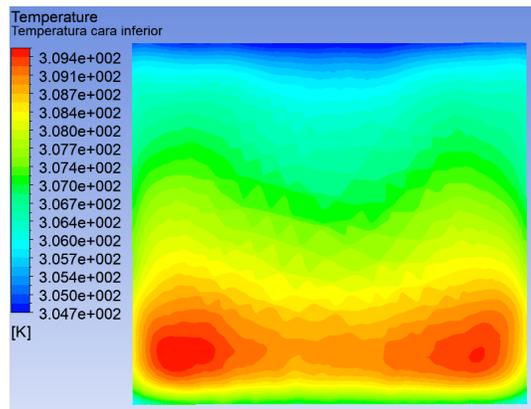
(b)  $v_{\infty} = 2\text{ m/s}$



(c)  $v_{\infty} = 3\text{ m/s}$

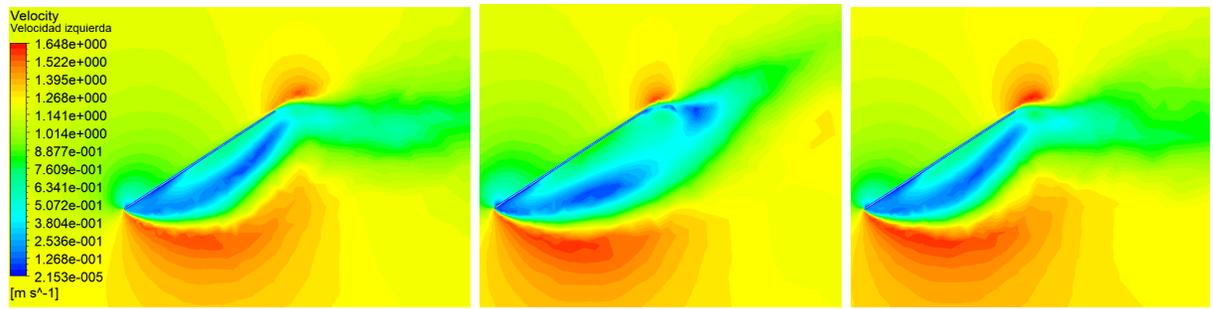


(d)  $v_{\infty} = 5\text{ m/s}$



(e)  $v_{\infty} = 7\text{ m/s}$

Figura 5.25: Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

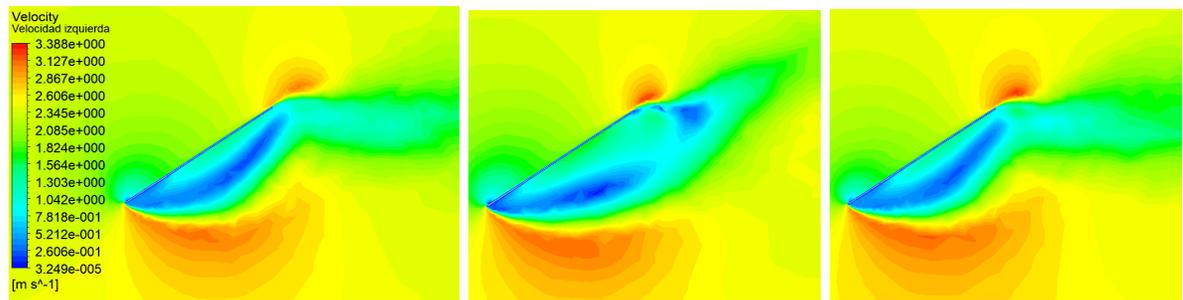


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.26: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia.

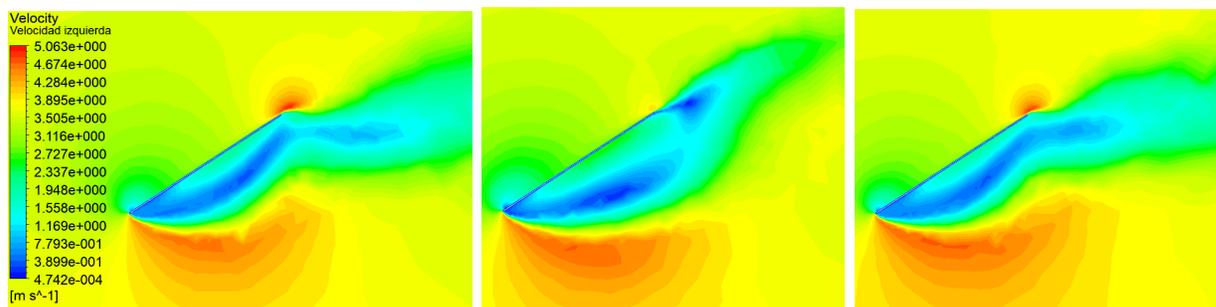


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.27: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 2m/s$ . Elaboración propia.

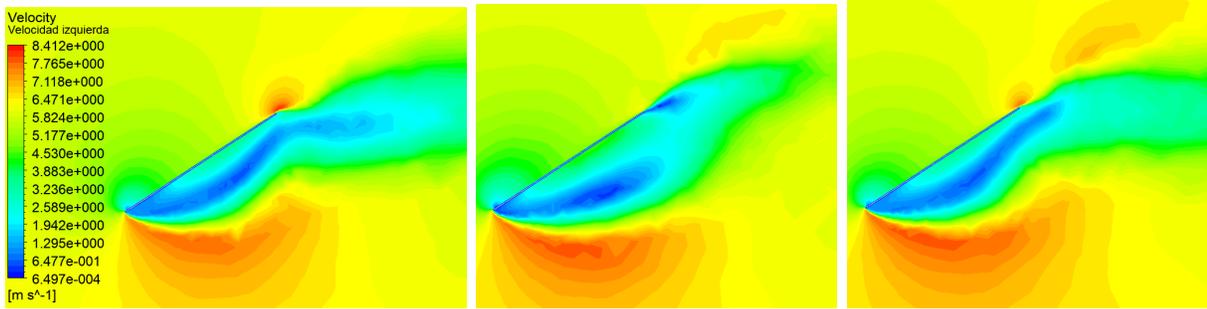


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

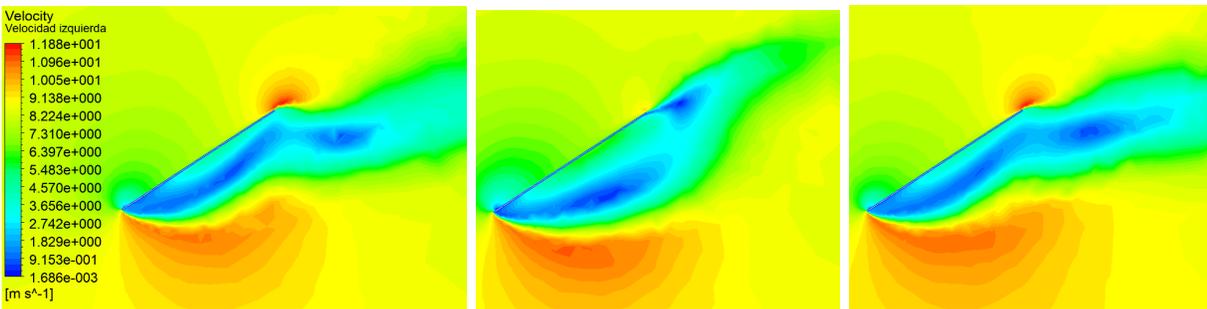
(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.28: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia.



(a) izquierda panel  $y = 0, 2m$                       (b)  $y = 0m$                       (c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.29: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia.



(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$                       (b)  $y = 0m$                       (c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura 5.30: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia.

Los resultados gráficos para las secciones a 2 metros de distancia del panel se encuentran en Anexos debido a la similitud con las figuras ya mostradas, y a que es posible comprender los fenómenos involucrados en este problema de transferencia de calor con lo expuesto en las secciones anteriores. Los resultados numéricos de estas simulaciones a 2 metros de distancia del panel serán incluidos en la comparación de resultados.

A continuación se presenta una tabla resumen con las temperaturas promedio en las distintas capas del panel PV, en esta tabla “Zona” se refiere al lugar en el cual se tomo el perfil respecto al giro de la turbina, con A la zona de avance del álabe y R la zona de retorno como se explica en secciones anteriores.

Tabla 5.6: Resumen resultados para la temperatura promedio en las distintas capas del panel a distintos perfiles de velocidad aguas abajo de la VAWT

$v_{\infty}$	Zona	Perfil de velocidad a 1m respecto a VAWT			Perfil de velocidad a 2m respecto a VAWT		
		T vidrio [°K]	T celda [°K]	T tedlar [°K]	T vidrio [°K]	T celda [°K]	T tedlar [°K]
1	A	333,18	333,63	333,51	334,06	334,52	334,39
1	R	332,24	332,69	332,57	332,32	332,76	332,64
2	A	319,88	320,32	320,20	320,35	320,79	320,66
2	R	319,25	319,69	319,56	319,28	319,72	319,59
3	A	314,42	314,86	314,74	314,73	315,17	315,04
3	R	313,97	314,41	314,28	313,96	314,40	314,27
5	A	309,54	309,98	309,85	309,69	310,13	310,00
5	R	309,28	309,71	309,58	309,19	309,62	309,49
7	A	307,26	307,69	307,56	307,28	307,73	307,60
7	R	307,01	307,44	307,30	306,96	307,38	307,25

### 5.3.3. Comparación de resultados en la celda fotovoltaica

Se compara la temperatura de celda en los distintas configuraciones y el aumento en la eficiencia para las distintas posiciones. A continuación la nomenclatura usada es la siguiente:

- **PV solo:** panel fotovoltaico sin interacción la turbina.
- **1m-A:** panel se encuentra bajo el perfil a 1 metro de distancia de la turbina en la zona de avance del álabe.
- **2m-A:** panel se encuentra bajo el perfil a 2 metros de distancia de la turbina en la zona de avance del álabe.
- **1m-R:** panel se encuentra bajo el perfil a 1 metro de distancia de la turbina en la zona de retorno del álabe.
- **2m-R:** panel se encuentra bajo el perfil a 2 metros de distancia de la turbina en la zona de retorno del álabe.

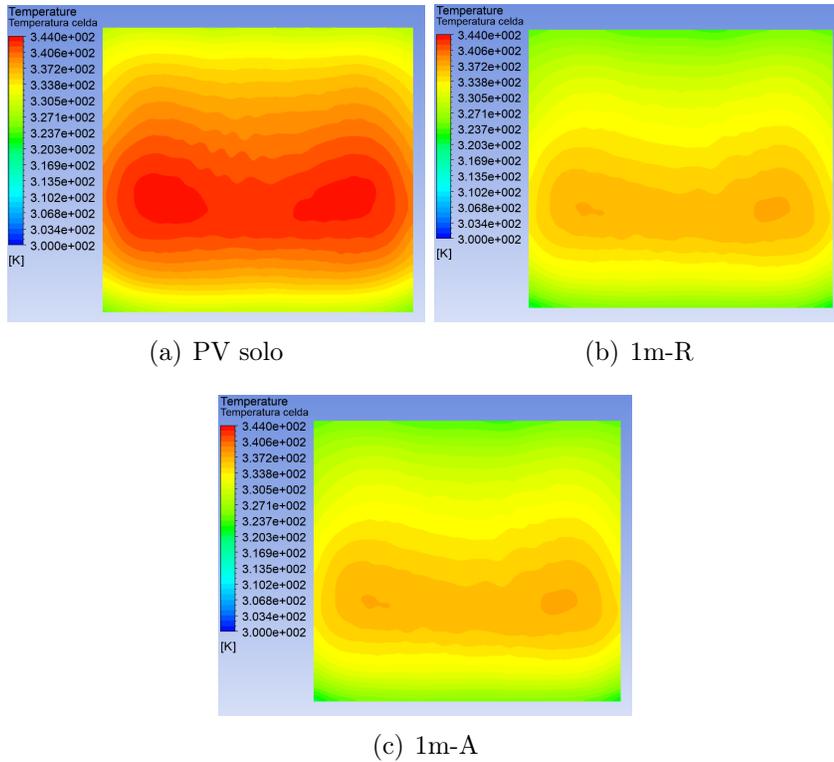


Figura 5.31: Distribución de la temperatura en la parte inferior de la celda fotovoltaica para distintas configuraciones y  $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia.

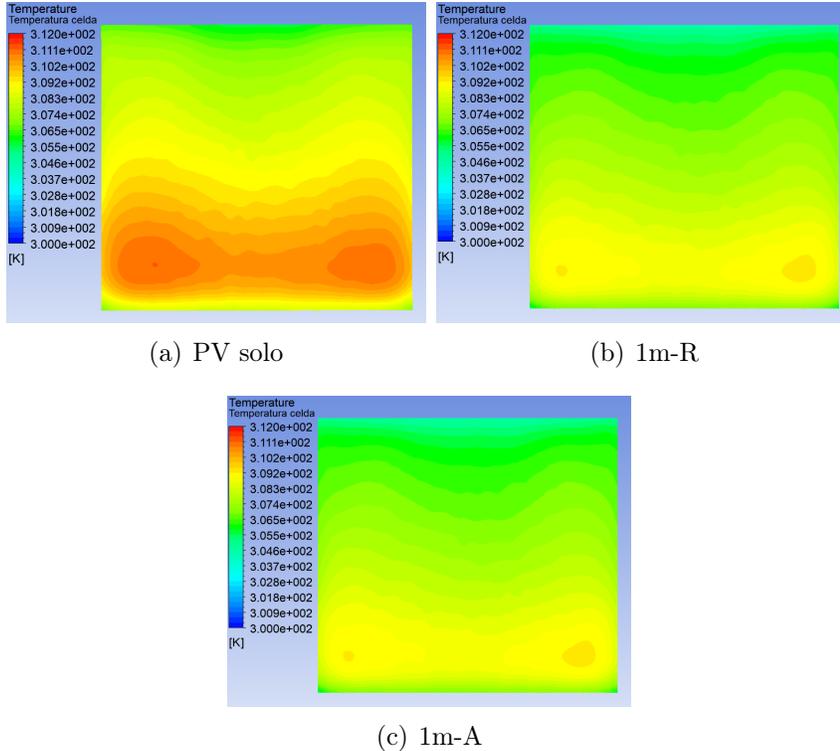


Figura 5.32: Distribución de la temperatura en la parte inferior de la celda fotovoltaica para distintas configuraciones y  $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia.

Tabla 5.7: Comparación entre la temperatura promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV.

$v_\infty$	Temperatura celda [ $^{\circ}C$ ]				
	PV solo	1m-A	2m-A	1m-R	2m-R
<b>1</b>	64,93	60,48	61,37	59,54	59,61
<b>2</b>	50,32	47,17	47,64	46,54	46,57
<b>3</b>	44,08	41,71	42,02	41,26	41,25
<b>5</b>	38,47	36,83	36,98	36,56	36,47
<b>7</b>	35,81	34,54	34,58	34,29	34,23

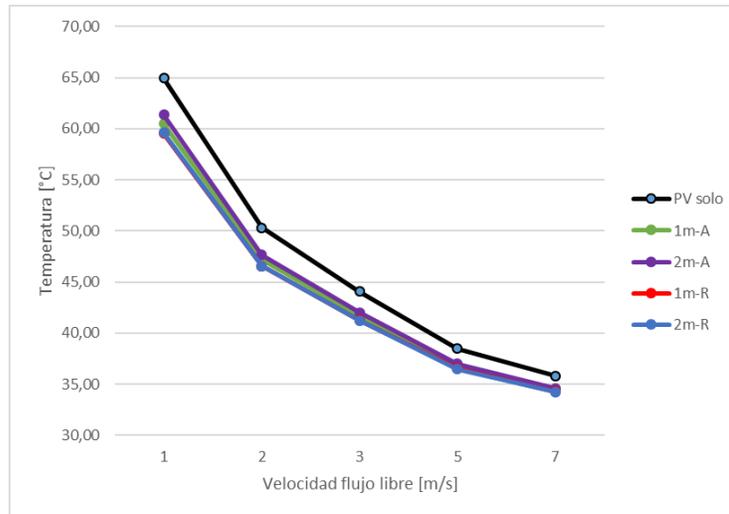


Figura 5.33: Comparación entre la temperatura promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV. Elaboración propia.

Tabla 5.8: Comparación de la temperatura máxima en la parte inferior de la celda del panel PV. Elaboración propia.

$v_\infty$	Temperatura máxima de celda [ $^{\circ}C$ ]				
	PV solo	1m-A	2m-A	1m-R	2m-R
<b>1</b>	70,56	65,55	67,10	64,31	64,80
<b>2</b>	53,60	50,68	51,60	49,86	50,01
<b>3</b>	47,50	44,70	45,14	43,87	44,05
<b>5</b>	40,88	39,13	39,31	38,65	38,75
<b>7</b>	37,93	36,57	36,45	36,21	36,27

Tabla 5.9: Comparación entre la eficiencia promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV.

Eficiencia promedio celda [%]					
$v_\infty$	PV solo	1m-A	2m-A	1m-R	2m-R
1	14,29	14,64	14,57	14,71	14,70
2	15,43	15,68	15,64	15,73	15,73
3	15,92	16,11	16,08	16,14	16,14
5	16,36	16,49	16,48	16,51	16,52
7	16,57	16,67	16,66	16,69	16,69

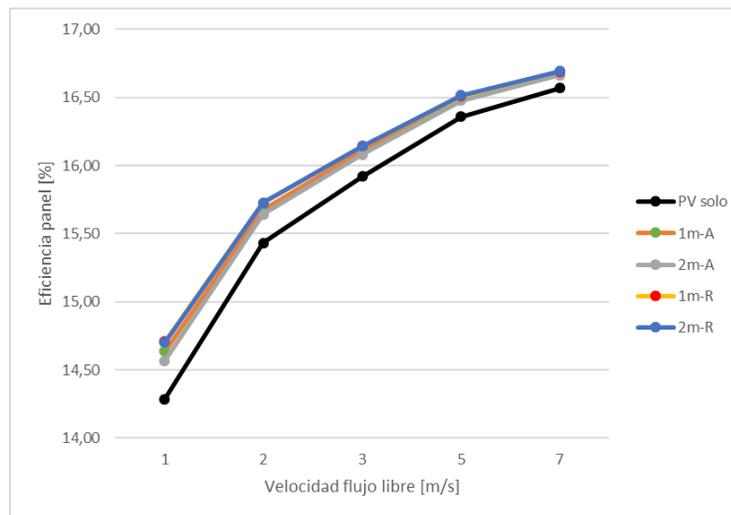


Figura 5.34: Comparación de la eficiencia promedio de celda para distintas configuraciones del panel PV. Elaboración propia.

Tabla 5.10: Disminución de la temperatura promedio de celda para las distintas configuraciones con respecto al panel sin interacción con la turbina.

Disminución T° celda [%]				
$v_\infty$	1m-A	2m-A	1m-R	2m-R
<b>1</b>	6,85	5,48	8,30	8,18
<b>2</b>	6,25	5,33	7,51	7,45
<b>3</b>	5,36	4,66	6,38	6,42
<b>5</b>	4,25	3,88	4,96	5,18
<b>7</b>	3,55	3,42	4,25	4,40

Tabla 5.11: Aumento de la potencia generada por el panel para las distintas configuraciones con respecto al panel sin interacción con la turbina.

Aumento de la potencia [%]				
$v_\infty$	1m-A	2m-A	1m-R	2m-R
<b>1</b>	2,44	1,95	2,95	2,91
<b>2</b>	1,60	1,36	1,92	1,90
<b>3</b>	1,16	1,01	1,38	1,39
<b>5</b>	0,78	0,72	0,91	0,96
<b>7</b>	0,60	0,58	0,72	0,75

# Capítulo 6

## Análisis y discusión de resultados

### 6.1. Modelo turbina eólica y obtención de perfiles

Como se observa en la sección 4.2 el modelo realizado para la simulación de la turbina eólica mediante una malla rotatoria, para simular los efectos del funcionamiento de esta, entrega resultados cercanos a la realidad. La malla seleccionada cumple con los criterios en cuanto a calidad que se mencionan en la guía de usuario de Ansys[19] y cumple el criterio de independencia, pero a pesar de esto se producen diferencias de entre 11 % y 13 % comparado con los resultados experimentales como se ve en la Tabla 4.3. Estas diferencias, como se mencionó en la misma sección, pueden tener relación con los parámetros ambientales de los modelos experimentales[18] y las simulaciones [15] en cuanto no se tiene consideración de ellas en los estudios realizados, pero debido a que siguen la misma tendencia, como se observa en el gráfico 4.6, se considera el modelo validado.

Los resultados observados en los Figuras 4.7 a 4.11 de la sección 4.3.1 muestran la generación de las zonas periódicas de alta y baja velocidad estudiadas por Zhang[15] aguas abajo de la turbina Savonius, estas zonas se ven generadas por el efecto de bloqueo que generan las paredes de los álabes contra el flujo de viento, obligando a este a acelerar por los lados. Además es posible observar en los gráficos como la zona de avance del álabe genera velocidades superiores a la zona de retorno como es esperado por la dirección en la que gira la turbina y la oposición que ejerce el álabe en la segunda zona. Por otro lado la zona directamente detrás de la turbina eólica posee vórtices de muy baja velocidad comparada con el flujo de aire, llegando incluso cercanas a los  $0[m/s]$ , principalmente por el efecto de bloqueo de flujo que ejerce la turbina.

También es interesante observar la parte (b) de estos gráficos en la que se muestra la energía cinética promedio en turbulencias, donde se observa que existen vórtices de variada energía que generan un perfil parecido al efecto de la calle de vórtices de Von Kármán, los cuales van disipando esta energía debido a las recirculaciones de flujo en la zona, disipación que puede ocurrir en forma de temperatura debido a los efectos de roce viscoso. Es por esto, y debido a que la baja velocidad no favorece la transferencia de calor hacia el ambiente de parte de un panel fotovoltaico, que esta zona se ha dejado fuera del estudio, el cual busca mejorar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

En la sección 4.3.2 se presentan gráficamente los perfiles de velocidad estudiados, estos representan la velocidad promedio para un periodo de rotación de la turbina en los puntos de medición definidos en la Figura 4.12. En las Figuras 4.13 a 4.17 se aprecia mejor la zona de

baja velocidad que ocurre aguas abajo de la turbina exactamente detrás de esta, de aquí es que se seleccionan como objeto de estudio para las simulaciones del panel PV los perfiles de velocidad en las zonas de avance y retorno de la turbina, que son utilizados como condición de borde entrada en la simulación 3D del panel fotovoltaico. Es posible observar en la parte (a) de estas figuras como en todos los casos la velocidad llega a un máximo que es 1,3 veces el valor de la velocidad del viento incidente, además como la velocidad en el lado de avance de álabe disminuye entre 1 y 2 metros de distancia, mientras que en la zona de retorno tiene un aumento que se va haciendo cada vez más notorio al aumentar la velocidad, esto puede tener relación a la forma del perfil que se ve observada en la parte (b) de velocidad en el eje  $y$ , donde la velocidad en  $y$  pasa a ser prácticamente cero en las zonas de 2 metros lo que puede ocurrir debido a como las zonas periódicas de rotación van desapareciendo a medida que avanza el flujo y la magnitud de la velocidad aumenta debido a la desaparición de esta velocidad en el eje  $y$ . Este efecto de la velocidad a 1 y 2 metros es interesante en el campo de como cambiará la temperatura del panel fotovoltaico y en que posición será mejor ubicarlo.

## 6.2. Modelo del panel fotovoltaico

La malla seleccionada en la sección 5.2, como se observa en la Tabla 5.4, logra resultados con un error menor al 1 % con respecto a las simulaciones y los datos experimentales tomados por Nizetic[17], lo que deja como interrogante la diferencia entre la distribución de la temperatura a lo largo de los puntos de medición que se observan en la Figura 5.7 , efecto que es obviado en la bibliografía mencionando que no es posible obtener un flujo de viento en la misma dirección a cada momento en la toma de resultados experimentales debido a que ellos también obtienen la misma tendencia diferente a la de los datos tomados. A pesar de esto el modelo, al igual que en el estudio de Nizetic, se considera válido para el estudio de los otros fenómenos que ocurren en el panel.

### 6.2.1. Resultados para velocidad uniforme

La zona en que es más interesante observar la temperatura es en la parte inferior del panel fotovoltaico, debido a que esta es la que está más cercana a la celda y el fenómeno de transferencia de calor es más interesante en la parte posterior del panel debido a la separación de capa límite y a las recirculaciones que existen. Es debido a esto que se muestran las temperaturas en la cara posterior al flujo del viento en las Figuras 5.8 y 5.9, en estas se observa un perfil relativamente simétrico desde el centro del panel fotovoltaico, esto principalmente porque se está evaluando el caso con velocidad uniforme. También es posible observar como el rango de temperaturas va bajando a medida que se aumenta la velocidad del viento, y como la temperatura en todos los casos es más baja en los bordes superior e inferior, llegando el borde superior a tener una temperatura cercana al aire, y como en la parte inferior del panel se producen las mayores temperaturas con dos focos principales a mayor temperatura a la misma distancia del centro del panel.

En las Figuras 5.10 a 5.14 es posible observar el perfil de velocidad alrededor del panel fotovoltaico, en las partes (a) y (c) se ubican los focos más calientes del panel, mientras que la parte (b) es el perfil de velocidad en el centro de este. Los perfiles de velocidad muestran como existe una separación de la capa límite del flujo en la parte posterior del panel junto con recirculaciones, estas separaciones del flujo que generan recirculaciones de baja velocidad disminuyen la transferencia de calor[20] en la zona posterior del panel, lo que provoca la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior del panel observada en las Figuras 5.8 y 5.9. Además es posible observar como la zona con menores velocidades debido a estos efectos es más grande en la zona cercana al panel a los lados de este, lo que explica la forma que tiene el perfil de temperaturas en la parte posterior, donde las zonas a mayor temperatura se encuentran a los lados y en la línea central la temperatura es menor. Por otro lado, se observa en los perfiles de velocidad como en la parte superior del panel se genera una zona de alta velocidad comparada con el resto, debido al efecto de bloqueo que genera el panel al flujo de aire, esta alta velocidad implica lo observado en la distribución de temperatura del panel, donde la zona superior es la que tiene menor temperatura gracias a que la mayor velocidad conlleva a una transferencia de calor por convección forzada mayor.

Finalmente al observar el resumen de los resultados en la Tabla 5.5 queda claro que el material con menor temperatura promedio es el vidrio, al encontrarse en la parte superior y quedar expuesto a contacto directo con el fluido en movimiento, el cual mejora la transferencia de calor por convección forzada, y al estar más lejos de la celda fotovoltaica. Por este mismo fenómeno se observa como al aumentar la velocidad de entrada del viento la temperatura promedio del panel disminuye, pasando de  $338^{\circ}K$  con  $1m/s$  a  $309^{\circ}K$  con  $7m/s$  lo que confirma la importancia de los flujos de viento en el ambiente urbano como mecanismo de enfriamiento del panel fotovoltaico. Aparte de esto es importante destacar como la diferencia de temperaturas al aumentar la velocidad es considerable en el paso de bajas velocidades como  $1$  y  $2m/s$  pero a medida que aumenta más la velocidad la disminución de temperatura no es mucho mayor, esto puede tener relación con que a  $1m/s$  el efecto de la convección forzada no es superior al de la convección natural por lo que la velocidad del viento no es relevante como mecanismo de enfriamiento del panel fotovoltaico.

### 6.2.2. Resultados para velocidad afectada por la VAWTV

De las Figuras 5.15, 5.16 y 5.24, es posible observar la magnitud de la velocidad de los distintos perfiles generados, además se da cuenta como estos tienden a tener una mayor velocidad por un sólo lado del panel, lo que hace esperable que la distribución de temperatura en estos no sea uniforme como en la sección anterior. Es importante mencionar nuevamente que los perfiles están centrados en el panel y que las condiciones de bordes usadas incluyen la velocidad en  $x$  e  $y$  para así imponer el efecto de rotación del fluido observado en los vórtices periódicos del perfil de la turbina eólica de eje vertical, y representar de mejor manera los perfiles promedio.

En las Figuras 5.17 y 5.18, junto con la Figura 5.25, se nota como los paneles tienen la misma distribución que para la velocidad uniforme, concentrándose las mayores temperaturas en la parte inferior de este y a cada extremo respecto al centro. También se da cuenta como el lado con mayor velocidad en el perfil usado como condición de borde es el lado del panel con

menores temperaturas como se preveía por el efecto de la convección forzada.

La distribución de temperaturas nuevamente se explica observando las Figuras 5.19 a 5.23 y 5.26 a 5.30, donde se aprecian las zonas de desprendimiento de capa límite y recirculaciones provocadas por la geometría del panel, las cuales son de menor longitud en el centro de este y en el lado consecuente con la mayor velocidad del perfil, lo que provoca la diferencia de temperaturas y la distribución de estas como se comentó para los paneles de velocidad uniforme debido a la disminución en la transferencia de calor por convección provocada por estas zonas. Además nuevamente se aprecian zonas de mayor velocidad en la parte superior del panel lo que provoca que mejore la transferencia de calor en la cara superior sobretodo en la parte superior, donde se encuentran las menores temperaturas.

En la Tabla 5.6 se observa la misma distribución de temperaturas que en la zona uniforme, donde la capa de vidrio es la con menor temperatura promedio, y la tedlar la con mayor temperatura después de la celda debido a la cercanía con la fuente de generación de calor y la disminución de la transferencia de calor producto de las recirculaciones de baja velocidad en la cara inferior del panel. Nuevamente se observa el efecto de la velocidad en la convección forzada debido a la disminución de la temperatura promedio en todos los materiales del panel producto del aumento de esta.

Por otro lado, se identifica que para la posición a 1 metro de la turbina, la zona de retorno del álabe siempre tiene menores temperaturas de celda respecto al panel fotovoltaico sin considerar el efecto de la turbina, lo que puede ser explicado con los perfiles mostrados en la sección 4.3.2 dado que el lado de retorno concentra las mayores velocidades en el eje  $y$  siendo un fluido con un carácter más parecido a un vórtice, los cuales son estudiados debido a su capacidad de mejorar la transferencia de calor[21]. Para la ubicación del panel a 2 metros de la turbina nuevamente la zona que obtiene menores temperaturas es la de retorno, esto debido al efecto comentado de la velocidad en la zona de retorno con la disminución de la velocidad en el eje  $y$  y el aumento de la magnitud de la velocidad con respecto a la zona de avance del álabe, lo que puede ser observado claramente en los perfiles de velocidad a 2 metros que se encuentran en las Figuras A.1 y B.1 de la sección de anexos los cuales son mucho más uniformes y de mayor velocidad en el lado de retorno. Este fenómeno también afecta a los resultados respecto a la zona a 1 metro, ya que se observa que la temperatura a 2 metros en la zona de retorno del álabe es menor que a 1 metro para los casos de  $v_{\infty}=3,5$  y  $7$  m/s, debido al aumento en la magnitud de la velocidad en el lado de retorno a 2 metros.

### 6.3. Implementación de ambas tecnologías

Es importante considerar que estos resultados son una simplificación de la interacción real de la turbina eólica con el panel fotovoltaico, debido a que se usaron simplificaciones en la forma de obtener el perfil de la turbina y en como este es implementado como condición de borde del panel con el fin de realizar simulaciones estacionarias de la transferencia de calor. Además se usaron condiciones específicas para un momento del día en el entorno urbano y no se consideraron los efectos de la dirección del viento, ni del aumento de la velocidad del viento producido en edificios[22] debido a las características de los modelos.

Al observar las Figuras 5.31 y 5.32 es posible notar para los casos de menor y mayor

velocidad como el perfil de velocidades generado por la turbina produce disminuciones de la temperatura y cambios en el perfil de temperatura en la cara inferior de la celda fotovoltaica para los casos (b) y (c) al ser comparados con el panel fotovoltaico solo. Las Figuras muestran como el perfil de temperatura en la celda se vuelve más uniforme en los casos en que el panel se encuentra aguas abajo de la turbina, y como los focos de mayor temperatura disminuyen su tamaño para ambos casos representativos. Además es posible observar en la Tabla 5.8 como los máximos de temperatura en los distintos casos disminuyen entre  $6,25^{\circ}C$  y  $1,36^{\circ}C$  dependiendo de  $v_{\infty}$ , lo que evidencia el beneficio que proporciona la turbina en la distribución de temperaturas y en los máximos de estas alcanzados en la capa de celda fotovoltaica lo que en la realidad puede tener un efecto beneficioso en el desempeño general del panel.

El resumen de los resultados para el promedio de la temperatura de celda, que se observa en la Tabla 5.7 y en la Figura 5.33, muestra como las dos zonas de vórtices periódicos generados por la turbina eólica Savonius logran una disminución de esta respecto a la temperatura promedio de celda del panel sin una turbina aguas arriba, resultado esperado debido al aumento de la velocidad promedio en estas zonas observado en la sección 4.3.2 pero que se cuantifica mediante el uso de simulaciones en el software. En la Tabla 5.9 y la Figura 5.34 se observa el efecto que tienen estas diferencias de temperatura respecto a la eficiencia promedio del panel fotovoltaico, mostrándose un aumento de esta última para la simulaciones del panel sumergido en el fluido aguas abajo de la turbina eólica de eje vertical. La disminución de la temperatura observada en 5.10 muestra que a mayor velocidad del viento las disminuciones porcentuales de la temperatura con respecto al panel sin turbina son menores, lo que concuerda con que existe un límite en que el aumento de la velocidad mejora la transferencia de calor por convección forzada. El aumento de la eficiencia promedio produce un aumento en la potencia generada por el panel fotovoltaico el cual es cuantificado en la Tabla 5.11 donde se denota que a velocidades bajas el aumento de la potencia puede llegar a un 3 %, mientras que a velocidades superiores a 3 m/s no supera el 1 %, siendo obtenidos los mayores aumentos de eficiencia, y por ende potencia, en la zona de retorno del álabe de la turbina eólica, donde para casos en que la velocidad del viento es inferior a 3 m/s los mayores aumentos de la potencia son a 1 metro de la turbina, mientras que para los casos con velocidad del viento entre 3 y 7 m/s estos se encuentran en la zona a 2 metros de la turbina.

Considerando lo anterior es importante tener en cuenta el espacio disponible en el techo de un edificio y las condiciones de viento en el lugar si se quiere instalar ambas tecnologías, y además si el objetivo es generar una gran cantidad de energía o sólo aportar de manera eficiente al consumo del edificio. Esto debido a que un arreglo bajo las mismas condiciones y dimensiones de la tecnología utilizada requiere un espacio de 4 metros de ancho por 2 metros de largo, por lo que será importante para el inversor determinar si su objetivo es obtener mayor potencia y pagar un precio más alto por las tecnologías, o menor potencia pero un sistema de menor costo y más eficiente, lo cual también dependerá de los tipos de paneles y turbinas, junto con su posible potencia para hacer la comparación de la inversión v/s lo que se obtiene en potencia y eficiencia en el uso del espacio.

# Conclusión

En este trabajo se logra desarrollar de manera satisfactoria el uso de simulaciones CFD mediante el software Ansys Fluent para representar fenómenos complejos de transferencia de calor en la realidad. Se demuestra que la utilización del software como herramienta, bajo condiciones de borde adecuadas, logra resultados con errores incluso menores al 2% con respecto a la realidad en el problema de transferencia de calor del panel fotovoltaico, pudiendo así usarlo como una herramienta fiable para analizar los fenómenos que se generan en las interacciones de la velocidad del viento con la temperatura del panel fotovoltaico.

Las simulaciones de la turbina eólica de eje vertical de tipo Savonius muestran de la manera esperada el efecto producido por la estela, generando zonas de vórtices periódicos de alta velocidad de los cuales se obtienen perfiles promedio de velocidad que son mayores a la velocidad de flujo libre del viento  $v_\infty$  lo que confirma la teoría sobre el aprovechamiento de estas zonas para mejorar la transferencia de calor por convección forzada.

Las simulaciones del panel fotovoltaico logran recrear las temperaturas promedio de celda observadas en la bibliografía y se confirma el aumento del fenómeno de convección forzada en las paredes del panel debido al aumento de la velocidad, ya que al aumentar esta se producen disminuciones en la temperatura promedio de este. Además es posible confirmar que el efecto de desprendimiento de capa límite y las recirculaciones presentes en la parte posterior del panel provocan zonas en la que es disminuida la transferencia de calor, por lo que se generan puntos a mayor temperatura en el panel coincidentes con los lugares en que ocurren estos fenómenos.

Los resultados de las simulaciones en las que el panel fotovoltaico es sumergido en el flujo aguas abajo de la turbina eólica de eje vertical, confirman que el aumento de la velocidad en las zonas de vórtices generadas por los álabes en avance y retorno provocan una mejora en la transferencia de calor del panel, obteniéndose menores máximos de temperatura en la celda, una distribución más uniforme de la temperatura, menores temperaturas promedio de celda y por ende un aumento en la eficiencia del panel. La disminución de la temperatura promedio va desde un 3,42% en el caso de 2 metros en la zona de avance del álabe a la velocidad de 7m/s hasta un 8,3% para el caso a 1 metro de la zona de retorno del álabe a la velocidad de 1m/s, estos aumentos se traducen en un aumento de la eficiencia y la potencia del panel que van desde el orden del 0,58% hasta un 2,95% respectivamente. Por lo tanto se confirma que la implementación de ambas tecnologías, mediante el posicionamiento del panel en las zonas de vórtices de alta velocidad aguas abajo de la turbina, genera un aumento de la eficiencia del panel y por consecuencia una mayor producción de energía eléctrica, llegando a la conclusión de que si la velocidad del viento en la zona a instalar ambas tecnologías es menor a 3m/s es más conveniente instalar un panel a 1 metro de la turbina en la zona de avance del álabe, y a 1 o 2 metros en la zona de retorno del álabe. Mientras que para velocidades de viento entre 3 y 7m/s es más conveniente instalar el panel a 2 metros de la turbina en la zona de retorno y a 1 metro en la zona de avance.

Este estudio confirma que, bajo ciertas condiciones ambientales, la implementación de ambas tecnologías de la manera modelada implica un aumento en la eficiencia del panel fotovoltaico, resultado que requiere una distribución espacial específica de las tecnologías la que puede que no logre un uso adecuado del espacio si es que el objetivo principal es sólo generar potencia sin importar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Es por esto que es necesario en un futuro realizar un análisis económico para comparar el mejor uso del espacio dependiendo del objetivo de la implementación de las tecnologías, junto con un estudio de las condiciones ambientales específicas del sitio de la instalación de estas.

### **Trabajo futuro**

Para mejorar los resultados de este trabajo y acercarlos de mejor manera a lo que ocurre en la realidad es necesario un estudio más en detalle de las condiciones generadas por los edificios en la velocidad del viento mediante el uso de un modelo 3D que incluya la turbina eólica de eje vertical y el panel fotovoltaico. Además sería interesante observar este mismo problema pero con un arreglo de paneles aguas abajo de la turbina, y así cuantificar los cambios en la eficiencia en un arreglo de paneles debido también a la zona de vórtices de baja velocidad, de manera de observar si el aumento en la eficiencia de las otras zonas compensa lo que ocurre en la zona de baja velocidad.

Otro fenómeno interesante de estudiar es como cambiaría la eficiencia del panel si en vez de una turbina eólica de eje vertical tipo Savonius, se ubica aguas arriba un generador de vórtices cilíndrico del mismo diámetro y se evalúa su impacto en el desempeño del panel comparado con el impacto que produce la estela de la turbina.

Por otro lado, los resultados de este trabajo muestran que la mayor mejora ocurre a velocidades de viento bajas, es por esto que quizás edificios altos no constituyan el mejor lugar para implementar ambas tecnologías y un análisis en otro entorno con velocidades más bajas puede presentar resultados más provechosos.

Finalmente, se hace necesario un estudio transiente de la evolución de la temperatura del panel fotovoltaico al cambiar las condiciones ambientales durante el día, ya que en este trabajo se hace un modelo estacionario, lo que no considera cambios en la radiación, la velocidad y dirección del viento, ni la temperatura ambiente.

# Bibliografía

- [1] C. Ministerio de Energía, “Energia 2050 - Política Energética de Chile.pdf,” 2015.
- [2] “Solar PV grew faster than any other fuel in 2016, opening a new era for solar pow.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/newsroom/news/2017/october/solar-pv-grew-faster-than-any-other-fuel-in-2016-opening-a-new-era-for-solar-pow.html>
- [3] “Commentary: The success of wind and solar is powered by strong policy support.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/newsroom/news/2017/june/commentarythe-success-of-wind-and-solar-is-powered-by-strong-policy-support.html>
- [4] Comisión Nacional de Energía, “Reporte Mensual Sector Energético - Octubre 2017,” Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: [https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2015/06/RMensual\\_v201710.pdf](https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2015/06/RMensual_v201710.pdf)
- [5] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, and D. Crawley, “Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition,” *ACEEE Summer Study Pacific Grove*, p. 15, 2006. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>
- [6] E. Biyik, M. Araz, A. Hepbasli, M. Shahrestani, R. Yao, L. Shao, E. Essah, A. C. Oliveira, T. del Caño, E. Rico, J. L. Lechón, L. Andrade, A. Mendes, and Y. B. Atlı, “A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 833–858, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009>
- [7] M. Casini, “Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings,” *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 56–65, 2015. [Online]. Available: <http://www.jocet.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=45&id=541>
- [8] S. Mathew, *Wind energy: Fundamentals, resource analysis and economics*, 2007.
- [9] S. Mertens, “Wind Energy in the Built Environment - concentrator effects of buildings,” *Wind Engineering*, vol. 30, pp. 451–452, 2009.
- [10] “Module Materials | PVEducation.” [Online]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/module-materials>
- [11] C. Algora and I. Rey-Stolle, *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, C. Algora and I. Rey-Stolle, Eds. Wiley, 2016. [Online]. Available: [https://books.google.co.jp/books?id=2zHOCwAAQBAJ&pg=PA648&lpg=PA648&dq=GNI+DNI&source=bl&ots=oKfmOrkl1N&sig=9nyU9HY95Flw22uXryI2\\_Wz5l2Y&hl=ja&sa=X&ved=0ahUKEwi48u70mOHQAhUES7wKHdvzBUYQ6AEIYZAJ#v=onepage&q=GNIDNI&f=false](https://books.google.co.jp/books?id=2zHOCwAAQBAJ&pg=PA648&lpg=PA648&dq=GNI+DNI&source=bl&ots=oKfmOrkl1N&sig=9nyU9HY95Flw22uXryI2_Wz5l2Y&hl=ja&sa=X&ved=0ahUKEwi48u70mOHQAhUES7wKHdvzBUYQ6AEIYZAJ#v=onepage&q=GNIDNI&f=false)

- [12] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614–624, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- [13] Y. A. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, tercera ed ed. McGraw-Hill, 2007.
- [14] J. K. Kaldellis, M. Kapsali, and K. A. Kavadias, "Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece," *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 612–624, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.041>
- [15] B. Zhang, B. Song, Z. Mao, and W. Tian, "A novel wake energy reuse method to optimize the layout for Savonius-type vertical axis wind turbines," *Energy*, vol. 121, pp. 341–355, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.004>
- [16] C. S. Solanki, *Solar Photovoltaic: Fundamentals, Technologies and Applications, Third Edition*. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2015.
- [17] S. Nižetić, F. Grubišić-Čabo, I. Marinić-Kragić, and A. M. Papadopoulos, "Experimental and numerical investigation of a backside convective cooling mechanism on photovoltaic panels," *Energy*, vol. 111, pp. 211–225, 2016.
- [18] R. Sheldahl, B. Blackwell, and L. Feltz, "Wind tunnel performance data for two and three bucket Savonius Rotors," *Journal of Energy*, vol. 2, no. 3, p. 160–164, 1978.
- [19] Ansys Inc., "ANSYS Fluent User's Guide," vol. 15, no. November, 2013.
- [20] F. G. Čabo, I. M. Kragić, S. Nižetić, and A. M. Papadopoulos, "Analysis of influence of panel size on PV panel operating temperature," *SpliTech2016 - INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON COMPUTER AND ENERGY SCIENCE*, no. July, 2016. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/305404546\\_Analysis\\_of\\_influence\\_of\\_panel\\_size\\_on\\_PV\\_panel\\_operating\\_temperature](https://www.researchgate.net/publication/305404546_Analysis_of_influence_of_panel_size_on_PV_panel_operating_temperature)
- [21] M. Fiebig, "Vortices, Generators and Heat Transfer," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 76, no. 2, pp. 108–123, 1998. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8JGF-4RV2MP5-3/2/872ba9927324c4acb473c0189a7237c5>
- [22] B. Hermann Priesnitz, "Emplazamiento De Turbinas Eólicas Urbanas Y Potencial Energético Disponible Según La Distribución De Edificaciones," 2014.

# Anexos

## A. Lado retorno del álabe a 2 [m] de distancia del panel

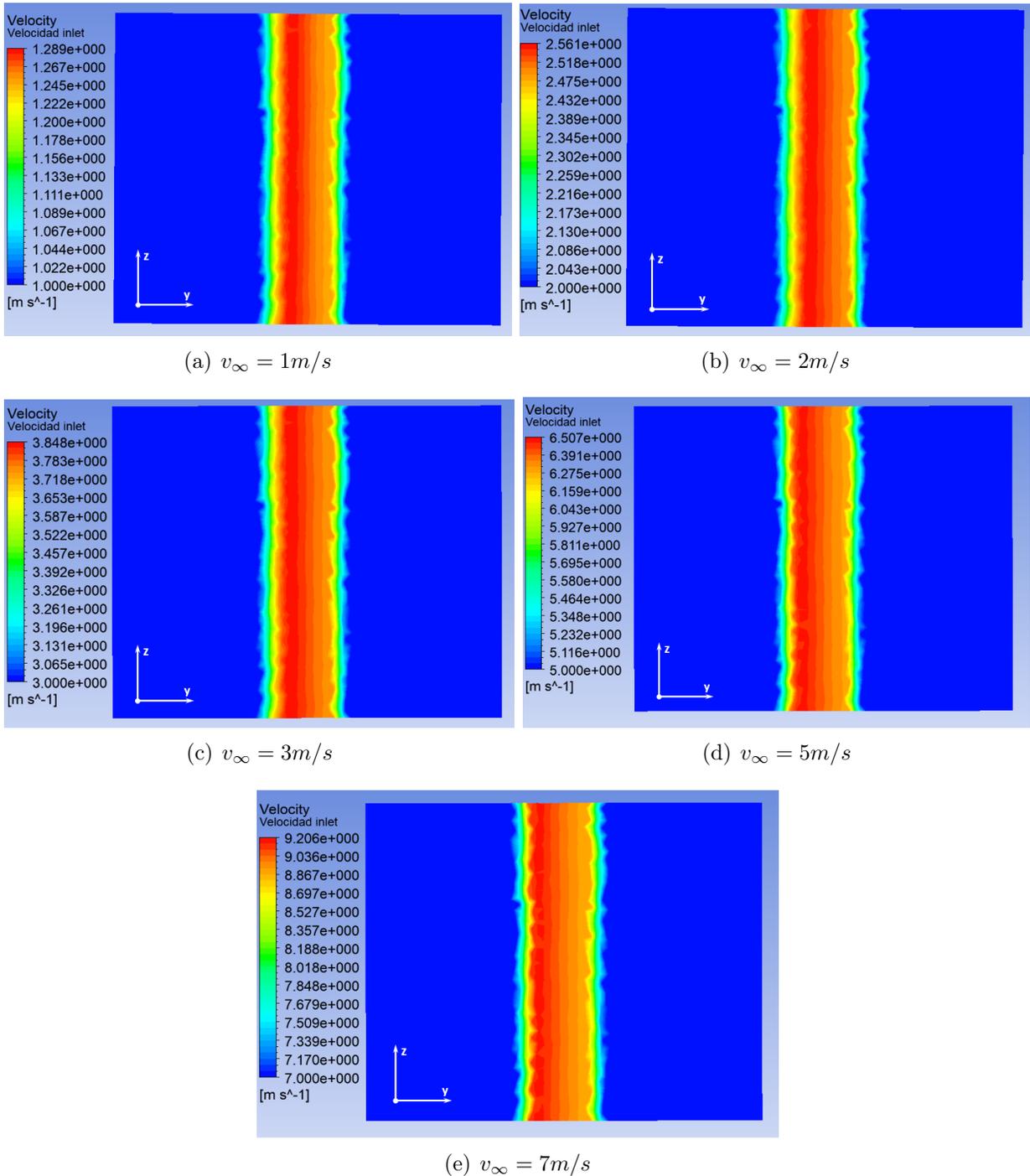


Figura A.1: Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

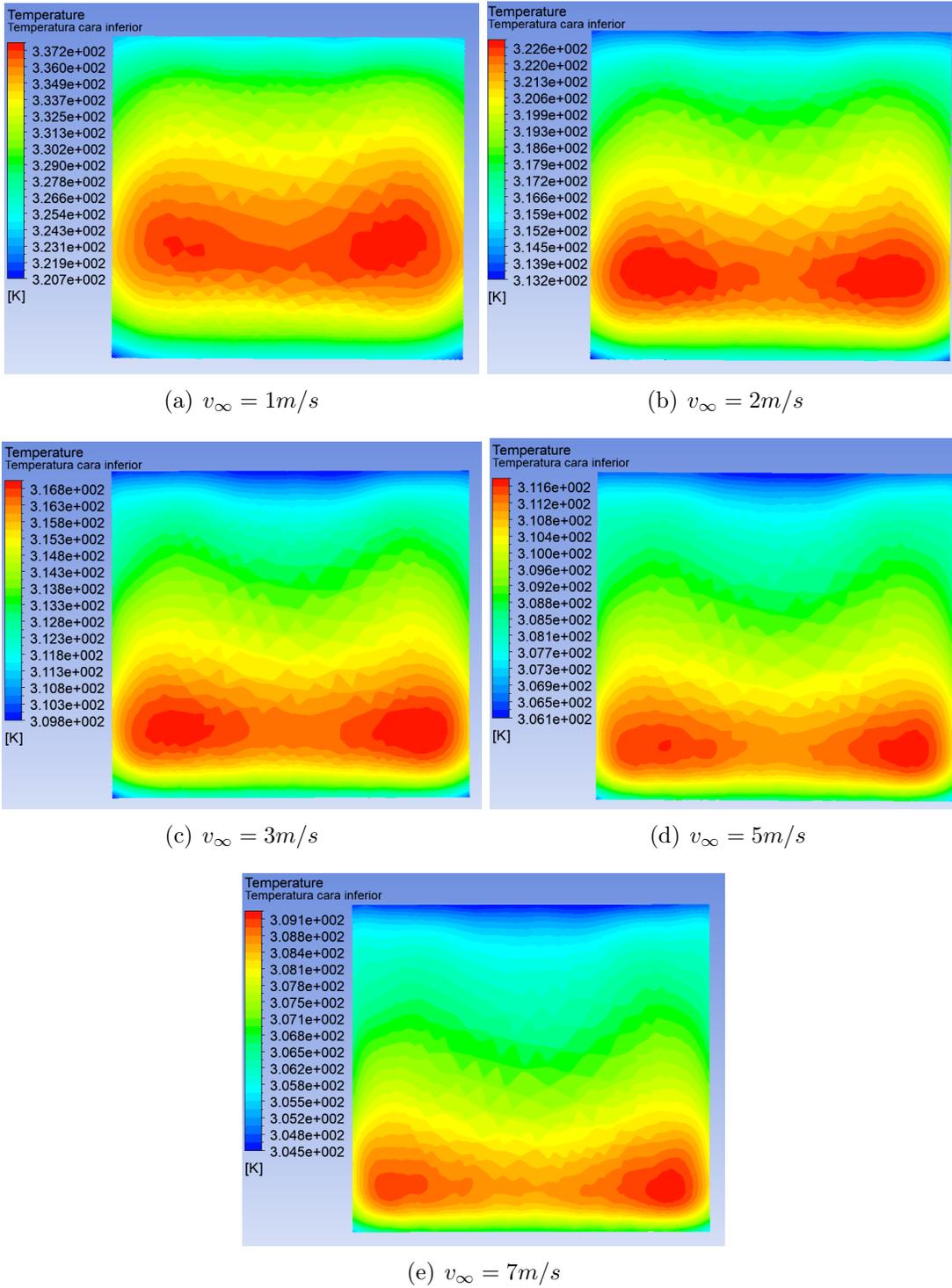
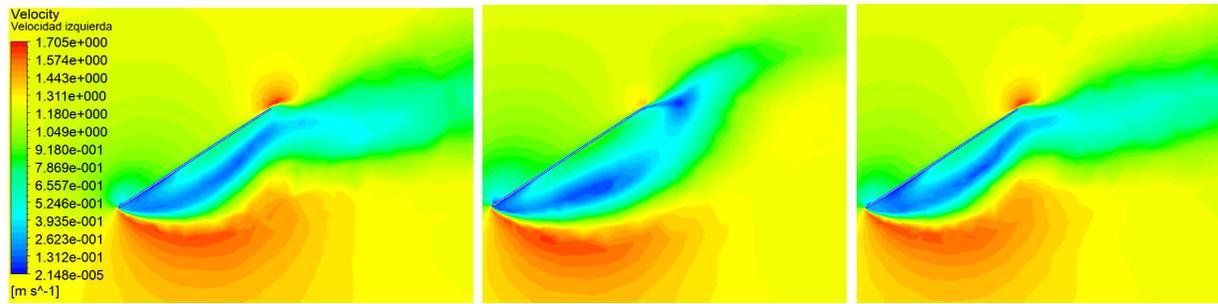
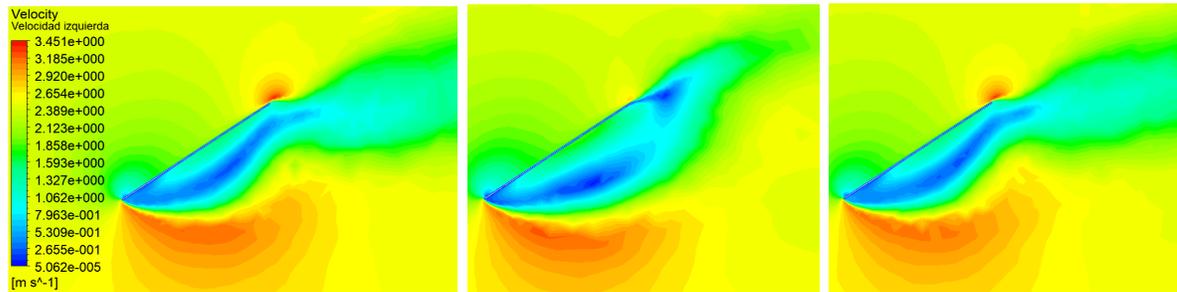


Figura A.2: Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.



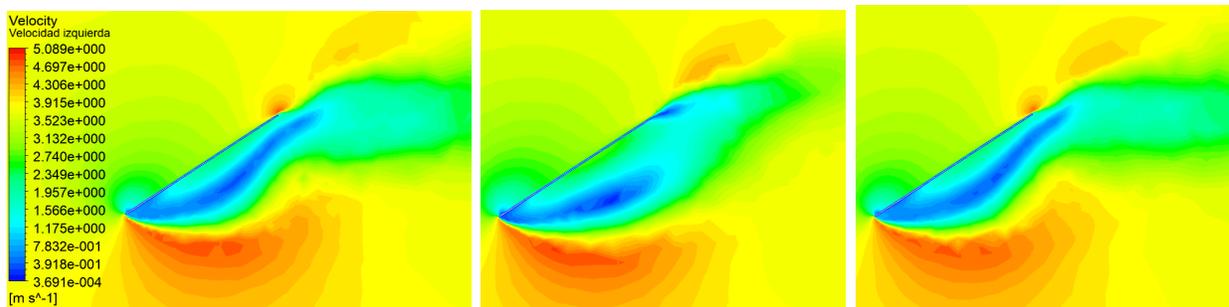
(a) izquierda panel  $y = 0, 2m$                       (b)  $y = 0m$                       (c) derecha panel  $y = 0, 2m$

Figura A.3: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia.



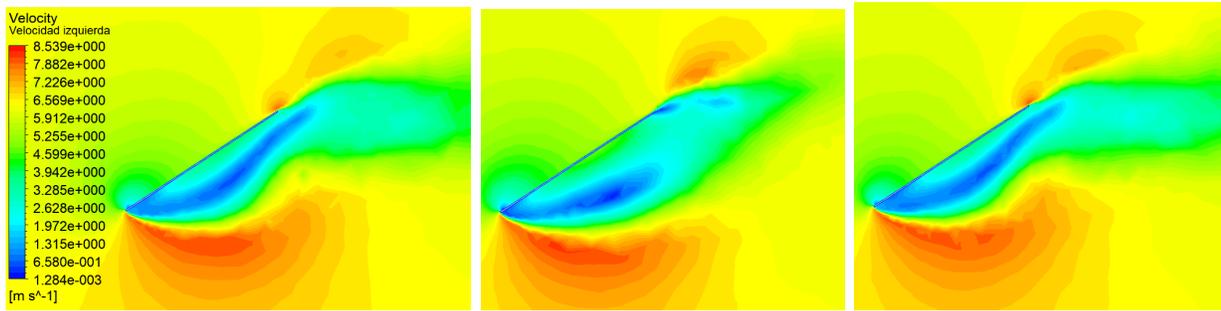
(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$                       (b)  $y = 0m$                       (c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura A.4: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 2m/s$ . Elaboración propia.



(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$                       (b)  $y = 0m$                       (c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura A.5: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia.

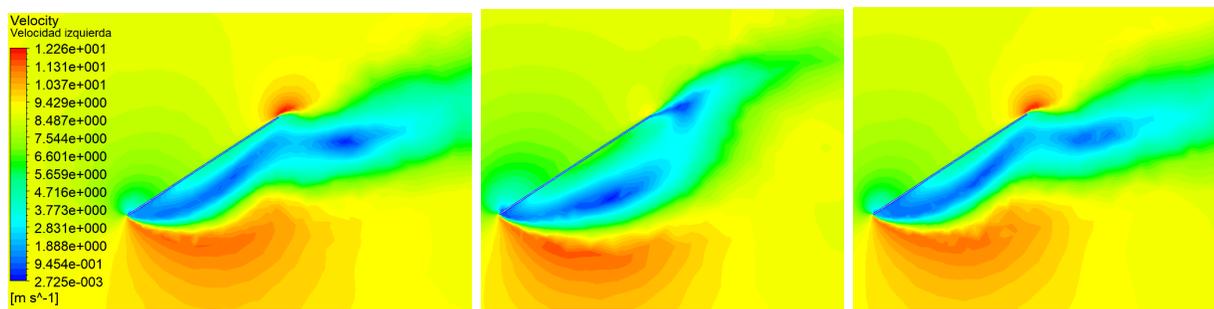


(a) izquierda panel  $y = 0, 2m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura A.6: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia.



(a) izquierda panel  $y = 0, 23m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 23m$

Figura A.7: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia.

## B. Lado avance del álabe a 2 [m] de distancia del panel

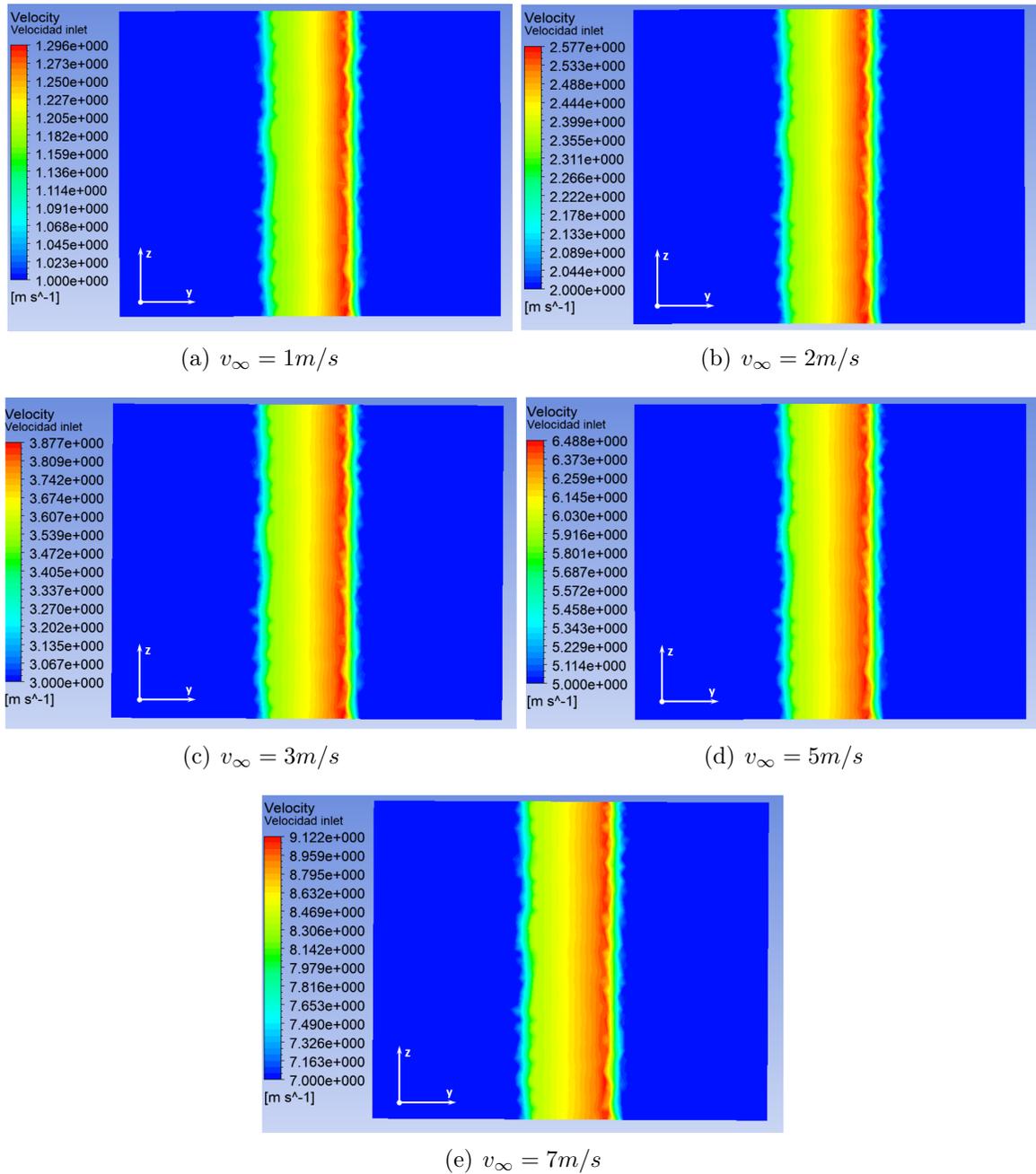
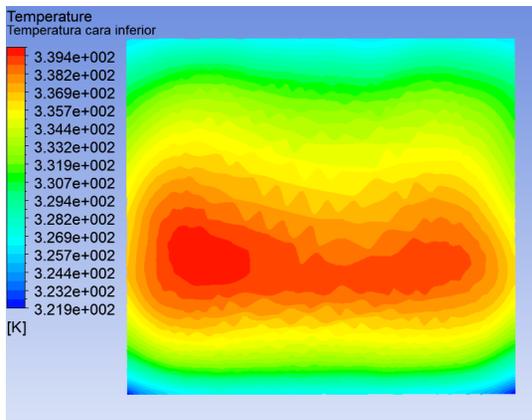
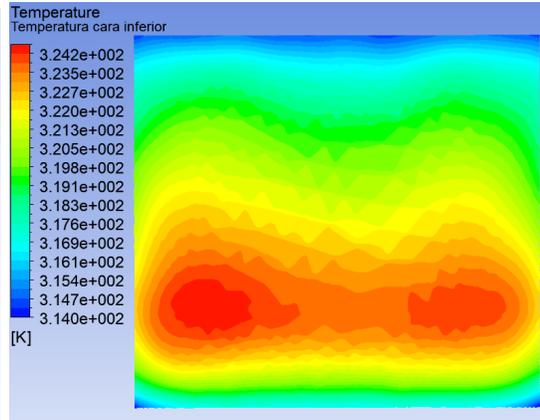


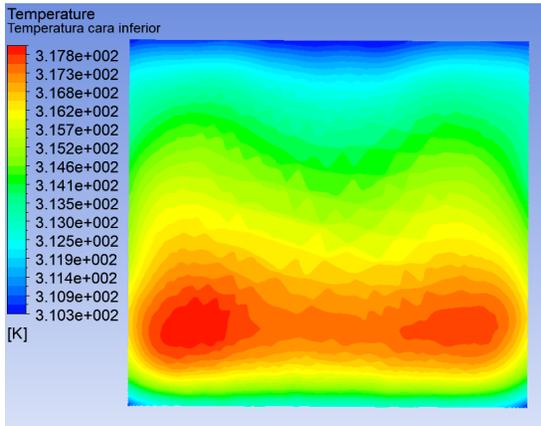
Figura B.1: Perfiles de velocidad usados en la cara A del modelo para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.



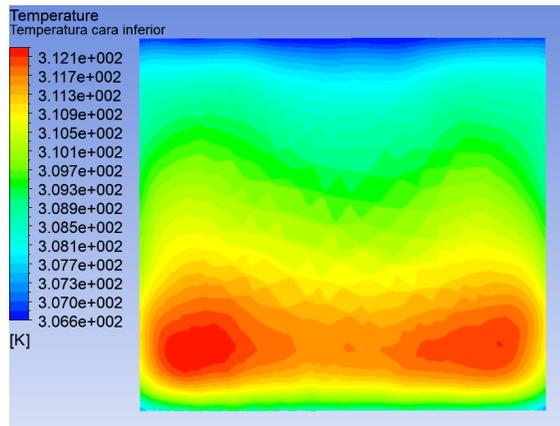
(a)  $v_{\infty} = 1\text{m/s}$



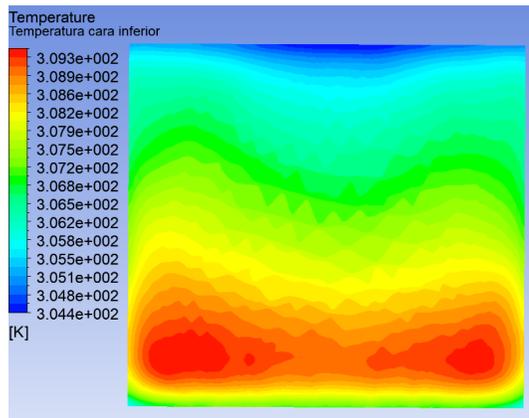
(b)  $v_{\infty} = 2\text{m/s}$



(c)  $v_{\infty} = 3\text{m/s}$

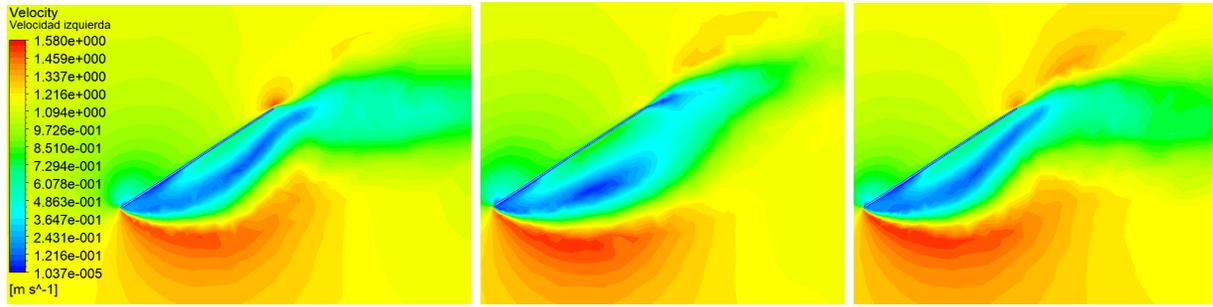


(d)  $v_{\infty} = 5\text{m/s}$



(e)  $v_{\infty} = 7\text{m/s}$

Figura B.2: Distribución de temperatura en la cara inferior del panel fotovoltaico para distintas velocidades del viento. Elaboración propia.

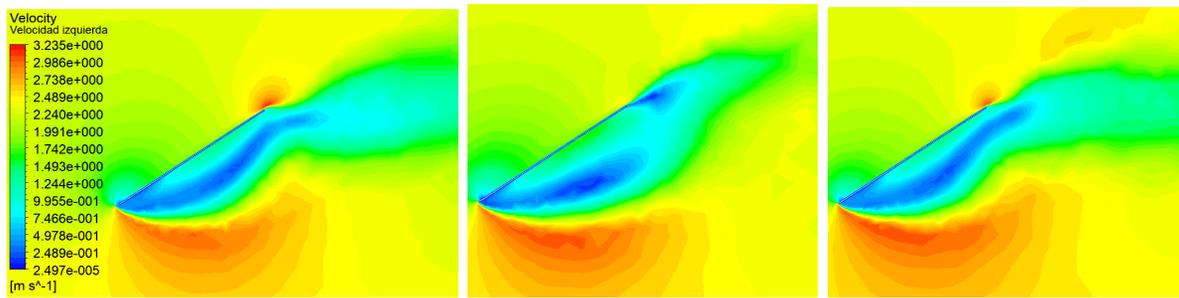


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura B.3: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 1m/s$ . Elaboración propia.

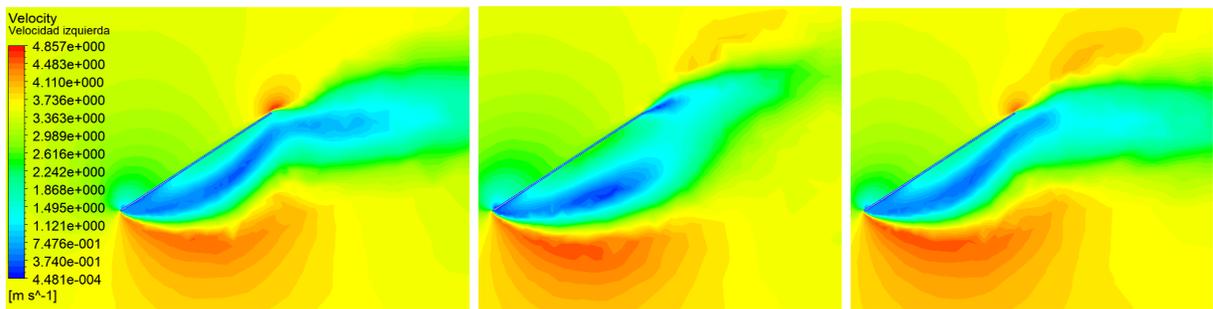


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura B.4: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 2m/s$ . Elaboración propia.

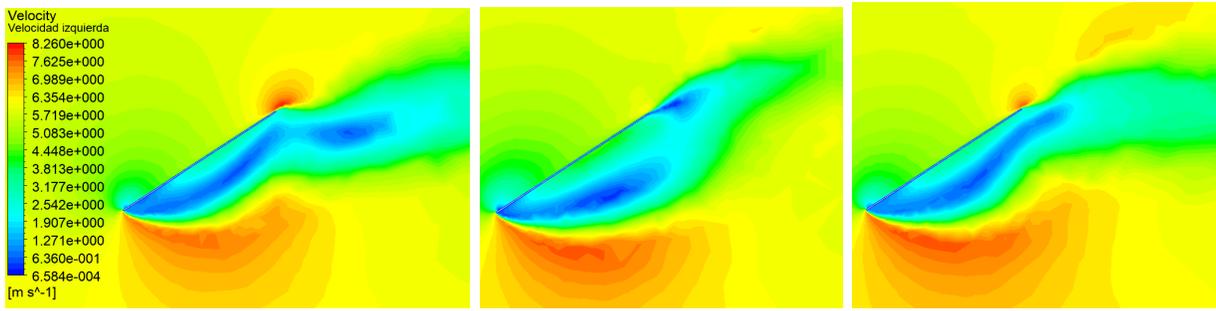


(a) izquierda panel  $y = 0, 18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0, 18m$

Figura B.5: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 3m/s$ . Elaboración propia.

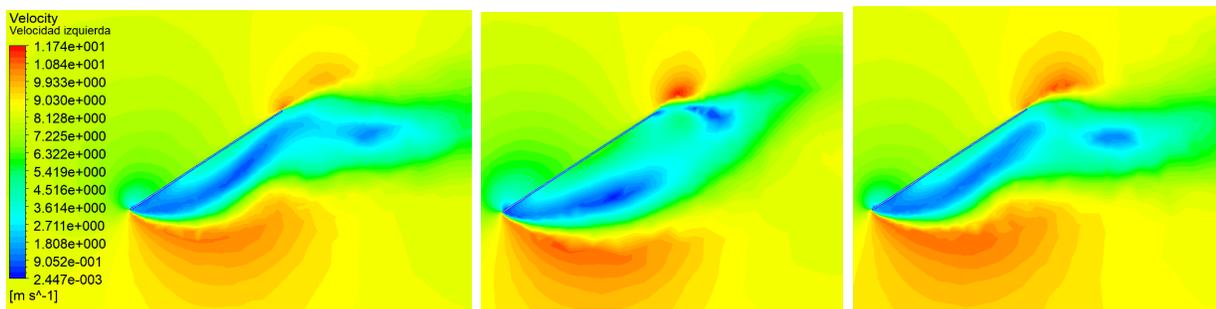


(a) izquierda panel  $y = 0,18m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0,18m$

Figura B.6: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 5m/s$ . Elaboración propia.



(a) izquierda panel  $y = 0,23m$

(b)  $y = 0m$

(c) derecha panel  $y = 0,23m$

Figura B.7: Distribución de la velocidad alrededor del panel para  $v_\infty = 7m/s$ . Elaboración propia.