



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO EMBEBIDO PARA ENTORNO URBANO

Alejandro Ferro
Emilia Fuentesfría
Giulliano Pozzo

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero Industrial Mecánico.

Tutor:
Alejandro Gutiérrez
Co-Tutor:
Bruno López

Montevideo, Uruguay
Abril de 2024

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto. En primer lugar, agradecemos a nuestro tutor, Alejandro Gutiérrez, por su orientación constante, apoyo y consejos a lo largo de todo el proceso. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el éxito de este trabajo.

A nuestro co-tutor, Bruno López, le agradecemos su valioso aporte en el ámbito de las simulaciones numéricas. Su conocimiento y guía fueron cruciales para comprender y aplicar eficazmente este aspecto del proyecto.

Extendemos nuestro agradecimiento a aquellos que colaboraron en actividades de taller y el montaje de los experimentos. En particular a Pablo Pais, quien colaboró con la impresión 3D de los modelos, a Joaquín Fernández y Ricardo Zouko, cuya ayuda fue fundamental para el refuerzo del rotor y los ensayos en el túnel.

Por último, a todos aquellos que, de alguna manera, brindaron su apoyo para hacer posible este proyecto, extendemos nuestro más sincero agradecimiento.

Resumen Ejecutivo

La presente investigación busca analizar el desempeño y viabilidad de diversas tecnologías de envolventes, con la finalidad de proponer un modelo de aerogenerador específicamente para entornos urbanos. En los siguientes capítulos se abordarán todos los estudios llevados a cabo. Estos se organizan según el tipo de estudio realizado y, a su vez, se subdividen por cada variante de envolvente considerada.

Se comienza con el análisis inicial de las envolventes, clasificándolas según sus modos de funcionamiento. En cada categoría, se profundiza en el principio de operación, se revisan investigaciones previas de diversos autores y se tiene una representación gráfica ilustrativa de las mismas.

En el segundo capítulo, se profundiza en las herramientas fundamentales utilizadas para la investigación. Éstas son numéricas y experimentales. Inicialmente, se dedica una sección completa al túnel de viento, ofreciendo una descripción detallada de sus dimensiones y datos más relevantes, así como una revisión de cada tipo de ensayo llevado a cabo en esta instalación. A continuación, se aborda la simulación numérica en `OpenFOAM`. Se presenta una introducción exhaustiva a esta herramienta, explorando su funcionamiento, historia y aplicaciones, para culminar con su papel en el proyecto. En tercer y último lugar está el banco de ensayos de la azotea del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) - FING - Udelar. Ésta permite relevar datos reales para analizar la interacción viento-edificio, con especial atención a la zona de la cornisa. Se describe el método empleado en la recolección y procesamiento de datos.

Luego, se detallan los estudios llevados a cabo para cada variante de envolvente, con observaciones, comparaciones y conclusiones respecto a su desempeño. Además, se incluyen lineamientos sobre su viabilidad práctica, en términos constructivos y económicos.

Con la información recopilada, se formulan hipótesis de funcionamiento y se propone un modelo. Esto conduce al re-diseño del rotor para la envolvente propuesta, considerando una distribución de viento acorde a velocidades típicas en entornos urbanos. En la fase final de este análisis, se realiza un estudio mecánico del rotor, cumpliendo con las normativas pertinentes, se verifican los principales modos de vibración de la estructura para la operación, y se genera una representación del modelo utilizando el software `Inventor`.

A lo largo del documento, se sugieren investigaciones futuras dirigidas a profundizar en aspectos geométricos de las envolventes, abordando tanto cuestiones de proporciones como la incorporación de perfiles aerodinámicos. Además, se plantea la necesidad de explorar los puntos de funcionamiento óptimos considerando el acople del rotor y el generador eléctrico. En todos estos casos, se destaca la necesidad de realizar ensayos específicos en el túnel de viento.

En la sección 3.4 se encuentra una tabla resumen que organiza los casos de estudio, agrupándolos según su geometría de envolvente. Esta tabla proporciona detalles sobre los estudios llevados a cabo para cada uno de ellos. [3.4.1]

Índice

Agradecimientos	I
Resumen Ejecutivo	II
1 Introducción	1
2 Envolveres	2
2.1 Concentrador de flujo	2
2.1.1 Envolvere con concentrador cónico (Cono-Recto)	3
2.1.2 Envolvere con concentrador de perfil aerodinámico (Cono- Perfil)	4
2.2 Obstrucción del flujo alrededor del aerogenerador	4
2.2.1 Envolvere recta con falange (Falange-Recto)	4
2.2.2 Envolvere con perfil aerodinámico y falange (Falange-Perfil) .	6
2.3 Generación de diferencias de presiones	7
2.3.1 Aeromine	8
3 Herramientas de estudio	11
3.1 Túnel de Viento	11
3.1.1 Introducción	11
3.1.2 Ensayos DHAWT	13
3.1.2.1 Ensayo Cono-Recto	14
3.1.2.2 Ensayo Falange-Recto	14
3.1.3 Ensayos DVAWT	14
3.1.3.1 Ensayo de mallas	15
3.1.3.2 Ensayo Aeromine	16
3.2 Simulación numérica en caffa3d.MBRi	17
3.2.1 Introducción	17
3.2.2 Modelo Matemático	18
3.2.3 Discretización	19
3.2.4 Condiciones de Borde Inmersas IBCM	22
3.2.5 Paralelización del cálculo	24
3.2.6 Contexto de Trabajo	25
3.2.7 Generación del dominio numérico	25
3.2.7.1 Anidamiento de mallas	26
3.2.7.2 Malla gruesa	26
3.2.7.3 Malla fina	28
3.3 Condiciones de viento disponible - Azotea de Facultad	31
3.4 Tabla-Resumen	33

4	Análisis	36
4.1	Concentrador de flujo	36
4.1.1	Concentrador Cono-Recto	36
4.1.2	Ensayos Cono-Recto	37
4.1.3	Simulación numérica	39
4.1.3.1	Malla Gruesa y Envolverte Cono-Recto - 1er simulación	40
4.1.3.2	Malla Gruesa y Envolverte Cono-Recto - corrección.	44
4.1.3.3	Malla Gruesa y Envolverte Cono-Recto - D_{rotor} reducido	45
4.1.3.4	Malla Anidada y Envolverte Cono-Recto	46
4.1.3.5	Malla Anidada y Envolverte Cono-Perfil	50
4.1.4	Conclusiones	54
4.2	Obstrucción del flujo alrededor del aerogenerador	55
4.2.1	Envolverte Falange-Recto	55
4.2.2	Ensayo Falange-Recto	56
4.2.2.1	Curvas Experimentales	59
4.2.3	Simulación numérica	61
4.2.3.1	Malla Anidada y Envolverte Falange-Recto	63
4.2.3.2	Malla Anidada y Envolverte Falange-Recto - Ángulo Agudo (difusor)	66
4.2.3.3	Malla Anidada y Envolverte Falange-Recto - Ángulo Obtuso	69
4.2.3.4	Malla Anidada y Envolverte Falange-Perfil	72
4.2.4	Conclusiones	73
4.3	Aeromine	77
4.3.1	Modelo físico	77
4.3.2	Modelo analítico	79
4.3.3	Viento en la Azotea	84
4.3.4	Ensayo de Aeromine	84
4.3.4.1	Ensayo de Visualización - Cualitativo	89
4.3.4.2	Ensayo de medición - Cuantitativo	92
4.3.5	Conclusiones	99
4.4	Aspectos constructivos	100
5	Diseño	101
5.1	Re-Diseño del rotor	102
5.1.1	Diseño de las palas	102
5.1.2	Selección del generador	105
5.1.3	Diseño de la nariz	108

5.2	Análisis Mecánico	111
5.2.1	Análisis mecánico y aspectos constructivos del rotor	111
5.2.2	Diseño y análisis mecánico de la envolvente	113
5.2.3	Soportes y características del generador eléctrico	116
5.3	Costos estimados de construcción	117
5.4	Presentación del producto	118
6	Conclusiones	119
A	Anexo	121
A.1	Ensayo MF2	121
A.2	Iteración	121
A.2.1	Primera versión del Script	122
A.2.2	Función Auxiliar $dif_{pot}(\beta_p, l_c, V_1, r, N, Z, dr)$	122
A.2.3	Script de Potencia: cuerpo principal	124
A.2.4	Influencia del número de Reynolds	125
A.2.5	Corrección de Prandtl	126
A.2.6	Curva Experimental MF2	127
A.2.7	Resultados	128
A.3	Simulación numérica: Malla gruesa y envolvente Cono-Recto 1er intento	131
A.4	Simulación numérica: Malla gruesa y envolvente Cono-Recto - corrección	133
A.4.1	Cálculo de Potencia Cinética en una Sección Vertical	133
A.4.2	Otros resultados de la simulación	134
A.5	Simulación numérica: Malla Gruesa y Envolvente Cono-Recto - D_{rotor} reducido	134
A.6	Malla Gruesa y Envolvente Falange-Recto	136
A.7	Malla Gruesa y Envolvente Falange-Recto Alargada	140
A.8	Malla Gruesa y Envolvente Falange-Recto - D_{rotor} reducido	142
A.9	Ensayo de mallas	145
A.9.1	Banco de Ensayo	145
A.9.2	Procedimiento	147
A.9.3	Resultados	149
A.9.4	Análisis de Resultados	149
A.10	Resultados de ensayo del Aeromine	151
A.11	Datos $C_p - \lambda$ para diseño final	154
	Referencias	156

1. Introducción

En la actualidad se está dando una transición hacia la generación de energías limpias renovables, siendo la energía eólica una de las más destacadas en la generación global. La mayor parte de la generación de energía eólica se da a gran escala, en parques eólicos a lo largo y ancho del planeta, pero fuera de ciudades, pueblos y lejos de los hogares rurales. Esta transición mencionada, hacia fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC), junto con el impacto relativamente bajo que tiene la energía eólica en la microgeneración, motivan el estudio de nuevas tecnologías para aprovechar la energía del viento disponible en entornos urbanos, rodeando casas y edificios. Estas tecnologías se distinguen de los típicos aerogeneradores de vena abierta¹ al buscar favorecer el flujo del viento a través del rotor mediante estructuras que lo rodean, o que modifican el flujo del viento cercano.

Las estructuras previamente mencionadas, denominadas "envolventes", se fundamentan en diversos principios o conceptos de funcionamiento para optimizar el desempeño en un entorno urbano. Esto implica bajas velocidades de viento disponible, así como restricciones relacionadas con la seguridad urbana y la generación de ruido.

Una de estas ideas implica la generación de una diferencia de presión entre la entrada y la salida del aerogenerador. De esta manera, el viento tiende a atravesar el rotor debido a la sobrepresión en la entrada y la depresión en la salida del mismo. Este principio de funcionamiento resulta simple, pudiendo combinarse con otros. Otra idea consiste en obstruir el flujo alrededor del aerogenerador. Así, las líneas de flujo cercanas tienden a pasar por el rotor en lugar de rodearlo externamente. Este principio se puede implementar mediante el uso de falanges, como se explorará con mayor detalle en secciones posteriores de este documento. Por último, agregado a los dos principios anteriores, se puede explorar la posibilidad de guiar el flujo hacia el rotor mediante un diseño similar a una tobera o troncocono. En este enfoque, el objetivo es capturar el flujo incidente en un área mayor y concentrarlo en una sección reducida, donde se encuentra el rotor.

El punto de partida para este proyecto se basa en los resultados obtenidos en el proyecto "Diseño de un aerogenerador de flujo embebido para entorno urbano" (Ferro-Pozzo, [1]). En dicho trabajo, se empleó una envolvente que se basa en el último principio mencionado, y los resultados derivan de ensayos realizados en el túnel de viento del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) - FING - Udelar. Aunque los ensayos no lograron aumentar significativamente la generación de energía eólica, revelaron beneficios sustanciales en otros aspectos. La envolvente ensayada presenta ventajas en términos de seguridad y reducción del ruido, justificando su implementación en entornos urbanos.

A partir de lo mencionado anteriormente, el objetivo central de este proyecto consiste en mejorar el diseño de la envolvente con el fin de incrementar la generación de energía eólica en comparación con un aerogenerador sin envolvente (vena abierta).

¹El término 'a vena abierta' hace referencia a que el rotor está expuesto directamente al viento sin ninguna obstrucción significativa al flujo de aire.

2. Envolventes

En el proceso de diseño de un aerogenerador de flujo embebido destinado a entornos urbanos, uno de los aspectos críticos es el diseño de la envolvente. El rendimiento global del aerogenerador depende en gran medida de esta envolvente, ya que condiciona la cantidad de flujo de aire que realmente atraviesa el rotor. Ésta influye tanto en la velocidad del viento necesaria para iniciar la generación de energía, como en la cantidad de energía aprovechable. El rendimiento mencionado se define como el coeficiente de potencia (C_P), el cual representa el cociente de la potencia extraída del flujo sobre el total de energía cinética del flujo que atravesaría el área bloqueada por el dispositivo, a la cual se llama potencia atmosférica ($P_{atm} = \frac{1}{2}\rho Av^3$, siendo A el área proyectada del rotor).

$$C_P = \frac{P_{extraida}}{P_{atm}} \quad (2.0.1)$$

Diferentes investigadores han planteado envolventes que prometen mejorar el rendimiento de los aerogeneradores con respecto al rotor sin envolvente (vena abierta). Estas envolventes se distinguen principalmente por su geometría y la forma en la que actúan sobre el flujo incidente para mejorar la energía cinética disponible en el rotor. La clasificación propuesta en este capítulo es la siguiente:

- Concentrador de flujo
 - Cono-Recto
 - Cono-Perfil
- Obstrucción del flujo alrededor del aerogenerador
 - Falange-Recto
 - Falange-Perfil
- Generación de diferencias de presiones
 - Aeromine

A continuación se describen las envolventes estudiadas en el marco del proyecto, ordenadas según la clasificación anterior, haciendo referencia a sus principios de funcionamiento y bibliografía correspondiente.

2.1. Concentrador de flujo

Una de las estrategias de diseño de envolventes consideradas se basa en el principio de concentrar el flujo del viento. Este enfoque implica la captación del viento en un área mayor que la del rotor, y su posterior guía hacia el mismo. Esta implementación ofrece varias ventajas potenciales, entre las que se incluye la posibilidad de aprovechar un mayor flujo de viento con un rotor de dimensiones reducidas. Además, se logra un aumento de la velocidad del viento gracias a la conservación de la masa, por la diferencia de áreas de la geometría.

2.1.1. Envoltente con concentrador cónico (Cono-Recto)

Se plantea estudiar este tipo de envoltente, donde los parámetros clave son la relación de áreas y el ángulo del cono. La primera desempeña un papel fundamental, ya que determina el incremento de la velocidad del viento, mientras que la segunda influye en cómo se da la llegada del flujo al rotor. Es importante destacar que el ángulo no debe ser excesivamente pronunciado, ya que el objetivo no es obstruir el paso del flujo, sino guiarlo eficazmente hacia el rotor.

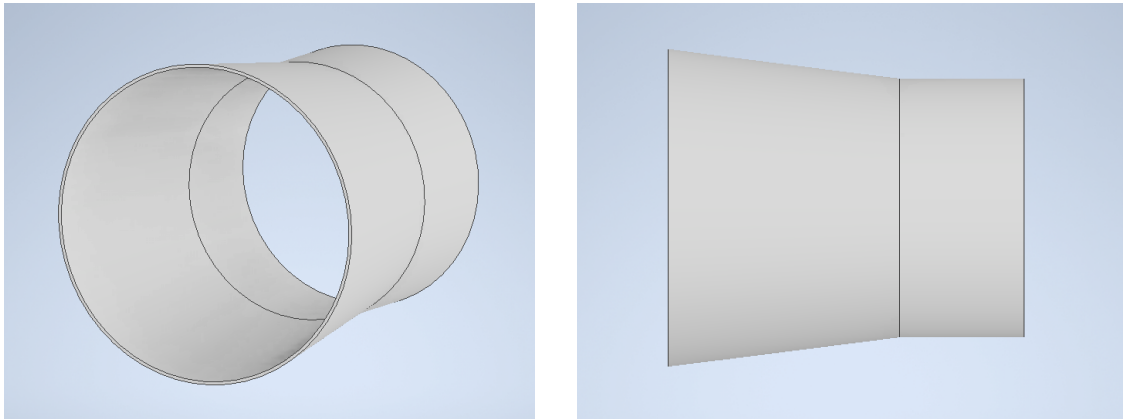


Figura 2.1.1: Envoltente Cono-Recto (sin rotor).

Se puede encontrar en diferentes documentos información sobre la prueba de este tipo de envoltentes, por ejemplo en [1] y en [12] en el cual se plantea la utilización de un troncocono recto con un cilindro detrás donde se coloca el rotor, tal como se muestra en la Figura 2.1.2.

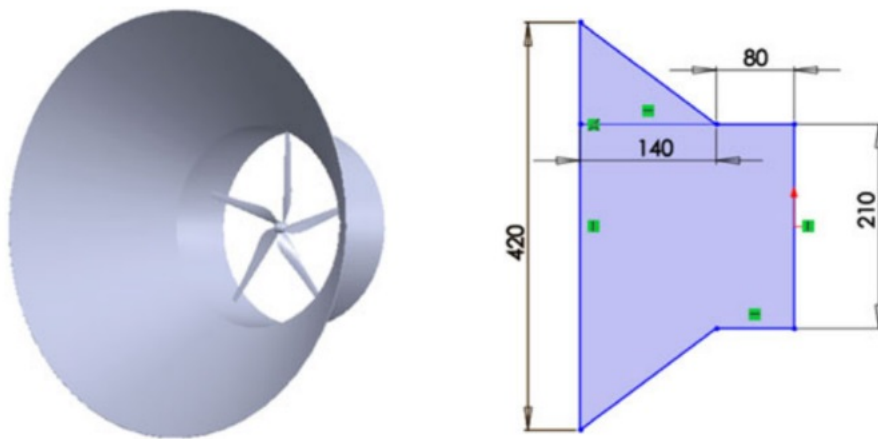


Figura 2.1.2: Envoltente troncocónica para aplicación en ducto - flujo confinado.
Tomada de [12].

En este último, se estudió esta disposición para colocarlo dentro de una tubería de mayor diámetro en los interiores de una mina de carbón, para aprovechar las corrientes de aire de ventilación que allí se generan. El estudio se realizó mediante elementos finitos, el rotor estudiado fue de 5 palas y se eligió el mas óptimo entre tres

opciones de perfiles aerodinámicos seleccionados. La cantidad de palas elegida fue debido a su mayor estabilidad para menores velocidades de viento. De estos estudios se concluyó que la envolvente funciona para aumentar la velocidad del aire hacia el rotor y a su vez, para este caso particular, donde el aire ya se encuentra encausado, la envolvente ayuda a ordenar el flujo y lograr diferencias de presión adecuadas entre aguas arriba y aguas abajo del rotor.

2.1.2. Envolvente con concentrador de perfil aerodinámico (Cono-Perfil)

Para guiar el flujo de una forma más ordenada que en la envolvente anterior, en el marco de este estudio se propone cambiar la forma del cono recto estudiado en [1] por un perfil aerodinámico con simetría de revolución alrededor del eje del rotor. Para esto, se elige un perfil aerodinámico en el cual se tenga una gran curvatura, y se lo dispone de manera tal que el borde de fuga sea paralelo al eje del rotor. El rotor se coloca al final del mismo. Se puede ver su disposición en la Figura 2.1.3.

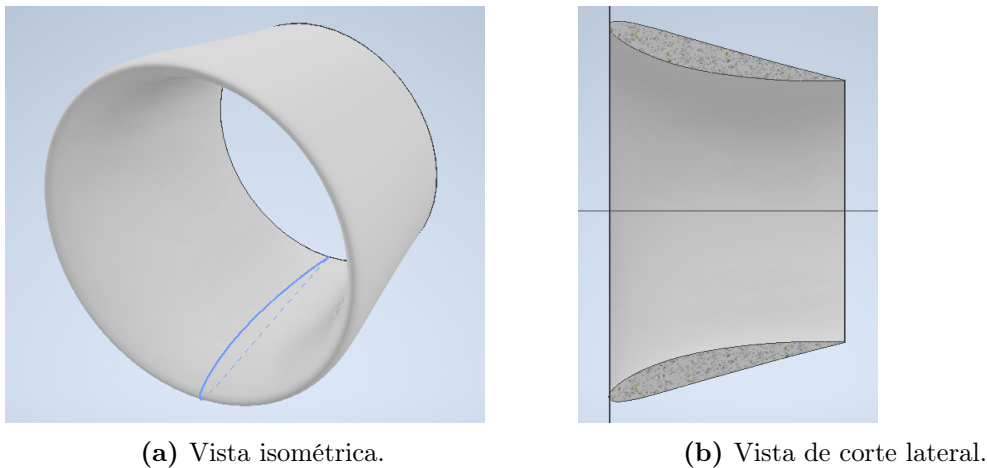


Figura 2.1.3: Envolvente con concentrador de perfil aerodinámico.

2.2. Obstrucción del flujo alrededor del aerogenerador

Dado la presencia del aerogenerador, el flujo de viento se ve afectado por un cierto "efecto de bloqueo". El concentrador genera una sobrepresión frente a los alrededores de la envolvente, lo que provoca que muchas líneas de flujo tiendan a "escapar" del mismo. Para mitigar este efecto e incluso facilitar el paso de un mayor número de líneas de flujo a través del rotor, se puede obstruir el pasaje del flujo alrededor del aerogenerador con una envolvente adecuada, que se base en este principio de funcionamiento.

2.2.1. Envolvente recta con falange (Falange-Recto)

Como una solución para obstruir el flujo alrededor del aerogenerador, se propone una envolvente de diseño sencillo. Esta envolvente consiste en un cilindro que culmina con un anillo en su parte exterior, conocido como falange. El cilindro cumple la función de guiar el flujo al rotor, y la falange obstruye el flujo alrededor, de manera tal que hay una mayor tendencia del viento a pasar a través del rotor, que por fuera del mismo. En la Figura 2.2.1 se presenta un modelo ilustrativo de esta envolvente.

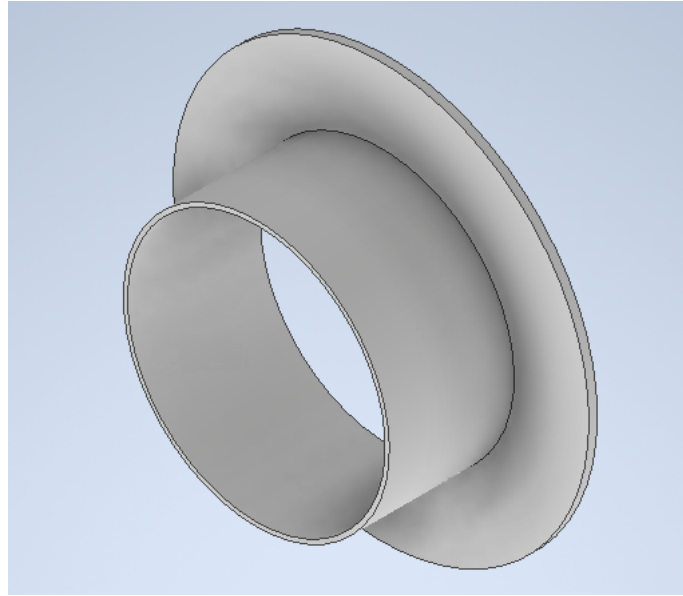


Figura 2.2.1: Envolvente recta con falange.

Una de las referencias utilizadas [10] plantea la utilización de una envolvente similar a la descrita anteriormente. En este texto se plantea la utilización de una envolvente cilíndrica troncóconica por fuera del rotor, acompañada de una falange que se coloca por fuera del mismo aguas abajo del rotor, y un troncocono de mayor ángulo aguas arriba del rotor.



Figura 2.2.2: Fotografía de envolvente. Tomado de [10]

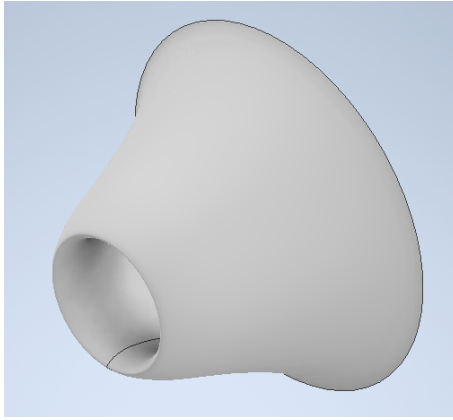
La idea detrás de esta envolvente es generar una depresión en la parte trasera del aerogenerador, buscando que la velocidad del aire aumente en el pasaje por el rotor.

En el estudio presentado en [10], además de tener ensayos en un túnel de viento, también se hicieron estudios numéricos para poder correlacionar y predecir el comportamiento del aparato. Experimentalmente se utilizó un anemómetro de hilo caliente para poder medir el campo de velocidades dado en el aerogenerador y obtener datos que permitan predecir mas condiciones de funcionamiento del aerogenerador. La simulación del flujo implicó resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, ecuación de continuidad suponiendo fluido incompresible, a su vez el rotor fue simulado como un disco con cierta pérdida de carga la cual fue modelada a partir de las características

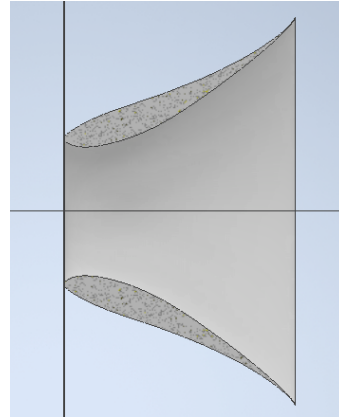
del rotor en función del ángulo de ataque de las palas. Las conclusiones del estudio hacen notar un aumento del coeficiente de potencia del orden de cuatro veces mayor del rotor con envolvente con respecto a la misma situación a vena abierta. Sin embargo, cuando se normalizan los resultados tomando como referencia la velocidad media aguas abajo de la turbina, los mismos son prácticamente iguales con envolvente o sin ella, lo cual indica que en ambos casos la turbina funciona de manera muy similar. Las simulaciones numéricas dieron resultados acordes a lo obtenido en el experimento para λ ² relativamente alto, mientras que para λ bajos, la simulación no es tan buena, esto se atribuye a la generación de vórtices que no son simulados por el disco. En cuanto al campo de velocidades, se notó que ambas turbinas a vena abierta y con envolvente se comportaron de manera muy similar aguas arriba del rotor, mientras que aguas abajo el comportamiento es completamente diferente. En particular se detecta una mayor presencia de vórtices en la turbina desnuda, lo que se concluye que es una característica notable de colocar envolvente al rotor.

2.2.2. Envolvente con perfil aerodinámico y falange (Falange-Perfil)

De manera análoga a lo descrito en la sección anterior, se propone la implementación de un perfil aerodinámico para guiar el flujo de manera más ordenada que una simple sección recta de cilindro. Esta envolvente se logra utilizando un perfil aerodinámico específico, dispuesto de manera tal que el borde de fuga sea perpendicular al eje del rotor. Una representación visual de esta alternativa se puede observar en la Figura 2.2.3.



(a) Vista isométrica.



(b) Vista de corte lateral.

Figura 2.2.3: Envolvente con falange de perfil aerodinámico.

Este tipo de envolventes ha sido planteada y se han obtenido resultados considerablemente buenos, por ejemplo en [14] se hace un estudio computacional y en [13] se plantea el uso de una envolvente al rotor que funcione como difusor y tenga la sección de un perfil aerodinámico alargado hacia la salida del flujo. La idea de esto es generar una depresión aguas abajo del rotor, provocando un efecto de succión en esa zona, aumentando la velocidad del aire, obteniendo un mejor desempeño del sistema con respecto a un rotor a vena abierta. Se obtiene, según este texto, un aumento de entre 20 y 60 por ciento de la velocidad de disco con respecto a un 67 por ciento de la velocidad de viento libre que se podría obtener en un rotor a vena abierta. En

² λ : velocidad específica del aerogenerador, definida como $\lambda = \frac{rw}{V}$.

cuanto al rotor, en este tipo de envoltente se puede utilizar uno de alta velocidad y con palas de ángulo variable para aprovechar la mayor cantidad de condiciones de aire posible.

El coeficiente de potencia se calcula según la siguiente ecuación, donde los puntos se observan en la figura. Los símbolos P , V y ρ hacen referencia a la presión, velocidad y densidad respectivamente.

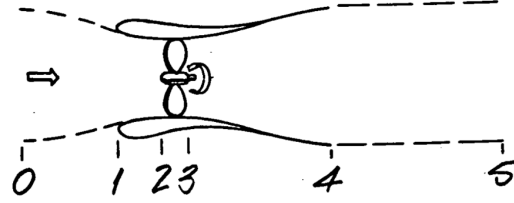


Figura 2.2.4: Esquema de envoltente difusora. Tomado de [13]

$$C_p = \frac{\Delta P_{23} \cdot V_2}{\frac{1}{2} \rho V_0^3} \quad (2.2.1)$$

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega}{V} \quad (2.2.2)$$

Luego, utilizando Bernoulli, continuidad y la forma de las pérdidas de carga a la entrada del difusor se obtiene:

$$C_p = [1 - K_i - C_{P_4} \epsilon - (1 - n_D) \epsilon^3 - n_D \epsilon^3 \lambda^2] \quad (2.2.3)$$

Donde:

$$\epsilon = \frac{V_2}{V_0} \quad (2.2.4)$$

$$K_i \quad (2.2.5)$$

Es el coeficiente de pérdida a la entrada. [13]

$$n_D \quad (2.2.6)$$

Es la eficiencia del difusor .

2.3. Generación de diferencias de presiones

Estas envoltentes se basan en la idea de generar una diferencia de presiones entre la entrada y la salida, de modo de favorecer el flujo de aire a través de ellas. La forma más sencilla es generando una depresión en la salida del aerogenerador, lo cual se puede lograr de distintas maneras, modificando la estructura de la envoltente. Como agregado para favorecer la operación del aerogenerador, se puede provocar una sobrepresión a la entrada del mismo. Ésta se puede realizar a través del diseño de la propia envoltente, o ubicándola estratégicamente para aprovechar las condiciones ambientales circundantes. Un claro ejemplo de esto es instalarla al borde del techo

de un edificio, aprovechando la concentración de líneas de flujo a raíz del bloqueo creado por el propio edificio (3.3).

En el contexto de la Subsección 3.3, se puede afirmar que las condiciones en la azotea de la Facultad de Ingeniería son compatibles con aquellas para las cuales se diseña esta tecnología de envolvente, justificando así el desarrollo de esta familia en la presente investigación.

Estas envolventes se enfocan principalmente en generar una diferencia de presiones, y esta es la única característica que comparten con los demás diseños. Una de las diferencias más destacadas es la disposición de los rotores, que en este caso se encuentran dispuestos verticalmente, en contraposición a los casos anteriores que presentan rotores horizontales.

2.3.1. Aeromine

La envolvente Aeromine [24] está diseñada para ser instalada al borde del techo de un edificio, aprovechando el efecto de bloqueo del edificio para generar una sobrepresión a la entrada del mismo.

La entrada al dispositivo consta de un prisma de base rectangular, alineado con el borde del edificio. Al mismo le falta una cara, que corresponde a la entrada del flujo de viento incidente. Por otra parte, por su cara superior ingresa un tubo vertical, hasta un poco menos que la altura media del prisma, esto se puede apreciar en la Figura 2.3.1. El prisma recibe y acumula aire, aumentando su presión al bajar su velocidad. Éste luego ingresa al tubo vertical debido a la sobrepresión generada.



Figura 2.3.1: Base de Aeromine. Tomado de [23]

En dicho tubo vertical (tipo chimenea) se coloca el rotor, pudiendo así definir esta envolvente como Ducted Vertical Axis Wind Turbine (DVAWT). Aguas abajo del mismo, la chimenea evoluciona a un semicírculo, dejando abierto el lado opuesto a la dirección de viento incidente, que constituye la sección de salida. Por lo tanto se tiene la configuración de la Figura 2.3.2.

Visto de frente (dirección del flujo incidente), a cada costado del tubo vertical se colocan perfiles aerodinámicos, como se puede ver en la Figura 2.3.3. Junto al tubo, éstos cumplen la función de generar una depresión en la sección de salida (posterior), aumentando la velocidad del flujo entre ellos y el tubo.

Los perfiles laterales no se extienden hasta el final de la base; en su lugar, detrás de estos perfiles se encuentran dos perfiles adicionales con un ángulo más pronunciado

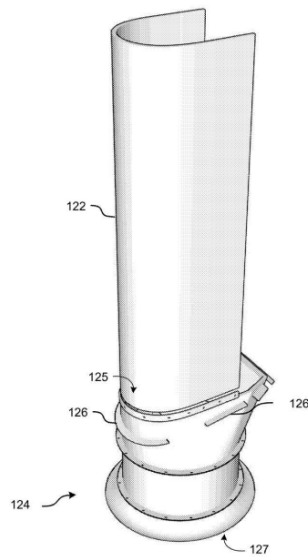


Figura 2.3.2: Tubo vertical en Aeromine - Imagen obtenida de [24].

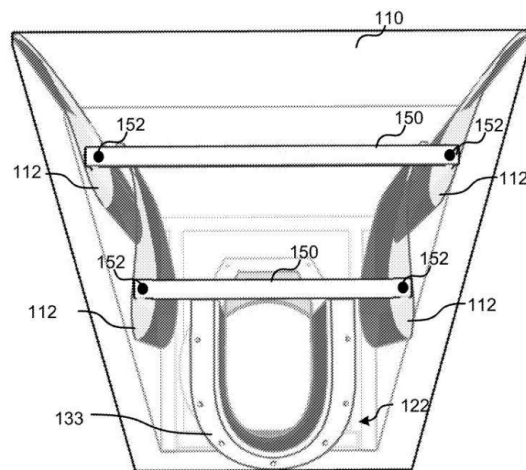


Figura 2.3.3: Vista superior de Aeromine - Imagen obtenida de [24]

en relación con la dirección del flujo incidente. Esta configuración tiene como objetivo bloquear el paso del viento y asegurar la depresión a la salida del mismo.

Encima de estos perfiles y del tubo, se coloca un techo que no solo brinda estructura sino que también cubre la salida del aire del rotor.

El modelo final luce como en la Figura 2.3.4.



Figura 2.3.4: Prototipo de Aeromine. Tomado de [23].

Cabe destacar que en este diseño de envoltente, el rotor es de eje vertical, lo cual lo distingue de los demás casos presentados.

3. Herramientas de estudio

En esta sección se describirán las herramientas utilizadas en el proceso del estudio realizado. Estas herramientas abarcan distintos enfoques, que incluyen tanto métodos experimentales como el ensayo de modelos fabricados, así como también el análisis mediante simulaciones numéricas utilizando modelos computacionales para resolver el comportamiento del fluido alrededor de las envolventes propuestas. Además, se llevará a cabo un estudio de las velocidades del viento en la azotea de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, a dos alturas distintas, con el fin de reflejar el efecto que se produce sobre la cornisa de un edificio.

3.1. Túnel de Viento

En esta sección se presentará el túnel de viento en el cual se realizaron los ensayos y una breve introducción de los diferentes ensayos realizados en el marco del presente proyecto.

Para facilitar la lectura en lo que sigue, se destacan los conceptos de aerogeneradores de eje horizontal y vertical, o DHAWT (por sus siglas en inglés, Ducted Horizontal Axis Wind Turbines) y DVAWT (por sus siglas en inglés, Ducted Vertical Axis Wind Turbines), respectivamente. Esta nomenclatura será utilizada de manera abreviada a lo largo del documento.

3.1.1. Introducción

Los ensayos se llevaron a cabo en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR en Montevideo, Uruguay. Este túnel es del tipo atmosférico o capa límite y cuenta con una longitud de 17 metros en la zona de trabajo. También dispone de un variador de frecuencia en el motor del ventilador, lo que permite ajustar la velocidad del viento en un rango que va desde 0m/s hasta 30m/s . Se muestra un esquema del mismo en la figura 3.1.1.

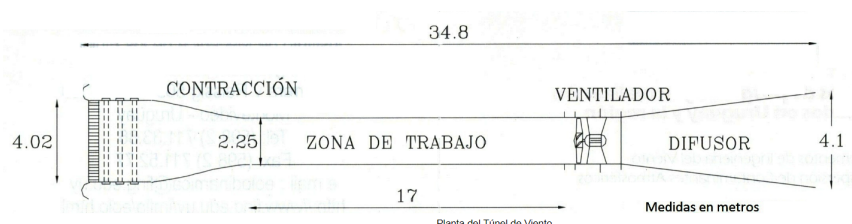


Figura 3.1.1: Esquema del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería con sus principales dimensiones en metros. Extraído de <https://www.fng.edu.uy/imfia/eolodinamica/tunel.html>

En la zona de trabajo, el túnel de viento ofrece dimensiones de 2,25 metros de ancho por 1,80 metros de altura. También permite colocar el modelo en dos ubicaciones estratégicas: cerca de la entrada de aire, después de que el flujo se ha enderezado y corregido, o cerca del ventilador.

Es importante destacar que el área máxima que puede obstruirse con el modelo en la zona de ensayo del túnel no debe superar el 5 % del área total de pasaje. De no cumplirse esta restricción, los datos de presión y velocidad registrados pueden verse

afectados, lo que cuestiona la confiabilidad de los resultados. En casos excepcionales en los que no sea posible cumplir con esta restricción, existe un factor de corrección disponible, aunque se recomienda evitar su uso siempre que sea posible.

El prediseño de la herramienta fue hecho en conjunto entre la Universidad de la República (Uruguay) y la Universidad de Minnesota (EEUU) en la cual participaron docentes e investigadores Uruguayos.



Figura 3.1.2: Foto del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería. Extraído de <https://www.fing.edu.uy/imfia/eolodinamica/tunel.html>

En las dos zonas de trabajo principales que ofrece el túnel, se tiene la capacidad de girar el piso del mismo, lo que permite llevar a cabo diversos tipos de ensayos sin la necesidad de desmontar el modelo. Esta flexibilidad representa una ventaja significativa en su funcionamiento. Además, el túnel está equipado con una variedad de herramientas que permiten tomar mediciones de presión, deformación, y cuenta con un robot posicionador con cuatro grados de libertad.

El uso del túnel de viento se ha extendido a diversas ramas de la ingeniería. Ha sido empleado en la evaluación de la interacción entre edificios y la atmósfera, destacándose proyectos como la torre de telecomunicaciones de Antel y el World Trade Center en Montevideo. Asimismo, ha sido fundamental en investigaciones a nivel nacional e internacional en el campo de la energía eólica. En el ámbito de la ingeniería mecánica, se ha utilizado para llevar a cabo ensayos con una variedad de modelos de aerogeneradores, piezas de vehículos, y para la calibración de instrumentos de medida.

En el marco de este proyecto se realizaron distintos ensayos en ambas zonas de trabajo. En la zona de trabajo más alejada del ventilador se ensayaron las envolventes del tipo de aerogenerador embebido de eje horizontal (conocidos por sus siglas en inglés DHAWT), con un banco de ensayos de eje horizontal, sujeto al piso del túnel de viento, y en la zona de trabajo más cercana al ventilador se ensayó un modelo del tipo aerogenerador embebido de eje vertical (DVAWT).

En los ensayos realizados se calculó la velocidad del viento libre dentro del túnel de viento, a partir de la medida de temperatura, presión estática y presión dinámica.

Con las medidas de temperatura y presión estática se calcula la densidad, para posteriormente calcular la velocidad a partir de la medida de presión dinámica. El dato de temperatura se toma en un determinado momento, ya que no se tienen grandes variaciones de temperatura en el tiempo, y las medidas de presiones se toman por 10 segundos, un dato por segundo, con dos micromanómetros ³, tomando la media para los cálculos.

A continuación, se realiza una breve descripción del en el ensayo llevado a cabo para cada modelo de envolvente en el túnel de viento.

3.1.2. Ensayos DHAWT

Para llevar a cabo las pruebas de las envolventes de eje horizontal, específicamente las envolventes Cono-Recto y Falange-Recto, se diseñó y construyó un banco de ensayo dedicado a rotores de eje horizontal. Este banco está equipado con un torquímetro y un tacómetro de la marca y modelo específicos INTERFACE T25 e IBD B53, respectivamente, permitiendo la medición precisa del torque y las revoluciones por minuto (RPM). Estos datos son esenciales para calcular la potencia generada por el rotor.

Adicionalmente, se incorporó un freno magnético que, al variar el voltaje suministrado desde una fuente, posibilita la modulación del torque. Esta capacidad de ajuste del torque permite obtener diferentes velocidades de giro para una velocidad de viento determinada, generando así diversos puntos en la curva adimensionada $C_P - \lambda$.

Durante las mediciones, se registran los valores de torque y RPM continuamente durante aproximadamente un minuto, con una frecuencia de muestreo de 1000 datos por segundo. Los valores medios de torque y RPM se calculan posteriormente para obtener una evaluación precisa de la potencia generada en cada configuración.

Para llevar a cabo los ensayos, se implementó una estrategia estructurada que comprendió los siguientes pasos.

1. Se enciende el túnel de viento a una velocidad suficiente para que el rotor pueda comenzar a girar, en un principio con el freno liberado, es decir, sin voltaje.
2. Una vez que comienza a girar, se aplica cierto voltaje al freno magnético hasta llegar a un punto estable de funcionamiento con el voltaje más alto posible. En caso de excederse con el freno aplicado, el rotor se frena, teniendo que liberar el freno para volver a buscar un punto estable.
3. Una vez se llega a un punto estable, se toman medidas para calcular la velocidad del túnel de viento y la potencia generada.
4. Se disminuye el voltaje en la fuente, hasta llegar a un nuevo punto estable, y se toman nuevamente las medidas. Al disminuir el voltaje, se debe tener en cuenta que aumentan las RPM, por lo que se establece una cantidad máxima de RPM que se puedan alcanzar.
5. Se repite el paso anterior las veces que sea posible hasta alcanzar las máximas RPM establecidas, para así poder calcular la máxima cantidad de puntos posibles.

³ALNOR modelo EBT730 y TSI modelo DPCALC 8710.

6. Se aumenta el voltaje aplicado al freno hasta el máximo valor medido y luego se aumenta la velocidad del viento, aumentando la frecuencia del variador del ventilador del túnel de viento, nuevamente teniendo en cuenta que aumentarán las RPM.
7. Se repiten los pasos anteriores para buscar nuevos puntos estables y tomar medidas, con distintas intensidades de freno y velocidades de viento, tantas veces como sea necesario.

Tras la ejecución del ensayo y la recopilación de datos, se procede a realizar el cálculo subsiguiente de velocidades y potencia utilizando la información obtenida, seguido por un análisis detallado de los resultados.

3.1.2.1 Ensayo Cono-Recto

El ensayo de la envolvente Cono-Recto, fue realizado para un proyecto en el marco de la asignatura "Máquinas para Fluidos 2", en el cual se midió el desempeño del rotor y luego el desempeño del aerogenerador con dos variantes de la envolvente. La primera variante, presentada en la Sección 2.1.1, corresponde a la envolvente Cono-Recto, mientras que la segunda variante incorpora un difusor en la salida, manteniendo la geometría del concentrador cónico.

Después de estos ensayos, se llevó a cabo una evaluación de las pérdidas mecánicas del banco de ensayos. Este análisis implicó medir la potencia generada a partir de una fuente externa de potencia conocida, en este caso, un taladro.

3.1.2.2 Ensayo Falange-Recto

El ensayo de la envolvente Falange-Recto involucró, en una primera etapa, realizar medidas del desempeño del rotor, ya que se escaló el rotor utilizado en la envolvente Cono-Recto. Posteriormente se realizó un ensayo para medir el desempeño de la envolvente Falange-Recto.

Durante este ensayo, se enfrentaron desafíos relacionados con las dimensiones del rotor y las velocidades del túnel de viento. En particular, no se consiguió vencer la fuerza estática inicial para iniciar el ensayo, requiriendo la aplicación de una fuerza de giro externa en el eje del rotor. Esta acción permitió que el rotor iniciara su movimiento y mantuviera una velocidad de giro constante durante las mediciones.

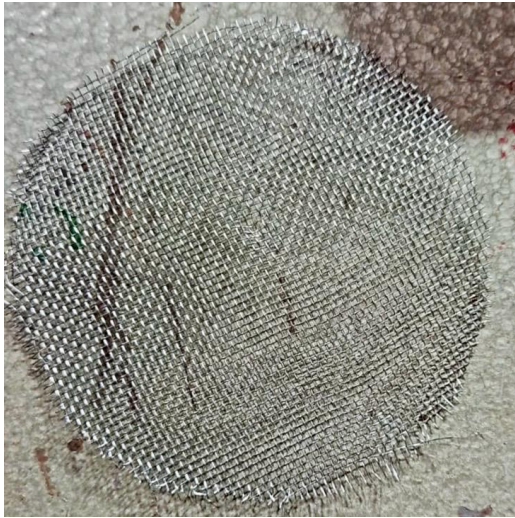
3.1.3. Ensayos DVAWT

En el contexto de este proyecto, se llevaron a cabo ensayos de un modelo de envolvente con eje vertical. A diferencia de los ensayos realizados con aerogeneradores de eje horizontal (DHAWT), en este caso, no se empleó el mismo banco de ensayos debido a las diferencias en las características y dimensiones de la envolvente. En lugar de construir un rotor específico para esta envolvente, se optó por implementar una solución alternativa.

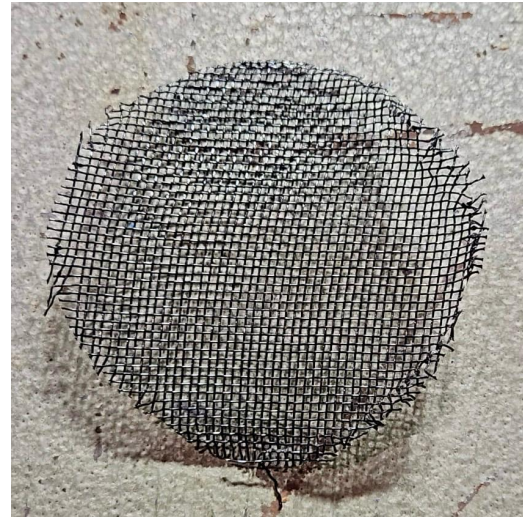
Dado que no se diseñó un rotor para este modelo, se introdujo una pérdida de carga en la zona del rotor mediante la instalación de diferentes tipos de mallas. Previamente, se llevó a cabo un ensayo para determinar la pérdida de carga asociada a cada tipo de malla utilizada. Estos enfoques permitieron evaluar la eficiencia de la envolvente con eje vertical en condiciones específicas.

3.1.3.1 Ensayo de mallas

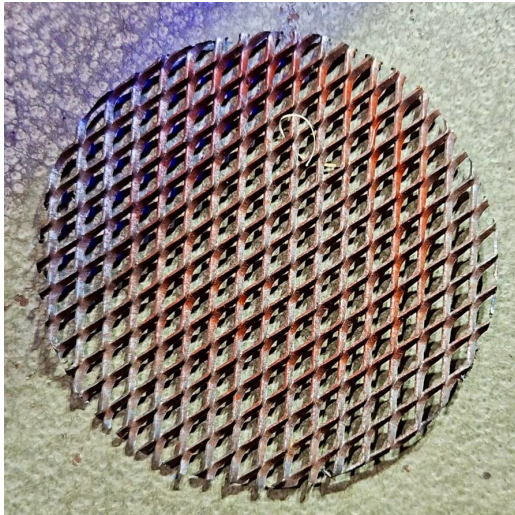
Con el objetivo de colocar una malla dentro de la envolvente DVAWT estudiada, para simular la presencia de un rotor, se realizó un ensayo a distintas mallas. En este ensayo se midió la pérdida de carga de tres mallas distintas, presentadas en Figura 3.1.3, en un banco de ensayo con esta finalidad. En el banco de ensayo utilizado, se dispone de un ventilador cuya salida está conectada a una tubería. En dicha tubería se encuentra una placa orificio equipada con las tomas de presión necesarias. El propósito de esta configuración es calcular el caudal del flujo de aire generado por el ventilador. Después de la placa orificio, se dispone de una toma de presión, seguida por la malla a ensayar. A partir de los datos de presión registrados, es posible calcular tanto el caudal como la pérdida de carga impuesta por cada malla en el sistema.



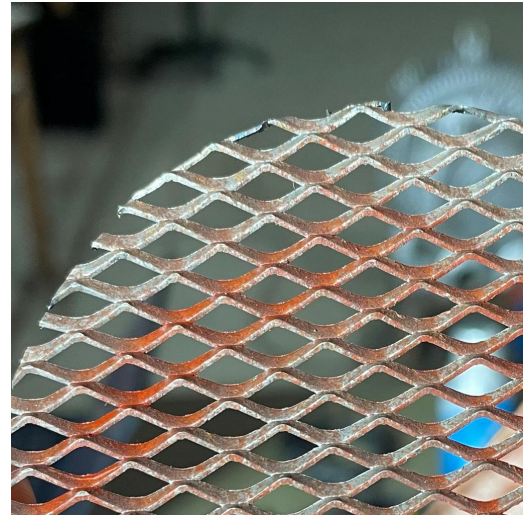
(a) Malla fina de alambre.



(b) Malla fina de plástico.



(c) Malla gruesa.



(d) Zoom Malla gruesa.

Figura 3.1.3: Fotografías de las tres mallas distintas ensayadas.

Este ensayo se encuentra desarrollado en la sección A.9 del anexo.

3.1.3.2 Ensayo Aeromine

La envolvente Aeromine, al ser diferente a las demás en cuanto a construcción y principio de funcionamiento, necesita un enfoque distinto a la hora de ser ensayada. Primero se definieron las dimensiones, las cuales son demasiado reducidas como para colocar un rotor. Se definió también que se necesita de una base para simular la presencia de un edificio, para lo cual se construyó una caja de madera con el ancho del área de ensayo del túnel de viento.

Debido a las dimensiones y a la complejidad del diseño de la envolvente, se optó por construirla mediante impresión 3D. Dadas las limitaciones de tamaño de la impresora 3D disponible, fue necesario dividir la envolvente en varias secciones para imprimir cada parte por separado y posteriormente ensamblarlas. Una vez montada, la envolvente se fijó a la base de madera construida para su sujeción en el área de ensayo del túnel de viento.

Para instalar las mallas, diseñadas para simular la pérdida de carga generada por un rotor, se fabricaron anillos de acrílico. Estos anillos fueron fijados directamente en la zona destinada para el rotor en la envolvente, sin requerir elementos de sujeción externos a la estructura.

El primer ensayo realizado fue cualitativo y tuvo como objetivo verificar el correcto funcionamiento de la envolvente según la propuesta teórica. En este ensayo, se encendió el túnel de viento a bajas velocidades y se utilizó una máquina de humo. Con una manguera que expulsaba el humo, se direccionó hacia distintos puntos de interés para realizar la visualización. Además, se colocó un láser para facilitar la observación de las líneas de flujo generadas por el humo. Las líneas de flujo se visualizaron en la parte frontal de la envolvente, variando la posición de la salida del humo y manteniendo el haz del láser en posición vertical. Además, se realizó una visualización de las líneas de flujo en la salida del aerogenerador, cambiando el techo de la envolvente por uno recto de acrílico transparente. Esto permitió observar las líneas de flujo desde la parte superior de la envolvente. Se desarrolla en 4.3.4.1.

En el segundo ensayo, se llevó a cabo una medición cuantitativa, registrando la temperatura, presión estática del viento libre, presión dinámica del viento libre en el plano medio de la base de madera, y la presión dinámica en distintos puntos dentro de la envolvente, específicamente en el tubo central donde se colocaría un rotor. Para medir la presión dinámica del viento libre, se utilizó un pitot conectado a un micromanómetro TSI (modelo DPCALC 8710). La presión dinámica en la sección del rotor se midió con un micropitot fijado a la base de madera, conectado a otro micromanómetro ALNOR (modelo EBT730). La medida de la presión estática se realizó desconectando las tomas de presión del micromanómetro utilizado para medir la presión dinámica del viento libre, midiendo, y volviéndolas a conectar. Se tomaron medidas durante un lapso de 10 segundos, registrando un dato por segundo. Se utilizó la media de estas medidas para los cálculos de velocidades, excepto para la temperatura, que se midió en un momento específico debido a la falta de variaciones significativas en la temperatura. Se desarrolla en 4.3.4.2.

3.2. Simulación numérica en `caffa3d.MBRi`

3.2.1. Introducción

En el transcurso del último siglo, la necesidad de analizar problemas reales del flujo de fluidos, acompañada de avances notables en recursos computacionales, ha dado lugar al desarrollo de una rama de la Mecánica de los Fluidos conocida como Mecánica de los Fluidos Computacional CFD (por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics). Las herramientas numéricas computacionales desarrolladas por esta disciplina ofrecen métodos, inicialmente complementarios y luego alternativos, para resolver problemas de alta complejidad y coste para técnicas analíticas o experimentales clásicas.

Su desarrollo tiene sus raíces en la década de 1950, en el contexto histórico de la carrera espacial, y se orientó hacia la resolución de problemas específicos intrínsecamente relacionados con ella (estudio de flujos supersónicos a altas temperaturas). Fue en los años 60, con la segunda generación de programas CFD, que se sentaron las bases para los códigos CFD de la actualidad al cambiar el enfoque para tomar un rumbo más general -centrándose en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes.

La herramienta ha experimentado una evolución constante desde 1950. Según [15], se estima que el costo computacional relativo de un mismo algoritmo se redujo en un orden de magnitud cada 8 años aproximadamente, en la segunda mitad del siglo XX.

El software de CFD resuelve de manera aproximada las ecuaciones que rigen los movimientos de los fluidos, discretizadas en millones de celdas que constituyen volúmenes elementales, de forma que únicamente los recursos computacionales modernos pueden hacer viable. La creciente capacidad de cómputo y paralelización de cálculo potencian la eficacia de este recurso, consolidado hoy como una herramienta versátil y confiable para el modelado de fenómenos físicos. Fundamental en diversas áreas de la ingeniería moderna, el CFD se ha convertido en una herramienta esencial en campos como la ingeniería industrial, química, civil y ambiental, contribuyendo significativamente al diseño y análisis de sistemas que requieren un alto nivel de flexibilidad geométrica y paralelización de cálculo.

Dentro de la amplia gama de software de código abierto disponibles en la actualidad, el utilizado en el contexto de este proyecto es conocido como `caffa3d.MBRi`. Este fue desarrollado por el Grupo de Mecánica de los Fluidos de la Facultad de Ingeniería (IMFIA, FING-UdelaR, Uy), en colaboración con la Universidad Rovira i Virgili en España. [16]

Este modelo numérico tridimensional fue desarrollado en Fortran 90, sobre la base de un solver bidimensional 'caffa' [16], también de código abierto. Se modelan flujos viscosos e incompresibles en regímenes turbulentos o laminares, empleando el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de manera implícita. La descomposición del dominio en bloques con mallas estructuradas permite la paralelización del cálculo en memoria distribuida mediante librerías MPI.

`Caffa3d.MBRi` se compone de módulos que organizan algoritmos según su función. Algunos a destacar son el módulo de turbulencia (LES), el que aplica el Método de Condiciones de Borde Inmersas IBCM (ImmersedBoundaryManager), y el de turbinas (WindTurbineModelManager).

3.2.2. Modelo Matemático

El modelo en cuestión plantea tres ecuaciones matemáticas (leyes) que caracterizan el movimiento de fluidos newtonianos incompresibles sometidos a la acción del campo gravitatorio: conservación de la masa, conservación de la cantidad de movimiento, y conservación de magnitudes escalares en el flujo.

Es importante destacar que el carácter 'incompresible' de los fluidos modelados constituye una adecuada aproximación a la experiencia práctica, debida a la escasa variación de su densidad con moderados cambios de presión. La única excepción en la que se considera dicha variación se da en uno de los términos de la Ecuación 3.2.2, mediante la aplicación de la aproximación de Boussinesq, que tiene en cuenta los efectos de flotación inducidos por gradientes de temperatura. En el marco de esta aplicación particular, en la que se apunta a reproducir el flujo de aire en ensayos en túnel de viento de tipo CLA (Capa Límite Atmosférica), las velocidades de viento empleadas se corresponden con una compresibilidad despreciable y el modelo resulta adecuado [18].

Las mencionadas ecuaciones se expresan en su forma integral, sobre una región fija del espacio Ω que sirve de volumen de control, definida dentro del dominio del fluido, cuya frontera se denota S . Esto es consistente con el método de volúmenes finitos, donde el sistema de ecuaciones discretizadas se aplica a cada volumen elemental.

La Ecuación 3.2.1 expresa el Balance de masa sobre la frontera del volumen de control y bajo las hipótesis de fluido newtoniano incompresible. La misma es escalar y expresa que la integral en la superficie S del producto escalar entre el vector de velocidad instantánea $\vec{v}$ y el versor normal saliente de la superficie $\hat{n}_s$ en el diferencial dS considerado, debe ser nulo.

$$\int_S (\vec{v} \cdot \hat{n}_s) dS = 0 \quad (3.2.1)$$

La Ecuación 3.2.2 describe el balance de momento o conservación de la cantidad de movimiento. Es una ecuación vectorial. La nueva simbología empleada incluye la densidad del fluido ρ , el coeficiente de expansión volumétrica del mismo β , la temperatura T y aquella de referencia T_{ref} , junto con la viscosidad dinámica del fluido μ . Además, entra en juego la matriz simétrica D , que representa el tensor de velocidades de deformación (local), y se descompone en función del gradiente de la velocidad $\nabla \vec{v}$, de la forma indicada en la Ecuación 3.2.3.

$$\int_{\Omega} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} d\Omega + \int_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \hat{n}_s) dS = \int_{\Omega} \rho \beta (T - T_{ref}) \vec{g} d\Omega + \int_S -p \hat{n}_s dS + \int_S (2\mu D \cdot \hat{n}_s) dS \quad (3.2.2)$$

$$D = \frac{1}{2} [\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] \quad (3.2.3)$$

El lado izquierdo de la Ecuación 3.2.2 expresa la derivada total de la cantidad de movimiento, descompuesta en dos términos mediante el teorema de transporte, para ser expresada sobre un volumen de control Ω . Del lado derecho, el primer término hace referencia a la resultante de las fuerzas de masa en la región Ω . Es aquí donde se tiene en cuenta la aproximación de Boussinesq para contemplar movimientos no despreciables por efecto de flotación debido a pequeñas variaciones de densidad inducidas por temperatura. Fuera de este término particular, la densidad del fluido

es considerada una constante. La ecuación se completa al considerar la resultante de las fuerzas de contacto sobre la frontera del volumen de control S . Las mismas se componen de un primer término asociado a las presiones p , ejercidas en la dirección normal $\hat{n}_s$ a cada diferencial de superficie dS , y otro asociado a las tensiones rasantes, donde la viscosidad dinámica μ se considera indiferente a variaciones de temperatura.

La tercera ley de conservación que completa el sistema de ecuaciones es la de una magnitud escalar genérica ϕ , con coeficiente de difusión Γ y considerando fuentes o sumideros q_ϕ de la misma. Se expresa en la Ecuación 3.2.4, escalar, que incluye como caso particular la conservación de energía o especies, a través del transporte de los escalares temperatura o masa, respectivamente.

$$\int_{\Omega} \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} d\Omega + \int_S \rho \phi (\vec{v} \cdot \hat{n}_s) dS = \int_S \Gamma (\nabla \phi \cdot \hat{n}_s) dS + \int_{\Omega} q_\phi d\Omega \quad (3.2.4)$$

En este caso, los términos del lado izquierdo corresponden a la derivada total en el tiempo de una magnitud escalar ϕ , expresada en el volumen de control Ω mediante el teorema de transporte. El lado derecho de la ecuación completa el equilibrio con un término difusivo, integrando en la frontera S , y otro que considera fuentes o sumideros.

El sistema de ecuaciones que describe el modelo matemático queda gobernado entonces por las ecuaciones 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.4, donde la conservación del momento (3.2.2) se descompone en tres ecuaciones escalares, y el transporte de magnitudes escalares (3.2.4) se expresa de manera genérica, pudiendo aplicarse a más de una magnitud ϕ . Considerando el caso más simple, con este sistema se tienen 5 ecuaciones escalares, por lo que se pueden resolver 5 incógnitas. Éstas suelen ser la el campo de presiones p , las tres componentes de la velocidad $\vec{v} = (u, v, w)$ (en coordenadas cartesianas) y el campo de la magnitud escalar en cuestión ϕ . Cabe destacar que, al tratarse de un fluido incompresible, el campo de presiones y el de velocidades no están relacionados de manera unívoca.

Para terminar de determinar el sistema, se lo debe caracterizar mediante condiciones iniciales y condiciones de borde. Tales pueden ser de sobre cualquiera de los campos mencionados, siendo las cinemáticas las más usadas, como lo son condiciones de entrada del flujo, de no deslizamiento y de simetría, que se emplean en el marco de este trabajo.

3.2.3. Discretización

La discretización del problema significa que el sistema original de ecuaciones diferenciales, cuyas incógnitas son campos continuos (como velocidad y presión), es simplificado para obtener uno de ecuaciones algebraicas, que permita una resolución computacional eficiente. La solución teórica es aproximada por la aplicación del modelo matemático en un conjunto finito de puntos del espacio e instantes del tiempo.

La implementación de esta metodología involucra el estudio detallado de técnicas de interpolación, diferenciación, integración en volumen y superficie, y el análisis de la estabilidad del sistema. Todo ello con el objetivo de garantizar la convergencia del problema aproximado al modelo teórico.

Según [18] se sostiene que el método de resolución del modelo matemático es diseñado y/o seleccionado para cada aplicación particular. Los tres parámetros clave para caracterizar la metodología empleada son la discretización de las ecuaciones,

la integración temporal, y el acoplamiento entre la presión y la velocidad. Para profundizar en las distintas opciones disponibles, sus ventajas, y criterios de selección para un caso dado se puede recurrir a [18].

La técnica de discretización empleada en el caso del `caffa3d` (`caffa3d.MBRi`) se denomina Método de Volúmenes Finitos, caracterizado por su sencillez y conservación integral en el dominio. El dominio numérico está cubierto/dividido por bloques de malla estructurada. Cada uno de estos bloques está compuesto por un arreglo de celdas, cada una con exactamente 6 caras, formando hexaedros no regulares, careciendo de superposición y espacios libres/vacíos. La Figura 3.2.1 ejemplifica una celda con las características mencionadas.

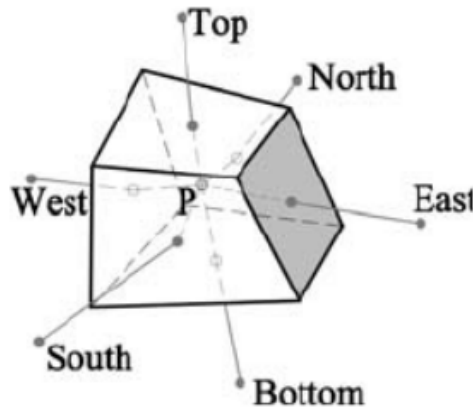


Figura 3.2.1: Celda o volumen elemental con seis vecinos (caras). Adaptado de [16]

En principio, las mallas que cubren un dominio numérico podrían clasificarse según su carácter estructurado o no-estructurada (ver Figura 3.2.2). Las grillas no estructuradas, potencialmente, permiten el análisis de dominios de alta complejidad, pero el consecuente esfuerzo de cómputo adicional las vuelve poco atractivas - especialmente en el empleo de solucionadores lineales [16]. Las mallas completamente estructuradas que se ajustan a la geometría de los cuerpos ('body fitted grid' en inglés), en contraparte, solo logran una adecuada discretización espacial del dominio en casos de geometría muy simple.

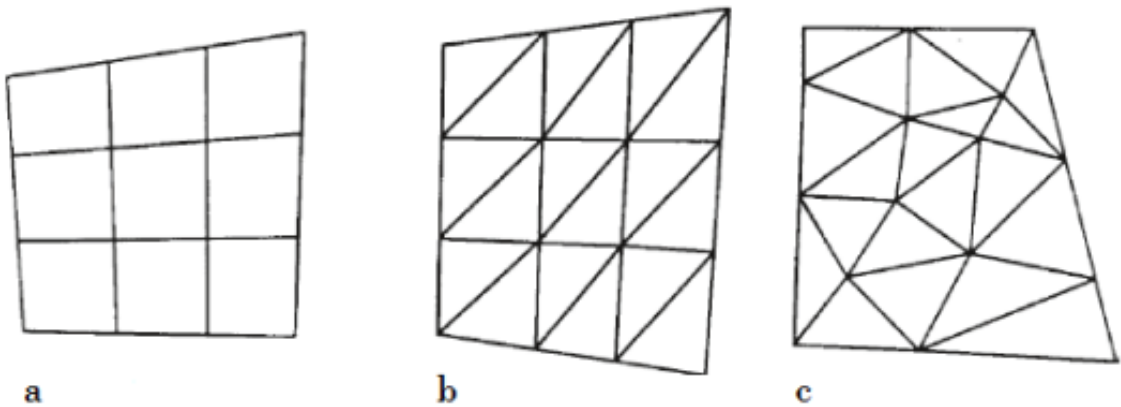


Figura 3.2.2: Ejemplo de mallas estructuradas y no estructuradas. Adaptado de [22].

El enfoque implementado en el código brinda una mayor flexibilidad y yace en un punto medio entre mallas completamente estructuradas y no estructuradas: crear bloques de grillas curvilíneas, admitiendo una estructura irregular, dentro de cada cual se define una malla estructurada, pudiendo o no ser ortogonal. Este criterio, a su vez, se alinea con otros propósitos como lo son el refinamiento local de la malla (3.2.7.1) (sin afectar el resto del dominio), la interacción de cuerpos rígidos en movimiento en el dominio, o la aplicación de la paralelización del cálculo mediante descomposición del dominio y el uso de librerías MPI (Message Passage Interface).

En particular, esta división en bloques estructurados en conjunto con el método de condiciones inmersas (IBCM, por sus siglas en inglés) permite abordar geometrías complejas sin dejar de lado la simpleza y eficiencia, tanto en creación como en post-procesamiento de resultados, de las mallas estructuradas. Este tema es abordado más adelante en 3.2.7.1, o en mayor profundidad en [15] y [19].

La Figura 3.2.3 contiene un ejemplo de celda de una malla regular, donde se denotan parámetros característicos del centro de la celda (representado con letras mayúsculas) y de sus respectivas caras (minúsculas) en contacto con celdas aledañas. Las seis caras de cada celda se nombran de forma de asociarlas a los puntos cardinales Norte (North), Sur (South), Este (East) y Oeste (West), la cara Superior (Top) e Inferior (Bottom).

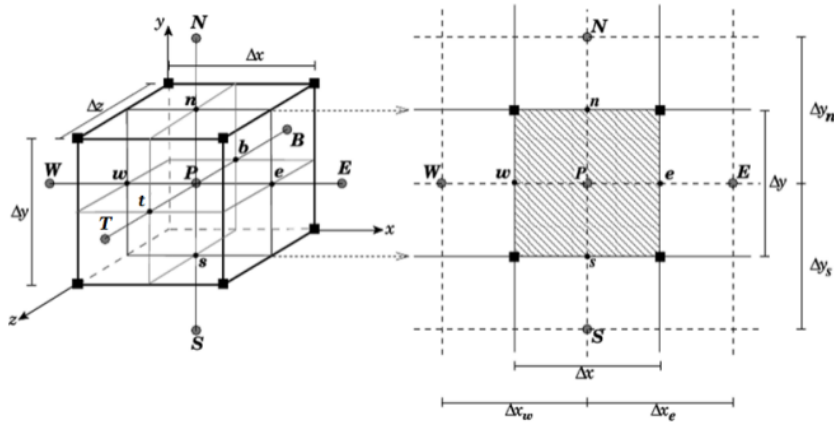


Figura 3.2.3: Identificación de celda en una malla estructurada. Adaptado de [15].

El sistema de ecuaciones algebraicas se resuelve para cada celda, de modo que cada centroide tiene asociado y almacenado los valores de las incógnitas $\vec{v}$, p y ϕ . La posición de estos centroides (y por ende de la celda) está unívocamente determinada por el conjunto de 3 índices: (i, j, k) - correspondientes a las coordenadas en el sistema seleccionado, como puede ser el sistema cartesiano. Esto permite un óptimo uso de memoria en cuanto al almacenamiento, acceso a propiedades de cada celda, y la aplicación eficiente de algoritmos para resolver sistemas matriciales de ecuaciones.

La elección del sistema de coordenadas y la base de vectores es crucial para resolver modelos matemáticos mediante sistemas de ecuaciones. La selección se basa en las características geométricas del problema y los métodos de discretización. En el contexto de códigos numéricos para flujos en diversas configuraciones geométricas, la elección de un sistema Cartesiano proporciona flexibilidad y robustez.

El código *caffa3d* se ha desarrollado utilizando un sistema Cartesiano debido a estas ventajas, que incluyen una formulación simplificada de ecuaciones para la re-

solución numérica y la conservación de magnitudes en todo el dominio numérico.

En la resolución numérica de fluidos incompresibles, el cálculo del campo de presiones se convierte en un aspecto crucial. Esto se debe a que las ecuaciones de balance de masa (3.2.1) y momento (3.2.2) para fluidos viscosos newtonianos están acopladas con respecto a las variables independientes: velocidad $\vec{v} = (u, v, w)$ y presión p . Resolver estas ecuaciones requiere conocer el campo de presiones, el cual se calcula a partir de la ecuación de balance de masa, donde también interviene el campo de velocidades.

Es fundamental destacar que en la teoría de fluido newtoniano incompresible no existe una ecuación constitutiva, lo que permite valores arbitrarios de presión para una misma densidad. Conociendo el campo de fuerzas de masa junto a condiciones de borde cinemáticas puras, existen infinitas soluciones para el campo de presiones. Hace falta proporcionar al código una presión de referencia en algún volumen de control del dominio numérico.

Volviendo a la Ecuación 3.2.2, se observa que el campo de presiones es esencialmente una restricción cinemática que debe cumplir el campo de velocidades.

En el `caffa3d`, se utiliza el método SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) de acople velocidad-presión, para resolver el campo de presiones a partir de las ecuaciones discretizadas del Balance de Masa y el Balance de Momento. Este método, introducido en 1973, emplea un algoritmo iterativo que corrige progresivamente el campo discreto de presiones (pressure correction) hasta obtener un campo de velocidades que satisface las ecuaciones de balance. La corrección de la presión p' se determina de manera que, sumada a la presión inicial p^* , se obtenga un campo de velocidades $\vec{v}'$ que, sumado al campo de velocidades inicial $\vec{v}^*$, resulte en el campo de velocidades correcto $\vec{v}$. Véanse las ecuaciones 3.2.5.

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \vec{v}^* + \vec{v}' \\ p &= p^* + p'\end{aligned}\tag{3.2.5}$$

Una vez que las correcciones alcanzan valores inferiores a un cierto margen de tolerancia, se finaliza la iteración y se procede a resolver las ecuaciones del siguiente paso temporal.

3.2.4. Condiciones de Borde Inmersas IBCM

En las simulaciones numéricas de dominios con fronteras complejas, surge un desafío crucial desde el principio: el diseño de la malla que representará el dominio de la simulación. Esta malla debe ajustarse de manera precisa a la estructura en cuestión, garantizando buenas propiedades geométricas para lograr la convergencia de las ecuaciones. En muchos casos, esta necesidad conduce a la utilización de mallas no estructuradas, a pesar de la complejidad asociada.

Este desafío constituye la principal ventaja del método de condiciones de borde inmersas (IBCM).

El enfoque IBCM, basado en el método introducido por Peskín en 1972 [21], revolucionó la representación de geometrías complejas en simulaciones numéricas. Emplea mallas simples cartesianas en lugar del método clásico de ajustar la malla a la geometría de trabajo, utilizando campos de fuerzas de masa externos al fluido para representar las geometrías mediante un término fuente adicional en la ecuación

discretizada. Esta elección permite liberarse de una fuerte dependencia con cada geometría específica, posibilitando abordar de manera eficaz geometrías muy complejas y desafiantes en términos numéricos.

En el presente trabajo se parte de una discretización, en bloques de mallas cartesianas, del volumen vacío de la sección de trabajo del Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería 3.1. La misma fue creada en el marco de la tesis de maestría [15]. Sobre esta base, se implementa el método IBCM para representar distintas geometrías de envolventes. Cabe destacar que en principio, si bien el método lo permite, se omite la inclusión de un rotor en movimiento por su elevado grado de complejidad.

Desde su origen en 1972, se han ramificado diversos métodos para implementar el cálculo y aplicación de la fuerza de masa. En el `caffa3d` se adopta el enfoque directo del método denominado 'discrete forcing approach', usualmente empleado en la simulación de fronteras rígidas, que aplica la fuerza en las ecuaciones discretizadas como un término adicional. El mismo corrige el campo de velocidades en presencia de la frontera.

La aplicación de esta fuerza se limita a aquellas celdas o completamente incluidas en la frontera, o inmediatamente fuera de ella. La resolución se realiza considerando la posición de la celda con respecto a la frontera y la velocidad del cuerpo sólido en esa ubicación. Si se está en el primer caso, como pueden verse las celdas de color amarillo de la Figura 3.2.4, la velocidad se ve afectada para coincidir con aquella del cuerpo sólido en esa posición. Al estar la celda completamente fuera no corresponde afectar su velocidad (celeste en la figura).

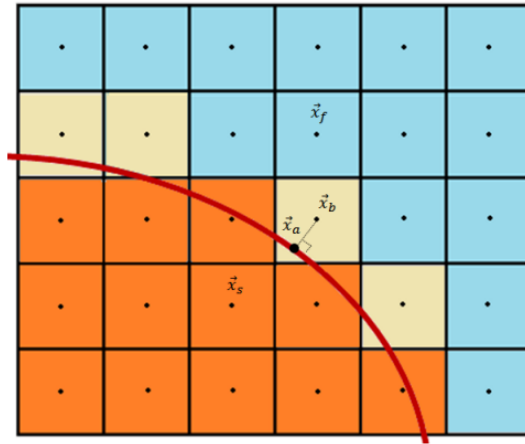


Figura 3.2.4: Esquema identificando las distintas posiciones de celdas respecto a la frontera de un cuerpo sólido. Adaptado de [15].

En resumen, el IBCM utiliza campos de fuerzas de masa externos al fluido para representar la geometría de las superficies mediante un término fuente adicional en la ecuación discretizada. Las celdas de la malla que caen dentro de estos campos y sus adyacentes quedan condicionadas a tener velocidad nula (caso frontera estática), simulando la acción de las fronteras de manera efectiva. [11]

La Figura 3.2.5 esquematiza la configuración utilizada para representar la presencia de un cuerpo rígido de frontera Γ en un dominio ocupado por un fluido Ω .

En casos donde las dimensiones de la frontera son comparables o menores que la discretización de la malla, se pueden presentar desafíos en su representación. En el marco de este trabajo utilizando el código `caffa3d`, al tratarse de geometrías con

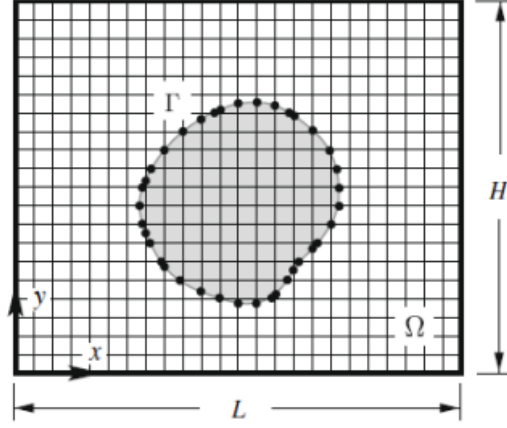


Figura 3.2.5: Objeto de frontera Γ representado mediante IBCM sobre un dominio numérico discretizado con mallas cartesianas. Tomado de [20].

dimensiones características conocidas, este inconveniente se aborda ajustando la malla para obtener una resolución adecuada a la aplicación. Esto se materializa en un compromiso entre aumentar los espesores de las envolturas y "afinar" la malla.

En el *caffa3d*, la implementación de los algoritmos relacionados con el Método de Condiciones de Borde Inmersas se encuentra en el módulo "ImmersedBoundary-Manager". La subrutina principal, llamada desde "ComputeMomentumBalance", se encarga de actualizar los términos fuentes antes de resolver las ecuaciones algebraicas correspondientes al Balance de momento.

La representación de los sólidos en el espacio tridimensional se realiza mediante superficies cerradas triangulares, llamadas "patches", orientadas mediante vectores normales salientes al sólido. Estas superficies se obtienen a partir de programas CAD 3D, exportando los objetos en formato STL (Stereolithography). La información contenida en el formato STL se traduce a matrices, teniendo una matriz V que contiene las coordenadas de los vértices de todas las caras, otra F que especifica los vértices de cada cara, y la matriz Tn con los vectores normales.

Estas matrices se cargan mediante la subrutina "LoadPatchData" en el módulo "PatchObjectsDataManager". Posteriormente, se calculan las distancias de las celdas a los objetos mediante la subrutina "ComputeDistancesToPatch". Dado que los objetos en el trabajo no cambian su posición durante la simulación, ambas subrutinas se invocan una sola vez al inicio de la ejecución del *caffa3d*.

3.2.5. Paralelización del cálculo

El *caffa3d* mejora la eficiencia de las simulaciones al hacer uso de paralelización del cálculo a través de la biblioteca MPI (Message Passing Interface), una herramienta de código libre diseñada para la programación paralela en lenguajes como C, C++, y Fortran, en la que la comunicación entre los procesos se da mediante pasaje explícito de mensajes.

Esta técnica se justifica en la división del dominio en bloques de mallas estructuradas, que a su vez se agrupan en distintas regiones. Cada región se asigna estática y biunívocamente a un procesador MPI antes de la ejecución del código, buscando un equilibrio en la distribución para optimizar el uso de memoria y tiempo de ejecución. Es importante destacar que las interfaces intra-región no requieren comu-

nicación explícita, a diferencia de las inter-región, lo que implica un mayor consumo de memoria.

Este equilibrio en la distribución del dominio tiene como objetivo minimizar las comunicaciones entre procesadores y lograr que cada uno maneje cantidades similares de celdas. Con el fin de facilitar la programación, todas las rutinas MPI necesarias se encuentran organizadas y encapsuladas en el módulo "MpiManager".

3.2.6. Contexto de Trabajo

En el presente trabajo se empleará la simulación numérica en forma paralela a ensayos experimentales en túnel de viento. Utilizando un modelo simplificado del mismo, ésta herramienta permite ampliar fuertemente la gama de casos de estudio, pudiendo servir como filtro inicial previo a ensayos experimentales.

El enfoque primordial del modelado es hacia la selección de un tipo de envolvente. Ignorando la presencia del rotor, es posible evaluar el desarrollo del flujo alrededor de numerosas geometrías de envolventes, sin necesidad de construirlas. Se puede, entonces, elegir los diseños más prometedores en cuanto a su capacidad de concentrar flujo másico.

Como ha sido mencionado en el capítulo, se emplea el método de condiciones de borde inmersas IBCM para llevar a cabo este análisis. En el transcurso del proyecto, además, se vio la necesidad y oportunidad de analizar la sensibilidad de la resolución de la malla, experimentando con distintos tamaños y correspondientes espesores de envolvente.

Es importante resaltar la naturaleza complementaria del enfoque numérico y experimental en este estudio. La simulación numérica inicial se origina a partir de los ensayos realizados en el proyecto base [1], con el objetivo de reproducir y comprender situaciones encontradas en la práctica. Al lograr este objetivo, se abre la posibilidad de investigar otros casos antes de llevar a cabo ensayos experimentales, con el propósito de abordar y mejorar posibles inconvenientes que puedan surgir durante la realización de los ensayos.

En la mayoría de las simulaciones, se implementó un paso temporal uniforme de 0,2 segundos, con una excepción en la que se redujo a 0,1 segundos. En cuanto al número de iteraciones, se inició con valores más elevados, específicamente 5000, los cuales posteriormente fueron ajustados a 3000 o incluso 2000 en ciertos casos. Esta modificación se realizó con el objetivo de optimizar los tiempos de ejecución, tras realizar un análisis sobre la estabilidad de la velocidad en puntos específicos del dominio.

3.2.7. Generación del dominio numérico

Dada la naturaleza del proyecto, el dominio numérico con el que se trabajará trata de una representación del Túnel de Viento tipo CLA de la Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Como se desarrolla en 3.1, la sección transversal de la zona de trabajo es de 2,25 metros de ancho por 2 metros de altura, con una profundidad de 17 metros. Como dato importante, se destaca que el área máxima que puede obstruirse en la zona de trabajo corresponde a un 5 % de la sección transversal del túnel de viento. Esta característica restringe la mayor dimensión de los modelos a ensayar, lo cuál se verá reflejado también en la modelación numérica.

A continuación se detallan el método y dimensiones características de las mallas empleadas en la discretización del dominio numérico.

3.2.7.1 Anidamiento de mallas

Para lograr modelar la situación experimental deseada, de una cierta geometría dentro del túnel de viento, naturalmente deben tenerse en cuenta distintas escalas para discretizar el dominio.

En términos de costo computacional y tiempos de simulación, el problema es viable solamente mediante el diseño de dos mallas de distinta resolución, que pueden ser superpuestas (anidadas) en el dominio. También se logró optimizar en recursos computacionales mediante la representación de tan solo la primer mitad del túnel de viento, previendo que el lugar de ensayo deja suficiente margen aguas abajo del dispositivo para simular las estelas que ocasiona.

3.2.7.2 Malla gruesa

Como fue mencionado anteriormente 3.2.7.1, se optó por crear mallas de distinta resolución para los distintos elementos a representar en la simulación.

De esta forma, se creó un primer dominio numérico, "malla gruesa", para representar el tramo inicial de la zona de trabajo del túnel de viento vacío. A posteriori, mediante el anidamiento de mallas y uso de condiciones de borde inmersas, se contempla la influencia de los dispositivos (envolventes) a ensayar dentro del túnel.

El tramo a representar consta de aproximadamente $7,5m$ de largo, con una sección transversal fija de $2,25m$ de ancho y $2m$ de altura.

Para lograr la precisión deseada del orden de $1cm$, se divide el dominio en grupos con cantidades limitadas de celdas. El `caffe3d` cuenta con herramientas de paralelización de cálculo, con las cuales se resuelve cada grupo de celdas de manera independiente, en procesadores distintos.

La Figura 3.2.6 esquematiza la disposición de las 18 regiones resultantes, cada una compuesta de un único bloque cartesiano. Las dimensiones de cada región son $0,83m$ en la dirección del flujo, $1,125m$ de ancho y $2m$ de altura. En la Tabla 3.2.1 se indica el número de divisiones por bloque y resolución de la celda en cada dirección. El total de celdas por bloque ronda los 1,676 millones.

Luego, en la Figura 3.2.7 se tiene una vista superior indicando la numeración de bloques empleada, y la Figura 3.2.8 ilustra en mayor detalle la geometría de un bloque individual (bloque 1).

Tabla 3.2.1: Información malla gruesa - por bloque.

Malla Gruesa	tamaño (m)	nro. celdas (uniformes)	resolución(cm)
eje x	0.830	80	1.0375
eje y	1.125	108	1.0417
eje z	2.000	194	1.0309

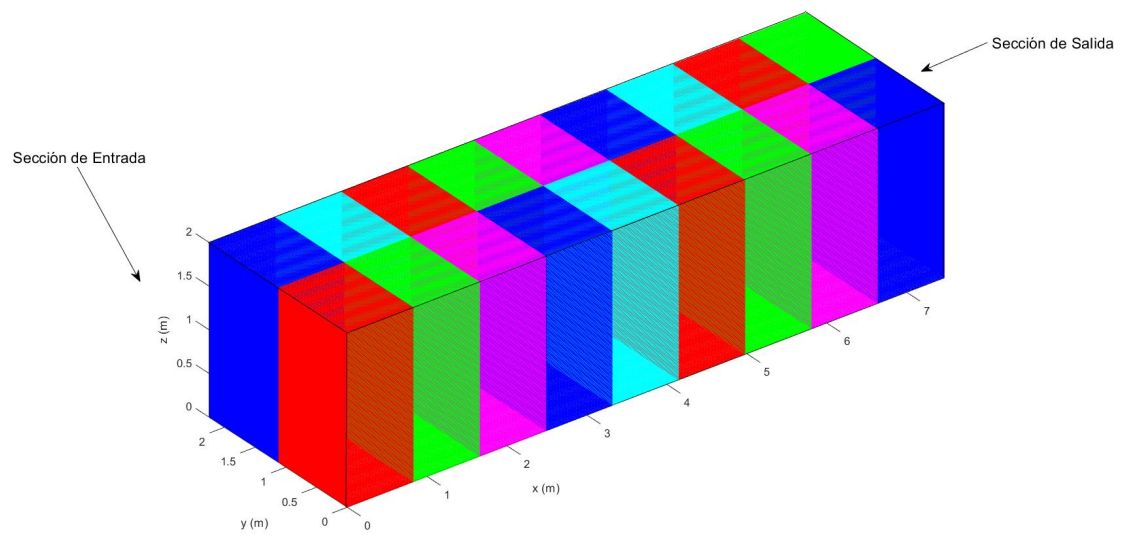


Figura 3.2.6: Configuración de los bloques de malla cartesiana gruesa que componen el dominio del túnel de viento (primera mitad de sección de trabajo).

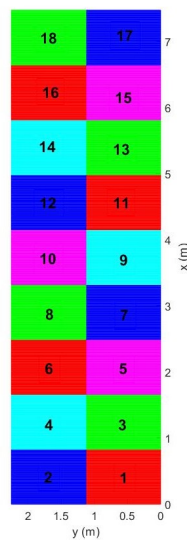


Figura 3.2.7: Configuración de los bloques de malla cartesiana gruesa que componen el dominio del túnel de viento. Vista superior numerada.

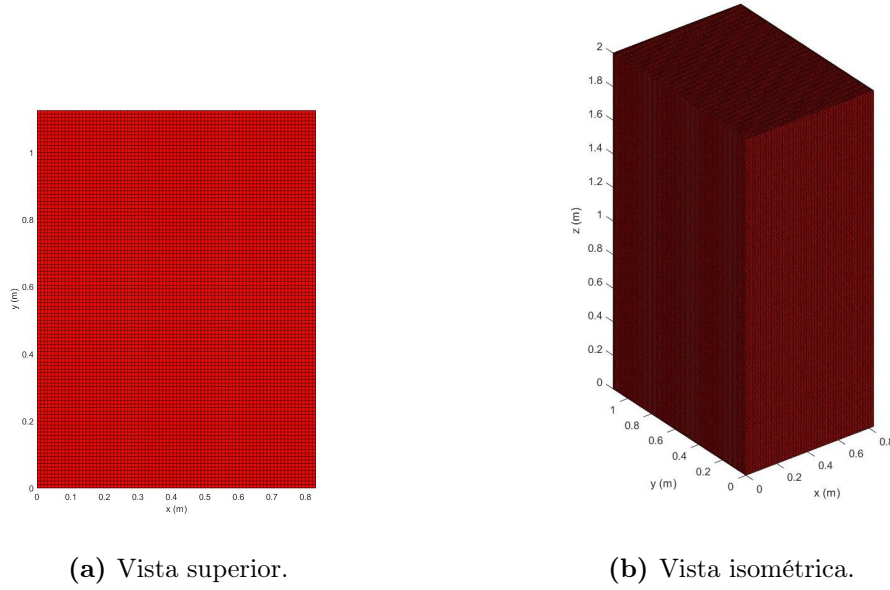


Figura 3.2.8: Vista del primer bloque la de malla cartesiana gruesa.

3.2.7.3 Malla fina

Posteriormente, se creó un segundo dominio numérico, "malla fina", para representar la zona donde efectivamente se colocarían las envolventes, y demás dispositivos, en un ensayo.

Esta región, de menores dimensiones, cubre 80cm en cada una de las tres direcciones. Se ubica a $x = 2,5\text{m}$ del comienzo del primer bloque de la malla gruesa, centrado en las direcciones y y z . Se esquematiza su ubicación en la Figura 3.2.9.

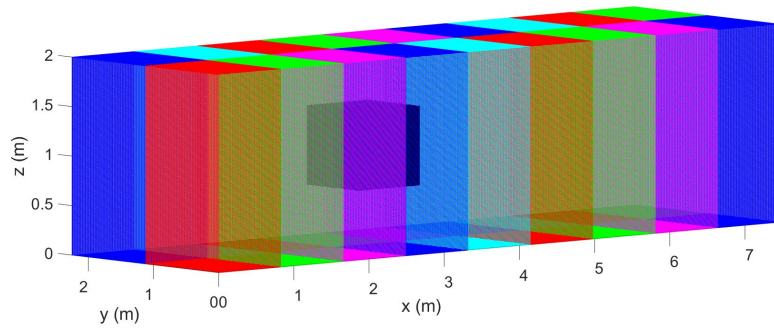
El diseño de la malla fina se realizó con el objetivo de obtener una resolución aproximada de $0,25\text{ cm}$ en cada una de las direcciones, reduciendo las dimensiones de las celdas de la malla gruesa en un cuarto de su tamaño original. En estas caso, para que las condiciones de borde funcionen correctamente, se debe apuntar a una dimensión mínima de 1cm en la envolvente a simular.

El diseño de la malla fina consta de 20 bloques adicionales, cada uno compuesto por 160 celdas en las direcciones del flujo y transversal, y 64 celdas en la dirección vertical, totalizando 1,638 millones de celdas por bloque. Los detalles de cada bloque se encuentran en la Tabla 3.2.2.

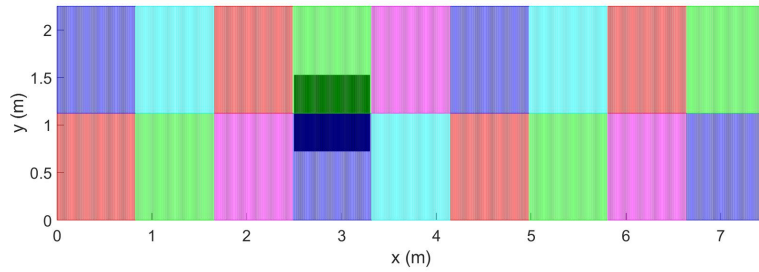
Con esta disposición:

- Cada celda se divide en 4 en cada dimensión, obteniendo una resolución aproximadamente 64 veces menor (dando como resultado 71).
- Cada simulación con mallas anidadas utiliza 38 regiones, lo que implica el uso de 38 procesadores. Esto es compatible con la ejecución de hasta dos casos simultáneos por usuario, permitiendo el uso de hasta 80 procesadores.
- El número de celdas por procesador se mantiene en el mismo orden que en los bloques de malla gruesa, alrededor de 1,638 millones.

La estructura de la malla fina, sus bloques y numeración utilizada, puede visualizarse en la Figura 3.2.10.

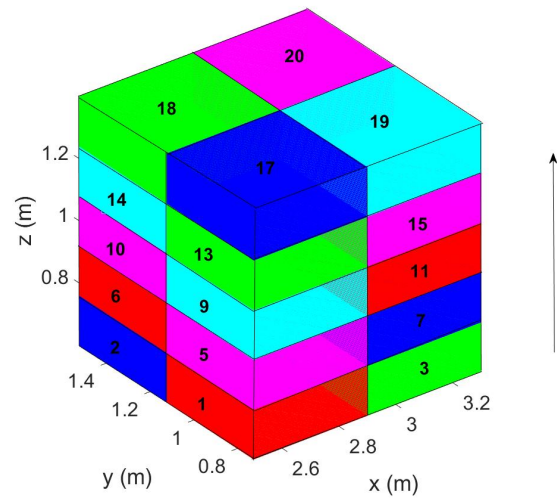


(a) Vista isométrica.

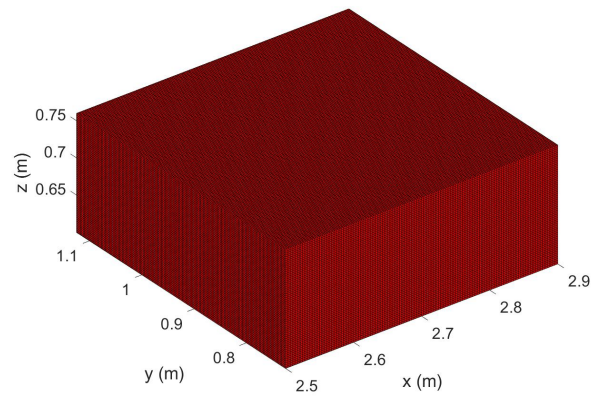


(b) Vista superior $x - y$.

Figura 3.2.9: Ubicación de la zona cubierta por la malla fina (en negro) en el dominio numérico.



(a) Bloques de malla fina, numeración.



(b) Bloque 1 de malla fina -celdas.

Figura 3.2.10: Estructura en bloques de la malla fina.

Tabla 3.2.2: Información malla fina - por bloque.

Malla Fina	tamaño (m)	nro. celdas (uniformes)	resolución(cm)
eje x	0.40	160	0.25
eje y	0.40	160	0.25
eje z	0.16	64	0.25

3.3. Condiciones de viento disponible - Azotea de Facultad

El proyecto, al enfocarse en la microgeneración en entornos urbanos y al contar con las instalaciones e instrumentos de la Facultad, brinda la oportunidad única de analizar las condiciones reales del viento en la azotea del edificio.

La finalidad de este análisis es determinar si, junto a la cornisa del edificio, se registran efectivamente mayores módulos de viento que a mayores alturas, para ciertas direcciones de viento. Este resultado sería consistente con la concentración de líneas de flujo debido al efecto bloqueo del edificio.

Para esto, se utilizan dos anemómetros: uno ultrasónico para medir dirección y módulo de velocidad, y otro de cazoletas para registrar solo el módulo. A su vez, se aprovecha la estructura existente para ubicar al primero a mayor altura (Figura 3.3.1), mientras que el anemómetro de cazoletas se sitúa enseguida de la cornisa, a 1,80 metros del suelo.

Las figuras 3.3.1 y 3.3.3 muestran distintas vistas de la azotea en las que se puede visualizar la diferencia en altura entre los instrumentos, y la posición del de cazoletas respecto de la cornisa.



Figura 3.3.1: Vistas de la azotea donde se pueden diferenciar ambos anemómetros: de cazoletas a menor altura y ultrasónico a mayor.

La Facultad de Ingeniería, ubicada en la rambla de Montevideo, está expuesta

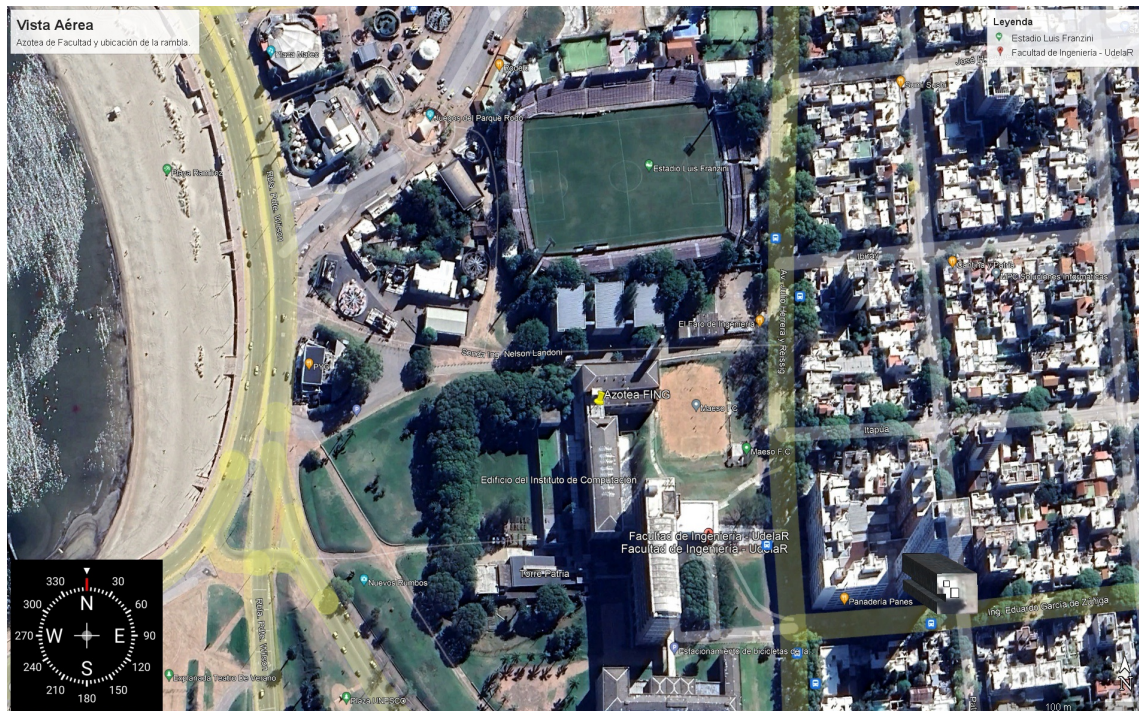


Figura 3.3.2: Vista aérea de la azotea de la Facultad de Ingeniería.

a vientos que provienen de diversas direcciones, siendo de especial interés aquellos provenientes la playa Ramírez (W y S-W), ya que se anticipa que presentan los mayores módulos de viento. La Figura 3.3.2 muestra una vista aérea de Google Earth en la que se puede distinguir la azotea de la facultad, y su ubicación respecto de la rambla.

Es importante señalar que el anemómetro ultrasónico registra menos interferencia por parte de los árboles en la rambla, lo que implica una mayor precisión al medir las velocidades.

Se recopilan numerosos días de registro conjunto de ambos instrumentos en un lapso de cuatro meses (junio a septiembre 2023), restringiéndose a las direcciones de viento incidente mencionadas. El análisis de estos datos y conclusiones se presentan en la Subsubsección 4.3.3.



(a) Vista hacia la rambla.



(b) Vista lateral.

Figura 3.3.3: Vistas de la azotea que ilustran la posición del anemómetro de cazoletas respecto de la cornisa del edificio (en forma escalonada).

3.4. Tabla-Resumen

En la tabla siguiente (Tabla 3.4.1), se presenta un esquema detallado de los análisis realizados para cada tipo de envolvente. En la sección superior horizontal, las envolventes se clasifican en tres categorías según sus principios de funcionamiento: Concentrador, Falange (obstrucción del flujo alrededor del aerogenerador) y Aeromine (diferencia de presiones). Además, se distingue entre modelos de geometría recta y refinada, que emplean perfiles aerodinámicos.

En relación con los estudios realizados (sección vertical a la derecha en la tabla), se establece una distinción entre herramientas experimentales y numéricas. Los ensayos realizados en modelos de eje horizontal, DHAWT, implican una comparación del desempeño del rotor con y sin envolvente. Estos experimentos son fundamentales, ya que abordan directamente el principal objetivo del trabajo. Por otro lado, los ensayos del modelo de eje vertical (DVAWT) siguen una metodología menos directa, de mayor complejidad.

Es importante destacar algunos detalles simbolizados en la tabla:

- *: Los ensayos de medición se subdividen en cualitativos y cuantitativos. Esto es omitido en la tabla.
- **: Las simulaciones con malla gruesa incluyen análisis específicos del perfil de velocidades en la sección de salida de la envolvente, permitiendo el cálculo discreto de la potencia. Sin embargo, cabe destacar que son menos precisas en comparación con otras simulaciones.
- ***: En las simulaciones con malla anidada, a pesar de su mayor precisión, el estudio de las velocidades se limita a la línea central del dominio. Esto pro-

porciona información valiosa sobre la ubicación del rotor, pero solo ofrece una aproximación de la potencia disponible en la sección (utilizando la velocidad en un punto).

ENVOLVENTES										A e r o m i n e		
Concentrador			Falange/Obstrucción									
Recto		Perfil	Recto				Perfil					
Cono-Recto (original de MF2)	D_rot reducido	Cono- Perfil	Fal.-Recto	F. Alargado	D_rot reducido	F. Áng. Agudo (Difusor)	F. Áng. Obtuso	F. Perfil				
X			X							DHAWT	T Ú N E L C A F F A	
									X	Mallas		D
									X	Visualización		V
									X	Medición (*)		W T
X	X		X	X	X					M. Gruesa (**)		
X		X	X			X	X	X		M. Anidada (***)		

4. Análisis

A continuación, se presentará un análisis detallado de los ensayos realizados a cada tipo de envolvente. Para facilitar la comparación entre las distintas variantes, tanto en ensayos como en simulaciones, se destacan las métricas y parámetros utilizados.

En el ámbito de los ensayos en túnel de viento, se dividen dos categorías: ensayos DHAWT (eje horizontal) y DVAWT (eje vertical). En el caso de los primeros, se realiza una comparación directa del rendimiento del rotor con y sin la envolvente. La métrica clave para evaluar estos desempeños es la curva adimensionada $C_p - \lambda$ (coeficiente de potencia - velocidad específica). Si no se modifica el denominador del coeficiente de potencia con la adición de la envolvente ⁴, un aumento en C_p se traduce directamente en un incremento de la potencia extraída, siendo este el objetivo principal. Finalmente, la efectividad de una envolvente se determina por el porcentaje de aumento del coeficiente de potencia para un mismo valor de λ .

Por otro lado, los ensayos DVAWT presentaron una metodología más compleja debido a la falta de un rotor con las dimensiones necesarias. Sin embargo, se logró estimar el coeficiente de potencia y se utilizó también como métrica de desempeño del dispositivo.

En paralelo, en las simulaciones numéricas, se empleó la potencia como medida comparativa para evaluar el rendimiento de las envolventes. El cálculo de la potencia varía según si la simulación se realiza con malla gruesa o anidada. En el caso de la malla gruesa, se analiza específicamente el perfil de velocidades en la sección de salida de la geometría, realizando un cálculo discreto de la potencia, cuyo procedimiento detallado se describe en la sección A.4.1. En cambio, en el caso de la malla anidada, se restringe el estudio de velocidades a la línea media del dominio, aproximando la potencia en la sección del rotor con una velocidad uniforme correspondiente al punto medio de la sección.

Con esta introducción detallada de las métricas y enfoques utilizados, se proporciona una base sólida para adentrarse en el análisis pormenorizado de los ensayos y simulaciones que se presentarán a continuación.

4.1. Concentrador de flujo

Las envolventes de este tipo, como se mencionó en la Subsección 2.1, se diseñan con la finalidad de dirigir el flujo de aire hacia el rotor de manera eficiente. Para alcanzar este objetivo, se proponen dos configuraciones distintas: un Cono-Recto y un Cono-Perfil, ambas detalladas en la Subsección 2.1. La primera cuenta con estudios experimentales previos. Se realizan simulaciones numéricas para ambas envolventes, seguidas de un análisis y conclusiones sobre el diseño.

4.1.1. Concentrador Cono-Recto

La envolvente Cono-Recto estudiada en el presente proyecto, se basa en un proyecto anterior, desarrollado en el marco de la asignatura "Máquinas para Fluidos 2" (MF2), por los integrantes explicitados en [1].

⁴Este criterio es aplicado en el ensayo de la envolvente tipo Falange-Recto, si bien lo correcto es usar el área de bloqueo para el cálculo del C_p .

Ya que se diseña la envolvente para un entorno urbano, se define un diámetro máximo de 1m y una relación de diámetros de 0,8, con un ángulo del cono de 15° . Estos criterios fueron utilizados para minimizar las pérdidas de carga según el manual de hidráulica utilizado al momento del diseño [9]. Con estos criterios y restricciones se tiene un diámetro menor del cono y del rotor de 0,8m, determinando así las dimensiones del cono como se puede ver en la Figura 4.1.1.

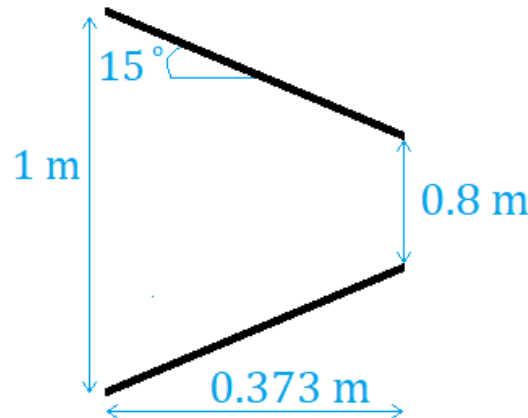


Figura 4.1.1: Dimensiones del concentrador cónico. Extraída de [1].

Luego del cono, se coloca un cilindro de diámetro igual al diámetro menor del mismo, en donde se posiciona el rotor. Este debe de tener una longitud suficiente para poder colocar el rotor, lo que se esquematiza en la Figura 4.1.2.

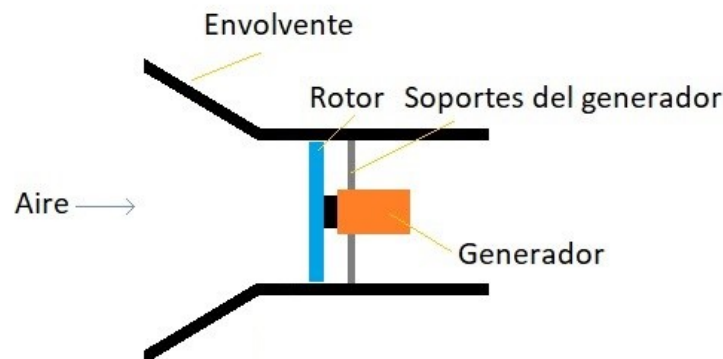


Figura 4.1.2: Esquema del concentrador cónico. Extraída de [1].

4.1.2. Ensayos Cono-Recto

Todos los resultados aquí mostrados fueron obtenidos previamente, en el marco proyecto [1]. En este contexto, se diseñó el modelo 'base' de la geometría del rotor. Ésta incluye un diámetro exterior de 0,8m, un diámetro del cubo de 0,14m y 3 palas conformadas por un perfil NACA 4412. Para este diseño se tomó el criterio de $\tan(\lambda)$ mínimo, y que la componente de giro de la velocidad corresponde a una configuración de vórtice libre.

Los ensayos experimentales realizados utilizaron este diseño de rotor con un factor de escala de 0,5, debido a las limitaciones dimensionales del túnel de viento. De esta forma, se obtiene un diámetro exterior de 400mm y uno interior de 70mm. Las dimensiones del rotor ensayado se especifican en la Tabla 4.1.1.

Tabla 4.1.1: Resultados del diseño del rotor - Proyecto MF2. Extraído de [1].

Radio(mm)	56,25	83,9	104,5	121,65	136,65	150,15	162,55	174,1	184,9	195,1
$l(mm)$	44,3	35,05	30	26,75	24,4	22,65	21,2	20,05	19,1	18,3
$\beta(^{\circ})$	22,6	15	11,1	8,6	6,9	5,6	4,5	3,7	3	2,4

Se realizaron diversos ensayos que constaron de distintas configuraciones. Primero se realizó un ensayo con el rotor a vena abierta (sin envolvente), para poder así evaluar el desarrollo teórico del rotor y el desempeño al agregar la envolvente. El siguiente ensayo realizado fue con la envolvente Cono-Recto, posteriormente se le agregó un difusor para realizar otro ensayo, se pueden apreciar estas configuraciones en las Figuras 4.1.3a y 4.1.3b. Por motivos de simplicidad en el diseño y la construcción, el difusor utilizado contó con las mismas dimensiones que el concentrador.



(a) Ensayo de Cono-Recto.



(b) Ensayo de Cono-Recto con difusor.

Figura 4.1.3: Ensayos realizados en el proyecto previo. Imágenes extraídas de [1].

Debido al factor de escala aplicado, la envolvente ensayada de tipo Cono-Recto, de ángulo 15° , fue de diámetro mayor 500mm y menor de aproximadamente 400mm, previendo una luz entre la misma y el rotor.

Se realizó un ensayo para medir las pérdidas mecánicas del banco de ensayo, de manera de no afectar los resultados del desempeño del aerogenerador por éstas. En el mismo se miden el torque y la velocidad de giro, con el torquímetro y tacómetro respectivamente, para poder así calcular la potencia, a partir de suministrarle una potencia fija conocida con un taladro.

En cuanto a la influencia de la envolvente, en la Figura 4.1.4 (extraída de [1]) se muestra un gráfico de las curvas experimentales para las tres configuraciones distintas: rotor a vena abierta, con envolvente (sin difusor), y con envolvente y difusor. También se indica una curva analítica, que de momento no es de interés.

Cabe destacar que para el cálculo del C_P se utiliza el área mayor del Cono-Recto (50cm) y para el cálculo del λ se utiliza el radio del rotor (40cm).

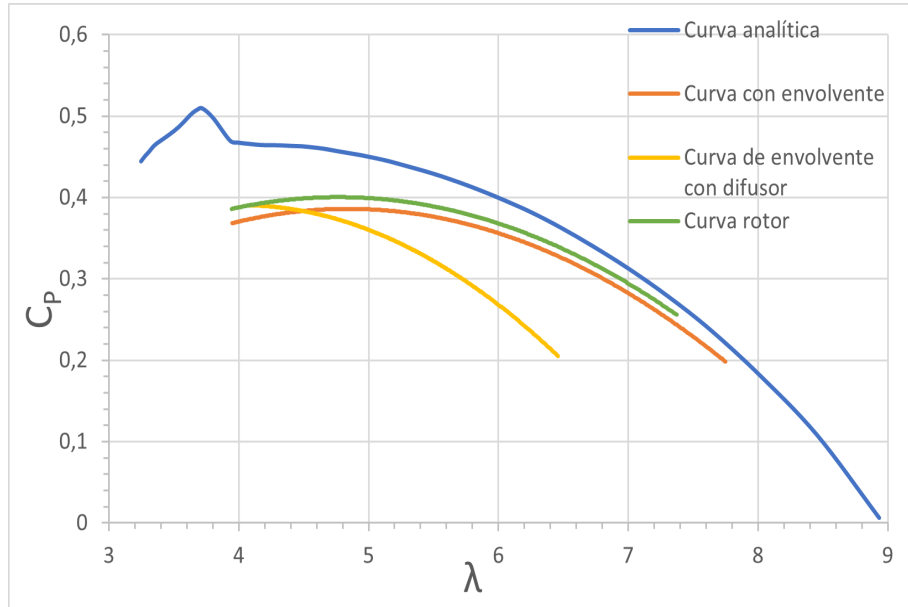


Figura 4.1.4: Curvas obtenidas para las distintas configuraciones junto a la curva analítica. Extraída de [1]

Del ensayo anterior, se determinó que la configuración "rotor+envolvente" exhibe un peor desempeño que la "rotor vena abierta". Se concluye que el agregado de componentes al aerogenerador aumenta el empuje generado por el dispositivo, lo cual se evidencia en la curva $C_P - \lambda$ al disminuir el valor del C_P y "moverse" hacia λ menores. [1]

En la sección A.1 del Anexo se tiene la Tabla A.1.1 con medidas experimentales tomadas en el ensayo final en el túnel de viento, con la deducción del número de Reynolds correspondiente a cada medida. En la sección A.2.6 se desarrolla el procedimiento aplicado para obtener dicho valor de Reynolds. Además se ilustran, en A.2.7 y A.2.8, las curvas teóricas y experimentales correspondientes al rotor funcionando a vena abierta (es decir, sin la envolvente).

En dichas figuras se tienen dos curvas adicionales, correspondientes a un segundo modelado teórico del desempeño del rotor, conocida su geometría. El detalle del desarrollo, así como la influencia del número de Reynolds y lineamientos sobre la corrección utilizada, puede verse en la sección A.2.

4.1.3. Simulación numérica

En el ámbito de las simulaciones numéricas, se emprendieron esfuerzos para replicar las condiciones del ensayo experimental realizado en el túnel de viento. A medida que se desarrollaba la herramienta, se exploraron diversas variantes con el objetivo de modelar lo mismo.

Entre estas variantes se incluyen:

- Primer modelo con malla gruesa y 5,000 pasos temporales de 0,2 segundos: A pesar de enfrentar desafíos con la ubicación del patch, este modelo proporcionó valiosa información para estudios de turbulencia en puntos específicos. Se concluyó que la cantidad de pasos temporales podía reducirse. Además, se realizaron análisis preliminares sobre la necesidad de mejorar la resolución de la malla.
- Modelado con malla gruesa, 3,000 pasos temporales de 0,2 segundos y patch corregido: En este caso, se registró la evolución del campo de velocidades en dos secciones verticales de interés, correspondientes a la entrada y salida de la envolvente. Se realizaron análisis en las secciones sobre potencia, energía cinética disponible, pérdidas en el trayecto, y diámetro equivalente.
- Variante geométrica con diámetro interior menor, malla gruesa: Se mantuvo el diámetro exterior y el ángulo de la sección cónica, pero se utilizó un diámetro interior menor. Este ajuste se justifica más adelante (ver A.6) y busca comparar concisamente esta geometría con la denominada Falange-Recto, que debido a restricciones del túnel de viento, requirió un nuevo escalado del rotor al 75 %. El objetivo es comparar casos con el mismo diámetro de rotor.
- Geometría original con malla anidada: Se resolvieron 2000 iteraciones de 0,1 segundos, totalizando 200 segundos de simulación. Se analizó la sensibilidad de la malla y se confirmó la importancia de aumentar la resolución, antes solo sospechada. En estos casos de malla anidada, se grafican diversas magnitudes a lo largo de la línea media del túnel de viento, como velocidad, energía cinética y potencia, en algunos casos normalizados para una comparación más clara. Al no representar el rotor, los gráficos indican claramente dónde debería ubicarse éste.
- Cono-perfil: Se analizó brevemente esta variante aprovechando la malla anidada, que permite refinar la geometría sin perder detalles en la resolución de la malla. Aunque solo se tienen resultados teóricos sin respaldo experimental, estos podrían ser indicativos de un mejor funcionamiento.

A continuación, se detallan algunos resultados.

4.1.3.1 Malla Gruesa y Envolvente Cono-Recto - 1er simulación

En la primera simulación realizada exitosamente se utilizó solamente la malla gruesa y el modelo de envolvente tipo *Cono – Recto* descrito en 2.1.1, de espesor aumentado (5 cm). Se resolvieron 5,000 pasos temporales de 0,20 segundos (1,000 segundos de simulación en total). Con la misma se pueden sacar resultados preliminares a tener en cuenta en próximos casos -mas refinados.

Primeramente, con los archivos de salida del *caffa* se puede graficar la geometría del concentrador, mediante una variable que asigna valores positivos a celdas por fuera de la misma, y negativos a celdas que caen por dentro.

La Figura A.3.1 del anexo (A.3) ilustra un corte horizontal medio de dicha variable, en la que se puede observar que un error de posicionamiento dejó la geometría

ligeramente descentrada en el eje y -vertical del gráfico. Sin embargo, se pueden realizar observaciones generales sobre el flujo alrededor de la misma.

La Figura 4.1.5 muestra, en un corte horizontal medio ($z = 1m$), la componente según la dirección del flujo (x) del campo de velocidades instantáneo, en el último paso temporal (número 5000, equivalente al segundo 1000).

Esta información fue guardada cada 500 pasos temporales, pero solamente cobra sentido analizarla en los finales, donde se supone las ecuaciones que gobiernan el flujo han convergido.

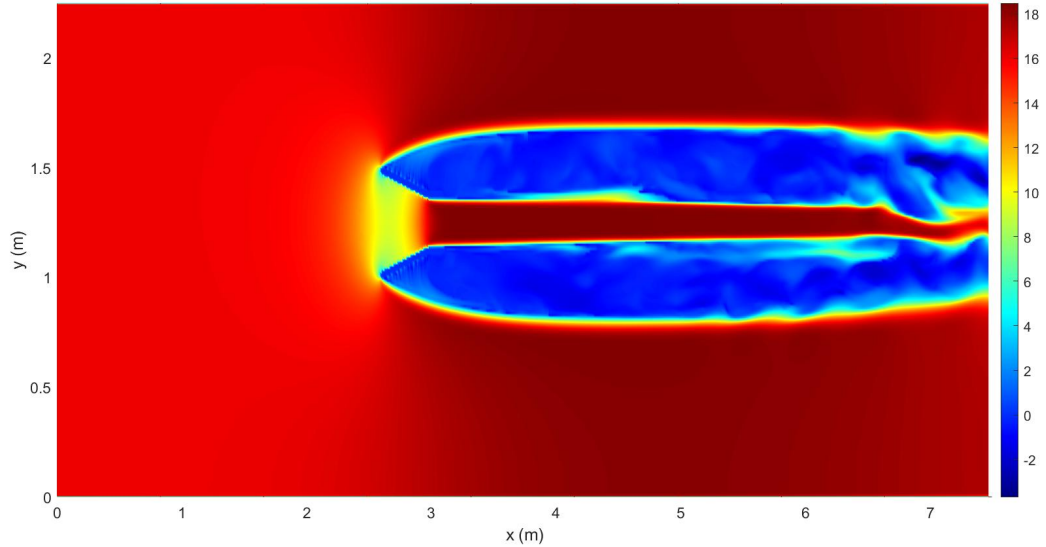


Figura 4.1.5: Componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$), en el segundo 1000 de simulación.

En la misma se tiene la llegada de un flujo uniforme de velocidad $16m/s$. Previo al concentrador, se observan anillos de colores más claros, que ilustran el efecto de "bloqueo" de la geometría. De realizar un corte vertical a una distancia $x = 2m$ por ejemplo, por conservación de masa, se tendrían velocidades mayores a $16m/s$ por fuera de dichos anillos (ver Figura A.3.2a).

Si bien estos anillos indican una reducción de velocidad por el bloqueo de la geometría, de seguir avanzando sobre el eje horizontal, la misma cuenta con una reducción gradual de sección. Esto provoca que la velocidad aumente, y se tiene un efecto conjunto de aumento de velocidad dentro del concentrador, que se representa en la figura con un color rojo más intenso a partir de $x = 3m$ aproximadamente. En un corte vertical a $x = 3,5m$ por ejemplo, se observa una zona central rojo intensa, envuelta por un anillo azulado por las estelas alrededor del concentrador, y finalmente una transición a un rojo intenso nuevamente (ver Figura A.3.2d).

Este primer resultado aparentaría sugerir que, de colocar un rotor en la zona de mayor velocidad dentro del concentrador, éste dispondría de mayor energía cinética para generar, en comparación con el caso clásico a vena abierta. Sin embargo, en la práctica se pudo apreciar que este no es el caso [1]. La hipótesis que se maneja es que el agregado del rotor en movimiento añade un bloqueo adicional, que la reducción de sección puede no ser suficiente para compensar. Por ende, se entiende que este resultado preliminar alentador no es extrapolable a la situación experimental. Esto

evidencia la importancia del efecto del rotor.

Otra observación relevante está vinculada a la influencia de la resolución de la malla en los campos observados. En la Figura 4.1.6 se presenta una imagen ampliada de la geometría representada sobre la grilla (A.3.1). Se observa que aproximadamente 4 celdas caen "dentro" de la misma, aunque el tramo convergente presenta límites menos definidos que el recto. De manera análoga, se aprecia el efecto de emplear mallas cartesianas del orden de la geometría en la Figura 4.1.7. Esta figura proporciona un acercamiento de la Figura 4.1.5, incluyendo la grilla.

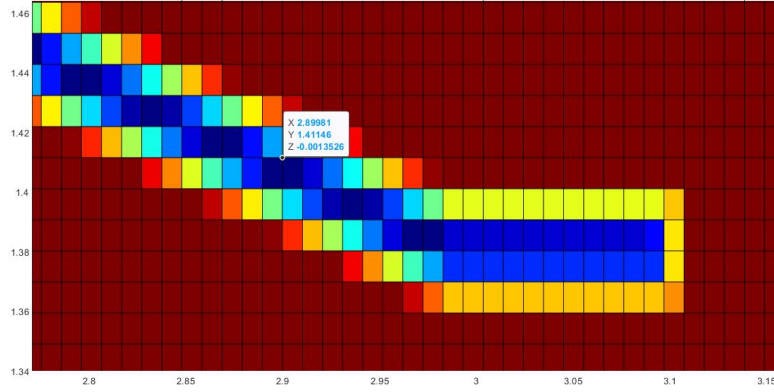
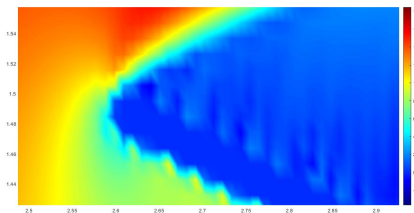


Figura 4.1.6: Zoom al bloque 8 de la malla gruesa, en corte horizontal del dominio simulado.

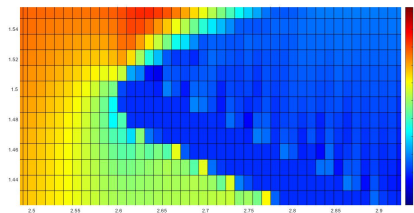
Es importante destacar que, dado que el concentrador se representa con un espesor aumentado de $2,5\text{cm}$, en una malla de 1cm de resolución, es imperativo refinar inicialmente esta última para explorar espesores menores. Si, en dicho caso, se obtienen resultados equivalentes, se podrá proceder con confianza utilizando espesores aumentados.

Finalmente, se tomó el registro temporal de la velocidad (componente horizontal) en tres puntos particulares para analizar su estabilidad. En la Figura 4.1.8 se indica, en primer lugar, la posición de dichos puntos en el plano horizontal mencionado (4.1.8a), seguido de los gráficos de velocidad en función del tiempo de cada uno (4.1.8b 4.1.8c 4.1.8d).

En la tabla Tabla 4.1.2, se proporciona información sobre su velocidad promedio, desviación estándar e intensidad de turbulencia (cociente entre la desviación estándar y la velocidad media).

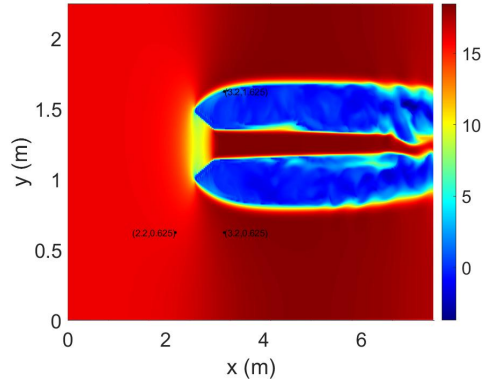


(a) Zoom sin malla superpuesta.

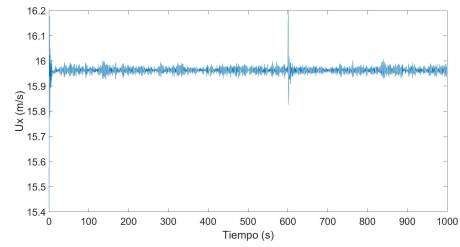


(b) Zoom con malla superpuesta.

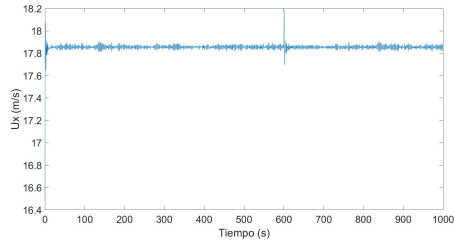
Figura 4.1.7: Zoom a parte convergente del concentrador.



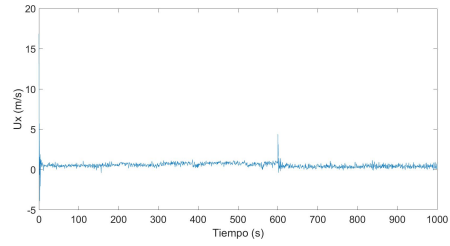
(a) Ubicación en el plano horizontal mencionado de los tres puntos seleccionados.



(b) Evolución temporal de la componente horizontal de la velocidad, en el primer punto ($x = 2,2m$, $y = 0,625m$).



(c) Evolución temporal de la componente horizontal de la velocidad, en el segundo punto ($x = 3,2m$, $y = 0,625m$)



(d) Evolución temporal de la componente horizontal de la velocidad, en el tercer punto ($x = 3,2m$, $y = 1,625m$)

Figura 4.1.8

Tabla 4.1.2: Información sobre puntos seleccionados.

Punto	Vel media (m/s)	Desv Est (m/s)	IT (%)
$(x = 2,2m, y = 0,625m)$	15.9626	0.0187	0.1174
$(x = 3,2m, y = 0,625m)$	17.8550	0.0279	0.1561
$(x = 3,2m, y = 1,625m)$	0.5601	0.3889	69.4331

Dada la baja variabilidad de la velocidad en cada punto, se opta por disminuir la cantidad de pasos temporales en próximas simulaciones.

4.1.3.2 Malla Gruesa y Envolverte Cono-Recto - corrección

En esta segunda versión del mismo caso, se implementó la corrección de la ubicación del patch y solamente 3,000 pasos temporales - 600 segundos de simulación. En la Figura 4.1.9 se tiene el corte horizontal medio instantáneo del campo de velocidades, en el último paso temporal 3,000 (análogo a 4.1.5). Se mantienen los comentarios cualitativos anteriores. La geometría corregida puede verse en la Figura A.4.1.

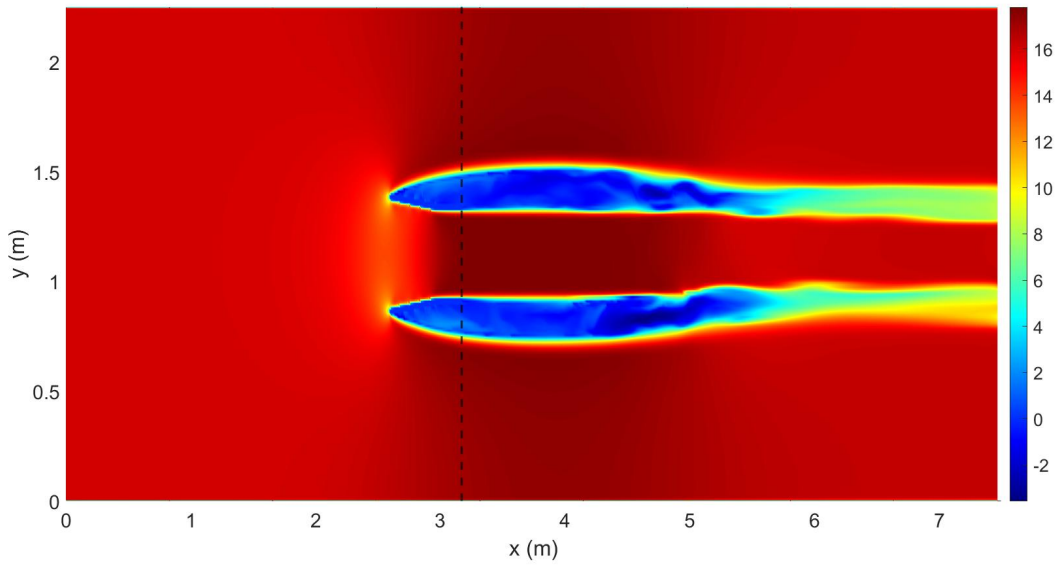


Figura 4.1.9: Componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$), en el segundo 600 de simulación.

En este caso, se registró la evolución temporal del campo de velocidades en dos secciones verticales de particular interés, correspondientes a la entrada y salida de la envolvente. Esto permite estimar en las secciones magnitudes tales como potencia o energía cinética disponible. La envolvente Cono-Recto captura el flujo incidente en una primer sección "mayor", e intenta transmitirlo a una sección "menor", donde se encuentra el rotor. Por ende, tiene sentido comparar la potencia disponible en la sección "menor" con la meteorológica o disponible en la sección "mayor". En Subsección A.4 se sientan las bases de cómo se realizó la suma discreta de potencia cinética con la información disponible.

La Figura A.4.2 del anexo ilustra el campo de velocidades medio de la sección correspondiente a la salida de la envolvente, punteada en la Figura 4.1.9. Aquí, la potencia cinética estimada resulta ser de $369,73W$. Comparado con una potencia meteorológica de $478,00W$, correspondiente a viento libre de $16m/s$ en la sección "mayor" de $0,1945m^2$, representa una pérdida de $108,27W$, $22,65\%$, en el trayecto de la envolvente.

Otra manera de interpretar esta potencia cinética es calculando su área equivalente en el contexto de un viento incidente uniforme a una velocidad de $16m/s$, siguiendo el

principio de conservación de masa. En este caso, la potencia disponible en la sección de diámetro $0,4050m$, es equivalente a la disponible en una sección de diámetro ligeramente mayor, de $0,4377m$, manteniendo una velocidad uniforme.

En la siguiente Tabla 4.1.3 se resumen los parámetros mencionados, junto a otros tales como velocidad máxima alcanzada en A.4.2 (V_{max} de las velocidades medias) y rendimiento de la envolvente ⁵. Naturalmente, este último se calcula con el área ocupada por la geometría, correspondiente a la sección mayor del dispositivo.

$V_{max}(\frac{m}{s})$	17,7525
$En.C(\frac{J}{m})$	21,3917
$Pot(W)$	369,7312
$Pot_{meteo}(W)$	478,0032
$Perd(\%)$	22,65
$Rend.$	0,7662
$D_{orig}(cm)$	40,50
$D_{eq}(cm)$	43,77

Tabla 4.1.3: Parámetros que caracterizan el desempeño de la envolvente Cono-Recto en la simulación Malla-Gruesa. $En.C$ y Pot están referidas al área menor, se salida, mientras que Pot_{meteo} y $Rend.$ son referidos a la sección mayor de entrada.

4.1.3.3 Malla Gruesa y Envolvente Cono-Recto - D_{rotor} reducido

Una variante geométrica realizada consiste de un tronco-cono con el mismo diámetro mayor ($D_{entrada}$) y ángulo de inclinación que el caso original, pero con un diámetro menor reducido a 31 centímetros (D_{salida}). Esta elección específica se fundamenta en dos consideraciones clave:

- Por un lado, al conservar el diámetro a la entrada, se emplea el diámetro mayor máximo que permite el área de bloqueo del túnel de viento. Esta elección facilita la comparación con el caso original de Cono-Recto, ya que ambos comparten el mismo diámetro a la entrada (misma potencia meteorológica disponible).
- En cuanto al diámetro a la salida, se seleccionó para que coincida con el caso de Falange-Recto, el cual se abordará más adelante en la Subsubsección 4.2.1. Este último caso requirió un nuevo escalado del rotor al 75 %. Se permite así la comparación equitativa de casos con diámetros de rotor iguales.

La Figura A.5.1 del anexo, análoga a A.4.2, presenta el campo medio de velocidades en la sección de salida con un diámetro menor. A primera vista, se aprecia que las velocidades medias son superiores, aunque se plantea la posibilidad de que no sean suficientes para compensar la reducción en la sección transversal.

Los parámetros que caracterizan el desempeño de esta variante de envolvente se encuentran detallados en la Tabla 4.1.4. Además, la Tabla 4.1.5 proporciona una comparación más directa con el caso original de Cono-Recto. El análisis comparativo con la envolvente Falange-Recto se desarrolla más adelante en la sección A.6.

⁵Cociente entre potencia disponible y meteorológica.

$V_{max}(\frac{m}{s})$	18,1836
$En.C(\frac{J}{m})$	12,5181
$Pot(W)$	221,0126
$Pot_{meteo}(W)$	482,5486
$Perd(\%)$	54,20
$Rend.$	0,4580
$D_{orig}(cm)$	31,00
$D_{eq}(cm)$	33,84

Tabla 4.1.4: Parámetros que caracterizan el desempeño del caso Cono-Recto con D_{salida} reducido. $En.C$ y Pot están referidas al área menor, se salida, mientras que Pot_{meteo} y $Rend.$ son referidos a la sección mayor de entrada.

	Cono _ Recto (40,5cm)	Cono _ Recto (31cm)	Dif.
$A_{salida}(m^2)$	0,1305	0,0749	baja 42,6 %
$Pot_{salida}(W)$	369,7312	221,0126	baja 40,2 %
$Pot/A(\frac{W}{cm^2})$	0,2833	0,2951	sube 4 %
$Pérd.(\%)$	22,65	54,2	sube
$V_{max}(\frac{m}{s})$	17,75	18,18	sube 2,4 %
$\frac{D_{eq}}{D_{orig}}$	1,08	1,09	-
$Rend.$	0,7662	0,4580	baja 40 %

Tabla 4.1.5: Comparación casos Cono-Recto, evaluando la reducción del diámetro de salida (rotor).

En resumen, la tabla mencionada anteriormente (4.1.5) sugiere que el modelo con menor diámetro de salida no resulta beneficioso. Se observa una disminución en la potencia extraíble, lo cual coincide con una potencia por unidad de área aproximadamente constante, resultando en un menor rendimiento de la envolvente. Además, la máxima velocidad (campo medio) en la sección no experimenta un aumento significativo. Es importante destacar que ambos modelos comparten una potencia meteorológica idéntica, ya que ésta depende del diámetro mayor y la velocidad uniforme del viento incidente, pero uno de ellos presenta pérdidas significativamente mayores a lo largo de la geometría.

4.1.3.4 Malla Anidada y Envolvente Cono-Recto

Una vez que se logró la implementación de la malla anidada, se procede primeramente a reproducir la simulación utilizando la geometría original. A pesar de que uno de los principales beneficios de aumentar la resolución en la región de la envolvente es la capacidad de trabajar con geometrías de menor espesor, más cercanas a la realidad, resulta fundamental examinar la sensibilidad de la malla. Esto implica evaluar la magnitud de las diferencias en las salidas cuando se mantiene constante la geometría, las condiciones de viento en la entrada, y demás factores.

Se resolvieron 2000 iteraciones con paso temporal 0,1 segundos, totalizando 200 segundos de simulación.

En primer lugar, la Figura 4.1.10 presenta una imagen ampliada de la geometría

representada sobre la grilla de la malla fina, en la zona de unión del cono y la sección recta, análoga a 4.1.6. Se observa que para cada valor del eje horizontal x , 10 celdas caen completamente dentro de la geometría ilustrada.

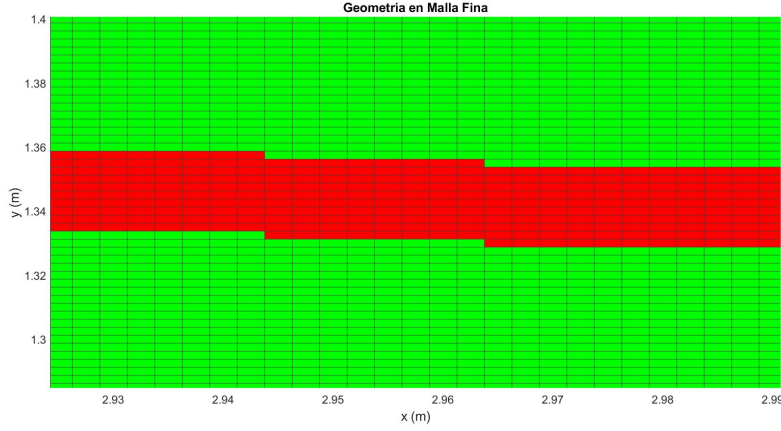


Figura 4.1.10: Zoom a la geometría de la malla fina, en corte horizontal del dominio simulado.

La Figura 4.1.11a presenta un corte horizontal medio del campo de velocidades instantáneo en la iteración número 1000 (segundo 100). Además, en el mismo plano, se representa el campo medio de velocidades durante las últimas 1000 iteraciones, como se observa en la Figura 4.1.11b. Las figuras incluyen un recuadro azul que delimita el borde de la malla fina, que posee una resolución más elevada. Además, se ha aplicado la superposición de la geometría de la envolvente para mejorar la claridad visual.

La comparación entre las figuras 4.1.11, 4.1.9 y 4.1.5 revela claras diferencias en la formación y desarrollo de las estelas. En la simulación inicial (4.1.5), se distingue una zona convergente en la que se originan estelas más gruesas, las cuales persisten hasta el límite del dominio simulado. Sin embargo, al refinar la malla, estas estelas no se forman de manera tan pronunciada y se atenúan rápidamente.

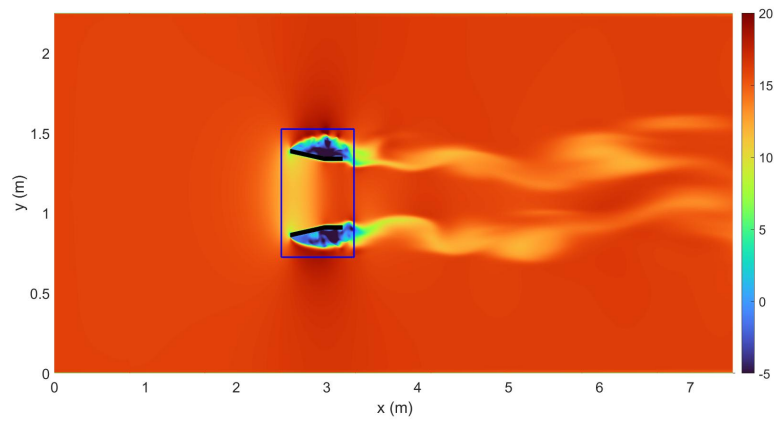
Surge la pregunta válida sobre si la frontera entre las mallas anidadas podría influir en esta rápida atenuación de las estelas.

A partir de esta observación sobre las estelas, se deduce directamente, mediante la conservación de masa en cualquier sección transversal, que las velocidades obtenidas de esta simulación serán inferiores a las esperadas.

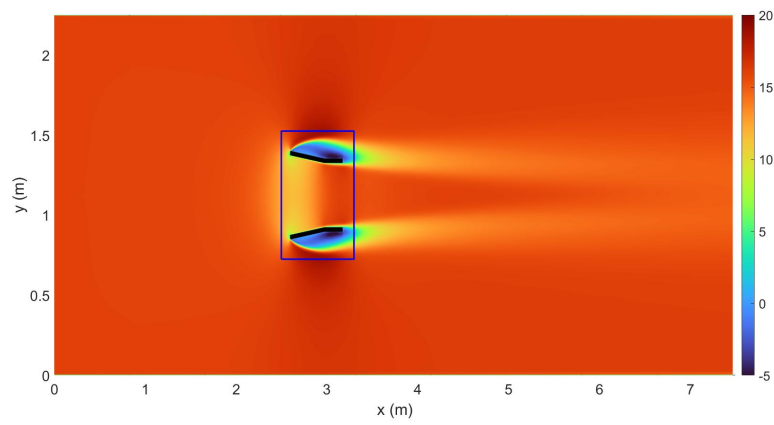
A continuación, en la Figura 4.1.12a y Figura 4.1.12b, se presentan gráficos que representan dos magnitudes a lo largo de la línea central del dominio de malla fina ($y = 1,1125m$, $z = 1m$). Estas magnitudes son la velocidad media, calculada en las últimas 1000 iteraciones y normalizada por la velocidad incidente a la entrada ($16m/s$), y la potencia disponible, calculada con dicha velocidad media y un área fija correspondiente a la del rotor ($40,5cm$), respectivamente.

En el caso refinado, se observa que la velocidad media máxima apenas supera la velocidad del viento incidente. El punto de máxima velocidad, señalado en la Figura 4.1.12a, corresponde a 1,0056, equivalente a $16,09m/s$, y se localiza en el centro de la sección a $x = 3,17125m$. En caso de que esta velocidad fuese uniforme, según se muestra en la Figura 4.1.12b, representaría una potencia cercana a los $322W$ ⁶.

⁶Rendimiento aproximado de la envolvente de 0.6674.

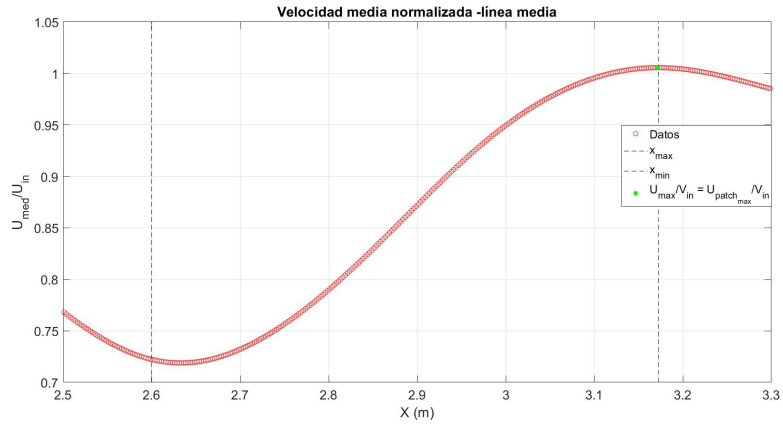


(a) Velocidad instantánea, iteración 1000.

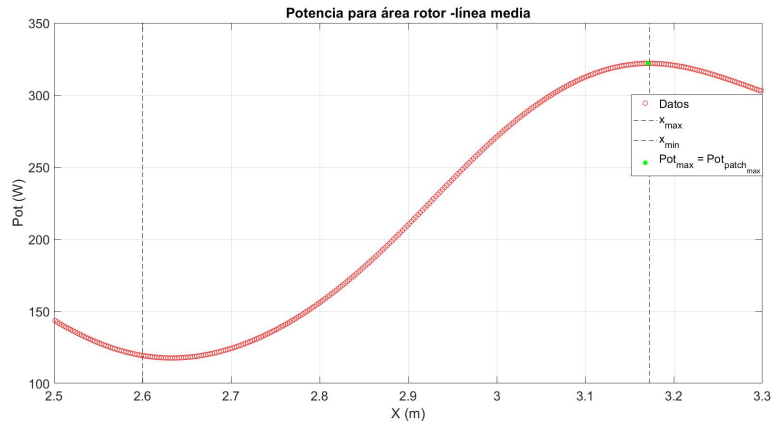


(b) Velocidad media, iteraciones 1000 – 2000.

Figura 4.1.11: Componente según la dirección del flujo (x) del campo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$).



(a) Velocidad media, normalizada por la de entrada ($16m/s$).



(b) Potencia calculada, a partir de la velocidad media, para un área fija -área del rotor: $40,5 \text{ cm}$.

Figura 4.1.12: Magnitudes graficadas a lo largo de la línea central del dominio de la malla refinada ($y = 1,1125m$, $z = 1m$).

Estos valores resultan inferiores a las estimaciones previas de $17,75m/s$ y $370W$, destacando la importancia de considerar la resolución de la malla en la obtención de resultados más precisos.

En resumen, el análisis de la sensibilidad de la malla confirma la considerable influencia de aumentar su resolución. Este hallazgo destaca la importancia de implementar resoluciones finas en futuras simulaciones para lograr resultados más precisos y representativos del comportamiento del flujo alrededor de la envolvente.

Además, al excluir la representación del rotor en los gráficos (4.1.12), se presenta una clara indicación de su ubicación potencial en el dominio simulado. Afortunadamente, los máximos indicados se sitúan dentro de los límites de la geometría de la envolvente, muy cerca de la sección proyectada para el rotor. Estos resultados proporcionan valiosa información para el diseño y la interpretación de futuras simulaciones.

4.1.3.5 Malla Anidada y Envolvente Cono-Perfil

Una vez que se han establecido los fundamentos de la estructura del concentrador cónico, detallados en 4.1.1, resulta lógico realizar ajustes específicos con el objetivo de facilitar una transición suave desde el flujo de viento libre hacia el rotor. Este ajuste busca evitar encuentros abruptos que puedan provocar fenómenos no deseados, como el desprendimiento de la capa límite, que podrían perjudicar significativamente el rendimiento del dispositivo.

En consecuencia, se plantea una estructura muy similar, conservando los diámetros mayor (entrada) y menor (del rotor), pero incorporando perfiles aerodinámicos del tipo NACA8406. La Figura 4.1.13 presenta esquemas de la geometría realizados en inventor, donde se pueden apreciar sus características.

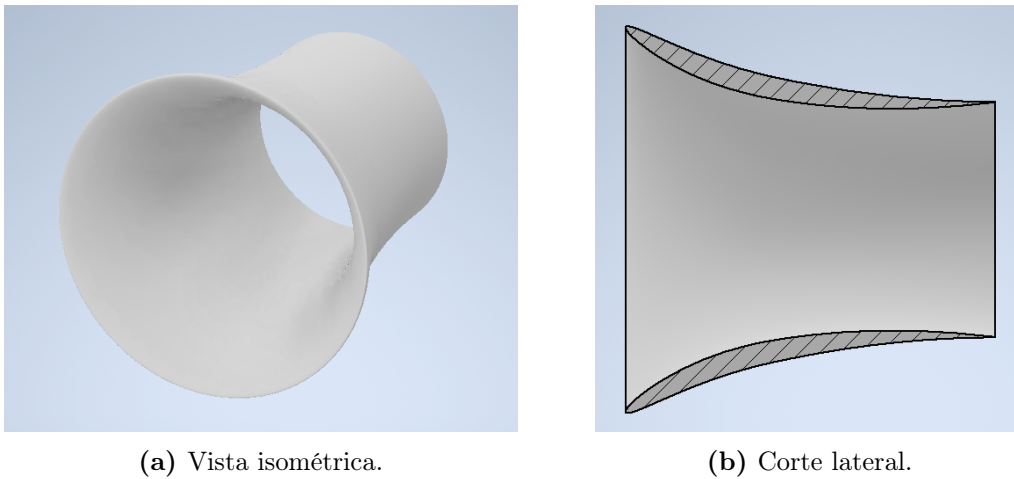


Figura 4.1.13: Envolvente Cono-Perfil.

Cabe destacar que en este caso, se trata simplemente de una propuesta de diseño. No se llevará a cabo un ensayo experimental, aunque se realizará una simulación numérica.

A su vez, es fundamental destacar que este caso pudo ser considerado únicamente después de la implementación de la malla fina. En etapas anteriores, cuando solo

se contaba con la malla gruesa, fue necesario trabajar con espesores aumentados de $2,5\text{cm}$, con los cuales no se obtuvieron resultados de todo satisfactorios.

La malla fina, con una resolución de $0,25\text{ cm}$, logra capturar los cambios suaves y sutiles en la geometría. Aunque, en este caso, solo se disponga de resultados teóricos, estos podrían ser indicativos de un mejor funcionamiento. Luego, de concluirse que esta familia de envolventes es la más adecuada a los objetivos del proyecto, podría ser necesario realizar un estudio más detallado de la misma.

En esta simulación específica, se llevaron a cabo 3000 pasos temporales, cada uno de $0,2$ segundos, totalizando 600 segundos. La geometría correspondiente se presenta de manera visual en la Figura 4.1.14, sobre la grilla de la malla de mayor resolución.

Adicionalmente, en la Figura 4.1.15, se muestran los campos instantáneos y medios de velocidad (componente según la dirección del flujo x) en el plano horizontal medio del dominio. Se remarca, en cada caso, la geometría de la envolvente, y se recuadra el límite entre las mallas. A primera vista, se puede apreciar una estela ligeramente más ancha en este modelo. Sin embargo, los resultados se vuelven más evidentes al graficar las magnitudes de interés en la línea media.

En particular, la Figura 4.1.16 efectivamente revela un pico de velocidad que supera en un 20% al viento incidente, alcanzando los $19,44\text{m/s}$, localizado en $x = 3\text{m}$. Afortunadamente, esta posición coincide con la ubicación prevista para el rotor (consultar 4.1.14). La potencia disponible estimada, considerando esta velocidad media máxima de forma uniforme en la sección del rotor, se sitúa alrededor de los 568W ⁷.

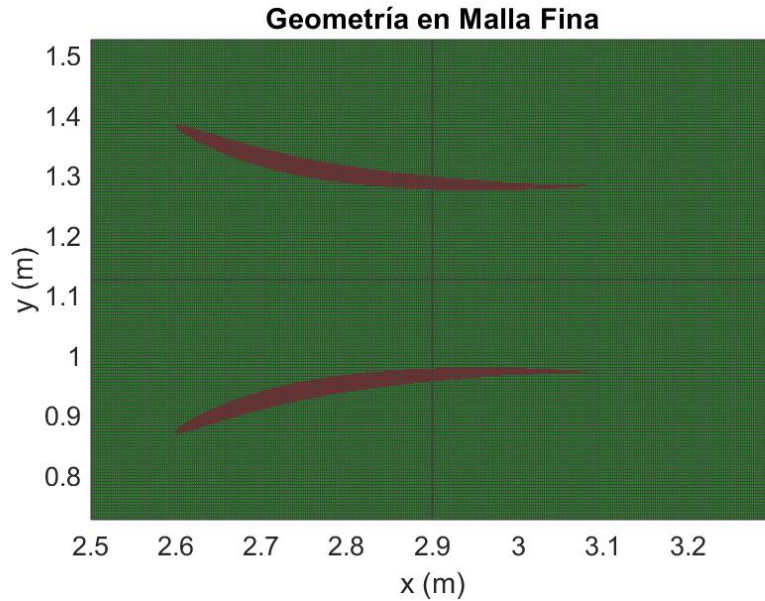
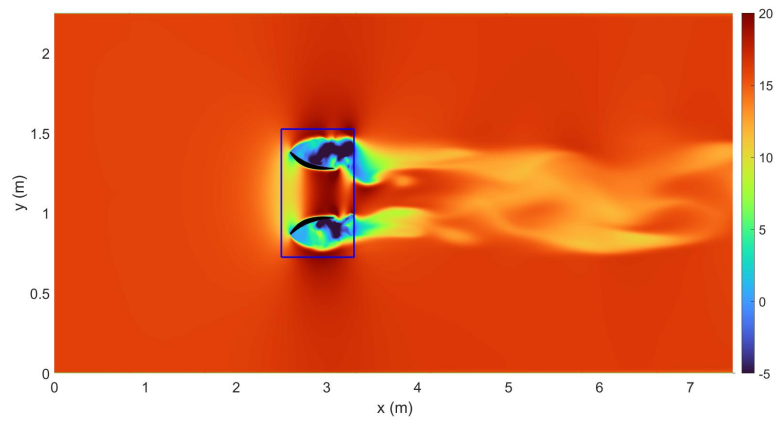


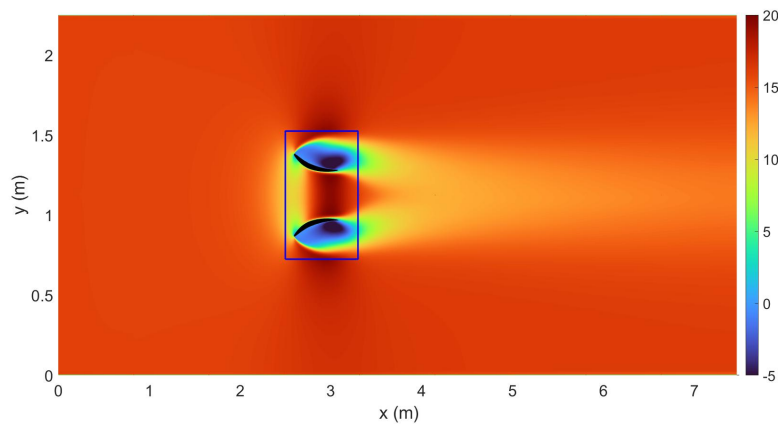
Figura 4.1.14: Geometría del patch (envolvente) superpuesta a la grilla de la malla fina.

Estos resultados representan una mejora considerable con respecto a las estimaciones obtenidas con la geometría original, lo cual es altamente alentador. Los hallazgos sugieren, de manera contundente, la consideración del uso de perfiles aerodinámicos en esta familia de envolventes.

⁷Rendimiento aproximado de la envolvente de 1.1772.

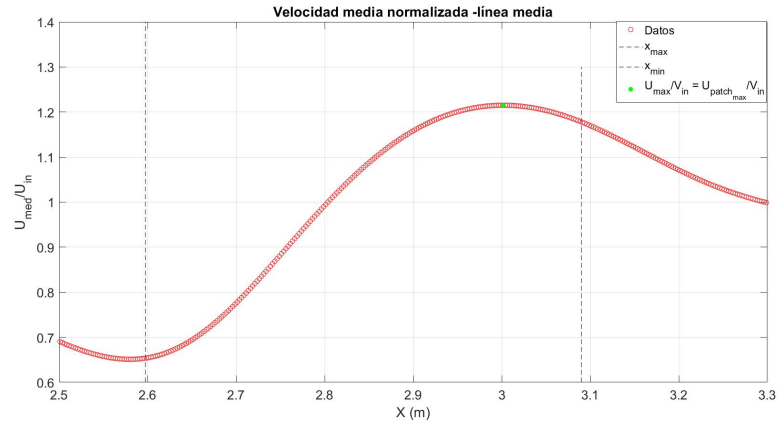


(a) Velocidad instantánea, iteración 2000.

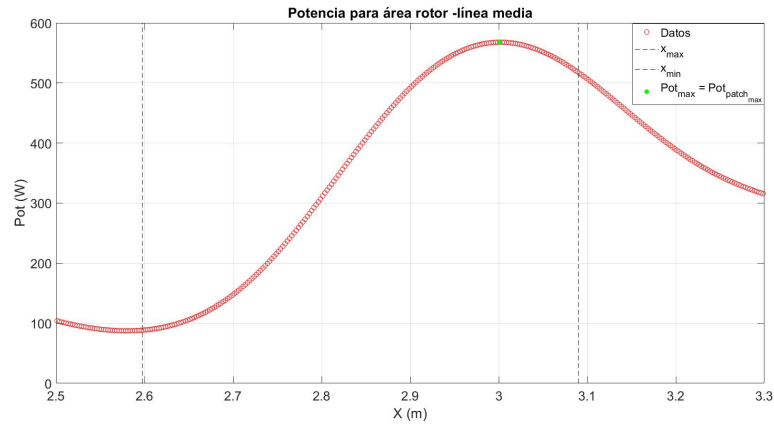


(b) Velocidad media, iteraciones 2000 – 3000.

Figura 4.1.15: Componente según la dirección del flujo (x) del campo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$).



(a) Velocidad media, normalizada por la de entrada ($16m/s$).



(b) Potencia calculada, a partir de la velocidad media, para un área fija -área del rotor: $40,5 \text{ cm}$.

Figura 4.1.16: Magnitudes graficadas a lo largo de la línea central del dominio de la malla refinada ($y = 1,1125m$, $z = 1m$).

4.1.4. Conclusiones

Dado lo expuesto en esta sección, se pueden extraer algunas conclusiones o aprendizajes sobre el concentrador de flujo.

En primer lugar, y de mayor relevancia, se observa que en el ensayo experimental la implementación de la envolvente tipo Cono-Recto fue perjudicial para el desempeño del aerogenerador en comparación con el caso a vena abierta. En su momento, se concluyó que el agregado de componentes al dispositivo, como lo es la envolvente, aumenta el empuje que este genera y disminuye su desempeño. Esto queda evidenciado en la Figura 4.1.4 al disminuir el valor del coeficiente de potencia.

Como complemento a dicho análisis, se realizaron varias simulaciones numéricas. Es importante destacar que, dada la complejidad de la tarea, no se simuló el rotor ni su movimiento. Carece de sentido, por ende, intentar comparar dichos resultados con los experimentales. Sin embargo, se puede extraer información valiosa sobre el desempeño relativo de distintos tipos de envolventes.

Como es de esperarse, el primer aprendizaje de esta área resulta ser la importancia del papel del rotor en la dinámica del flujo alrededor de la envolvente. En concordancia con lo mencionado anteriormente, el agregado de esta "componente" contribuye al empuje generando un bloqueo adicional. Esto se plantea desde las primeras corridas (ver 4.1.3.1), por lo que resultados aparentemente alentadores en la modelación no se extrapolan a la práctica.

Otro aprendizaje planteado es la influencia de la resolución de la malla. El análisis de la sensibilidad de la malla confirma la considerable influencia de aumentar su resolución. Esto se evidencia en diferencias en la formación de estelas, lo cuál desembocó en velocidades inferiores a las esperadas en la zona de interés. Si bien estos valores no necesariamente se corresponden con lo experimental, la potencia "disponible" estimada bajó en un 13 %, de 370W a 322W. La estimación del aumento de velocidad causado por la envolvente cayó del 11 % a tan solamente un 0,5 %, es decir, prácticamente nulo. Este último resultado se asemeja a lo reportado en el experimento.

Finalmente, se evaluó el desempeño relativo de una envolvente con perfiles aerodinámicos. La simulación indicó aumentos de la velocidad máxima alcanzada y la potencia disponible en comparación con el Cono-Recto, del 20 % y 76 %, respectivamente. Al no estar respaldada por un ensayo, queda simplemente como una propuesta de diseño.

4.2. Obstrucción del flujo alrededor del aerogenerador

Este diseño de envolvente no busca aumentar de forma directa el flujo hacia el rotor, sino más bien dificultar u obstruir su paso en la zona inmediatamente alrededor de él. Como se describe en la sección 2.2, este enfoque genera una depresión inmediatamente después de la obstrucción en la sección de salida de la envolvente. Este fenómeno indirectamente fomenta un mayor pasaje de flujo a través del interior de la envolvente, por el rotor.

Para investigar esta familia de envolventes, se construyó una envolvente sumamente simplificada, permitiendo su ensayo en el túnel de viento. Además, el desempeño de esta envolvente se modeló mediante simulaciones numéricas. Posteriormente, se empleó la misma herramienta para recrear otras variantes geométricas, cuyos niveles de complejidad constructiva y requerimientos de tiempo impiden su estudio práctico.

En la sección 2.2.1, se presenta una imagen de un diseño específico que se ensayó en el contexto de [10], la cual se considera como referencia -en particular la relación empleada entre el diámetro mayor de la falange y aquel del rotor. Sin embargo, es importante señalar que, debido a las limitaciones físicas del túnel de viento y al tamaño del rotor, la misma resultó imposible de mantener, incluso habiendo escalado el rotor en un factor de 0,75.

4.2.1. Envolvente Falange-Recto

La configuración geométrica más simple que se ajusta a esta descripción consiste en una sección cilíndrica de diámetro uniforme, que al final incluye un anillo sobresaliente conocido como "falange". Esta representación puede apreciarse en la Figura 4.2.1.

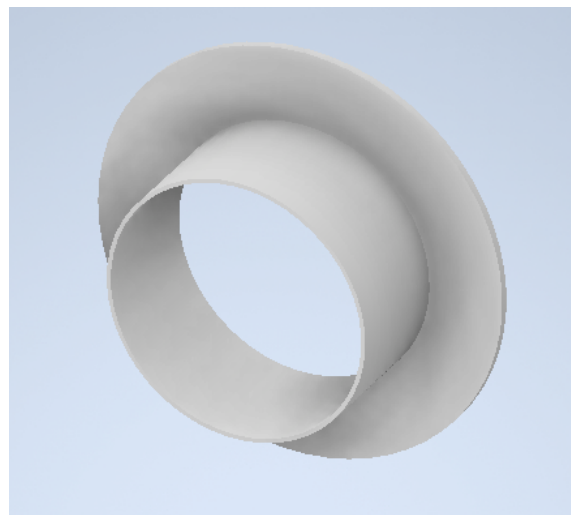


Figura 4.2.1: Vista isométrica de envolvente Falange-Recto.

Debido a las restricciones dimensionales del área de ensayo del túnel de viento, no se diseña esta envolvente según la relación de diámetros presentada en la bibliografía [10], sino que se toma el diámetro exterior de la envolvente igual al diámetro equivalente al área máxima que se puede bloquear en el ensayo. Para el diámetro interior de la falange, el cual es el diámetro del rotor agregando una pequeña luz entre estos, se toma como criterio escalar el rotor, con el que ya se cuenta de ensayos previos,

en un factor en el cual las RPM máximas se mantengan por debajo de cierto valor. Como medidas finales para el ensayo de esta envolvente se tienen un diámetro mayor de 500mm , diámetro de rotor 300mm , por lo que se tiene un diámetro interior de la falange de 310mm y se decide que el largo del cilindro sea de 150mm . En la Figura 4.2.2 se puede ver un corte lateral de la envolvente, junto a las medidas utilizadas en el diseño y elaboración del modelo a ensayar.

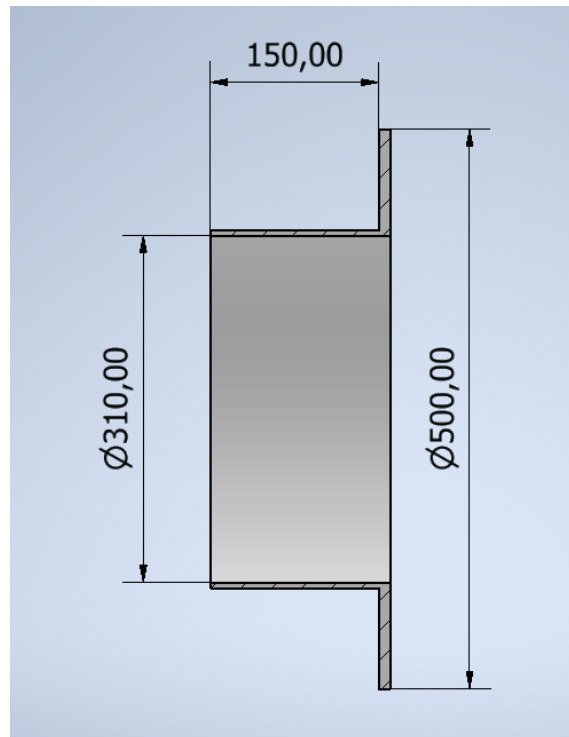


Figura 4.2.2: Corte lateral de envolvente Falange-Recto con medidas (mm) utilizadas en el ensayo.

Es importante resaltar que la relación de diámetros de la falange obtenida es de $1,61 \left(\frac{D_{max}}{D_{min}} \right)$, mientras que en la bibliografía se tiene una relación de $2,53$. Como ya fue mencionado, el motivo de realizar este estudio con una relación de diámetros significativamente menor es poder realizar el ensayo en el túnel de viento con resultados confiables.

4.2.2. Ensayo Falange-Recto

Para realizar el ensayo se construyó la envolvente con las dimensiones mencionadas en la sección anterior, con chapa, de tal manera de poder fijar la misma al banco de ensayo de DHAWT.⁸

El diseño del rotor empleado en este ensayo es una versión previamente utilizada en el proyecto de la asignatura MF2 (4.1.2), con dimensiones afectadas por un factor de $0,75$. Esto es necesario para que el dispositivo (rotor+envolvente) cumpla con el máximo bloqueo admisible del túnel.

En la Tabla 4.2.1 se detallan las dimensiones del rotor en cada radio de diseño. El mismo fue construido completamente de PLA (ácido poliláctico), mediante impresión

⁸Trabajo realizado por personal del taller del IMFIA.

3D, y revestido con fibra de vidrio y resina poliéster para mejorar su acabado y fortaleza superficial.

Se tiene que las dimensiones del rotor son mayores a las máximas de la impresora 3D con la que se cuenta. Por lo tanto, para la impresión del rotor se imprimen cuatro piezas por separado: el cubo y las tres palas. Luego, con un sistema de encastre y adhesivo epoxi, se logra unir las piezas. Cabe destacar que las palas del rotor utilizan el perfil aerodinámico tipo NACA 4412.

A continuación, la Figura 4.2.3 muestra una imagen del rotor en el banco de ensayos.



Figura 4.2.3: Rotor utilizado para el ensayo.

Tabla 4.2.1: Dimensiones del rotor del ensayo.

Radio(mm)	84,4	125,8	156,7	182,5	205	225,2	243,8	261,1	277,3	292,6
$l(mm)$	66,4	52,6	45	40,1	36,6	33,9	31,8	30	28,6	27,4
$\beta(^{\circ})$	16,9	11,2	8,3	6,4	5,1	4,2	3,3	2,7	2,2	1,8

En la primera etapa de ensayo, se recopilieron datos tanto del rotor funcionando a vena abierta como del mismo junto con la envolvente tipo Falange-Recto. Es importante recordar que la estrategia adoptada para medir diferentes puntos de funcionamiento se basó en garantizar la seguridad del rotor y la envolvente.

Con la estrategia adoptada, desarrollada en la Subsubsección 3.1.2, se alcanzaron velocidades de giro de hasta 7500 revoluciones por minuto (rpm).

A continuación, la Figura 4.2.4⁹ presenta una imagen del banco de ensayos montado en el túnel de viento.

⁹En este caso la envolvente se montó de forma opuesta a la que se ensayó, con la falange hacia el frente.



Figura 4.2.4: Banco de ensayo, envolvente y rotor montados en túnel.

En este ensayo, se enfrentaron problemas para comenzar el mismo, ya que la fuerza del viento no era suficiente para vencer las fuerzas estáticas y poner en marcha el rotor. Este problema se atribuye principalmente a las dimensiones reducidas de las palas del rotor, las cuales no generan el torque necesario para iniciar el movimiento rotacional de manera autónoma.

Como solución, se implementó un método que consistió en la aplicación de un torque externo. Este torque adicional se logró enrollando una cuerda delgada al eje del rotor. Una vez que la velocidad del viento en el túnel alcanzó un nivel suficiente para mantener la rotación del rotor, se procedió a tirar rápidamente de la cuerda, superando así las fuerzas estáticas y permitiendo el inicio del giro.

En distintas oportunidades, se excedió la intensidad del freno magnético, lo que resultaba en la detención involuntaria del rotor. Ante esta situación, fue necesario detener el funcionamiento del ventilador del túnel de viento y repetir el procedimiento mencionado previamente para reiniciar el ensayo.

Luego de tomar múltiples puntos sobre la curva adimensionada $C_P - \lambda$, se procedió a continuar el ensayo tomando datos a altas revoluciones y velocidades de viento. Sin embargo, durante este proceso, las palas experimentaron una falla. Se toma como hipótesis que esta falla se debió a una vibración en la estructura que resultó en el contacto entre la envolvente y una de las palas a altas revoluciones, lo que provocó su fallo. Posteriormente, al continuar el giro del rotor con solo dos palas, el desbalanceo resultante condujo al fallo de las otras dos palas, lo que culminó en la terminación prematura del ensayo. Finalmente, solo quedó el cubo del rotor, como se ilustra en la Figura 4.2.5.

Para llevar a cabo otro ensayo, habría sido necesario fabricar un nuevo rotor y volver a ensamblarlo. Se procedió al análisis y tratamiento de los datos obtenidos



Figura 4.2.5: Rotor al finalizar el ensayo de la envolvente Falange-Recto.

en el ensayo anterior. Después de este análisis, se determinó que no era necesario recopilar más datos de este ensayo, ya que se había cubierto una parte significativa y útil de la curva relevante.

4.2.2.1 Curvas Experimentales

A continuación, la Figura 4.2.6 depicts los resultados experimentales de ambas configuraciones, junto con sus curvas polinómicas de ajuste. Es importante destacar que, al realizar comparaciones entre los casos de vena abierta y falange, se utiliza el mismo área del rotor para el cálculo del C_p .

Se tiene que se consiguieron tomar datos en distintos rangos de velocidad específica (λ) para el rotor solo y para el rotor con envolvente. En el caso del rotor sin envolvente, se limitó la obtención de datos a valores de λ más bajos, ya que esto requeriría tomar mediciones a velocidades de viento más altas, lo cual no se consideró seguro para el rotor. Además, debido a los valores reducidos de los coeficientes de potencia (C_p) al final de la curva de los datos obtenidos, valores de λ cercanos a 6,5, continuar tomando datos por encima de estos valores de λ resultaría redundante o carecería de sentido.

Para la configuración del rotor con la envolvente, aún se podrían tomar más datos a mayores valores de velocidad específica. Sin embargo, los valores más relevantes para el estudio de este proyecto, así como para su aplicación práctica, son aquellos correspondientes a λ más bajos, donde se encuentra el pico de coeficiente de potencia máximo.

Para tomar valores a velocidades específicas más bajas, se necesitaría aumentar la velocidad de viento o reducir la velocidad de giro. Ya que la falla con la cual finalizó el ensayo fue a velocidades de viento muy altas, no se recomienda esta alternativa, donde se debería llevar el túnel de viento a una velocidad que puede poner en riesgo la estabilidad del mismo. Disminuir la velocidad de giro puede ser dificultoso durante el ensayo, ya que incluso a velocidades de viento altas, la sensibilidad del freno es alta y pequeños ajustes podrían detener bruscamente el rotor, aumentando el riesgo de

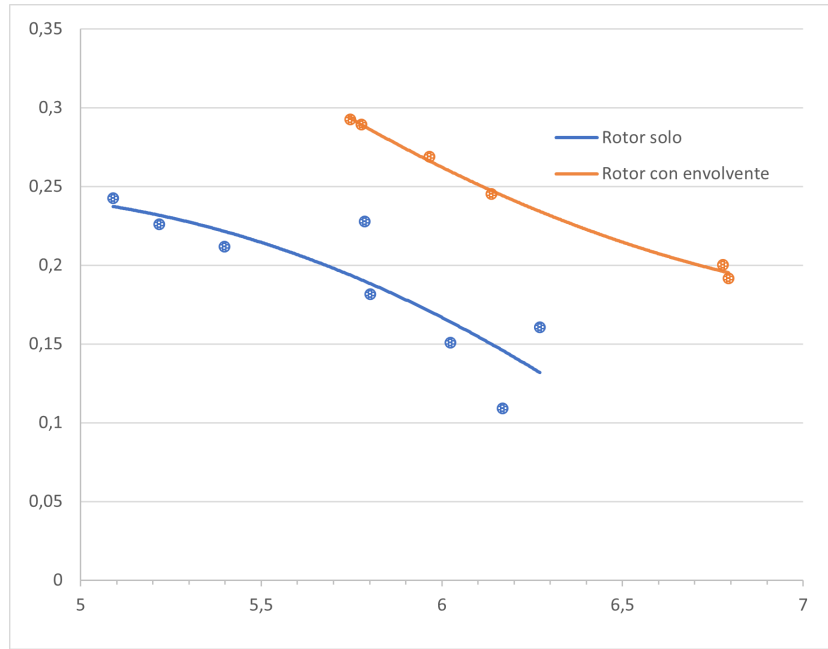


Figura 4.2.6: Curvas experimentales $C_p(\lambda)$ del rotor a vena abierta y con envolverte Falange-Recto, junto con su ajuste polinómico.

falla. Además, se tiene que para volver a tomar datos una vez que se detuvo el rotor, requiere detener el túnel de viento y aplicar nuevamente un torque externo al eje del rotor para comenzar el ensayo, lo que añade complejidad y tiempo al proceso. Por lo tanto, la alternativa más razonable para obtener más puntos sobre la curva se reduce a aumentar las dimensiones del rotor. Esto permitiría reducir las velocidades de giro necesarias y aumentar la resistencia a velocidades de viento más altas, al tener palas más grandes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que si se quiere mantener la relación de diámetros, se bloqueará un porcentaje mayor al máximo recomendado del área de ensayo, lo que disminuye la confiabilidad de los datos obtenidos.

En este ensayo se detectó que al colocar la envolverte, la velocidad de viento necesaria para iniciar el movimiento del rotor aumentó, es decir, la presencia de la envolverte ocasionó que se necesitara aumentar la velocidad del viento mínima para comenzar el ensayo.

A pesar de las complicaciones durante la práctica y los aspectos negativos asociados a las dimensiones utilizadas en el ensayo, se logró obtener datos dentro del rango de velocidad específica de entre 5,75 y 6,25 para ambas configuraciones. Esto permitió llevar a cabo el análisis requerido y obtener información relevante para el estudio.

Para calcular el coeficiente de potencia (C_P) y comparar ambas curvas, se empleó el mismo diámetro en el cálculo de la potencia atmosférica para ambas configuraciones. Este diámetro correspondió al del rotor, que fue de 30cm.

A partir de los datos obtenidos, se observa que la curva correspondiente a la configuración con envolverte se encuentra por encima de la curva del rotor sin envolverte. Esto sugiere que la presencia de la envolverte resulta en mayores valores de coeficiente de potencia, lo que implica un aumento en el desempeño del aerogenerador. En el rango de valores de λ considerado (entre 5,75 y 6,25), se registró una mejora en el coeficiente de potencia de entre el 50 % y el 80 % al comparar la configuración con envolverte con la configuración del rotor solamente. Esta mejora significativa

demuestra el impacto positivo de la envolvente en el desempeño global del aerogenerador dentro de este intervalo de velocidades específicas.

Se requieren más datos para valores de λ menores en la curva del rotor con envolvente, pero se visualiza que la curva adimensionada no solo presenta valores más altos de coeficiente de potencia, sino que se desplaza a mayores valores de velocidad específica. Esto sugiere una mayor relación entre la velocidad de giro del rotor y la velocidad del viento.

Aunque no se disponga de los máximos de las curvas, se puede inferir que la curva del rotor sin envolvente no exhibe una pendiente muy pronunciada en los valores más bajos de λ , lo que sugiere que el pico máximo de C_P probablemente no sea significativamente mayor que los valores obtenidos en el ensayo, siendo el máximo valor registrado de 0,243.

En cuanto a la curva del rotor con envolvente, se observa que el valor máximo alcanzado es de 0,293, lo que representa un incremento del 20 % respecto al máximo valor obtenido en la configuración de rotor sin envolvente. Además, dada la forma de la curva obtenida, se puede estimar que el pico máximo de C_P aún tiene potencial para aumentar. Por lo tanto, se concluye que el desempeño del aerogenerador mejora considerablemente con la envolvente estudiada, tanto en el máximo coeficiente de potencia que se puede alcanzar como en la distribución de la curva en cada punto.

En este ensayo, no se consideraron las pérdidas mecánicas en el banco de ensayo, y se asumió que son iguales para ambos ensayos de configuraciones. Las pérdidas mecánicas en el banco de ensayo se atribuyen principalmente a la caja de rodamientos utilizada como soporte del eje.

Es importante tener en cuenta que los valores obtenidos en el ensayo pueden verse afectados por el hecho de que el rotor y las palas se reforzaron con fibra de vidrio en toda su superficie. Esto puede resultar en desviaciones geométricas de las palas respecto al perfil aerodinámico seleccionado en el diseño, lo que podría haber causado una disminución en los valores de potencia obtenidos y, por ende, en los valores de C_P .

4.2.3. Simulación numérica

En el ámbito de las simulaciones numéricas, se emprendieron esfuerzos para replicar las condiciones del ensayo experimental realizado en el túnel de viento. A medida que se desarrollaba la herramienta, se exploraron diversas variantes con el objetivo de modelar lo mismo.

Entre estas variantes de incluyen:

- Primer modelo con malla gruesa y 5000 pasos temporales de 0,2 segundos cada uno: Este escenario cumple con el propósito de realizar observaciones generales sobre la situación, como la identificación de incompatibilidades entre las zonas de mayores velocidades y las áreas aprovechables para la colocación del rotor. Los resultados obtenidos en esta fase siguen siendo altamente preliminares, subrayando la necesidad de mejorar la resolución de la malla.
- Falange Alargada, malla gruesa - 3000 iteraciones de 0,2 segundos: Esta variante geométrica plantea la posibilidad de que la falange no necesariamente se ubique al final de la envolvente. Surge a raíz de los resultados obtenidos en la primera simulación, tras la observación de que las velocidades más elevadas

parecen desarrollarse un par de diámetros aguas abajo de la falange. Este hallazgo ha motivado la exploración de la opción de modificar la posición de la falange en la envolvente.

- Variante geométrica con D_{rotor} menor, malla gruesa - 3000 iteraciones de 0,2 segundos: En este caso, la premisa consiste en mantener el diámetro mayor en 50cm, que corresponde al diámetro de la falange misma, mientras se reduce el diámetro del rotor a 21cm. El objetivo es incrementar la relación entre ambos diámetros, obteniendo así una configuración más acorde con lo observado en la bibliografía. La idea subyacente es evaluar específicamente el impacto de la falange en el sistema y determinar si existen discrepancias notables entre ambos casos.
- Geometría original *Falange – Recto* con malla anidada: Se llevaron a cabo 2000 iteraciones, cada una con una duración de 0,1 segundos, sumando un total de 200 segundos de simulación. Durante este proceso, se evaluó la sensibilidad de la malla, y se confirmó la importancia de incrementar la resolución para obtener resultados más precisos. En los casos de malla anidada, se grafican diversas magnitudes a lo largo de la línea media del túnel de viento, como velocidad, energía cinética, y potencia, en algunos casos normalizados para una comparación más clara. Al no representarse el rotor, lo gráficos indican claramente dónde debería ubicarse éste.
- Variante geométrica con "falange" de ángulo agudo, o difusor, malla anidada: Se simuló con un difusor, que conceptualmente puede considerarse como una falange con un ángulo diferente a 90°. Durante esta simulación, se realizaron 3000 iteraciones con un paso temporal de 0,2 segundos. Resulta interesante observar los parámetros graficados a lo largo de la línea media, en particular, cómo la posición de los valores máximos varía para cada geometría. Este análisis proporciona una perspectiva valiosa sobre la influencia de la forma de la "falange" en los resultados obtenidos.
- Variante geométrica con "falange" de ángulo obtuso, malla anidada: Esta geometría, aunque más compleja, se incluye en esta sección debido a su semejanza con la falange y la reproducción del método de obstruir el flujo alrededor del aerogenerador. La configuración comprende una sección recta con una falange, pero con un ángulo superior a 90. Además, incorpora un elemento derivado del aprendizaje obtenido en la sección 4.3, consistente en separar la falange del cuerpo principal, permitiendo el paso de aire y anticipando un efecto similar a un tubo "venturi". Se espera que esta modificación contribuya a mejorar la eficiencia global de la geometría. Nuevamente, se realizaron 3000 iteraciones de 0,2 segundos, y los parámetros graficados en la línea media son de particular interés.
- Falange-Perfil: Esta variante toma como base la geometría de la falange, pero incorpora perfiles aerodinámicos con el objetivo de explorar posibles mejoras en su rendimiento, aunque sea en un contexto teórico simplificado. Es relevante destacar nuevamente que esta modificación fue viable únicamente después de lograr el funcionamiento adecuado de las mallas anidadas. Esto resulta crucial, ya que sin esta capacidad, sería inviable obtener la resolución necesaria para

captar los detalles finos de la geometría y evaluar adecuadamente su impacto en el flujo.

En vista de las conclusiones derivadas del análisis del Concentrador de flujo en 4.1.4, se reconoce el carácter superior de las simulaciones numéricas realizadas con una mayor resolución de malla (malla anidada), y se opta por presentar exclusivamente estos resultados en el cuerpo principal. Los resultados preliminares derivados del análisis de con malla gruesa desempeñaron un papel crucial en las etapas iniciales del proyecto, y se desarrollan detalladamente en las secciones A.6, A.7 y A.8 del anexo. Además, se plasman los conocimientos fundamentales adquiridos al cierre de esta sección, en 4.2.4.

4.2.3.1 Malla Anidada y Envolvente Falange-Recto

Una vez que se logró la implementación de la malla anidada, se procede a reproducir la simulación utilizando la geometría original: Falange-Recto.

Resulta fundamental examinar la sensibilidad de la malla. Se resolvieron 2000 iteraciones con paso temporal 0,1 segundos, totalizando 200 segundos de simulación. La Figura 4.2.7a presenta un corte horizontal medio del campo de velocidades instantáneo en la iteración número 2000 (segundo 200). Además, en el mismo plano, se representa el campo medio de velocidades durante las últimas 1000 iteraciones, como se observa en la Figura 4.2.7b. Las figuras incluyen un recuadro azul que delimita el borde de la malla fina, que posee una resolución más elevada. Además, se ha aplicado la superposición de la geometría de la envolvente para mejorar la claridad visual.

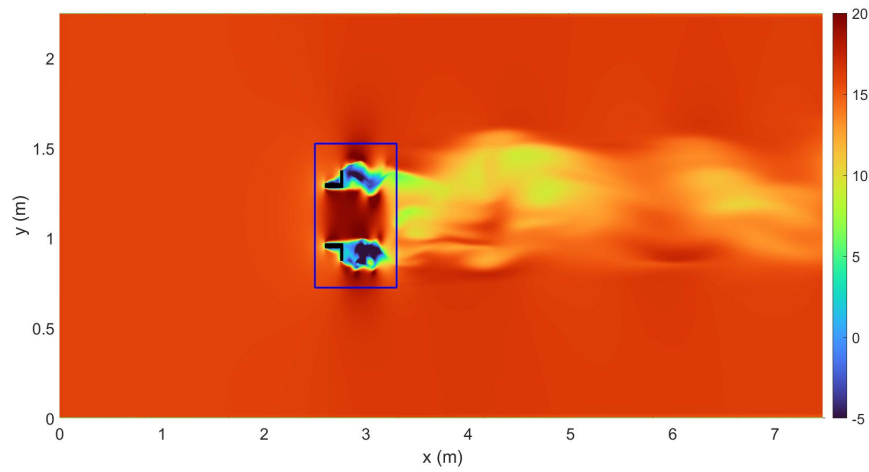
A continuación, en la Figura 4.2.8a y 4.2.8b, se presentan gráficos que representan dos magnitudes a lo largo de la línea central del dominio de la malla fina ($y = 1,1125m$, $z = 1m$). Estas magnitudes son la velocidad media, calculada en las últimas 1000 iteraciones y normalizada por la velocidad incidente a la entrada ($16m/s$), y la potencia, calculada con dicha velocidad media y un área fija correspondiente a la del rotor ($31cm$), respectivamente.

En el caso refinado, se observa que la velocidad media máxima se alcanza fuera de los límites de la envolvente. No obstante, este valor máximo es muy cercano a la velocidad en la sección de salida. En este contexto, se habla de una velocidad "máxima" y otra máxima "del rotor", siendo la segunda la que efectivamente se podría aprovechar.

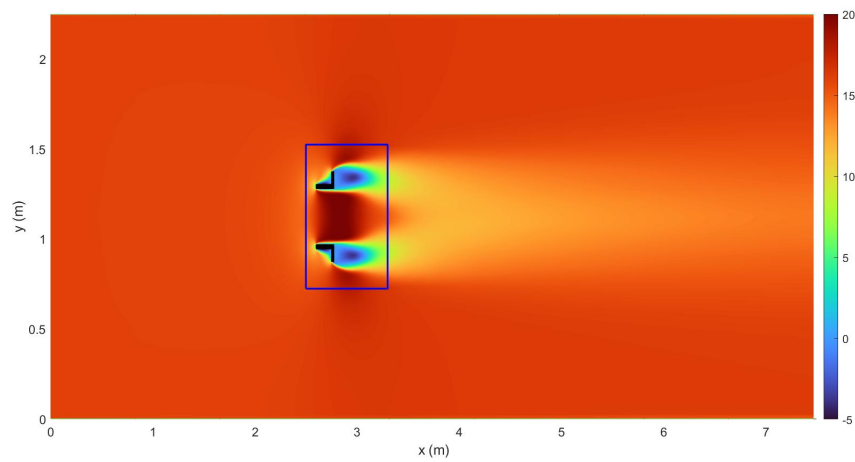
La velocidad máxima aprovechable es de $19,93m/s$, lo que representa un incremento del 25 % respecto a la velocidad incidente, y se alcanza a una altura de $x = 2,77m$. El punto máximo, por un lado, corresponde a una velocidad ligeramente mayor de $20,11m/s$, y por otro, se da a menos de $10cm$ aguas abajo.

Estas observaciones no son consistentes con las preocupaciones surgidas en la primera simulación A.6, mostrando resultados más alentadores. Se destaca la importancia de considerar la resolución de la malla para obtener resultados precisos.

Si la velocidad máxima del rotor fuera uniforme en la sección, según se muestra en la figura 4.2.8b, esto representaría una potencia cercana a los $358,62W$.

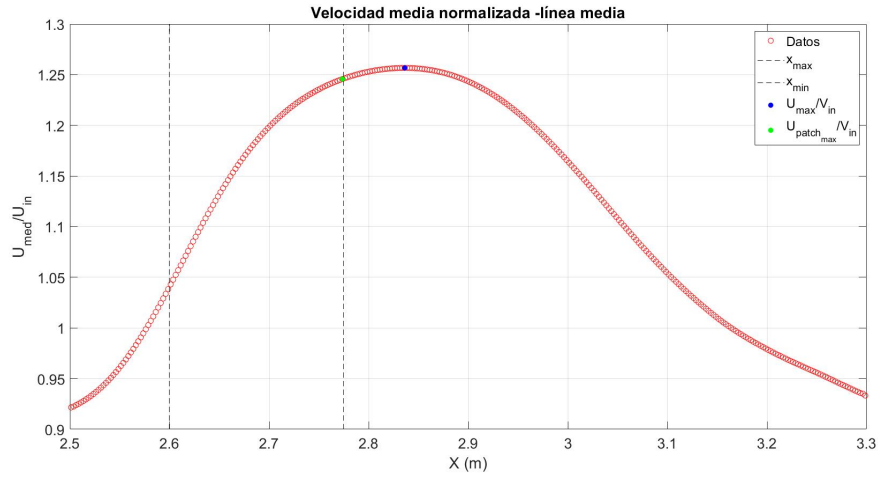


(a) Velocidad instantánea, iteración 2000.



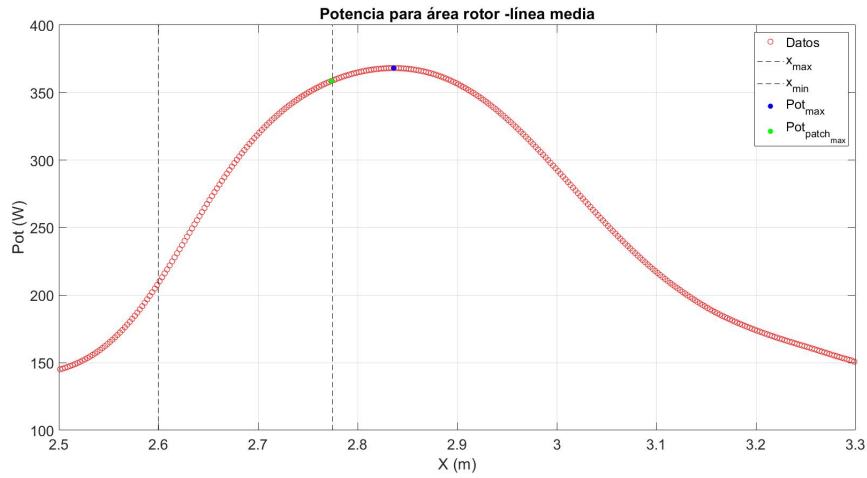
(b) Velocidad media, iteraciones 1000 – 2000.

Figura 4.2.7: Componente según la dirección del flujo (x) del campo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$).



(a) Velocidad media, normalizada por la de entrada (16m/s).

$$V_{norm_{max}}(2,84m) = 1,26, V_{norm_{rotmax}}(2,77m) = 1,25$$



(b) Potencia calculada, a partir de la velocidad media, para un área fija -área del rotor:

$$31 \text{ cm. } Pot_{max}(2,84m) = 368,14W, Pot_{rotmax}(2,77m) = 358,62W$$

Figura 4.2.8: Magnitudes graficadas a lo largo de la línea central del dominio de la malla refinada ($y = 1,1125m$, $z = 1m$).

4.2.3.2 Malla Anidada y Envolvente Falange-Recto - Ángulo Agudo (difusor)

En el caso de esta variante geométrica, se explora reduciendo el ángulo de la falange hasta obtener un difusor. El diámetro interior sigue siendo de 31cm , y a una altura de $x = 2,9\text{m}$ comienza a abrirse con un ángulo de 35° . Esta geometría se muestra en la Figura 4.2.9, en un corte horizontal medio, superpuesto a la grilla de la malla fina. El espesor empleado es de 2cm .

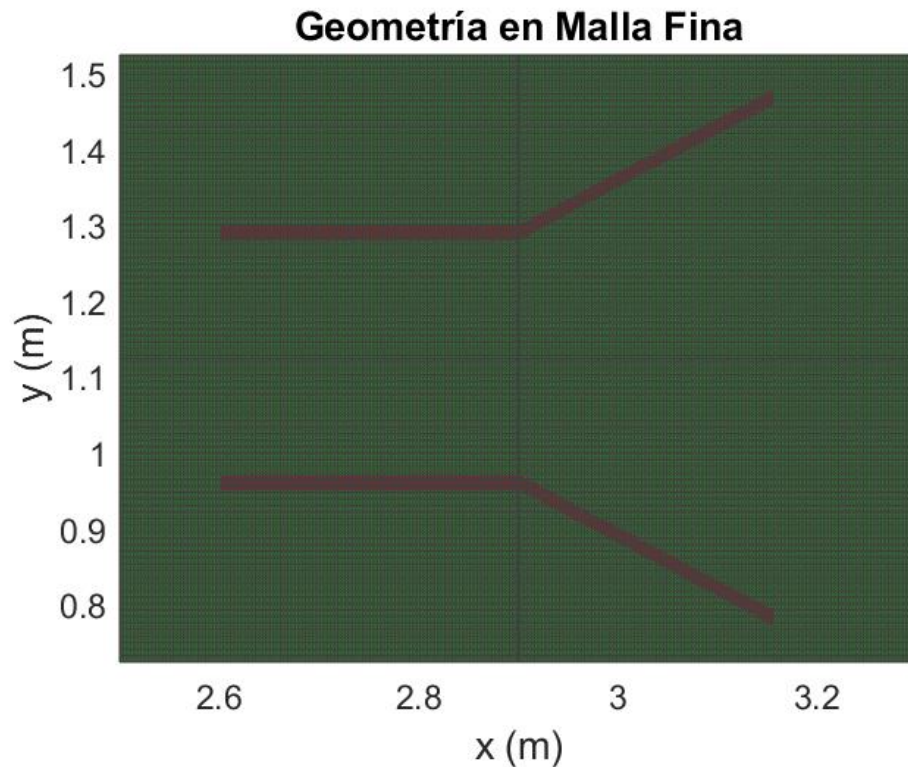


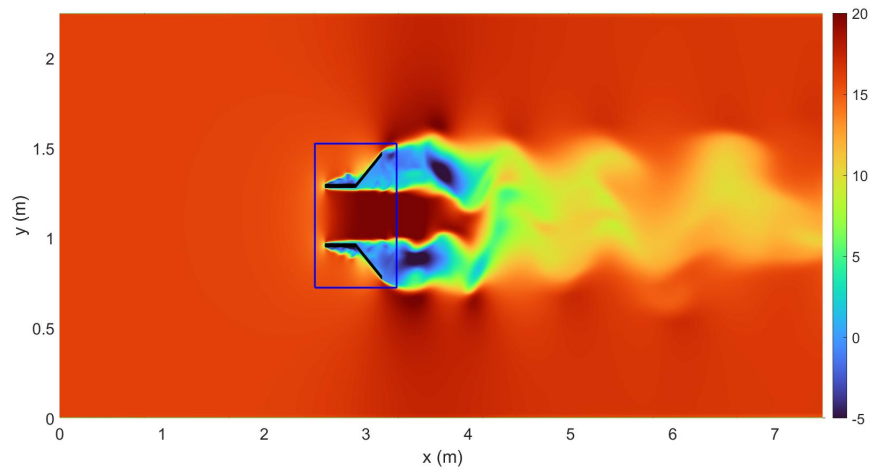
Figura 4.2.9: Patch geometría difusor.

Luego, la Figura 4.2.10 presenta el mismo corte horizontal que ilustra el campo de velocidades, tanto instantáneo como medio. Se incluye un recuadro azul que delimita el borde de la malla fina, de resolución más elevada, y se superpone la geometría de la envolvente para una mejor visualización.

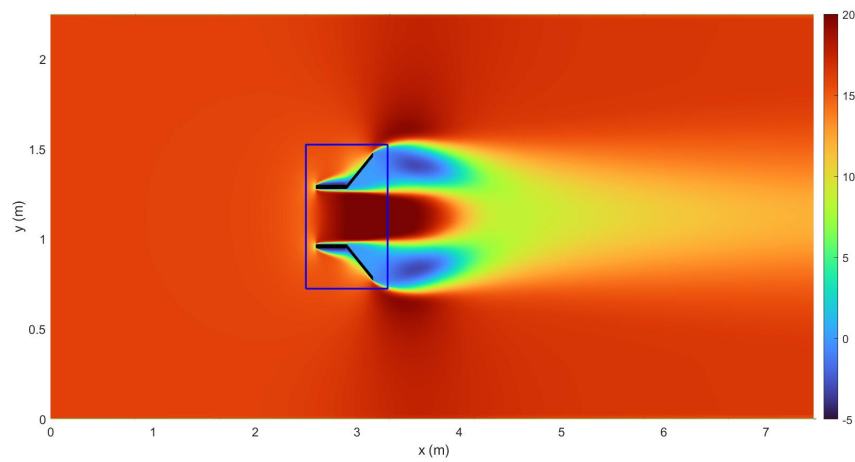
Los gráficos de la Figura 4.2.11 muestran la evolución de la velocidad media normalizada a lo largo de la línea media del dominio de la malla fina, así como la potencia calculada a partir de la misma para el diámetro del rotor. Se observa que la velocidad máxima dentro de los límites de la envolvente se registra al final, en $x = 3,15\text{m}$. Sin embargo, dado que el rotor debe ser ubicado antes del difusor, el punto de interés corresponde a $x = 2,9\text{m}$.

La amplificación de la velocidad aquí es del 25 %, en lugar del 28 % (en $x = 3,15\text{m}$), lo que corresponde a $19,9\text{m/s}$ y $358,93\text{W}$ (hipótesis de velocidad uniforme). Se observa que estos casos son muy similares a los de la sección "Malla Anidada y Envolvente Falange-Recto" 4.2.3.1.

Aguas abajo de la geometría, se observa una tendencia de la velocidad a aumentar levemente.

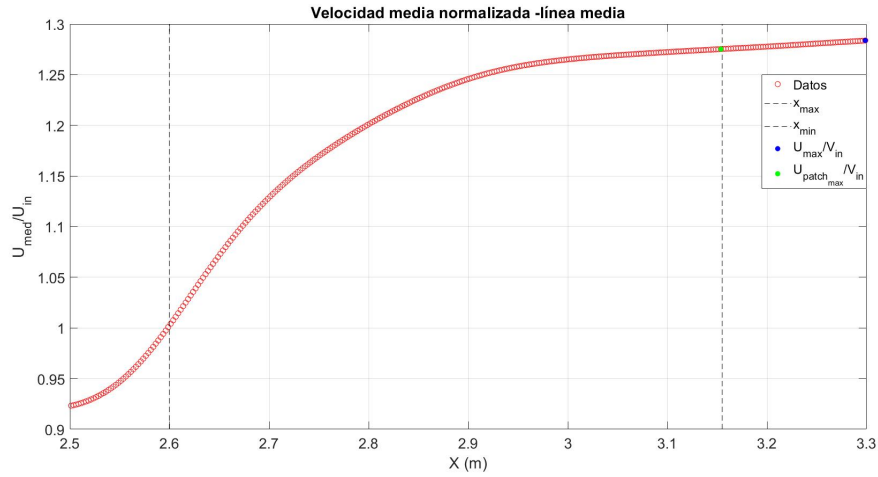


(a) Velocidad instantánea, iteración 2000.



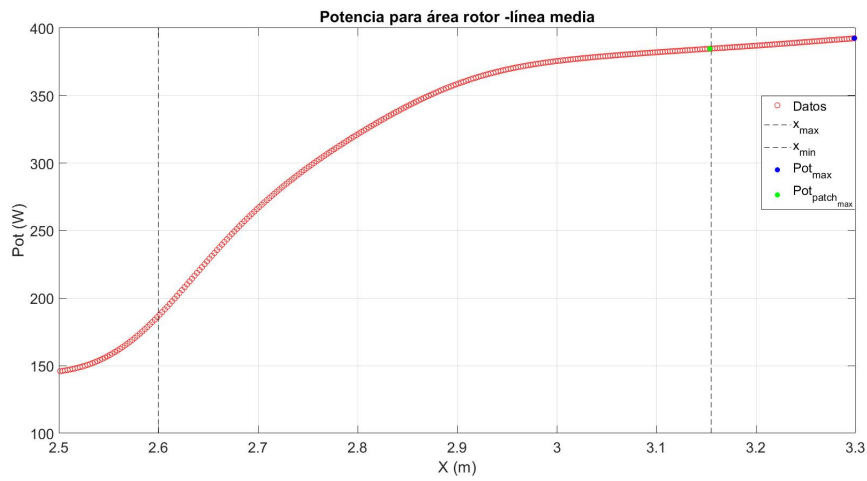
(b) Velocidad media, iteraciones 2000 – 3000.

Figura 4.2.10: Componente según la dirección del flujo (x) del campo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$).



(a) Velocidad media, normalizada por la de entrada (16m/s).

$$V_{norm_{max}}(3,30\text{m}) = 1,28, V_{norm_{rotmax}}(3,15\text{m}) = 1,28$$



(b) Potencia calculada, a partir de la velocidad media, para un área fija -área del rotor:

$$31\text{ cm. } Pot_{max}(3,30\text{m}) = 392,47\text{W}, Pot_{rotmax}(3,15\text{m}) = 384,70\text{W}$$

Figura 4.2.11: Magnitudes graficadas a lo largo de la línea central del dominio de la malla refinada ($y = 1,1125\text{m}$, $z = 1\text{m}$).

4.2.3.3 Malla Anidada y Envolvente Falange-Recto - Ángulo Obtuso

Aunque más compleja, se incluye esta geometría en esta sección debido a su semejanza con la falange y la reproducción del método de obstruir el flujo alrededor del aerogenerador. En la Figura 4.2.12, se muestra la misma sobre la grilla de la malla fina.

La configuración comprende una sección recta con una falange, pero con un ángulo superior a 90. Además, incorpora un elemento derivado del aprendizaje obtenido en la sección 4.3, consistente en separar la falange del cuerpo principal, permitiendo el paso de aire y anticipando un efecto similar a un tubo "venturi".

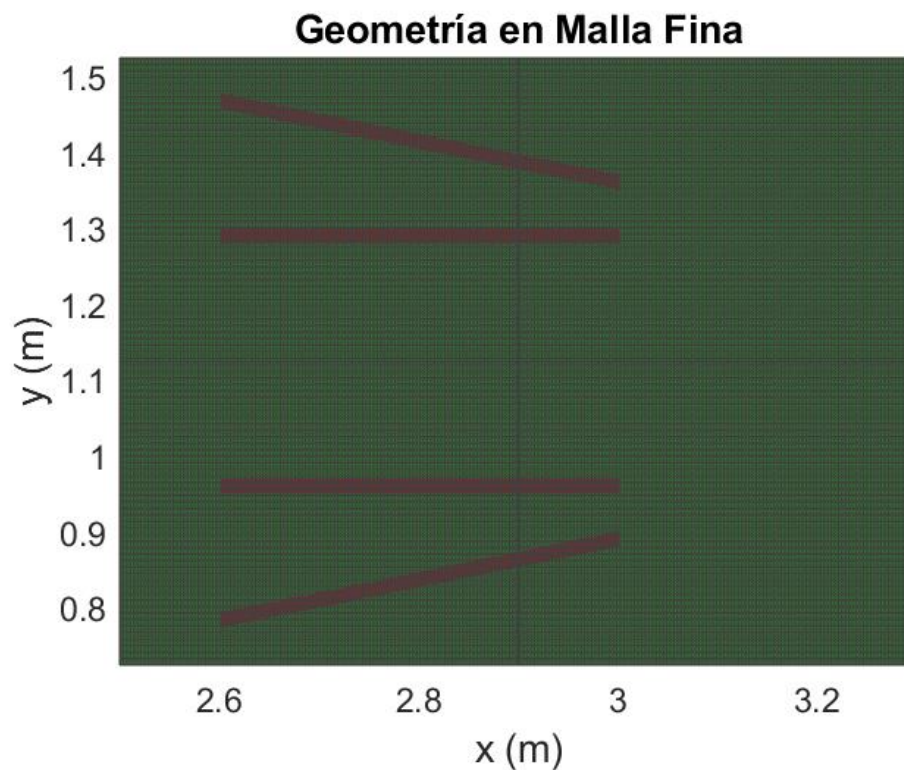
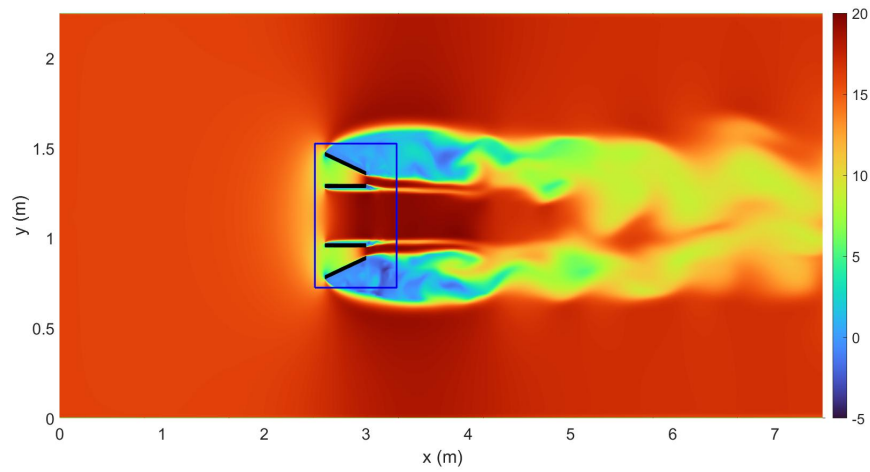


Figura 4.2.12: Patch geometría falange ángulo obtuso.

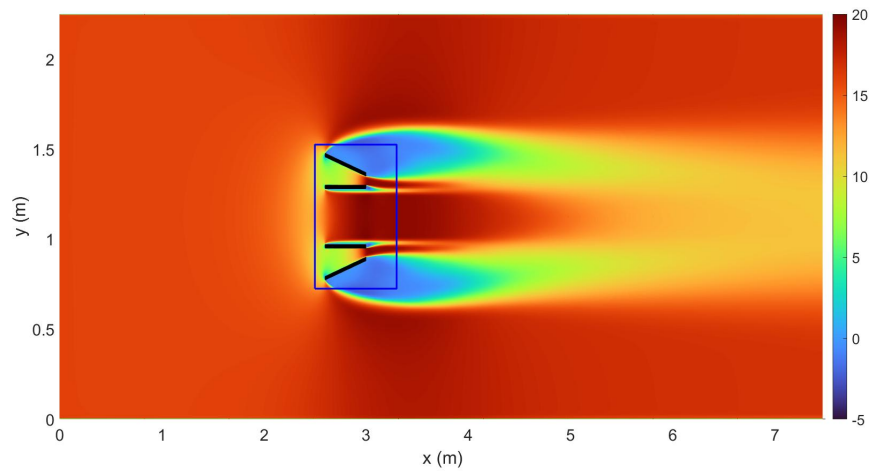
Se espera que esta modificación contribuya a mejorar la eficiencia global de la geometría.

En la Figura 4.2.13, se presentan cortes horizontales con el campo de velocidades medio e instantáneo. Posteriormente, la Figura 4.2.14 indica magnitudes de interés a lo largo de la línea media del dominio de la malla fina.

En el caso de este diseño de envolvente, parece haber un claro máximo que se encuentra dentro de los límites de la envolvente, a una distancia de $x = 3m$. En este punto, donde se ubicaría el rotor, la velocidad media alcanza los $19,62m/s$, casi un 23 % superior a la velocidad incidente. Con la hipótesis simplificadora de que esta velocidad sea uniforme en la sección, se estima la potencia en $342,2W$. Estas referencias son del orden de los otros resultados obtenidos con la malla anidada, aunque ligeramente menores.

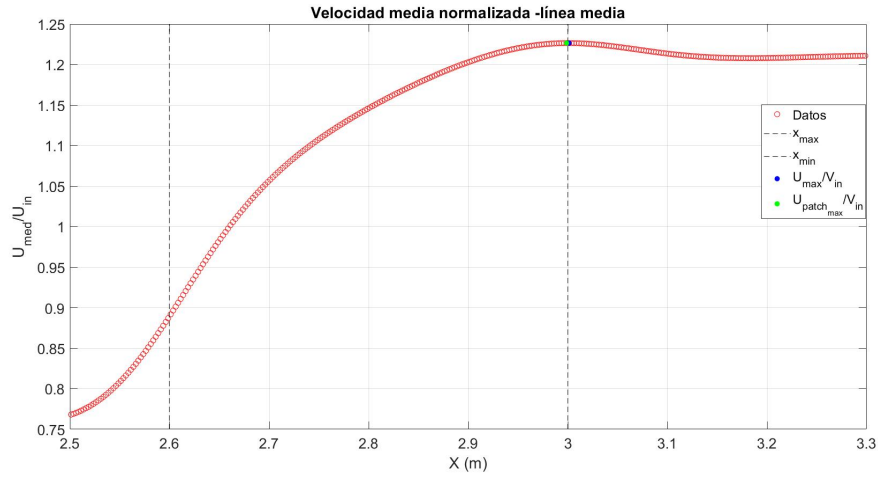


(a) Velocidad instantánea, iteración 2000.

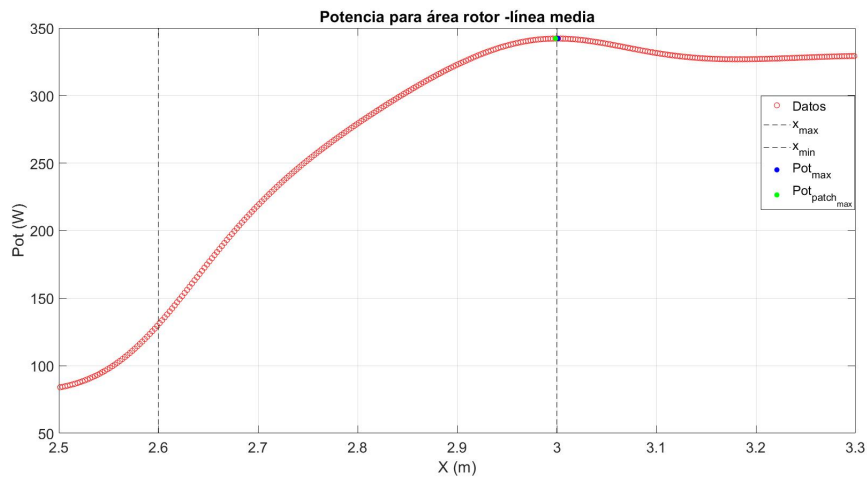


(b) Velocidad media, iteraciones 2000 – 3000.

Figura 4.2.13: Componente según la dirección del flujo (x) del campo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$).



(a) Velocidad media, normalizada por la de entrada (16m/s).
 $V_{norm_{max}}(3,00\text{m}) = 1,23$, $V_{norm_{rotmax}}(3,00\text{m}) = 1,23$



(b) Potencia calculada, a partir de la velocidad media, para un área fija -área del rotor:
 31 cm . $Pot_{max}(3,00\text{m}) = 342,21\text{W}$, $Pot_{rotmax}(3,00\text{m}) = 342,21\text{W}$

Figura 4.2.14: Magnitudes graficadas a lo largo de la línea central del dominio de la malla refinada ($y = 1,1125\text{m}$, $z = 1\text{m}$).

4.2.3.4 Malla Anidada y Envolvente Falange-Perfil

Esta variante mantiene el principio de funcionamiento de la *Falange – Recto*, utilizando perfiles aerodinámicos que permitan una mejor conducción del viento, sin cambios bruscos de dirección, como se ve en la Figura 4.2.15.

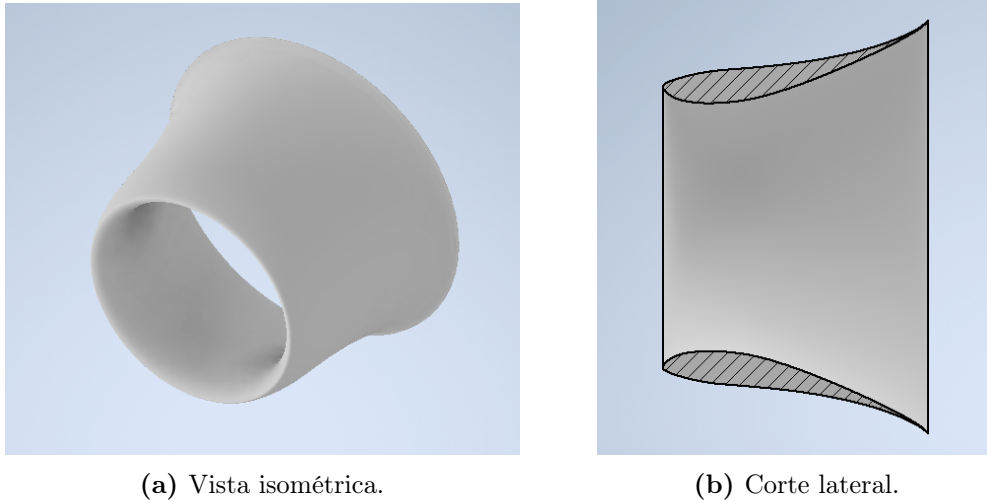


Figura 4.2.15: Envolvente Falange-Perfil.

En esta envolvente se utilizaron perfiles aerodinámicos S1210 y se mantuvieron los diámetros máximo y mínimos establecidos para la *Falange-Recto*, siendo el diámetro exterior de 50cm y el interior de 30cm . En la Figura 4.2.16 se tiene la misma sobre la grilla de la malla fina.

En la Figura 4.2.17, se presentan cortes horizontales con el campo de velocidades medio e instantáneo. Posteriormente, la Figura 4.2.18 indica magnitudes de interés a lo largo de la línea media del dominio de la malla fina.

En el caso de este diseño de envolvente, la velocidad media aumenta dentro de los límites de la envolvente y se mantiene casi constante aguas abajo de la misma. Sin embargo, debido a la geometría de la envolvente, el rotor debería ir ubicado al comienzo de la misma, a una distancia de $x = 2,66\text{m}$.

En este punto, la velocidad experimenta un aumento menor al 4%, alcanzando los $16,63\text{m/s}$, y una potencia aproximada de $200,25\text{W}$. Estos valores no resultan alentadores.

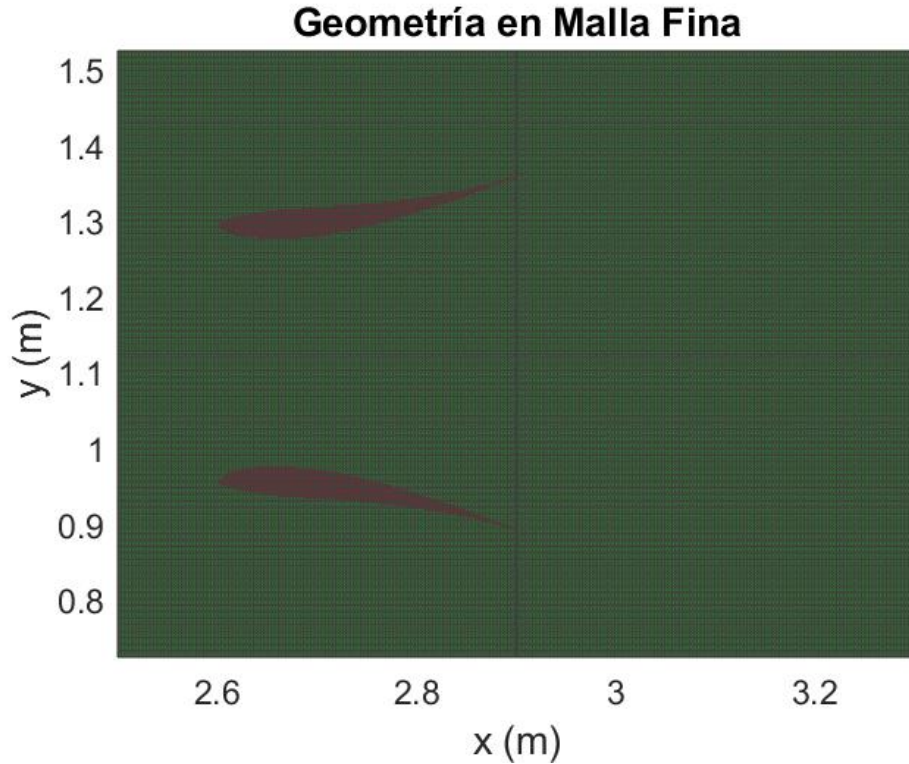


Figura 4.2.16: Patch geometría Falange-Perfil.

4.2.4. Conclusiones

Dado lo expuesto en esta sección, se pueden extraer algunas conclusiones o aprendizajes sobre las envolventes con falange.

Por un lado, en el ensayo experimental con el modelo escalado del rotor de MF2, se evaluaron las configuraciones a vena abierta y con la envolvente falange-recto. Se observó un notable incremento en los valores de C_P con la envolvente, específicamente en el rango de velocidades específicas (λ) 5,75 – 6,25, donde se registró un aumento de aproximadamente 50 – 80 %.

En términos de máximos, se estimó un C_P máximo de 0,243 para el rotor solo y 0,293 con la envolvente, representando un aumento del 20 %¹⁰.

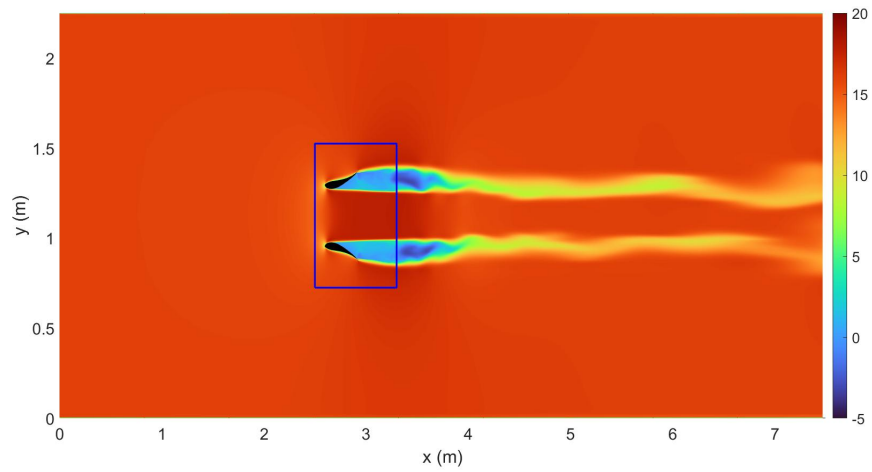
Un aspecto relevante fue el aumento en la velocidad de viento requerida para iniciar el movimiento del rotor con la envolvente. Esto plantea un desafío para la puesta en marcha y operación de este tipo de envolvente.

Otra observación crucial fue el desplazamiento de la curva $C_P - \lambda$ hacia mayores velocidades específicas (λ) con la envolvente. Este cambio sugiere una relación más estrecha entre la velocidad de giro del rotor y la velocidad del viento cuando se utiliza la misma.

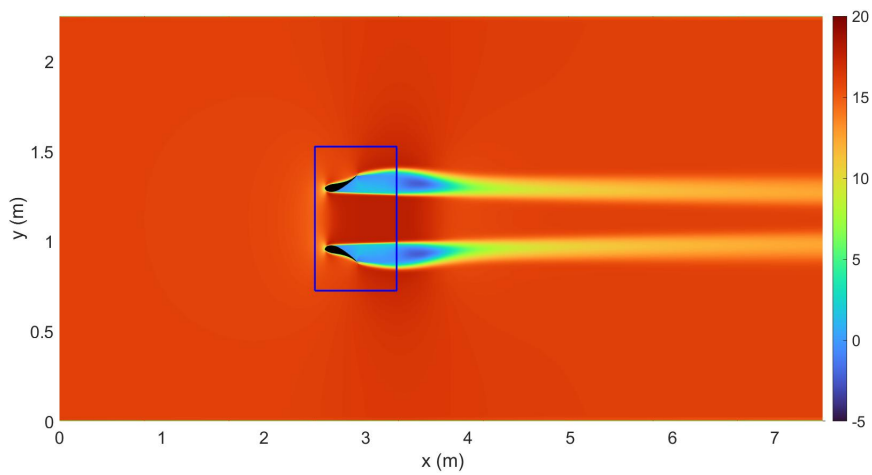
En resumen, aunque el C_P máximo no superó el valor de 0,3, la envolvente provocó mayores coeficientes de potencia, indicando una mejora global en el desempeño del aerogenerador.

Además del análisis experimental, se llevaron a cabo varias simulaciones numéricas para evaluar el desempeño de distintas geometrías de envolventes. Es crucial señalar

¹⁰Para la comparación, se mantuvo constante el denominador de C_p para el caso a vena abierta, correspondiente a la potencia meteorológica calculada en una sección de 31cm, en lugar de 50cm.

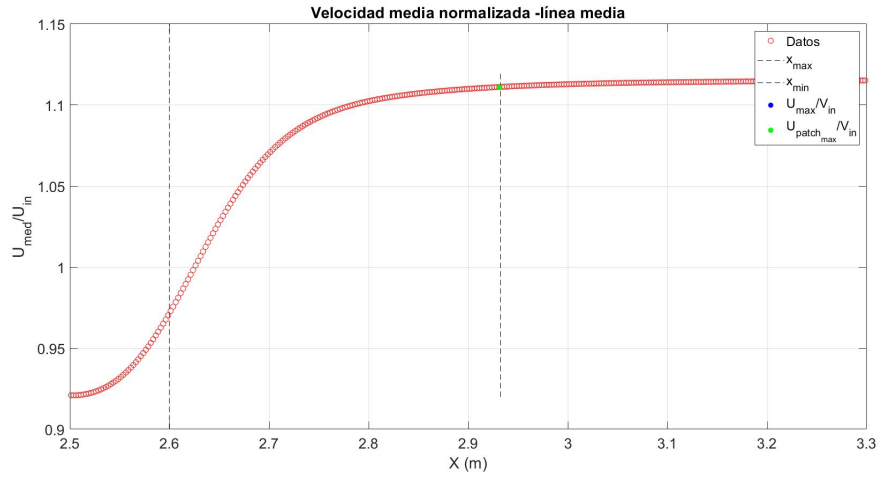


(a) Velocidad instantánea, iteración 2000.



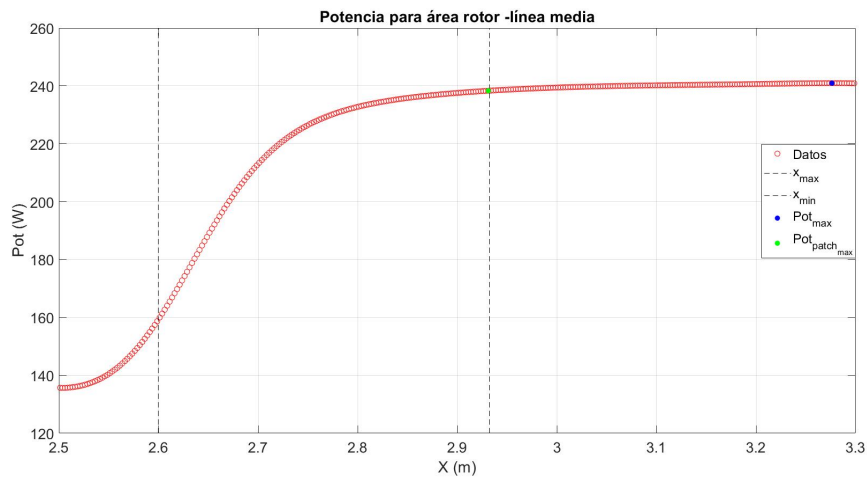
(b) Velocidad media, iteraciones 2000 – 3000.

Figura 4.2.17: Componente según la dirección del flujo (x) del campo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$).



(a) Velocidad media, normalizada por la de entrada (16m/s).

$$V_{norm_{max}}(3,28m) = 1,12, V_{norm_{rotmax}}(2,93m) = 1,11$$



(b) Potencia calculada, a partir de la velocidad media, para un área fija -área del rotor:

$$31 \text{ cm. } Pot_{max}(3,28m) = 240,96W, Pot_{rotmax}(2,93m) = 238,33W$$

Figura 4.2.18: Magnitudes graficadas a lo largo de la línea central del dominio de la malla refinada ($y = 1,1125m$, $z = 1m$).

que, debido a la complejidad de la tarea, no se simuló el rotor ni su movimiento. En consecuencia, carece de sentido intentar una comparación directa entre los resultados experimentales y numéricos. A pesar de ello, estas simulaciones ofrecen información valiosa sobre el desempeño relativo de las diversas envolventes estudiadas.

Nuevamente, la importancia de la resolución de la malla para obtener resultados precisos se evidencia entre las primeras y últimas simulaciones realizadas. En las primeras, los puntos de mayor velocidad parecían ubicarse aguas abajo del rotor, generando la percepción de un desaprovechamiento del efecto de la falange (ver A.6). Sin embargo, al emplear un modelo más refinado, esta situación no resultó ser tan preocupante (ver 4.2.3.1).

A pesar de esto, se propone una solución conceptual (ver A.7). En este planteo, se introduce la idea de extender la "zona aprovechable" al colocar la falange en la zona central, en lugar de ubicarla en la sección de salida de la envolvente. Este enfoque, aunque requiere una exploración adicional, podría ofrecer una mejora en el desempeño de la envolvente.

También se exploró una variante con una mayor relación de diámetros falange/rotor (ver A.8), para evaluar un caso más alineado con la bibliografía [10]. Se destaca que incrementar la relación de diámetros es beneficioso para alcanzar mayores velocidades en la sección del rotor. Sin embargo, se advierte que la estrategia óptima no sería disminuir el diámetro del rotor, sino más bien aumentar el de la falange.

Posteriormente, se exploraron otras geometrías, como una falange con ángulo agudo (difusor) y obtuso, con el objetivo de analizar cómo la distribución de magnitudes, como la velocidad, varía con la geometría. Esto verifica la posibilidad de ajustar la geometría para obtener máximos en distintas posiciones a lo largo de la envolvente. Sin embargo, los resultados no mostraron mejoras significativas en comparación con el caso inicialmente ensayado (ver 4.2.3.1).

Finalmente, es relevante destacar que el empleo de perfiles aerodinámicos como falange tuvo resultados poco satisfactorios en la simulación. La necesidad de obstruir el flujo alrededor del aerogenerador indica que un cambio brusco en la geometría es preferible, sugiriendo que la transición suave proporcionada por perfiles aerodinámicos puede ser innecesaria e incluso contraproducente.

4.3. Aeromine

La envolvente Aeromine ha sido diseñada con el propósito de generar una diferencia de presión entre la entrada y la salida del aerogenerador, utilizando principios aerodinámicos para mejorar su rendimiento.

Esta diferencia de presión se establece de manera que se genere una sobrepresión en la entrada y una depresión en la salida del flujo de aire. La sobrepresión en la entrada se logra mediante el diseño de la entrada como una caja con un lado abierto, mientras que la depresión en la salida se alcanza utilizando una configuración de perfiles aerodinámicos que dirigen el flujo del viento.

Esta envolvente está diseñada para ser instalada en la parte superior de un edificio, aprovechando el aumento de velocidad del viento sobre la cornisa del mismo. Su principal desventaja radica en la falta de un sistema de orientación, lo que significa que al ser una estructura fija, solo puede aprovechar el viento que llega desde la dirección frontal a la misma.

4.3.1. Modelo físico

Para estudiar esta envolvente no se cuenta con planos del modelo original, por lo que se realiza una investigación sobre la envolvente, para recabar información de la misma. A través de imágenes oficiales, la patente del aerogenerador y publicaciones de la empresa diseñadora, se busca obtener un modelo físico que se asemeje lo máximo posible al original, de tal manera de poder ensayar el modelo en el túnel de viento.

Utilizando una serie de fotos de un prototipo del Aeromine, se buscaron relaciones entre sus dimensiones. De esta manera se puede construir un modelo 3D paramétrico a alguna dimensión, que mantenga una relación entre sus dimensiones, para poder aplicar un factor de escala y así llegar al modelo final. Un ejemplo de una de las imágenes utilizadas para obtener relaciones entre las dimensiones se presenta en Figura 4.3.1.



Figura 4.3.1: Foto utilizada para obtener relaciones entre las dimensiones del Aeromine. La foto utilizada fue extraída de la página de LinkedIn de Aeromine Technologies, Inc. (<https://www.linkedin.com/company/aeromine-technologies/>).

Se tiene que en un modelo previo al Aeromine, se utilizaron perfiles aerodinámicos S1210 [23] (Figura 2.3.1), los cuales fueron tomados como una primer opción para utilizar en los perfiles verticales, y para el perfil horizontal de la base de la envolvente, se utilizó el perfil S1091, por la similitud con el perfil S1210, pero siendo este un perfil más fino. Para el techo se decidió utilizar un perfil aerodinámico simétrico, ya que se consideró que es lo más óptimo desde la aerodinámica y lo estructural, optando por el perfil NACA0006 (Figura 4.3.2a).

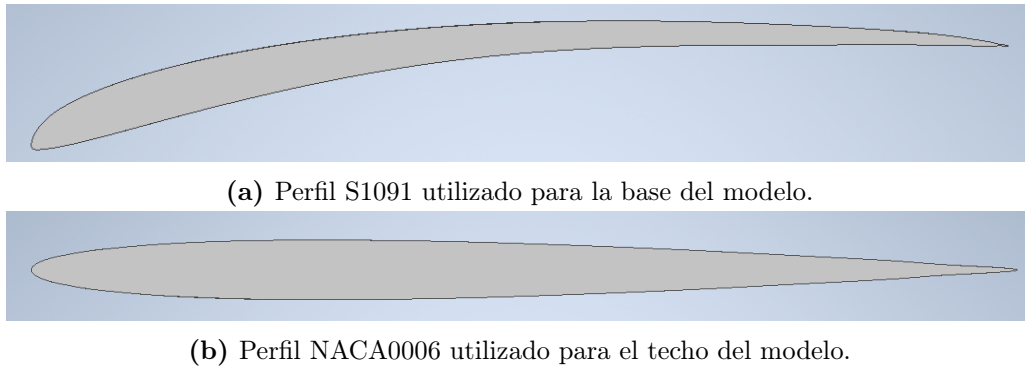


Figura 4.3.2: Perfiles utilizados para la base y el techo del modelo.

A partir de las imágenes y la patente del Aeromine, se pudo ver que la envolvente cuenta con dos pares de columnas con forma de perfiles aerodinámicos en la parte superior, con distintos ángulos de ataque con respecto a la dirección del flujo del viento en el aerogenerador, con simetría con respecto al plano central y una columna central en forma de semicírculo con dos paredes laterales rectas, como se puede visualizar en la Figura 4.3.3.

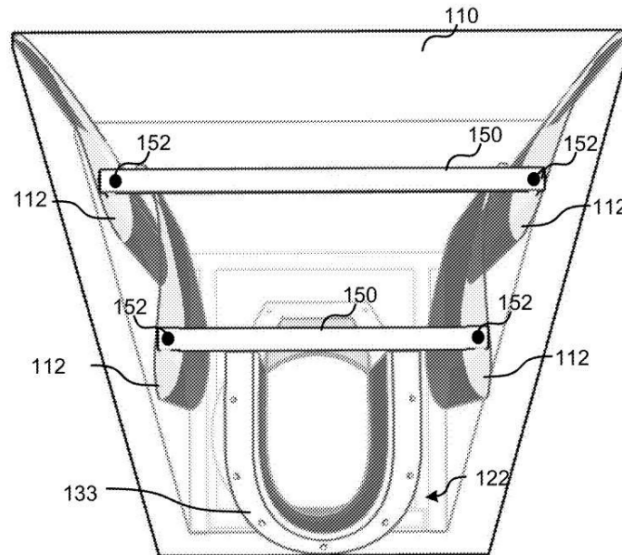


Figura 4.3.3: Vista de la configuración de la parte superior del Aeromine. Extraída de [24].

Con imágenes obtenidas de la patente se observa que la parte posterior del tubo central es hueca, visible en Figura 4.3.4a, siendo esta sección la salida del aire que

circula por el rotor. También se puede observar que la salida en la base del Aeromine sigue la forma del semicírculo y las paredes rectas, teniendo una transición por debajo del perfil base hacia una forma circular, como se puede ver en Figura 4.3.4.

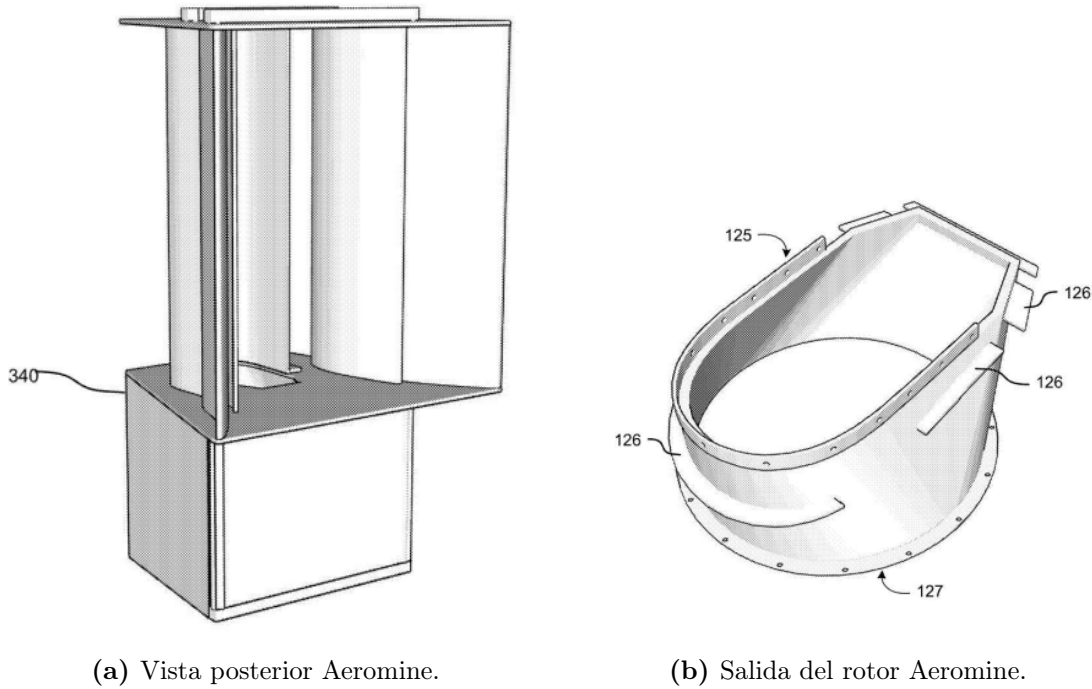


Figura 4.3.4: Tubo central del Aeromine. Imágenes extraídas de [24].

Luego de realizar un análisis crítico a la información recabada de las imágenes y la patente, se obtuvo un plano de la sección superior del Aeromine, donde se tiene que el borde de ataque de las primeras columnas están alineadas al centro del tubo central, con cierta separación al mismo. El ángulo de ataque de estos perfiles es de $5,5^\circ$, distanciándose entre ellos en el sentido de avance del flujo. El siguiente par de columnas con forma de perfil aerodinámico se encuentran con una pequeña separación con respecto a las primeras columnas, sobre el final de los anteriores, con un ángulo de ataque de $42,2^\circ$. El resultado obtenido para el modelo físico es el mostrado en la Figura 4.3.5.

El modelo final logrado a partir del estudio antes mencionado se presenta en Figura 4.3.6.

4.3.2. Modelo analítico

Para realizar un modelo del funcionamiento del Aeromine, se toma la fuerza de arrastre generada por dos partes de la envolvente por separado, para estimar el empuje que le generan éstas al viento, generando un efecto de bloqueo y disminuyendo la velocidad del mismo a la entrada del aerogenerador. Las dos partes en la que se separa la envolvente para este estudio es, por un lado, la base, que es el cubo que acumula el aire y, por otro lado, los perfiles, el tubo y el techo.

Para el cubo se toma un coeficiente de arrastre de $C_D = 2$. Para los perfiles aerodinámicos se toma el flujo incidente que llega de forma perpendicular a la entrada del aerogenerador, por lo que se toma un ángulo de ataque igual al ángulo que tiene el perfil con respecto a la perpendicular a la entrada. Se estima un valor para el

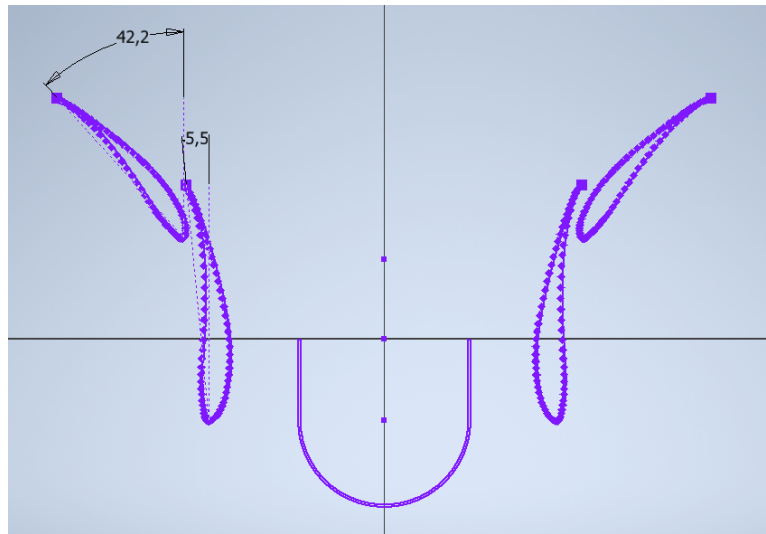


Figura 4.3.5: Vista de la configuración recreada de la parte superior del Aeromine.

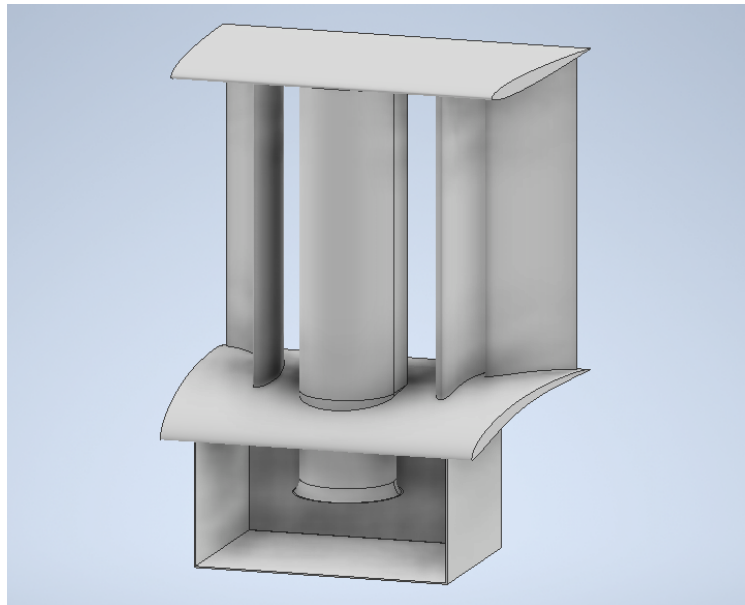
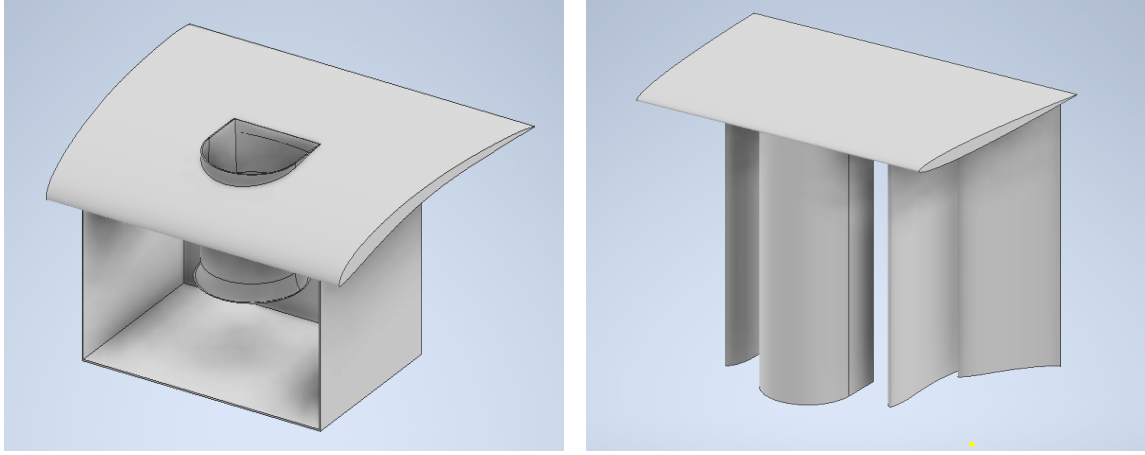


Figura 4.3.6: Vista del modelo recreado del Aeromine.



(a) Parte inferior de la envolvente.

(b) Parte superior de la envolvente.

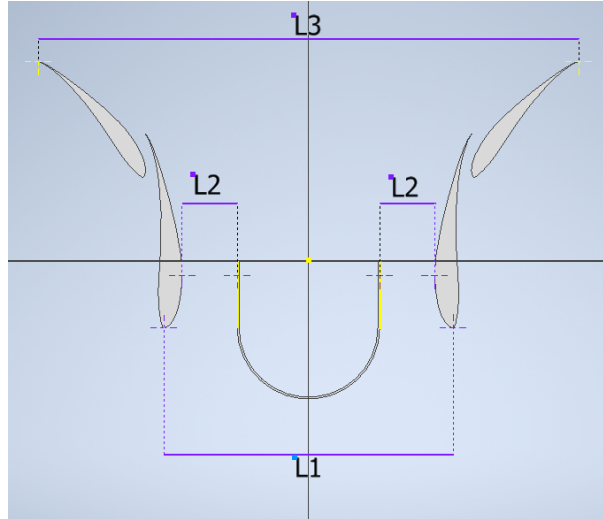
Figura 4.3.7: Partes separadas utilizadas en el desarrollo analítico.

número de Reynolds con la velocidad de viento alejado del aerogenerador. En cuanto al tubo se toma el coeficiente de arrastre de un semicírculo $C_D = 1,2$. Primero se puede vincular la velocidad alejada del aerogenerador con la velocidad a la entrada del mismo a través de la siguiente ecuación.

$$v_{alejado} = v_{entrada} + \frac{T}{2\rho Q} \quad (4.3.1)$$

Siendo T el empuje, ρ la densidad y Q el caudal.

Utilizando la conservación de masa y las dimensiones que se muestran en Figura 4.3.8 y Figura 4.3.9, se obtiene la ecuación 4.3.2.

**Figura 4.3.8:** Medidas de parte superior del Aeromine.

$$v_3 = \frac{v_{1'} \cdot L_4 H_2 + v_{2'} \cdot L_1 H_1}{L_3 H_1} \quad (4.3.2)$$

Siendo $v_{1'}$ y $v_{2'}$ las velocidades a la entrada del aerogenerador de la parte inferior y superior, respectivamente y v_3 la velocidad a la salida del mismo. Estas veloci-

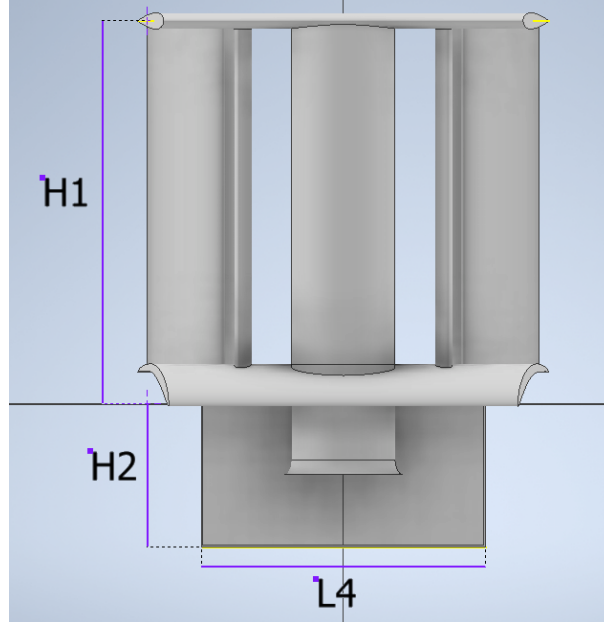


Figura 4.3.9: Medidas de frente al Aeromine.

des se pueden obtener a partir de la ecuación 4.3.1, calculando el empuje de cada componente tal cual se mencionó anteriormente.

Una vez se tiene esto, se pueden trazar líneas de flujo que vayan desde la entrada a puntos claves en el análisis de la operación de este aerogenerador. Estos puntos claves para la parte superior son en el sector con menor área de pasaje y a la salida del aerogenerador. Para la base se toma un punto dentro del cubo en el cual se considera flujo estanco.

Para modelar la parte superior se utilizan los puntos mostrados en la Figura 4.3.10. Y luego para la parte inferior se utilizan los puntos mostrados en la Figura 4.3.11. De aquí se puede utilizar Bernoulli y obtener la siguiente relación:

$$p_0 + \frac{v_0^2}{2g} = p_3 + \frac{v_3^2}{2g} \quad (4.3.3)$$

Y debido a la ecuación 4.3.2, se puede reescribir esto último como sigue:

$$p_3 = p_0 + \frac{v_0^2}{2g} - \frac{\left(\frac{v_{1'} \cdot L_4 H_2 + v_{2'} \cdot L_1 H_1}{L_3 H_1} \right)^2}{2g} \quad (4.3.4)$$

Como $v_{1'}$ y $v_{2'}$ se pueden relacionar con v_0 , la ecuación 4.3.4 depende de p_0 , v_0 , el empuje y caudal que circula.

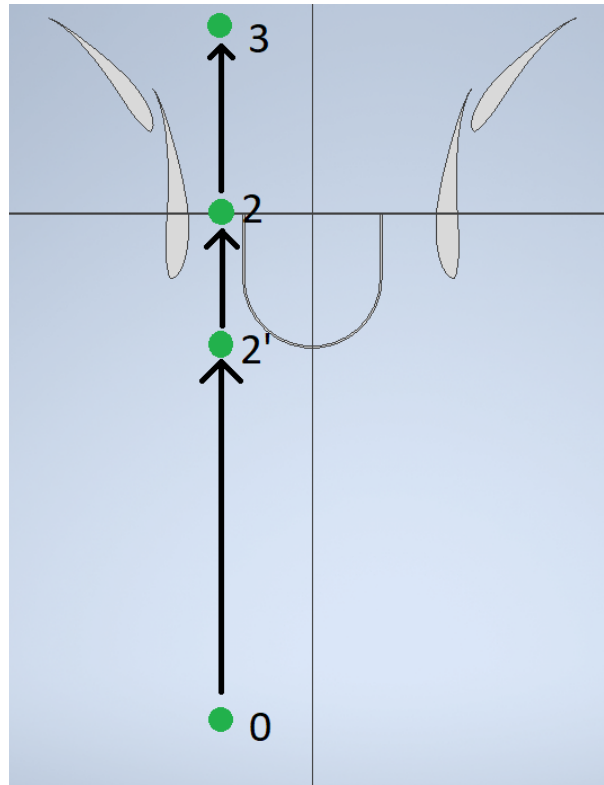


Figura 4.3.10: Parte superior del Aeromine con líneas de flujo.

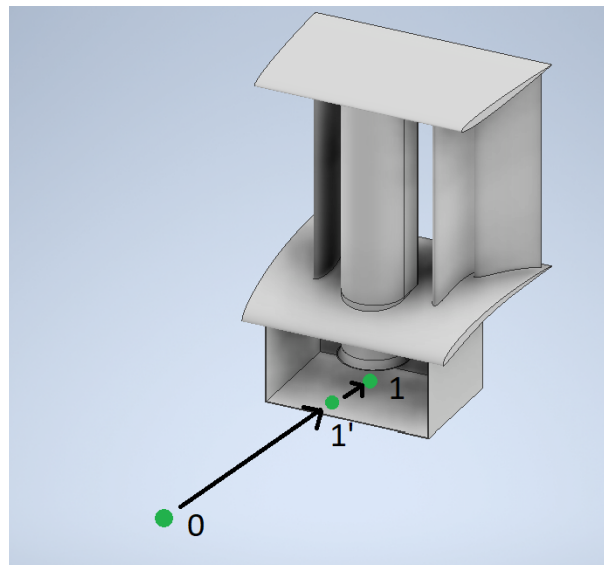


Figura 4.3.11: Parte inferior del Aeromine con líneas de flujo.

4.3.3. Viento en la Azotea

Como fue desarrollado en la Subsección 3.3, se cuenta con la posibilidad de estudiar las condiciones reales de viento disponibles en la azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería. Con el objetivo de determinar la conveniencia de una envolvente de estas características, se busca determinar si se registran efectivamente mayores módulos de viento en la cornisa que a mayores alturas, para ciertas direcciones de viento.

Como instrumentos se emplearon dos anemómetros, uno ultrasónico a mayor altura (mide dirección y módulo de la velocidad) y otro de cazoletas (solo mide módulo).

Recopilando numerosos días de registro conjunto y restringiéndose a las direcciones de viento incidente mencionadas, se seleccionan 18 días de datos. En 11 de ellos, se tiene un claro lapso de tiempo con viento incidente de esa dirección, en los que el módulo del anemómetro de cazoletas supera al del ultrasónico. Seis (6) de los restantes días tienen un registro considerado 'ruidoso' y más parejo, mientras que solo uno (1) muestra lo contrario.

Este patrón de mayor velocidad a menor altura, en su mayoría, se alinea consistentemente con el efecto de bloqueo anticipado debido a la presencia del edificio.

A continuación, la Tabla 4.3.1 resume los valores medios de viento registrado por cada anemómetro y la dirección incidente para algunas de las fechas seleccionadas. Además, la Figura 4.3.12 contiene tres gráficos de fechas seleccionadas que permiten visualizar el comportamiento descrito anteriormente.

Tabla 4.3.1: Medias experimentales tomadas por los anemómetros en la azotea del edificio de la Facultad de Ingeniería. Se seleccionan 5 fechas. C y U representan al anemómetro de cazoletas y al ultrasónico, respectivamente.

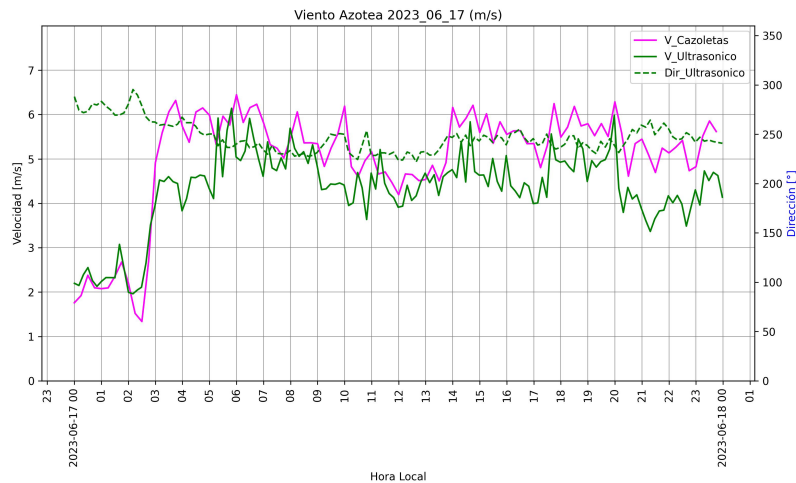
Fecha	Hora	V_{C_prom} [m/s]	V_{U_prom} [m/s]	Dir_{U_prom} [°]	C-U [m/s]	C/U
16/06/23	6-17	1,513	1,112	258,54	0,401	1,361
17/06/23	3-23	5,420	4,584	242,40	0,836	1,182
18/06/23	0-15	3,687	3,051	250,68	0,636	1,208
23/07/23	7-18	3,550	2,851	256,37	0,699	1,245
16/09/23	11-17	3,946	3,324	259,56	0,622	1,187

Las subfiguras 4.3.12a, 4.3.12b y 4.3.12c se corresponden con la segunda, tercera y última fila de la Tabla 4.3.1, respectivamente. En ésta última se detalla el rango horario en el cual la dirección de viento incidente coincide con la de interés, y los valores medios de velocidades y dirección en esos rangos. A su vez, las dos últimas columnas representan la resta y el cociente de los módulos de velocidad del anemómetro de cazoletas (C) y el ultrasónico (U). En las fechas mencionadas, la diferencia de velocidades ronda los $0,5\text{ m/s}$ y un aumento del 18 – 20 %.

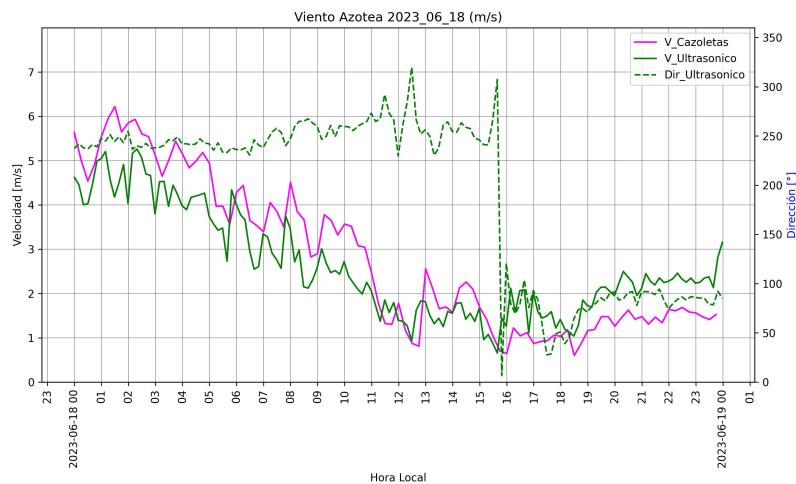
Las condiciones disponibles sugieren que, ubicar estratégicamente un aerogenerador en la cornisa del edificio podría capitalizar la concentración de líneas de flujo que este fenómeno provoca, permitiendo la extracción de una potencia mayor.

4.3.4. Ensayo de Aeromine

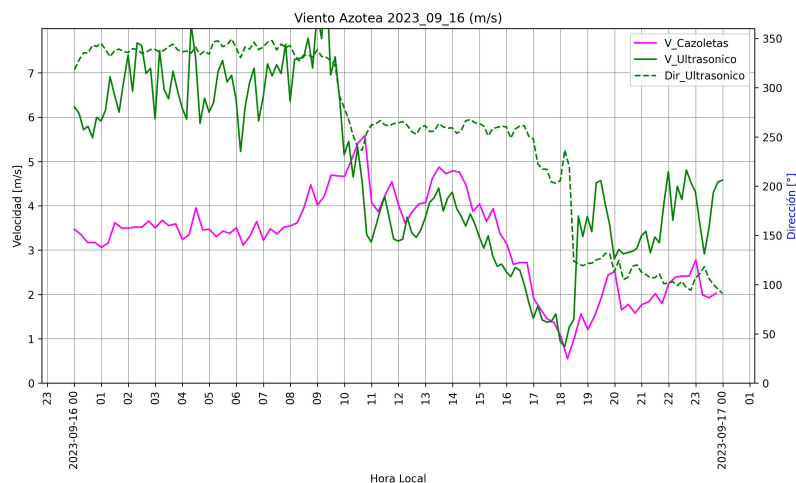
El modelo de la envolvente Aeromine utilizado en el ensayo fue realizado en PLA, con impresión en 3D. Ya que la impresora con la que se cuenta tiene un volumen máximo de impresión menor al tamaño del modelo, se tuvo que dividir la envolvente



(a) Gráfico del 17 de junio del 2023.



(b) Gráfico del 18 de junio del 2023.



(c) Gráfico del 16 de septiembre del 2023.

Figura 4.3.12: Gráficos de módulos y direcciones del viento en la azotea de la Facultad de Ingeniería, obtenidos mediante anemómetros ultrasónicos y de cazoletas. Se presentan promedios quinceminutales.

en varias partes para poder imprimirlas por separado y luego ensamblarlas. También, para la división de piezas, se tuvo en cuenta que la impresora 3D genera estructuras de soporte a la hora de imprimir, la cual debe ser cortada y extraída antes del ensamblaje.

Se dividió la envolvente en un total de trece piezas. La base, desde el perfil aerodinámico horizontal hacia abajo, se dividió en seis piezas, de forma simétrica con respecto al centro del modelo. Por un lado se imprimió el perfil horizontal, con parte de las columnas verticales de la parte superior, dividido en cuatro secciones. Dos de estas cuatro secciones son los extremos del perfil, que se le incluyó un sistema de encastre para el ensamblaje junto a las partes centrales(4.3.13e). Estos extremos están aislados de la impresión de las paredes y piso de la caja de la base, siendo estas paredes y pisos impresas como una pieza más por lado (4.3.13f), y luego pegadas con adhesivo epoxi. Las otras dos piezas de la base, componen la sección central(4.3.13d), la cual se dividió en estas dos piezas para poder retirar la estructura de soporte generada por la impresión 3D sin dañar la envolvente, y también, cumple la función de poder ajustar la malla colocada en la zona del rotor. Las piezas de los extremos del perfil, se encastran y pegan al centro con adhesivo epoxi.

Por otro lado, se imprimieron las columnas(4.3.13c), la central es solamente una columna que cuenta con un semicírculo y dos paredes rectas a los laterales. Las columnas en forma de perfil se imprimieron con un hueco en la zona de mayor espesor, para pasar por estos huecos varillas de 5mm.

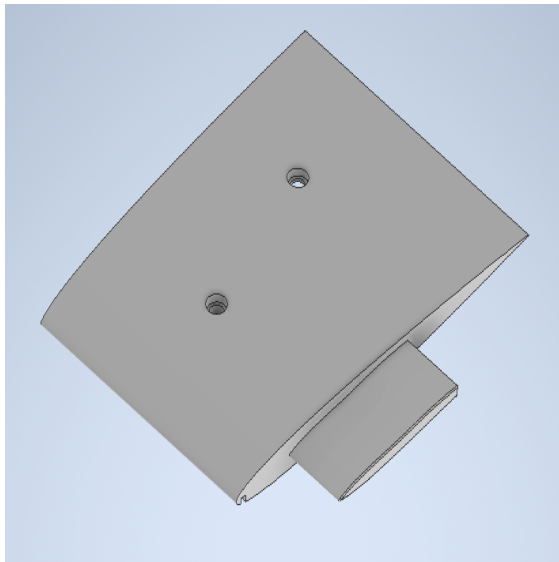
Por último, se imprimió el techo(4.3.13a), con huecos para pasar las varillas antes mencionadas y un sistema de encaje para las cinco columnas(4.3.13b), de forma de que tengan una única posición, y no hayan errores a la hora del montaje.

Para el ensamblaje se fijaron las varillas en la sección de las columnas con forma de perfiles aerodinámicos que se imprimieron con el perfil horizontal, las cuales también contaban con el hueco para una varilla de 5mm, utilizando adhesivo epoxi. Luego se colocan las columnas con forma de perfiles en las varilla, y la columna central se adhiere, con adhesivo epoxi, solamente sobre uno de los dos lados centrales de la parte correspondiente en la base. Finalmente se coloca el techo con el sistema de encaje, y se colocan tuercas por encima del techo en las varillas, para que así queden fijadas todas las piezas de la envolvente.

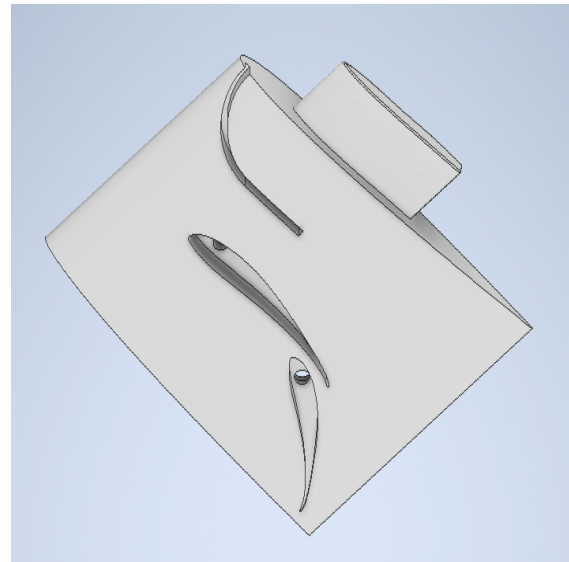
En la Figura 4.3.13 se presentan los modelos 3D de las piezas que se imprimieron para fabricar el modelo del ensayo del Aeromine. En las imágenes se muestran solamente las piezas impresas para la mitad del modelo. Las piezas restantes son simétricas, teniendo en cuenta la diferencia que se tiene por los sistemas de encastre.

Se tiene que las paredes y el piso de la base del Aeromine son delgadas, por lo que se decide reforzar las paredes traseras y el piso con una base metálica, hecha de chapa, por fuera de la envolvente. Se utiliza una chapa de acero calibre 18, doblada en dos secciones, para que tenga la forma del piso y paredes. Se fija la envolvente a esta chapa con dos tornillos de 4mm en la pared trasera y dos tornillos en la base, que también son utilizados para fijar la envolvente a la base del ensayo.

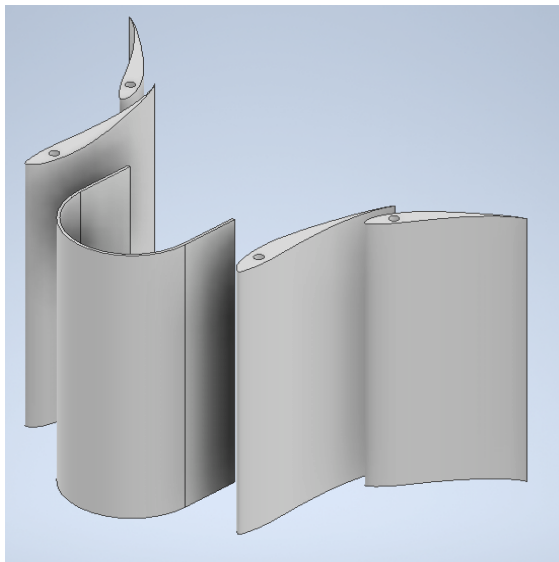
Para poder visualizar las líneas de flujo a la salida de la envolvente, se realizó el sistema de encaje y fijación con tornillos del techo, pensando en que este techo sea postizo, pudiendo sacarlo al momento de realizar la visualización necesaria. En el ensayo de visualización en cuestión, se utilizó un techo de acrílico, al cual se le realizaron cortes, en una cortadora láser, para poder pasar las varillas roscadas y así fijarlo a la envolvente.



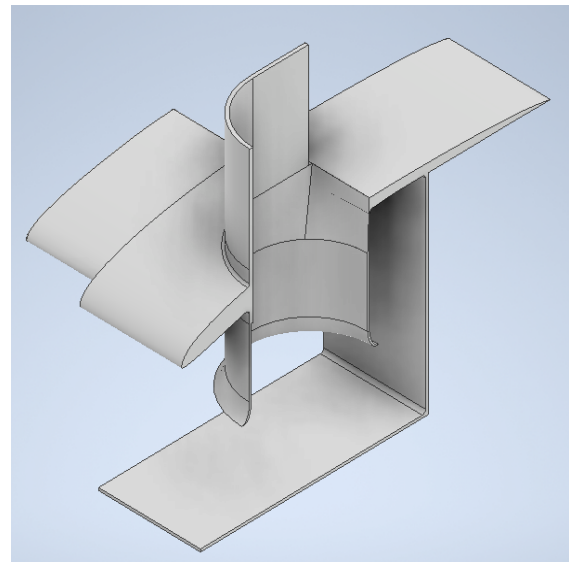
(a)



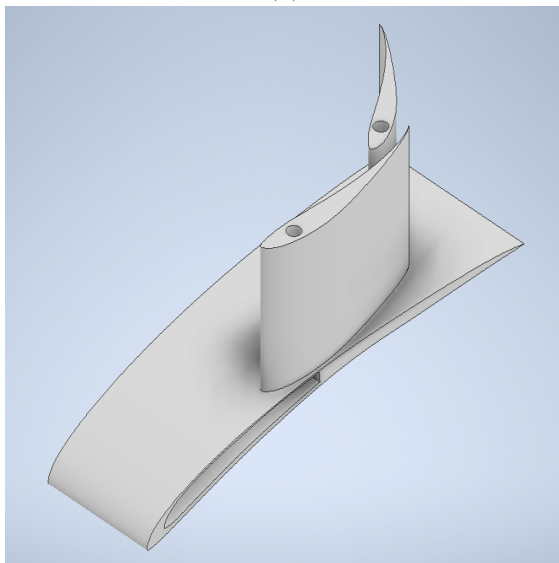
(b)



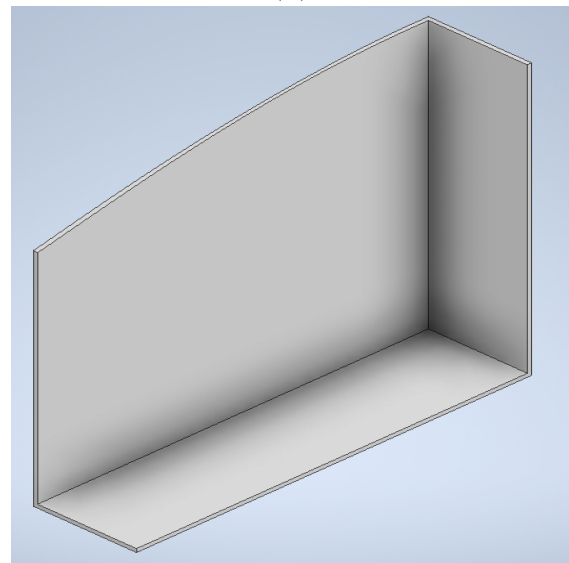
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.3.13: Piezas impresas para fabricar el modelo a ensayar.

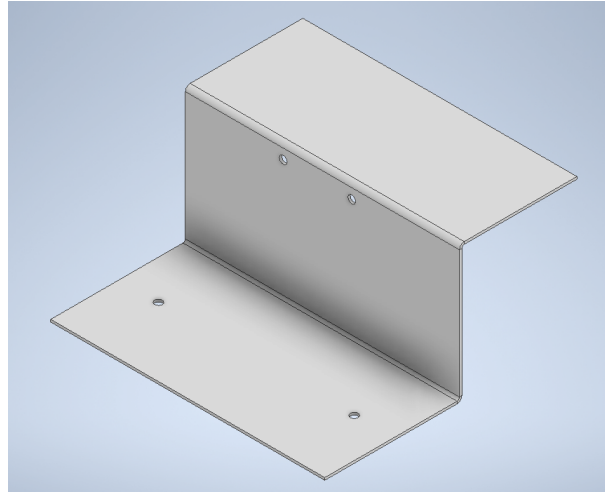


Figura 4.3.14: Representación de la chapa utilizada para dar soporte al modelo de Aeromine ensayado.

Utilizando la cortadora láser, se hicieron anillos de acrílico, para colocar una malla entre dos de estos y pegarlos. De esta forma se fijan las distintas mallas a estructuras rígidas que se pueden colocar dentro del modelo.



Figura 4.3.15: Mallas pegadas al soporte acrílico.

El ensamblaje planificado, cuenta con tener la base dividida en dos piezas finales, con la parte superior de la columna central adherida a solamente una de estas dos piezas. Con esto en mente, se puede conseguir poner una malla entre estas dos piezas, y luego atornillar las dos piezas a la base metálica, quedando la malla fija en su lugar. Luego se colocan el resto de columnas y finalmente el techo.

Tal como se mencionó en la Sección 3.1.3, debido a las dimensiones reducidas del modelo a ensayar, no es posible colocar un rotor. En su lugar, se coloca una malla que simule las pérdidas de carga que experimentaría el fluido por el funcionamiento de un rotor. Para poder definir las mallas a utilizar, primero se realiza un ensayo de mallas, el cual se desarrolla en A.9.

El modelo de envolvente Aeromine tiene un funcionamiento distinto a las demás envolventes planteadas, con una complejidad mayor por estar compuesta por varias piezas que buscan obtener distintos efectos. Para ver el efecto cualitativo de la presencia de la envolvente en el flujo del viento, se realiza un primer ensayo de visualización.

Luego de analizada la dinámica de las líneas de flujo, se utiliza una disposición similar con el agregado de instrumentos de medida para ver el efecto cuantitativo.

Ya que el diseño de la envolvente contempla su instalación en la cima de un edificio, en ambos ensayos se simula una obstrucción en el piso del túnel de viento, sobre la cual se coloca la envolvente. Se utiliza una estructura de madera de altura 0,57m

(1,5 veces la altura del modelo a ensayar) y largo igual al ancho de la zona de ensayo (2,25m). La profundidad de 0,72m es tal que permite el soporte de la estructura de la envolvente, junto con algún instrumento requerido en los ensayos tal como se muestra en la figura 4.3.16 y representa 3 veces la profundidad del modelo.

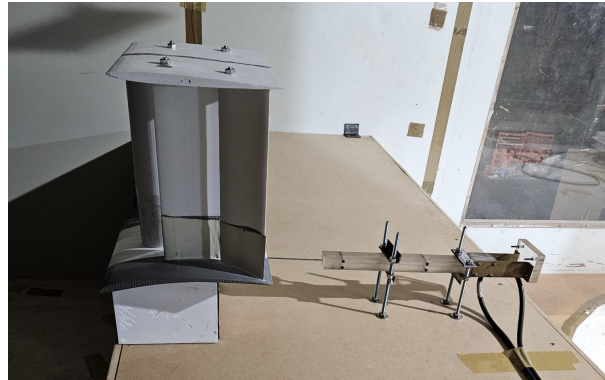


Figura 4.3.16: Micropitot colcado sobre la base de madera para el ensayo cuantitativo del Aeromine.

4.3.4.1 Ensayo de Visualización - Cualitativo

En este primer ensayo se utiliza el túnel de viento a bajas velocidades (en torno a los 2 m/s) y la disposición de la envolvente anteriormente descripta. Esto permite que una persona permanezca dentro del túnel con una máquina de humo, posicionando la salida del humo en distintas ubicaciones.

Se colocó un plano láser para mejorar la visualización. Con esto, se logra ver las líneas de flujo trazadas por el humo como se puede ver en la Figura 4.3.17.

Este ensayo fue de gran utilidad posteriormente, ya que las observaciones fueron imprescindibles para corregir el modelo a ensayar.

En primera instancia, como puede verse en las figuras 4.3.16 y 4.3.18, el piso de la envolvente fue atornillado directamente a la madera que simula la presencia de un edificio. Los resultados visuales para esta configuración fueron poco favorables y llevaron a replantearse la misma, y corregir el modelo.

Como se observa en la figura 4.3.19 y a partir de lo visto en el ensayo, la cantidad de humo que se ve ingresar a la entrada del dispositivo es relativamente baja, la mayor parte del humo se desvía hacia la parte superior de la envolvente. Debido a esto, se toma la decisión de realizar unas medidas primarias de velocidad para evaluar si se está teniendo algún efecto positivo.

Estas medidas dieron por debajo de lo esperado, obteniendo velocidades dentro del tubo del Aeromine por debajo de la velocidad libre (el procedimiento y los resultados de este primer ensayo cuantitativo se presentan en la sección a continuación), por lo que se deduce que el efecto de 'succión' no estaba a la altura de las expectativas. Con una detenida inspección de las imágenes, y volviendo a consultar la referencia, se opta por elevar el dispositivo como indica la Figura 4.3.20.

Se cree que en la posición original, el desprendimiento de capa límite generada en la cornisa disminuye significativamente el área efectiva de entrada de aire. Además, permitiendo el pasaje de aire por debajo de la misma, se podría tener un efecto Venturi que favorezca la succión y captura de aire en la entrada de la envolvente.



Figura 4.3.17: Utilización de láser para marcar planos.



Figura 4.3.18: Modelo Aeromine montado sin separación del "techo".



Figura 4.3.19: Líneas de flujo marcadas por el humo en ensayo contra el piso.

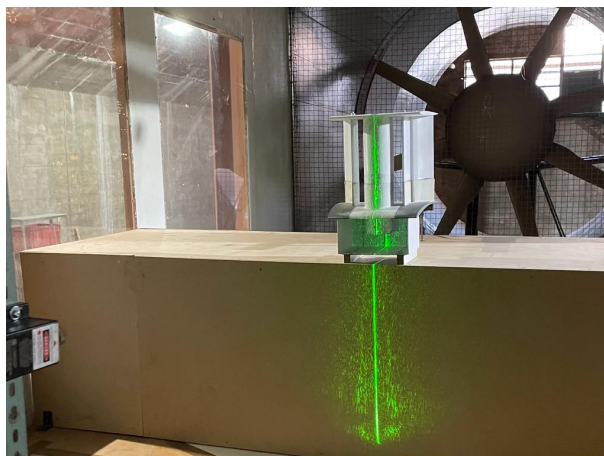


Figura 4.3.20: Dispositivo Aeromine elevado 25 mm.

Estas hipótesis se respaldan en los resultados cualitativos del ensayo de visualización y, cuantitativamente con medidas primarias posteriores.

Con las restricciones del momento en cuanto a tiempo y materiales disponibles, se estimó y utilizó una elevación de aproximadamente un tercio de la parte inferior de la envolvente.

Al elevar el modelo 25 mm (Figura 4.3.20) se observa una mayor succión de la envolvente. Las Figuras 4.3.21a y 4.3.21b son imágenes tomadas bajo estas condiciones.

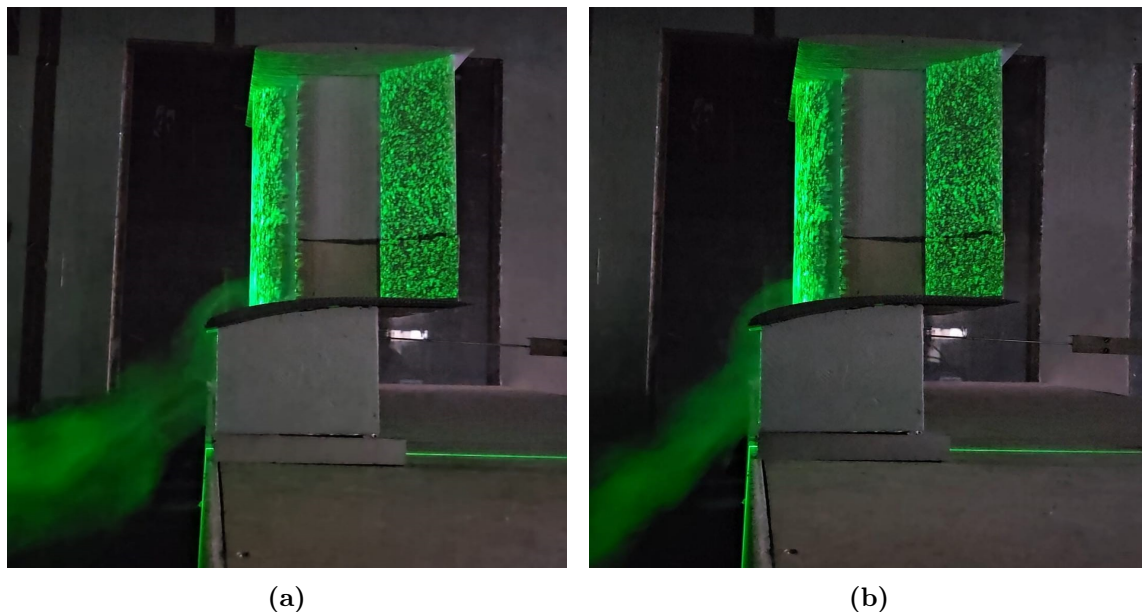


Figura 4.3.21: Líneas de flujo marcadas por el humo con modelo Aeromine levantado 25mm.

Se ve claramente que hay un mayor flujo ingresando en la envolvente. Sin embargo, de igual forma que en el caso anterior, existe un bloqueo que hace que se desvíen líneas de flujo hacia la parte superior de la misma.

Cabe destacar que, si bien se asegura que lo adecuado es elevar el dispositivo, queda por determinar la altura óptima.

4.3.4.2 Ensayo de medición - Cuantitativo

El ensayo de medición tiene por objetivo estimar el coeficiente de potencia que tendría un rotor al ser colocado en esta envolvente.

Debido a las restricciones dimensionales, el modelo no permite la colocación de un rotor, y se representa el mismo mediante pérdidas de carga. En la sección A.9 se ensayan distintas opciones de mallas, para esta finalidad.

Además de la disposición descrita en 4.3.4, se utilizan tres instrumentos. El primero es un tubo pitot instalado en el túnel de viento, en el plano medio de la caja que actúa de bloqueo para simular el edificio, a una altura de 1,80m, que junto a un micromanómetro mide la presión dinámica del viento libre. El segundo, de funcionamiento análogo, es un micropitot que se utiliza con otro micromanómetro para medir la presión dinámica dentro del tubo vertical, inmediatamente antes de donde iría el

rotor o malla. Éste permite estimar la energía cinética que circula por la sección de interés. Y el último instrumento es un termómetro, colocado en el túnel de viento. Con los datos tomados por estos instrumentos se pueden calcular la velocidad de viento libre y la velocidad dentro del tubo vertical.

El micropitot es un tubo de 2mm de espesor, con una curva de ángulo 90 y que sobresale 27mm. Para colocarlo se realizó una pequeña perforación en la parte de atrás de la envolvente (pared posterior y tubo vertical), sellada con cinta adhesiva. A su vez se construyó una pequeña estructura que sostenga al instrumento horizontalmente, atornillado a la estructura de madera, y permita su movimiento según el eje del túnel (Figura 4.3.16).

Con lo anterior, se realizaron distintas configuraciones de medidas:

- 0 - Sin elevación
- I - Elevación de 25 mm
 - a: Sin malla
 - b: Con malla fina de alambre
 - c: Con malla fina de plástico
- II - Elevación de 46,5 mm
 - a: Sin malla
 - b: Con malla fina de alambre
 - c: Con malla fina de plástico

Configuración 0

Se le adjudica el número 0 a la configuración original, corregida durante el ensayo de visualización, en la cual la envolvente se encontraba colocada inmediatamente sobre la cornisa.

En este caso, no se tomaron medidas formales con promedios temporales de los registros de los manómetros. Sin embargo, sí se realizaron observaciones puntuales, para tener una idea de la comparación dentro del tubo vertical (micropitot) y el viento libre fuera (pitot).

A continuación, en la Tabla 4.3.2 se ejemplifica, a groso modo, el contraste entre los casos con/sin malla, y sin elevar/elevado 25mm. No cuenta con valores de velocidad. Cada caso queda caracterizado por la frecuencia de funcionamiento del túnel de viento. Las presiones manométricas del pitot y micropitot, son indicativas de las velocidades de viento libre y por la sección de interés, respectivamente.

Cabe recalcar que estos valores fueron tomados y promediados manualmente, por lo que solo se presentan a modo de referencia.

Como referencia, tener la misma presión manométrica en ambos instrumentos implica que el diseño de la envolvente logra capturar suficiente aire para contrarrestar el bloqueo que impone por sí misma. El efecto neto es nulo, y significa que se tiene la misma velocidad dentro y fuera de la envolvente. Si la relación de presiones micropitot-pitot es mayor a uno, se considera que la presencia de la envolvente es aerodinámicamente favorable, ya que se logra en ella una mayor velocidad.

El principal aporte de la tabla anterior radica en que, al elevar el dispositivo cierta altura por encima de la cornisa, la velocidad en la sección de interés experimenta un

Tabla 4.3.2: Valores experimentales tomados manualmente, que justifican la elevación del dispositivo.

Punto Central			
Frecuencia [Hz]	$P_{pitot(libre)}$ [Pa]	$P_{micropitot(tubo)}$ [Pa]	T_{tunel} [°C]
Sin Malla			
10	28,2	25,91	18,2
15	64,9	59,51	18,2
20	115,6	102,29	18,2
22	144,4	124,64	18,2
24	167,0	147,36	18,2
Con Malla			
10	27,4	18,28	18,2
15	64,4	41,73	18,2
20	117,6	74,03	18,2
22	140,3	85,13	18,2
24	167,2	104,60	18,2
Sin Malla elevado 25mm			
10	28,0	46,63	18,5
15	64,5	105,22	18,2
20	116,0	179,14	18,2
22	140,0	218,75	18,2
Con Malla elevado 25mm			
10	27,8	26,00	18,2
15	65,0	60,28	18,0
20	115,5	105,80	18,0
22	141,6	116,85	18,0

importante aumento. El caso 'Sin Malla' es el más evidente, en el cuál la indicación del micropitot pasa a superar la del pitot, con aumentos desde el 75,5 % hasta el 80 %. La colocación de una malla reduce la medida tomada por el micropitot. Sin embargo, el aumento es en torno al 30 %, y la relación micropitot/pitot pasa de 0,64 a 0,9.

Configuración I

Esta configuración se corresponde con la **elevación de 25mm** del dispositivo Aeromine.

En el caso de las medidas tomadas, se utilizó un software para tener alta frecuencia de datos, y valores más confiables.

Se evaluaron tres casos distintos: sin malla, con malla fina de alambre y fina de plástico. En cada uno de ellos, además, se colocó el micropitot en tres posiciones distintas: a 1/2, 1/4 y 3/4 de la pared anterior del tubo vertical, designadas como 'medio', 'atras' y 'adelante' respectivamente.

Con esto se busca un indicio de la variación que experimenta la velocidad en la sección, para realizar hipótesis razonables a la hora de integrarla en el área de interés. Por ejemplo, se puede modelar la realidad con una suma ponderada.

En el anexo A.10 se tienen las tablas A.10.1, A.10.2 y A.10.3 que exponen los registros de presiones obtenidas en el ensayo y las velocidades calculadas con esta configuración.

La Figura 4.3.22 muestra las velocidades obtenidas en el ensayo con la configuración I a, con la recta en donde la velocidad de viento libre es igual a la velocidad del viento dentro del tubo del Aeromine. Se puede apreciar que la velocidad obtenida en este caso es mayor a la del viento libre, teniendo así esta envolvente por si misma un efecto beneficioso para la colocación de un rotor dentro del tubo. Cabe aclarar que esta situación en donde se obtuvieron mayores velocidades dentro de la envolvente que alejado de la misma, es la situación más cercana a lo ideal u optimista que se puede obtener, al no tener una pérdida de carga impuesta por el rotor.

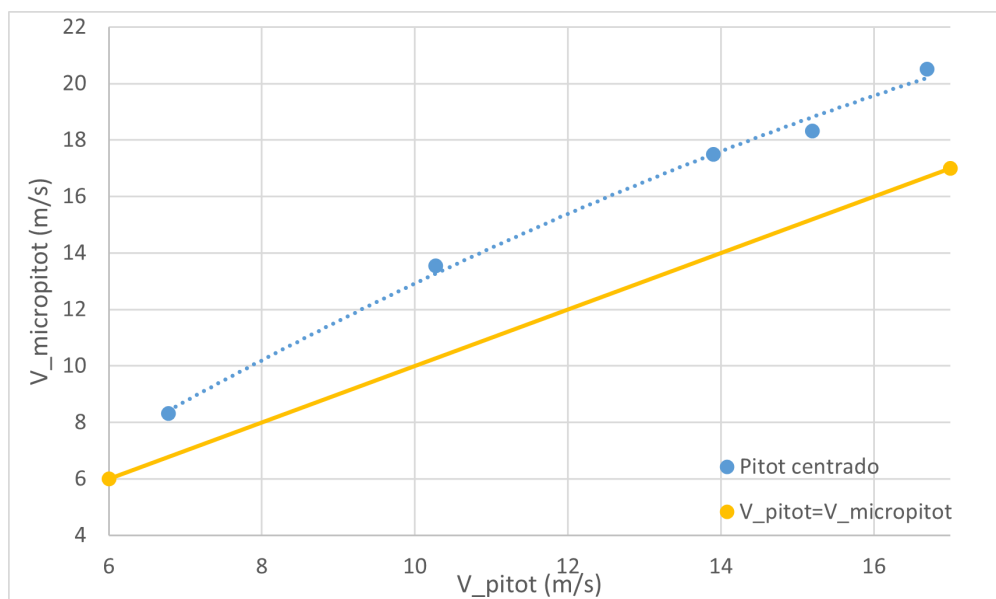


Figura 4.3.22: Velocidades obtenidas en la configuración I a.

Para poder evaluar el rendimiento del aerogenerador, en un caso más cercano al real, se colocan dos de las mallas ensayadas en la sección A.9. La primer malla

colocada es la fina de alambre, con la cual se obtuvo menor pérdida de carga. Los resultados obtenidos de este ensayo se presentan en la Figura 4.3.23. En este caso se obtuvieron velocidades de viento menores dentro de la envolvente que fuera de la misma, demostrando que si bien la envolvente tiene un efecto beneficioso para el aerogenerador, con la presencia de una pérdida de carga en el tubo vertical el beneficio se ve disminuido. Aún así se tienen velocidades dentro del tubo cercanas a las del viento libre, lo cual ya se toma como un resultado positivo. Otro resultado a destacar es que las velocidades dentro del tubo, en las tres posiciones en las que se colocó el micropitot, son de magnitud similar, pudiendo así afirmar que se tiene una gran uniformidad en la sección.

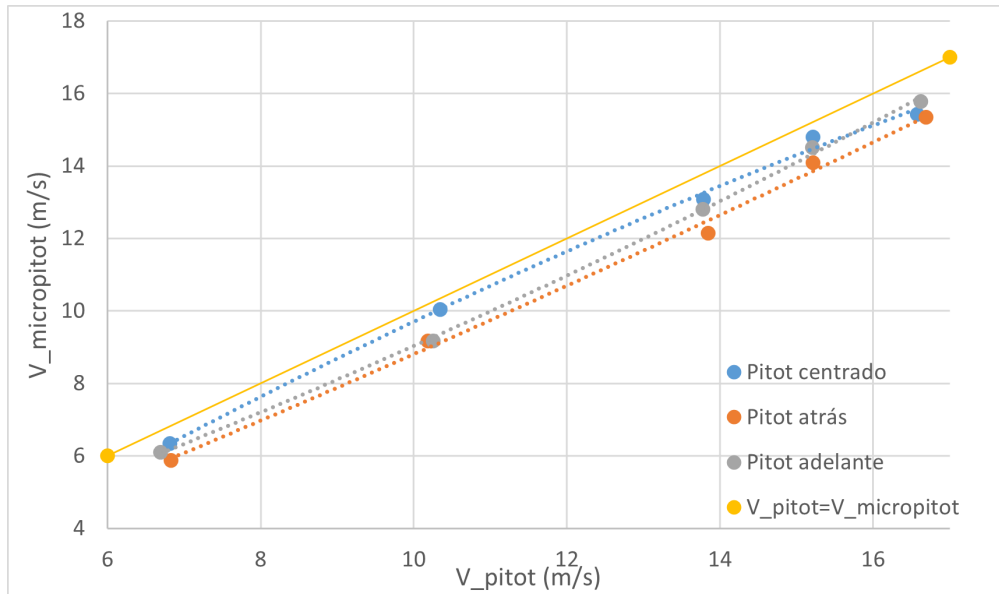


Figura 4.3.23: Velocidades obtenidas en la configuración I b.

En la figura 4.3.24 se presentan los resultados obtenidos con la configuración 1c, en donde se tiene una malla con mayor pérdida de carga que la anterior, por lo que se tienen velocidades menores que en el caso anterior. Aún así, se evalúa de forma positiva esta configuración, ya que se tiene una gran pérdida de carga y la velocidad dentro del tubo tiene una magnitud mayor que el 70 % de la velocidad de viento libre. Nuevamente se nota un comportamiento uniforme de la velocidad del viento en la sección dentro del tubo vertical.

Como ya se mencionó, en todas las configuraciones (a, b y c) se obtienen valores de velocidades similares para las tres configuraciones del micropitot. Como consecuencia, se justifica considerar una velocidad promediada, uniforme, en la sección para los cálculos de potencia.

Para analizar el desempeño del aerogenerador, se utiliza el coeficiente de potencia en función de la velocidad de viento libre. Se debe definir el área a utilizar en el cálculo del C_P , en primera instancia se toma el área frontal ocupada por el modelo (37,5cmx28cm).

Durante el ensayo realizado, se llegaron a valores de C_P para la configuración Ib de 3 % y cercanos al 2 % para la configuración Ic.

Se puede notar que los valores obtenidos de C_P son bajos, menos a 0,1, lo cual puede resultar contradictorio si se piensa en los resultados de las velocidades de viento. Pero lo que se debe tener en cuenta es que el área bloqueada por el Aeromine

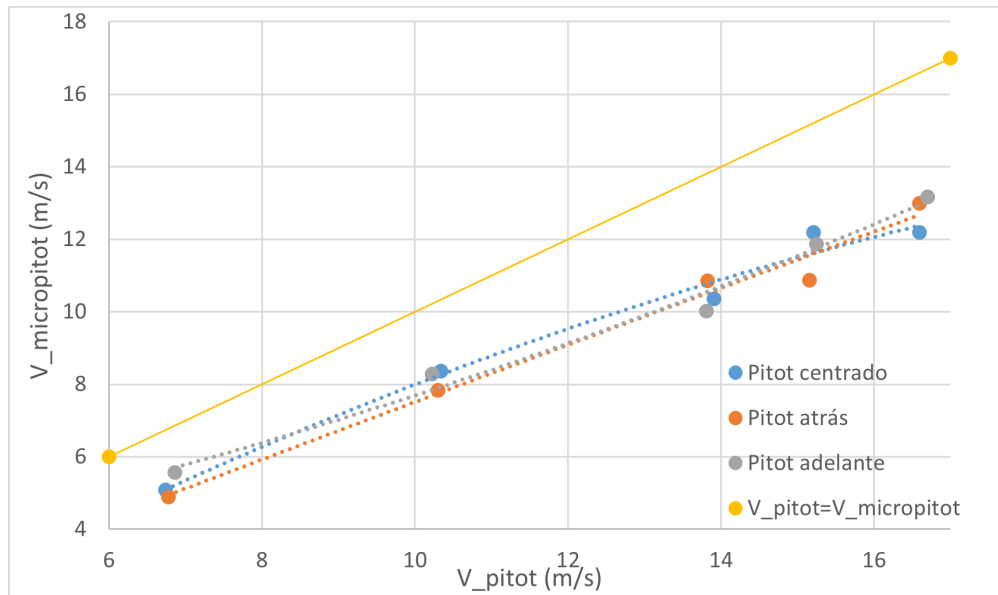


Figura 4.3.24: Velocidades obtenidas en la configuración I c.

es 27 veces mayor al área del rotor, reduciendo así el coeficiente de potencia por definición. Lo que se puede deducir, es que si bien se logra tener velocidades muy cercanas a la del viento libre dentro del aerogenerador, éste ocupa una gran área para poder lograr este efecto. Otro punto a tener en cuenta, es que el C_P calculado no tiene en cuenta la potencia obtenida por un rotor, sino que es una relación de la potencia disponible en la sección del rotor sobre la potencia disponible en toda la sección frontal de la envolvente.

Configuración II

Dados los alentadores resultados obtenidos al elevar el dispositivo de la cornisa, se realizó una tercera configuración elevando el dispositivo aún más. La Configuración II corresponde con una **elevación mayor**, de 46,5mm.

De manera análoga a la Configuración I, las medidas fueron tomadas con alta frecuencia, cambiando la posición del micropitot en la sección, y variando entre los casos con y sin malla.

En el anexo A.10 se tiene la tabla A.10.4 que expone los registros del experimento en esta configuración.

La Figura 4.3.25 ilustra la variación de la velocidad en distintos puntos de la sección de interés, bajo esta configuración.

Al compararla con la Figura 4.3.23, a simple vista se observa una mayor dispersión de los valores en función de la ubicación del dispositivo.

Al momento de realizar las medidas, se tuvo un importante aumento de los valores de dispersión, lo cual dificultó el proceso - se requería un gran número de repeticiones de toma de datos para obtener series con rangos menores al 60 – 70 %.

Con esto cuenta, se realizan observaciones cualitativas.

Se tiene un cierto aumento de velocidad en la medida central, mientras que en los extremos ésta tiende a disminuir. Además, se observa que la medida 'atrás' (3/4 diámetro desde pared anterior) decae más que la medida 'adelante' (1/4 diámetro desde pared anterior).

Se conjetura que la nueva altura es demasiado pronunciada, por lo que los resultados están afectados por una mayor turbulencia a la entrada, tornándolos también po-

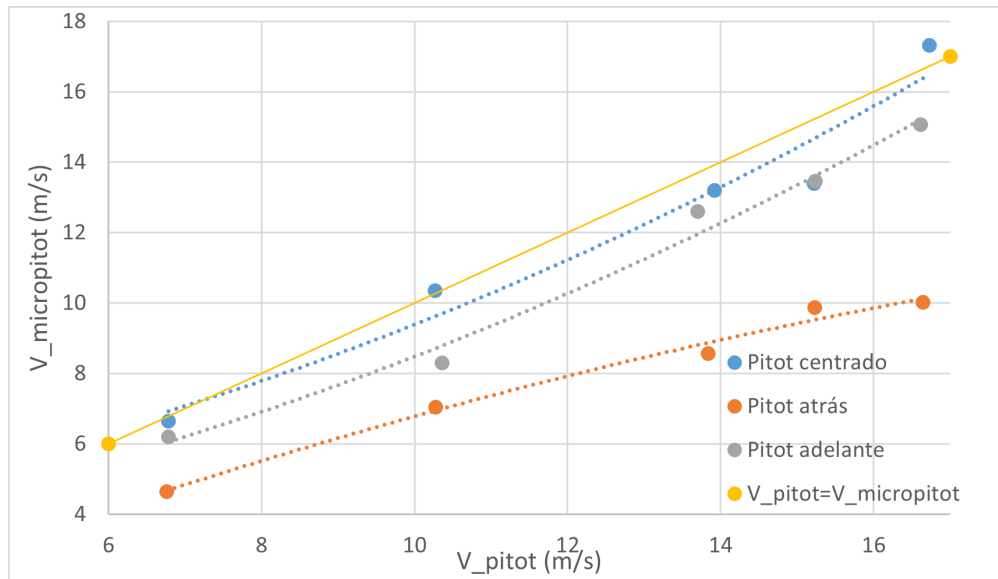


Figura 4.3.25: Velocidades obtenidas en la configuración II b.

co robustos. Por otro lado, los patrones de velocidades descriptos en la Figura 4.3.25 no respaldan la hipótesis de uniformidad utilizada en la configuración anterior, ni son suficientes para caracterizar el perfil de velocidades de la sección.

Sin poder realizar hipótesis razonablemente justificadas para el perfil en la sección, y sumada la inestabilidad de las medidas, carece de sentido continuar con el análisis del caso.

De lo contrario, se debería volver a tomar medidas, considerando una mayor cantidad de puntos en la sección.

4.3.5. Conclusiones

El proceso de ingeniería inversa realizado sobre el aparato fue lo mas riguroso posible interpretando de la manera mas fehaciente posible el flujo de aire que rodea y circula por la envolvente. Se buscó imitar la envolvente modelo de Aeromine, utilizando fotos de los modelos oficiales e imágenes de la patente, por lo que no se buscó optimizar la misma variando los perfiles aerodinámicos utilizados, sus ángulos con respecto al flujo y sus largos de cuerda. Tampoco se buscó optimizar las demás características geométricas de la envolvente, llegando a un modelo que se rige por lo presentado por la empresa diseñadora de esta envolvente, pero no necesariamente se plantea que estas características sean las óptimas.

En cuanto al desempeño de la envolvente, no se lograron obtener valores de C_P elevados a partir de los ensayos realizados. Se entiende que en relación a las otras envolventes el valor de este coeficiente es menor debido a la relación del área frontal con respecto al área de la sección del rotor, la cual es 27 veces mayor. Los valores que se obtuvieron de C_P en el ensayo llegaron a un máximo de 3 %, pero se recuerda que este C_P no contempla el mecanismo de intercambio de potencia que realiza el rotor, sino que es una relación de la potencia total disponible en la sección del rotor con respecto a la potencia atmosférica en la sección frontal del Aeromine. Con este valor de C_P , para una envolvente de 3m de altura y una velocidad de viento de 5m/s se llega a una potencia disponible de 16W en la sección donde se ubicaría el rotor. Con esto se muestra que esta envolvente, si bien aerodinamicamente es efectiva al obtener velocidades dentro de la sección del rotor aproximadamente iguales a la velocidad del viento libre, no es efectiva en la generación de energía.

Un resultado muy importante del ensayo de esta envolvente es la mejora en el funcionamiento de la envolvente al elevarla de la base. Se pudo obtener una mejora sustancial en las velocidades de viento medidas al elevar la envolvente del piso de la base que simula un edificio, concluyendo así en la importancia de instalar envolvente con cierta separación del suelo, aprovechando el aumento de velocidad dado por la obstrucción del edificio sobre el flujo del viento. Esta elevación, si bien no fue optimizada, se logró medir y comprobar su efecto.

En cuanto a su construcción, se destaca de este tipo de envolvente su gran seguridad para el entorno que la rodea, así como su potencial menor contaminación acústica.

Por otro lado se debe tener en cuenta que Aeromine tiene mayor valor económico que otro tipo de envolventes, lo que la hace aún menos viable que otras opciones en el mercado. De todas formas, la empresa desarrolladora esta en una etapa incipiente de producción, por lo que la descripción de la tecnología es muy reciente en el sitio web de la empresa, dando lugar a mejoras aún no presentadas al público.

4.4. Aspectos constructivos

Esta última sección del capítulo se centra en un análisis comparativo de las tres principales familias de envolventes considerando aspectos prácticos, facilidad constructiva y evaluación económica preliminar.

La fabricación del aerogenerador completo varía en función de la complejidad de cada envolvente, considerando la fabricación de las piezas, anclajes y el pre-ensamblado previo a la entrega. En términos generales, el diseño del rotor, los anclajes al generador y las piezas auxiliares (como convertidores de corriente o sistemas de almacenaje de la energía) suponen el mismo tiempo de trabajo para todas las envolventes, aunque el diseño específico del rotor se adapte a cada situación particular.

Las envolventes tipo falange y concentrador de flujo **sin perfiles aerodinámicos** requieren un tiempo de fabricación relativamente corto debido a la simplicidad de su geometría y escasos detalles. La utilización de máquinas cilindradoras de chapa y cortadoras computarizadas brinda precisión y agiliza significativamente el tiempo del proceso, al igual que utilizando matrices de prensa hidráulica. Asimismo, se destaca que el peso de estas envolventes es inferior a las demás, ya que se construyen íntegramente con una sola lámina de metal. Este aspecto facilita el transporte y montaje. Esto es crucial, permitiendo incluso que la envolvente llegue pre-ensamblada de fábrica, reduciendo la intervención del usuario final al anclaje y conexiones eléctricas. Cada usuario podría montar su aerogenerador.

En el caso de envolventes tipo falange y concentrador de flujo **con perfiles aerodinámicos**, la geometría específica implica el uso de materiales plásticos para su construcción óptima. Aunque se consideró el uso de materiales compuestos como la fibra de vidrio, el proceso de fabricación resulta largo, requiere de mano de obra calificada, y no justifica el valor añadido. Luego, existen dos opciones plausibles: el plástico inyectado y la chapa. El primero requiere de moldes y el segundo de matrices para colocar la prensa hidráulica que ejerce la fuerza sobre la chapa. El plástico inyectado se presenta como la opción más viable, ofreciendo un peso reducido, fabricación eficiente y un montaje sencillo (similar al caso anterior).

Luego, para una envolvente como la del **Aeromine**, las dimensiones de la estructura hacen que la construcción con láminas de plástico reforzadas con perfiles de acero sea la opción más adecuada. Cada estructura tiene muchos puntos de anclaje y cada pieza tiene su geometría particular y compleja, esto hace encarecer su construcción y diseño. A su vez, el montaje en el edificio se vuelve más complejo, dado que su superficie es casi cuatro veces mayor a los casos anteriores, requiriendo la división del aerogenerador en varias partes. La producción eléctrica que implicaría esta envolvente no justifica los costos de fabricación y montaje.

Finalmente, la Tabla 4.4.1 a continuación ofrece una comparación de los datos relevantes para cada tipo de envolvente, tomando como referencia una envolvente tipo falange recta ¹¹. Se asume que la generación eléctrica, las condiciones de diseño y el lugar de montaje son idénticos para los tres tipos de envolventes.

¹¹A los efectos de los aspectos constructivos de la tabla, se considera que la falange y el cono son equivalentes. Se diferencia en los casos con y sin perfiles.

Envolvente	Falanges sin perfil	Falanges con perfil	Aeromine
Tiempo de fabricación (un)	1	1	3
Tiempo de montaje (un)	1	1	4
Peso (un)	1	1	3
Complejidad de montaje	Sencillo	Sencillo	Complejo
Dimensiones finales (cm) (alto x ancho x profundidad)	240 x 200 x 150	240 x 200 x 150	300 x 150 x 150
Superficie (m ²)	11	11	43

Tabla 4.4.1: Tabla comparativa sobre aspectos constructivos de los tipos de envolventes. Se toma como referencia la falange-recto.

5. Diseño

De todas las variantes propuestas y analizadas en la sección anterior, se debe seleccionar un candidato que será considerado como el modelo final. Posteriormente, para esa envolvente específica, se procederá al rediseño de la geometría del rotor y establecerán hipótesis fundamentadas acerca de la influencia de la estructura de la envolvente. Este proceso culmina con un análisis mecánico que abarca tanto el rotor como la estructura de la envolvente, consolidando así las evaluaciones y resultados obtenidos en este capítulo.

La envolvente seleccionada es el modelo **Falange-Recto**, distinguiéndose por su destacado desempeño experimental y sencillez constructiva. A continuación, se destacan aprendizajes adquiridos de las demás envolventes a lo largo del proceso, que son de utilidad.

En relación a la envolvente tipo aeromine, se remarca la estrategia de aprovechar el efecto de bloqueo de estructuras preexistentes, como edificios, para potenciar las condiciones del viento incidente. Los ensayos efectuados han puesto de manifiesto la importancia crucial de la separación entre el nivel de la cornisa y el inicio de la estructura, aunque aún resta realizar un análisis en profundidad para determinar la distancia óptima en este sentido. Las mediciones realizadas en la azotea de la facultad respaldan el fenómeno que se busca aprovechar, aunque los módulos de viento siguen siendo relativamente bajos. Por lo tanto, se propone instalar el modelo final en la cornisa de un edificio, asumiendo una distribución de Weibull para el viento disponible. Se requiere que la orientación del edificio sea estratégica, de manera que el dispositivo pueda aprovechar las direcciones de viento con mayor probabilidad. En cuanto a la familia de envolventes tipo concentrador de flujo, no se lograron experimentalmente resultados que reflejen una mejora del desempeño. No obstante, se destaca la potencial utilidad de incorporar perfiles aerodinámicos, como se propone en 4.1.3.5. Dada la limitación actual en el desarrollo de las simulaciones numéricas y la falta de respaldo experimental, se excluye de momento este modelo. Sin embargo, se recomienda una evaluación más detallada de esta propuesta en futuras investigaciones.

Una vez seleccionado el diseño final de la envolvente, en este caso, el modelo Falange-Recto, es necesario formular una hipótesis para modelar su influencia sobre

el desempeño del rotor a vena abierta. En el experimento detallado en 4.2.2, se registró un aumento variable del coeficiente de potencia (C_p), entre un 50 % y 80 %, en un rango de velocidades específicas (λ) acotado entre 5,75 y 6,25. Se propone simplificar este efecto con una hipótesis de amplificación uniforme para el C_p ¹², conservativa, correspondiente a un 50 %. Esto se ve reflejado en la Ecuación 5.0.1.

$$C_{P_{falange}}(\lambda) = C_{P_{venaabierta}}(\lambda) * 1,5 \quad (5.0.1)$$

Es importante señalar que en la formulación no se modela el desplazamiento aparente de la curva base, $C_p - \lambda$, del rotor a vena abierta, hacia velocidades específicas mayores.

Por último, se recuerda la sugerencia de incrementar la relación de diámetros entre la falange y el rotor, como se documenta en A.8, que experimentalmente no fue factible implementar. En lo que resta del documento, se mantiene la relación de diámetros probada en los ensayos para asegurar la consistencia con los resultados experimentales empleados.

5.1. Re-Diseño del rotor

A continuación, se detalla el proceso seguido para el rediseño del rotor y se presentan los resultados correspondientes, abordando la geometría de las palas, el diseño de la nariz, la curva teórica $C_p - \lambda$ para las condiciones de vena abierta y con la adición de la falange, así como la selección de un generador adecuado. Además, se exhiben modelos tridimensionales del rotor creados mediante el programa Inventor.

5.1.1. Diseño de las palas

Con el modelo final de envolvente seleccionado, se procede a recalcular la geometría del rotor. Para ello, se establecen ciertos parámetros de diseño y se procede a optimizar otros. La Figura 5.1.1 indica un esquema del procedimiento.

En primer lugar, para reducir las variables de diseño, se establecen los **diámetros interior y exterior**. El diámetro exterior se elige de manera que el diámetro mayor de la envolvente no supere los 2 metros. Luego, manteniendo la misma relación de diámetros falange/rotor observada en el ensayo experimental, que es de $\frac{5}{3}$, se determina que el diámetro mayor del rotor será de 1,2 metros. La elección del diámetro del cubo del rotor (diámetro menor de las palas) se establece en 20 centímetros. Esta decisión se fundamenta en la posibilidad de cubrir ciertos modelos de generadores por detrás del cubo, evitando así que el generador sea una obstrucción adicional al paso del aire por el rotor. Aunque existen modelos de generadores con diámetros mayores, se considera que un aumento en el diámetro del cubo resultaría en una disminución del área efectiva para la extracción de energía mecánica del viento, debido a una mayor obstrucción al flujo de aire.

En cuanto al **número de palas**, se establece en tres, siguiendo una práctica usual debido a que la carga soportada por cada pala es mayor a medida que se reduce su cantidad, resultando en una potencia específica más elevada.

Otro parámetro del diseño de las palas que se define es el **perfil aerodinámico** a utilizar. Se opta por el perfil NACA 4412, el mismo perfil empleado en el rotor de

¹²Utilizando el área del rotor en el denominador.

los ensayos DHAWT. Esta elección se sustenta en la facilidad constructiva proporcionada por su geometría, evitando posibles complicaciones asociadas a perfiles de menor espesor o mayores curvaturas. Además, respaldada por la consistencia entre los datos experimentales y los resultados analíticos obtenidos durante los ensayos ¹³, se garantiza la disponibilidad de información confiable para el diseño.

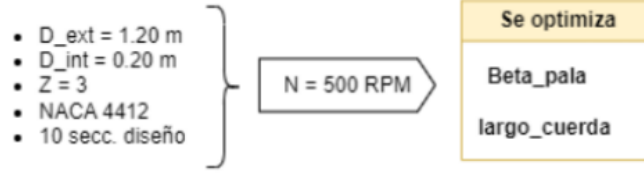


Figura 5.1.1: Esquema del procedimiento de diseño.

Para introducir la estrategia de diseño, es crucial recordar que el diseño de las palas se realiza por secciones específicas. Es decir, no se crea un perfil de manera completamente continua; en cambio, se diseñan secciones discretas ("secciones de diseño") de la pala y luego se proporciona la continuidad necesaria en el diseño físico final.

El diseño de la pala se realiza para 10 secciones. Es importante destacar que el radio para el cual se diseña cada sección no es arbitrario, sino que se establece de manera que en cada sección anular circule el mismo caudal, garantizando así que todos los anillos tengan el mismo área. Por lo tanto, el primer paso implica dividir el área total de pasaje del viento a través del rotor en la cantidad predeterminada de secciones. Seguidamente, se calculan los diámetros asociados para que las 10 secciones presenten áreas equivalentes, utilizando la Ecuación 5.1.1 ¹⁴. Éstos constituyen los diámetros que limitan las secciones de diseño.

$$d_{i+1} = \sqrt{\frac{d_2^2 - d_1^2}{\#Secciones} + d_i^2} \quad (5.1.1)$$

En esta ecuación (5.1.1), d_1 y d_2 representan el diámetro menor y mayor del rotor, respectivamente. Naturalmente, d_i representa la i -ésima sección. Se comienza tomando el diámetro del cubo como el diámetro d_i (caso $i = 1$), y se calculan los diámetros sucesivos.

Luego, la Ecuación 5.1.2 permite calcular los diámetros sobre los cuales se va a diseñar, donde d_i y d_{i+1} son los diámetros que limitan la i -ésima sección de diseño, calculados anteriormente.

$$d_{disj} = \sqrt{\frac{d_i^2 + d_{i+1}^2}{2}} \quad (5.1.2)$$

Obtenidos los diámetros (o radios) de diseño, se llega al siguiente paso: optimización del **largo de cuerda** l_c y **ángulo de pala** β_{pala} para cada sección.

El criterio de optimización empleado implica calcular y maximizar la potencia que se extraería con cada combinación de l_c y β_{pala} , en cada sección de diseño. Para el cálculo de la potencia de cada combinación, se vuelve a emplear la función

¹³consultar A.2.6.

¹⁴ $\#Secciones$ representa el número de secciones. En este caso es igual a 10.

desarrollada en la Subsubsección A.2.2 ¹⁵. Este criterio ofrece la mejor combinación posible dentro de los valores establecidos. No obstante, presenta la desventaja de ser un método de diseño con valores discretos; las combinaciones de l_c y β_{pala} están sujetas a la discretización empleada. Finalmente, cabe destacar que para el proceso de diseño se debe seleccionar una **velocidad de giro**. Se evaluaron rangos en torno a 150 y 600 revoluciones por minuto, culminando en un valor de 500rpm. Se remarca que se experimentaron dificultades para la convergencia de la función auxiliar de potencia para velocidades de giro menores, en torno a 150rpm.

Luego de aplicar este método de diseño, con una discretización para las longitudes de cuerda de 1,05cm, que abarcan desde 5cm hasta 25cm, y para los ángulos de pala de 1°, que varían desde 1° hasta 20°, se obtuvieron los resultados detallados en la Tabla 5.1.1.

Tabla 5.1.1: Resultados del diseño de las palas del rotor.

Radio(mm)	165,8	250,0	312,2	364,0	409,3	450,0	487,3	522,0	554,5	585,2
$l(mm)$	144,7	113,2	92,1	81,6	71,1	60,5	60,5	60,5	50,0	50,0
$\beta(^{\circ})$	20	13	10	9	8	6	6	6	5	4

Este resultado fue modelado en 3D con la herramienta Inventor y se puede apreciar en Figura 5.1.2.

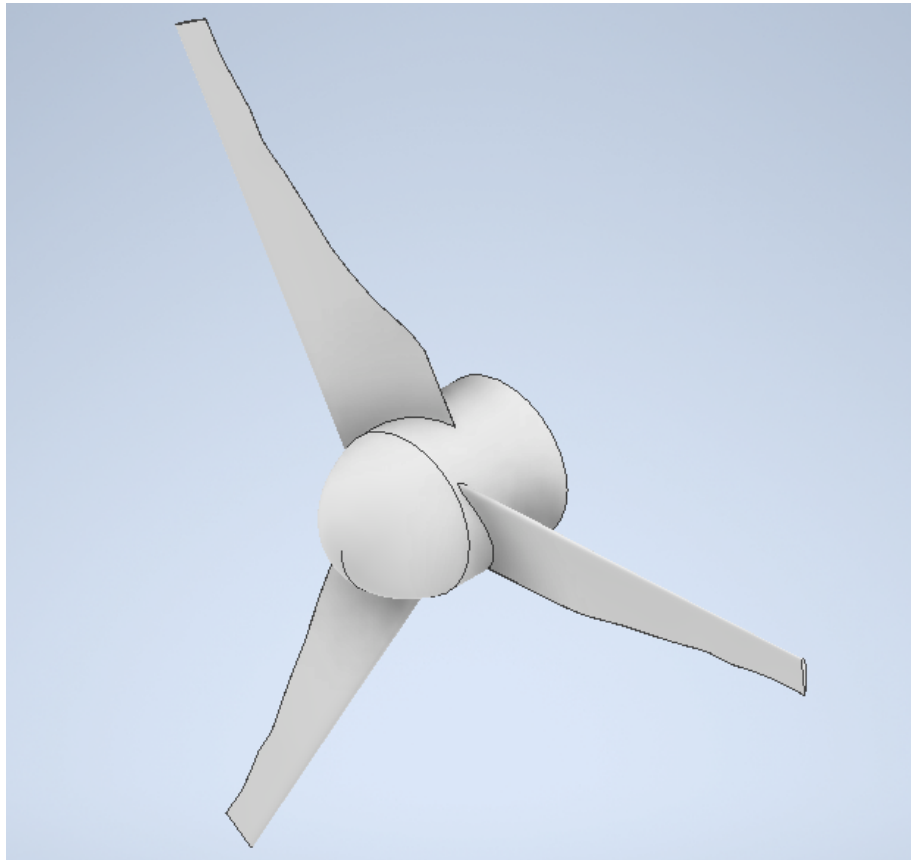


Figura 5.1.2: Modelo de palas para el diseño final.

¹⁵Es crucial registrar los valores del número de Reynolds y los ángulos de ataque para asegurar que se mantengan dentro de los rangos de tabla establecidos.

Con el diseño del rotor definido, se procede a realizar una curva $C_P - \lambda$ analítica, siguiendo lo descrito en la Subsección A.2. Posteriormente, esta curva se afecta por la presencia de la envolvente, siguiendo la hipótesis mencionada anteriormente (5.0.1). La forma de la curva depende del número de Reynolds asociado, el cual a su vez depende de las velocidades involucradas, en particular, la velocidad de giro. Por lo tanto, para seleccionar la "mejor" curva, primero se genera la misma para diferentes velocidades de giro. El criterio de selección es el de obtener el más amplio rango posible de λ , con las menores rpms. En este caso, la velocidad de giro que brindó la mejor **curva** fue de 600 rpm. Los resultados se presentan en la Figura 5.1.3 y se registran en la Tabla A.11.1. Es importante recordar que, al realizar comparaciones entre los casos de vena abierta y falange, se utiliza el mismo área del rotor para el cálculo del C_p . El C_p superior al límite de Betz que se logra con la falange se debe, en rigor, al aprovechamiento del área total bloqueada por esta estructura.

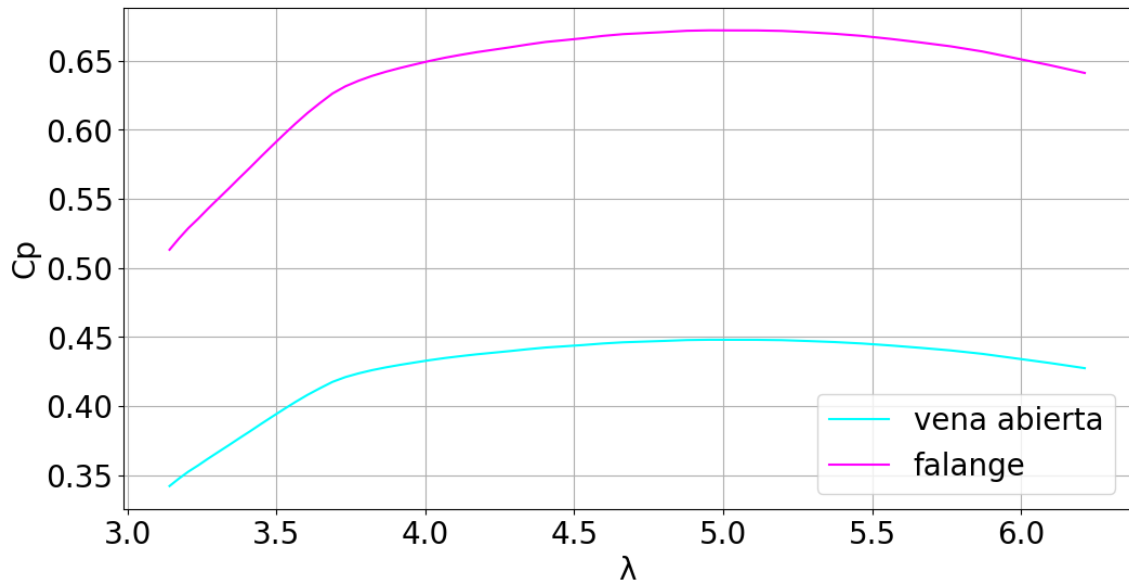


Figura 5.1.3: Curva $C_P - \lambda$ para el diseño final. Curvas del rotor vena abierta y con la hipótesis de afectación de la falange, ambas a 600 rpm.

5.1.2. Selección del generador

Con la curva $C_p - \lambda$, es posible derivar una relación entre el torque T y las RPM (N), lo que proporcionaría una descripción del funcionamiento del rotor para diversas velocidades del viento incidente. La expresión de esta relación se presenta en la Ecuación 5.1.4.

$$T = C_P \frac{0,5\rho A v^3}{\omega} \quad (5.1.3)$$

$$RPM = \frac{30v\lambda}{\pi r} \quad (5.1.4)$$

Donde ρ es la densidad, A es el área proyectada del rotor, v la velocidad de viento incidente y $\omega = \frac{2\pi N}{60}$.

Dado que esta relación está vinculada a la velocidad del viento, es factible generar múltiples curvas que describen el funcionamiento del rotor, paramétricas respecto a dicha variable. La búsqueda de las curvas $T - N$ se realiza con el propósito de identificar el generador eléctrico óptimo para esta aplicación. Esto implica la búsqueda de los puntos de intersección entre estas curvas y las curvas de funcionamiento del generador. Para esta aplicación, se elige implementar un generador de imanes permanentes, conocidos por tener curvas $T - N$ que son aproximadamente lineales, con un factor proporcional k ($T = k \cdot N$).

Siguiendo el procedimiento explicado, se buscan curvas $T - N$ para el rotor con velocidades que oscilan entre 3 y 10 m/s, evaluando diferentes constantes k para los generadores de imanes permanentes. Algunos valores explorados para k incluyen 0,005, 0,0075 y 0,01 $\frac{\text{Nm}}{\text{RPM}}$, representados en 5.1.4. El objetivo es identificar los puntos de intersección entre estas curvas. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.1.4.

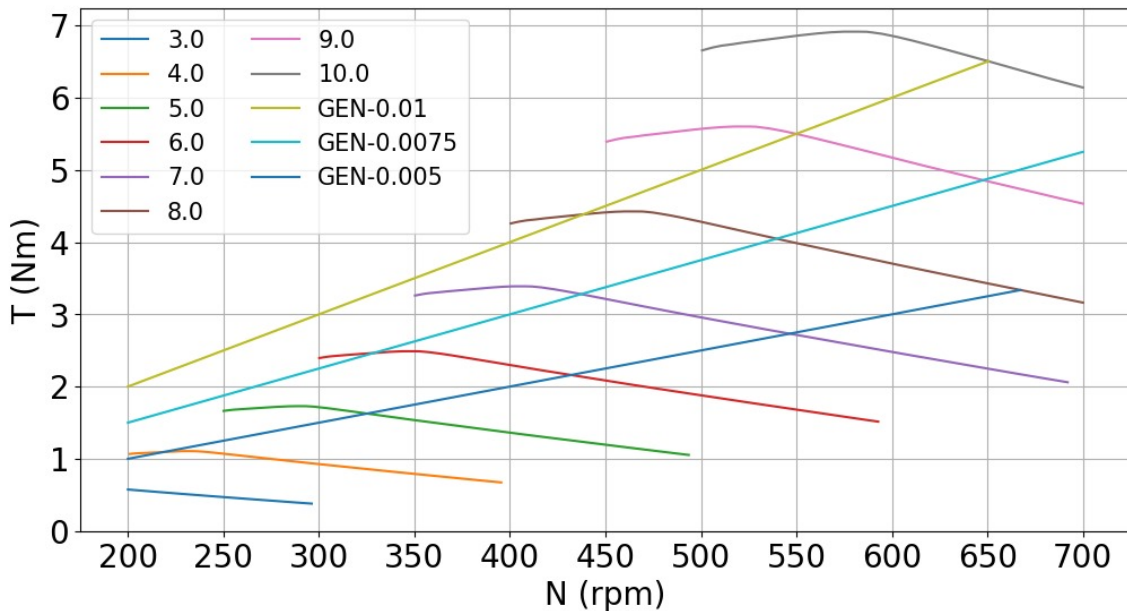


Figura 5.1.4: Gráfico $T - \text{RPM}$ con curvas del funcionamiento del rotor a distintas velocidades de viento y curvas de distintos generadores.

El criterio para seleccionar el generador óptimo implica elegir aquel que tenga la mayor **potencia media**. Este valor se calcula multiplicando la potencia obtenida para una velocidad de viento específica por la probabilidad asociada a esa velocidad. Para obtener este último valor, es esencial contar con una curva que represente la distribución de probabilidad de viento en el sitio de colocación del aerogenerador.

Los datos disponibles sobre las velocidades de viento provienen de la azotea de la Facultad de Ingeniería y muestran una velocidad media baja. Ante esta limitación, como fue mencionado anteriormente, se toma la decisión de implementar una curva de **distribución de Weibull**, que aproxima la distribución del viento utilizando dos variables clave. La primera variable, que varía de 1 a 3, indica la variabilidad del viento; donde 1 representa una variabilidad muy alta y 3 una variabilidad baja. Se recomienda utilizar un valor de 2 para esta variable, lo que genera distribuciones muy similares a las reales ¹⁶. La segunda variable necesaria para obtener la curva de

¹⁶Ver https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power#Distribution_of_wind_speed.

distribución de Weibull es una velocidad media, la cual es arbitraria. En este caso, se elige una velocidad media de $5 \frac{m}{s}$.

Es esencial tener en cuenta que la distribución de Weibull no considera la dirección variable del viento, por lo que utilizarla implica la hipótesis de que el mismo proviene de una única dirección (predominante). Esta suposición se alinea con las consideraciones tomadas para el diseño del aerogenerador, que estará ubicado de manera fija, sobre la cornisa de un edificio; idealmente, en la dirección de mayor probabilidad de viento incidente.

Una vez obtenida la distribución de Weibull, se seleccionan valores discretos de velocidades de viento, en este caso, desde 3 hasta 10 m/s, variando de a 1 m/s. En este enfoque, se asume que en un rango de 0,5m/s alrededor de cada valor discreto seleccionado, la potencia obtenida es la correspondiente a la velocidad discreta, y la probabilidad de la misma se calcula como la acumulada dentro de ese rango. Con esta estrategia, se selecciona el **generador** que logra una mayor potencia media. Éste es el correspondiente a la constante $k = 0,0075$, y brinda $69,6W$ de potencia media. Para este generador eléctrico, se tiene la curva de **potencia** en función de la **velocidad de viento** que se presenta en la Figura 5.1.5

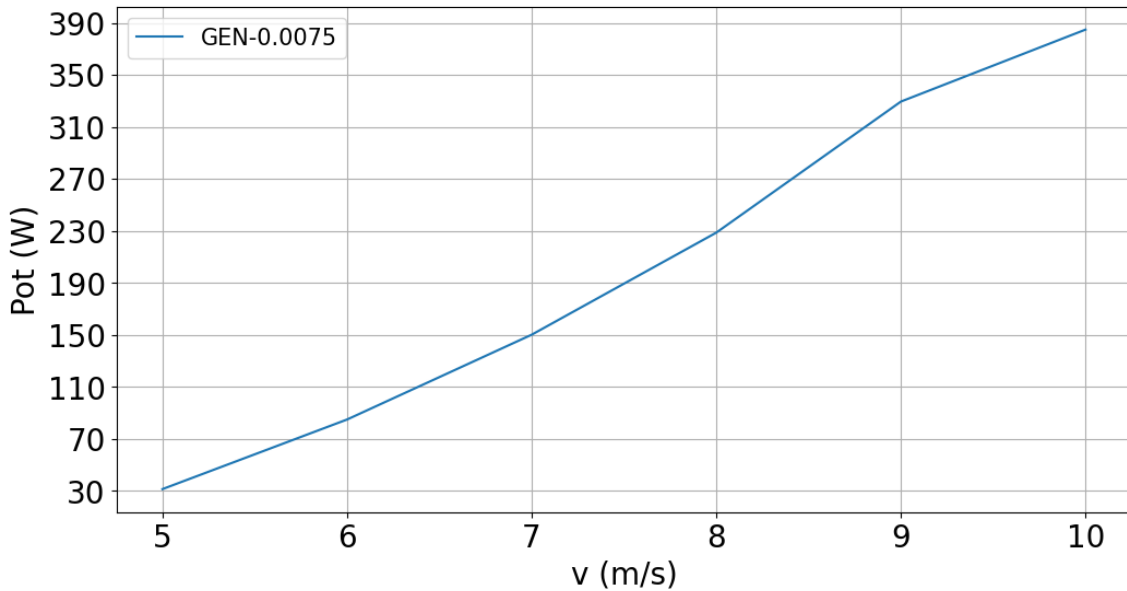
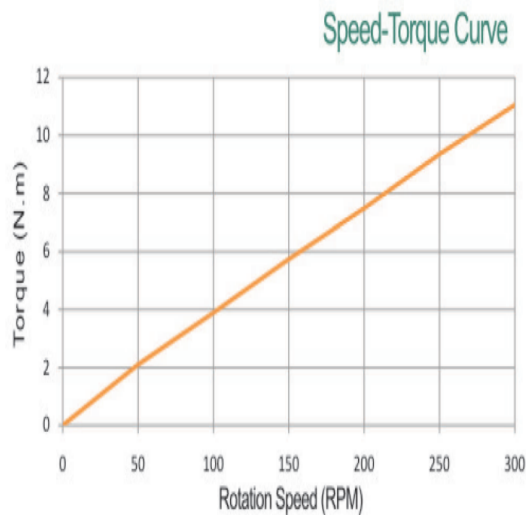


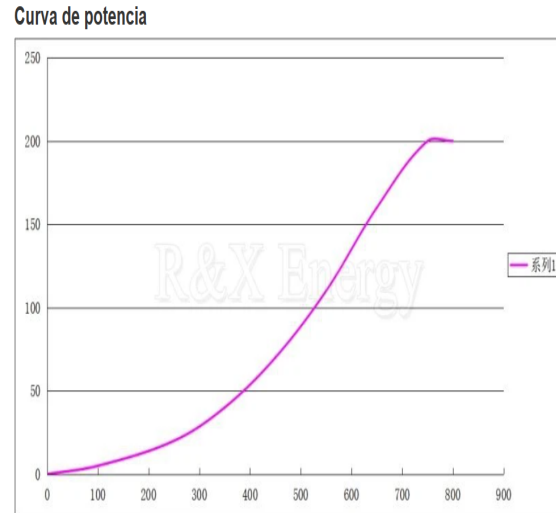
Figura 5.1.5: Curva $Pot - v$ para el aerogenerador con un generador con $k = 0,0075$.

Se llevó a cabo una búsqueda en el mercado de generadores de imanes permanentes que cumplieran con los lineamientos y restricciones establecidos. No obstante, no se encontró un generador que se ajustara adecuadamente a los requisitos especificados. En la Figura 5.1.6 se presentan ejemplos de algunos modelos evaluados, proporcionándolos como referencia para contextualizar la situación, en donde el generador de Figura 5.1.6a tiene un $k = 0,053$ y el generador de Figura 5.1.6b un $k = 0,0034$. En consecuencia, se procede a definir los parámetros nominales del generador que se utilizaría en la situación planteada de la siguiente manera.

Volviendo sobre la Figura 5.1.4, se tienen los puntos de corte de cada curva $T - N$ (una para cada velocidad de viento incidente) y distintas alternativas de curvas de generadores. Habiendo asumido una distribución de Weibull para modelar las probabilidades de viento incidente, se determina que el generador óptimo se caracteriza



(a) Generador de Qiangsheng Magnets Co.,Ltd, modelo AFPMG260 - 0.3kW/300RPM. <https://www.qm-magnet.com/Catalog-download>



(b) Generador R&X Energy, modelo RX-100PH. <https://www.rx-greenenergy.com/permanent-magnet-generator/radial-flux-permanent-magnet-generator/permanent-magnet-generator-for-wind-turbine.html>

Figura 5.1.6: Modelos de generadores.

por un coeficiente $k = 0,0075 \frac{\text{Nm}}{\text{RPM}}$. Se toma, por ende, el punto de corte asociado a la mayor potencia y se utiliza el mismo para caracterizar el generador.

La velocidad de viento incidente vinculada a esta intersección se define como la velocidad de corte V_{corte} , y los valores de potencia y velocidad de giro asociados representan los parámetros nominales del generador. La Tabla 5.1.2 presenta los valores de estos parámetros.

$k \frac{\text{Nm}}{\text{RPM}}$	$V_{\text{corte}} \frac{\text{m}}{\text{s}}$	N (RPM)	T (Nm)	$\text{Pot}_{\text{nominal}}$ (W)	FC (%)
0,0075	10	700	5,25	384,8	16,9

Tabla 5.1.2: Parámetros que caracterizan el funcionamiento del generador.

El generador, con **potencia nominal** $385W$ y **velocidad de giro nominal** 700 rpm , proporcionará una **potencia media** de $65,16W$. Esta potencia se generará hasta alcanzar una **velocidad de corte** V_{corte} de $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Con esta información, se calcula el **Factor de Capacidad (FC)**, definido como el cociente entre la potencia media y la potencia nominal del generador, resultando en un $16,9\%$. Se asume que el bobinado puede cumplir con estas restricciones.

5.1.3. Diseño de la nariz

La nariz del rotor representa el primer punto de contacto con la corriente de flujo entrante. Su presencia provoca la contracción de las líneas de corriente hacia la sección donde se encuentran las palas del rotor. Es fundamental lograr que esta transición sea lo más suave posible para prevenir el desprendimiento de la capa límite adyacente a la superficie.

Para lograr un diseño acorde a los requisitos establecidos, se examina el caso de una "corriente uniforme más una fuente puntual", utilizando las formulaciones de flujo potencial axilsimétrico [25]. En esta interacción, se identificará un punto de estancamiento o remanso, similar a la interacción entre la nariz y el flujo que ingresa al aerogenerador. Por consiguiente, el diseño de la nariz se basa en el modelo proporcionado por la superficie de corriente que atraviesa dicho punto. La geometría de la nariz se describe mediante la siguiente Ecuación 5.1.5 en coordenadas polares.

$$r = \frac{a}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (5.1.5)$$

El parámetro a está asociado al comportamiento asintótico de la función en relación con las coordenadas x . En particular, en el diseño específico de la nariz del aerogenerador, y manteniendo constante el diámetro interior, este parámetro exhibe una relación inversamente proporcional con la extensión de la nariz con respecto a las palas.

La Figura 5.1.7 ilustra la función 5.1.5, destacando en rojo la porción que define el perfil de la geometría de la nariz. Las asíntotas verdes representan el diámetro interior establecido. El código utilizado para generar esta figura se basa en el previamente creado, en el contexto de [2].

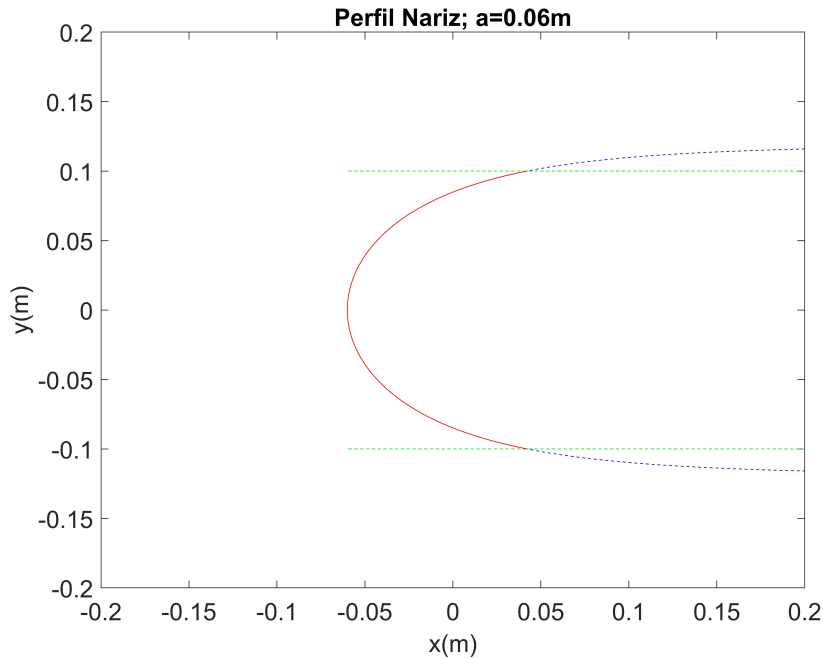


Figura 5.1.7: Gráfico de la función que define la geometría de la nariz (trazo punteado), indicando la porción utilizada (trazo rojo liso) delimitada por las líneas asíntóticas verdes en $y = \pm 0,10m$.

El parámetro a se establece en $60mm$ para lograr un diámetro d_{int} de $20mm$ a una distancia horizontal de $102,5mm$.

Una vez definida la geometría de la nariz, es posible analizar cómo se desarrolla la capa límite en esta estructura y estimar el orden de magnitud del espesor de la capa límite del modelo.

La capa límite tridimensional se caracteriza por una notable variación en la dirección de la velocidad dentro de la capa, en comparación con el flujo exterior. Este

fenómeno es resultado de un gradiente de presiones que actúa con un ángulo específico con respecto al flujo principal, generando movimientos secundarios vigorosos [26].

En el contexto de la capa límite en un cuerpo de revolución, se tienen tablas experimentales que permiten aproximar este espesor. Estos cálculos se basan en la velocidad de rotación, velocidad axial del fluido y otras características del flujo y la geometría. Según estos datos, se estima un espesor de cantidad de movimiento de la capa límite del orden de $150\mu m$. Cabe destacar que, para esta estimación, el valor del número de Reynolds es inferior al que se presenta en la tabla [26].

5.2. Análisis Mecánico

En esta sección, se detalla el procedimiento llevado a cabo para el análisis mecánico, abordando tanto el rotor como la estructura de la envolvente. Se emplea la norma UNE-EN 61400-2 [3] y se utiliza el programa Inventor para llevar a cabo parte de los análisis realizados. Además, se incluye el cálculo de los modos de vibración de la envolvente y del aerogenerador, asegurándose de que no interfieran con los puntos de operación del aerogenerador.

Norma para pequeños aerogeneradores

La norma UNE-EN 61400-2 [3] establece que los pequeños aerogeneradores, englobando todas las variantes examinadas en este proyecto, se clasifican en distintas clases para caracterizar grupos de aerogeneradores dentro de cada una y poder homogeneizar el tipo de estudio. Estas clases buscan categorizar los aerogeneradores según las características del entorno donde se ubiquen, tomando como criterios principales dos valores: la velocidad de referencia del viento promediada en 10 minutos (V_{ref}) y la velocidad media anual del viento a la altura del buje (eje) (V_{ave}).

En el caso del diseño final de este proyecto, el aerogenerador se clasifica como **clase IV**. Una vez definida la clase del aerogenerador, es necesario determinar el tipo de estudio a realizar de acuerdo con ciertas condiciones preestablecidas. En este contexto, se opta por llevar a cabo el estudio utilizando el método de cargas simplificadas y bajo la **hipótesis de carga I**: Inmovilización con carga del viento y exposición máxima.

La fuerza ejercida en cada dirección y, por ende, en cada pala, se describe mediante la Ecuación 5.2.1 a continuación.

$$F = \frac{1}{2} C_f \rho V_{ref}^2 A_{proj} \quad (5.2.1)$$

Donde C_f es el coeficiente de fuerza, que se obtiene de la norma, ρ es la densidad del aire, V_{ref} es la definida según la clase del aerogenerador y A_{proj} es el área del rotor proyectada en la dirección de la fuerza.

5.2.1. Análisis mecánico y aspectos constructivos del rotor

Según la ecuación 5.2.1, y teniendo en cuenta la geometría del rotor y los parámetros pertinentes, se obtiene una fuerza sobre la cara más expuesta (delantera y trasera) de $F = 181,75\text{N}$. Luego, el análisis de las solicitaciones en las palas del rotor da como resultado una tensión de Von Mises máxima de $11,87\text{MPa}$. Esta máxima tensión ocurre en las inmediaciones de la unión del cubo con la pala tal como se muestra en la figura 5.2.1. Según la norma, también se debe analizar si el rotor es capaz de soportar la misma fuerza en la dirección lateral, pero en este caso carece de sentido, dado que en esa dirección se encuentra la envolvente cubriendo al rotor.

Se selecciona Resina Acetal Copolímero como material de construcción, el cual tiene un valor de tensión de fluencia de 68MPa ¹⁷. Con estos datos, se obtiene que el factor de seguridad mínimo del rotor es de $5,72$ en las condiciones que plantea la normativa, las cuales son muy extremas comparadas con las condiciones normales de funcionamiento.

¹⁷Extraído de: <https://pbplastics.com.ar/portfolio/resina-acetal-pom-c-h/>

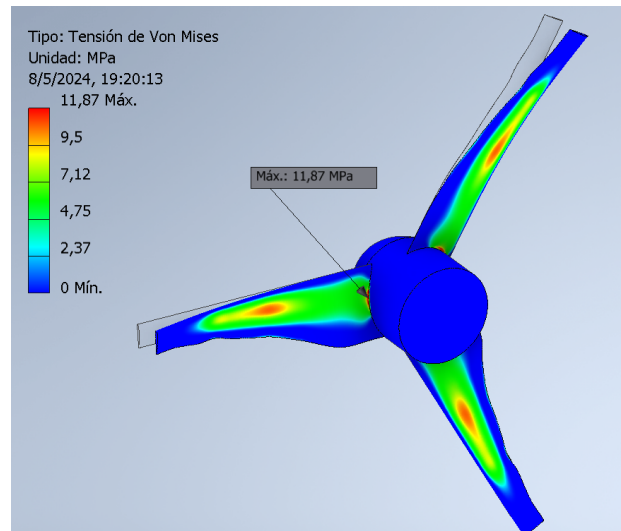


Figura 5.2.1: Puntos con mayor tensión de Von Misses en el rotor al aplicar fuerza en la cara frontal del mismo.

Este rotor es capaz de soportar una fuerza equivalente a que el mismo gire a $1100RPM$, y lo soporta con un factor de seguridad de 3,43. Por lo tanto, la resistencia está garantizada para las condiciones de funcionamiento y es capaz de soportar ciertas cargas extremas.

Para finalizar el análisis del rotor, resulta importante estudiar sus modos normales de vibración y asegurarse de que su frecuencia natural de oscilación no coincida con la frecuencia generada por el rotor al pasar por delante de los soportes fijos del sistema rotor-generator. Si esto pasa provoca que el sistema entre en resonancia, llevando a la destrucción del rotor. Dado que los puntos de operación del rotor varían desde las 200rpm hasta las 700rpm, que el rotor es de tres palas y que el soporte del generador esta formado por cuatro radios equidistantes, las frecuencias de vibración en los puntos normales de funcionamiento van desde los 40Hz a los 140Hz.

El análisis de modos de vibración realizado en Inventor da como resultado que la frecuencia natural de oscilación de las palas se sitúa en 22,32Hz. Este resultado muestra que, aunque el rotor atravesará de manera transitoria su frecuencia natural de oscilación al acelerar, en su operación normal se encuentra alejado de los posibles puntos de resonancia.

Debido al material seleccionado y el tamaño del rotor, se diseña el mismo para ser fabricado en una sola pieza a través de moldes. En estos moldes se tendría en cuenta la cavidad para el eje y chavetero del generador.

5.2.2. Diseño y análisis mecánico de la envolvente

Para evaluar el diseño de la envolvente, se llevaron a cabo pruebas en Inventor con diversas opciones constructivas, cada una sometida a las condiciones establecidas por la norma [3] y utilizando la ecuación 5.2.1 para el análisis de fuerzas ¹⁸. Se seleccionó la variante que resiste las condiciones establecidas por la norma y que resultó más convincente desde el punto de vista constructivo. Se logra un diseño simple utilizando chapa moldeada. Para la construcción, se consideraron distintos materiales, como hierro, aluminio, y acero inoxidable, optándose por acero ASTM A36. La falange se diseña a partir de planchas de 4 mm de espesor, al igual que las patas. El acero seleccionado es muy maleable, tiene una excelente soldabilidad y es muy sencillo de conseguir en las especificaciones deseadas. A su vez, es necesario aplicarle una protección superficial para evitar los efectos de la intemperie, por ejemplo, una simple pintura sintética es suficiente para el cometido y se puede adaptar al color deseado por el cliente.

A continuación se presenta el diseño realizado en las figuras 5.2.2 y 5.2.3.

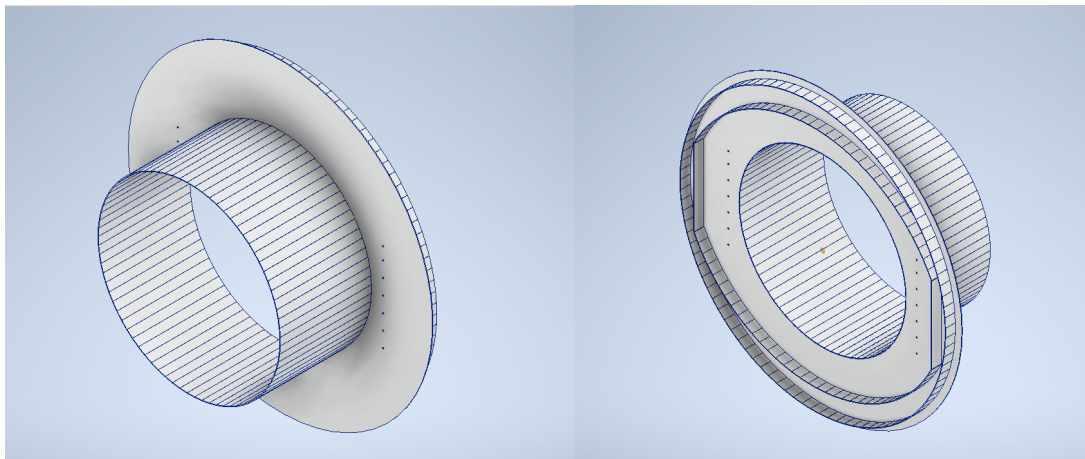


Figura 5.2.2: Propuesta de construcción de falange.

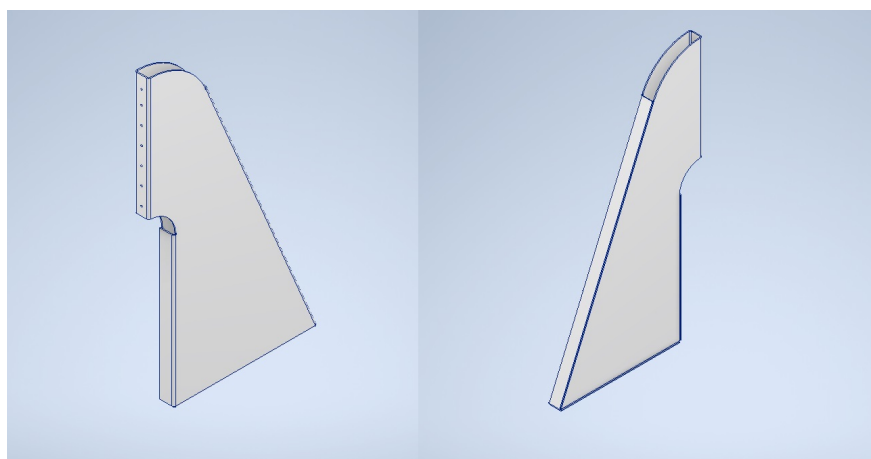


Figura 5.2.3: Propuesta de construcción de patas de soporte.

Las patas se fijan a la falange mediante tornillos, simplificando así la construcción al permitir la fabricación de las piezas de manera independiente, incluso en diferentes

¹⁸Se adaptó el estudio de la norma a las características específicas de la envolvente.

talleres, lo que optimiza el costo de producción. Esta configuración también tiene ventajas en términos de transporte y empaque del aerogenerador. Al dividirlo en partes, se reducen las dimensiones y permite que a la hora del montaje se puedan acarrear piezas mas livianas. Esto es especialmente relevante dado que, como se ha mencionado previamente, la instalación se llevará a cabo en las terrazas de edificios, donde el espacio para el acceso a menudo es limitado.

A continuación, la Figura 5.2.4 muestra el acople entre la envolvente y las patas mediante tornillos con brida $M10 \times 25$ y las tuercas correspondientes, también con brida, a dichos tornillos.

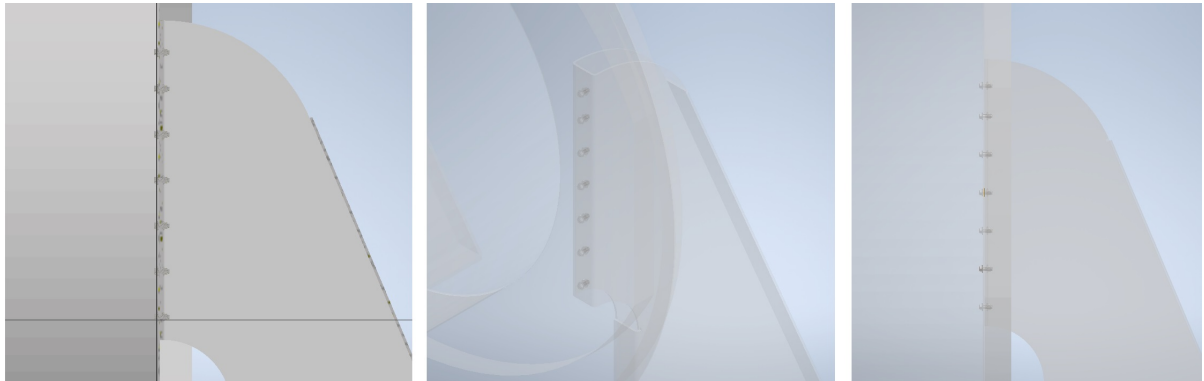


Figura 5.2.4: Anclaje de patas y falange. De izquierda a derecha: Vista de corte por el plano en el centro de los tornillos; vista isométrica; vista desde plano lateral.

El anclaje al techo se efectúa mediante tornillos de 12 mm, los cuales pueden ser del tipo taco fischer, chumbadores, o el método más adecuado para la construcción específica. Cada pata se monta con seis tornillos.

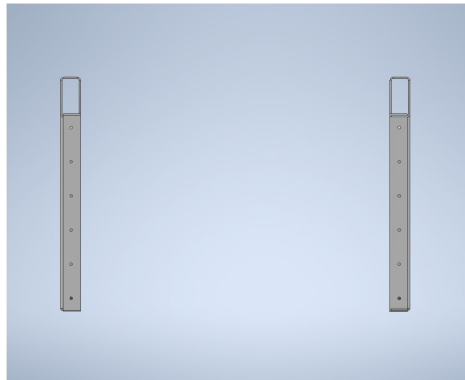


Figura 5.2.5: Agujeros para el anclaje de las patas al techo.

Luego de terminado el diseño y definidas las respectivas restricciones de la envolvente, se lleva a cabo la simulación de las cargas sobre la misma, considerando una fuerza distribuida sobre la cara frontal de la envolvente. Utilizando la ecuación 5.2.1 y los parámetros previamente determinados, se obtiene una fuerza de 2200N a la cual se le suma el peso en la dirección correspondiente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos (Figura 5.2.6).

La máxima tensión de Von Mises en todo el cuerpo es de 76,69MPa y se localiza en la unión entre la falange y las patas, en particular en el primer y último tornillo. Se observan los puntos mencionados en la Figura 5.2.6. Con una tensión de fluencia

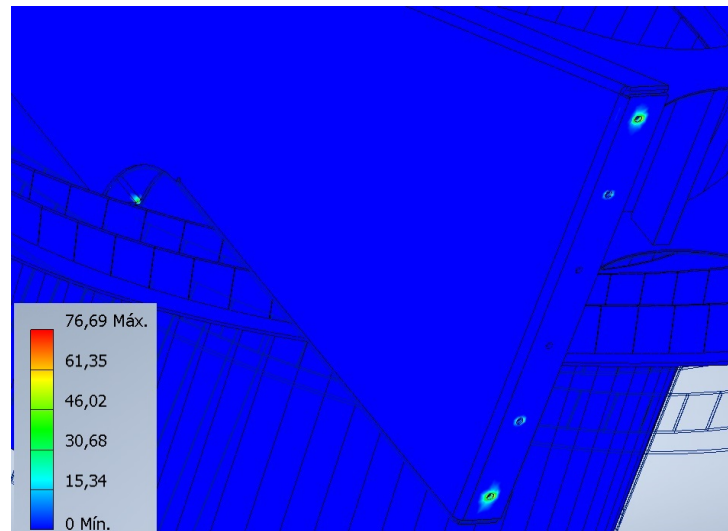


Figura 5.2.6: Puntos con mayor tensión de Von Misses en la envoltente al aplicar fuerza en el frente de la misma. Unidad: MPa.

del material de aproximadamente 250MPa ¹⁹, se logra un factor de seguridad mínimo de 3, 24.

De manera análoga, es crucial considerar la exposición al viento en la dirección lateral al aerogenerador.

La envoltente demuestra una capacidad para resistir vientos laterales de hasta 25m/s con un factor de seguridad de 3. Aunque la fuerza del viento incidente que la envoltente es capaz de soportar lateralmente es menor a la que puede soportar en su cara frontal, cabe destacar que los vientos laterales tienen otra probabilidad de ocurrencia y son generalmente de menor velocidad. Esto se debe a la hipótesis de que el aerogenerador se orienta hacia las direcciones de mayor probabilidad de viento (Rosa de vientos).

Realizado esto, se verifica que los modos de vibración de la envoltente no coincidan con los puntos de operación del aerogenerador, de modo de evitar su rotura. Mediante el programa Inventor, se determina que la frecuencia natural de oscilación de la envoltente es de $2,31\text{Hz}$, ubicándose fuera del rango de los puntos de operación que va de 40Hz a 140Hz . Por lo tanto, al iniciar la aceleración del rotor, este pasará transitoriamente por la frecuencia natural de oscilación de la envoltente, pero no generará una resonancia destructiva en el sistema.

¹⁹Propiedades extraídas de la especificación de ASTM.

5.2.3. Soportes y características del generador eléctrico

Como se mencionó anteriormente, el generador eléctrico de imanes permanentes debe ser construido a medida para esta aplicación. A continuación, se presentan en la Figura 5.2.7 los soportes que se montan en la envoltura para fijar el rotor.

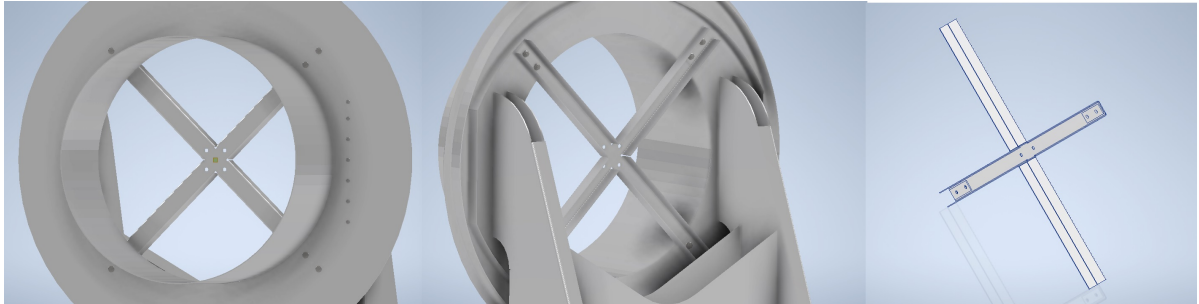


Figura 5.2.7: Soporte del generador eléctrico en la envoltura.

Al igual que la construcción de toda la envoltura, el soporte se diseña para ser fabricado a partir de chapa moldeada de 3 mm de espesor y del mismo material. Éste se monta sobre la envoltura con ocho tornillos $M16 \times 35$ mm, los cuales son bridados y cuentan también con tuercas bridadas.

En cuanto al generador, la Figura 5.2.8 a continuación ilustra el modelo a construir, cuyas medidas básicas se encuentran en los planos siguientes 5.2.9.

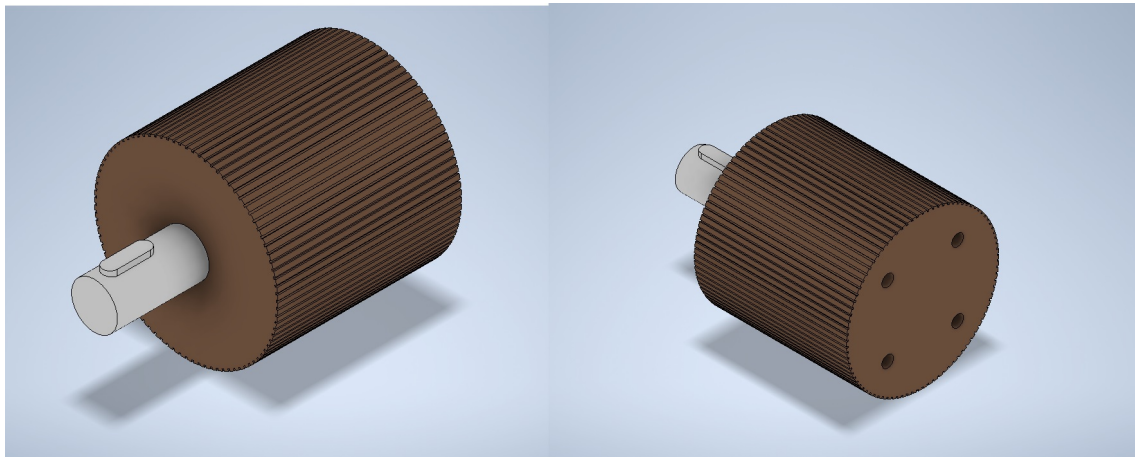


Figura 5.2.8: Generador de imanes permanentes a construir.

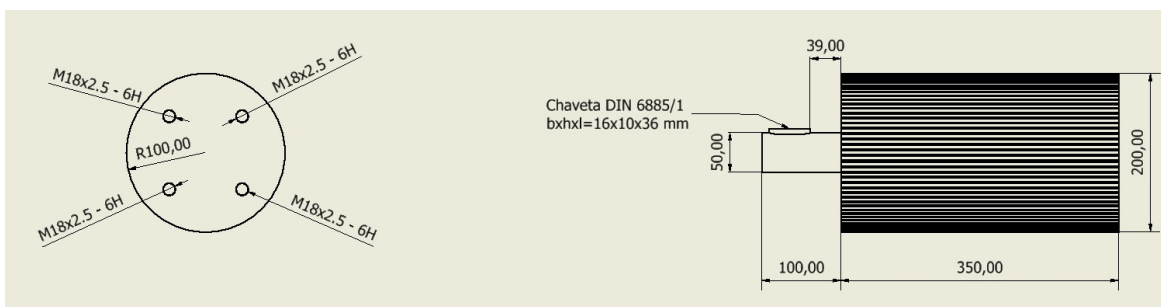


Figura 5.2.9: Planos básicos del generador eléctrico a construir. Dimensiones en mm.

El generador se acopla al soporte descrito en este mismo apartado mediante cuatro tornillos $M18 \times 2,5$, que son suficientes para soportar las cargas a las que se somete el generador. Además, se colocó un chavetero sobre el eje del generador para realizar el acople con el rotor. Este tipo de montaje tiene la ventaja de ser sencillo y proporcionar soporte por sí mismo a lo que se acopla. Para dar ajuste axial al rotor, se sugiere utilizar prisioneros montados sobre el mismo que ajusten sobre el eje del generador.

5.3. Costos estimados de construcción

Como fue mencionado anteriormente, en la Subsección 4.4, la construcción de la envolvente es relativamente sencilla teniendo las máquinas adecuadas; como cortadoras, dobladoras, soldadoras y el espacio necesario. Se estima el precio del material, sabiendo que el costo por metro cuadrado del tipo de chapa utilizado está en torno a los 2400 pesos Uruguayos ²⁰. Por otro lado, el costo de fabricación se compone del costo por hora de un taller metalúrgico típico ²¹ de 1500 pesos Uruguayos por hora.

El costo del generador se estima tomando como referencia distintos sitios internacionales de venta y sumando un costo del 80 % sobre el publicado, debido a impuestos de importación y transporte.

El costo del rotor es lo mas difícil de estimar debido a que es completamente realizado a medida. Sin embargo, se tiene que por la compra e importación del material se tendría un costo de aproximadamente 4000 pesos Uruguayos. Para la fabricación en molde, se estima un costo total de 16000 pesos Uruguayos por unidad, llegando así a un costo total de 20000 pesos Uruguayos por rotor a fabricar.

A continuación, en la tabla 5.3.1 se presenta el costo de fabricación del aerogenerador. El prototipo finalizado, teniendo en cuenta el peso de todos sus componentes y tomando como referencia que el generador eléctrico pesa entorno a 20kg , se estima que ronda los 360kg .

Pieza del aerogenerador	Costo de material (Pesos Uruguayos)	Costo de fabricación (Pesos Uruguayos)	Total (Pesos Uruguayos)
Envolvente	30000	12000	42000
Rotor	4000	16000	20000
	Costo del fabricante (Pesos Uruguayos)	Costo de envío e impuestos	
Generador	8000	6400	14400
		Costo total (Pesos Uruguayos)	76400

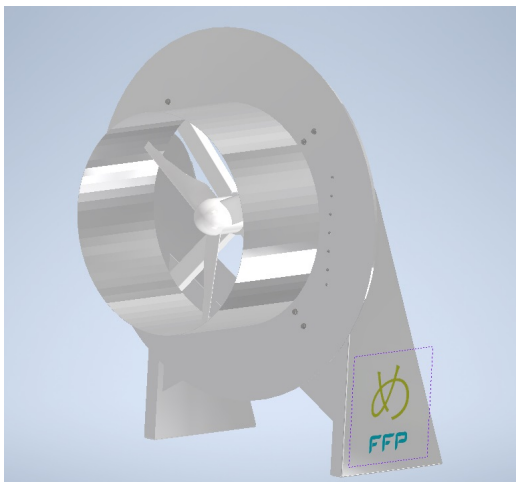
Tabla 5.3.1: Tabla estimativa de los costos asociados a la fabricación del aerogenerador.

²⁰Referencia de valor tomada en base a: https://lc.cx/vy_8Lr.

²¹Referencia de valor tomada en base a consultas realizadas a tres talleres metalúrgicos.

5.4. Presentación del producto

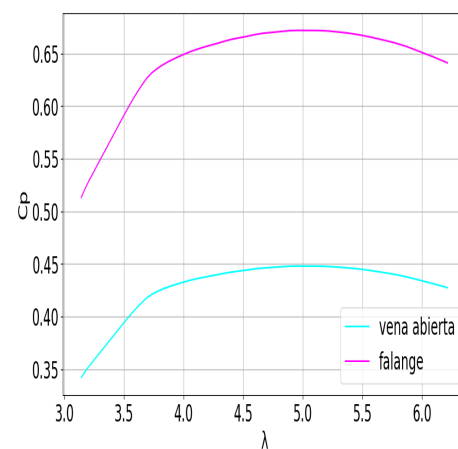
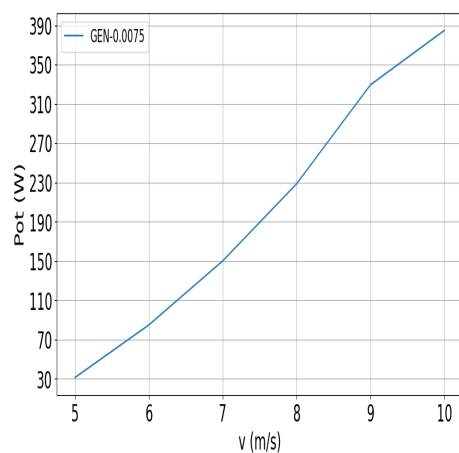
FFP

Aerogenerador para
entorno urbano

Potencia nominal	385 w
Velocidad de giro nominal	700 rpm

Potencia media generada ²²	69,6 W
Máxima velocidad de giro	1100 rpm
Velocidad de viento de corte	10 m/s
Factor de capacidad	16,9 %

Dimensiones (m)	2,4x2,0x1,5
Peso	360 kg



6. Conclusiones

La investigación tuvo como objetivo analizar el desempeño y la viabilidad de diversas tecnologías de envolventes, con la finalidad de proponer un modelo de aerogenerador diseñado específicamente para entornos urbanos. Durante el desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo análisis exhaustivos de diferentes envolventes, abordando varios principios de funcionamiento y empleando niveles variables de complejidad en el análisis.

Siguiendo esta línea, se llevaron a cabo ensayos específicos, como los de eje horizontal DHAWT, que abordaron el objetivo central del proyecto de manera directa. Aunque surgieron desafíos al escalar el rotor para los ensayos en el túnel de viento, como pérdidas mecánicas significativas y dificultades para iniciar la rotación, se logró medir la variación del desempeño del rotor con el agregado de la envolvente. Otros ensayos, como los realizados con el modelo de aerogenerador de eje vertical DVAWT, presentan un mayor grado de incertidumbre debido a la complejidad de los experimentos ideados y las limitaciones de las herramientas disponibles. A pesar de ello, el enfoque se centró en el entendimiento del fenómeno detrás del funcionamiento de la envolvente, objetivo que se logró. Este modelo no resultó convincente desde el punto de vista de la complejidad constructiva ni en términos de la potencia extraíble. No obstante, se obtuvo información valiosa acerca del lugar propuesto para su colocación, así como destacados aprendizajes prácticos sobre detalles de su instalación que inicialmente pasaron desapercibidos.

A partir de esta experiencia, se determina que el diseño final del dispositivo debe ubicarse sobre la cornisa de un edificio, considerando una distribución de vientos asumida. Es crucial prestar especial atención a la separación entre el nivel de la cornisa y el inicio del dispositivo, un aspecto subrayado en varias ocasiones durante el proyecto. Además, al proponer este modelo, es importante tener en cuenta que no se dispone de un sistema de orientación, por lo que el análisis detallado del lugar físico de instalación adquiere una importancia primordial.

Surgen un par de recomendaciones como fruto de los ensayos realizados, para investigaciones futuras. Específicamente, en relación a la operación del modelo propuesto, se sugiere realizar un análisis enfocado a la separación óptima entre la cornisa y el dispositivo. Además, dada la falta de un sistema de orientación, se recomienda estudiar en profundidad las condiciones disponibles en el sitio de instalación, cuyo papel en el rendimiento operativo resulta fundamental.

Se reconoce que los datos medidos en la azotea de la facultad se relegaron a un plano secundario, con respecto a las demás herramientas, a pesar de haber sido útiles para los estudios realizados y haber contribuido a la disposición final. Esto se debe a que son datos limitados a la ubicación en donde se tomaron, con las respectivas complejidades que implica la localización en donde están ubicados los sensores.

En cuanto a las simulaciones numéricas empleadas, esta herramienta permitió estudiar diversas configuraciones de envolvente, lo cual condujo a la obtención de resultados muy valiosos. Entre ellos, estos estudios respaldan los resultados experimentales, y determinan el principio de funcionamiento de la envolvente final: obstrucción del flujo alrededor del aerogenerador mediante una falange recta. Como contraparte, no se logró simular la operación de las envolventes con un rotor en su interior, lo cual representa la principal limitación de la herramienta. Otro punto importante a resaltar es la sensibilidad del resultado respecto a la resolución de la malla utili-

zada. En etapas iniciales del proceso, se obtuvieron resultados contradictorios con la práctica, empleando una malla "gruesa" de menor resolución. Afortunadamente, mediante el refinamiento de la misma, éstos resultados pasaron a respaldar los experimentos. Asimismo, cabe destacar que la resolución empleada limita directamente los espesores mínimos de las estructuras a simular. Consecuentemente, las grillas gruesas demandan geometrías de espesores aumentados, y no permiten captar las sutilezas geométricas que se ven en la práctica; éste es el caso del empleo de perfiles aerodinámicos. A pesar de las limitaciones mencionadas, el empleo de simulaciones numéricas, con el agregado de una malla refinada adecuada, resultó crucial. Una vez verificada la concordancia con lo experimental, ésta herramienta permite extender enormemente el campo de envoltentes de estudio, algo que es absolutamente inviable desde el punto de vista práctico. Sentadas las bases para realizar una simulación con resultados confiables, se abren las puertas a estudiar y optimizar parámetros geométricos, como puede ser variar el ángulo de ataque de un perfil aerodinámico o la relación de diámetros entre una falange y un rotor.

Otro aprendizaje significativo sobre los modelos de envoltentes estudiados, obtenido de las simulaciones numéricas y que se insta a seguir investigando, es la implementación de una envoltente tipo Cono-Perfil. Su desempeño teórico, con el agregado de perfiles aerodinámicos, parece superar ampliamente al caso Cono-Recto, pendiente la evaluación del agregado del rotor. Adicionalmente, se destaca el análisis en cuanto a la relación de diámetros entre la falange y el rotor (ver A.8). Se considera que un aumento en esta relación podría beneficiar el rendimiento del dispositivo.

En las secciones 4.4 y 5.2, se abordan aspectos constructivos de las envoltentes, especialmente la seleccionada, y se discuten los materiales de construcción para lograr un diseño seguro. Se plantean métodos de sujeción, soportes adicionales, análisis de los modos de vibración, e incluso se proporcionan lineamientos para el diseño del generador que se ajuste a los requisitos planteados.

Por otro lado, al considerar los lineamientos constructivos propuestos y realizar estimaciones económicas que abarcan el costo del generador, los materiales y la mano de obra, se concluye que el valor de inversión inicial es muy alto y en base a la generación, la amortización del equipo llevaría mucho tiempo. Si bien podrían reducirse costos produciendo en cantidad o buscando precios mas bajos de fabricación, es muy difícil llegar a los valores que tienen otras formas de generación eléctrica. Sin embargo, no se pone en tela de juicio el valioso aprendizaje adquirido y los desafíos superados.

Persisten ciertos aspectos con un grado de incertidumbre, especialmente aquellos directamente vinculados con la implementación y operación del dispositivo. Uno de los desafíos más prominentes está relacionado con el arranque del dispositivo y las velocidades de viento incidente requeridas para lograr dicho arranque. Podría ser necesario, incluso, considerar la utilización de un dispositivo auxiliar que asista en el proceso.

En resumen, se realizó una minuciosa investigación con las herramientas a disposición, y se presentan resultados concretos, así como áreas de oportunidad que merecen una exploración más profunda. El objetivo principal es la implementación de un aerogenerador de flujo embebido mediante una envoltente segura, con el propósito de aprovechar los vientos disponibles a una escala urbana. Se llega a la conclusión de que el modelo Falange-Recto ofrece la configuración más simple, con mejor desempeño energético.

A. Anexo

A.1. Ensayo MF2

Tabla A.1.1: Medidas experimentales en túnel de viento (primeras cuatro columnas) y deducción de número de Reynolds asociado a cada una.

$\rho(kg/m^3)$	$V_1(m/s)$	$N(rpm)$	$Pot(W)$	a	$\lambda_{60\%}$	a'	$V_\infty(m/s)$	Re
1,21675	17,367	3272,611	151,481	0,025693	2,6936	0,0034502	49,897	80575,6
1,21878	16,186	3053,316	123,411	0,025820	2,6965	0,0034594	46,548	75166,6
1,23558	14,740	2809,865	96,536	0,026409	2,7248	0,0034630	42,783	69086,6
1,21591	18,279	3620,005	191,823	0,028058	2,8308	0,0034031	54,877	88616,4
1,21878	16,186	3296,496	123,600	0,025862	2,9112	0,0029725	49,822	80453,4
1,21591	18,279	3879,902	195,507	0,028631	3,0341	0,0030211	58,393	94294,2
1,21591	18,279	3926,955	192,436	0,028153	3,0709	0,0029014	59,032	95326,4
1,23558	14,740	3184,101	97,591	0,026714	3,0877	0,0027271	47,840	77253,6
1,21591	18,279	4235,660	190,767	0,027894	3,3123	0,0024716	63,243	102126,1
1,21675	17,367	4265,685	155,245	0,026368	3,5110	0,0020826	63,398	102377,0
1,23558	14,740	3628,868	97,636	0,026727	3,5191	0,0021006	53,924	87078,3
1,21675	17,367	4385,852	152,340	0,025847	3,6099	0,0019322	65,052	105047,5
1,18464	12,479	3165,429	54,770	0,025719	3,6259	0,0019059	46,936	75793,0
1,18821	16,039	4140,573	120,877	0,026706	3,6901	0,0019089	61,320	99020,7
1,18821	16,858	4422,130	130,579	0,024746	3,7495	0,0017166	65,419	105640,6
1,18424	10,788	3058,767	38,656	0,028255	4,0530	0,0016714	45,033	72720,3
1,18542	9,957	3036,012	25,592	0,023535	4,3584	0,0012098	44,525	71899,4
1,18464	12,989	4016,316	55,293	0,022894	4,4201	0,0011450	58,860	95049,3
1,18542	8,833	3003,779	14,024	0,018275	4,8608	0,0007594	43,836	70786,9
1,18902	11,686	3993,443	34,610	0,019467	4,8848	0,0008000	58,267	94090,5
1,18582	8,189	2883,549	10,120	0,016488	5,0335	0,0006400	42,024	67860,6
								84648,9

A.2. Iteración

Se utilizará la iteración de la Figura A.2.1 para corroborar los resultados obtenidos anteriormente del rotor ya diseñado.

²²Tomando como referencia una distribución de viento de Weibull con velocidad media 5 m/s

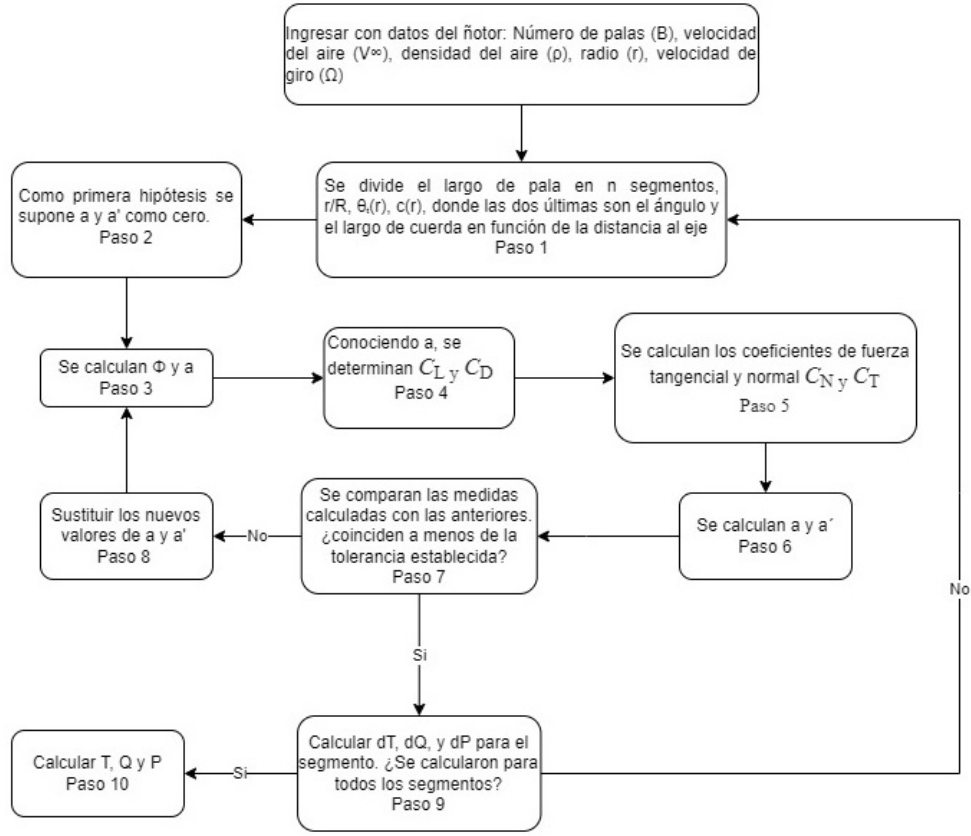


Figura A.2.1: Iteración aerogenerador eje horizontal a vena abierta

A.2.1. Primera versión del Script

Esta primera etapa del proyecto consiste en tomar la geometría conocida del rotor del aerogenerador del proyecto base[1], y corroborar su desempeño, comparándolo con resultados conocidos.

En particular, se tiene la curva experimental del coeficiente de potencia (C_p) en función de la velocidad específica (λ). Se pretende, utilizando la iteración anterior (Figura A.2.1), obtener una curva teórica $C_p(\lambda)$ en concordancia con la experimental.

De acuerdo a esto, se programó una primera versión de script, cuyo funcionamiento se plantea a continuación. Cabe destacar que, en primera instancia, no se tiene en cuenta la corrección de Prandtl de la bibliografía (ref), y se analiza su efecto a posteriori en A.2.5.

El script consta de un cuerpo principal en donde se definen distintos parámetros, como velocidad de giro N y el rango de velocidades de viento libre (V_1) que se desea explorar. Luego, para cada caso particular, consulta una función auxiliar simplificada.

A.2.2. Función Auxiliar $dif_{pot}(\beta_p, l_c, V_1, r, N, Z, dr)$

Las entradas de esta función se detallan a continuación. Se consideran parámetros fijos que son la densidad ρ y la viscosidad cinemática ν del aire.

- β_p : ángulo de pala.

- l_c : largo de cuerda.
- V_1 : velocidad del viento libre.
- r : radio de diseño considerado.
- N : velocidad de giro.
- Z : número de palas.
- dr : diferencial de radio al que pertenece r .

Al trabajar con valores discretos y realizar ciertas aproximaciones e interpolaciones, se debe topear la cantidad de iteraciones posibles para contemplar casos en los que no se obtiene una rápida convergencia. En este caso, se limitó el número de iteraciones a 500.

El procedimiento se esquematiza en la Figura A.2.2, con las correspondientes ecuaciones empleadas. El método itera en dos parámetros, denominados a y a_p (o a'), que corresponden a coeficientes de corrección empleados en los triángulos de velocidades del modelo analítico del funcionamiento de un aerogenerador. a corresponde a la fracción de la velocidad del viento que es absorbida por el rotor, mientras que a_p corrige la velocidad axial del viento en el rotor. Para comenzar este procedimiento primero se toman dos valores iniciales que son $a = 0$ y $a' = 0$. Con esto se puede calcular β_∞ según A.2.1.

$$\beta_\infty = \arctan\left(\frac{V_1(1-a)}{\omega r(1+a')}\right) \quad (\text{A.2.1})$$

Posteriormente se calcula α (A.2.2), V_∞ (A.2.3) y Re (A.2.4), suponiendo para la primer iteración $V_\infty = V_1$.

$$\alpha = \beta_\infty - \beta_P \quad (\text{A.2.2})$$

$$V_\infty = \frac{V_1(1-a)}{\sin \beta_\infty} \quad (\text{A.2.3})$$

$$Re = \frac{V_\infty l_c}{\nu} \quad (\text{A.2.4})$$

A partir de estos resultados se pueden obtener C_L y C_D de tablas. Posteriormente se calculan C_N (A.2.5) y C_T (A.2.6) que son los coeficientes de las fuerzas normales y tangenciales, respectivamente.

$$C_N = C_L \cos \beta_\infty + C_D \cos \beta_\infty \quad (\text{A.2.5})$$

$$C_T = C_L \sin \beta_\infty - C_D \cos \beta_\infty \quad (\text{A.2.6})$$

Para cerrar la iteración, se calcula σ_r con A.2.7 y luego se recalculan a y a' utilizando A.2.8 y A.2.9, respectivamente.

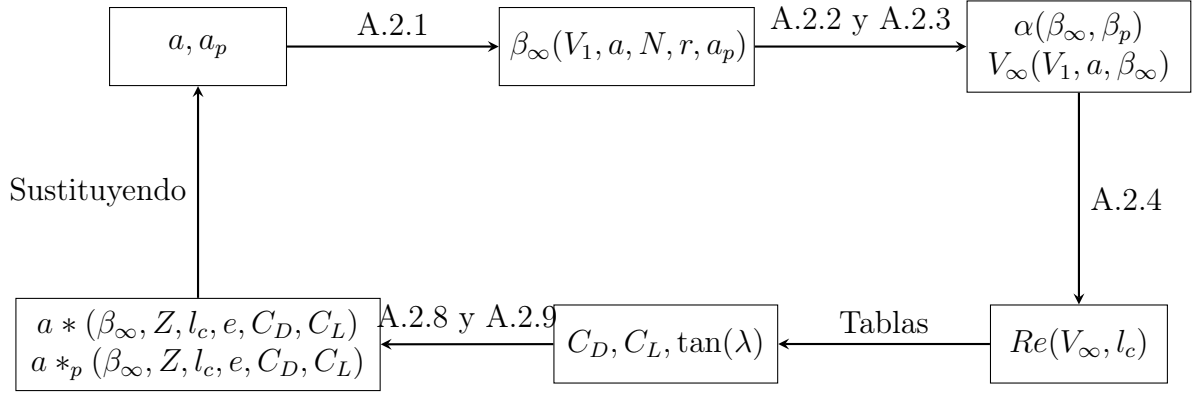


Figura A.2.2: Esquema de iteración desarrollada en la función auxiliar.

$$\sigma_r = \frac{Zl_c}{2\pi r} \quad (\text{A.2.7})$$

$$a^* = \frac{1}{\frac{4 \sin \beta_\infty^2}{\sigma_r C_N} + 1} \quad (\text{A.2.8})$$

$$a'^* = \frac{1}{\frac{4 \sin \beta_\infty \cos \beta_\infty}{\sigma_r C_T} - 1} \quad (\text{A.2.9})$$

Una vez terminada la iteración, se puede calcular el diferencial dp de potencia con A.2.10.

$$dp = Z \frac{2\pi N}{60} \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 [C_L \sin \beta_\infty - C_D \cos \beta_\infty] l_c r dr \quad (\text{A.2.10})$$

Y la función auxiliar tiene como salida los parámetros $dp, a, a', \alpha, Re, V_\infty, \beta_\infty$.

A.2.3. Script de Potencia: cuerpo principal

En primer lugar, se definen cuales son las variables fijas y conocidas, y qué parámetros se pueden variar. Éstos son:

- Parámetros Fijos
 - Geometría (para cada sección de diseño):
 - r : radio de diseño.
 - l_c : largos de cuerda
 - β_p : ángulos de pala.
 - Z : número de palas.
 - D_{int} : diámetro interior.
 - D_{ext} : diámetro exterior.
 - Secciones de diseño (10).
- Parámetros Variables:

- N : velocidad de giro.
- $vec(V_1)$: vector de velocidades de viento libre.

Partiendo de cada velocidad de viento libre del vector, se utiliza A.2.11 para hallar la velocidad específica correspondiente (independiente de la sección), y se aplica la función auxiliar (Subsubsección A.2.2) para cada una de las secciones de diseño, con los parámetros correspondientes.

$$\lambda(D_{ext}, V_1, N)$$

$$\lambda = \frac{0,5D_{ext}}{V_1} \left(\frac{2\pi N}{60} \right) \quad (A.2.11)$$

$$dif_{pot}(\beta_p, l_c, V_1, r, N, Z, dr) \quad (A.2.12)$$

Si la iteración cierra, se obtiene un diferencial de potencia dp no nulo para cada sección de diseño, y se realiza la suma en las secciones para obtener la potencia total a dicha velocidad V_1 . Con la misma se puede calcular el coeficiente de potencia (A.2.13).

$$C_p(Pot) = \sum_{i=1}^{10} dp, D_{ext}, V_1) \quad (A.2.13)$$

$$C_p = \frac{Pot}{\frac{1}{2}\rho\pi\frac{1}{4}D_{ext}^2 V_1^3}$$

A su vez, se van registrando los valores obtenidos de V_1, a, a', α y Re de cada sección de diseño. Finalmente, con los valores de C_p y λ , se puede graficar la curva deseada, la cuál va a depender fuertemente del número de Reynolds (A.2.4).

A.2.4. Influencia del número de Reynolds

Resulta importante destacar la dependencia de la curva $C_p(\lambda)$ con el número de Reynolds. La misma se ve reflejada en los resultados de la iteración anteriormente descrita, por lo que cambios en la condición de funcionamiento (N o V_1) dan lugar a distintos valores de los coeficientes C_L, C_D, C_P, a y a' para una misma velocidad específica, λ .

Para evidenciar lo anterior, se toma un valor fijo de velocidad específica $\lambda = 4,5$ y se grafican, a continuación, los valores que toman los coeficientes mencionados, junto con el valor de Re respectivo, a lo largo de las diez (10) secciones de diseño de la pala, para dos condiciones de velocidad de giro N y viento V_1 distintas que se ven en la Tabla A.2.1.

Tabla A.2.1: Dos condiciones de funcionamiento analizadas, para un mismo valor de velocidad específica λ .

$\lambda = 4,5$	$N(rpm)$	$V_1(m/s)$
Re, C_D, C_L, C_P, a, a'	850	7,9122
$Re, C_{L1100}, C_{D1100}, C_{P1100}, a_{1100}, a'_{1100}$	1100	10,2393

De este análisis surgen las gráficas comparativas en donde se ven los resultados analíticos para los valores obtenidos con $N = 850rpm$ y $N = 1100rpm$ en líneas

punteadas. Primero con este cambio de velocidad de giro se obtiene un aumento del Reynolds, como se puede apreciar en la Figura A.2.3.

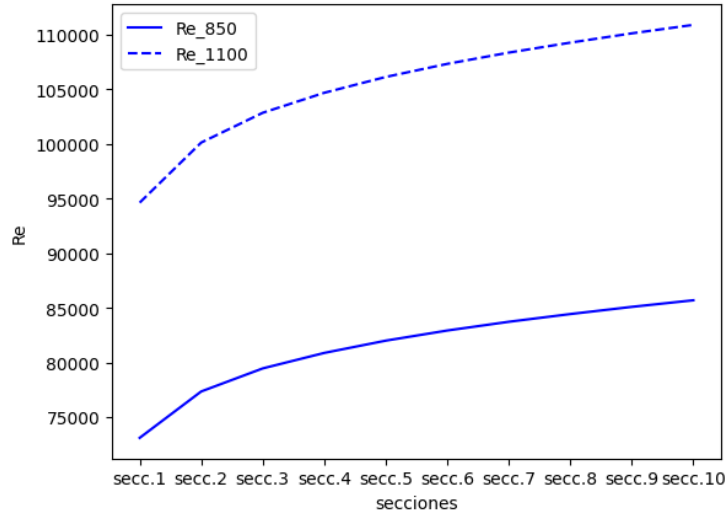


Figura A.2.3: Gráfica de cambio de Reynolds con N .

Con este cambio de Reynolds, los valores de C_L aumentan y lo opuesto sucede con C_D , lo que se observa en la Figura A.2.4.

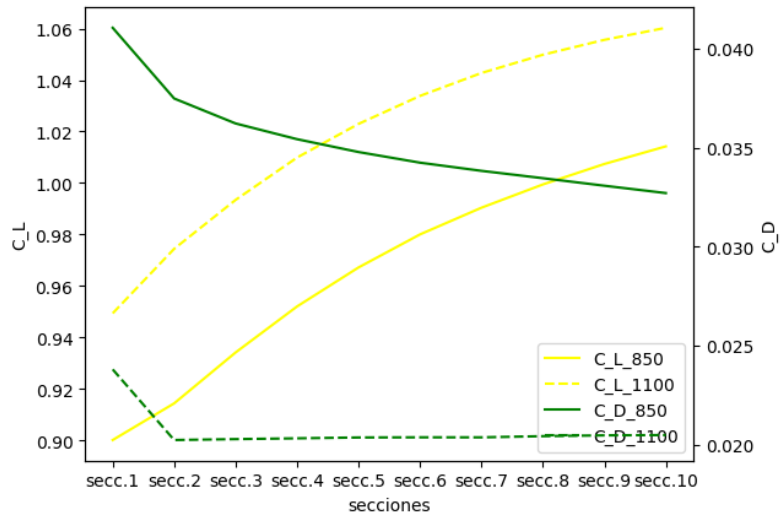


Figura A.2.4: Gráfica de cambio de C_L y C_D con N .

Debido a esto, también cambian los valores de a y a' , nuevamente se aprecia este cambio en la Figura A.2.5.

Con estos cambios, relacionados al cambio de la velocidad de giro (manteniendo la velocidad específica) y por lo tanto de Reynolds, también se tiene que el C_P aumenta de 0,46 a 0,51.

A.2.5. Corrección de Prandtl

La corrección de Prandtl está ligada a un fenómeno que ocurre en las palas de los aerogeneradores, en la cercanía de los extremos de las mismas. Esta corrección es

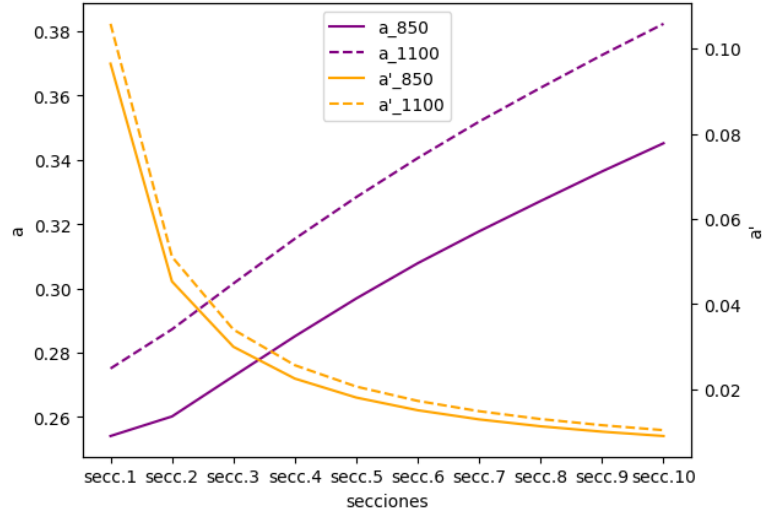


Figura A.2.5: Gráfica de cambio de a y a' con N .

necesaria para tener en cuenta las diferencias en el comportamiento aerodinámico de las partes interna y externa de la pala.

Cuando una pala de un aerogenerador gira y se mueve a través del viento, la velocidad del aire que se encuentra en la parte exterior de la pala (la punta) es mayor que la velocidad del aire que se encuentra en la parte interior de la pala (la raíz). Esto se debe a que la punta de la pala viaja a una distancia mayor en la misma cantidad de tiempo que la raíz de la pala. Como resultado, se crea una diferencia en las velocidades del aire a lo largo de la pala.

La corrección de Prandtl es un ajuste que se aplica en los cálculos aerodinámicos para tener en cuenta esta diferencia en las velocidades del aire. Sin esta corrección, los cálculos no serían precisos al no reflejar el comportamiento real de las palas del aerogenerador a medida que se acercan al extremo. Esta corrección ayuda a estimar de manera más precisa la eficiencia y el rendimiento de un aerogenerador.

Numéricamente la corrección se realiza sobre la fuerza de sustentación según:

$$L_{\text{corregido}} = \lambda \cdot L_{\text{calculado}} \quad (\text{A.2.14})$$

donde:

$$\lambda = \frac{1}{1 - \frac{dL}{d\alpha} \frac{c}{4\phi R}} \quad (\text{A.2.15})$$

A.2.6. Curva Experimental MF2

En paralelo, se tienen datos de un ensayo experimental en el túnel de viento del rotor sin envolvente (vena abierta), realizado como parte del proyecto anterior en "Máquinas para Fluidos 2". En el mismo se tomaron medidas de temperatura $T(^{\circ}C)$, presión $p(Pa)$, velocidad del viento en el túnel corregida por un factor de obstrucción del área de pasaje[5] $V_1(m/s)$, velocidad de giro $N(rpm)$ y potencia obtenida $Pot(W)$. A continuación en la Figura A.2.6 se esquematiza el procedimiento aplicado para obtener, en cada punto experimental, el valor de Reynolds para un radio representativo del 60 % de la pala.

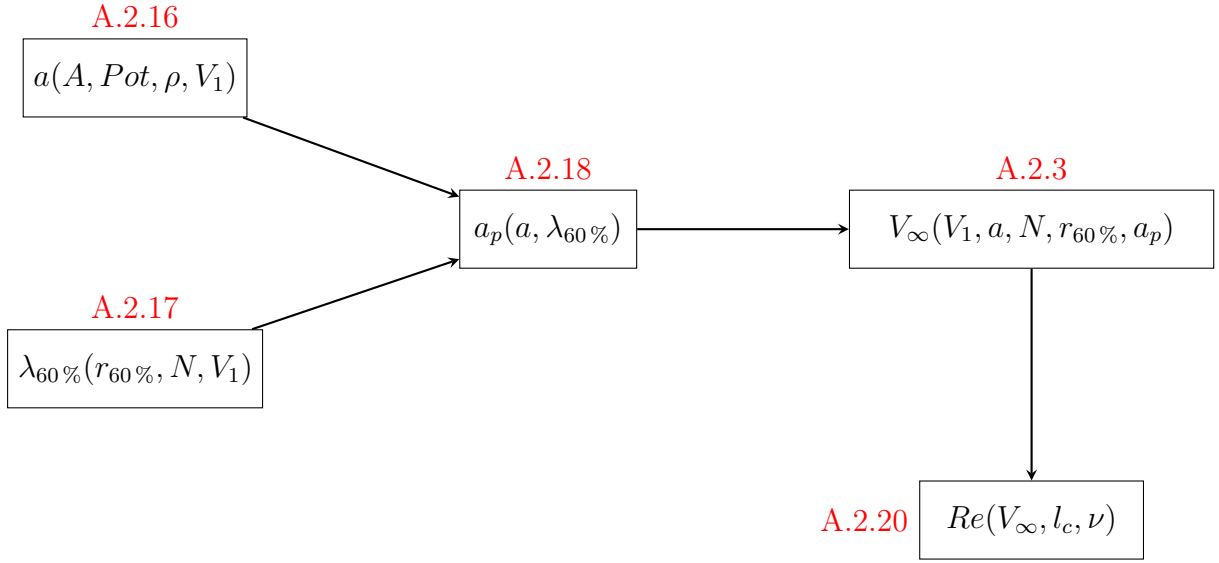


Figura A.2.6: Esquema de cálculo de Número de Reynolds en ensayo experimental.

Para resolver este sistema se utilizan las siguientes ecuaciones, con ν , l_c , $r_{60\%}$ y A conocidos.

$$Pot = 2\rho AV_1^3 a(1-a)^2 \quad (A.2.16)$$

$$\lambda_{60\%} = \frac{2\pi N}{60} \frac{r_{60\%}}{V_1} \quad (A.2.17)$$

$$a_p = \frac{a(1-a)}{\lambda_{60\%}^2} \quad (A.2.18)$$

$$V_\infty = \sqrt{V_1^2(1-a)^2 + \left(\frac{2\pi N}{60} r_{60\%}\right)^2(1+a_p)^2} \quad (A.2.19)$$

$$Re = \frac{V_\infty l_c}{\nu} \quad (A.2.20)$$

Con los resultados detallados en la Tabla A.1.1, se calcula el número de Reynolds promedio del experimento $Re = 85000$, y se utiliza el Script de Potencia para sacar una curva $C_p(\lambda)$ para este Reynolds fijo. De esta forma, se pueden comparar los resultados experimentales del proyecto anterior con dicha curva teórica. Lo mismo se observa en las figuras A.2.7 y A.2.8.

A.2.7. Resultados

En la Tabla A.2.2 se presentan los resultados obtenidos con el Script de Potencia para una misma geometría con diferentes velocidades de giro.

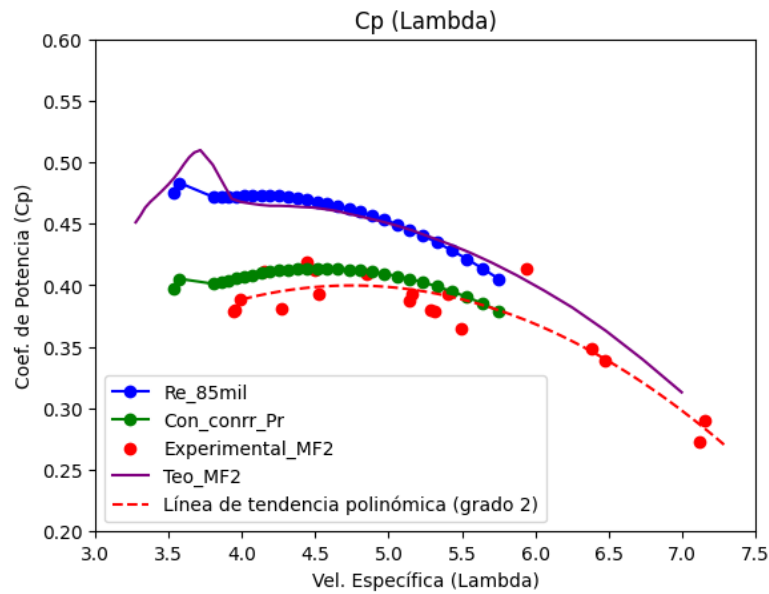


Figura A.2.7: Comparación de curvas teóricas $C_p(\lambda)$ con ensayo experimental a vena abierta. El trazo violeta liso corresponde al modelo teórico del proyecto anterior. Los trazos lisos con marcadores corresponden a las curvas teóricas del script de potencia, con y sin corrección de Prandtl. En rojo, se muestran los puntos experimentales y su curva punteada de tendencia.

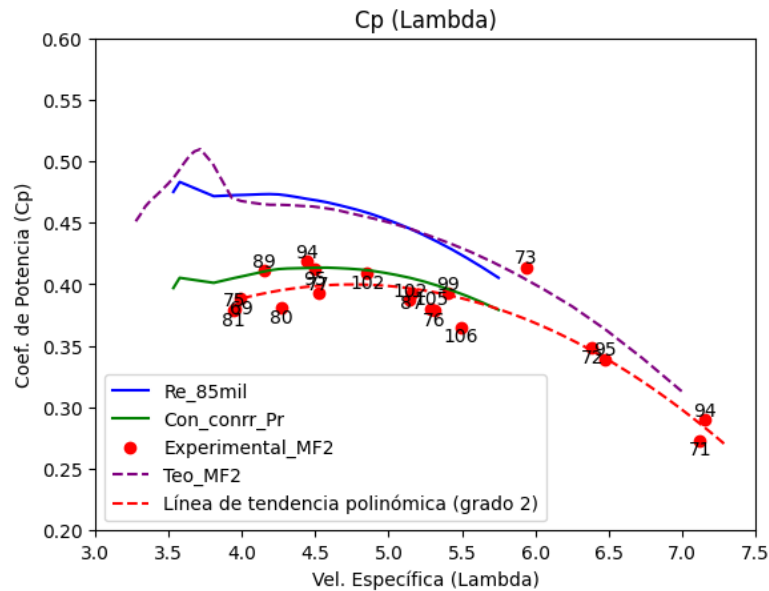


Figura A.2.8: Comparación de curvas teóricas $C_p(\lambda)$ con ensayo experimental a vena abierta. Se indican la milésima parte de los valores de Reynolds de cada punto experimental medido (puntos rojos).

Tabla A.2.2: Tabla con resultados analíticos para una misma geometría con dos velocidades de giro diferentes.

N	850.00	V1	7.91	λ		4.50	N		1100.00	V1	10.24
Secc	secc.1	secc.2	secc.3	secc.4	secc.5	secc.6	secc.7	secc.8	secc.9	secc.10	Prom
Re	73094.98	77344.14	79455.31	80872.94	81997.91	82925.83	83725.73	84433.28	85092.40	85694.92	81463.74
Re	94633.75	100136.31	102864.20	104694.67	106146.93	107344.39	108376.10	109288.77	110138.94	110916.08	105454.01
C_D	0.04105	0.03748	0.03622	0.03542	0.03477	0.03424	0.03382	0.03345	0.03307	0.03270	0.03522
C_D	0.02379	0.02022	0.02027	0.02031	0.02035	0.02036	0.02036	0.02042	0.02046	0.02047	0.02070
C_L	0.90012	0.91437	0.93415	0.95203	0.96718	0.98002	0.99040	0.99944	1.00739	1.01424	0.96593
C_L	0.94936	0.97442	0.99344	1.00989	1.02297	1.03384	1.04275	1.04984	1.05564	1.06031	1.01925
C_P	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097	0.46097
C_P	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114	0.50114
a	0.25408	0.26016	0.27269	0.28510	0.29689	0.30785	0.31778	0.32721	0.33642	0.34518	0.30034
a	0.27509	0.28728	0.30154	0.31546	0.32842	0.34057	0.35193	0.36245	0.37264	0.38235	0.33177
a_p	0.09643	0.04532	0.02999	0.02252	0.01807	0.01510	0.01295	0.01133	0.01006	0.00904	0.02708
a_p	0.10580	0.05111	0.03403	0.02566	0.02065	0.01729	0.01487	0.01303	0.01158	0.01042	0.03044

A.3. Simulación numérica: Malla gruesa y envolvente Cono-Recto 1er intento

La Figura A.3.1 corresponde a un corte horizontal medio ($z = 1m$) de la variable que ilustra la geometría del concentrador en el dominio del túnel. Se puede observar que hubo un error en el posicionamiento de esta misma, por lo que quedó ligeramente descentrada en el eje y - vertical en el gráfico.

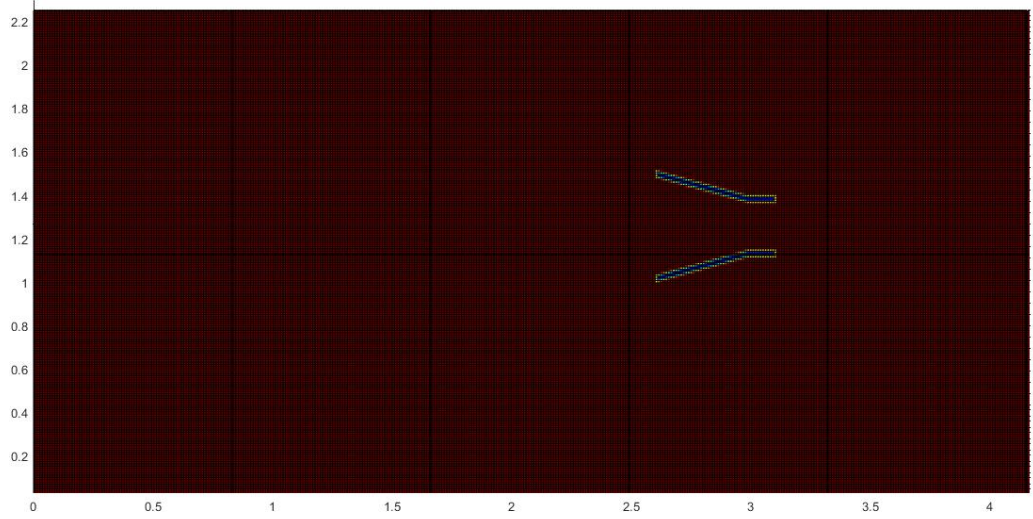


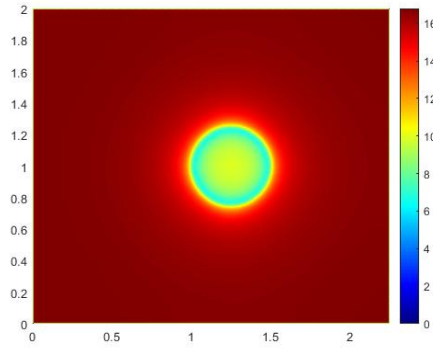
Figura A.3.1: Corte horizontal del dominio simulado a una altura media $z = 1m$, que indica la ubicación del concentrador en el túnel: bloques 7 y 8 de malla gruesa.

En la Figura A.3.2 se tienen cortes verticales a distintas alturas que ilustran la componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades, en el segundo 1000 de simulación. A su vez, la Figura A.3.3 indica la ubicación de estos planos en la vista horizontal.

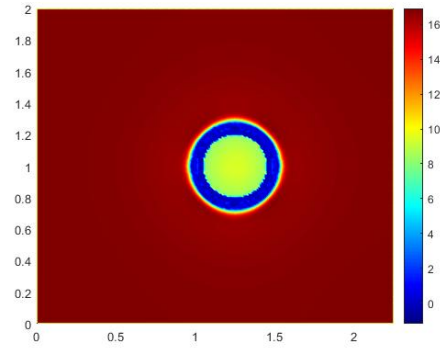
En la primera de ellas se contempla la situación inmediatamente previa al ingreso del concentrador, por lo que se tiene un centro amarillo correspondiente a la zona de bloqueo, un anillo celeste donde se ubica el concentrador (y alrededores), seguido de otro anillo amarillo y una transición al rojo más intenso. La zona central tiene velocidades del orden de $9,8m/s$, y la zona más lejana $16,7m/s$.

En el segundo y tercer corte vertical se observa un anillo azul intenso en crecimiento. En esta zona se encuentra el flujo que queda "por detrás" del concentrador (estela), al disminuir éste su sección. El flujo allí experimenta velocidades mucho menores e incluso negativas, correspondiente a recirculaciones. Por otro lado, se observa que el módulo de la velocidad en la zona central va en aumento.

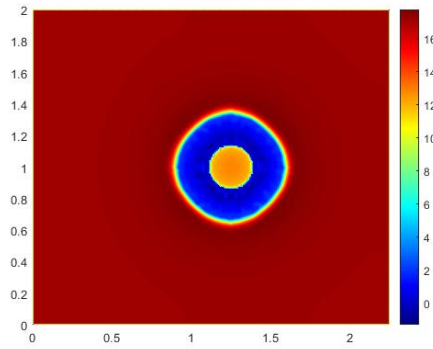
En el último corte vertical se tiene una velocidad central superior al flujo uniforme incidente, del orden de $18m/s$. Ésta situación es ideal para colocar el rotor. La Figura A.3.4 contiene etiquetas indicando algunos valores de velocidad.



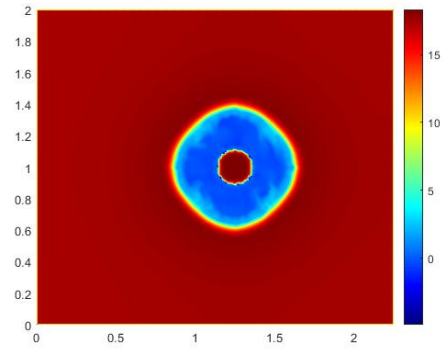
(a) Corte vertical a $x = 2,594m$, celda 10 de bloques 7 y 8.



(b) Corte vertical a $x = 2,698m$, celda 20 de bloques 7 y 8.



(c) Corte vertical a $x = 2,905m$, celda 40 de bloques 7 y 8.



(d) Corte vertical a $x = 3,113m$, celda 60 de bloques 7 y 8.

Figura A.3.2: Cortes verticales a distintas alturas que ilustran la componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades (U_x), en el segundo 1000 de simulación.

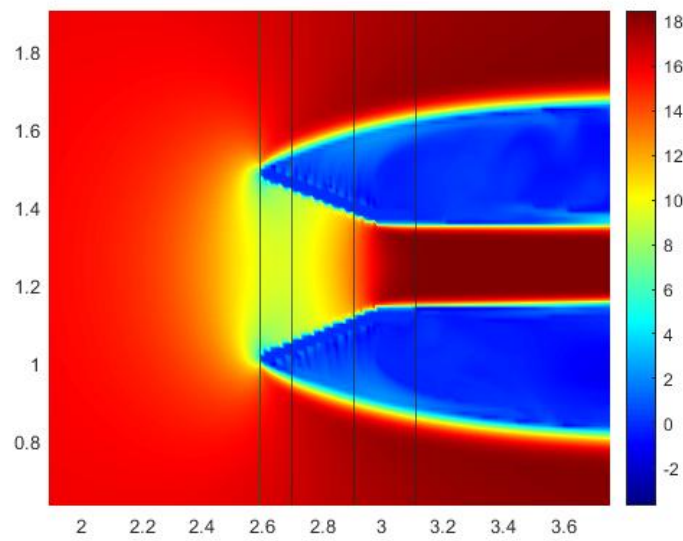


Figura A.3.3: Ubicación de los 4 planos verticales de la Figura A.3.2 en una vista horizontal, quitando la grilla.

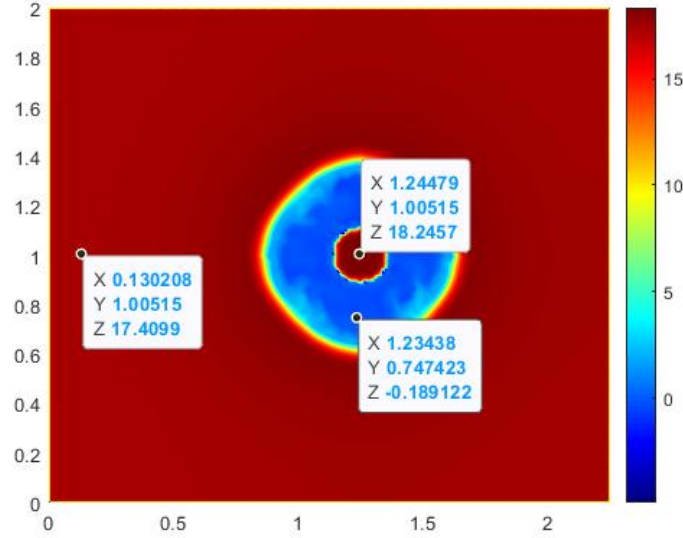


Figura A.3.4: Corte vertical a $x = 3,113m$, celda 60 de los bloques 7 y 8 del dominio, con etiquetas indicando algunos valores de velocidad.

A.4. Simulación numérica: Malla gruesa y envolvente Cono-Recto - corrección

A.4.1. Cálculo de Potencia Cinética en una Sección Vertical

A continuación se sientan las bases del cálculo realizado en cierta sección de interés - como puede ser la sección de salida de la envolvente.

1. Se calcula el campo de velocidades medias en el tiempo y guarda en una estructura denominada U_{mean} (A.4.1). En este caso particular, se opta por descartar los primeros 2000 pasos temporales por precaución.

$$U_{mean} = mean(PNT(2).U(:, :, :, 2001 : 3000), 5) \quad (A.4.1)$$

2. Se crea un loop (for) que recorre cada celda del plano y registra las coordenadas del centro de la misma. Se calcula:
 - La distancia de la celda al centro del plano. Si la misma es menor al radio de la envolvente en la sección considerada, la celda pertenece al área de interés para los cálculos de energía cinética y potencia.
 - De cumplirse el ítem anterior, se contabilizan los aportes diferenciales de energía cinética y potencia de la celda, utilizando su velocidad media. También se registra la cantidad de celdas en la sección de interés, para corroborar el área (que es un dato). Se emplean las fórmulas A.4.3 y A.4.2, donde ρ corresponde a una densidad de $1,4 \frac{kg}{m^3}$. V_{med} representa la velocidad media calculada para la celda, y dA su diferencial de área, usualmente de $1cm^2$.
3. Culminado el loop, se tiene la potencia y energía cinética, con lo que se pueden estimar parámetros como el "área equivalente" o "diámetro equivalente" (ver

A.4.4 y A.4.5). Además, se verifica el área calculada de forma discreta y mediante su fórmula matemática (ver A.4.6 y A.4.7, siendo ii el número de celdas contadas y d_{int} un dato).

$$Pot(W) = Pot + \frac{1}{2} * \rho * dA * V_{med}^3 \quad (A.4.2)$$

$$EnC(\frac{J}{m}) = EnC + \frac{1}{2} * \rho * dA * V_{med}^2 \quad (A.4.3)$$

$$A_{eq}(m^2) = \frac{Pot}{\frac{1}{2} * \rho * 16^3} \quad (A.4.4)$$

$$D_{eq}(m) = \sqrt{\frac{A_{eq}}{\frac{\pi}{4}}} \quad (A.4.5)$$

$$A(m^2) = ii * dA \quad (A.4.6)$$

$$A_{cfa}(m^2) = \frac{1}{4} * \pi * d_{int}^2 \quad (A.4.7)$$

$$Error(cm^2) = (A_{cfa} - A) * 100^2 \quad (A.4.8)$$

$$Error(\%) = \frac{Error}{100 * A_{cfa}} \quad (A.4.9)$$

A.4.2. Otros resultados de la simulación

En la Figura A.4.1 se tiene un corte horizontal medio ($z = 1m$) de la variable que ilustra la geometría del concentrador en el dominio del túnel. Se puede observar que la posición de la misma ha sido corregida - centrada.

Por otro lado, la Figura A.4.2 ilustra el campo de velocidades medio de la sección correspondiente a la salida de la envolvente, punteada en la Figura 4.1.9. Este gráfico indica, para cada coordenada (xy) del plano, la velocidad media alcanzada. Se representa con una altura correspondiente (eje z) y una escala de colores.

A.5. Simulación numérica: Malla Gruesa y Envolvente Cono-Recto - D_{rotor} reducido

La Figura A.5.1 indica el campo de velocidades medio de la sección de salida de la envolvente, análoga a la Figura A.4.2.

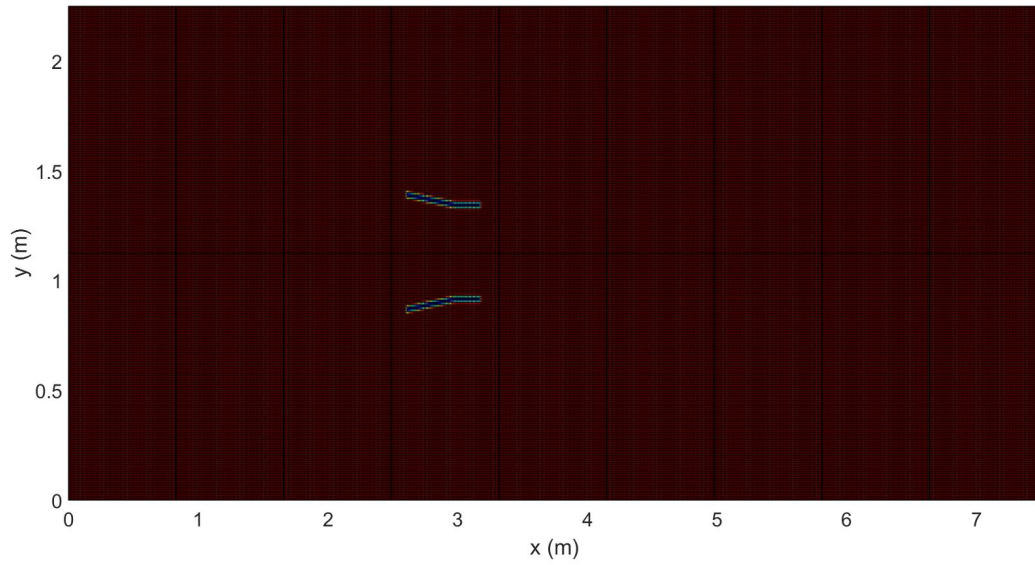


Figura A.4.1: Corte horizontal del dominio simulado a una altura media $z = 1m$, que indica la ubicación del concentrador en el túnel: bloques 7 y 8 de malla gruesa.

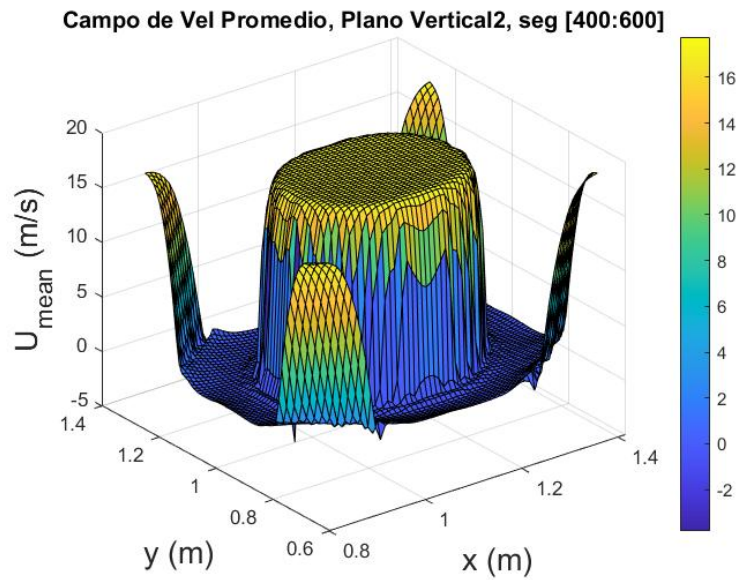


Figura A.4.2: Campo promedio de velocidades, entre los segundos 400 y 600, en un plano vertical ($60cm \times 60cm$) en la salida de la envolvente.

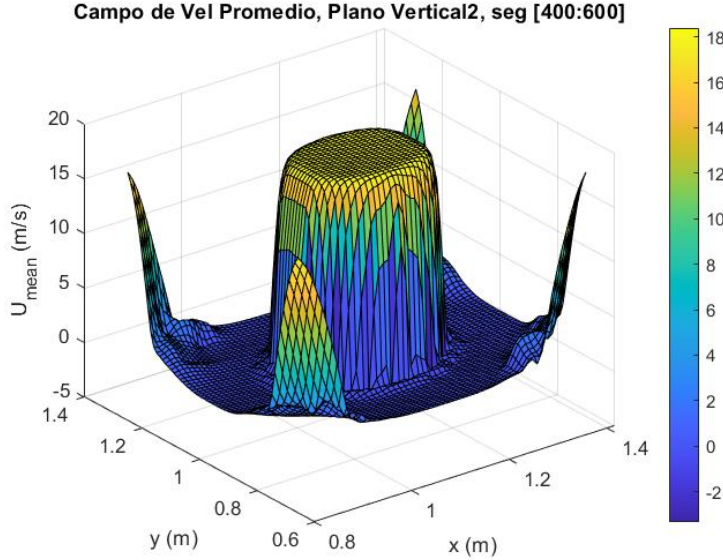


Figura A.5.1: Campo promedio de velocidades, entre los segundos 400 y 600, en un plano vertical ($60\text{cm} \times 60\text{cm}$) en la salida de la envolvente.

A.6. Malla Gruesa y Envolvente Falange-Recto

Como fue mencionado anteriormente en 4.1.3.1, las primeras simulaciones que arrojaron resultados exitosos se llevaron a cabo exclusivamente con una malla gruesa, lo que limitó las geometrías bajo estudio. En este contexto, se procedió a analizar una segunda categoría de envolventes, utilizando la geometría denominada "*Falange – Recto*", la cual se describe en detalle en la sección 2.2.1. La simulación comprendió un total de 5000 pasos temporales, equivalente a una duración de 1000 segundos.

Durante esta fase, se optó por un espesor mayor de 50mm para el cilindro en comparación con los 25mm de la falange. El diámetro interior del cilindro fue establecido en 310mm , mientras que el exterior de la falange se fijó en 500mm . Esta elección resultó en una relación de diámetros de 1,61.

La elección del diámetro mayor está experimentalmente restringida por el coeficiente de bloqueo del túnel de viento, explicitado en 3.1. Por otra parte, el diámetro interior está acotado inferiormente, por la precisión que se puede alcanzar en la impresión 3D del rotor. Dichas condiciones determinan la relación de diámetros de la geometría, si bien es menor a la hallada en referencias - Abe et al. (2005) utiliza una relación de diámetros de 2,53[10].

De forma análoga a 4.1.3.1, se realizan distintos cortes tanto horizontales como verticales, de la componente según la dirección del flujo del campo instantáneo de velocidades, en el último segundo simulado (segundo 1000, paso temporal número 5000).

La Figura A.6.1 ilustra esta variable en el plano horizontal medio del dominio.

Es crucial destacar, en primer lugar, que las velocidades más elevadas, evidenciadas por tonos rojos más intensos en la Figura A.6.1, se manifiestan principalmente a lo largo del eje de rotación de la envolvente, después de que esta estructura ha finalizado. Esto sugiere, en principio, que la presencia de la envolvente genera condiciones propicias para un aumento significativo de la velocidad en su interior. No obstante,

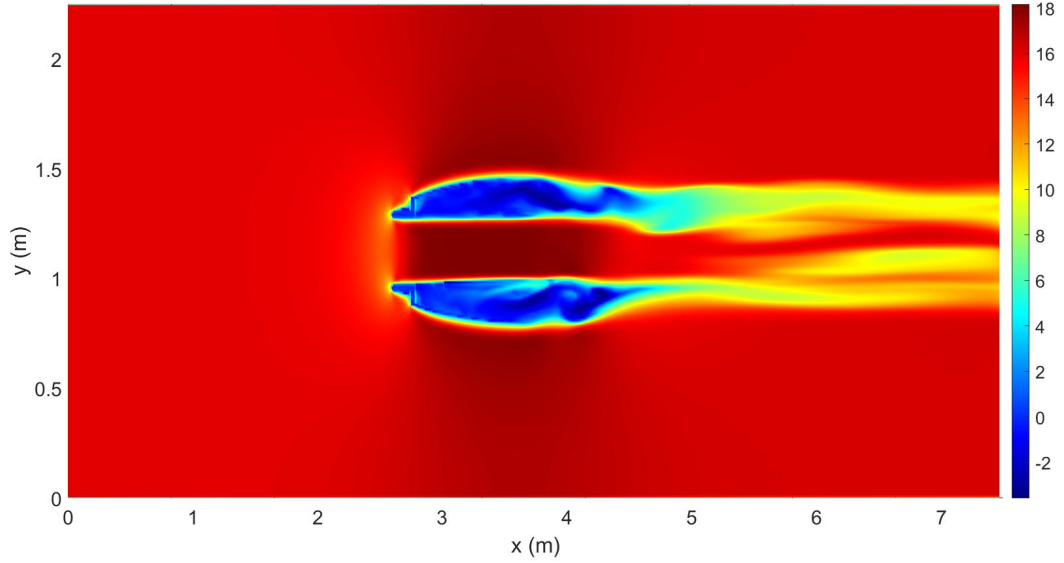


Figura A.6.1: Componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades, en un corte horizontal medio ($z = 1m$), en el segundo 1000 de simulación.

surge un dilema, ya que este incremento en la velocidad podría no ser completamente aprovechado, dado que el rotor debe ubicarse dentro de la propia envolvente.

En la Figura A.6.2 se presenta el corte horizontal del campo instantáneo de velocidades (A.6.1), con cinco líneas que representan planos verticales analizados. Cuatro de ellas son de color negro, y se corresponden con los cuatro planos analizados en 4.1.3.1. Cada uno de estos cortes se ilustra en la Figura A.6.3. Las velocidades máximas alcanzadas son $13,86m/s$, $15,80m/s$, $17,95m/s$ y $18,08m/s$ respectivamente.

La quinta línea agregada a A.6.2, de color blanco, se encuentra representada en la Figura A.6.4, y se corresponde con la zona aproximada donde se podría colocar el rotor en este modelo. La máxima velocidad alcanzada aquí es de $16,69m/s$.

Se evidencia claramente, en las figuras anteriores, que las velocidades más elevadas, alrededor de $18m/s$, se localizan a una distancia de más de dos diámetros después de la finalización de la geometría de la envolvente. Esta observación resulta esencial para comprender la variante discutida en la sección "Malla Gruesa y Envolvente Falange-Recto alargada" A.7.

En segundo lugar, al comparar las Figuras 4.1.5 y A.6.1, surgen dos observaciones fundamentales. Primeramente, se pueden identificar distintos modos de formación y desarrollo de las estelas en ambas configuraciones. En el caso de la primera, se observa una zona convergente que resulta en el desarrollo de estelas de mayor grosor, las cuales se mantienen a lo largo de todo el dominio simulado. Por otro lado, en la última configuración, la presencia de la falange conduce a una formación abrupta de las estelas, las cuales se atenúan de manera más rápida, posiblemente debido a la exposición inmediata al efecto de succión generado por la mayor velocidad en la zona central interior.

La segunda observación está vinculada a las regiones en las que se alcanzan las magnitudes más elevadas de velocidad. Como se mencionó previamente, la envolvente Falange-Recto presenta la desventaja de que las velocidades más altas se alcanzan en áreas que no son aprovechables. Se destaca que, si bien la máxima velocidad ronda los

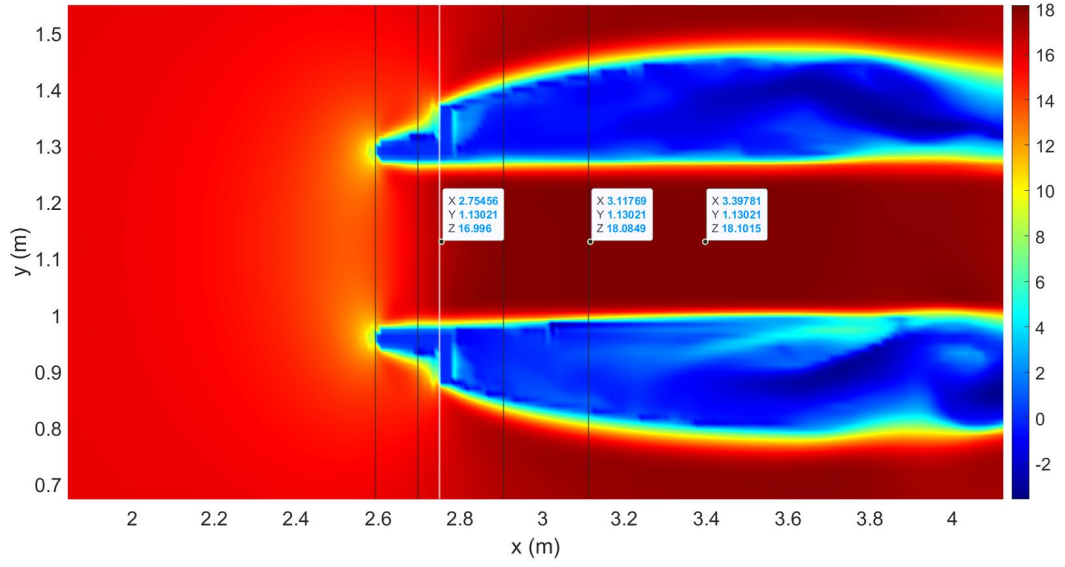
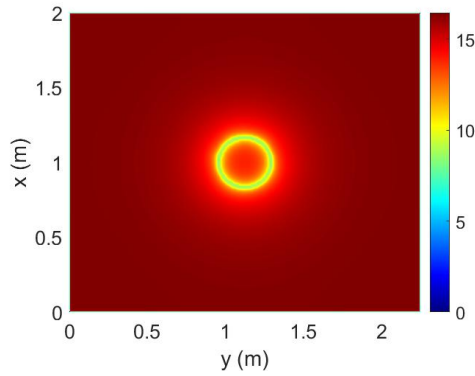
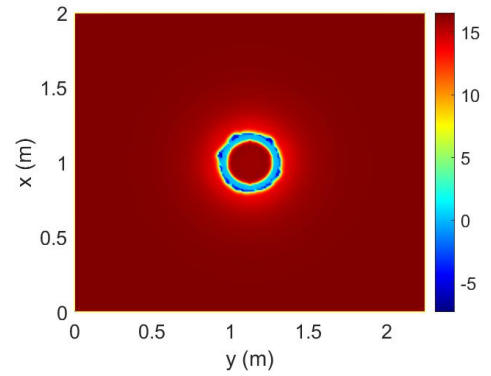


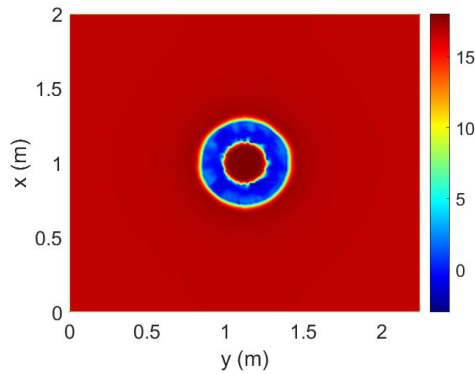
Figura A.6.2: Ubicación de los 4 planos verticales de la Figura A.6.3, y un quinto (línea blanca) correspondiente a la Figura A.6.4, en una vista horizontal, quitando la grilla.



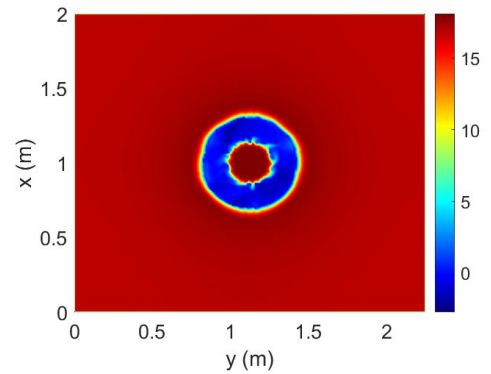
(a) Corte vertical a $x = 2,594m$, celda 10 de bloques 7 y 8.



(b) Corte vertical a $x = 2,698m$, celda 20 de bloques 7 y 8.



(c) Corte vertical a $x = 2,905m$, celda 40 de bloques 7 y 8.



(d) Corte vertical a $x = 3,113m$, celda 60 de bloques 7 y 8.

Figura A.6.3: Cortes verticales a distintas alturas que ilustran la componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades (U_x), en el segundo 1000 de simulación, envoltente Falange-Recto.

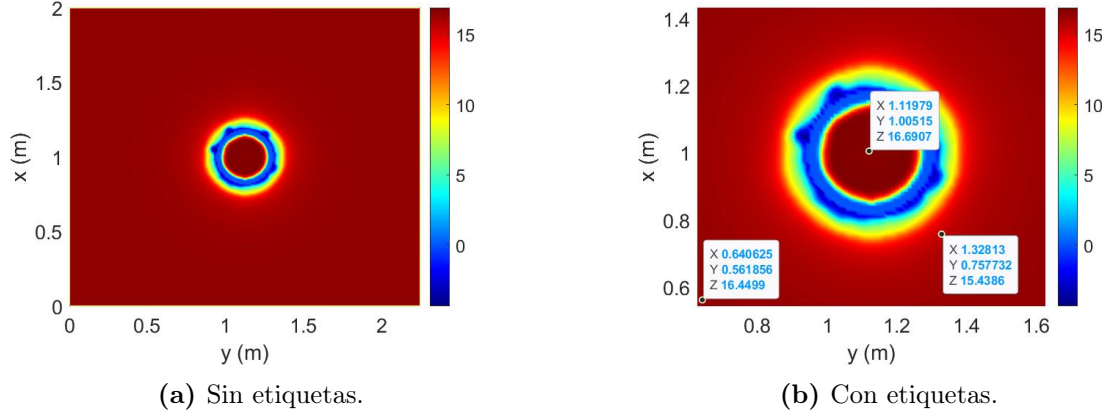


Figura A.6.4: Corte vertical a $x = 2,749m$, celda 25 de los bloques 7 y 8 del dominio, con y sin etiquetas indicando algunos valores de velocidad.

$18m/s$ en $x = 3,11m$, en la sección específica donde se colocaría el rotor, se registra una velocidad de apenas $16,69m/s$ ($x = 2,75m$).

Con los resultados de la simulación, se obtiene la evolución temporal de las velocidades en el plano a la salida de la envolvente. A partir de esto, se calcula una potencia cinética discreta de $175,14W$. Al compararla con la potencia meteorológica de $184,07W$, correspondiente a un viento libre de $16m/s$ en la sección de $0,0749m^2$, se tiene una pérdida de $8,93W$, lo que equivale al $4,85\%$.

Otra manera de interpretar esta potencia cinética es calculando su área equivalente en el contexto de un viento incidente uniforme a una velocidad de $16m/s$, siguiendo el principio de conservación de masa. En este caso, la potencia disponible en la sección de diámetro $0,3100m$, es equivalente a la disponible en una sección de diámetro ligeramente menor, de $0,3012m$, manteniendo una velocidad uniforme.

La Tabla A.6.1 presenta una concisa comparación entre los casos Falange-Recto y Cono-Recto, considerando un valor reducido para D_{rotor} . Éste último es tal que el diámetro del rotor coincide con el caso de la falange, estableciéndose en $31cm$.

	Falange_Recto (31cm)	Cono_Recto (31cm)	Dif.
$A_{salida}(m^2)$	0,1305	0,0749	baja 42,6 %
$Pot_{salida}(W)$	175,1400	221,0126	sube 26 %
$Pot/A \left(\frac{W}{cm^2}\right)$	0,2338	0,2951	idem
Pérd. ²³ (%)	4,85	54,20	sube
$V_{max}\left(\frac{m}{s}\right)$	16,69 ²⁴	18,18	sube 9 %
$\frac{D_{eq}}{D_{orig}}$	0,97	1,09	-
$Rend.$	0,3629	0,4580	baja 26 %

Tabla A.6.1: Comparación casos Falange-Recto y Cono-Recto con reducción del diámetro de salida (rotor).

En resumen, la tabla anterior sugiere que, para un mismo diámetro de rotor, la envolvente tipo concentrador o "cono" parece capturar de manera más efectiva el flujo incidente. No obstante, es crucial tener en cuenta que estos resultados carecen de respaldo experimental. En contraste, se observa que la adición de la envolvente tipo falange posibilita un incremento en el coeficiente de potencia en comparación

con el rotor a vena abierta, mientras que la envolvente tipo concentrador no muestra la misma mejora.

Esta discordancia podría deberse a diversas condiciones, como hipótesis simplificadas utilizadas en las simulaciones, la omisión del rotor en la simulación y la falta de refinamiento de la malla. Es importante señalar que estos resultados carecen de confiabilidad y respaldo, y no son relevantes para el desarrollo del estudio.

A.7. Malla Gruesa y Envolvente Falange-Recto Alargada

A partir de los resultados obtenidos en la sección anterior, surge la idea "alargar" la sección cilíndrica de la geometría, de manera que la falange no quede ubicada en la sección de salida. La Figura A.7.1 corresponde a un corte horizontal en la que se ilustra la geometría sobre la grilla de la malla gruesa.

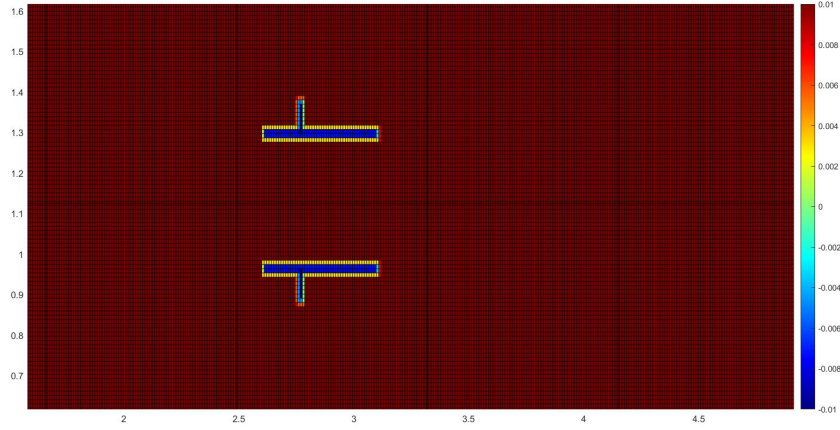


Figura A.7.1: Patch falange alargado (zoom).

A continuación, la Figura A.7.2 representa la componente según la dirección del flujo del campo instantáneo de velocidades, en un corte horizontal medio, en el segundo 600 de simulación. Esta figura no muestra diferencias apreciables en comparación con la Figura A.6.1, y se le han añadido cinco líneas que representan planos verticales analizados.

Cuatro de ellas son de color negro, y se corresponden con los cuatro planos analizados en 4.1.3.1 y A.6. Cada uno de estos cortes se ilustra en la Figura A.7.3.

La quinta línea, de color blanco, indica la posición donde se podría colocar el rotor en el caso de Falange-Recto. Aquí, se dispone de aproximadamente $16,8m/s$ de velocidad máxima en el centro, mientras que ahora se observan velocidades del orden de $18m/s$ dentro de la envolvente (en posiciones de x mayores).

La potencia cinética discreta se calcula en $183,24W$, lo que equivale a una sección de diámetro equivalente de $0,3081m$, manteniendo una velocidad uniforme de $16m/s$.

En conclusión, se plantea la noción de que se puede extender la "zona aprovechable" al colocar la falange como una especie de "pollera" en la zona central, en lugar de ubicarla en la sección de salida. Si esto fuera factible, implicaría un significativo aumento de la velocidad máxima aprovechable.

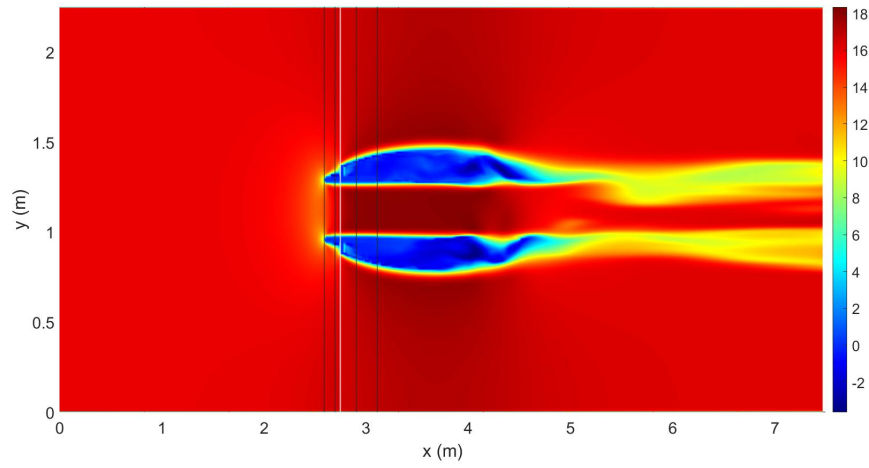
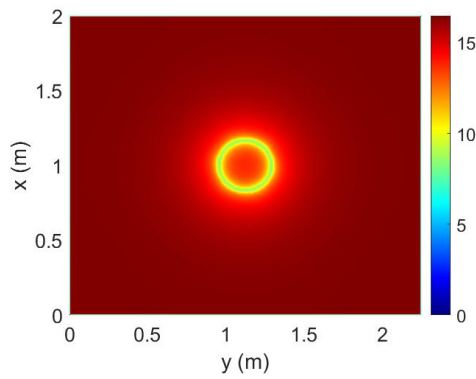
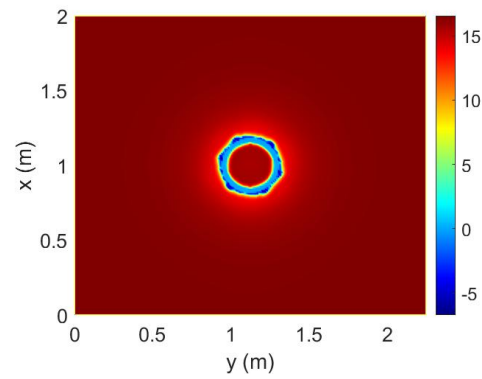


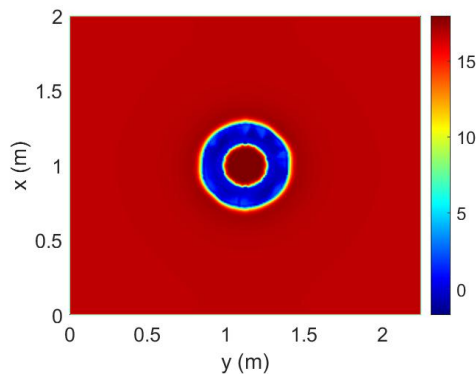
Figura A.7.2: Plano horizontal con líneas para los cortes verticales.



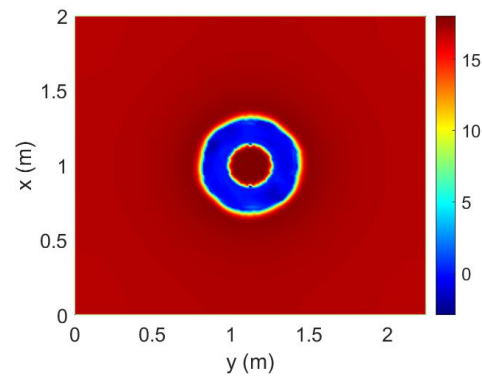
(a) Celda 10, $x = 2,594m$.
 $V_{centro} = 13,75m/s$



(b) Celda 20, $x = 2,698m$.
 $V_{centro} = 15,61m/s$



(c) Celda 40, $x = 2,905m$.
 $V_{centro} = 17,88m/s$



(d) Celda 60, $x = 3,113m$.
 $V_{centro} = 18,02m/s$

Figura A.7.3: Cortes verticales a distintas alturas que ilustran la componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades (U_x), en el segundo 600 de simulación, envolvente Falange-Recto Alargada.

A.8. Malla Gruesa y Envolverte Falange-Recto - D_{rotor} reducido

La variante geométrica implementada consta de una falange con un diámetro mayor de 50 cm y un diámetro interior del cilindro menor de 21 cm, logrando una relación de diámetros de 2,38. El propósito es aumentar la relación entre ambos diámetros, obteniendo así una configuración más acorde con lo observado en la bibliografía.

En la Figura A.8.1, se presenta la ilustración de esta geometría sobre la grilla de la malla gruesa. Además, un corte horizontal análogo muestra la componente según la dirección del flujo del campo instantáneo de velocidades en la Figura A.8.2, correspondiente al último instante simulado.

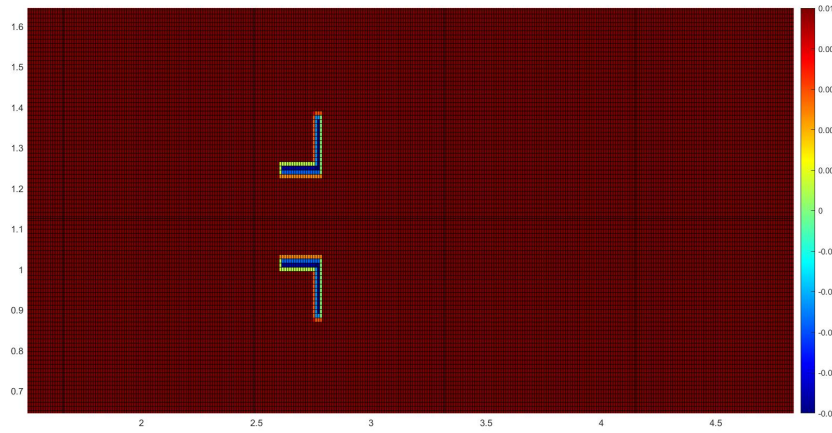


Figura A.8.1: Patch falange D_{rotor} 21cm (zoom).

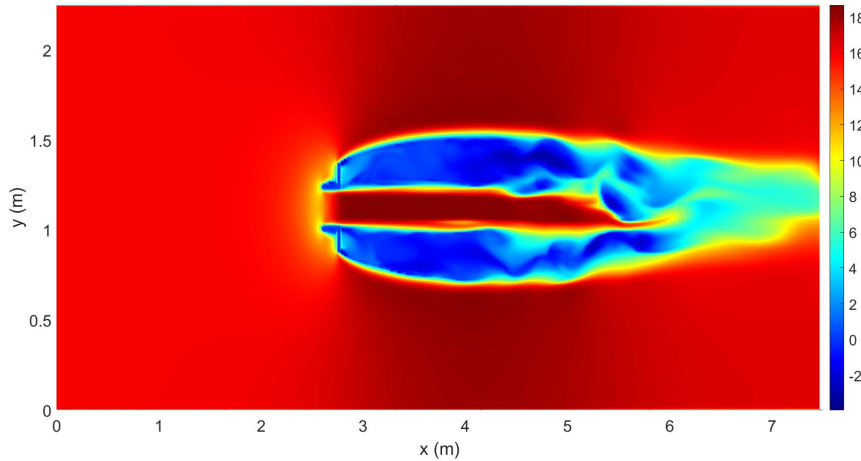


Figura A.8.2: Campo instantáneo de velocidades en un plano horizontal medio - segundo 600.

Las velocidades alcanzadas en el interior de la envolverte son superiores al caso de la geometría original. Esto se evidencia tanto en los cortes verticales de la Figura A.8.3 como en el campo medio de velocidades en la sección de salida mostrado en

la Figura A.8.4. En esta última, las velocidades medias superan los $17m/s$. No obstante, es poco probable que este aumento sea suficiente para compensar la reducción de la sección transversal.

La Figura A.8.3 ilustra cuatro planos verticales que representan la componente en la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades durante el segundo 600 de la simulación. Se destaca que la Figura A.8.3c indica el plano más cercano a la salida de la envolvente, donde se colocaría el rotor, alcanzando una velocidad máxima de $17,23m/s$. Luego, la Figura A.8.4 ilustra el campo medio de velocidades en la sección de salida de la envolvente.

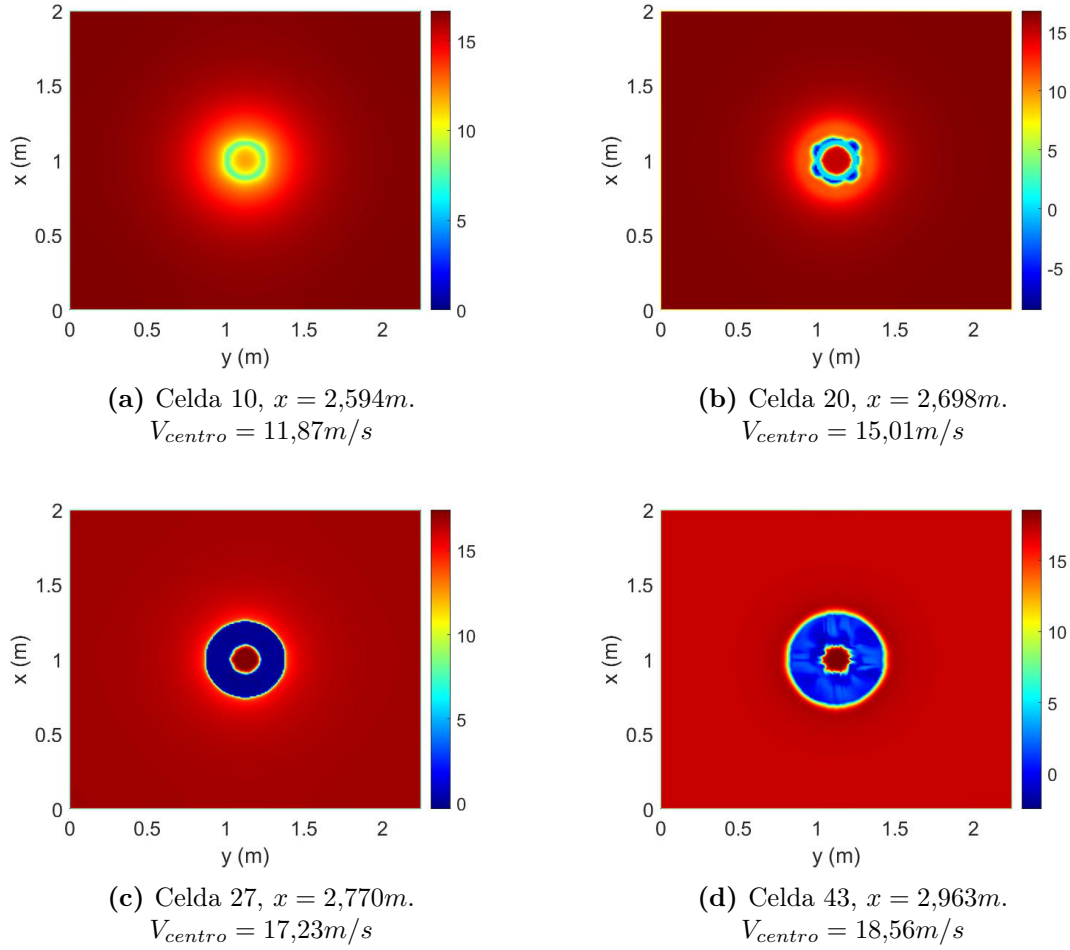


Figura A.8.3: Cortes verticales a distintas alturas que ilustran la componente según la dirección del flujo (x) del campo instantáneo de velocidades (U_x), en el segundo 600 de simulación, envolvente Falange-Recto D_{rotor} reducido.

Los parámetros que caracterizan el desempeño de esta variante de envolvente en comparación con el caso original Falange-Recto se detallan en Tabla A.8.1. La potencia disponible y el rendimiento de la envolvente disminuyen, lo cual es más que razonable dado la reducción de área. La idea subyacente es evaluar específicamente el impacto de la falange en el sistema al aumentar la relación entre $D_{falange}$ y D_{rotor} . El diámetro equivalente y la potencia por unidad de área, por otro lado, permiten cierta comparación. Ambos experimentaron una ligera disminución.

En conclusión, se destacan dos observaciones:

- Se evidencia un notorio aumento en la velocidad máxima alcanzada en el cen-

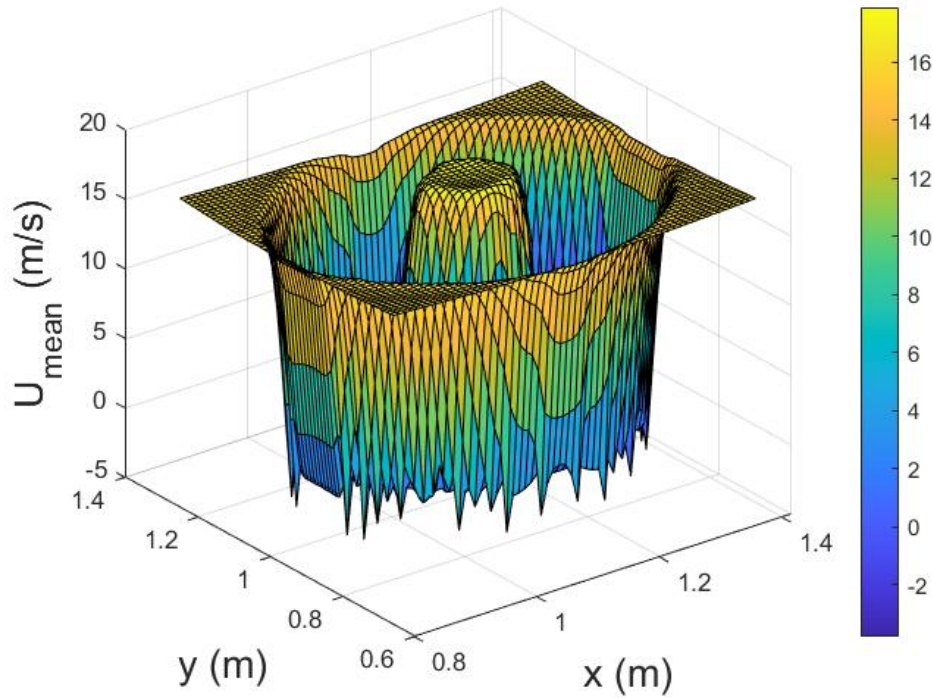


Figura A.8.4: Campo promedio de velocidades, entre los segundos 400 y 600, en un plano vertical (60cmx60cm) en la salida de la envolvente ($x = 2,775m$).

	Fal _ Recto (31cm)	Fal _ Recto (21cm)	Dif.
$A_{salida}(m^2)$	0,0749	0,0349	baja 53,4 %
$Pot_{salida}(W)$	175,14	75,0841	baja 57 %
$Pot/A (\frac{W}{cm^2})$	0,2338	0,2151	sube 8 %
Pérd. (%)	4,85	12,46	sube
$V_{maxrotor}(\frac{m}{s})$	16,69	17,2049	sube 3 %
$\frac{D_{eq}}{D_{orig}}$	0,9716	0,9390	-
Rend.	0,3629	0,1556	baja 43 %

Tabla A.8.1: Comparación casos Falange-Recto, evaluando la reducción del diámetro de salida (rotor).

tro, la zona donde se colocaría el rotor y, por ende, sería aprovechable. La velocidad máxima absoluta también experimenta un aumento, y la brecha entre velocidades máximas aprovechables y no aprovechables se mantiene.

- Persiste la existencia de dos velocidades máximas, una aprovechable y otra no, lo que sugiere que esta distribución es característica de la geometría.

El aprendizaje de esta pequeña prueba destaca que un aumento en la relación de diámetros es beneficioso para alcanzar mayores velocidades en la sección del rotor. Sin embargo, se observa que no sería conveniente disminuir el diámetro del rotor, sino más bien aumentar el de la falange. La elección de este ejemplo se basa en las restricciones geométricas identificadas para hacer lo anterior.

No obstante, persiste la noción de que parte del efecto se está perdiendo, ya que las mayores velocidades se registran aguas abajo de la envolvente. La sección anterior A.7 proporciona una idea de cómo abordar este problema.

A.9. Ensayo de mallas

Debido a las restricciones de tamaño para realizar ensayos con el modelo del Aero-mine, el agregado del rotor resulta muy complicado. En su lugar, se optó por utilizar una malla que representara la pérdida de carga que este rotor habría impuesto en las pruebas.

Para definir la malla a usar, se ensayaron tres tipos diferentes, que se pueden visualizar en la Figura A.9.1.

Las mallas finas de alambre y plástico cuentan con orificios de sección cuadrada, de lados $0,782\text{mm}$ y $1,320\text{mm}$ respectivamente. La sección del material es circular, de diámetros respectivos $0,40\text{mm}$ y $0,43\text{mm}$.

La malla gruesa, en cambio, posee una geometría más compleja. Como se aprecia en A.9.1d, está formada por 'barras' de acero de sección rectangular, dispuestas de forma tal que su profundidad no es despreciable. Presenta un borde afilado y tiende a producir un cambio de dirección en el flujo incidente. En una vista frontal, se pueden aproximar sus orificios como rombos de dimensiones $6,5\text{mm}$ y $2,8\text{mm}$, diagonal mayor y menor respectivamente.

La Tabla A.9.1 resume las principales características geométricas mencionadas de las mallas, y agrega información sobre el área de pasaje bloqueada en cada caso.

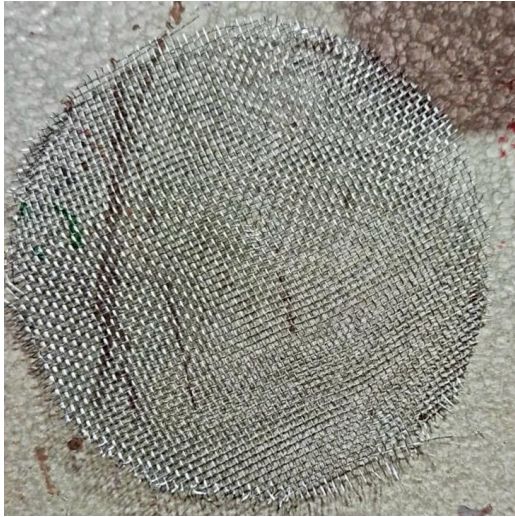
Tabla A.9.1: Características geométricas de las mallas.

Malla	Fina-Alambre	Fina-Plástico	Gruesa-Acero
Tipo orificio	cuadrado	cuadrado	rombo
Dimensiones (mm)	$l = 0,782$	$l = 1,320$	$D = 6,5$ $d = 2,8$
Espesor (mm)	0.40	0.43	0.80
$A_{\text{libre}}/A_{\text{Tot}}$	0.585	0.541	0.311

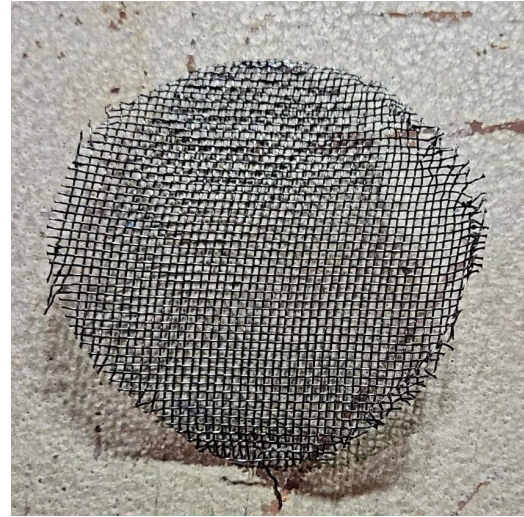
En este ensayo, se busca obtener una curva del coeficiente de pérdida de carga adimensionado (K_{malla}) de cada malla, en función de la velocidad.

A.9.1. Banco de Ensayo

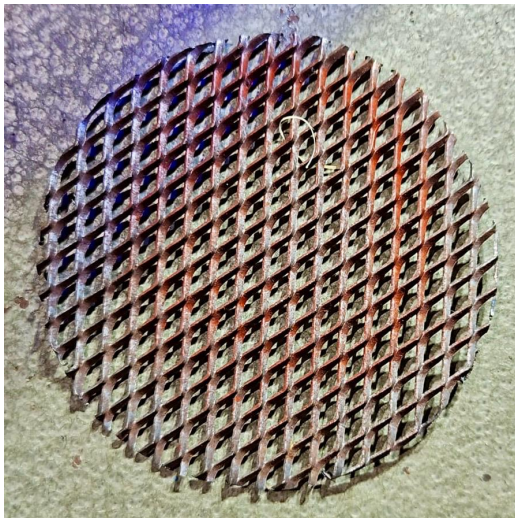
El ensayo fue realizado en la instalación que se visualiza/esquematiza en la Figura A.9.2. En la misma, se indica la posición donde se coloca la malla a ensayar, y



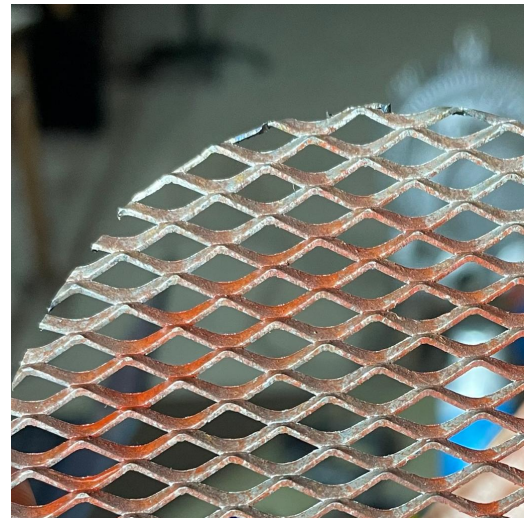
(a) Malla fina de alambre.



(b) Malla fina de plástico.



(c) Malla gruesa.



(d) Zoom Malla gruesa.

Figura A.9.1: Fotografías de las tres mallas distintas ensayadas.

se tiene un tramo de 26,6cm de tubería posterior (Figura A.9.4b). Será importante tener en cuenta la pérdida de carga distribuida en el mismo.

Se cuenta con un soplador marca BUSCH 0710 A.9.3a, un caudalímetro tipo placa de orificio (norma ISO 5167) A.9.3b, tramos de tuberías con tomas para realizar mediciones y accesorios que permiten ensamblar estos tramos y colocar la malla a ensayar.



Figura A.9.2: Imagen tomada de el banco de ensayos, señalando la zona donde se coloca la malla.

Para controlar la velocidad del ventilador se utilizó un variador de frecuencia A.9.3c.

Se utilizaron dos sensores presión diferencial A.9.3d, y tres de sus tomas fueron conectadas a la tubería. Uno de estos sensores fue utilizado para medir la diferencia de presión impuesta por la placa orificio, según la norma ISO 5167, y deducir el caudal. El otro sensor de presión diferencial fue utilizado para medir la presión manométrica previo a la malla.

A su vez, un sensor de temperatura A.9.3d fue colocado en la cuarta toma, para así, junto con la presión, poder calcular las propiedades del aire.

La Figura A.9.3 contiene imágenes tomadas de los principales instrumentos mencionados. A su vez, la Tabla A.9.2 brinda información técnica sobre sus marcas/modelos.

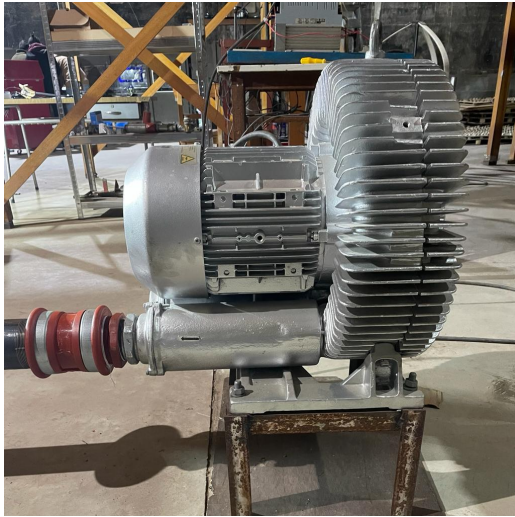
Tabla A.9.2: Información de los instrumentos utilizados.

Instrumento	Marca/modelo	Apreciación	Última calibración
Sensor de temperatura	-	0,1 °C	—
Medidor de presión	Alinor	1 Pa	06/08/2014
Medidor de presión	TSI	1 Pa	28/03/2018

En la Figura A.9.4 se tiene una vista frontal del banco de ensayos, y un zoom al tramo final de la tubería.

A.9.2. Procedimiento

Se enciende el ventilador a una determinada frecuencia, y se registran las medidas de diferencias de presión y de temperatura.



(a) Ventilador.



(b) Zona donde se coloca placa orificio, y sus tomas de presión.

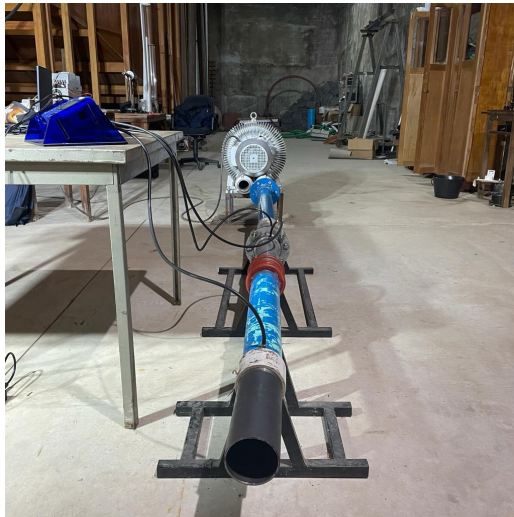


(c) Variador de frecuencia.



(d) Sensores de presión diferencial, y sensor de temperatura.

Figura A.9.3: Fotografías de los principales instrumentos utilizados en el ensayo.



(a) Vista frontal del banco de ensayos.



(b) Tramo final de la tubería, posterior a la malla, y toma de presión.

Figura A.9.4: Más fotografías del banco de ensayos.

Para caracterizar las condiciones del aire, también se desconecta la toma de presión posterior a la placa orificio, y registra la presión manométrica inmediatamente previa a la misma.

Realizados estos pasos, se procede a variar la velocidad del ventilador y se vuelven a registrar datos para otra condición de viento.

A.9.3. Resultados

En la Figura A.9.5 se pueden apreciar los resultados del ensayo para las distintas mallas, donde en el eje de las abscisas se tiene la velocidad en $\frac{m}{s}$ y en el de las ordenadas el coeficiente de pérdida de carga K_{malla} . Para cada malla se realizó un ajuste polinómico, siendo para la malla fina de alambre y la de plástico de grado 2 y para la malla gruesa de grado 4.

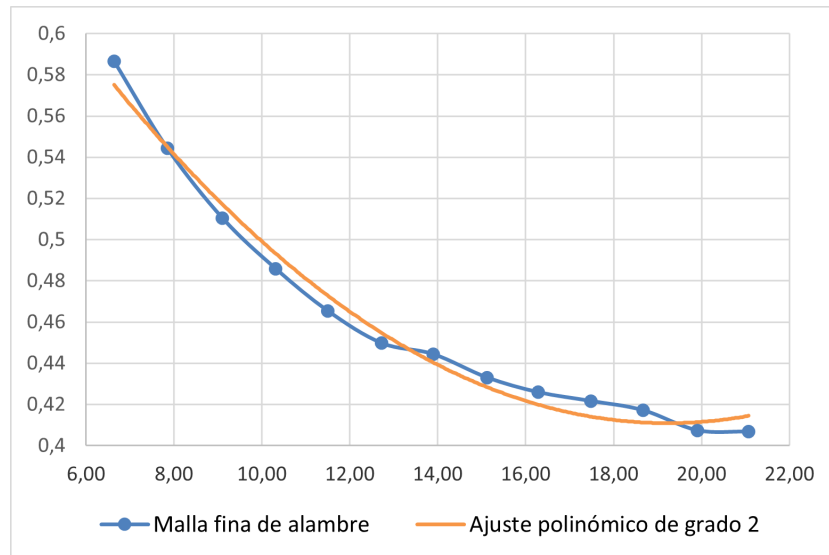
A.9.4. Análisis de Resultados

Tanto la malla fina de alambre como la de plástico, aunque difieren en dimensiones, presentan una geometría similar y exhiben un comportamiento similar en la práctica, reduciendo el coeficiente de pérdida de carga a medida que aumenta la velocidad.

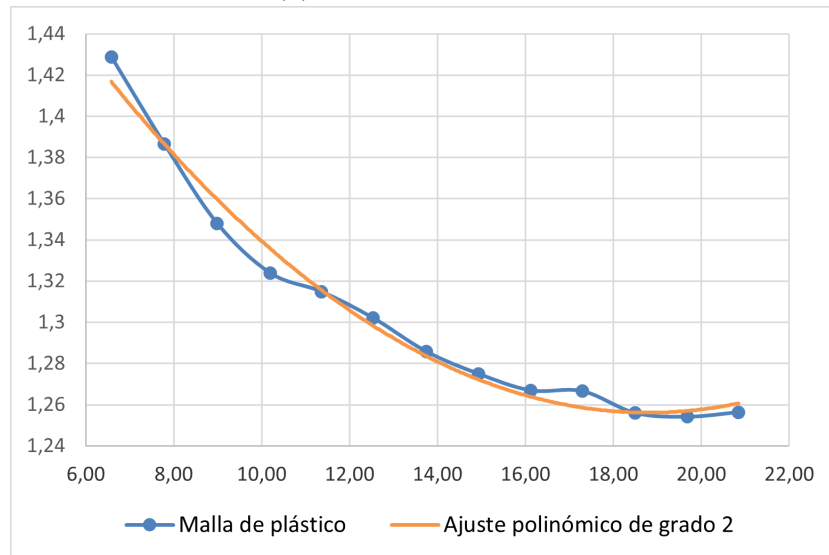
Sin embargo, la malla gruesa muestra un comportamiento diferente, incrementando el coeficiente de pérdida de carga en ciertos rangos (entre $6\frac{m}{s}$ y $11\frac{m}{s}$, y posterior a $17\frac{m}{s}$), con una meseta donde el valor de K_{malla} se mantiene constante.

Es evidente que la malla fina de alambre tiene la menor pérdida de carga, con valores de K_{malla} que oscilan entre 0,4 y 0,6. A continuación, la malla fina de plástico presenta una pérdida de carga mayor, con coeficientes que varían entre 1,24 y 1,44. Ambas presentan un rango de variación de 0,2 en las ordenadas, para una misma variación en las abscisas.

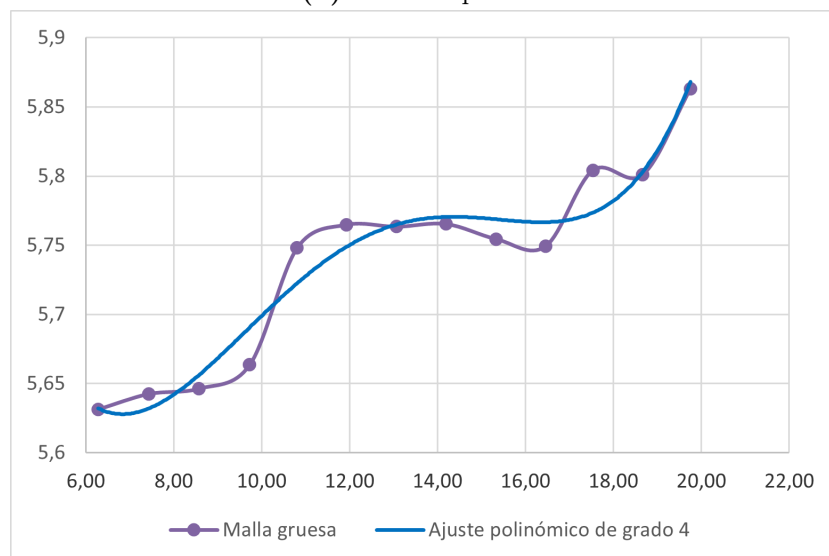
En contraste, la malla gruesa impone un coeficiente de pérdida de carga más elevado, situándose en un rango de entre 5,6 y 5,9, con una variación de 0,3.



(a) Malla fina de alambre



(b) Malla de plástico



(c) Malla gruesa

Figura A.9.5: Gráficos de curvas de coeficiente de pérdida de carga adimensional (K_{malla}) de cada malla, en función de la velocidad.

La diferencia en el comportamiento entre las mallas finas y la gruesa no se debe únicamente al espesor, sino también a las diferencias mencionadas en su geometría, que se cree contribuyen al desprendimiento de la capa límite.

A.10. Resultados de ensayo del Aeromine

En las tablas A.10.1, A.10.2 y A.10.3 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de la envolvente Aeromine con la configuración I, con el pitot centrado, atrás y adelante respectivamente. Los datos que se obtienen en el ensayo son las presiones y temperaturas, y se calculan la densidad con A.10.1 y las velocidades con la ecuación A.10.2.

$$\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) = 1,2041 \frac{293}{273 + T(^{\circ}C)} \frac{P(HPa)}{1013,25} \quad (A.10.1)$$

$$v\left(\frac{m}{s}\right) = (2 \cdot 9,8 \cdot 0,0254 P(inH_2O) \frac{1000}{\rho})^{0,5} \quad (A.10.2)$$

Tabla A.10.1: Resultados obtenidos para la configuración I con el micropitot centrado.

Micropitot Centrado				Pitot		Micropitot	
Frec(Hz)	T(°C)	P(Hpa)	ρ (kg/m ³)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)
Configuración I a							
10	20,9	998	1,1823	0,1093	6,7826	0,1644	8,3197
15	20,8	997	1,1816	0,2504	10,2713	0,4357	13,5485
20	20,9	995	1,1788	0,4576	13,9019	0,7237	17,4825
22	21,2	995	1,1776	0,5460	15,1925	0,7944	18,3256
24	21,2	994	1,1764	0,6587	16,6956	0,9947	20,5168
Configuración I b							
10	21,2	998	1,1811	0,1100	6,8105	0,0956	6,3486
15	21,3	997	1,1796	0,2537	10,3469	0,2391	10,0458
20	21,3	996	1,1784	0,4496	13,7825	0,4046	13,0749
22	21,5	995	1,1764	0,5470	15,2147	0,5177	14,8020
24	21,5	995	1,1764	0,6494	16,5780	0,5628	15,4323
Configuración I c							
10	21,6	998	1,1795	0,1076	6,7387	0,0611	5,0785
15	21,7	997	1,1780	0,2528	10,3357	0,1655	8,3645
20	21,8	996	1,1764	0,4570	13,9072	0,2536	10,3607
22	21,9	995	1,1748	0,5459	15,2103	0,3510	12,1954
24	22,0	996	1,1756	0,6501	16,5919	0,3507	12,1868

Tabla A.10.2: Resultados obtenidos para la configuración I con el micropitot atrás.

Micropitot Atrás				Pitot		Micropitot	
Frec(Hz)	T(°C)	P(Hpa)	ρ (kg/m ³)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)
Configuración I b							
10	22,3	997	1,1756	0,1102	6,8305	0,0815	5,8740
15	22,3	996	1,1744	0,2446	10,1834	0,1981	9,1650
20	22,4	995	1,1728	0,4517	13,8464	0,3477	12,1486
22	22,4	995	1,1728	0,5456	15,2179	0,4678	14,0915
24	22,5	995	1,1724	0,6560	16,6897	0,5547	15,3475
Configuración I c							
10	22,1	997	1,1764	0,1085	6,7751	0,0566	4,8958
15	21,8	997	1,1776	0,2509	10,2984	0,1450	7,8298
20	22,0	996	1,1756	0,4512	13,8235	0,2779	10,8477
22	22,0	996	1,1756	0,5423	15,1541	0,2792	10,8729
24	22,2	995	1,1736	0,6490	16,5922	0,3976	12,9873

Tabla A.10.3: Resultados obtenidos para la configuración I con el micropitot adelante.

Micropitot Adelante				Pitot		Micropitot	
Frec(Hz)	T(°C)	P(Hpa)	ρ (kg/m ³)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)
Configuración I b							
10	22,3	996	1,1744	0,1056	6,6903	0,0880	6,1077
15	22,6	996	1,1732	0,2477	10,2519	0,1982	9,1717
20	22,6	995	1,1720	0,4467	13,7750	0,3856	12,7985
22	22,6	995	1,1720	0,5446	15,2090	0,4957	14,5104
24	22,7	994	1,1704	0,6499	16,6264	0,5853	15,7788
Configuración I c							
10	22,8	996	1,1724	0,1108	6,8594	0,0728	5,5608
15	22,8	995	1,1712	0,2461	10,2273	0,1611	8,2740
20	22,8	995	1,1712	0,4488	13,8116	0,2364	10,0252
22	22,8	995	1,1712	0,5467	15,2442	0,3310	11,8608
24	22,8	994	1,1700	0,6552	16,6971	0,4079	13,1740

En la tabla A.10.4 se tienen los resultados experimentales obtenidos para la configuración II b y c.

Tabla A.10.4: Resultados obtenidos para la configuración II.

Micropitot Centrado				Pitot		Micropitot	
Frec(Hz)	T(°C)	P(Hpa)	ρ (kg/m ³)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)
Configuración II b							
10	22,9	995	1,1708	0,1081	6,7790	0,1040	6,6507
15	22,8	994	1,1700	0,2479	10,2697	0,2517	10,3480
20	22,8	993	1,1689	0,4548	13,9185	0,4089	13,1962
22	22,8	993	1,1689	0,5438	15,2189	0,4219	13,4045
24	22,8	993	1,1689	0,6571	16,7294	0,7041	17,3170
Configuración II c							
10	22,6	996	1,1732	0,1088	6,7958	0,0718	5,5192
15	22,8	995	1,1712	0,2504	10,3178	0,1726	8,5663
20	22,8	994	1,1700	0,4506	13,8472	0,3098	11,4816
22	22,8	994	1,1700	0,5484	15,2760	0,3472	12,1551
24	22,9	993	1,1685	0,6511	16,6550	0,3814	12,7481
Micropitot Atrás				Pitot		Micropitot	
Frec(Hz)	T(°C)	P(Hpa)	ρ (kg/m ³)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)
Configuración I b							
10	22,3	997	1,1756	0,1102	6,8305	0,0815	5,8740
15	22,3	996	1,1744	0,2446	10,1834	0,1981	9,1650
20	22,4	995	1,1728	0,4517	13,8464	0,3477	12,1486
22	22,4	995	1,1728	0,5456	15,2179	0,4678	14,0915
24	22,5	995	1,1724	0,6560	16,6897	0,5547	15,3475
Micropitot Adelante				Pitot		Micropitot	
Frec(Hz)	T(°C)	P(Hpa)	ρ (kg/m ³)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)	$P_{din}(inH_2O)$	v(m/s)
Configuración I b							
10	22,3	996	1,1744	0,1056	6,6903	0,0880	6,1077
15	22,6	996	1,1732	0,2477	10,2519	0,1982	9,1717
20	22,6	995	1,1720	0,4467	13,7750	0,3856	12,7985
22	22,6	995	1,1720	0,5446	15,2090	0,4957	14,5104
24	22,7	994	1,1704	0,6499	16,6264	0,5853	15,7788

A.11. Datos $C_p - \lambda$ para diseño final

En la tabla a continuación se presentan los datos obtenidos para la curva $C_P - \lambda$ para el rotor del diseño final.

Tabla A.11.1: Datos obtenidos sobre el diseño del rotor final para la curva $C_P - \lambda$.

λ	C_P	$C_{P_Falange}$	λ	C_P	$C_{P_Falange}$
6,2130	0,4274	0,6411	4,1190	0,4361	0,6542
6,0938	0,4312	0,6468	4,0663	0,4348	0,6521
5,8687	0,4378	0,6567	4,0149	0,4332	0,6498
5,7623	0,4403	0,6604	3,9648	0,4315	0,6473
5,6597	0,4422	0,6632	3,9159	0,4298	0,6447
5,5606	0,4438	0,6658	3,8683	0,4280	0,6420
5,4650	0,4453	0,6679	3,8217	0,4260	0,6390
5,3726	0,4463	0,6695	3,7763	0,4237	0,6355
5,2832	0,4471	0,6706	3,7320	0,4210	0,6314
5,1968	0,4477	0,6715	3,6886	0,4175	0,6262
5,1132	0,4479	0,6719	3,6463	0,4129	0,6193
5,0322	0,4479	0,6719	3,6049	0,4081	0,6122
4,9538	0,4480	0,6719	3,5645	0,4030	0,6045
4,8777	0,4477	0,6716	3,5250	0,3977	0,5965
4,8040	0,4472	0,6707	3,4863	0,3923	0,5885
4,7324	0,4466	0,6699	3,4484	0,3870	0,5805
4,6630	0,4461	0,6692	3,4114	0,3817	0,5725
4,5956	0,4453	0,6679	3,3752	0,3766	0,5649
4,5300	0,4442	0,6662	3,3397	0,3715	0,5573
4,4664	0,4432	0,6648	3,3050	0,3667	0,5500
4,4045	0,4424	0,6635	3,2710	0,3619	0,5429
4,3442	0,4411	0,6617	3,2376	0,3570	0,5355
4,2856	0,4398	0,6597	3,2050	0,3525	0,5288
4,2286	0,4386	0,6579	3,1730	0,3475	0,5212
4,1731	0,4374	0,6562	3,1416	0,3421	0,5131

Referencias

- [1] Alejandro Ferro-Giulliano Pozzo. "Diseño de un aerogenerador de flujo embebido para entorno urbano", 2022.
- [2] Emilia Fuentefria-Francisco Garchitorena. "Diseño de un ventilador para la protección eólica de un sendero peatonal", 2022.
- [3] IEC 61400-2. "Wind turbines - Part 2: Small wind turbines", 2015.
- [4] Miguel Villarrubia López: "Ingeniería de la Energía Eólica", 1ª Edición, 2012.
- [5] Ion Paraschivoiu Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept, Edición, 2002.
- [6] Hermann Schlichting Boundary Layer Theory , 1979.
- [7] Máquinas para Fluidos 2, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UdelaR. Notas del curso: Máquinas Axiales. Uruguay, Montevideo, 2022.
- [8] Máquinas para Fluidos 2, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UdelaR. Notas del curso: Turbinas Eólicas. Uruguay, Montevideo, 2022.
- [9] I. E. Idelchik: "HANDBOOK OF HYDRAULIC RESISTANCE", 4ª Edición, 2007
- [10] Abe, K., Nishida, M., Sakurai, A., Ohya, Y., Kihara, H., Wada, E., & Sato, K. (2005). "Experimental and numerical investigations of flow fields behind a small wind turbine with a flanged diffuser". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93, 951–970.
- [11] Facultad de Ingeniería, UdelaR, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA). (2023). "Uso del método de condiciones de borde inmersas en el `caffa3d.MBRi`" [Tutorial].
- [12] Xiaohong Gui-Haiteng Xue-Shujun Su-Zhengyu Hu-Yufeng Xu, "Study on aerodynamic performance of mine air duct horizontal axis wind turbine based on breeze power generation", 2021
- [13] R. A. Oman-K. M. Foreman, "ADVANTAGES OF THE DIFFUSER-AUGMENTED WIND TURBINE"
- [14] R. Bontempo, M. Manna, "Effects of the duct thrust on the performance of ducted wind turbines".
- [15] Bruno López. "Desarrollo de un Túnel de Viento Numérico."2018.
- [16] G. Usera, A. Vernet, J.A. Ferré, ".^ Parallel Block-Structured Finite Volume Method for Flows in Complex Geometry with Sliding Interfaces."2008.
- [17] Gonzalo Fernandez, Mariana Mendina and Gabriel Usera, "Heterogeneous Computing (CPU-GPU) for Pollution Dispersion in an Urban Environment"2020.

- [18] H. Ferziger, M. Peric. Computational methods for fluid dynamics. Springer-Verlag", 2002.
- [19] Mariana Mendina, Martin Draper, Ana Paula Kelm Soares, Gabriel Narancio, Gabriel Usera. ".^ a general purpose parallel block structured open source incompressible flow solver", 2013.
- [20] C. Liao, Y. W. Chang, C. A. Lin, J. M. McDonough. "Simulating ows with moving rigid boundary using immersed-boundary method.", 2010.
- [21] C. S. Peskin. "Flow patterns around heart valves: a nummerical method."Journal of computational physics, 1972.
- [22] J. D. Anderson y J. Wendt. "Computational fluid dynamics." Springer, volume 206, 1995.
- [23] Suhas Pol, Brent C. Houchens, David V. Marian, Carsten H. Westergaard. "Performance of AeroMINEs for Distributed Wind Energy". 2019.
- [24] Carsten Hein Westergaard. (2023). SYSTEMS AND METHODS FOR FLUID FLOW BASED RENEWABLE ENERGY GENERATION (Patente US 2023/0061818 A1). AEROMINE TECHNOLOGIES. <https://aeromine technologies.com/>
- [25] White, Frank M. "Mecánica de fluidos (5ta ed.)." McGraw Hill, 1979.
- [26] H. Schlichting. "Boundary Layer Theory (7th ed.)". McGraw Hill, 1979.