

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y  
ELÉCTRICA**

**ANÁLISIS DE UN TÚNEL CONCENTRADOR DE  
ENERGÍA EÓLICA PARA INCREMENTAR LA  
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN  
AEROGENERADOR.**

**TESIS PARA OPTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**AUTOR : BACH. FRANK KEVIN CAMPOS CORONADO  
: BACH. EDWIN RONALDO TANTALEAN GARCÍA**

**ASESOR : DR. DEIBI ERIC GARCÍA CAMPOS**


**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ENERGÍAS ALTERNATIVAS**

**JAÉN, PERÚ**

**2025**

# Frank Kevin Campos Coronado Edwin Ronaldo Tant...

## ANÁLISIS DE UN TÚNEL CONCENTRADOR DE ENERGÍA EÓLICA PARA INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ...

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaen

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3355855421

75 páginas

Fecha de entrega

29 sep 2025, 12:24 p.m. GMT-5

15.081 palabras

Fecha de descarga

29 sep 2025, 12:28 p.m. GMT-5


80.974 caracteres

Nombre del archivo

NK\_Y\_EDWIN\_TUNEL\_CONCENTRADOR\_DE\_ENERG\_A\_E\_LICA\_2025\_\_LO\_1.pdf

Tamaño del archivo

3.5 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN  
*Wagner Colmanares*  
Dr. Wagner Colmanares Mayanga  
Responsable de la Unidad de Investigación  
de la Facultad de Ingeniería

## 2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

### Fuentes principales

- 2% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN  
*Wagner*  
-----  
Dr. Wagner Colmenares Mayanga  
Responsable de la Unidad de Investigación  
de la Facultad de Ingeniería

**FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN**

En la ciudad de Jaén, el día 15 de octubre del año 2025, siendo las 16:40 horas, se reunieron de manera presencial los integrantes del Jurado:

Presidente : Mg. Frans Fuentes Maza .....  
Secretario : Mg. Mario Félix Olivera Aldana .....  
Vocal : Mg. Jaime Odar Honorio Acosta ....., para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- ( ) Trabajo de Investigación  
( X ) Tesis  
( ) Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado:

**ANÁLISIS DE UN TÚNEL CONCENTRADOR DE ENERGÍA EÓLICA PARA INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN AEROGENERADOR.**

Presentado por estudiante/egresado o Bachiller, Campos Coronado Frank Kevin y Tantalean García Edwin Ronaldo, de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

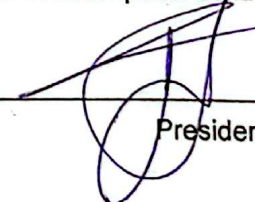
Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:


- ( X ) Aprobar      ( ) Desaprobar      ( X ) Unanimidad      ( ) Mayoría


Con la siguiente mención:

- |                |            |        |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente   | 18, 19, 20 | ( )    |
| b) Muy bueno   | 16, 17     | ( 16 ) |
| c) Bueno       | 14, 15     | ( )    |
| d) Regular     | 13         | ( )    |
| e) Desaprobado | 12 ò menos | ( )    |

Siendo las 17:20 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

  
\_\_\_\_\_  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Secretario

  
\_\_\_\_\_  
Vocal

**“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”**

**ANEXO N°06:**

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO  
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, Campos Coronado Frank Kevin y Tantalean García Edwin Ronaldo, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI N° 74897848 y 74394940.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

**“ANÁLISIS DE UN TÚNEL CONCENTRADOR DE ENERGÍA EÓLICA PARA INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN AEROGENERADOR”.**

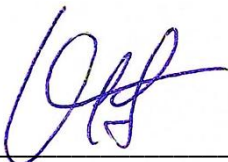
Asesorado por DR. Deibi Eric García Campos.

El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 06 Octubre del 2025.



Campos Coronado Frank Kevin



Tantalean García Edwin Ronaldo

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
I. INTRODUCCIÓN.....	8
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
2.1. Objeto de estudio.....	14
2.2. Ubicación del área de estudio.....	14
2.3. Materiales utilizados.....	14
2.4. Tipo de Investigación.....	15
2.5. Fuentes de información.....	17
2.6. Métodos.....	17
III. RESULTADOS.....	22
3.1. DISEÑO DEL TÚNEL CONCENTRADOR DE ENERGÍA EÓLICA.....	22
3.1.1. Disponibilidad del recurso eólico en el distrito de Jaén.....	22
3.1.2. Selección del aerogenerador.....	24
3.1.3. Dimensionamiento del túnel concentrador.....	26
3.1.4. Cálculos complementarios del túnel concentrador.....	28
3.2. ESTUDIO NUMÉRICO DEL TÚNEL CONCENTRADOR.....	29
3.2.1. Estudio de malla.....	30
3.2.3. Resultados para la Geometría A.....	36
3.2.4. Resultados para la Geometría B.....	39
3.2.5. Resultados para la Geometría C.....	43
3.2.6. Resultados comparativos para las Geometrías B, B2 y B3.....	46
3.2.7. Resultados comparativos para las Geometrías C, C2 y C3.....	51
3.2.8. Comparación de resultados obtenidos para todas las geometrías.....	56
3.2.9. Resumen de resultados para otros aerogeneradores.....	57
IV. DISCUSIÓN.....	61
V. CONCLUSIONES.....	65
VI. RECOMENDACIONES.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Velocidad del viento en el distrito de Jaén, según estación meteorológica NASA.....	22
Tabla 2 Según estación meteorológica NASA, velocidad media del viento. ....	23
Tabla 3 Densidad y viscosidad del aire .....	24
Tabla 4 Aerogeneradores horizontales comerciales para aplicaciones domésticas.....	25
Tabla 5 Calculo del diámetro de entrada y longitud del túnel.....	28
Tabla 6 Datos geométricos para el túnel concentrador de energía eólica. ....	28
Tabla 7 Coeficiente de pérdidas .....	29
Tabla 8 Casos evaluados en el estudio de convergencia de malla.....	33
Tabla 9 Caída de presión en las geometrías evaluadas como opciones para el túnel concentrador. ....	57
Tabla 10 Dimensiones de túneles concentradores para diversos aerogeneradores de baja potencia.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación geográfica del distrito de Jaén. ....	14
Figura 2 Datos geométricos del aerogenerador FSH 2000.....	25
Figura 3 Configuración básica del túnel concentrador para aumentar la velocidad del aire... ..	26
Figura 4 Cotas de la geometría del túnel. ....	27
Figura 5 Coeficientes de pérdidas menores para expansiones y contracciones. ....	29
Figura 6 Geometría axisimétrica 2D para el modelamiento del túnel.....	30
Figura 7 Enmallado de la Geometría axisimétrica 2D para el modelamiento del túnel (malla gruesa de 20x20 elementos). ....	31
Figura 8 Convergencia de la simulación de malla gruesa (20x20 elementos). ....	32
Figura 9 Obtención del valor promedio de velocidad en la salida del túnel concentrador .....	32
Figura 10 Resultados del estudio de malla (independencia de malla aparece a partir de 14400 elementos, i.e. 120x120 elementos). ....	33
Figura 11 Geometrías consideradas para el estudio del túnel concentrador.....	34
Figura 12 Geometrías consideradas para estudiar el efecto de la longitud de la región cilíndrica de salida del túnel concentrador. ....	35
Figura 13 Geometrías consideradas para estudiar el efecto de la longitud de la región cilíndrica de entrada del túnel concentrador.....	35
Figura 14 Contornos de velocidad en el túnel concentrador (Geometría A).....	36
Figura 15 Contornos de presión en el túnel concentrador (Geometría A).....	37
Figura 16 Vectores de velocidad en el túnel concentrador (Geometría A). ....	37
Figura 17 Líneas de corriente en el túnel concentrador (Geometría A). ....	38
Figura 18 Perfiles de velocidad con ubicación relativa en el túnel concentrador (Geometría A).....	38
Figura 19 Perfiles de velocidad en el túnel concentrador (Geometría A). ....	39
Figura 20 Contornos de velocidad en el túnel concentrador (Geometría B).....	40
Figura 21 Contornos de presión en el túnel concentrador (Geometría B).....	40
Figura 22 Vectores de velocidad en el túnel concentrador (Geometría B). ....	41
Figura 23 Líneas de corriente en el túnel concentrador (Geometría B). ....	41
Figura 24 Perfiles de velocidad con ubicación relativa en el túnel concentrador (Geometría B).....	42

Figura 25 Perfiles de velocidad en el túnel concentrador (Geometría B). .....	42
Figura 26 Contornos de velocidad en el túnel concentrador (Geometría C). .....	43
Figura 27 Contornos de presión en el túnel concentrador (Geometría C). .....	44
Figura 28 Vectores de velocidad en el túnel concentrador (Geometría C). .....	44
Figura 29 Líneas de corriente en el túnel concentrador (Geometría C). .....	45
Figura 30 Perfiles de velocidad con ubicación relativa en el túnel concentrador (Geometría C). .....	45
Figura 31 Perfiles de velocidad en el túnel concentrador (Geometría C). .....	46
Figura 32 Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante contornos de velocidad) de las Geometrías B, B2 y B3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para la presión en las mismas geometrías. ....	47
Figura 33 Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante vectores de velocidad) de las Geometrías B, B2 y B3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para las líneas de corriente en las mismas geometrías. ....	49
Figura 34 Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante contornos de velocidad) de las Geometrías C, C2 y C3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para la presión en las mismas geometrías. ....	52
Figura 35 Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante vectores de velocidad) de las Geometrías C, C2 y C3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para las líneas de corriente en las mismas geometrías. ....	54
Figura 36 Perfiles de velocidad a la salida de las geometrías evaluadas. ....	56
Figura 37 Simulación 3D del funcionamiento de un aerogenerador con diámetro de rotor de 1,584 m, accionado con una velocidad de salida del túnel concentrador de 12,5 m/s. ....	60

## RESUMEN

El proyecto de tesis tuvo como finalidad evaluar la viabilidad técnica de un dispositivo diseñado para aumentar la velocidad del viento en regiones con recurso eólico insuficiente. El estudio se desarrolló en la ciudad de Jaén, donde las velocidades promedio del viento registradas alcanzan apenas 2,49 m/s, insuficientes para que los aerogeneradores convencionales alcancen su régimen nominal. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental y basada en el método inductivo-deductivo. Para ello, se recopilaron datos meteorológicos de fuentes oficiales como la NASA y se realizaron mediciones in situ en distintos sectores de Jaén, identificando al sector El Huito como el más apropiado para la implementación. Se diseñó un túnel troncocónico con un diámetro de entrada de 3,549 m, salida de 1,584 m y una longitud de 3,667 m, con entradas y salidas cilíndricas de 0,3 m. Diseño evaluado mediante simulaciones CFD utilizando el software ANSYS Fluent. Los resultados mostraron que el túnel concentrador logró incrementar la velocidad del viento desde 2,49 m/s hasta 12,5 m/s, lo que permitió accionar un aerogenerador horizontal de tres aspas con diámetro de rotor de 1,584 m, alcanzando su régimen nominal. Se realizaron diferentes simulaciones con variaciones geométricas (modelos A, B y C) y se verificó la independencia de malla a partir de 14 400 elementos, obteniendo valores estables de 12,65 m/s. Entre las geometrías estudiadas, la más eficiente resultó ser la de tipo C, al ofrecer mayor uniformidad del flujo y menores pérdidas de presión. Se concluye que la implementación del túnel concentrador de energía eólica es técnicamente viable y constituye una solución innovadora para aprovechar el recurso eólico en zonas donde actualmente no es factible. Su aplicación puede optimizar la producción de energía renovable, reducir costos por kWh y ampliar el acceso a electricidad en comunidades rurales. Asimismo, representa un aporte al desarrollo de tecnologías sostenibles en el marco de la transición energética.

**Palabras clave:** Energía eólica, túnel concentrador, aerogenerador, CFD, velocidad del viento.

## ABSTRACT

The thesis project aimed to evaluate the technical feasibility of a device designed to increase wind speed in regions with insufficient wind resources. The study was conducted in the city of Jaén, where average wind speeds barely reach 2.49 m/s, which is insufficient for conventional wind turbines to reach their nominal speed. The research was applied, with a quantitative approach, non-experimental design, and based on the inductive-deductive method. To this end, meteorological data were collected from official sources such as NASA, and in situ measurements were taken in different sectors of Jaén, identifying the El Huito sector as the most appropriate for implementation. A truncated cone tunnel was designed with an inlet diameter of 3.549 m, an outlet diameter of 1.584 m, and a length of 3.667 m, with cylindrical inlets and outlets of 0.3 m. The design was evaluated using CFD simulations with ANSYS Fluent software. The results showed that the concentrator tunnel managed to increase the wind speed from 2.49 m/s to 12.5 m/s, which allowed a horizontal three-bladed wind turbine with a rotor diameter of 1.584 m to be activated, reaching its nominal speed. Different simulations were carried out with geometric variations (models A, B, and C), and mesh independence was verified based on 14,400 elements, obtaining stable values of 12.65 m/s. Among the geometries studied, type C proved to be the most efficient, offering greater flow uniformity and lower pressure losses. It is concluded that the implementation of the wind energy concentrator tunnel is technically feasible and constitutes an innovative solution for harnessing wind resources in areas where it is currently not feasible. Its application can optimize renewable energy production, reduce costs per kWh, and expand access to electricity in rural communities. It also represents a contribution to the development of sustainable technologies in the context of the energy transition.

**Keywords:** Wind energy, concentrator tunnel, wind turbine, CFD, wind speed.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el panorama energético global muestra una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, los cuales constituyen el 66,7% de la matriz energética mundial (International Energy Agency, 2021). Además, la demanda de energía eléctrica ha crecido a un ritmo del 10,06% entre 2020 y 2024. Este modelo energético no es sostenible a medio plazo, ya que dos de las principales fuentes de energía fósil, el petróleo y el gas natural, representan el 25,9% de la producción eléctrica global según el IEA y sus reservas se proyectan para un consumo que no excederá los 50 años (British Petroleum, 2024).

La posible escasez de petróleo y gas natural en el futuro, combinada con la creciente demanda de energía eléctrica, genera incertidumbre en cuanto a precios y suministro. Esta situación resalta la necesidad de diversificar la matriz energética, impulsando el desarrollo de fuentes alternativas de energía. En este contexto, y considerando que los combustibles fósiles son la principal fuente de generación eléctrica con un alto impacto negativo en el medio ambiente, diversas organizaciones están promoviendo el uso de energías renovables. Entre estas, la energía eólica ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años, alcanzando una capacidad instalada global cercana a los 430 000 MW, multiplicándose por más de siete veces su potencia en los últimos años (Global Wind Report, 2024).

En Perú, el potencial para el desarrollo de energía eólica es significativo, dado que actualmente solo se ha instalado el 1,07% de los 22 500 MW que podrían aprovecharse (Vásquez et al., 2017). Gran parte de este potencial se encuentra en regiones donde la velocidad del viento oscila entre 3 y 6 m/ (Dirección General de Electricidad, 2016). Esta situación limita el aprovechamiento óptimo de la energía eólica, ya que los aerogeneradores comerciales de baja potencia están diseñados para generar energía de manera efectiva en velocidades de viento entre 13 y 14 m/s (Gerrit Früh, 2023).

Para desarrollar la generación de energía eólica en estas áreas, es fundamental mejorar las condiciones del viento, especialmente su velocidad. Una forma de lograrlo es mediante el diseño de aerogeneradores que operen en rangos de baja velocidad, pero también se puede explorar la opción de aumentar las velocidades del viento utilizando los aerogeneradores existentes. La presente tesis se enfoca en esta segunda opción.

La propuesta estudia el aumento de la velocidad del viento mediante el diseño de un túnel que reduzca su sección para conseguir tal propósito. Esta forma de concentrar energía eólica puede facilitar el uso de aerogeneradores en regiones donde las velocidades del viento son reducidas.

En relación a los estudios encontrados a nivel internacional se tiene a Apccarian, (2019) en su tesis tuvo como objetivo caracterizar el patrón de vórtices en la estela de una torre de aerogenerador Multi-MW que estaba sometida a fuertes vientos. Para caracterizar el viento se realizó mediciones meteorológicas en 3 distintas zonas de la región con lo cual se caracterizó el viento como extremadamente intenso. Se calculó la velocidad máxima con un periodo de retorno de 5 décadas de 38,5 m/s, además de una intensidad de turbulencia de 30 m de alto de 0,18, el cual determina la clase de turbina que se instalará. Se ensayo con estos datos en un túnel concentrador de capa límite de circuito abierto a través de un prototipo de torre de aerogenerador Multi-MW, con un diámetro de 90 m, y orientación en barlovento. Por último, la ubicación del rotor cuando se detiene en bandera produce variaciones en el punto de desprendimiento y en la intensidad de las presiones.

Ramos Domínguez (2018) en su tesis de maestría realizó el diseño de un microaerogenerador del tipo Savonius que funcione en contra rotación, determinando previamente el estudio del viento en la ciudad de Baja California en México. La velocidad promedio del viento al año fue de 1,4 m/s, pudiendo llegar a tener aumentos de hasta 66 %. Se realizaron simulaciones en 2D y 3D con el programa Fluent para obtener los ángulos de ataque y coeficientes de arrastres, sustentación y momento, según el tipo de rotor. Se determinó que el rotor con mayores beneficios es el Blackwell, el cual alcanzó CPMAX de 0,46 a 0,8 TSR. Como conclusión se determinó que un solo aerogenerador en contra rotación no alcanzaría para potenciar la energía, recomendando instalar un sistema de 4 a 8 aerogeneradores.

En relación a los estudios nacionales se tiene a Cárdenas Meza (2023) en su tesis tuvo como objetivo analizar y determinar según los tipos de mini aerogeneradores, el más apto para suministrar energía eléctrica a las zonas en la ciudad de Chilca en Huancayo, verificando la zonificación y las velocidades del viento en dicha zona. Para calcular la velocidad del viento se instaló una estación meteorológica, la cual evidencia que, a una altura de 7 m, la velocidad del viento alcanza los 4 m/s, y al elevar la altura del mástil a

15 metros, la velocidad se incrementa a 6,74 m/s, siendo apta para generar energía eléctrica. Usando el coeficiente de límite de Betz se determina la densidad promedio la cual es de 47 W/m<sup>2</sup>. También se debe considerar la velocidad de arranque y la potencia nominal. Comparando los mini aerogeneradores, se determina que el tipo AEOLOS-H300 llega a alcanzar la potencia necesaria para este estudio, generando un aumento del 14 % en energía eléctrica.

Por otro lado, Querebalú Santisteban (2020) en su tesis de licenciamiento, determinó el dimensionamiento de una minicentral eólica que abastezca de energía eléctrica al molino de yeso en el distrito de Mórrope en Lambayeque, el cual no se satisface con la energía eléctrica que se le provee. Mediante mediciones realizadas en el año 2019 a una altura de 3 metros, se estima con la fórmula de Hellman la velocidad a 18 m de alto, y con el valor promedio, da como resultado la velocidad máxima para el estudio el cual es de 7,02 m/s, propiciando una energía eólica de más de 24 mil W, y un potencial eléctrico de más de 13 mil W, necesitando una energía diaria de 297 kW. Ante esto, los componentes que abastecerán de energía propuestos son: aerogenerador VESTAS de 1500 Ah con 34 baterías HOPPECKE, un regulador FLEXMAX de 80 amperios, con un motor eléctrico de 37 kW.

En la actualidad en relación al uso más eficiente de la energía. Entre las diversas razones encontramos: crecimiento poblacional, contaminación ambiental cuando las fuentes son hidrocarburos y el agotamiento continuo de las reservas de petróleo y gas, entre otros. Los recursos renovables son las fuentes de energía con mayor ventaja, debido a que no emiten gas de efecto invernadero, están disponibles para su uso directo y son prácticamente inagotables. Entre los diversos recursos renovables, como la energía hidráulica, la energía marina y la energía geotérmica, por ejemplo; son la energía solar y la energía eólica las más comunes y con mayores ventajas de desarrollo tecnológico a futuro. La energía eólica cuenta con un potencial considerable para cubrir parte de la demanda de electricidad actual (Gielen et al., 2019).

El Perú es geográficamente favorable para la construcción de parques eólicos, debido a la diversidad de climas que existen en todo el país, siendo la costa la zona más apropiada para el uso de energía eólica. En la actualidad, el país no cuenta con un uso considerable de estas fuentes debido a que la demanda siempre ha sido cubierta por

centrales hidroeléctricas y térmicas, no obstante, se prevé un mayor aprovechamiento en los próximos años debido a los beneficios que genera (Gordillo Valdez et al., 2022).

Para aprovechar la energía eólica de manera efectiva, es fundamental realizar un estudio exhaustivo del viento en la región. Este estudio debe considerar la dirección del viento, los horarios y la fuerza que podría generar dicho viento. La instalación de aerogeneradores en zonas con excesivo viento puede generar desgaste prematuro en los equipos y reducir su vida útil. Por otro lado, en zonas donde el viento es insuficiente, los aerogeneradores no logran alcanzar las velocidades necesarias para arrancar y operar eficientemente, resultando en una producción de energía eléctrica relativamente baja (Mendoza Uribe, 2018).

Se observó el lugar apropiado para la instalación de aerogeneradores, se ha observado que existen zonas en Jaén que no aprovechan adecuadamente este tipo de energía debido a la falta de intensidad del viento. Además, en áreas donde el viento es adecuado para iniciar el funcionamiento de los aerogeneradores, la energía generada no es suficiente para cubrir las necesidades energéticas locales. Estas limitaciones sugieren la necesidad de utilizar dispositivos adicionales, como túneles concentradores de viento, que pueden dirigir y aumentar el flujo de aire hacia los aerogeneradores, incrementando así la generación de energía eléctrica (Arciniegas Arenas et al., 2018).

En el contexto actual de transición hacia fuentes de energía renovable, la eficiencia en la generación eléctrica a partir del viento se ha convertido en un factor clave para el desarrollo sostenible. Los aerogeneradores de eje horizontal son ampliamente utilizados debido a su capacidad para generar mayores potencias, sin embargo, su rendimiento puede verse limitado por la variabilidad y velocidad del viento. En este sentido, el diseño e implementación de túneles concentradores de flujo eólico surge como una alternativa innovadora para canalizar y aumentar la velocidad del viento que incide sobre las palas del rotor. Este enfoque, se planteó la pregunta central de la investigación: ¿De qué manera el análisis de un perfil de túnel concentrador de flujo eólico influye en la producción de energía eléctrica en un aerogenerador de tipo horizontal?

El estudio se justificó por la necesidad de optimizar el aprovechamiento de los recursos renovables frente al creciente desafío de la demanda energética y crisis ambiental global. La dependencia de los combustibles fósiles ha generado impactos negativos como el incremento de gases de efecto invernadero, el calentamiento global y la degradación

de ecosistemas, obligando a replantear modelos energéticos hacia alternativas más limpias, eficientes y sostenibles. En dicho contexto, la energía eólica constituyó una de las fuentes renovables con mayor potencial por su carácter inagotable y su bajo impacto ambiental; sin embargo, su aprovechamiento enfrentó limitaciones vinculadas a la variabilidad de los recursos y eficiencia de los aerogeneradores convencionales, factores que restringen su competitividad frente a otras fuentes de generación.

Asimismo, resultó imprescindible explorar nuevas tecnologías y diseños que ayuden a superar restricciones técnicas del sistema eólico actual. En particular, el análisis de un túnel concentrador de energía eólica brindó alternativas innovadoras al posibilitar el redireccionamiento y aceleración de los flujos de aire hacia el rotor de un aerogenerador, lo que aumenta su rendimiento energético sin requerir un incremento proporcional en el número de equipos instalados. Esta característica lo convierte en una propuesta atractiva para desunir costos de inversión, optimización de espacios disponibles y minimizar impactos ambientales de los parques eólicos, especialmente donde las velocidades de viento no son constantes ni suficientemente elevadas.

Además, el estudio aportó evidencias técnicas y científicas sobre la viabilidad de este tipo de estructuras, generando conocimientos aplicables tanto a proyectos de pequeña escala, como en comunidades rurales con necesidades energéticas insatisfechas, como a sistemas de mayor envergadura dentro de matrices energéticas nacionales que busquen diversificar su producción. De esta forma, los resultados obtenidos ayudarán no solo a evaluar la factibilidad de aumentar la producción eléctrica a través del uso de túneles concentradores, sino también sentar las bases para futuros desarrollos tecnológicos orientados a fortalecer la transición energética hacia fuentes renovables.

El túnel concentrador ayudó a la optimización del recurso eólico al canalizar y acelerar el flujo de aire hacia el aerogenerador, lo que mejoró significativamente su eficiencia. Esto será especialmente útil en regiones con vientos moderados, ya que hace viable la instalación de aerogeneradores para aumentar la velocidad del viento disponible para la generación de energía. Además, esta tecnología contribuyó a mejorar la capacidad de producción de energía, aumentando la cantidad de electricidad generada y reduciendo el costo por kilovatio-hora. Esto será crucial en proyectos donde el espacio es limitado y se busca maximizar la producción. El desarrollo de un túnel concentrador también representó un avance en la ingeniería eólica, posibilitando la adaptación y mejora de

tecnologías existentes para distintas condiciones climáticas y geográficas. Su compatibilidad con aerogeneradores ya instalados permitió mejorar el rendimiento sin necesidad de reemplazar equipos.

El estudio planteó como hipótesis mediante un túnel concentrador de energía eólica incrementará la producción de energía eléctrica de un aerogenerador.

Finalmente, como objetivo general buscó realizar el análisis de un túnel concentrador de energía eólica para incrementar la producción de energía eléctrica de un aerogenerador de tipo horizontal.

Objetivos Específicos:

- Determinar los rangos mínimos de velocidad del viento en diferentes zonas de Jaén y comprobar in situ el lugar más apropiado.
- Determinar el dimensionamiento del túnel para la selección del tipo de aerogenerador.
- Seleccionar el tipo de aerogenerador considerando el dimensionamiento e inclinación del túnel.
- Simular el túnel concentrador de energía eólica, mediante herramientas computacionales, que posibilite incrementar la energía eólica entre su entrada y salida.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Objeto de estudio

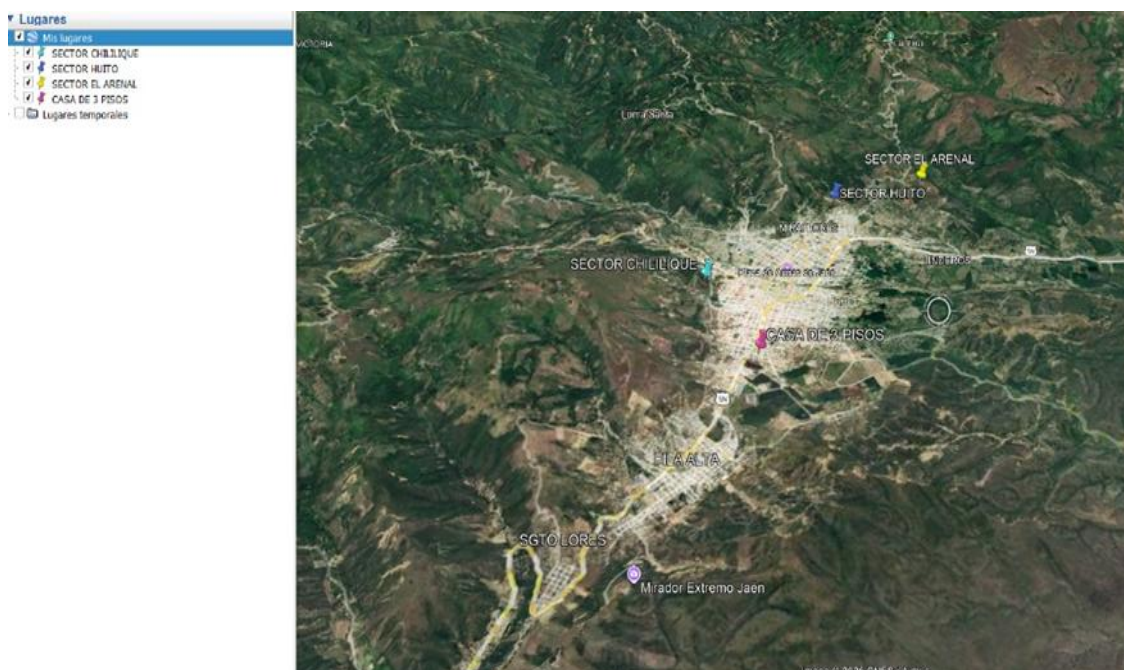
El objeto de estudio es un túnel troncocónico cuya función fue concentrar la energía eólica disponible para incrementar la velocidad del viento. Esta propuesta puede permitir la producción nominal de energía eléctrica de aerogeneradores que en las condiciones de energía eólica disponible no alcanzaría producir (e incluso ser insuficiente para arrancar el aerogenerador).

### 2.2. Ubicación del área de estudio

La ubicación geográfica de acuerdo al lugar de estudio se encuentra en el distrito de Jaén, provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, con coordenadas geográficas: latitud: - 5°41'48" S y longitud: - 78°46'29" 0 y 740 metros de altitud (ver Figura 1).

### Figura 1

*Ubicación geográfica del distrito de Jaén.*



Fuente: Elaboración propia

### 2.3. Materiales utilizados

Los materiales necesarios para el desarrollo del presente estudio y algunas de sus características más representativas fueron:

## **Computador**

Laptop de 11th Gen Intel(R) Core (TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz (1.69 GHz), RAM de 32.0 GB y Sistema operativo Windows 11 Pro de 64 bits.

## **Software**

ANSYS: Versión 20 mallas, disponible gratuitamente en el sitio web de la empresa. Este software es reconocido por su capacidad para realizar simulaciones precisas en Computational Fluid Dynamics (CFD) a través de ANSYS-Fluent, utilizado por centros de investigación de renombre mundial.

## **Materiales para Recolección de Información**

Para la recolección de datos se emplearán los siguientes materiales:

- **Estaciones meteorológicas:** Para obtener datos climáticos y condiciones ambientales.
- **GPS:** Para determinar la ubicación exacta de las mediciones.
- **Anemómetro:** Para medir la velocidad y dirección del viento en diferentes ubicaciones de Jaén.
- **Dispositivo de almacenamiento:** Para almacenar y transferir datos recolectados durante el estudio.
- **Acceso a bases de datos y publicaciones científicas:** Para revisar la bibliografía y estudios previos relevantes al proyecto.

Estos materiales permitirán realizar un análisis exhaustivo y detallado del entorno, asegurando que el diseño del túnel concentrador y la selección del aerogenerador sean óptimos para las condiciones específicas de Jaén.

### **2.4. Tipo de Investigación**

La investigación se clasificó como tipo aplicada y tecnológica por varias razones fundamentales. La investigación aplicada porque se utilizaron principios de mecánica de fluidos para comprender y optimizar el flujo de aire en el túnel concentrador, conceptos aerodinámicos para diseñar un túnel que maximice la eficiencia del aerogenerador, y evaluaciones de resistencia de materiales para asegurar que el túnel sea robusto y

duradero. Se utilizó también la simulación numérica mediante software avanzado para modelar y predecir el comportamiento del túnel y el aerogenerador bajo diversas condiciones. Se caracterizó por su enfoque en la resolución de problemas prácticos utilizando conocimientos ya establecidos (Hernández-Sampieri et al., 2014).

La investigación fue tecnológica ya que la investigación estuvo enfocada en el diseño un túnel concentrador que incremente la velocidad del viento y, en consecuencia, la eficiencia del aerogenerador. Se evalúan y optimizan aerogeneradores comerciales para las nuevas condiciones proporcionadas por el túnel concentrador. Además, se utilizaron herramientas computacionales como CAD y CFD para realizar simulaciones y modelamientos precisos que guiaron el diseño y la implementación del túnel. Este tipo de investigación busca el desarrollo y mejora de sistemas y equipos específicos (Zorrilla & Torres, 2009).

El enfoque de la investigación fue cuantitativo, de nivel descriptivo, porque se trabaja con datos numéricos, se usan mediciones y se analizan relaciones matemáticas. Fue de nivel descriptivo porque se describieron las características y particularidades de las condiciones del viento, las características del aerogenerador y sobre todo los aspectos geométricos del túnel concentrador propuesto (Vizcaíno Zúñiga et al., 2023).

El diseño de la investigación fue no experimental porque sólo se basó en simulación computacional y análisis teórico estructurándose en varias etapas clave. En la primera etapa, se realizó la recolección de datos mediante la medición de la velocidad y dirección del viento en diferentes zonas de Jaén y el análisis de las condiciones ambientales para identificar el lugar óptimo para el estudio. En la segunda etapa, se procesó la información obtenida seleccionando el aerogenerador adecuado, seguido del diseño y simulación del túnel concentrador utilizando software especializado como ANSYS Fluent ideal para simular el flujo del viento. En la tercera etapa, se realizó el pos-procesamiento de datos, analizando los resultados obtenidos de las simulaciones y evaluando el diseño del túnel concentrador, así como reevaluando el aerogenerador seleccionado. Finalmente, en la cuarta etapa, se elabora el informe final, redactando y presentando los resultados y conclusiones del estudio. Además, no existió manipulación de datos (Vizcaíno Zúñiga et al., 2023).

Este enfoque permitió un desarrollo sistemático y riguroso del proyecto, asegurando que cada etapa contribuya al objetivo final de incrementar la producción de

energía eléctrica mediante el diseño de un túnel concentrador de energía eólica para un aerogenerador horizontal en Jaén.

## **2.5. Fuentes de información**

Con el objetivo de dimensionar un túnel concentrador para incrementar la producción de energía eléctrica de un aerogenerador, se analizó la disponibilidad del recurso eólico en la zona. Para ello, se recopilaron datos meteorológicos de la página oficial de la NASA y se contrastó con los valores medidos de un anemómetro digital, marca Amprove. Para evaluar los aspectos técnicos y de diseño se consultaron diversas fuentes de información, incluyendo libros, tesis académicas y artículos científicos, entre otros.

## **2.6. Métodos**

El método utilizado fue inductivo – deductivo, que implicó partir de observaciones y mediciones específicas para formular conclusiones generales. En el estudio se diseñó un túnel concentrador de energía eólica y se evaluó cómo influye en la producción de energía eléctrica de un aerogenerador, enfocándose en sus características (Bernal Torres, 2010).

### **Procedimiento**

La investigación siguió cuatro etapas que son:

#### **Etapas 1**

Se determinó los rangos mínimos de velocidad del viento en zonas de Jaén. Se pretende utilizar los mapas eólicos de la NASA; y comprobar in situ el lugar más apropiado.

#### **Etapas 2**

Se identificaron aerogeneradores horizontales de baja potencia que puedan considerarse de uso residencial (viviendas, casas rurales, pequeñas instalaciones o de pequeña escala). Esto con la finalidad que sus dimensiones sean apropiadas para el túnel concentrador y se puedan manejar velocidades adecuadas para estas dimensiones. El aerogenerador óptimo se seleccionó teniendo en cuenta la potencia nominal, velocidad de arranque, velocidad nominal, el número de álabes, diámetro del rotor y el voltaje de salida, entre otras características importantes a considerar.

### **Etapa 3**

- ✓ Se realizó estimaciones previas para determinar la geometría del túnel concentrador a partir de los datos de entrada disponibles.
- ✓ Se realizó el modelo de túnel concentrador mediante herramientas computacionales CAD y CFD para el análisis del comportamiento del viento a través del mismo.
- ✓ Se estableció el aerogenerador apropiado, para las nuevas condiciones proporcionadas por el túnel concentrador.

### **Etapa 4**

- ✓ Se evaluaron las mejoras técnicas.
- ✓ Se extendió el análisis y propuso las dimensiones de túneles concentradores para diversos aerogeneradores.
- ✓ Se redactó y presentó el informe final de tesis.

### **Cálculos realizados**

#### a. Cálculo de densidad del aire

Para las condiciones de estudio, el aire se puede considerar de densidad constante (flujo incompresible), ya que las condiciones de velocidad son bajas ( $Ma < 0,3$ ). Según el MIDAGRI, la temperatura anual en Jaén varía entre  $17^{\circ}\text{C}$  y  $32^{\circ}\text{C}$  con una media de  $24^{\circ}\text{C}$  en las zonas bajas y medias. Así mismo informa que Jaén se encuentra a una altitud media de 740 m.s.n.m. con lo cual le corresponde una presión atmosférica de  $92,1 \text{ kPa}$ . De esta manera se obtiene la densidad del aire como:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1)$$

Donde:

p= presión atmosférica de  $92,1 \text{ kPa}$ .

R= Constante de gas específico del aire, cuyo valor es aproximadamente  $0,287 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .

T: Temperatura absoluta del aire, que se obtiene convirtiendo la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$  a Kelvin:  $297,15 \text{ K}$ .

b. Viscosidad del aire

Por las razones expuestas previamente, la viscosidad del aire también se considerará constante. Para efectos prácticos, se utilizó la viscosidad dinámica del aire a 24°C (a presión atmosférica) reportada en (Çengel & Cimbala, 2018):

$$\mu = 1,844 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s} \quad (2)$$

c. Cálculo del diámetro de entrada ( $D_1$ ):

Aplicando la ecuación de continuidad (conservación de masa) y asumiendo que la densidad del aire no varía al pasar por el túnel, tenemos:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (3)$$

Donde:

$V_1$  y  $V_2$ : Velocidades del aire a la entrada y salida del túnel, respectivamente.

$A_1$  y  $A_2$ : Áreas de la sección de entrada y salida del túnel, respectivamente.

$$V_1 \frac{\pi D_1^2}{4} = V_2 \frac{\pi D_2^2}{4} \quad (4)$$

d. Cálculo de la longitud del túnel ( $L$ ):

La longitud será determinada asumiendo que el ángulo imaginario del vértice del túnel es  $\theta$ . Así, a partir de la geometría del túnel tenemos:

$$\theta = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{D_1 - D_2}{2L} \right) \quad (5)$$

Donde:

$D_1$  y  $D_2$ : Diámetros de entrada y salida del túnel, respectivamente.

$L$  : Longitud del túnel.

e. Régimen de flujo:

El régimen de flujo se determina calculando el número de Reynolds ( $Re$ ). En este caso se calcula para las condiciones de entrada y salida, a efectos de verificar si el régimen de flujo se mantiene a lo largo del túnel:

$$Re_1 = \frac{\rho D_1 V_1}{\mu} \quad (6)$$

$$Re_2 = \frac{\rho D_2 V_2}{\mu} \quad (7)$$

f. Caída de Presión:

Se puede calcular la caída de presión ( $\Delta P$ ) mediante la aplicación de la ecuación de energía (Çengel & Cimbala, 2018):

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{L,total} \quad (8)$$

Como el flujo es horizontal, las alturas son iguales ( $z_1 = z_2$ ). Además, para flujo turbulento, incluso en ductos convergentes, el factor de corrección de la energía cinética  $\alpha$  es cercana a la unidad ( $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$ ), por lo cual se obtiene:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) + \rho g h_{L,total} \quad (9)$$

Donde

$h_{L,total}$  : Pérdidas de carga totales.

$g$  : Aceleración de la gravedad [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ].

Calculando las pérdidas de carga totales:

$$h_{L,total} = h_L + h_m \quad (10)$$

Pérdidas primarias

$$h_L = f \frac{L}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} \quad (11)$$

Donde

$f$  : Factor de fricción de Darcy.

$L$  : Longitud total del túnel [ $m$ ].

El factor de fricción se obtiene mediante la ecuación de Colebrook (Çengel & Cimbala, 2018):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D_2}{3,7} + \frac{2,51}{Re_2 \sqrt{f}} \right) \quad (12)$$

Donde

$\varepsilon$  : Rugosidad (suponiendo que el túnel sea de plancha galvanizada:  $\varepsilon = 0,15 \text{ mm}$ ).

Así de manera iterativa se encuentra que  $f = 0,0132$

Pérdidas secundarias

$$h_m = K_L \frac{V_2^2}{2g} \quad (13)$$

Donde

$K_L$  : Coeficiente de pérdidas menores.

g. Flujo másico

El caudal o flujo másico es una variable física empleada en la dinámica de fluidos para caracterizar la cantidad de materia que atraviesa una superficie en un determinado intervalo de tiempo. Suele simbolizarse con la notación " $\dot{m}$ " y se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \rho A_2 V_2 \quad (14)$$

### III. RESULTADOS

#### 3.1. DISEÑO DEL TÚNEL CONCENTRADOR DE ENERGÍA EÓLICA

##### 3.1.1. Disponibilidad del recurso eólico en el distrito de Jaén

En la página oficial de la NASA, en la sección de Predicción de Recursos Energéticos Globales, se realizó la investigación tomando datos desde los meses de enero a diciembre de 2022, debido a ser el último año con datos meteorológicos (NASA, 2024). Los datos sobre la velocidad del viento para el distrito de Jaén se presentan en las Tablas 1 y 2.

**Tabla 1**

*Velocidad del viento en el distrito de Jaén, según estación meteorológica NASA.*

Mes	Velocidad del viento m/s	
	Altura = 50 m	Altura = 10m
<b>Enero</b>	3,44	2,72
<b>Febrero</b>	3,25	2,57
<b>Marzo</b>	3,26	2,56
<b>Abril</b>	3,51	2,73
<b>Mayo</b>	3,9	3,03
<b>Junio</b>	4,57	3,55
<b>Julio</b>	4,79	3,74
<b>Agosto</b>	4,93	3,84
<b>Setiembre</b>	4,57	3,57
<b>Octubre</b>	3,68	2,88
<b>Noviembre</b>	3,19	2,49
<b>Diciembre</b>	3,34	2,62

**Tabla 2***Según estación meteorológica NASA, velocidad media del viento.*

<i>Altura = 10 m</i>	
Media	3,025
Error típico	0.146233
Mediana	2,805
Moda	#N/D
Desviación estándar	0,50656598
Varianza de la muestra	0,25660909
Curtosis	-1,44445193
Coefficiente de asimetría	0,62275494
Rango	1,35
Mínimo	2,49
Máximo	3,84
Suma	36,3
Cuenta	12
<i>Altura = 50 m</i>	
Media	3,86916667
Error típico	0,19071817
Mediana	3,595
Moda	4,57
Desviación estándar	0,66066713
Varianza de la muestra	0,43648106
Curtosis	-1,47293264
Coefficiente de asimetría	0,6075912
Rango	1,74
Mínimo	3,19
Máximo	4,93
Suma	46,43
Cuenta	12

Fuente: NASA (2024)

En las Tablas se expresan datos del viento para alturas de 50 y 10 metros, por lo cual se considerará los datos de la Tabla 1, para la altura de 10 metros por razones prácticas. Se evaluará la velocidad más baja registrada durante el año, la cual se produce en el mes de noviembre alcanzando un valor medio de 2,49 m/s.

La Tabla 2, expresa el valor medio anual de la velocidad del viento para una altura de 10 m, la cual es mayor que la velocidad más baja de 2,49 m/s; por lo cual se continúa considerando esta última al ser más crítica.

Como la página de la NASA no da referencia de un lugar específico dentro de la ciudad de Jaén, se midieron en zonas como el Arenal, el Huito, Chillique y San Isidro, sobre todo en casas de 3 pisos ( $\approx 10\text{m}$ ) con alrededores abiertos que no afecten considerablemente el viento en las zonas de medición. Se encontraron velocidades variables, pudiéndose constatar que efectivamente en horario desde las 6pm hasta la madrugada la velocidad en la zona del Huito este alrededor de la velocidad media mínima reportada (2,3 m/s), así también en otros horarios las velocidades oscilan entre 1 y 3 m/s (ver en Anexo sobre la medición). A partir de las mediciones se estableció que las geometrías de estudio denominadas A, B y C son adecuadas para el estudio de túnel concentrador de viento (ver figura 11).

**Tabla 3**

*Densidad y viscosidad del aire*

Detalle	Datos	Resultado
Densidad del aire	$\rho = \frac{92,1 \text{ kPa}}{0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (297,15\text{K})}$	$1,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Viscosidad del aire	$\mu = 1,844 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	$1,844 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2. Selección del aerogenerador

La elección de aerogeneradores de eje horizontal se fundamenta en que este tipo de dispositivos ha demostrado mayor eficiencia y confiabilidad en la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica, gracias a su diseño aerodinámico optimizado y a la capacidad de aprovechar de manera más efectiva los vientos predominantes. En la Tabla 4 se presenta una lista de aerogeneradores horizontales comerciales de venta común en el Perú:

**Tabla 4**

*Aerogeneradores horizontales comerciales para aplicaciones domésticas.*

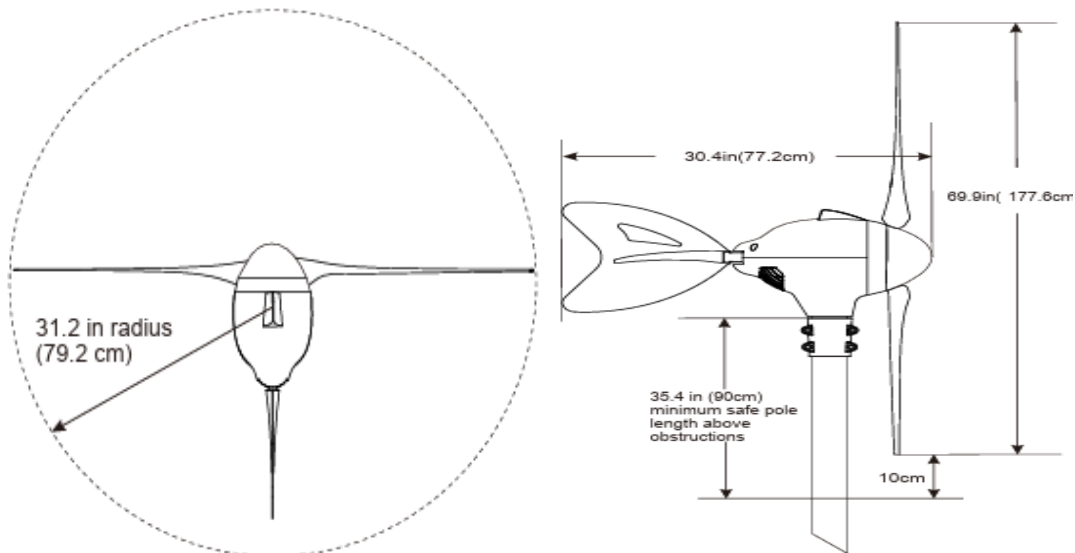
Marca	Zonhan	GreenEnergy	PowerWind	Aeolos	Pikasola	Primus Wind Power	Damia Solar	Techno Sun
Modelo	Aerogenerador 500W	400W/12V	RC600W - 12-24V	H 500w	400 W	1-ARBM-15-24	1000 12V - 1000W	FSH2000
Diámetro del rotor [m]	2.5	1.7	1.7	2.7	1.3	1.17	1.67	1.584
Potencia nominal [W]	500	400	600	500	400	200	1000	1000
Velocidad de arranque [m/s]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.68	4	3
Velocidad nominal [m/s]	8	12	12	12	13	12.5	12	12.5
Voltaje [V]	Dic-24	Dic-24	Dic-24	24	12	12/24/48	12	24/48
Generador	Trifásico, imán permanente	Trifásico, imán permanente	Trifásico, imán permanente	Trifásico, imán permanente	Trifásico, imán permanente	Trifásico, imán permanente	Trifásico, imán permanente	Trifásico, imán permanente

Fuente: Elaboración propia.

De las opciones evaluadas, para el análisis se ha seleccionado el aerogenerador de FSH2000, cuyas características geométricas se detallan en la Figura 2:

**Figura 2**

*Datos geométricos del aerogenerador FSH 2000.*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 2, corresponden al esquema dimensional de un aerogenerador de eje horizontal de pequeña escala, mostrando en vista frontal y lateral el alcance del radio del rotor (31,2 in = 79,2 cm) y las dimensiones principales del equipo, incluyendo la longitud total de la

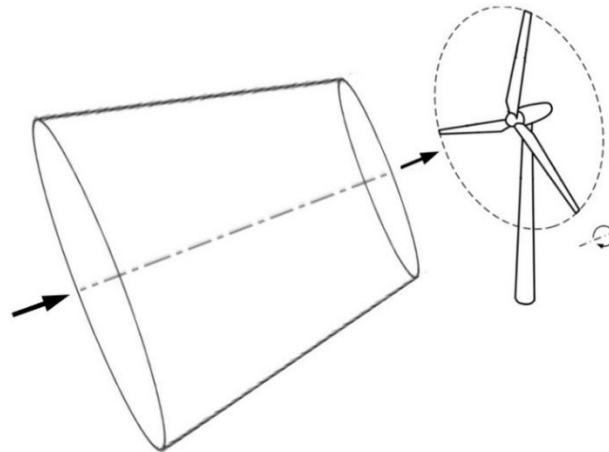
hélice (69,9 in = 177,6 cm), la envergadura de la carcasa (30,4 in = 77,2 cm) y la altura mínima de instalación sobre el soporte (35,4 in = 90 cm). El FSH 2000 tiene características geométricas y de diseño optimizadas para aplicaciones aisladas y de pequeña escala. Además, ofrece un balance óptimo entre rendimiento, facilidad de implementación y robustez operacional, haciéndolo idóneo para sistemas autónomos y complementos a instalaciones solares, particularmente en contextos rurales o remotos.

### 3.1.3. Dimensionamiento del túnel concentrador

En el esquema de la Figura 3 se muestra la configuración aproximada para el primer análisis.

#### Figura 3

*Configuración básica del túnel concentrador para aumentar la velocidad del aire.*

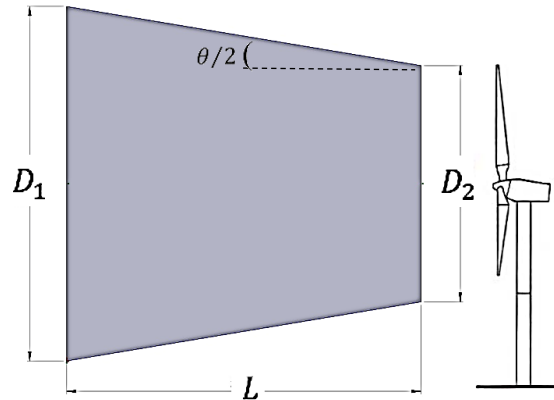


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3, se muestra la configuración básica del túnel concentrador para que aumente la velocidad del aire, se fundamenta en el principio de continuidad, donde el aire entra por una sección amplia y, al desplazarse hacia la salida más estrecha, incrementa su velocidad antes de impactar en las palas del aerogenerador; de este modo, el túnel actúa como un conducto convergente que concentra el flujo y dirige mayor energía cinética hacia el rotor, permitiendo aprovechar de manera más eficiente el recurso eólico incluso en zonas de vientos moderados, optimizando así la generación eléctrica con equipos de menor tamaño.

#### Figura 4

Cotas de la geometría del túnel.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4, se muestra el esquema de un túnel concentrador de viento con las cotas geométricas que se consideran para su análisis, donde  $D_1$  corresponde al diámetro de la entrada o boca de captación,  $D_2$  al diámetro de la salida ajustado al rotor del aerogenerador y  $L$  a la longitud del conducto que une ambas secciones; además, se introduce el ángulo de apertura  $\theta/2$ , que representa la semiamplitud de la divergencia del túnel, el cual depende de la diferencia de diámetros y de la longitud total. Estas variables permiten describir la geometría del concentrador, establecer la relación de áreas y el grado de aceleración del flujo de aire, siendo fundamentales para calcular la eficiencia aerodinámica y el aumento de velocidad del viento al llegar al rotor.

Para que el túnel concentrador mantenga proporciones geométricas que no exageren la diferencia de dimensiones entre los diámetros de entrada y salida, así como su longitud, para el presente estudio se asumió un ángulo  $\theta = 30^\circ$ . Este valor asumido no limita el uso de otros valores, cuya influencia podría evaluarse en estudios futuros.

Así, a partir de la siguiente fórmula, tenemos:

$$\theta = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{D_1 - D_2}{2L} \right) \quad (5)$$

Conociendo que el túnel será de sección circular, se calculará las dimensiones según detalle.

**Tabla 5***Cálculo del diámetro de entrada y longitud del túnel.*

Detalle	Cálculo	Resultado
Diámetro de entrada ( $D_1$ )	$(2,49 \text{ m/s})D_1^2 = (12,5 \text{ m/s})(158,4 \text{ cm})^2$	354,9 cm
Longitud del túnel (L)	$\theta = 2 \operatorname{atan}\left(\frac{354,9 - 158,4}{2L}\right)$	366,7 cm

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6***Datos geométricos para el túnel concentrador de energía eólica.*

<b>Datos básicos del aerogenerador</b>	
Potencia nominal [W]	1000
Diámetro del rotor [m]	1,584
Velocidad de arranque [m/s]	3,0
Velocidad nominal [m/s]	12,5
<b>Datos básicos del túnel concentrador</b>	
Diámetro de entrada [m]	3,549
Diámetro de salida [m]	1,584
Longitud del túnel concentrador [m]	3,667
Ángulo imaginario del vértice del túnel	30°
Velocidad del aire a la entrada del túnel [m/s]	2,49
Velocidad del aire a la salida del túnel [m/s]	12,5

Fuente: Elaboración propia.

**3.1.4. Cálculos complementarios del túnel concentrador****Régimen de flujo:**

$$Re_1 = \frac{1,08 \frac{kg}{m^3} (3,549m) (2,49 \frac{m}{s})}{1,844 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} = 517569 \quad (15)$$

$$Re_2 = \frac{1,08 \frac{kg}{m^3} (1,584m) (12,5 \frac{m}{s})}{1,844 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} = 1159653 \quad (16)$$

Los resultados muestran que el flujo es totalmente turbulento, considerando como referencia el número de Reynolds de transición entre flujo laminar y turbulento para tubos de secciones circulares. Para  $Re > 4000$ , el flujo es turbulento (White, 2011).

Al ser un flujo interno, acelerado y con cambio de sección (truncocónico), es importante capturar bien los gradientes de velocidad, presión y posibles efectos de separación de flujo (aunque poco probables en esta geometría si el cono es suave).

**Caída de Presión:**

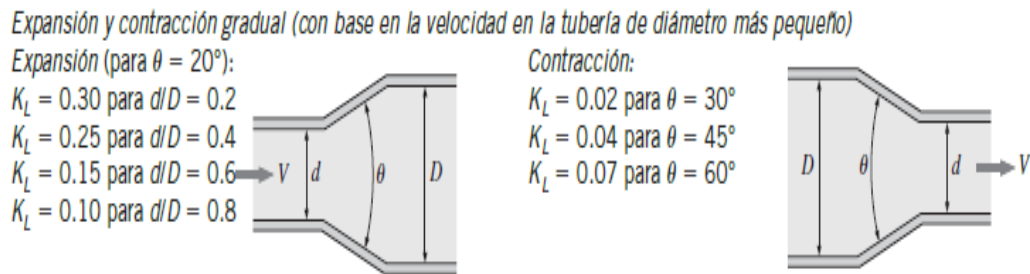
$$h_L = 0,0132 \frac{3,667m}{1,584m} \frac{(12,5m/s)^2}{2(9,81m/s^2)} = 0,243m \quad (17)$$

Pérdidas secundarias

Para contracciones, similar al caso del túnel concentrador, Çengel & Cimbala (2018) considera  $K_L = 0,02$  para  $\theta = 30^\circ$  (Ver Figura 5).

**Figura 5**

*Coefficientes de pérdidas menores para expansiones y contracciones.*



Fuente: Çengel & Cimbala (2018)

**Tabla 7**

*Coefficiente de pérdidas*

Detalle	Cálculo	Resultado
$h_m$	$0,02 \frac{(12,5 m/s)^2}{2(9,81 m/s^2)}$	0,159m
Pérdidas de carga totales	$h_{L,total} = h_L + h_m = 0,243m + 0,159m$	0,403m
Pérdidas de presión	$\Delta P = 81,03 Pa + 4,27 Pa$	85,30 Pa
Flujo másico (m)	$(1,08 kg/m^3)(1,9706)(12,5)$	26,6 kg/s

Fuente: Elaboración propia

**3.2. ESTUDIO NUMÉRICO DEL TÚNEL CONCENTRADOR**

El estudio numérico se realizó con la versión estudiantil libre del paquete de software Ansys 2025 R1, cuya licencia será válida 07/31/2026 (Ansys Student - Free Software Download, 2025). Específicamente se utilizó Ansys Fluent, que es un software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) empleado para simular flujo de fluidos.

Es una herramienta apropiada para simular la interacción de flujos con paredes sólidas. Según la web de Ansys, se emplea para el diseño y optimización de productos en diversas industrias como la aeroespacial, automotriz y energética.

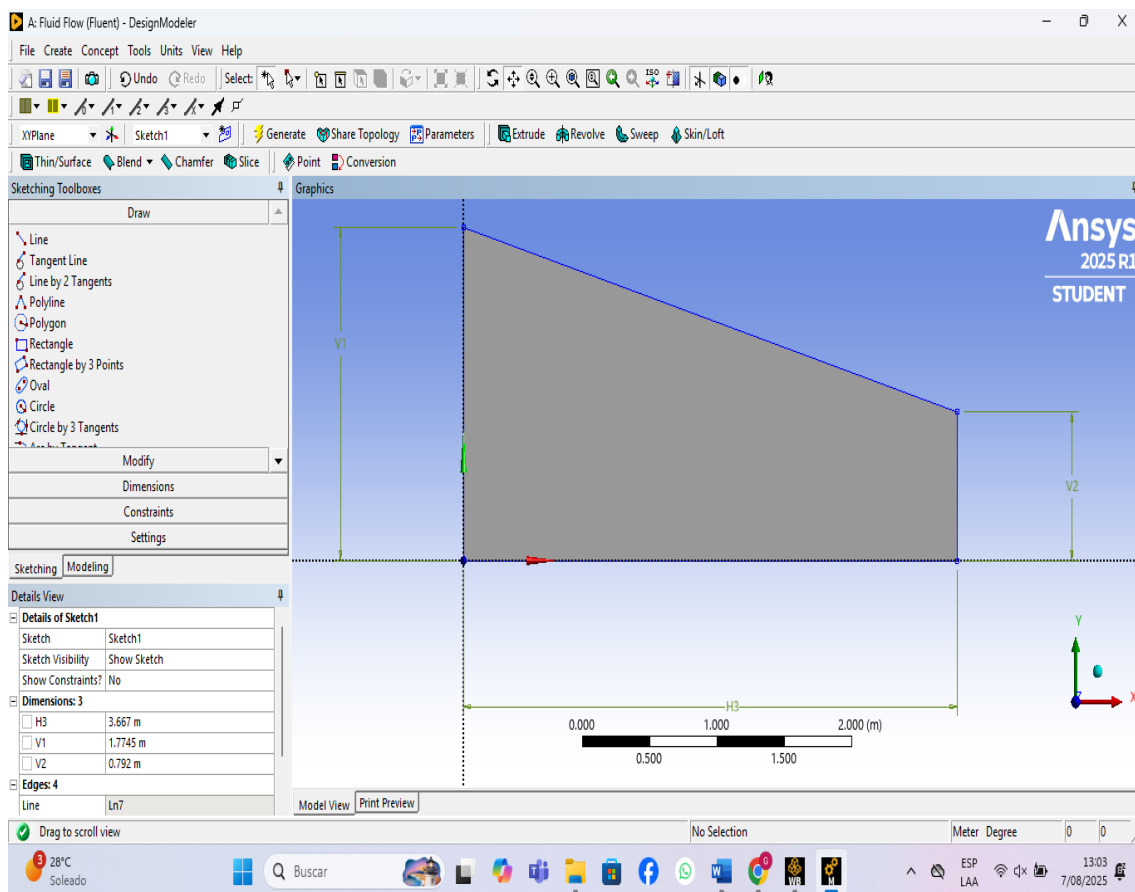
Para el presente estudio se seleccionó el caso desarrollado analíticamente (aerogenerador FSH 2000), a partir del cual se realizó el estudio de malla correspondiente.

### 3.2.1. Estudio de malla

El estudio se realizó considerando el modelo axisimétrico 2D mostrado en la Figura 6:

**Figura 6**

*Geometría axisimétrica 2D para el modelamiento del túnel.*



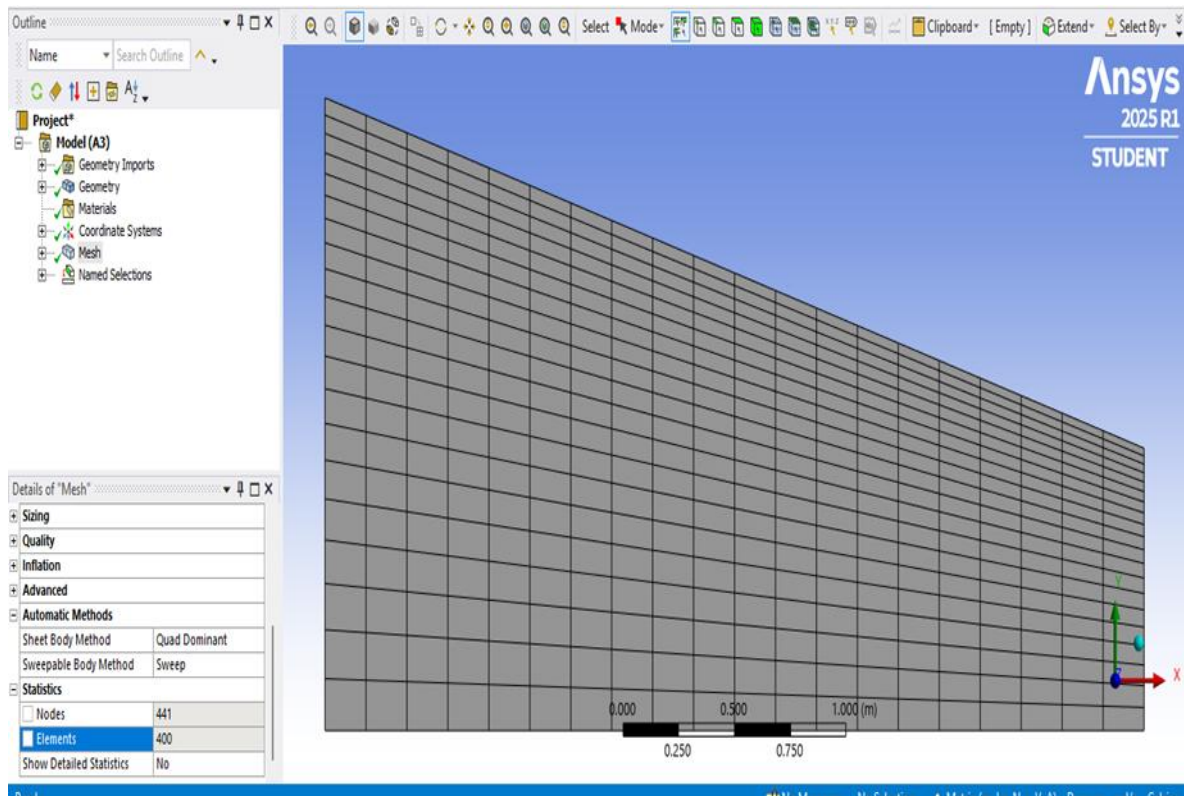
Fuente: Imagen extraída del software.

Sobre este dominio se realizó el enmallado que se incrementó proporcionalmente desde una malla gruesa (20x20 elementos), hasta una muy fina (150x150 elementos). Para capturar mejor el comportamiento del flujo cerca de la pared, la malla se refina en el sentido vertical (Bias Factor=3), manteniéndose uniforme en el sentido horizontal.

La Figura 7 presenta, como referencia, la malla gruesa (20x20 elementos) correspondiente al primer caso simulado y a continuación se detalla los demás pasos seguidos para obtener la simulación deseada.

### Figura 7

*Enmallado de la Geometría axisimétrica 2D para el modelamiento del túnel (malla gruesa de 20x20 elementos).*



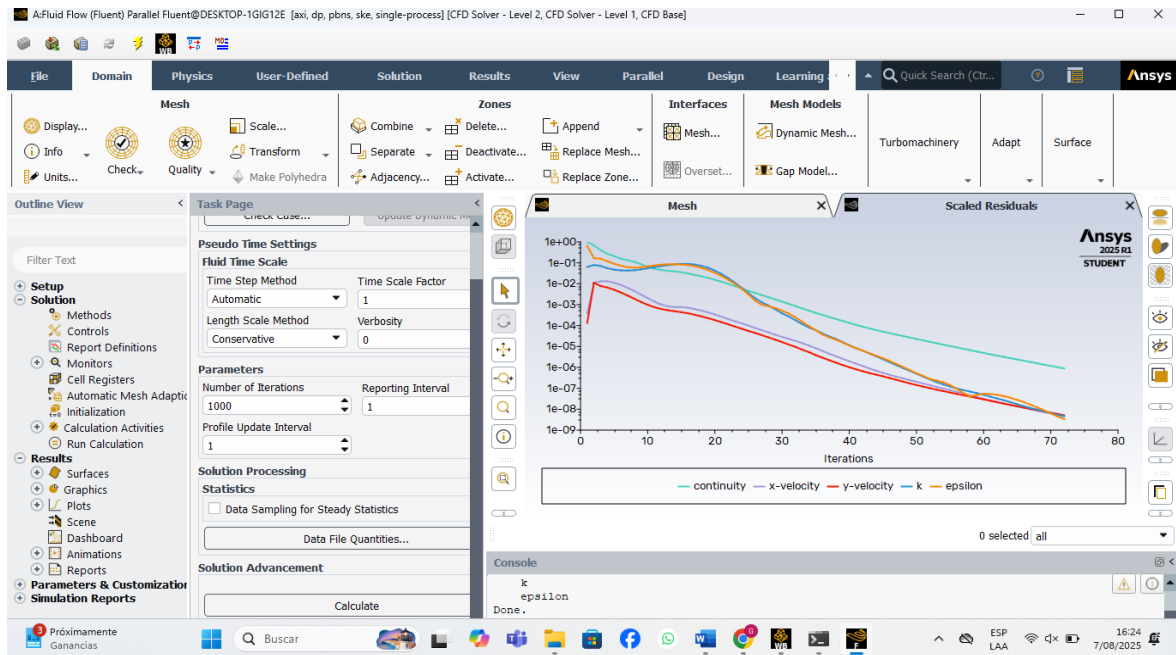
Fuente: Imagen extraída del software.

La simulación se realizó con los parámetros estándar de Ansys Fluent, considerando el régimen estacionario, el modelo espacial 2D Axisimétrico, el modelo de turbulencia (k-epsilon) que es robusto, tiene buena convergencia y es adecuado para flujo interno. Los modelos de discretización fueron Upwind de segunda orden, para proporcionar mayor precisión. En todos los casos, los valores residuales se redujeron hasta  $10^{-6}$ , para obtener resultados precisos durante la convergencia. Todos los demás parámetros numéricos fueron los valores estándar de Ansys Fluent.

En la Figura 8 se muestra la finalización del proceso de convergencia del caso en estudio:

**Figura 8**

*Convergencia de la simulación de malla gruesa (20x20 elementos).*

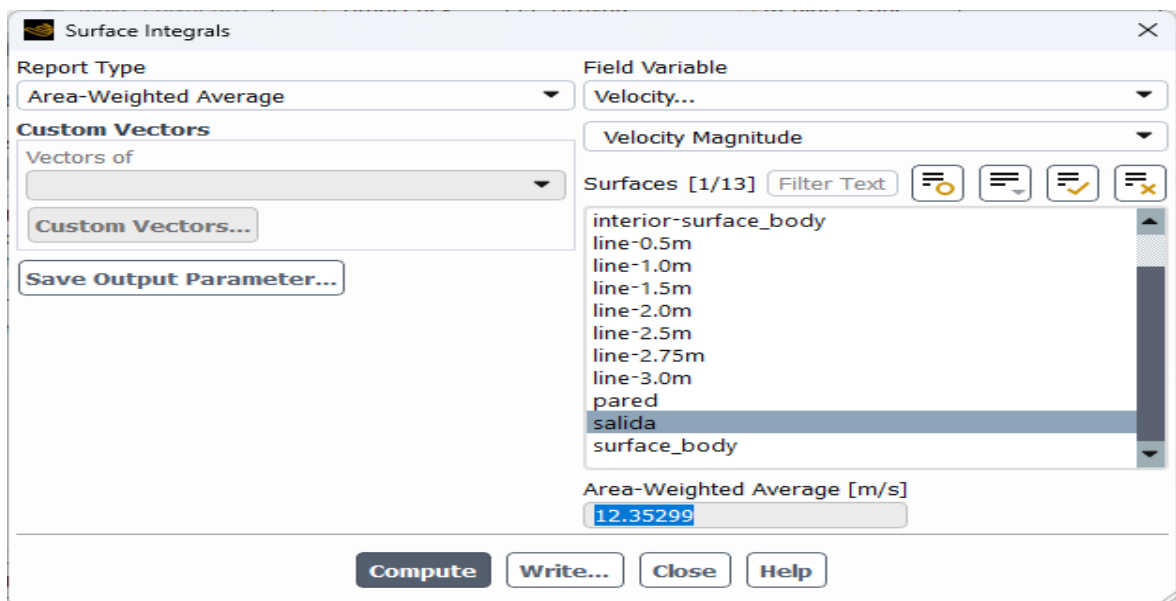


Fuente: Imagen extraída del software.

Para evaluar la convergencia de malla y seleccionar una cantidad adecuada de elementos que garanticen la independencia de resultados del tamaño de malla se seleccionó la velocidad media en la sección transversal de la salida del túnel.

**Figura 9**

*Obtención del valor promedio de velocidad en la salida del túnel concentrador.*

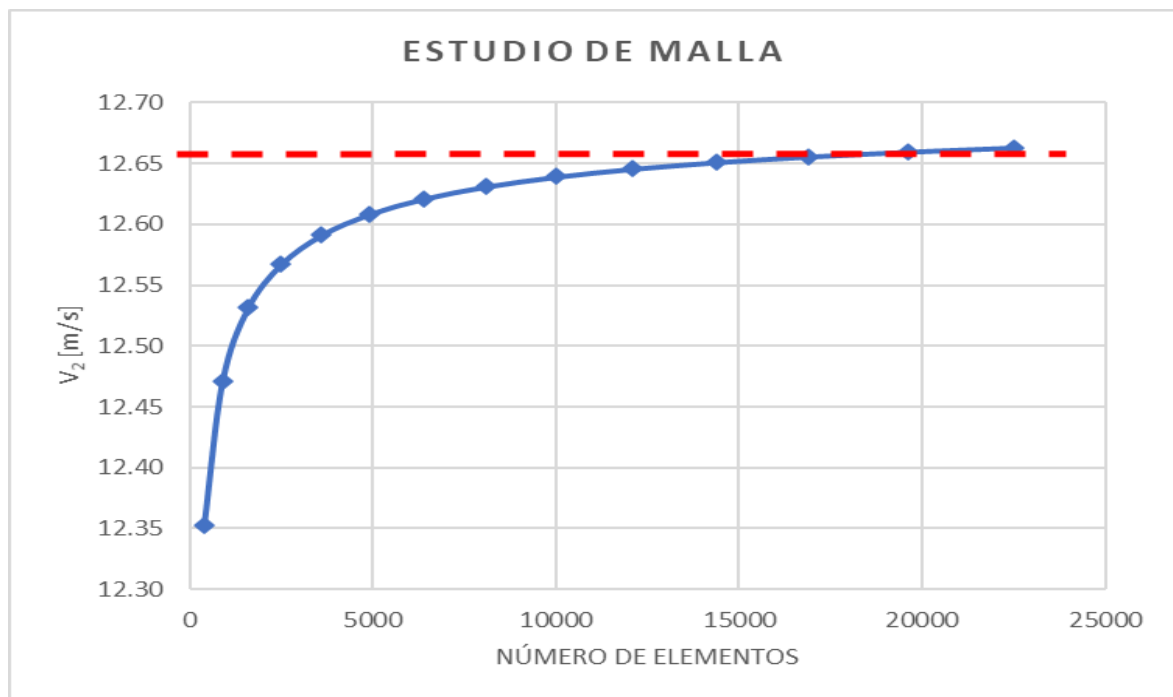


Fuente: Imagen extraída del software.

**Tabla 8***Casos evaluados en el estudio de convergencia de malla.*

Caso	Número de elementos	Velocidad media en la sección de salida del túnel [m/s]	Error Porcentual
caso 1: 20x20	400	12,35	
caso 2: 30x30	900	12,47	1.0%
caso 3: 40x40	1600	12,53	0.5%
caso 4: 50x50	2500	12,57	0.3%
caso 5: 60x60	3600	12,59	0.2%
caso 6: 70x70	4900	12,61	0.1%
caso 7: 80x80	6400	12,62	0.1%
caso 8: 90x90	8100	12,63	0.1%
caso 9: 100x100	10000	12,64	0.1%
caso 10: 110x110	12100	12,65	0.1%
caso 11: 120x120	14400	12,65	0.0%
caso 12: 130x130	16900	12,66	0.0%
caso 13: 140x140	19600	12,66	0.0%
caso 14: 150x150	22500	12,66	0.0%

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 10***Resultados del estudio de malla (independencia de malla aparece a partir de 14400 elementos, i.e. 120x120 elementos).*

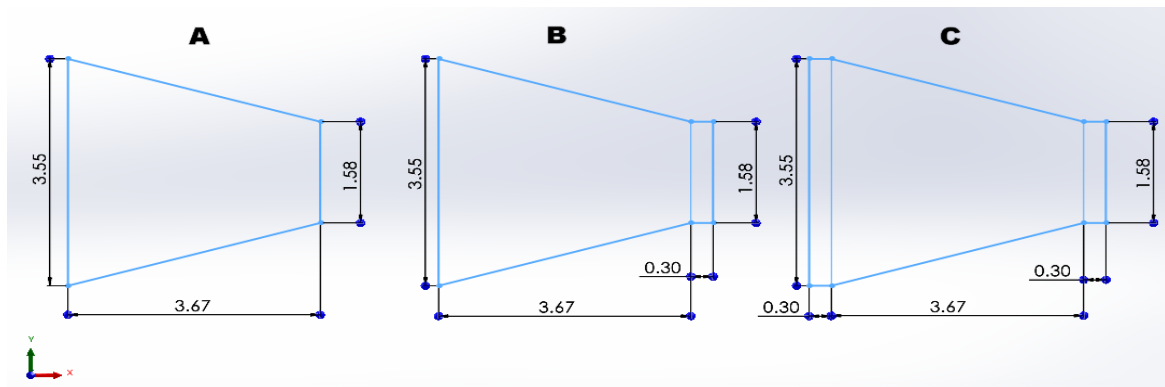
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 y Figura 10: Se muestra que a medida que aumenta el número de elementos, la solución numérica (línea azul) converge hacia un valor estable cercano a 12,65 m/s, que está indicado como referencia con la línea roja discontinua. A partir de aproximadamente 15000 elementos, la variación de la velocidad es mínima, indicando que la solución ha alcanzado independencia de la malla. Los resultados muestran una independencia del parámetro seleccionado en relación del tamaño de malla a partir de 120x120 (14400 elementos), con lo cual el estudio de malla concluye.

### 3.2.2. Estudio de casos

**Figura 11**

*Geometrías consideradas para el estudio del túnel concentrador.*



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11, se muestra tres configuraciones geométricas distintas, etiquetadas como A, B y C, que fueron consideradas para el estudio del túnel concentrador. Todas presentan una sección convergente seguida de un canal recto de salida, con dimensiones generales similares: una longitud total de 3.67 unidades y una altura de entrada de 3.55 unidades que se reduce a una altura de salida de 1.58 unidades.

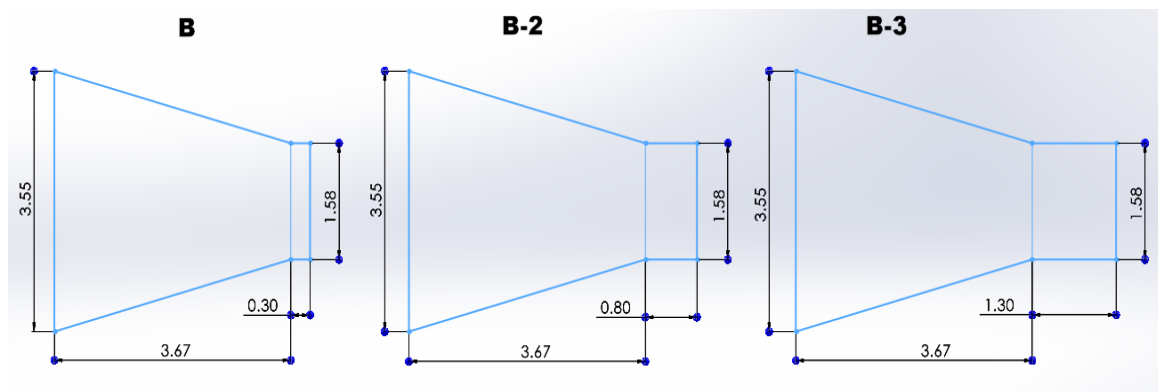
El modelo A presenta un diseño simple de tobera convergente-divergente, con apertura lateral sin prolongaciones adicionales. El modelo B incorpora un canal lateral inferior de 0,30 m, que permite modificar el ingreso del flujo y redirigirlo hacia la sección de salida. El modelo C incluye este mismo escalón tanto en la parte inferior como en la superior, simétricamente. A es la más simple. B introduce ligera asimetría inferior. C es la más balanceada (simétrica).

En Figuras 12, se observa una evolución del modelo B variando la dimensión del canal lateral: B (0,30 m): canal estrecho, con menor capacidad de direccionar flujo

adicional. B-2 (0,80 m): canal intermedio, lo que permite mayor captación de aire y mejor transición hacia la salida. B-3 (1,30 m): canal amplio, que maximiza la captación de aire en la zona lateral, buscando potenciar aún más el efecto de aceleración en la zona de salida. Donde B = transición suave, B-2 = intermedio y B-3 = transición muy forzada (puede generar turbulencia o esfuerzos adicionales si es un conducto). Las longitudes de salida de 0.30 m, 0.80 m y 1.30 m se consideraron para analizar la influencia geométrica en la disipación de energía, comportamiento hidráulico y estabilidad estructural, permitiendo comparar alternativas y seleccionar la opción más eficiente, segura y adecuada al diseño proyectado.

**Figura 12**

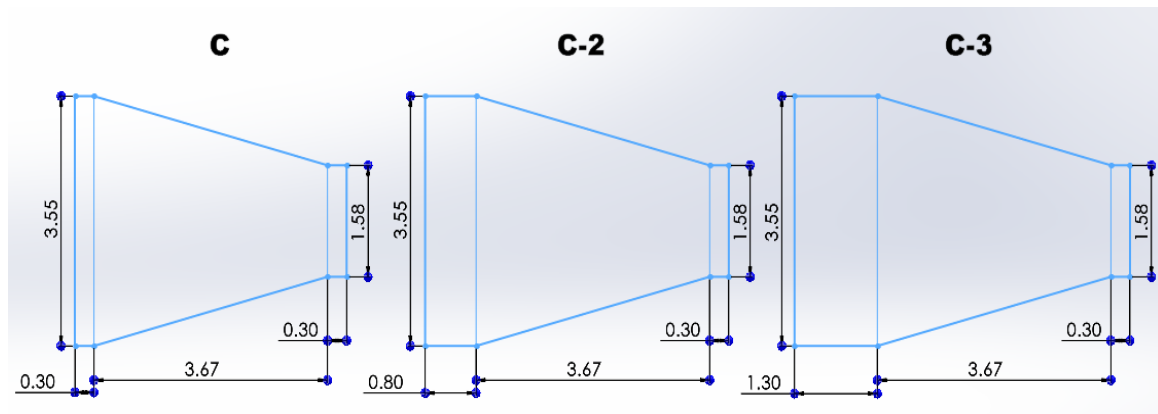
*Geometrías consideradas para estudiar el efecto de la longitud de la región cilíndrica de salida del túnel concentrador.*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 13**

*Geometrías consideradas para estudiar el efecto de la longitud de la región cilíndrica de entrada del túnel concentrador.*



Fuente: Elaboración propia.

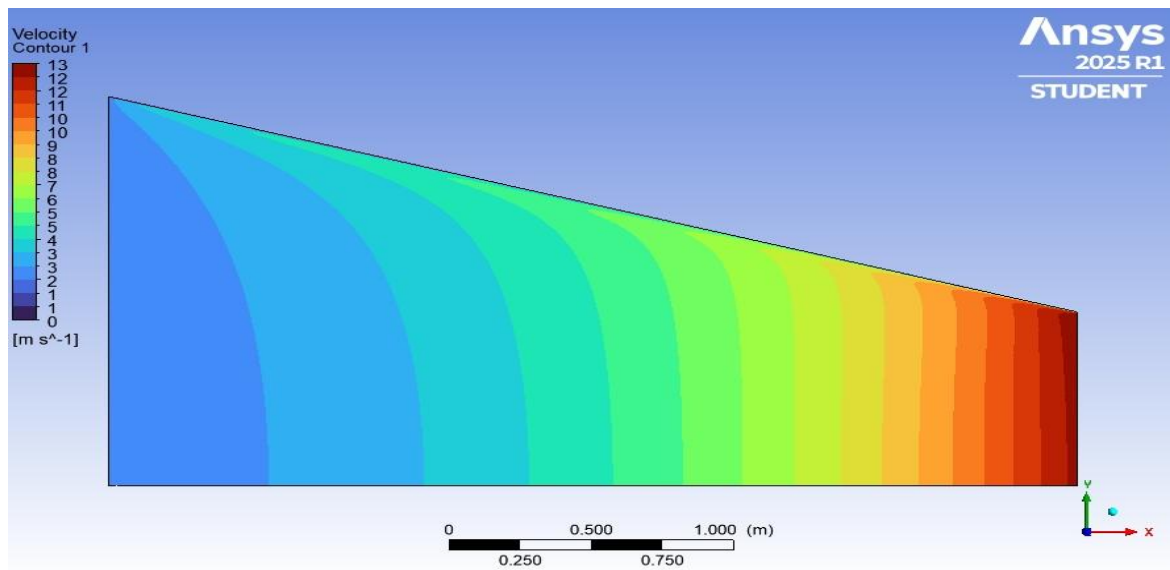
En la Figura 13, se observa una evolución del modelo C variando la dimensión del canal lateral de ingreso y salida: C: Simétrico con 0.30 en ambas bases, C-2: Desplazamiento de 0.80 en la entrada y C-3: Desplazamiento de 1.30 en la entrada. Donde C = transición simétrica y suave, C-2 = más pronunciada, aún equilibrada y C-3 = transición demasiado inclinada, más agresiva. Además, C y variantes mantienen simetría superior e inferior, lo cual es más favorable tanto para estabilidad estructural como para distribución de esfuerzos o flujo.

### 3.2.3. Resultados para la Geometría A

En la Figura 14 se muestran los contornos de velocidad para el dominio simulado (el dominio es simétrico a través de su eje horizontal), mostrando un aumento de la velocidad a medida que el flujo entra en las secciones de menor diámetro.

**Figura 14**

*Contornos de velocidad en el túnel concentrador (Geometría A).*



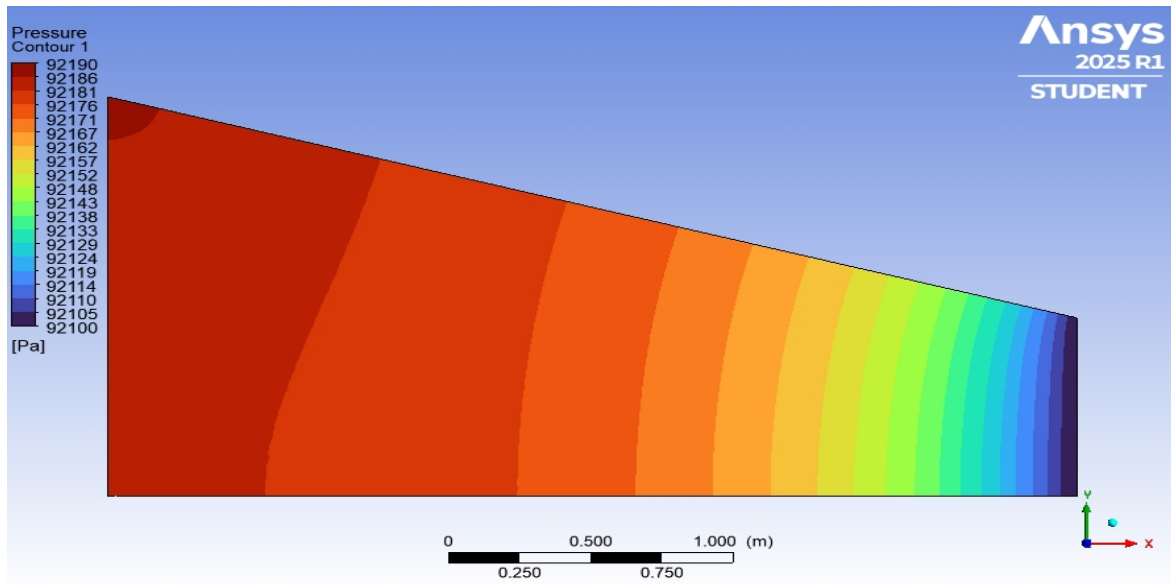
Fuente: Imagen extraída del software.

En la Figura 15 se muestran los contornos de presión para el dominio simulado, mostrando que la presión mayor está a la entrada y a medida que se avanza dentro del dominio la presión cae debido al aumento de la velocidad (Efecto Bernoulli).

En la Figura 16, se muestra el comportamiento del flujo mediante vectores de velocidad. A la salida del túnel, los vectores muestran que el flujo se orienta siguiendo la dirección del ángulo de inclinación del túnel. Este detalle puede influir en la búsqueda apropiada de la dirección del flujo que moverá los álabes del aerogenerador.

**Figura 15**

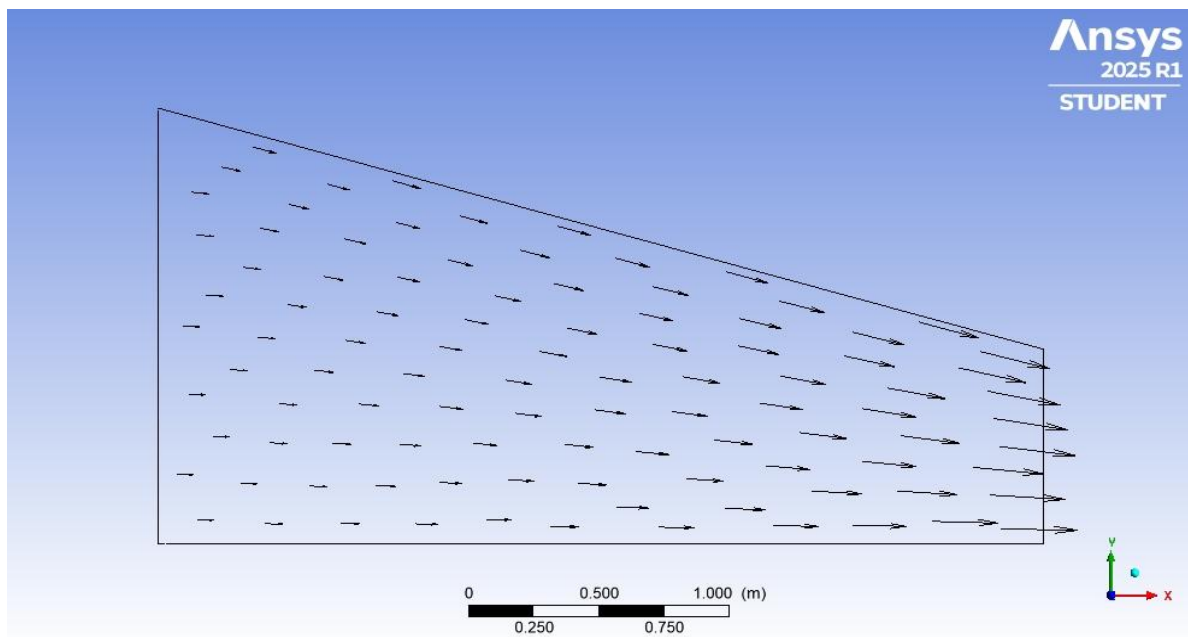
*Contornos de presión en el túnel concentrador (Geometría A).*



Fuente: Imagen extraída del software.

**Figura 16**

*Vectores de velocidad en el túnel concentrador (Geometría A).*

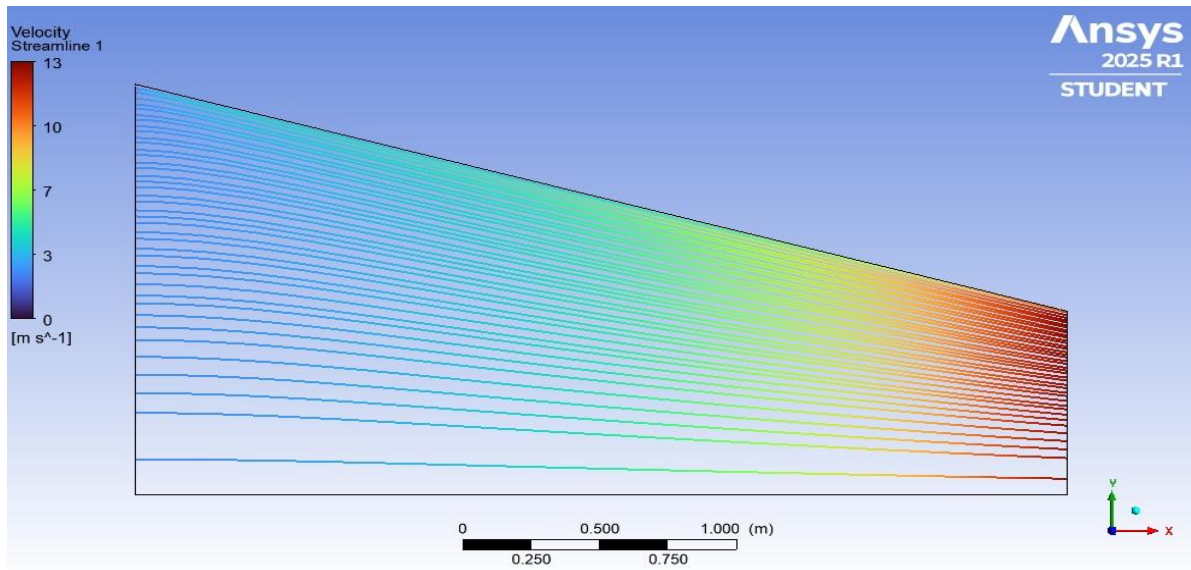


Fuente: Imagen extraída del software.

Las líneas de corriente mostradas en la Figura 17, indican un comportamiento uniforme que sigue la dirección de la pared del túnel, acercándose entre ellas en la salida como muestra de la aceleración del flujo en dicha zona.

**Figura 17**

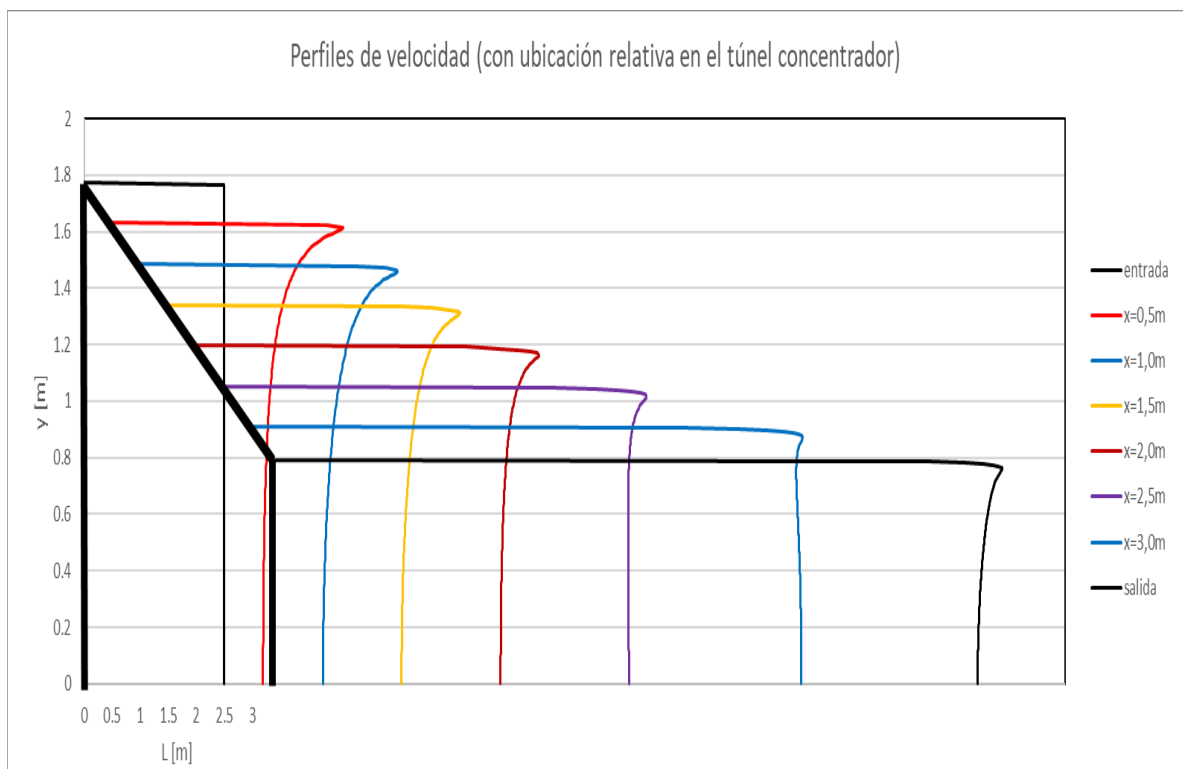
*Líneas de corriente en el túnel concentrador (Geometría A).*



Fuente: Imagen extraída del software.

**Figura 18**

*Perfiles de velocidad con ubicación relativa en el túnel concentrador (Geometría A).*



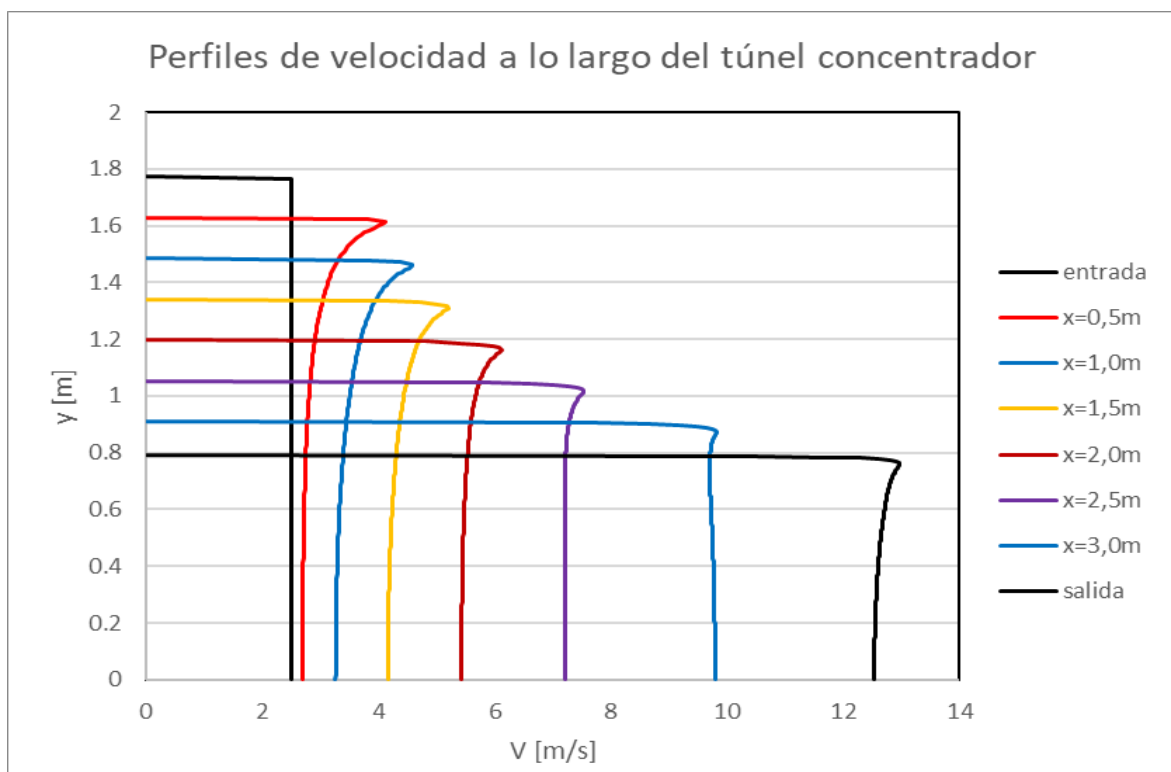
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18 se muestran los perfiles de velocidad a cada 0,5 metro del punto anterior desde la entrada. La forma de los perfiles muestra el comportamiento del flujo de aire a través del túnel concentrador. Se nota un incremento de la velocidad entre la zona próxima a la pared y la zona central del túnel (donde los efectos de pared son despreciables y la velocidad es uniforme).

En la Figura 19 se muestra una comparación entre los mismos perfiles de velocidad.

**Figura 19**

*Perfiles de velocidad en el túnel concentrador (Geometría A).*



Fuente: Elaboración propia.

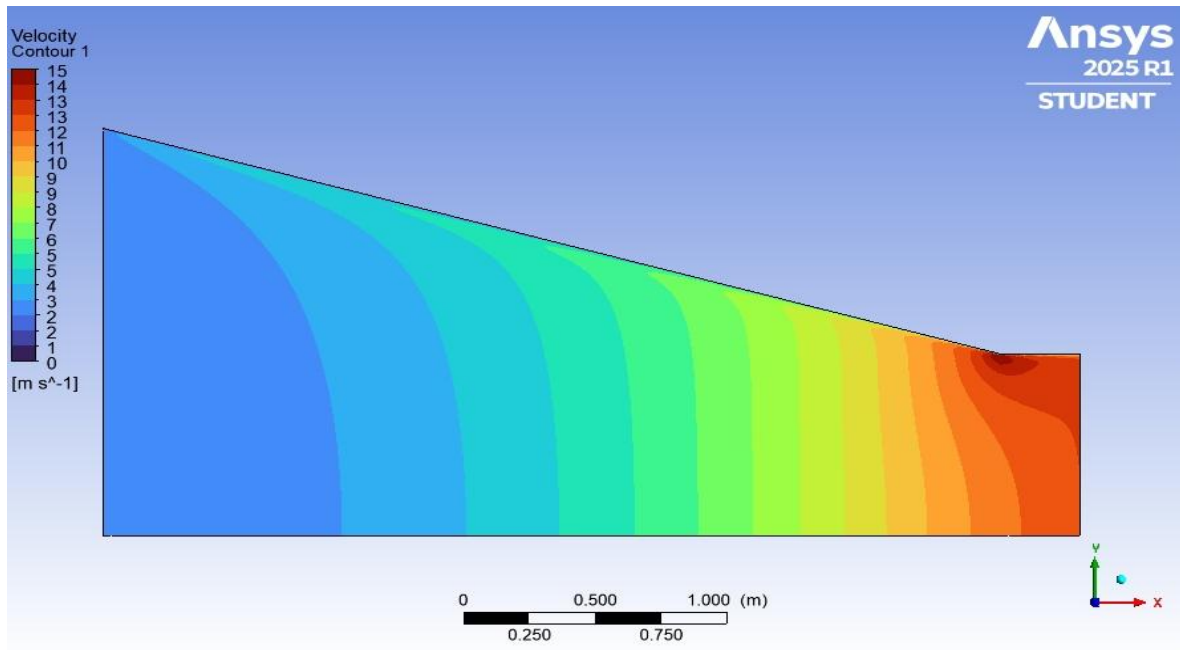
Los resultados para esta geometría no mostraron desprendimiento de capa límite. El flujo másico que atravesó el túnel fue de 26.60265 kg/s (medido a la salida del túnel).

### 3.2.4. Resultados para la Geometría B

En la Figura 20 se muestran los contornos de velocidad para el dominio de la Geometría B. Se observa que la salida horizontal genera un cambio en los contornos de velocidad, lo cual indica que el comportamiento de la velocidad se altera en el último tramo del túnel, en comparación con la Geometría A.

**Figura 20**

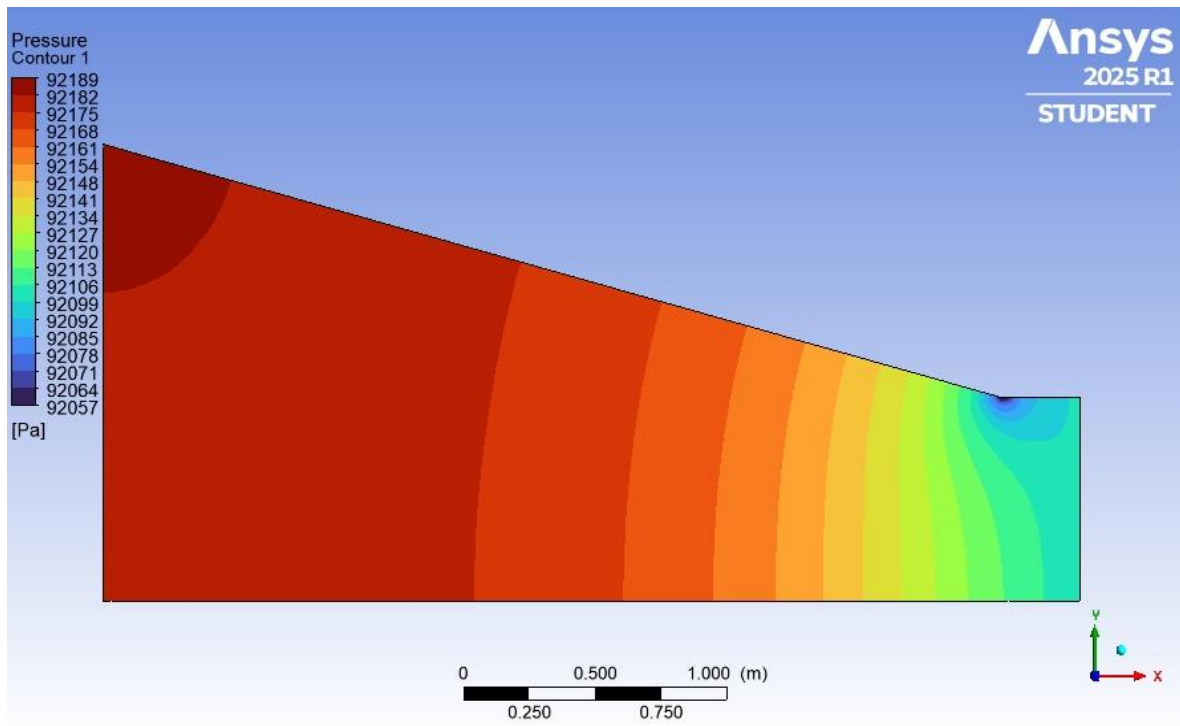
*Contornos de velocidad en el túnel concentrador (Geometría B).*



Fuente: Imagen extraída del software.

**Figura 21**

*Contornos de presión en el túnel concentrador (Geometría B).*

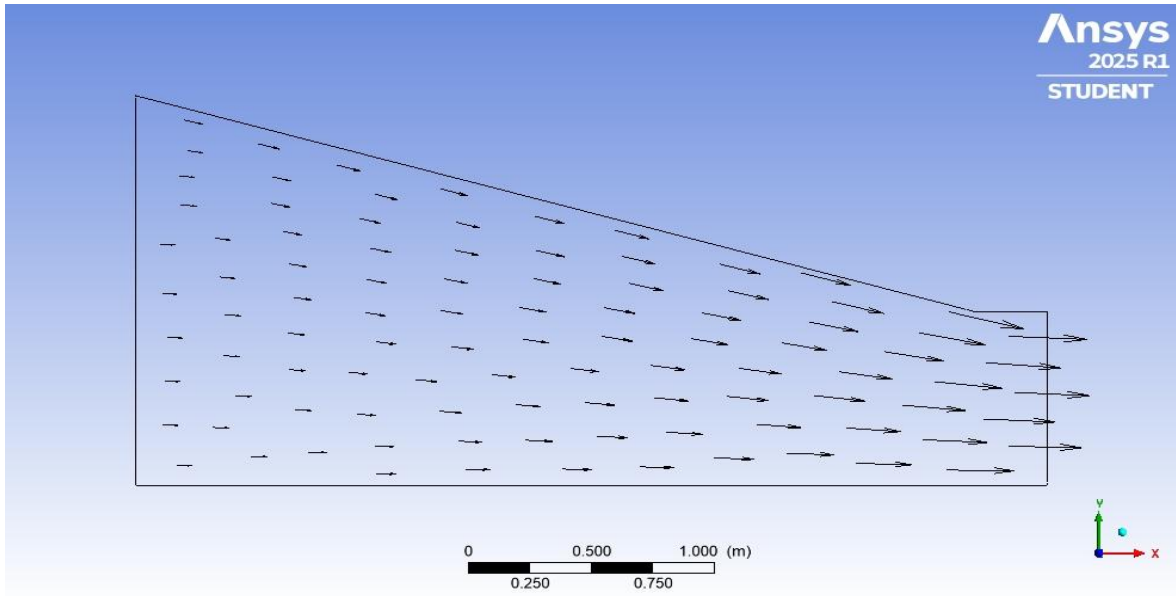


Fuente: Imagen extraída del software.

En la Figura 21, los contornos de presión muestran una caída de presión localizada (zona en azul) justo al inicio del tramo horizontal, coincidente con el aumento de velocidad en esta zona (ver contornos de velocidad) debido al efecto Bernoulli.

**Figura 22**

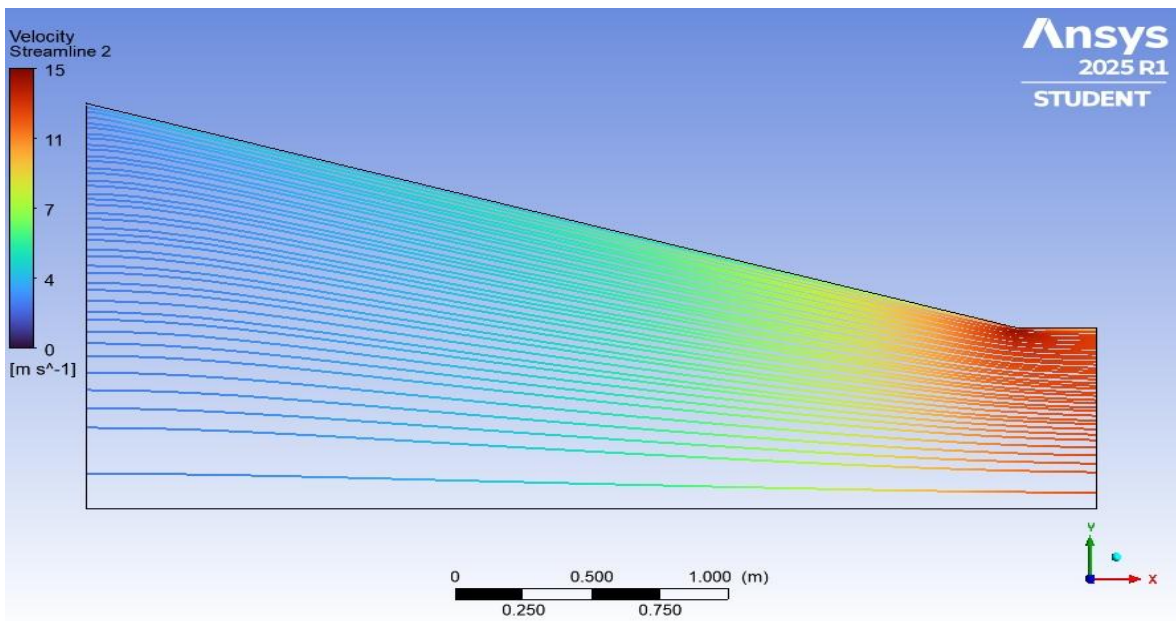
*Vectores de velocidad en el túnel concentrador (Geometría B).*



Fuente: Imagen extraída del software.

**Figura 23**

*Líneas de corriente en el túnel concentrador (Geometría B).*



Fuente: Imagen extraída del software.

**Figura 24**

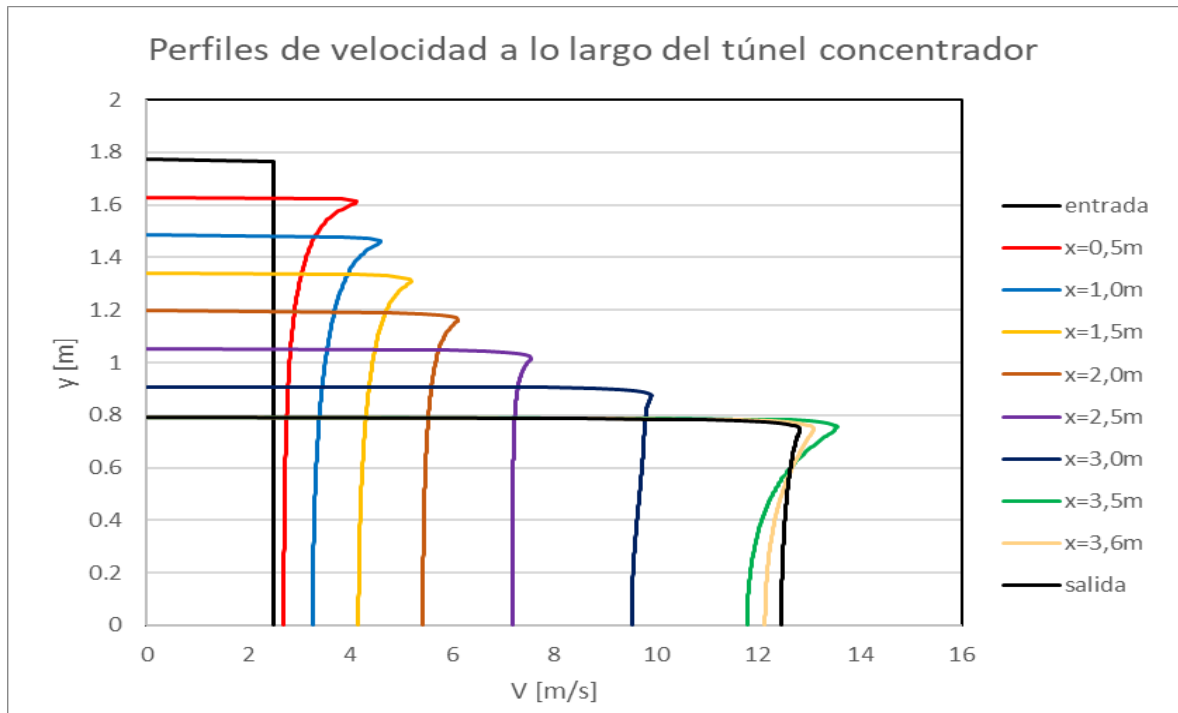
*Perfiles de velocidad con ubicación relativa en el túnel concentrador (Geometría B).*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 25**

*Perfiles de velocidad en el túnel concentrador (Geometría B).*



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 22, la pequeña salida horizontal del túnel reorienta la dirección del flujo, volviéndola casi horizontal a diferencia de la Geometría A. Esta condición posibilita que la Geometría B sea más adecuada en el sentido de la dirección, sin embargo, esto se da a cambio de incrementar las pérdidas de presión.

En la Figura 23, evidencian que no se produce desprendimiento de capa límite y que el flujo solo se acelera en la convergencia.

En la Figura 24 se muestran los perfiles de velocidad a cada 0,5 metro del punto anterior desde la entrada. Similar a la Geometría A, la forma de los perfiles muestra un incremento de la velocidad en la zona próxima a la pared.

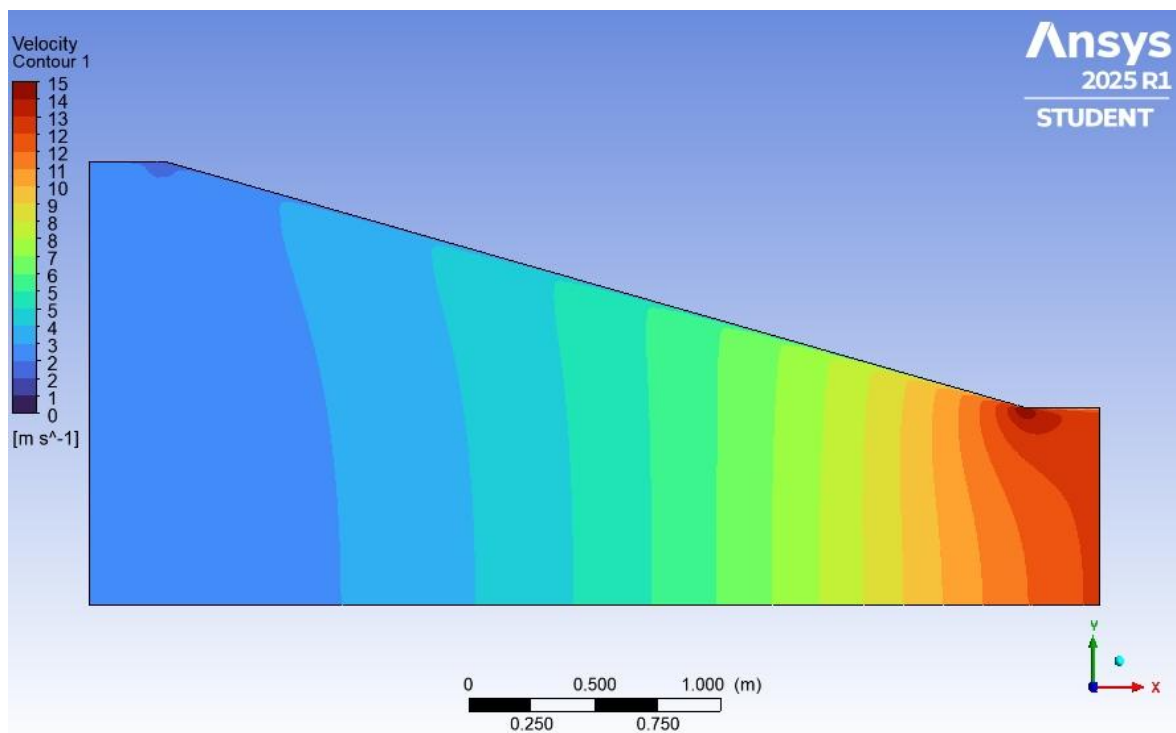
En la Figura 25 se muestra una comparación entre los mismos perfiles de velocidad.

### 3.2.5. Resultados para la Geometría C

En la Figura 26 se observa que la entrada horizontal genera un cambio en los contornos de velocidad, al hacer que los mismos se uniformicen desde la entrada.

**Figura 26**

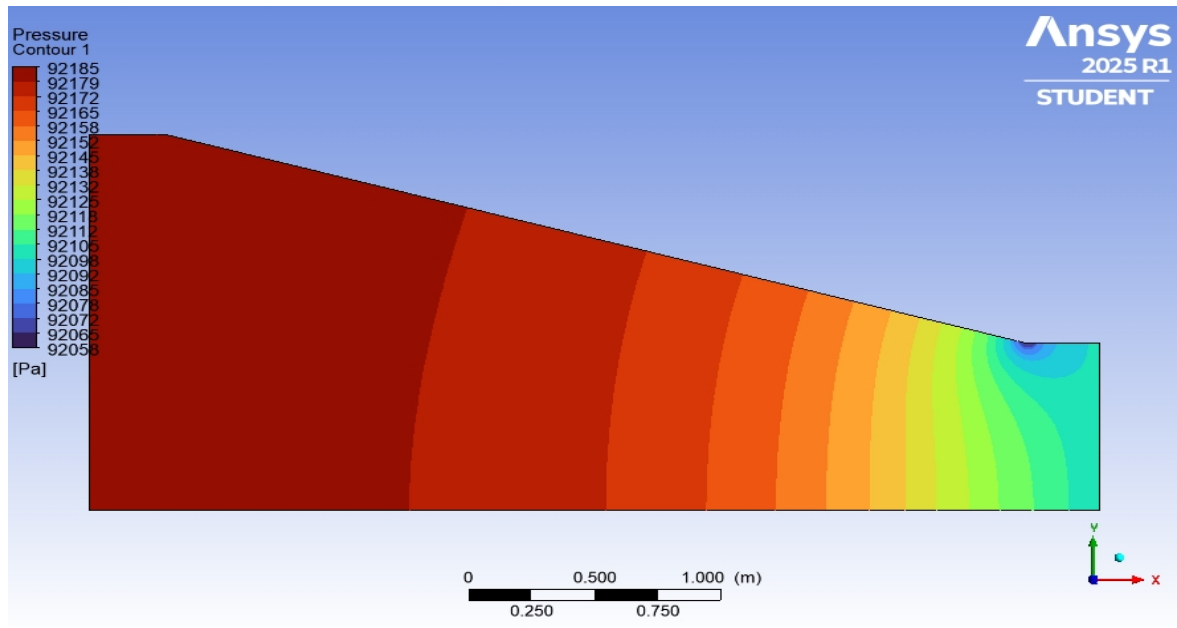
*Contornos de velocidad en el túnel concentrador (Geometría C).*



Fuente: Imagen extraída del software.

**Figura 27**

*Contornos de presión en el túnel concentrador (Geometría C).*

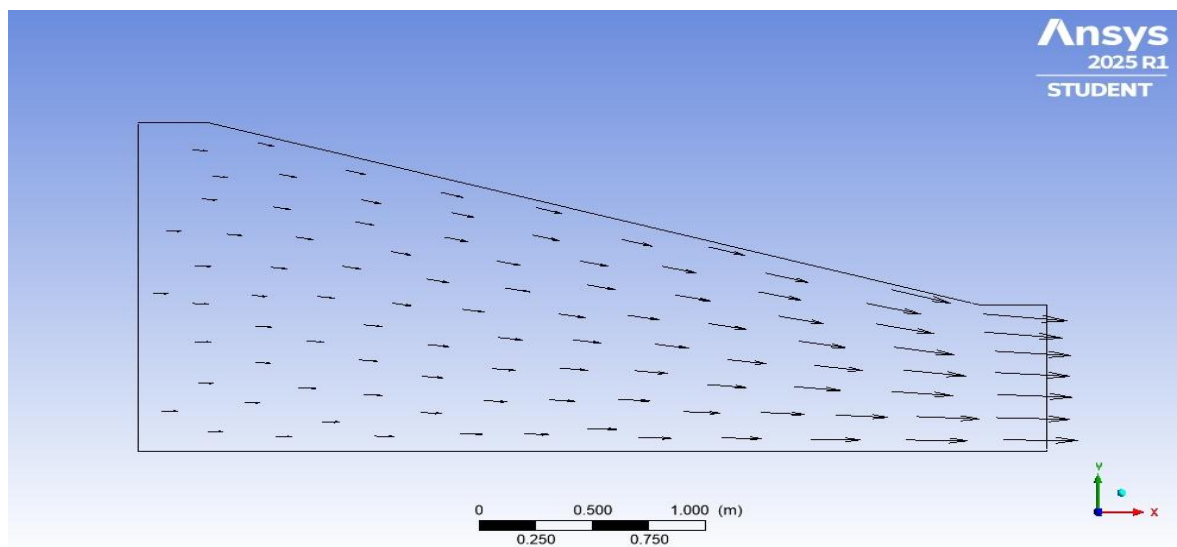


Fuente: Imagen extraída del software.

En la Figura 27, los contornos de presión muestran una caída de presión que es más uniforme, sobre todo desde la entrada del túnel, coincidente con el comportamiento de la velocidad en esta zona. En la Figura 28, los vectores de velocidad confirman una reorientación horizontal de la dirección del flujo, como se produjo también en la Geometría B.

**Figura 28**

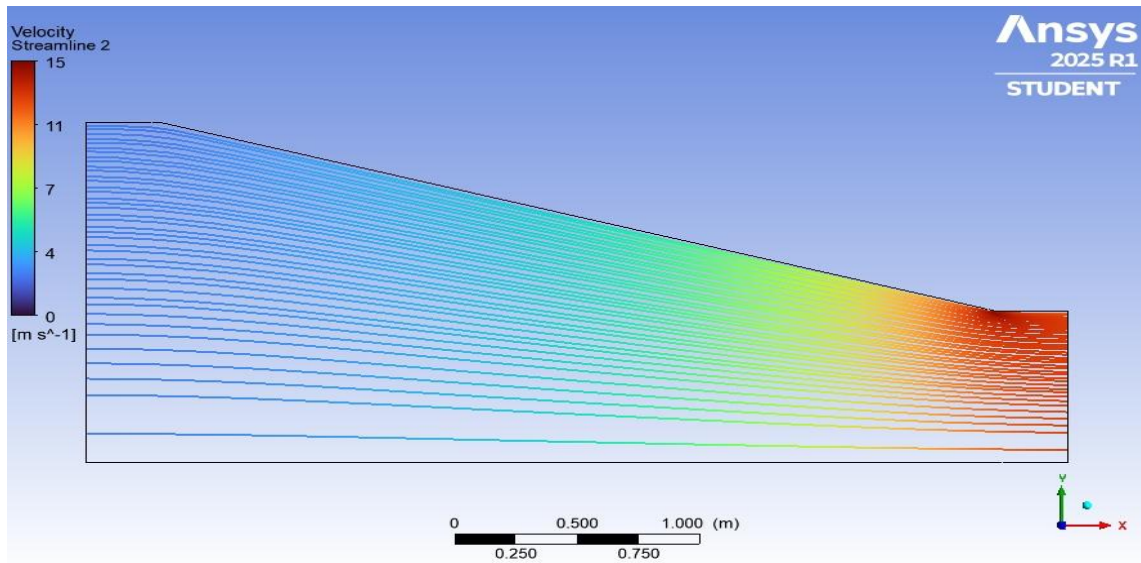
*Vectores de velocidad en el túnel concentrador (Geometría C).*



Fuente: Imagen extraída del software.

**Figura 29**

*Líneas de corriente en el túnel concentrador (Geometría C).*

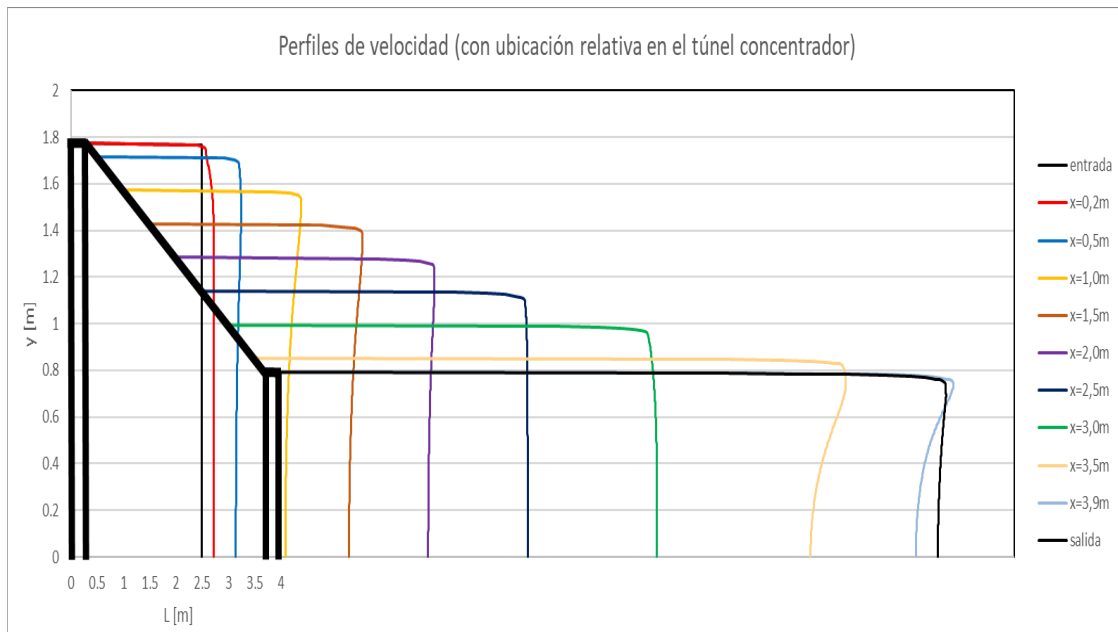


Fuente: Imagen extraída del software.

En la Figura 29, indican un flujo uniforme a lo largo del túnel que se acelera en la zona convergente.

**Figura 30**

*Perfiles de velocidad con ubicación relativa en el túnel concentrador (Geometría C).*



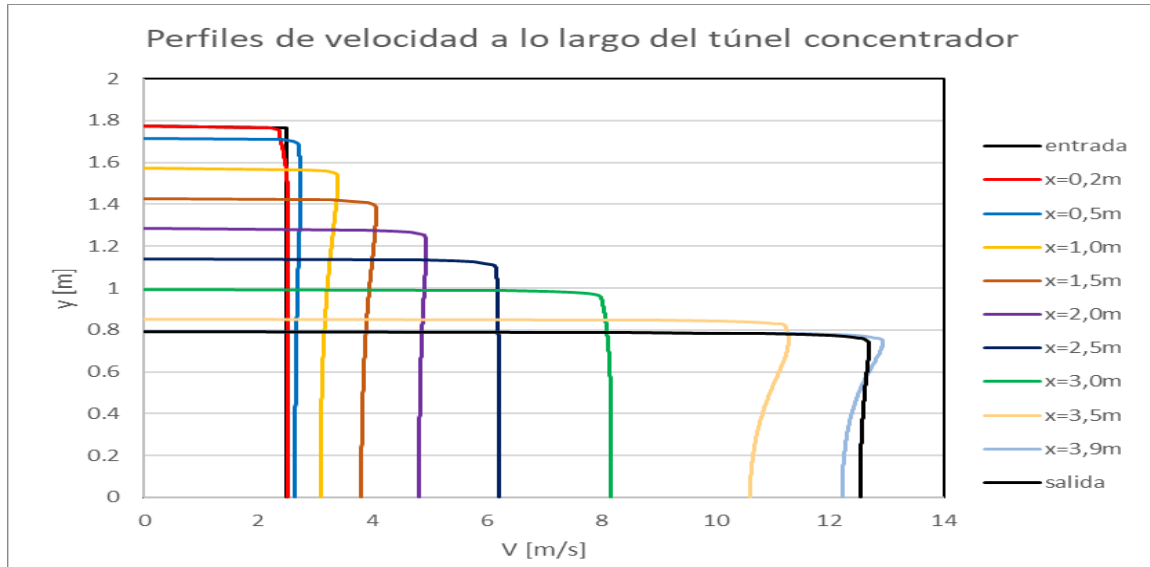
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30 se muestran los perfiles de velocidad en varias posiciones a lo largo de la longitud del túnel. Para esta geometría es importante resaltar la uniformidad

que alcanzan los perfiles de velocidad, a diferencia de las Geometrías A y B, que carecieron de entrada cilíndrica horizontal y donde se observaron aceleraciones de flujo en proximidades a la pared del túnel.

**Figura 31**

*Perfiles de velocidad en el túnel concentrador (Geometría C).*



Fuente: Elaboración propia.

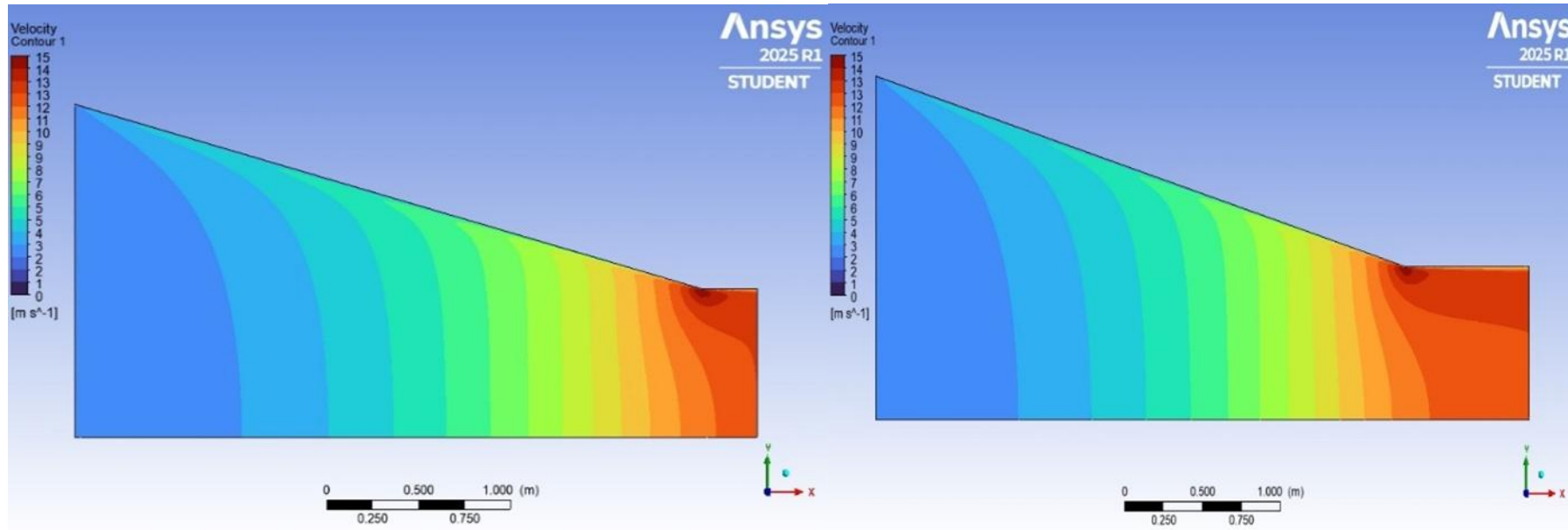
En la Figura 31, se muestra una comparación entre los mismos perfiles de velocidad.

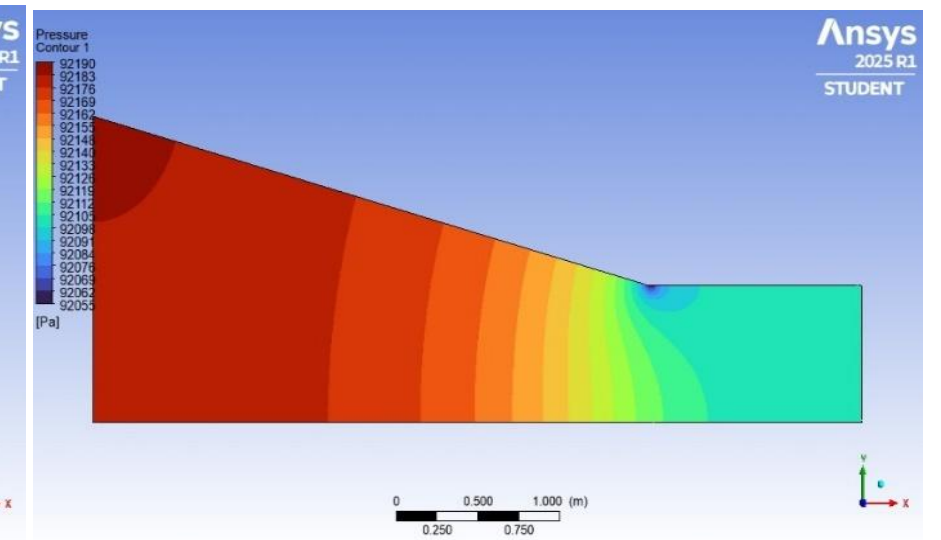
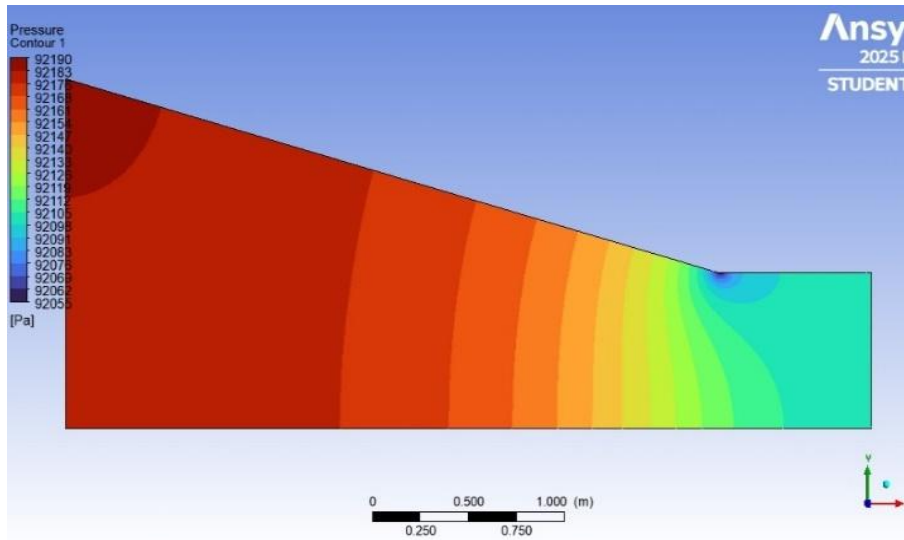
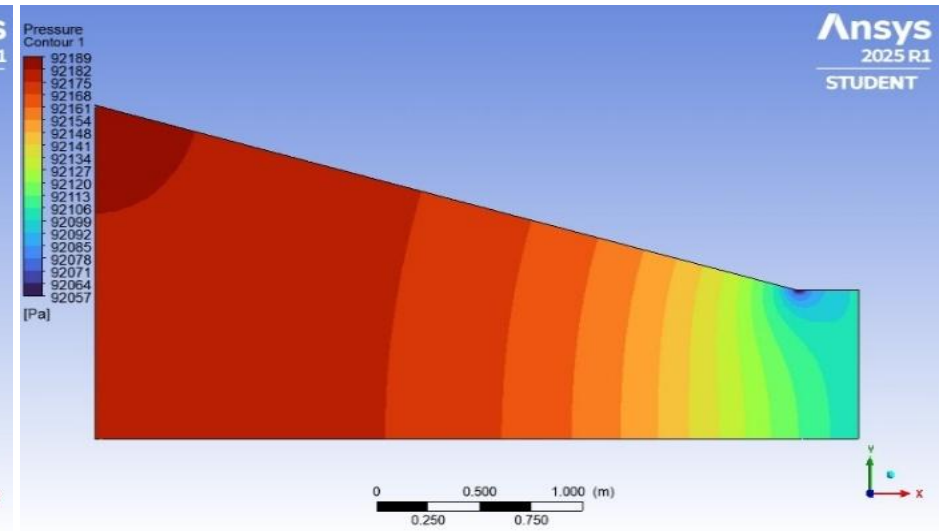
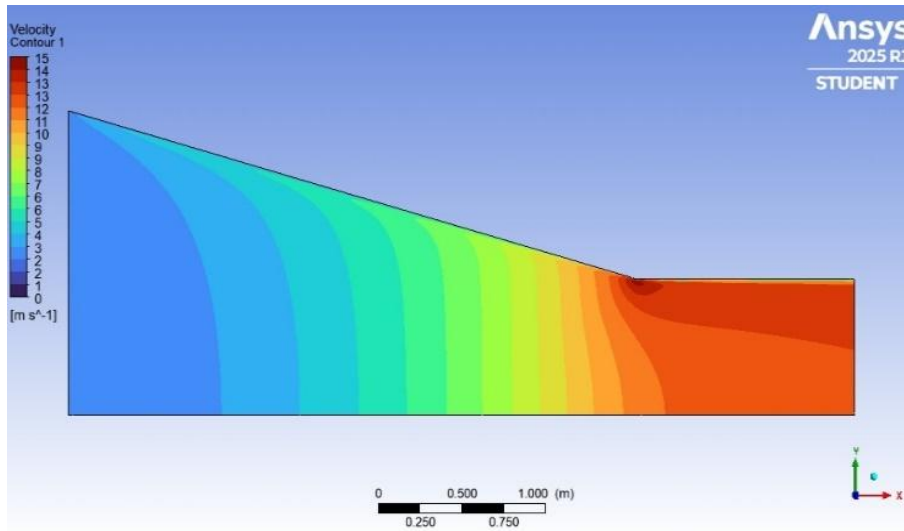
### 3.2.6. Resultados comparativos para las Geometrías B, B2 y B3

Los contornos de velocidad de la Figura 32 muestran un comportamiento similar en los tres casos, salvo en la zona cilíndrica de salida. En esta zona se observa que el flujo se va desarrollando similar a como ocurre en la región de entrada de los ductos de diámetro constante. De igual manera, los contornos de presión indican este comportamiento. Los vectores de velocidad presentados en la Figura 33, muestran con claridad como el flujo se reorienta horizontalmente gracias a la influencia de la región cilíndrica de salida. Esta característica se vuelve importante si para el funcionamiento del aerogenerador se requiere un flujo de aire totalmente horizontal. En cuanto a las líneas de corriente mostradas, las mismas revelan que no se produce desprendimiento de capa límite y que el flujo solo se acelera uniformemente conforme se reduce el área de la sección que atraviesa.

**Figura 32**

*Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante contornos de velocidad) de las Geometrías B, B2 y B3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para la presión en las mismas geometrías.*

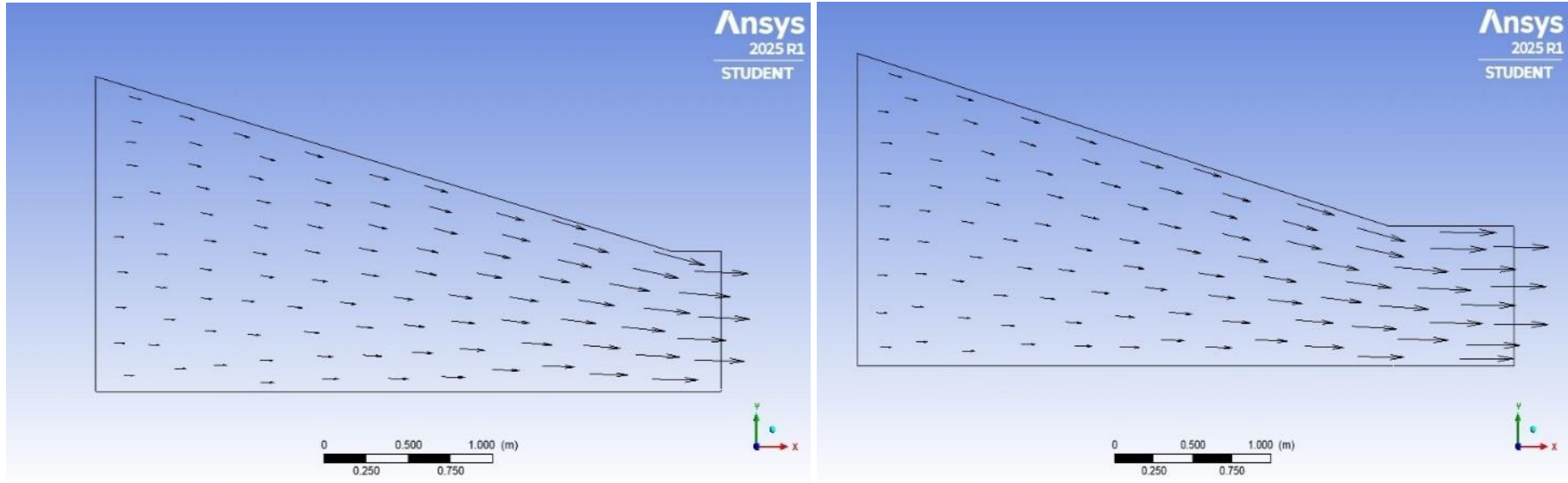


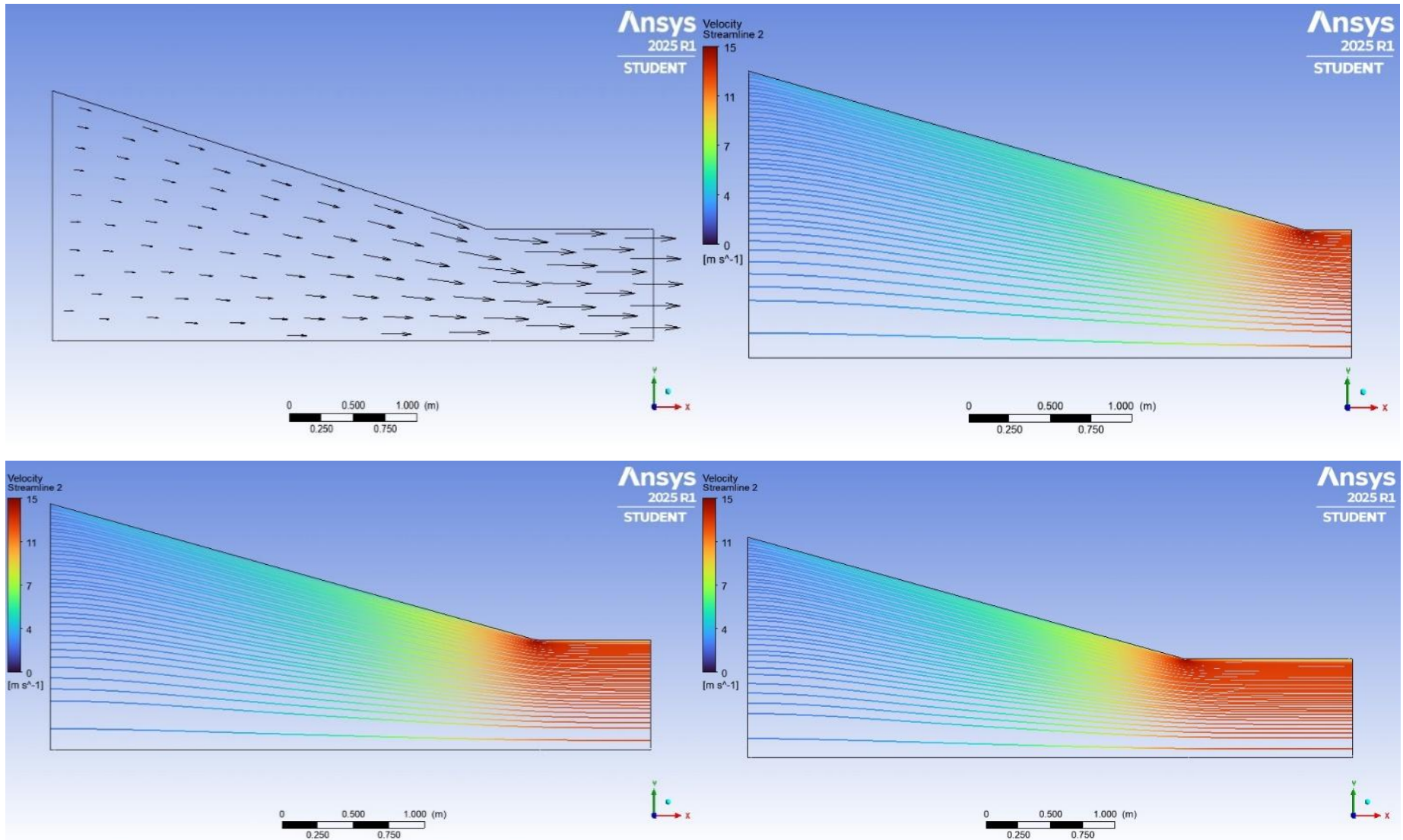


Fuente: Imágenes extraídas del software.

### Figura 33

Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante vectores de velocidad) de las Geometrías B, B2 y B3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para las líneas de corriente en las mismas geometrías.





Fuente: Imágenes extraídas del software.

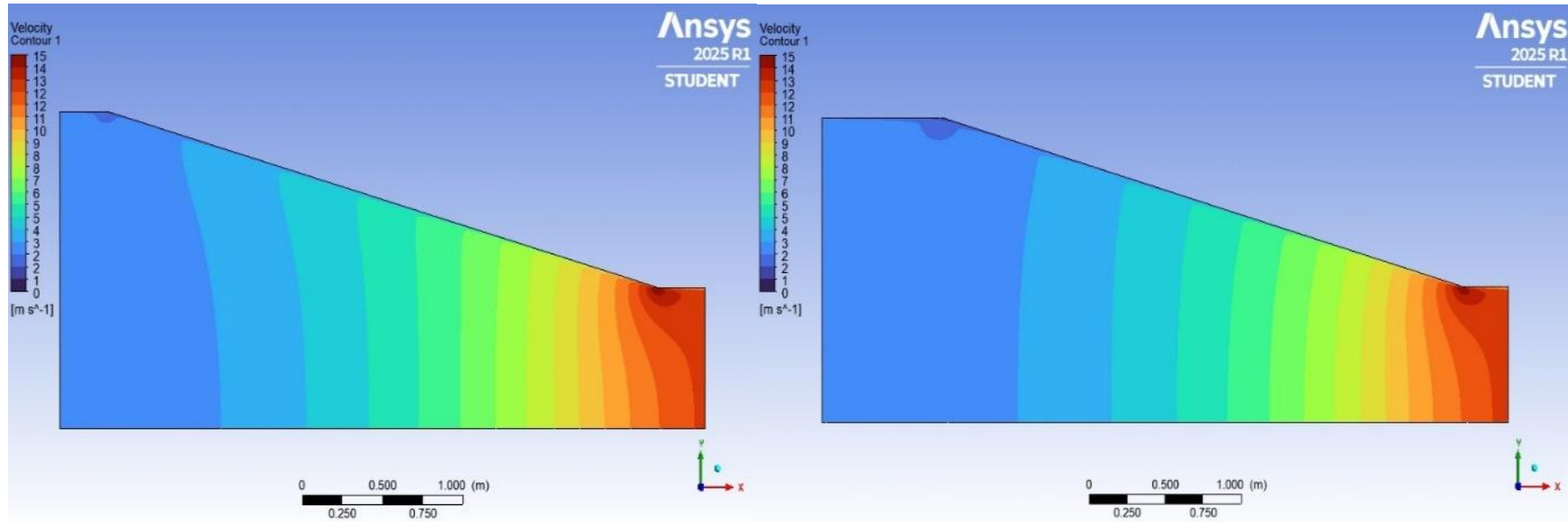
### **3.2.7. Resultados comparativos para las Geometrías C, C2 y C3**

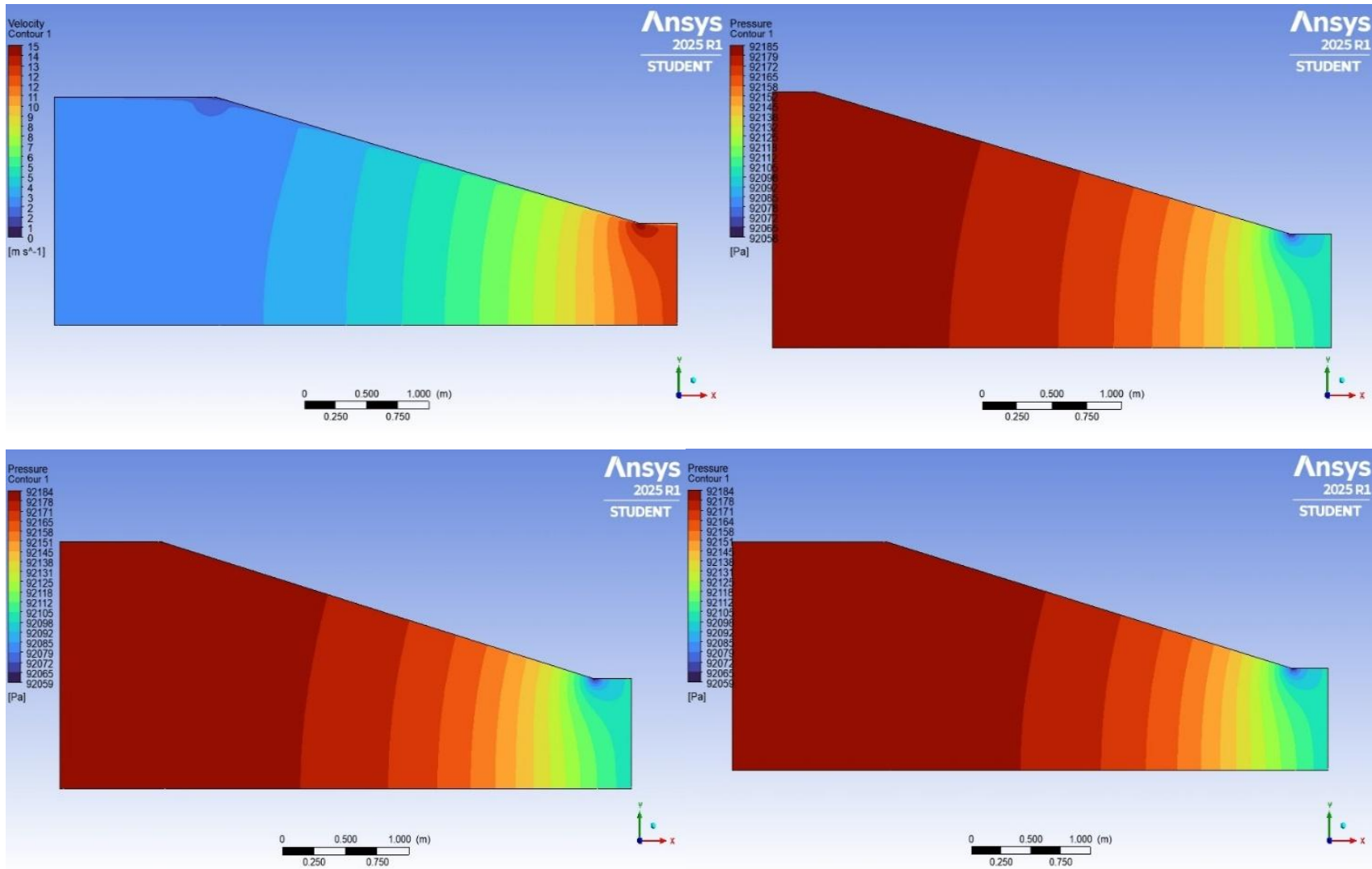
Los contornos de velocidad presentados en la Figura 34, muestran que la región cilíndrica de entrada, así como su longitud, si tienen un efecto sobre el flujo que atraviesa el túnel concentrador. Al parecer, a mayor longitud cilíndrica de entrada más uniforme es el flujo dentro del túnel. Este comportamiento va a alterar los perfiles de velocidad. En cuanto a la presión, los contornos de presión muestran una caída de presión que es más uniforme, sobre todo desde la entrada del túnel, coincidente con el comportamiento de la velocidad en esta zona.

En la Figura 35, los vectores de velocidad no muestran efectos significativos en la salida del túnel, si bien el flujo puede ser más uniforme dentro del mismo. En el análisis habrá que determinar si es necesario uniformizar el flujo dentro del túnel, a pesar de no conseguir algún efecto a la salida que pueda beneficiar al flujo que accionará al aerogenerador (como la total dirección horizontal del viento). Las líneas de corriente muestran un comportamiento uniforme, sin desprendimiento de flujo para los tres casos.

**Figura 34**

*Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante contornos de velocidad) de las Geometrías C, C2 y C3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para la presión en las mismas geometrías.*

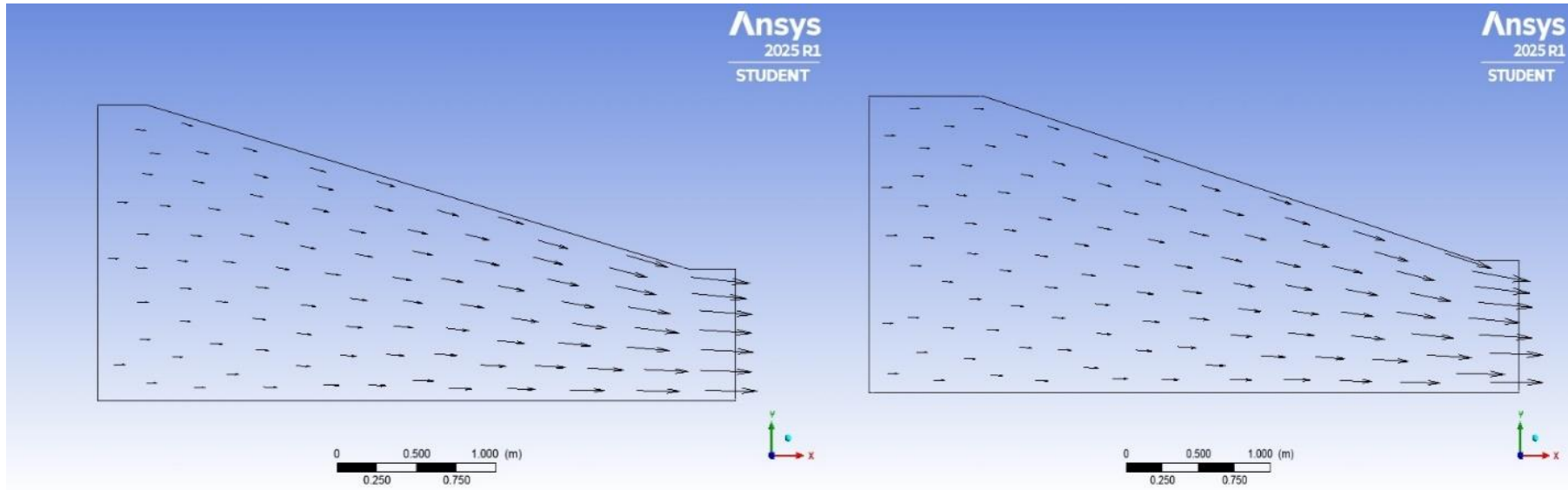


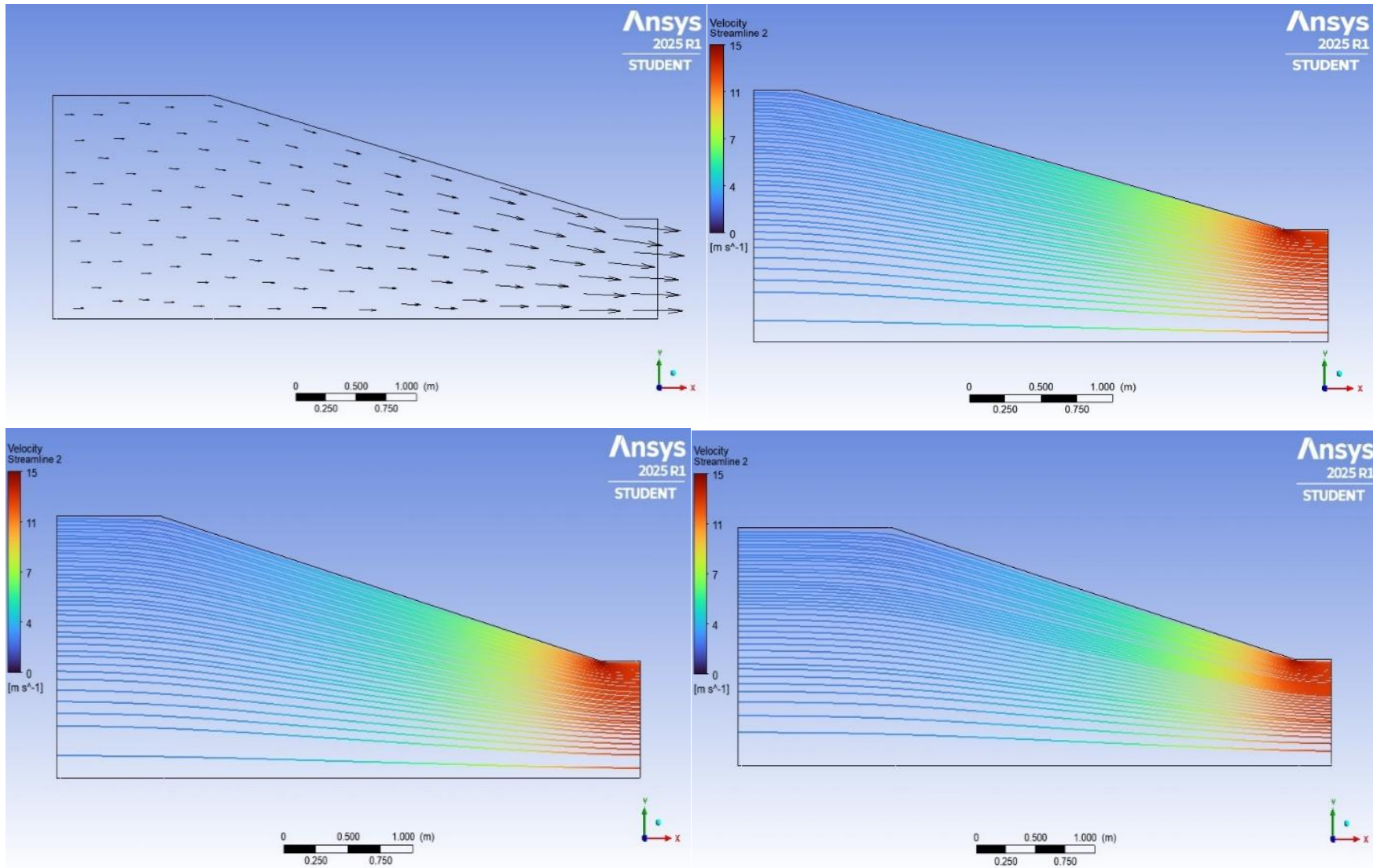


Fuente: Imágenes extraídas del software.

### Figura 35

Comparativo del comportamiento de la velocidad (mediante vectores de velocidad) de las Geometrías C, C2 y C3 consideradas como opciones para el túnel concentrador. El segundo grupo de imágenes muestra el comparativo para las líneas de corriente en las mismas geometrías.





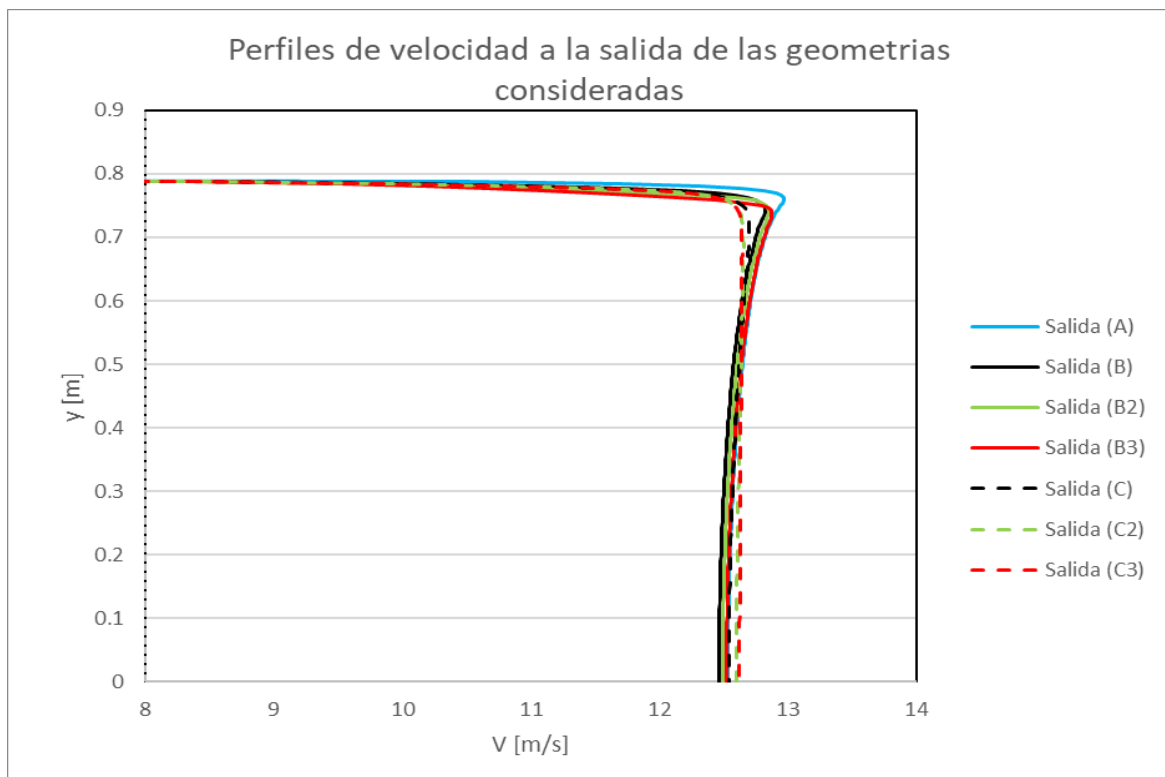
Fuente: Imágenes extraídas del software.

### 3.2.8. Comparación de resultados obtenidos para todas las geometrías.

En la Figura 36 se muestran los perfiles de velocidad a las salidas de las diferentes geometrías estudiadas. Se aprecia que todas son ligeramente distintas como resultado que cada modificación del túnel produce un efecto en el comportamiento del flujo. Como los perfiles son próximos y determinan una velocidad casi constante en toda la sección transversal de la salida, bien se podría asumir que la misma es constante (esto servirá para fijar una velocidad constante en una simulación 3D del aerogenerador). Si bien se podría elegir cualquier geometría, los vectores mostraron que la Geometría B, reorienta el flujo abandonando el túnel en una dirección horizontal más apropiada y con poca pérdida de presión. Se observa que las entradas horizontales mejoran la uniformidad del flujo al orientarlo horizontalmente, pero a cuenta de mayores caídas de presión al agregarle zona de ficción al dominio básico, por lo cual se preferirá evitar las longitudes excesivas. Podría agregarse que por cuestiones constructivas (de soporte y fijación), se debe mantener cierta entrada horizontal.

**Figura 36**

*Perfiles de velocidad a la salida de las geometrías evaluadas.*



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de las pérdidas de presión para cada geometría estudiada. Se observa que la Geometría A, a pesar de ser la de menor longitud tiene la mayor caída de presión lo cual muestra que los efectos más importantes provienen de las pérdidas secundarias (el cambio de sección en entrada y salida, así como la inclinación del túnel). La Geometría B muestra que suavizar la salida con una pequeña región cilíndrica disminuye la pérdida de presión a pesar de estar agregando longitud (pérdidas primarias). El incremento en las pérdidas de presión desde B hasta B3 es propio del incremento en la longitud de la región cilíndrica que diferencia estas geometrías. Por último, las Geometrías C, C2 y C3 adicionan una entrada cilíndrica que suaviza el comportamiento del flujo consiguiendo disminuir ligeramente las pérdidas de presión, con lo cual la mejor opción sería la Geometría C (caso 5).

**Tabla 9**

*Caída de presión en las geometrías evaluadas como opciones para el túnel concentrador.*

Caso	Geometría	Presión media [Pa]		$\Delta p$ [Pa] = $P_1 - P_2$
		Entrada ( $P_1$ )	Salida ( $P_2$ )	
1	A	92184,0	92100	84,0
2	B	92183,0	92100	83,0
3	B2	92183,4	92100	83,4
4	B3	92183,9	92100	83,9
5	C	92182,9	92100	82,9
6	C2	92182,9	92100	82,9
7	C3	92182,9	92100	82,9

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.9. Resumen de resultados para otros aerogeneradores

Habiendo determinado que la geometría más apropiada es la del tipo C, la misma sirvió como base para evaluar otros aerogeneradores. A continuación, se resumen los resultados encontrados.

**Tabla 10**

*Dimensiones de túneles concentradores para diversos aerogeneradores de baja potencia.*

Datos básicos del aerogenerador						Datos básicos del túnel concentrador					
Marca	Modelo	Diámetro del rotor [m]	Potencia nominal [W]	Velocidad de arranque [m/s]	Velocidad nominal [m/s]	Diámetro de entrada [m]	Diámetro de salida [m]	Longitud del túnel troncocónico [m]	Longitud de salida cilíndrica (igual para la entrada) [m]	Velocidad del aire a la entrada del túnel [m/s]	Velocidad del aire a la salida del túnel [m/s]
Zonhan	Aerogenerador 500W	2,500	500	2,50	8,00	4,481	2,500	3,697	0,30	2,49	8,00
GreenEnergy	400W/12V	1,700	400	2,50	12,00	3,732	1,700	3,792	0,31	2,49	12,00
PowerWind	RC600W - 12-24V	1,700	600	2,50	12,00	3,732	1,700	3,792	0,31	2,49	12,00
Aeolos	H 500w	2,700	500	2,50	12,00	5,927	2,700	6,022	0,49	2,49	12,00
Pikasola	400 W	1,300	400	2,50	13,00	2,970	1,300	3,117	0,26	2,49	13,00
Primus Wind Power	1-ARBM-15-24	1,170	200	2,68	12,50	2,621	1,170	2,708	0,22	2,49	12,50
Damia Solar	1000 12V - 1000W	1,670	1000	4,00	12,00	3,666	1,670	3,725	0,30	2,49	12,00
Techno Sun	FSH2000	1,584	1000	3,00	12,50	3,549	1,584	3,667	0,30	2,49	12,50

Observación: Datos obtenidos para un ángulo imaginario del vértice del túnel de 30°.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los materiales

Opción 1: Laminas de fibra de vidrio más resina epóxica (material liviano, resistente a la intemperie y fácil de moldear, pudiéndose colocar por capas sobre un molde).

Opción 2: Paneles de aluminio o acero galvanizado (material de alta resistencia estructural si tiene el espesor adecuado o se le combina con una estructura externa rígida y se puede colocar con remaches y refuerzos externos).

Opción 3: PVC o Polietileno de alta densidad HDPE (bajo costo, resistencia moderada, en este caso las secciones termoformadas tendrían que unirse entre sí).

Opción 4: Combinando los materiales previos a conveniencia (por ejemplo, la estructura principal en anillos y nervaduras metálicas más la cubierta en fibra de vidrio o PVC)

En cuanto al montaje

Opción A: Considerando el montaje fijo en la torre del aerogenerador. En este caso el túnel se acoplará directamente al aerogenerador, alineando su salida con el rotor. El túnel se puede fijar con abrazaderas metálicas o una estructura soldada al poste. Un sistema de rotación sobre eje vertical (sistema yaw) puede ser utilizado para permitir orientación (el túnel giraría con la veleta). Este sistema ofrecería la ventaja que todo el conjunto compacto se movería. La principal desventaja sería el peso en la parte superior requiriendo un reforzamiento de la torre.

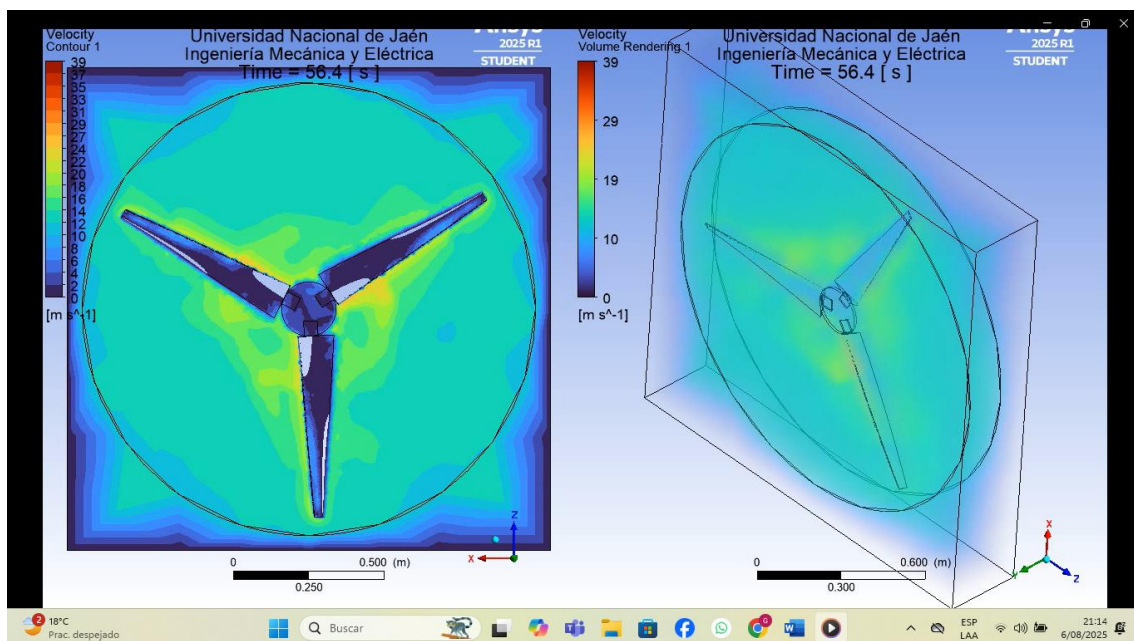
Opción B: Considerando una estructura independiente orientable. En este caso el túnel y aerogenerador se montarían en el mismo bastidor metálico fijo al suelo, alineado con la dirección del viento. Se utilizaría un sistema de bisagra más veleta para orientación automática. El aerogenerador se acoplaría al túnel mediante una estructura fija. Este sistema reduciría la carga sobre la torre del aerogenerador, en tanto que su desventaja sería el mayor espacio requerido. Se podría utilizar ruedas giratorias o pivote para orientación manual o veleta para orientación automática.

Como el túnel debe alinearse con el viento, en su parte superior podría ir una veleta y el bastidor de soporte debe tener un eje giratorio con rodamiento para giro suave. Asimismo, es necesario combinar pintura anticorrosiva para el metal y tener en cuenta un anclaje o fijación segura al suelo para evitar desajustes o vuelcos por vientos fuertes.

## Simulación 3D del aerogenerador a partir de los resultados obtenidos

En esta sección se ha realizado una simulación 3D a fin de ilustrar como operaría un aerogenerador sometido al flujo de salida del túnel. La simulación tiene fines ilustrativos y de marcar tendencias, más no de proporcionar valores que puedan indicar previsiones de potencia, torque o rpm debido a que solo se han utilizado los recursos computacionales disponibles (ver sección de materiales utilizados).

**Figura 37** Simulación 3D del funcionamiento de un aerogenerador con diámetro de rotor de 1,584 m, accionado con una velocidad de salida del túnel concentrador de 12,5 m/s.



Fuente: Imagen extraída del software

#### IV. DISCUSIÓN

En cuanto al análisis de un túnel concentrador de energía eólica no se han encontrado estudios anteriormente que hagan mención a su propuesta, análisis e incluso su ejecución; lo cual nos conlleva a realizar dichas investigaciones a partir de los recursos que se obtienen mediante un procedimiento de etapas con respecto a cálculos numéricos, herramientas computacionales para realizar simulaciones y modelamientos precisos que guiaron el diseño del túnel concentrador propuesto.

En relación con los rangos mínimos de velocidad del viento, se evaluaron cuatro zonas: El Arenal, El Huito, Chillique y San Isidro, además de mediciones realizadas en viviendas de tres pisos ( $\approx 10$  m de altura). Los resultados evidenciaron velocidades variables entre 1,0 y 3,5 m/s, lo que refleja la heterogeneidad del recurso eólico en los diferentes sectores estudiados. Particularmente, en la zona de El Huito se registraron velocidades superiores al umbral mínimo de 2,49 m/s, condición que resulta favorable para el aprovechamiento del recurso en la generación eléctrica mediante aerogeneradores de pequeña escala, mientras que en los otros sectores las velocidades más bajas representan una limitación técnica que debe considerarse al momento de evaluar la viabilidad de proyectos eólicos. En el estudio realizado por la NASA encontró una velocidad del viento mínima de 2,49 m/s (NASA, 2024). Por su parte Querebalú Santisteban (2020) en su estudio encontró que la velocidad del viento media fue de 4,5 m/s a una altura de 3 metros. Mientras que a 18 metros del suelo 4 m/s. Asimismo, Arciniegas Arenas et al. (2018) en su estudio encontró que las velocidades promedio del viento no alcanzan a contar con la magnitud mínima (3 a 4 m/s) de arranque de los aerogeneradores comerciales, lo cual hace que este recurso no sea aprovechado. Sin embargo, Ramos Domínguez (2018) en su estudio determinó que la velocidad del viento promedio en la ciudad de Baja California en México fue de 1,4 m/s.

Las investigaciones analizan el potencial de la energía eólica y su conversión en electricidad mediante el uso de minicentrales eólicas, mini aerogeneradores y bajas velocidades de viento (alrededor de 4 m/s). El estudio propuesto busca abrir un nuevo campo de investigación relacionado con concentradores de energía eólica, un tema poco explorado hasta ahora. En cuanto al diseño del túnel concentrador, se consideraron diferentes configuraciones geométricas con un diámetro de entrada de 3,579 m, salida de 1,548 m, y una longitud de 3,667 m con un ángulo de inclinación de  $30^\circ$ . El objetivo de

estas configuraciones es optimizar la aceleración del viento hacia el aerogenerador, equilibrando la aceleración del flujo, la simplicidad de construcción y la eficiencia energética. Se observó que la geometría sin zona cilíndrica en la salida del túnel interfiere con el flujo horizontal, mientras que las geometrías B, B2 y B3, así como todas las C, mejoran el rendimiento. Se destacó que al aumentar la longitud de la región cilíndrica de salida no se generan mejoras significativas en la dirección del flujo, pero sí aumenta la pérdida de presión, por lo que la opción más adecuada es la Geometría B. Las geometrías C, C2 y C3 mostraron un flujo más uniforme y sin cambios significativos entre ellas, lo que llevó a elegir la Geometría C como la más eficiente. Finalmente, se propone usar la Geometría C como referencia para el diseño de túneles concentradores para aerogeneradores pequeños de tres aspas y potencia similar.

Existen estudios donde lograron una variación máxima de velocidad del 23,3% en un ángulo de 4,5 grados para el difusor, mientras que se logró una variación máxima de potencia del 65,1% en un ángulo de 3,6 grados para el mismo difusor. La mencionada mejora se logró optimizando únicamente el ángulo de divergencia. Los diseños propuestos del aerogenerador con difusor y concentrador, así como las ecuaciones empíricas para calcular la variación de velocidad y potencia en función de los ángulos de divergencia y convergencia, constituyen las principales contribuciones (Mohan et al., 2021).

En relación al tipo de aerogenerador considerando en estudio fue el FSH 2000 que mantiene características geométricas y de diseño optimizadas para aplicaciones aisladas y de pequeña escala. Además, ofrece un balance óptimo entre rendimiento, facilidad de implementación y robustez operacional, haciéndolo idóneo para sistemas autónomos y complementos a instalaciones solares, particularmente en contextos rurales o remotos. El flujo debe ser lo más horizontal posible y debe existir pérdidas de presión lo más bajas posibles para no frenar el flujo de aire a través del túnel para garantizar que efectivamente se pueda alcanzar la velocidad de 12,5 m/s, a partir de la velocidad de aire disponible, en este caso una velocidad de 2,49 m/s. La elección de aerogeneradores de eje horizontal se fundamenta en que este tipo de dispositivos ha demostrado mayor eficiencia y confiabilidad en la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica, gracias a su diseño aerodinámico optimizado y a la capacidad de aprovechar de manera más efectiva los vientos predominantes. Su tecnología, ampliamente validada a nivel mundial, permite obtener mayores potencias de generación en comparación con los

aerogeneradores de eje vertical, además de ofrecer un mejor rendimiento en condiciones de vientos constantes y moderados, que son los más frecuentes en gran parte de los emplazamientos. Asimismo, los aerogeneradores horizontales cuentan con un nivel de estandarización tecnológica que facilita su mantenimiento, escalabilidad y adaptación a proyectos tanto de pequeña como de gran envergadura, lo que los convierte en la opción más adecuada y rentable para garantizar un mayor aprovechamiento del recurso eólico en términos de producción energética sostenible (Al-Rawajfeh & Gomaa, 2023).

Actualmente, existen diversos tipos de generadores eólicos, tanto de eje horizontal como vertical, que varían en estructura, potencia y costo. Este estudio se enfoca en los aerogeneradores horizontales pequeños (1-10 kW), adecuados para aplicaciones residenciales, casas rurales y pequeñas instalaciones. Estos generadores comienzan a producir energía con velocidades de viento de entre 2,5 y 4 m/s, aunque su velocidad nominal para una generación eficiente se encuentra entre 10 y 12 m/s. Usualmente, incorporan generadores de imanes permanentes y sistemas de almacenamiento con baterías. En un estudio de Querebalú Santisteban (2020), se describió un aerogenerador con tres aspas, torre de 18 m de altura y un diámetro de 15 m para las aspas, con velocidades de viento de inicio a 4 m/s y nominal de 16 m/s, alcanzando una velocidad máxima de 25 m/s. Por su parte, Cárdenas Meza (2023) determinó que el aerogenerador AEOLOS-H300, al instalarse, podría cubrir hasta el 14% del consumo energético mensual de un hogar promedio, dependiendo de la velocidad del viento en la zona de instalación. Sin embargo, Ramos Domínguez (2018) destacó que, en condiciones de baja velocidad de viento y vientos variables, los aerogeneradores tipo Savonius son la opción más viable, ya que inician su funcionamiento a menores velocidades y aceptan vientos de cualquier dirección.

Simular el túnel concentrador de energía eólica, mediante herramientas computacionales, Se demostró que a medida que aumenta el número de elementos, la solución numérica (línea azul) converge hacia un valor estable cercano a 12,65 m/s, que está indicado como referencia con la línea roja discontinua. A partir de aproximadamente 15000 elementos, la variación de la velocidad es mínima, indicando que la solución ha alcanzado independencia de la malla. Los resultados muestran una independencia del parámetro seleccionado en relación del tamaño de malla a partir de 120x120 (14 400 elementos). Los estudios realizados se han llevado a cabo con la intención de elegir la mejor geometría para un túnel troncocónico que consiga aumentar la velocidad del aire.

Esto ante la problemática que ocurre en muchas localidades (y en especial de nuestra ciudad), donde el recurso eólico es insuficiente para accionar el funcionamiento nominal de un pequeño aerogenerador comercial o incluso para dar inicio a su arranque. A priori, las características buscadas tienen que ver con alcanzar una velocidad uniforme de 12,5 m/s, que es la velocidad de accionamiento del aerogenerador para que desarrolle su potencia nominal.

Existen estudios que encontraron una velocidad máxima de viento de 38,5 m/s para un periodo de retorno de 50 años y una intensidad de turbulencia de 0,18 (Apcarian, 2019). Además, a una altura de 7 m, la velocidad del viento alcanzaba 4 m/s, y al elevar la altura del mástil a 15 m, subía a 6,74 m/s (Cárdenas Meza, 2023). En otro estudio se encontró a 18 m de altura la velocidad máxima era de 7,02 m/s (Querebalú Santisteban, 2020). Por otro lado, mostraron que el concentrador incrementaba el potencial eólico disponible en un 2,37 veces, lo que requeriría mayores velocidades para activar los aerogeneradores. No obstante, el concentrador permitiría poner en marcha los aerogeneradores incluso a velocidades de viento más bajas (4 m/s), lo que aumentaría los tiempos de funcionamiento (Arciniegas Arenas et al., 2018).

En lo que respecta a los estudios se centró más en el perfil aerodinámico de las hélices de la turbina de viento y consiguieron aumentar la velocidad del viento en 1,4 veces; lo cual es una buena referencia para intentar valores superiores. Los demás estudios apuntaron a la transformación de energía eólica en energía eléctrica, algunos investigando el potencial de aprovechamiento eólico con velocidades disponibles de hasta 10,52 m/s. La pluralidad de estos trabajos contribuye a nuestro conocimiento global de la energía eólica, los medios para su transformación, la optimización del cálculo mediante software y finalmente la construcción de aparatos que tienen que ver con el tema que se pretende desarrollar.

## V. CONCLUSIONES

1. Se determinó los rangos mínimos de la velocidad del viento que oscilan entre 1,0 y 3,5 m/s en las zonas de El Arenal, El Huito, Chillique, San Isidro y en edificaciones de tres pisos ( $\approx 10$  m). De estas zonas, El Huito destacó al presentar velocidades por encima del umbral mínimo de 2,49 m/s, condición que lo convierte en el lugar más apropiado para la implementación de un sistema eólico, ya que cumple con los requisitos de arranque de aerogeneradores de baja potencia.
2. Se determinó que las dimensiones del túnel del túnel concentrador, con longitud de 3,67 m y altura de entrada de 3,55 m reducida a una garganta de 1,58 m, incorporando variaciones en canales laterales de 0,30 m, 0,80 m y 1,30 m. Dichos dimensionamientos ayudaron a optimizar la aceleración del flujo, asegurando un incremento de la velocidad del viento que permita un mejor acoplamiento con el rotor del aerogenerador.
3. Se seleccionó el tipo de aerogenerador de eje horizontal de baja potencia, como el FSH 2000, que cuenta con un diámetro de rotor de 1,776 m, potencia máxima de 2 kW a 20 m/s, arranque desde 3 m/s y un peso total de 18 kg. Estas características lo hacen apropiado para trabajar con los flujos acelerados por el túnel concentrador y en contextos de velocidades de viento moderadas como las registradas en Jaén.
4. Se realizó la validación del cálculo analítico del túnel concentrador de energía eólica mediante simulación numérica utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD), a través de la versión estudiantil libre del paquete de software Ansys 2025 R1 (Ansys Fluent). La simulación del túnel concentrador de energía eólica, donde la malla de solución numérica converge de manera estable a partir de 15 000 elementos, alcanzando velocidades de salida de aproximadamente 12,65 m/s, en comparación con condiciones de entrada más bajas. El estudio investigó 07 geometrías diferentes mostrando que la opción adecuada es la C, la cual direcciona horizontalmente el flujo de salida del túnel concentrador gracias a la corta salida cilíndrica (lo cual es adecuado para accionar el rotor del aerogenerador eficientemente), permite un flujo uniforme dentro del túnel (gracias a la corta entrada cilíndrica), y en ambos casos los efectos favorables conseguidos son con las menores pérdidas de presión en comparación con los demás casos investigados.

5. El túnel concentrador de energía incrementa significativamente la velocidad del viento entre la entrada y la salida, lo que se traduce en un mayor potencial de generación eléctrica al aumentar la energía cinética disponible para el aerogenerador.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Si bien el presente estudio es prometedor, dado los resultados teóricos obtenidos, el mismo debe tomar en cuenta las dificultades propias del aspecto práctico. Se recomienda construir el túnel concentrador y hacer los estudios correspondientes para ver que dificultades no previstas podrían aparecer y al mismo tiempo evaluar posibles soluciones. El estudio también se podría realizar a escala, por similitud y modelado, si se contase con los medios e instrumentos adecuados para tal fin.
2. Si el conjunto fuera a construirse e instalarse, un factor importante a tener en cuenta será el hecho que en la zona de instalación el viento en ocasiones pueda cambiar de dirección frecuentemente, lo cual podría afectar la orientación y el desempeño del conjunto. No está demás indicar el tema de costos constructivos, además de los costos de mantenimiento, costo por energía adicional generada, entre otros, por lo cual estos factores serán los que se deberán tener en cuenta en próximos estudios.
3. El estudio demostró ser viable desde el punto de vista teórico, sin embargo, hay efectos que, a pesar de haber sido tomados en cuenta, no representan un modelamiento exacto sino aproximado como el modelo axisimétrico 2D empleado. Dicha aproximación puede estar omitiendo efectos de las turbulencias internas, las pérdidas por fricción, así como efectos de las condiciones de entrada y salida. Se recomienda que en próximas investigaciones se tengan en cuenta estos factores.
4. Si bien en el presente trabajo se fijó el ángulo del cono en  $30^\circ$  con la finalidad de no generar longitudes demasiado grandes para el túnel, un estudio podría considerar los efectos de este ángulo sobre las características deseadas del túnel. Esto puede determinar qué relaciones geométricas serían las más adecuadas tanto para el desempeño del conjunto, así como por el tema de costos (qué configuraciones serían las más económicas de construir).
5. Si bien se investigó geometrías con salidas y entradas cilíndricas, debería estudiarse los efectos de salidas y entradas divergentes respecto a la dirección de la región troncocónica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

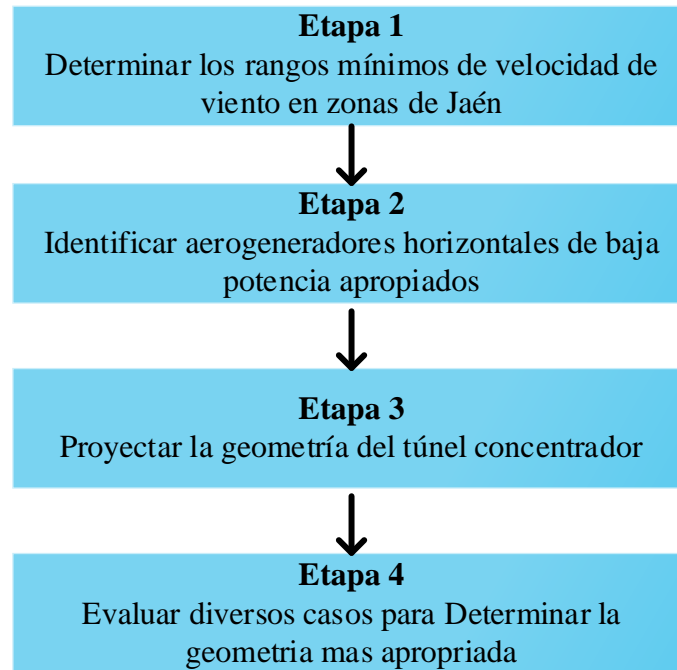
- Al-Rawajfeh, M. A., & Gomaa, M. R. (2023). Comparison between horizontal and vertical axis wind turbine. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, 12(1), 13. <https://doi.org/10.11591/ijape.v12.i1.pp13-23>
- Ansys Student - Free Software Download. (2025). *Licencia incorporada válida hasta el 31/07/2026*. <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>
- Apcarian, A. (2019). Patrones de vórtice a sotavento de una torre de aerogenerador multi-mw, en condiciones de viento extremo. *Universidad Nacional de La Plata*, 1–138.
- Arciniegas Arenas, E., Flórez S., E. G., & Serrano, J. C. (2018). Diseño y simulación de un concentrador de flujo para aumentar la potencia eólica disponible en un aerogenerador de baja potencia. *Ciencia En Desarrollo*, 9(2), 127–135. <https://doi.org/10.19053/01217488.v9.n2.2018.8754>
- Bernal Torres, C. A. (2010). *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (Tercera Edición). Pearson Educación de Colombia Ltda.
- British Petroleum. (2024). *Statistical Review of World Energy*. Energy Outlook. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html>
- Cárdenas Meza, J. (2023). *Evaluación de mini - aerogeneradores para el suministro de energía en zonas urbanas* [Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9404>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (McGraw-Hill Education, Ed.; 4th ed.).
- Dirección General de Electricidad. (2016). *Atlas Eólico del Perú*.
- Gerrit Früh, W. (2023). Assessing the Performance of Small Wind Energy Systems Using Regional Weather Data. *Energies*, 16(8), 3500. <https://doi.org/10.3390/en16083500>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Global Wind Report. (2024, April 17). *Key Highlights of Global Wind Report*. Key Highlights. <https://pwnlyias.com/current-affairs/global-wind-report-2024/>
- Gordillo Valdez, A., Montoya Granda, M., & Salinas Pedemonte, P. A. (2022). Análisis del desarrollo y potencial de la energía eólica en el Perú. *Ingeniería Industrial*, 43, 177–198. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n43.6114>

- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (S. A. de C. V. . McGraw-Hill / Interamericana Editores, Ed.; Sexta edición).
- Mendoza Uribe, I. (2018). Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, 22(3).
- Mohanani, J. N., Sundaramoorthy, K., & Sankaran, A. (2021). Mejora del rendimiento de una turbina eólica de baja potencia mediante secciones cónicas. *Revistas Energías*, 14(17), 5233. <https://doi.org/10.3390/es14175233>
- NASA. (2024, December). *Prediction of Worldwide energy resources*. NASA Power. NASA. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Querebalú Santisteban, F. M. (2020). *Dimensionamiento de una mini central eólica para abastecer de energía eléctrica el molino de yeso Fernando Tuñoque del distrito de Morrope* [Tesis, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/8197>
- Ramos Domínguez, M. (2018). *Diseño de un microaerogenerador de eje vertical* [Tesis (Master), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada]. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2079>
- Shonhiwa, C., Makaka, G., Mukumba, P., & Shambira, N. (2023). Determination of Optimal Geometry for an Empty Concentrator Augmented Wind Turbine. *Physical Science International Journal*, 27(6), 75–90. <https://doi.org/10.9734/psij/2023/v27i6815>
- Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources* (3rd Edition). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315766416>
- Vásquez, A., Tamayo, J., & Julio Salvador. (2017, March 1). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*. Organismo Supervisor de La Inversión En Energía y Minería. <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/informes-publicaciones/1201251-la-industria-de-la-energia-renovable-en-el-peru-10-anos-de-contribuciones-a-la-mitigacion-del-cambio-climatico>
- Vizcaíno Zúñiga, P. I., Cedeño Cedeño, R. J., & Maldonado Palacios, I. A. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 9723–9762. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i4.7658](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658)
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (McGraw-Hill, Ed.; 7ma ed.).

Zorrilla, M., & Torres, J. (2009). *Metodología de la investigación tecnológica*  
(Alfaomega Grupo Editor, Ed.).

## ANEXOS

### Anexo 1. Diagrama de proceso de la investigación



## Anexo 2. Ficha técnica aerogenerador

Detalle	Características
Número de palas	3
Material de palas	Fibra de vidrio con resinas y núcleo de poliuretano
Generador	250 rpm nominales / imágenes de neodimio
Potencia	5500 W
Potencial de nominal	4000 W (según IEC 61400-2)
Tensión	24/48/220V
Clase de viento	CLASS I-IEC 61400-2/NVNI-A
Diámetro de entrada	3,549 m
Diámetro de salida	1,584 m
Longitud del túnel	3,667 m
Sentido de giro	Horario
Área de barrido	14,5 m <sup>2</sup>
Peso	165 kg
Aplicaciones	Carga de baterías 24 8 48 V y conexión a red
Viento de arranque	2,49 m/s
Vel. regulación peso variable	12,5 m/s
Velocidad de supervivencia	60 m/s
Rango de generación eficiente	De 2 a 60 m/s
Tipo	Rotor de eje horizontal
Orientación	Sistema pasivo con timón de orientación
Control de potencia	Sistema de peso variable pasivo centrifugo con dos velocidades
Transmisión	Directa
Freno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electromagnético por cortocircuito</li> <li>- Mecánico (opcional)</li> <li>- Aerodinámico mediante paso variable</li> <li>- Manual o automático por viento o por tensión de baterías</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

### Anexo 3. Mediciones de la velocidad del viento.

Turno	Horario	Sector Chililique (Casa de 3 pisos) m/s	Fecha	Sector Huito (Casa de 3 pisos) m/s	Fecha	Sector Arenal (Casa de 3 pisos) m/s	Fecha	Sector San Isidro (Casa de 3 pisos) m/s	Fecha
Mañana	06:00 a.m.	1.26	19/07/2025	3.19	26/07/2025	1.35	2/08/2025	1.86	9/08/2025
		1.21	20/07/2025	2.75	27/07/2025	1.39	3/08/2025	1.16	10/08/2025
		1.02	21/07/2025	3.25	28/07/2025	1.71	4/08/2025	1.51	11/08/2025
		1.82	22/07/2025	3.7	29/07/2025	1.29	5/08/2025	1.79	12/08/2025
		1.17	23/07/2025	2.64	30/07/2025	2.07	6/08/2025	1.48	13/08/2025
		1.42	24/07/2025	3.12	31/07/2025	1.53	7/08/2025	1.19	14/08/2025
		1.18	25/07/2025	3.08	1/08/2025	1.84	8/08/2025	1.6	15/08/2025
Tarde	13:00 p.m.	2.47	19/07/2025	2.5	26/07/2025	2.12	2/08/2025	2.47	9/08/2025
		2.21	20/07/2025	2.49	27/07/2025	2.27	3/08/2025	2.38	10/08/2025
		2.72	21/07/2025	2.82	28/07/2025	2.05	4/08/2025	2.26	11/08/2025
		2.65	22/07/2025	3.09	29/07/2025	2.42	5/08/2025	2.47	12/08/2025
		2.08	23/07/2025	2.57	30/07/2025	2.32	6/08/2025	2.36	13/08/2025
		2.44	24/07/2025	2.73	31/07/2025	2.11	7/08/2025	2.26	14/08/2025
		2.32	25/07/2025	2.76	1/08/2025	2.1	8/08/2025	2.34	15/08/2025
Noche	19:00 p.m.	3.3	19/07/2025	3.03	26/07/2025	3.37	2/08/2025	3.02	9/08/2025
		2.97	20/07/2025	2.92	27/07/2025	3.26	3/08/2025	3.4	10/08/2025
		3.41	21/07/2025	3.14	28/07/2025	3.36	4/08/2025	3.32	11/08/2025
		1.98	22/07/2025	3.29	29/07/2025	3.22	5/08/2025	3.22	12/08/2025
		2.4	23/07/2025	2.62	30/07/2025	3.17	6/08/2025	3.42	13/08/2025
		3.55	24/07/2025	3.07	31/07/2025	3.15	7/08/2025	3.22	14/08/2025
		3.08	25/07/2025	3.5	1/08/2025	3.16	8/08/2025	3.16	15/08/2025
<b>Promedio</b>		<b>2.22</b>		<b>2.96</b>		<b>2.35</b>		<b>2.38</b>	

En la tabla se observa que el mínimo valor de la velocidad del viento en el sector el Huito es de 2.49 m/s y en promedio de 2,96 m/s. Mientras que el sector Chililique la menor velocidad es de 1,02 m/s, con promedio de 2,22. Asimismo, en el sector el Arenal el mínimo valor de la velocidad del viento es 1,29 m/s, con un promedio de 2,35 m/s y finalmente en sector San Isidro es de 1,16 m/s y un promedio de 2,38 m/s. Para el estudio se consideró el sector el Huito por presentar una mejor velocidad del viento.

#### Anexo 4. Panel fotográfico

Con el anemómetro se tomó mediciones en distintos horarios y días en la zona de jaén.



Foto 1. Hora: 12:00 AM. Velocidad: 3.78 m/s



Foto 2. Hora: 08:00 PM. Velocidad: 2.75 m/s



Foto 3. Hora: 07:00 PM. Velocidad: 2.06 m/s



Foto 4. Hora: 11:00 PM. Velocidad: 3.82 m/s



Foto 5. Hora: 09:00 PM. Velocidad: 1.07 m/s



Foto 6. Hora: 11:00 PM. Velocidad: 3.02 m/s



Foto 7. Hora: 08:00 AM. Velocidad: 2.50 m/s



Foto 8. Hora: 04:00 PM. Velocidad: 1.26 m/s



Foto 9. Hora: 10:00 AM. Velocidad: 3.39 m/s



Foto 10. Hora: 9:00 AM. Velocidad: 3.39 m/s



Foto 11. Hora: 2:00 PM. Velocidad: 1.60 m/s



Foto 12. Hora: 06:00 PM. Velocidad: 3.30 m/s



Foto 13. Hora: 05:00 PM. Velocidad: 3.51 m/s



Foto 14. Hora: 01:00 PM. Velocidad: 1.86 m/s



Foto 15. Hora: 03:00 PM. Velocidad: 2.47 m/s



Foto 16. Hora: 03:00 PM. Velocidad: 2.50 m/s



Foto 17. Hora: 01:00 PM. Velocidad: 1.16 m/s



Foto 18. Tomada en campo.