



# **Diseño de un prototipo de turbina esférica para generar energía a partir de un flujo de aire.**

**Wilson Raúl Giral Barrera**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Tunja, Colombia  
2020



# **Diseño de un prototipo de turbina esférica para generar energía a partir de un flujo de aire.**

**Wilson Raúl Giral Barrera**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):

Msc. Omar F. Rojas Moreno

Línea de Investigación:

Mecánica

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2020



## *Dedicatoria*

*El presente trabajo investigativo lo dedico a Dios, por darme las oportunidades y la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.*

*A mi madre, Yolanda por su amor, trabajo y sacrificio, en todos estos años.*

*A mi hermana, Karen su apoyo incondicional y su buena voluntad en los momentos más difíciles.*

*A mi hija, Avril mi motor diario fortaleciéndome con su sonrisa, su paz y felicidad, para ti todo este esfuerzo y logro culminado.*



# **Agradecimientos**

A Dios por la oportunidad de empezar y culminar este proceso educativo, por las múltiples habilidades que en este trabajo se ven plasmadas, a mi familia y amigos cercanos por sus sacrificios, consejos y apoyo moral, a mis profesores que me brindaron su conocimiento para ser de este ser, una mejor persona y profesional, al Sr. Gustavo A. Rodríguez que me tendió la mano para iniciar mis estudios y lograr culminarlos, a mis compañeros de las dos sedes Puerto Colombia y Tunja por su colaboración, solidaridad, confianza y amistad en momentos buenos y malos.

---

## Resumen

La eficiencia energética en las industrias cada vez toma más importancia, esto lleva a la implementación de métodos como la actualización de equipos, la cogeneración eléctrica y las energías renovables (eólica, fotovoltaica), analizar métodos y encontrar procesos industriales a los que se pueden aplicar ciertos principios físicos, y los flujos de aire a la atmosfera que son muy comunes en las industrias, así que en este proyecto de diseño mecánico, se tomarán en cuenta aquellos que son emitidos por los depuradores de aire, filtros de mangas del tipo jet pulse, electrofiltros, o equipos que evacuen flujos de aire residuales por medio de chimeneas o ductos, para el desarrollo de un prototipo de turbina esférica. Los modelos se hacen a través de un programa de diseño asistido por computadora, Autodesk Inventor y un análisis de simulación por medio de un software de dinámica de fluidos computacional CFD. Con estos dos programas, se obtienen planos a nivel de detalle en su construcción y un cálculo de velocidades, presiones y torque aproximado para la generación de energía.

Se analizó un flujo de aire de un proceso en la compañía productora de cemento, Cementos del Oriente S.A., ubicada en la ciudad de Sogamoso-Boyacá, flujo de aire procedente de la línea de harina cruda, e intervenido la geometría de la chimenea en el filtro del molino de masas vertical. Se realizó el diseño en detalle de la turbina esférica en base al diseño de Gorlov y Lucid Energy, al implementar los diseños en la chimenea, inicialmente se simula el flujo de aire sin la turbina, para determinar las turbulencias y pronosticar la posible ubicación de la turbina dentro de la chimenea, luego se realiza el análisis del flujo de aire con el modelo chimenea-turbina, en un lapso de tiempo para generar datos de velocidades, presiones, torque y energía cinética.

Los valores arrojados por la simulación, oscilan en una producción de potencia de 100 kw y 200 kw, muy favorables para este trabajo y base a futuras investigaciones, en los procesos industriales que deseen analizar sus flujos de aire residuales.

**Palabras clave:** Turbina esférica, Filtro de mangas, Diseño, Chimenea, Torque.

## **Abstract**

The energy efficiency in the industries is becoming more and more important, this leads to the implementation of methods such as equipment upgrading, electrical cogeneration and renewable energy (wind, photovoltaic), and when analyzing these methods it is possible find industrial processes to which certain physical principles can be applied. Air flows to the atmosphere are very common in industries, so in this mechanical, design project for develop of a prototype of a spherical turbine, the next flows can be considered. The models are made through a computer aided design program Autodesk Inventor and the analysis of dynamic simulation by a computational fluid dynamics software. With these two programs, it is possible to obtain plans at the detail level in its construction and an approximate torque calculation for power generation.

An air flow from a process in the cement producing company, Cementos del Oriente SA, located in the city of Sogamoso-Boyacá, was analyzed, air flow from the raw flour line, and the geometry of the chimney in the vertical mass mill filter. The spherical turbine design was carried out in detail based on the Gorlov and Lucid Energy design, implementing the designs in the chimney, initially the air flow without the turbine is simulated, to determine the turbulence and predict the possible location of the turbine inside the chimney, then the analysis of the air flow is carried out with the chimney-turbine model, in a period of time to generate data of speeds, pressures, torque and kinetic energy.

The values produced by the simulation are between 100 kW and 200 kW power production, very favorable for this work and the basis for future research in industrial processes that wish to analyze their residual air flows.

**Keywords: Spherical Turbine, Bag filter, Design, Chimney, Torque.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>19</b>
<b>1. Marco teórico .....</b>	<b>19</b>
1.1 Sector industrial.....	19
1.2 Filtros de mangas (jet pulse).....	21
1.2.1 Descripción de su funcionamiento .....	21
1.3 Ventiladores.....	23
1.3.1 Clasificación de ventiladores .....	26
1.4 Chimeneas.....	29
1.4.1 Reseña histórica .....	29
1.4.2 Clasificación.....	31
1.5 El flujo del aire .....	32
1.5.1 Flujo laminar y turbulento.....	32
1.5.2 Numero de Reynolds.....	¡Error! Marcador no definido.
1.6 Turbinas .....	35
1.6.1 Clasificación de turbinas .....	35
1.7 Software para el diseño y análisis.....	39
1.7.1 Autodesk INVENTOR.....	39
1.7.2 Autodesk CFD .....	40
<b>2. Características del proceso, equipos y determinación del fluido de aire.....</b>	<b>41</b>
2.1 Molienda de crudo en CEMENTOS DEL ORIENTE S.A.....	41
2.1.1 Filtro de mangas.....	42
2.1.1.1 Principio de operación.....	45
2.1.1.2 Mangas filtrantes .....	47
2.1.1.3 Componentes técnicos.....	47
2.1.2 Ventilador centrífugo .....	49
2.1.3 Ducto de salida ó chimenea.....	52
2.1.4 Características del flujo de aire actual en la circulación de la chimenea.....	54
<b>3. Modelado en CAD del filtro de mangas, chimenea y turbina esférica.....</b>	<b>56</b>
3.1 Filtro de mangas.....	58
3.2 Ducto filtro a ventilador y ventilador centrífugo.....	59
3.3 Chimenea .....	60
3.4 Turbina esférica .....	61
3.4.1 Antecedentes de la turbina esférica.....	63

---

3.4.2	Modelado de la turbina esférica.....	65
3.4.2.1	Parámetros de la geometría.....	66
3.4.2.2	Vistas graficas de la turbina esférica en la chimenea .....	74
<b>4.</b>	<b>Investigación y selección del tipo de álabe.....</b>	<b>76</b>
4.1	Selección del tipo de álabe .....	77
4.2	Referencias investigativas.....	78
4.2.1	Parámetros geométricos y dinámicos.....	78
4.2.2	Trabajos y artículos, de la turbina esférica con perfil NACA 0020..	80
<b>5.</b>	<b>Evaluar los resultados obtenidos mediante la simulación en CFD y determinar su rendimiento.....</b>	<b>83</b>
5.1	Simulación del flujo de aire libre en la chimenea sin la turbina esférica .....	83
5.2	Simulación del flujo de aire en la chimenea con la turbina esférica.....	87
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>101</b>
6.1	Conclusiones.....	101
6.2	Recomendaciones.....	102
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>
	<b>A. Informe resultados del software CFD para la chimenea sin turbina.....</b>	<b>105</b>
	<b>B. Informe resultados del software CFD para la chimenea con turbina.....</b>	<b>105</b>
	<b>C. Planos de detalle para la construcción de la turbina esférica.....</b>	<b>105</b>

# Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1.</b> Localización Geográfica Cementos del Oriente. ....	19
<b>Figura 1-2.</b> Diagrama de Flujo, Zona Molienda de Crudo. ....	20
<b>Figura 1-3.</b> Flujo de Aire en Proceso de Filtrado. ....	21
<b>Figura 1-4.</b> Descripción de los Componentes del Sistema de Limpieza partes Principales de los Filtros de Mangas (jet pulse).....	22
<b>Figura 1-5.</b> Partes Principales de los Filtros de Mangas (Jet Pulse).....	22
<b>Figura 1-6.</b> Principales Variables de un Ventilador. ....	23
<b>Figura 1-7.</b> Dirección de Álabes en la Turbina del Ventilador .....	24
<b>Figura 1-8.</b> Ventiladores Axiales.....	27
<b>Figura 1-9.</b> Terminología usual de los ventiladores centrífugos. ....	28
<b>Figura 1-10.</b> Tipos de impulsores centrífugos. ....	29
<b>Figura 1-11.</b> Comportamiento del Flujo.....	34
<b>Figura 1-12.</b> Turbinas Eólicas de Eje Horizontal.....	36
<b>Figura 1-13.</b> Turbinas Eólicas de Eje Vertical .....	37
<b>Figura 1-14.</b> Turbina Gorlov.....	37
<b>Figura 1-15.</b> Turbina Esférica Helicoidal Gorlov .....	39
<b>Figura 2-1.</b> Diagrama de Flujo, Zona de Intervención para el Proyecto.....	41
<b>Figura 2-2.</b> Filtro de Mangas, Ducto, Vent. Centrífugo y Chimenea, Molienda de Crudo.	43
<b>Figura 2-3.</b> Plano General Filtro de Mangas, Molienda de Crudo. ....	43
<b>Figura 2-4.</b> Ventilador Centrífugo .....	50
<b>Figura 2-5.</b> Plano General Ventilador Centrífugo Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.	50
<b>Figura 2-6.</b> Chimenea Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.....	53
<b>Figura 3-1.</b> Sistema de Filtración, Molienda de Crudo.....	56
<b>Figura 3-2.</b> Sentido del Flujo de Aire en la Molienda de Crudo.....	57
<b>Figura 3-3.</b> Vista Alzado Filtro de Mangas, Molienda de Crudo. ....	58
<b>Figura 3-4.</b> Vista Isométrica Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.....	59
<b>Figura 3-5.</b> Vista Isométrica Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.....	59
<b>Figura 3-6.</b> Vista isométrica ducto salida de aire y ventilador centrífugo, molienda de crudo. ....	60
<b>Figura 3-7.</b> Vista Planta e Isométrica Chimenea, Molienda de Crudo.....	61
<b>Figura 3-8.</b> Tipos de Turbinas en la Sección de la chimenea.....	62
<b>Figura 3-9.</b> Tipos de Construcción para Turbinas Tipo Darrieus.....	63
<b>Figura 3-10.</b> Turbina Esférica, Alexander M. Gorlov.....	64
<b>Figura 3-11.</b> Área Esférica en la Chimenea .....	66
<b>Figura 3-12.</b> Definición del Ángulo para los Álabes. ....	67
<b>Figura 3-13.</b> Ángulo de Rotación del Álabes.....	67
<b>Figura 3-14.</b> Asignación y Posición del Álabes.....	68
<b>Figura 3-15.</b> Revolución en tres dimensiones se la sección de álabes.....	69
<b>Figura 3-16.</b> Asignación y Posición del Álabes.....	69
<b>Figura 3-17.</b> Asignación y Posición del Álabes.....	70

<b>Figura 3-18.</b> Disco Cóncavo con Placas de Soporte. ....	70
<b>Figura 3-19.</b> Ensemble disco Cóncavo y Álabes. ....	71
<b>Figura 3-20.</b> Vista Sección de Fijación Disco Cóncavo y Álabes. ....	72
<b>Figura 3-21.</b> Eje Horizontal con Chumaceras de Soporte. ....	72
<b>Figura 3-22.</b> Isométrico Eje Horizontal con Chumaceras de Soporte. ....	73
<b>Figura 3-23.</b> Vista Planta Turbina Esférica Instalada en Proceso Seleccionado. ....	74
<b>Figura 3-24.</b> Vista Planta Turbina Esférica Instalada en Proceso Seleccionado. ....	75
<b>Figura 4-1.</b> Parámetros de Selección para Perfil NACA. ....	77
<b>Figura 4-2.</b> Perfiles Aerodinámicos Simétricos y Asimétricos Analizados.....	78
<b>Figura 4-3.</b> Análisis de Rendimiento ( $Re = 0.33 \times 10^6$ ).....	79
<b>Figura 4-4.</b> Comparación del Número de Palas en el Rendimiento de las Turbinas Darrieus ( $H = 1,5 \text{ m}$ , $R = 0,5 \text{ m}$ , $c = 0,2 \text{ m}$ ), $\lambda$ (TSR) .....	79
<b>Figura 4-5.</b> Número de Palas Modeladas.....	79
<b>Figura 4-6.</b> Montaje de Turbinas Esféricas .....	81
<b>Figura 5-1.</b> Simulación Entrada y Velocidad del Flujo de Aire en la Chimenea. ....	84
<b>Figura 5-2.</b> Simulación Entrada del Flujo de Aire, Turbulencia en la Base Chimenea. ...	84
<b>Figura 5-3.</b> Simulación masa del fluido con turbulencia en la base chimenea.....	85
<b>Figura 5-4.</b> Simulación Velocidad del Flujo de Aire en la Chimenea.....	86
<b>Figura 5-5.</b> Componentes para la Simulación. ....	87
<b>Figura 5-6:</b> Malla en la Turbina.....	87
<b>Figura 5-7.</b> Simulación del Flujo de Aire en la Turbina. ....	88
<b>Figura 5-8.</b> Simulación de la Presión en la Turbina. ....	89
<b>Figura 5-9.</b> Vorticidad del Flujo de Aire en la Turbina.....	89
<b>Figura 5-10:</b> Iteraciones de la Simulación. ....	90
<b>Figura 5-11.</b> Presión en la Estructura de la Turbina en 0 seg. ....	90
<b>Figura 5-12.</b> Presión en la Estructura de la Turbina en un Intervalo de Tiempo.....	91
<b>Figura 5-13.</b> Relación Tiempo vs. Velocidad Angular de la Simulación. ....	95
<b>Figura 5-14.</b> Relación Tiempo (seg) vs. Torque Nm, de la Simulación. ....	95
<b>Figura 5-15.</b> Relación Tiempo (seg) vs. Torque Nm, de la Simulación. ....	96
<b>Figura 5-16.</b> Área de Presión Zona Posterior de la Turbina. ....	97
<b>Figura 5-17.</b> Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.2 seg.....	98
<b>Figura 5-18.</b> Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.4 seg.....	98
<b>Figura 5-19.</b> Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.6 seg.....	99
<b>Figura 5-20.</b> Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.8 seg.....	100
<b>Figura 5-21.</b> Energía cinética turbulenta en un tiempo de 1.0 seg.....	100

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1.</b> Valores y Características, Filtro de Mangas.....	44
<b>Tabla 2-2.</b> Valores y Características, Ventilador Centrifugo .....	49
<b>Tabla 2-3.</b> Características del Flujo de Aire en la Chimenea .....	54
<b>Tabla 5-1.</b> Características de la Malla .....	88
<b>Tabla 5-2.</b> Resultados de la Simulación en CFD.....	92
<b>Tabla 5-2.</b> Continuación .....	93
<b>Tabla 5-2.</b> Continuación .....	94

## Introducción

La necesidad de mejorar procesos en la industria, y la dependencia de las redes locales o nacionales para el suministro de energía eléctrica, hacen que las empresas industriales opten por proyectos de eficiencia energética, para reducir sus consumos y así contribuir en temas económicos y ecológicos. Estos desarrollos de eficiencia energética, vienen encaminados en sectores como la electrónica (factor de servicio de los equipos) y mecánica (transferencia de calor). En este trabajo se determinarán características en flujos de aire producidos en el mismo proceso de las empresas industriales, mediante depuradores de aire, filtros de mangas del tipo jet pulse y electrofiltros; como función principal es separar las partículas contaminantes del flujo de aire o gas, producidos por procesos industriales como trituración y que se evacúan al exterior a través de chimeneas.

Estos depuradores de aire cuentan con un equipo periférico como los ventiladores centrífugos, los cuales, por presión negativa, sustraen el aire del proceso por un grupo de aletas, (palas rectas, adelantadas o atrasadas), dentro de su mismo cuerpo, y lo evacuan en los ductos o chimeneas a la atmosfera, El funcionamiento de los depuradores de aire con base en la energía eléctrica, es el extraer, limpiar y emitir aire limpio a la atmosfera.

Tomando de referencia estos dos temas como base del trabajo “disminución en el consumo de energía eléctrica y funcionamiento de los depuradores de aire” en pro de las energías renovables, se aplicará el principio de las turbinas, determinadas por la velocidad, la densidad, y las características de un determinado fluido.

Teniendo en cuenta las características establecidas por las corporaciones ambientales en el flujo de aire, como condiciones de velocidad (m/s), temperatura ( $^{\circ}$ T) y contaminación, el caudal producen los depuradores de aire varían entre 80% y 100% según su aplicación,

pero la velocidad de salida y su presión son constantes ya que se adaptan a las normas establecidas.

Gorlov (2015) diseñó una turbina esférica con eje de rotación central. En primera instancia, indica que se puede adaptar para cualquier tipo de fluido como la energía eólica, hidroeléctrica y o similares.

Home - Lucid Energy (2020) ha implementado este tipo de turbina para generar energía eléctrica de los conductos de agua potable en diferentes ciudades, los estudios realizados con este tipo de turbinas, van encaminados a los flujos de conductos de agua potable, la pequeña energía hidroeléctrica generada se puede usar para alimentar energía a los sistemas de recolección de datos en ubicaciones subterráneas y congestionadas o para trabajos de mantenimiento en locaciones remotas.

Oladosu & Koya, (2018), se basaron en el modelo de Lucid Energy de la TE en conductos de agua. Investigaron el potencial de aprovechamiento mediante suministros elevados, pero para turbinas más pequeñas.

Se seleccionó un depurador de aire en operación actualmente, se tuvo en cuenta las propiedades y datos del flujo de aire, suministrados por la empresa donde está ubicado el depurador, los cuales son presentados a las corporaciones autónomas regionales (CAR).

El tamaño de la turbina dependerá de los datos iniciales del depurador, donde el ducto de salida o chimenea deberá ser de geometría cilíndrica, esto como base para el estudio.

El desarrollo de una turbina esférica, que se espera sea capaz de generar potencia energética a partir de un par mecánico, obtenido por un flujo de aire residual, de un depurador de aire y/o filtro de mangas en un proceso industrial, el modelamiento, la simulación y estudio de la turbina esférica, con valores aproximados a la realidad para determinar un rendimiento óptimo del modelo.

Se realizó un modelo CAD, (Computer Aided Design por sus siglas en inglés), básico para el depurador de aire, ventilador, chimenea y planos de detalle constructivos para la turbina

esférica, y una simulación aerodinámica mediante un software de dinámica de fluidos computacional, (CFD "Computational Fluid Dynamics" por sus siglas en inglés).

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Diseñar una turbina esférica para generar energía eléctrica a partir del flujo de aire en la salida de los depuradores de aire.

### **Objetivo específicos**

- Determinar las características del flujo según el depurador de aire y su función en la industria.
- Modelar en CAD la turbina esférica para el ducto o chimenea en la salida del depurador de aire.
- Investigar y seleccionar las posibles formas de los alabes de la turbina esférica con el fin de obtener un diseño con el mejor rendimiento posible.
- Evaluar los resultados obtenidos y caracterizar el diseño de turbina con el mejor resultado posible encontrado.

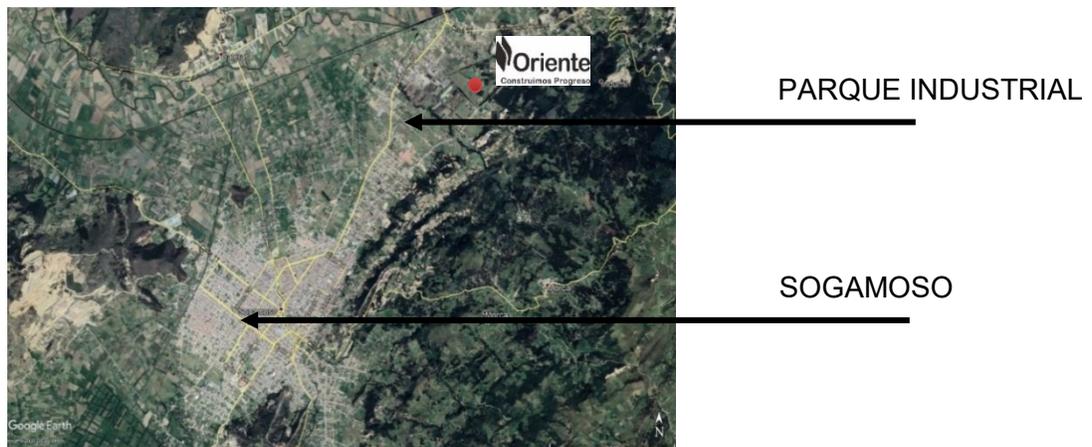
# 1. Marco teórico

A continuación, se presentan conceptos fundamentales, con localización y definiciones de los equipos que intervienen en la generación del flujo de aire, de los que se sustraerán los datos necesarios para el desarrollo del diseño.

## 1.1 Sector industrial

Se selecciona la compañía CEMENTOS DEL ORIENTE S.A., ubicada en dos sedes, la ciudad de Sogamoso – departamento de Boyacá ver Figura 1-1, y en el municipio Sabanagrande – departamento del Atlántico, dedicada a la producción de cemento tipo Portland en varias características y presentaciones: uso general gris UG, estructural gris, ART gris y concreto premezclados. Cumpliendo con altos estándares de calidad según las normas NTC 121 y ambientales con sistemas de control de alta eficiencia en la generación de emisiones atmosféricas.

**Figura 1-1.** Localización Geográfica Cementos del Oriente.



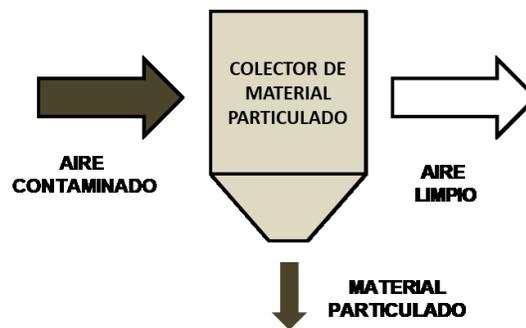
Fuente: Tomado de [www.google.com/intl/es/earth](http://www.google.com/intl/es/earth)



## 1.2 Filtros de mangas (jet pulse)

Los filtros de mangas (jet pulse), son equipos utilizados en las industrias principalmente para la separación de partículas en los gases generados por los procesos. La funcionalidad específica es la de extraer las partículas sólidas de los flujos de aire haciéndolas a travesar por tejidos compuestos, reteniéndolas y liberando el flujo sin partículas, ver Figura 1-3. Un filtro de mangas no llega a tener un rendimiento del 100%, ya bien si el filtro tiene un diseño correcto, y su mantenimiento es correcto, pueden tener rendimientos de hasta el 99% (Industrial Ventilation 20th 1988, 1992).

**Figura 1-3.** Flujo de Aire en Proceso de Filtrado.

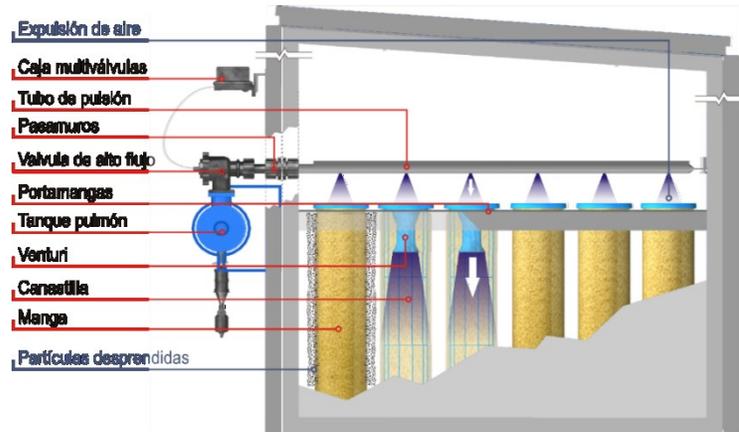


Fuente: Recorrido del Flujo de Aire a través del Filtro de Mangas, Realizada por el Autor.

### 1.2.1 Descripción de su funcionamiento

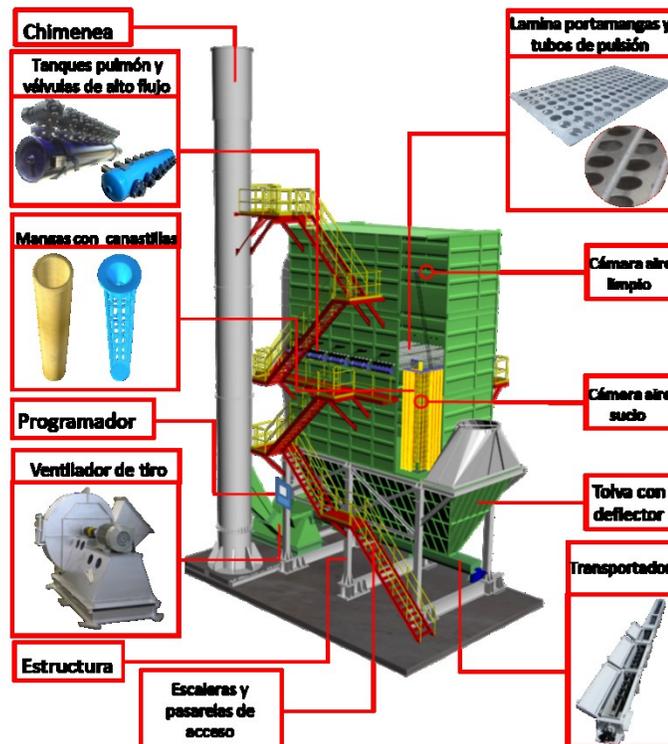
- La separación del sólido se efectúa haciendo pasar el aire con partículas en suspensión mediante un ventilador, a través de la tela que forma la manga.
- Las partículas quedan retenidas entre los intersticios de la tela formando una "torta" filtrante o capa.
- La capa o "torta" va engrosando con lo que se aumenta la pérdida de carga del sistema.
- Para evitar disminuciones en el caudal se procede a desprender periódicamente la capa de las mangas.
- El gas limpio fluye por el espacio interior de las mangas y se dirige hacia la chimenea de escape.
- Dentro de los filtros de mangas tipo jet pulse ver figuras 1-4 y 1-5, existen 2 tecnologías para su operación y funcionamiento, están los ON LINE y los OFF LINE.

**Figura 1-4.** Descripción de los Componentes del Sistema de Limpieza partes Principales de los Filtros de Mangas (jet pulse).



Fuente: Sistemas para el control de la contaminación ambiental. Tomada de Archivo Ingemol S.A. Ingeniería del Medio Ambiental.

**Figura 1-5.** Partes Principales de los Filtros de Mangas (Jet Pulse)



Fuente: Sistemas para el control de la contaminación ambiental. Tomada de Archivo Ingemol S.A. Ingeniería del Medio Ambiental.

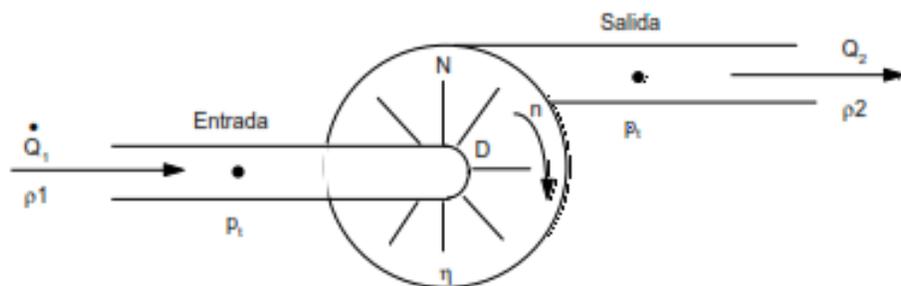
## 1.3 Ventiladores

En general, se puede decir que en el estudio de los ventiladores aplican las teorías de la mecánica de fluidos, para analizar su comportamiento cuantitativamente, los modelos matemáticos aplicados representan las variables que cambian significativamente (Flujo, presión, etc.), considerando los principios fundamentales de las leyes de conservación de masa, termodinámica y la segunda ley de Newton acerca del movimiento. (CEMEX S.A.B. de C.V., 1997)

Asumiendo, en un flujo continuo y estable sus consideraciones de energía, la función principal de los ventiladores es la de transportar aire o gases en procesos industriales, el aire y/o gases manejados por los ventiladores, en la mayoría de las aplicaciones, se comprime muy poco, es decir, la presión a la que operan los ventiladores es relativamente baja. varias veces menos que una atmósfera de presión, así pues, el aire y/o gases se consideran como un fluido. (en un fluido la fuerza de atracción de sus moléculas es baja, un fluido siempre se deformará al aplicársele una fuerza, por pequeña que esta sea). (CEMEX S.A.B. de C.V., 2002)

La función primordial de un ventilador es transformar la energía mecánica del rotor en energía aerodinámica, ver Figura 1-6. Esto sucede al paso por el impulsor o rodete (impeller). Cuando el aire o gas pasa a través del impulsor, su presión total se incrementa, produciéndose por ende una diferencia entre la presión total después y antes del rodete.

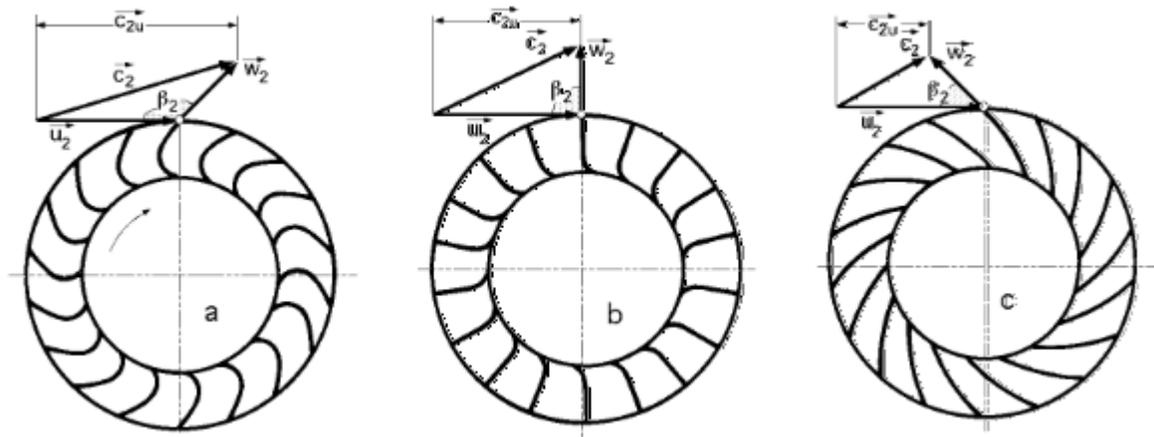
**Figura 1-6.** Principales Variables de un Ventilador.



Fuente: Tomado de Ventiladores Leyes, Control y Tipos, (CEMEX S.A.B. de C.V., 1997).

La capacidad de crear una diferencia de presión por un aspa, está dada por la capacidad de incrementar la velocidad del flujo eficientemente al pasar por ella, ver Figura 1-7.

**Figura 1-7.** Dirección de Álabes en la Turbina del Ventilador



Fuente: *Rodetes y triángulos de salida de los ventiladores centrífugos; a) Con álabes curvados hacia adelante; b) Con álabes de salida radial; c) Con álabes curvados hacia atrás. Libros sobre Ingeniería Energética, Pedro Fernández Díez, pfernandezdiez.es, ventiladores.VI. -107*

La eficiencia de un ventilador se rige por la energía real transferida al flujo, la cual se verá afectada por diferentes tipos de pérdidas en el ventilador:

- Pérdidas mecánicas (Eficiencia mecánica). De fricción del elemento rotativo y en los elementos mecánicos ( $\eta_m$ )
- Pérdidas aerodinámicas. Por fricción del flujo al paso dentro de la carcasa, entre las secciones de entrada y salida (turbulencia) ( $\eta_a$ )
- Pérdidas volumétricas. Por fugas de flujo en la carcasa (no necesariamente al exterior)  $\eta_v$ .

La eficiencia aerodinámica es el parámetro que define porcentualmente el grado de eficiencia con el que el ventilador transforma la energía mecánica en energía aerodinámica o de flujo. Según las Ecuaciones 1.1 y 1.2, la eficiencia aerodinámica es igual al (Flujo \* Incremento de Presión) / Potencia consumida.

$$\eta_A = \frac{Q * \Delta P}{N} \text{ En unidades compatibles} \quad (1.1)$$

Donde:

$\eta_A$  = Eficiencia aerodinámica

Q = Caudal de flujo

$\Delta P$  = Diferencial de presión

N = Potencia asumida

$$\eta_{TA}(\%) = \left( \frac{Q * \Delta PT}{N} \right) * 100\% \text{ En unidades compatibles} \quad (1.2)$$

Donde:

$\eta_{TA}$  = Eficiencia total aerodinámica

Q = Caudal de flujo

$\Delta PT$  = Diferencial de presión total

N = Potencia asumida

en las Ecuaciones 1.3 y 1.4 se considera la presión estática como el parámetro más relevante:

$$\eta_s = \left( \frac{Q * \Delta P_s}{N} \right) \text{ En unidades compatibles} \quad (1.3)$$

$$\text{En sistema internacional S. I.} \quad Q (\text{m}^3/\text{s}), P_s (\text{Pa}), N (\text{w}) \quad (1.4)$$

Donde:

$\eta_s$  = Eficiencia estática

Q = Caudal de flujo

$\Delta P_s$  = Diferencial de presión estática

N = Potencia asumida

Si se desea considerar el resto de las pérdidas en la eficiencia teórica total se emplea la Ecuación 1.5.

$$\eta_{TT} = \eta_{AT} * \eta_m * \eta_v \quad \text{Normalmente} \quad \eta_m, \eta_v = 1 \quad (1.5)$$

Donde:

$\eta_{TT}$  = Eficiencia teórica total

$\eta_{TA}$  = Eficiencia total aerodinámica

$\eta_m$  = Pérdidas mecánicas

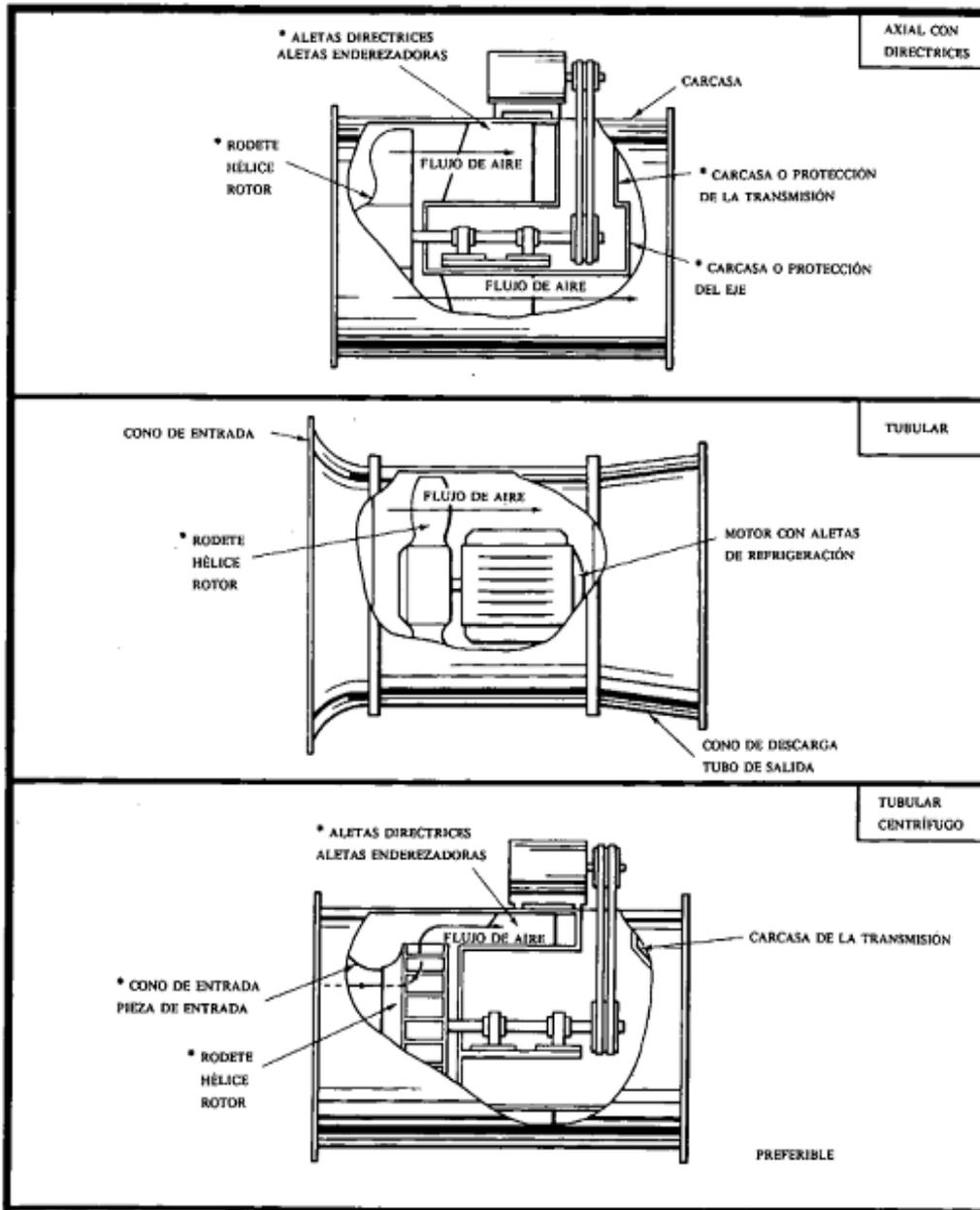
$\eta_v$  = Pérdidas volumétricas

### 1.3.1 Clasificación de ventiladores

Los ventiladores se clasifican en tres tipos según su funcionalidad: axiales, centrífugos y especiales. En funcionalidad, tenemos que los axiales son importantes para caudales de aire con mínima pérdida de carga, los centrífugos, para caudales de aire bajos y pérdidas de carga elevadas, con ciertas características en la diferencia de presión estática, según su alta presión de  $180 < \Delta p > 300$  mm.c.a., media presión:  $90 < \Delta p < 180$  mm.c.a. y baja presión:  $\Delta p < 90$  mm.c.a. (Industrial Ventilation 20th 1988, 1992).

- Ventiladores axiales: mueven grandes caudales con incrementos de presión estática baja, en su configuración helicoidales, de tubo axial (en una envolvente, dan mayores presiones, generan mucho ruido), y tubulares con directrices, ver Figura 1-8.

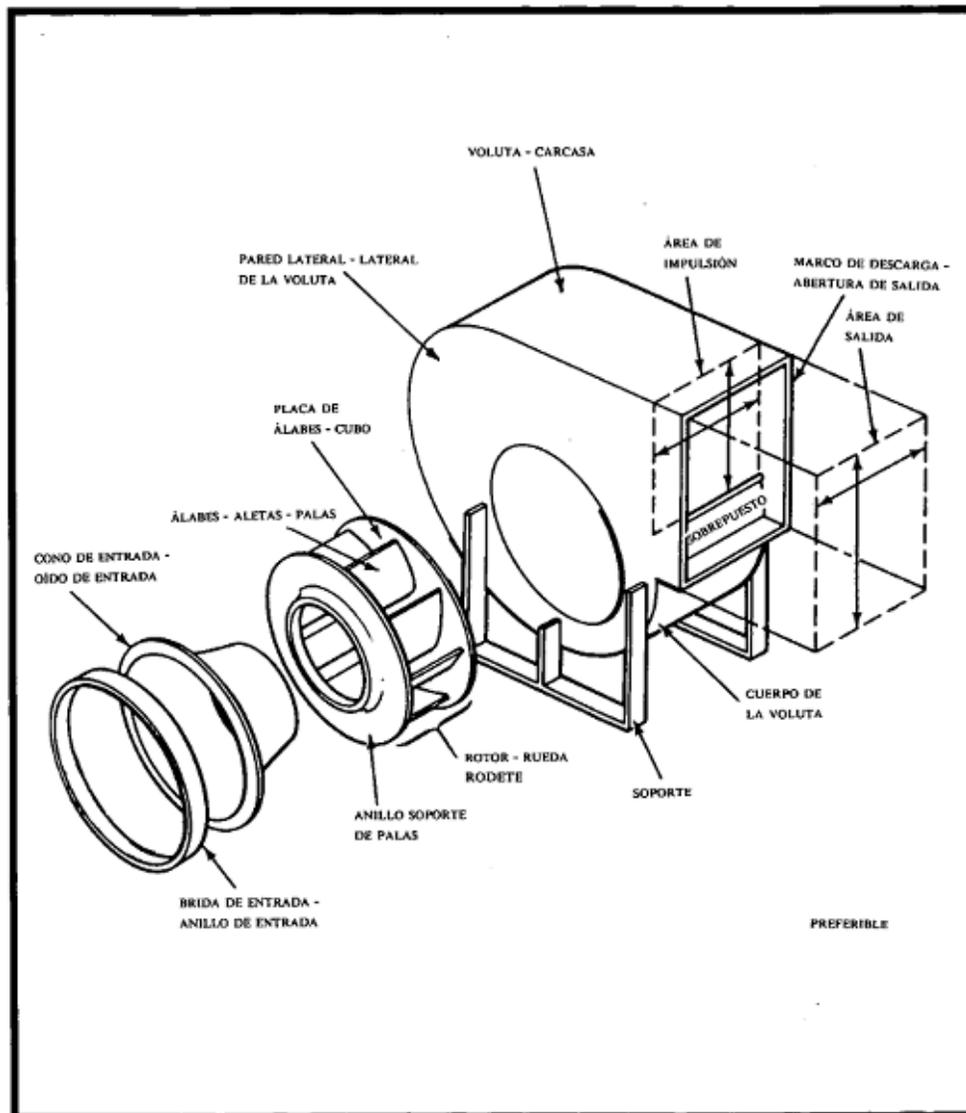
Figura 1-8. Ventiladores Axiales.



Fuente: *Ventilación industrial 1988, Edición en español.*

- Ventiladores centrífugos: el flujo de salida es perpendicular al de entrada, en configuraciones de álabes curvados hacia delante, de álabes curvados hacia atrás y de álabes rectos a radiales, ver figuras 1-9 y 1-10.

**Figura 1-9.** Terminología usual de los ventiladores centrífugos.



Fuente: *Ventilación industrial 1988, Edición en español.*

Figura 1-10. Tipos de impulsores centrífugos.

		TIPO	DISEÑO DEL RODETE	DISEÑO DE LA CARCASA	
VENTILADORES CENTRÍFUGOS	PALAS DE ALA PORTANTE		Es el tipo de ventilador centrífugo de mayor rendimiento. Dispone de 9 a 16 palas de perfil aerodinámico curvadas hacia atrás con respecto a la dirección de giro. El aire sale del rodete a una velocidad inferior a la velocidad lineal de la periferia del mismo y el diseño de las palas permite una expansión del aire con pocas pérdidas al circular entre ellas. Para una función dada, es el diseño de ventilador centrífugo que puede girar a mayor velocidad.		La carcasa tiene forma de voluta diseñada para convertir la presión dinámica en presión estática con pocas pérdidas y por tanto con alto rendimiento del ventilador; para que el rendimiento sea el mayor posible, es importante que la holgura entre el rodete y el cono de entrada sea pequeña. En ocasiones la carcasa es cóncava y concéntrica con el rodete tal como en algunos modelos de extractores de techo ya que la conversión a presión en el rodete es suficiente.
	PALAS INCLINADAS HACIA ATRÁS PALAS CURVADAS HACIA ATRÁS		El rendimiento es un poco menor que el de los ventiladores con palas de ala portante. Las palas curvadas o inclinadas hacia atrás con respecto a la dirección de giro son de espesor constante, se montan de 9 a 16 palas. El rendimiento es alto por los mismos razones que las del ventilador con palas de ala portante ya indicadas arriba.		Se utiliza el mismo diseño de carcasa que para los de ala portante.
	RADIAL		Es el más sencillo y el de menor rendimiento entre todos los ventiladores centrífugos. Es muy resistente mecánicamente, y el rodete puede ser reparado con facilidad. Para una función dada requiere una velocidad de giro intermedia. Se montan entre 6 y 10 palas en disposición exactamente radial (R), o modificada (M).		En forma de voluta, generalmente es el disco más estrecho de todos los ventiladores centrífugos descritos aquí debido a la alta velocidad de descarga que precisa. Las exigencias dimensionales de esta carcasa son más críticas que en el caso de los ventiladores de palas de ala portante o inclinadas hacia atrás.
	PALAS CURVADAS HACIA ADELANTE		El rendimiento es menor que el de los ventiladores de palas de ala portante o inclinadas hacia atrás. La construcción ligera y de bajo coste es la utilizada generalmente para este tipo de ventilador. Tiene entre 24 y 64 palas cortas con los bordes interior y exterior curvados hacia adelante. El aire sale del rodete a una velocidad mayor que la periférica. La energía primaria comunicada al aire se debe a la alta velocidad de giro del rodete. Para un trabajo dado, el tamaño del rodete y la velocidad de giro son los menores entre todos los ventiladores centrífugos.		La voluta es de diseño similar a los otros ventiladores centrífugos. El ajuste entre el rodete y la entrada no es tan crítico como en los ventiladores con palas de ala portante o inclinadas hacia atrás. La chapa sobrepuesta en la carcasa es de gran tamaño.

Fuente: *Ventilación industrial 1988, Edición en español.*

## 1.4 Chimeneas

### 1.4.1 Reseña histórica

Por años, “la chimenea ha sido un elemento indispensable en la mayoría de los conjuntos fabriles, símbolo del desarrollo industrial y económico en relación con su propia función, la

expulsión de humos, vapores u otros elementos gaseosos al exterior de las fábricas” (Egia, 2016). Aunque escasos, según los datos existentes, la invención de la chimenea como tal, data del siglo I después de Cristo. En los primeros períodos de la civilización occidental, las “chimeneas” eran agujeros en el suelo donde se hacía fuego para poder calentarse. Posteriormente se inventó una especie de calefacción procedente de hornos que calentaban todas las estancias, e incluso el agua.

Cuando se empezaron a levantar edificios de varias plantas, las chimeneas iban pegadas a la pared y el humo salía de la estancia de forma horizontal, al contrario que en la actualidad. Las primeras chimeneas fueron construidas en ladrillo, hoy por hoy conservándose como obras arquitectónicas majestuosas, posteriormente se utilizó bloques de prefabricados de cemento con refuerzos estructurales en barras de acero corrugadas para darles mayor altura de descarga a la atmosfera. Las técnicas utilizadas hoy en día son más tecnificadas utilizando sistemas de encofrados deslizantes, que a su vez también son utilizadas para el deslizado de silos de hormigón armado, la construcción de actual de las chimeneas en su mayoría son metálicas, ya que resultan, en ocasiones más fáciles en su montaje y económicamente más rentable, en situaciones especiales son recubiertas en su interior por materiales aislantes de la corrosión o agentes químicos restantes del proceso y transportados por el flujo de aire o gas. Las chimeneas industriales son dimensionadas en su geometría fundamental, diámetro y altura, con base en la función de dar salida de los gases a la atmósfera. Considerando: velocidad del flujo, temperatura y volumen.(Chimeneas Industriales, 2016)

Las chimeneas y humeantes, junto con los ferrocarriles, fueron los dos elementos más constantes en toda la iconografía industrial. Sistemas diseñados para la evacuación de humos en calderas, hornos, estufas y calentadores a la atmosfera, en dirección vertical, para asegurar que las salidas de los humos fluyan sin problemas en convección térmica por diferencia de densidades. Hay conductos o chimeneas que no son del todo verticales, se observan en pequeños cuartos de calderas y cocinas con salidas por orificios situados en los muros perimetrales de las edificaciones, teniendo en cuenta que no deben estar a una inclinación cercana a los  $0^\circ$ , ya que lo humos no transitarían con facilidad.

## 1.4.2 Clasificación

Las chimeneas pueden clasificarse según diversos criterios; Atendiendo al método empleado para conseguir una velocidad adecuada de los gases, se les puede clasificar en chimeneas de tiro natural, chimeneas de tiro inducido y chimeneas de tiro forzado. Esto se debe al diferencial de presión necesario para que el flujo de los gases se deba exclusivamente, a diferencias de temperatura y densidad, que se haya creado por medios artificiales una presión negativa progresivamente decreciente, o que se fuerce el flujo mediante presiones positivas mayores a la atmosférica. Dependiendo del número de ductos independientes contenidos dentro de una misma envoltura estructural, en chimeneas de ducto simple y chimeneas de ductos múltiples. Según la manera como se resistan las solicitaciones debidas a fuerzas horizontales, se las puede dividir en dos clases: auto portantes y no auto portantes. Las auto portantes son aquellas chimeneas que no necesitan de una estructura auxiliar para soportar las solicitaciones globales debidas a viento o sismo. Mientras que las no auto portantes, son las que cuyo ducto (o ductos) de gases, no están diseñados para soportar por sí mismos las solicitaciones globales de viento o sismo, se requiere, por lo tanto, de una estructura auxiliar para resistirlas. Esta clase incluye las chimeneas atirantadas, (Chimeneas Industriales, 2016)

Según la temperatura y la composición química del flujo de aire, que transitan por la chimenea, se debe considerar, en ciertos casos, un revestimiento o aislante para que el material el cual está diseñada, no cause daños en su estructura de construcción. Estos refractarios o aislantes suelen ser de composiciones especiales como los silicoaluminosos o de agentes naturales. Los ácidos, son los más comunes al interior de las chimeneas o ductos, estos principalmente relacionados por tener baja temperatura en un ambiente oxidado con exceso de comburente necesarios para la formación de ácidos sulfuros y nitrosos. Para altos niveles de ácido, se recomienda la utilización de materiales a base de borosilicatados, en flujos con gas natural, lo más propicio es la utilización de metales o acero especiales, en el mercado no son muy costosos, sin la aplicación de refractarios, ya que resisten a este tipo de gases. (Palazón, 2014).

## 1.5 El flujo del aire

Existe un flujo de aire, cuando este obtiene propiedades como velocidad, ciertamente se describe como un volumen de aire que atraviesa una superficie en un determinado tiempo dado. La superficie puede ser real o imaginaria, si existe viento y se considera 1 metro cuadrado vertical se denominará imaginaria, pero si la superficie es una sección transversal de una tubería se considera real.

Para la medición del flujo de aire, se puede volumétricamente o en masa, en dos unidades como los metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), u otras unidades de volumen sobre tiempo, o en kilogramos por segundo ( $kg/s$ ). el cálculo para cada aplicación es diferente ya que podemos hablar de condiciones actuales de operación, donde se requieren el peso en el manejo de flujos, como los de combustión; y las condiciones estándar para el secado de flujos de aire. Para la operación de los ventiladores, se debe tener claro qué condiciones se proporcionan.

- Condiciones actuales (ACT) significan las condiciones de operación en el lugar y temperatura de operación.
- Condiciones estándar (STD) son referidas al nivel de mar y  $20^{\circ}C$

### 1.5.1 Flujo laminar y turbulento.

Flujo laminar, con características en su trayectoria suaves y regulares en el fluido, en movimientos paralelos con una mínima mezcla lateral, sin alguna interrupción entre sus capas, es el contraste del flujo turbulento, ya que este se caracteriza por el movimiento irregular de sus capas. El flujo laminar es también conocido como flujo aerodinámico o flujo viscoso. Cuando el fluido fluye a través de una tubería o por dos placas, se producen flujos laminares o turbulentos, esto depende de la velocidad, viscosidad, la sección transversal donde fluye (o número de Reynolds), por tanto, el flujo laminar ocurre cuando es sus características tiene a tener velocidades bajas y alta viscosidad.

Existe un fenómeno entre el flujo laminar y turbulento denominado flujo en transición, con algunas fluctuaciones intermitentes del fluido, en un flujo laminar, aunque no suficientes para ser caracterizado como flujo turbulento, ver Figura 1-11 imagen (b).

flujo turbulento, con características en su trayectoria con movimientos irregulares, en un estado caótico del fluido. Su comportamiento está determinado en velocidades altas, baja viscosidad y a mayores dimensiones lineales, asumiendo si el número de Reynolds es mayor que  $Re > 3500$ , el flujo es turbulento. Por esta razón, el flujo turbulento normalmente se estudia estadísticamente en lugar de hacerlo de una forma con leyes casuales y/o mecánicas. La mezcla lateral es muy alta, con interrupción entre las capas, con características de aleatoriedad aparente, remolinos y recirculación. La velocidad del fluido turbulento está sometida a cambios en sus propiedades como en dirección y magnitud.

Los conocimientos en el comportamiento de las características del flujo turbulento son importantes en el área de la ingeniería, ya que, en la mayoría de los estudios industriales, se obtienen flujos turbulentos.

Según (Connor, 2019)) el carácter altamente intermitente e irregular de la turbulencia complica todos los análisis. La herramienta para su análisis es el análisis CFD, rama de la mecánica de fluidos que utiliza análisis numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran fluidos turbulentos. Es ampliamente aceptado que las ecuaciones de Navier-Stokes (o las ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes promediadas por Reynolds) son capaces de exhibir soluciones turbulentas, y estas ecuaciones son la base de esencialmente todos los códigos CFD.

Afirma (Connor, 2019)) que la difusividad en el flujo turbulento, tiene una distribución de velocidad bastante plana en la sección de la tubería, con el resultado de que todo el fluido fluye a un valor único dado y cae rápidamente muy cerca de las paredes, la característica que es responsable de la mezcla mejorada y el aumento de las tasas de transporte de masa, momento y energía en un flujo se llama «difusividad», en la rotacionalidad, el flujo turbulento se caracteriza por un fuerte mecanismo tridimensional de generación de vórtices, este mecanismo se conoce como estiramiento de vórtice. En la disipación es un

proceso disipativo es un proceso en el cual la energía cinética del flujo turbulento se transforma en energía interna por el esfuerzo de corte viscoso. (Connor, 2019)

**Figura 1-11.** Comportamiento del Flujo.



Fuente: Visualización de la trayectoria de un trazador en el interior de un tubo en diferentes regímenes de flujo. (a) Laminar, (b) Transición, (c) Turbulento (Fuente: ANSYS, Inc.).

## 1.5.2 Numero de Reynolds

Relaciona características como la velocidad, viscosidad, densidad y dimensión típica de un flujo, en una expresión adimensional que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos, relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Desde un punto de vista matemático, el número de Reynolds de un problema o situación concreta se define por medio de la Ecuación 1.6:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad \text{ó} \quad Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1.6)$$

Donde:

$V$  = Velocidad del fluido (m/s)

$D$  = Diámetro del ducto (m)

$\nu$  = Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

$\rho$  = Masa específica ( $kg \cdot s^2/m^4$ )

$\mu$  = Viscosidad del fluido ( $kg \cdot s/m^2$ )

## 1.6 Turbinas

La energía eólica se basa en el viento como fuente principal de potencia, se caracteriza por ser inagotable, renovable y amigable con el medio ambiente.

Las turbinas eólicas, también conocidas como aerogeneradores, son mecanismos que capturan la energía cinética del viento, producen con ella energía mecánica y tras un proceso de transformación, generan energía eléctrica que es distribuida a través de un cableado.

### 1.6.1 Clasificación de turbinas

Las turbinas eólicas pueden clasificarse de diferentes maneras; como lo son según su potencia o según la disposición de su eje.

Según su potencia Creus (2008), dice que las turbinas eólicas se clasifican en tres grupos principales; el primer grupo, turbinas de baja potencia (hasta 100 kW), el segundo, turbinas de mediana potencia (entre 100 kW y 1000 kW), y el tercer y último grupo, turbinas eólicas de gran potencia (más de 1000 kW).

Según la disposición de su eje, hay dos formas, las de eje horizontal, y las de eje vertical.

Las turbinas de eje horizontal, son el tipo de turbina más conocida y utilizada en la generación de energía eólica, y se caracterizan principalmente, porque el eje del rotor se encuentra paralelo a la corriente de viento, ver Figura 1-12. Dentro de este tipo de turbinas eólicas existen dos subdivisiones; la turbina con rotor a barlovento, cuando la corriente de

aire fluye frente al rotor y las palas, la segunda, es la turbina con rotor a sotavento, cuando la corriente de aire fluye por el lado posterior del rotor y las palas.

**Figura 1-12.** Turbinas Eólicas de Eje Horizontal



Fuente: XATACA Aerogeneradores [www.xatakaciencia.com/tag/aerogeneradores](http://www.xatakaciencia.com/tag/aerogeneradores)

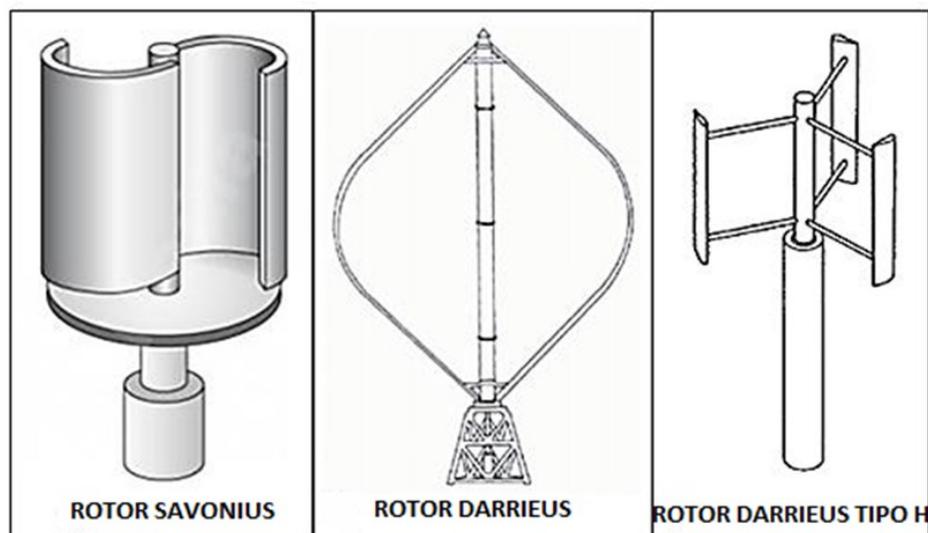
Las turbinas eólicas de eje vertical, se caracterizan principalmente porque el eje del rotor se encuentra perpendicular al suelo. Estas turbinas tienen la capacidad de recibir viento desde cualquier dirección y el espacio requerido para su montaje es relativamente pequeño en comparación con las anteriores mencionadas. Al igual que las turbinas eólicas de eje horizontal, estas turbinas poseen tres subdivisiones o tipos principales.

El primer tipo es la turbina de eje vertical con rotor Savonius, inventada por el ingeniero Sigurd J. Savonius en 1922, su principio de operación se basa en la fuerza de resistencia debida principalmente al campo de presiones diferenciales sobre el rotor, ver Figura 1-13. Este tipo de turbina consta de dos palas (álabes) semicilíndricas unidas entre sí y que desde una vista superior forman una S, siendo su principal ventaja girar a bajas velocidades de viento.

Otro tipo de turbina de eje vertical es la de rotor Darrieus que debe su nombre a su inventor, el ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus, quien fue el pionero en el diseño de turbinas verticales basadas en la fuerza de sustentación, patentándolas en 1931 en la oficina de patentes estadounidense, ver Figura 1-13. Esta turbina consta de dos palas curvas unidas en sus extremos y se caracteriza por su capacidad de alcanzar altas velocidades.

El último tipo de turbina de eje vertical es la del rotor Darrieus tipo H, ver Figura 1-13, también desarrollado y patentado por Darrieus, se trata de una variante del diseño anterior, igualmente está basada en el aprovechamiento de la fuerza de sustentación, pero usando palas rectas colocadas verticalmente.

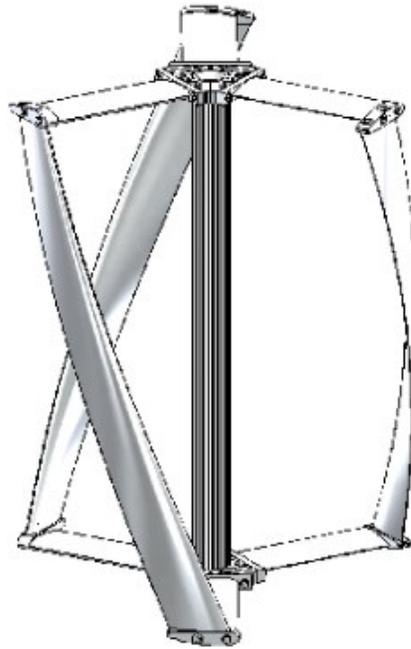
**Figura 1-13.** Turbinas Eólicas de Eje Vertical



Fuente: ECOSOURCES. VAWT. [www.ecosources.info](http://www.ecosources.info).

Hay un último modelo de turbina, derivado de la turbina de Darrieus que es la turbina Gorlov, y debe su nombre a su inventor, el ingeniero Alexander M. Gorlov, a mediados de los años 90, ver Figura 1-14. En un principio, se desarrolló como una turbina hidráulica, pero se ha adaptado también a usos eólicos. Este diseño propone perfiles aerodinámicos helicoidales que mejoran la fluctuación del aire.

**Figura 1-14.** Turbina Gorlov



Fuente: Tomado de (Bachant & Wosnik, 2015)

Según Gorlov, (2015) la patente de EE.UU. 5.451.137 describe una turbina helicoidal Gorlov (GHT), que proporciona una mejora notable a las máquinas de eje vertical o tipo Darrieus. Las palas de las turbinas helicoidales son unidireccionales, es decir, independientemente de la dirección del flujo y el punto de ataque, giran en una sola dirección. Las palas helicoidales de la turbina también viajan a una velocidad constante sin aceleración y desaceleración. Como resultado, las turbinas que usan aspas helicoidales reducen los efectos de la pulsación y la correspondiente eficiencia de la turbina más baja que resulta de la aceleración y desaceleración cíclica. Esto conduce a un mayor poder operativo y fuerza, ver Figura 1-15.



producto, validando el correcto funcionamiento de los elementos, y permitiendo la parametrización de variables de validación, para la mejora constante y el ciclo de vida del producto. Además, permite la extracción de información de ingeniería por medio de planos detallados, facilitando a los departamentos de diseño la comunicación con los de manufactura. También permite la actualización automática del modelo 3D, según la dependencia de este a las variables asignadas (*Inventor, Autodesk, 2020*).

## 1.7.2 AUTODESK CFD

Autodesk CFD (“Computational Fluid Dynamics” por sus siglas en inglés) es un software de simulación de dinámica de fluidos computacional que los ingenieros y analistas utilizan para predecir inteligentemente cómo se comportarán los líquidos y los gases; minimizar la necesidad de prototipos físicos, a la vez que proporciona una visión más profunda del rendimiento del diseño del flujo de fluidos, permitiendo diseñar sistemas con conocimientos de fluidos, térmicos y de movimiento. También proporciona a los ingenieros una gama de potentes herramientas para la optimización del diseño del sistema como el flujo de fluidos y movimiento libre de la superficie, la gestión térmica para la refrigeración de la electrónica y la integración BIM para la comodidad de los ocupantes de HVAC en AEC y MEP.

La Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) y las funciones de scripting amplían las capacidades básicas de Autodesk CFD a través de la personalización y automatización de tareas comunes del centro de decisión. Además, el centro de decisión automatiza las comparaciones de diseño del sistema para acelerar la toma de decisiones basada en el diseño (*Autodesk CFD, 2020*).

## 2. Características del proceso, equipos y determinación del flujo de aire.

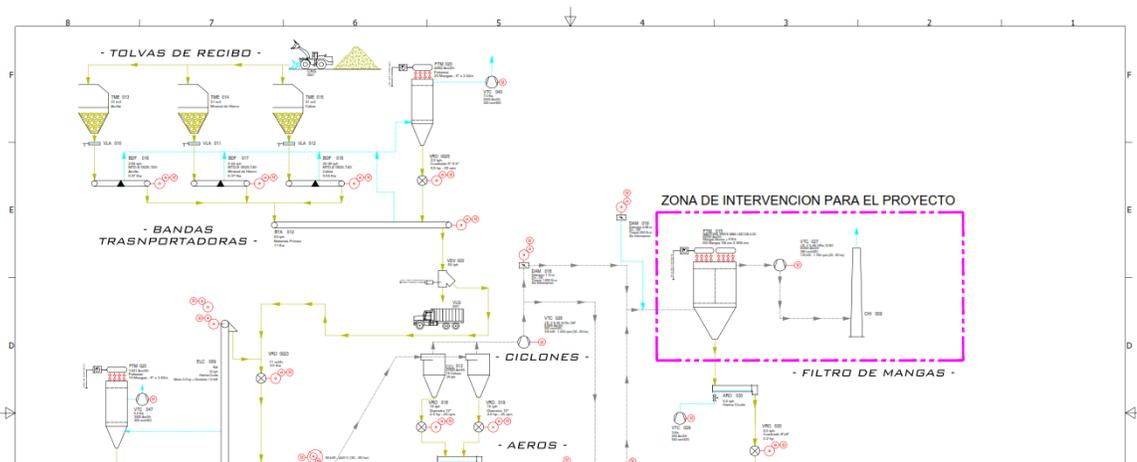
En el presente capítulo se explicará el tipo de proceso y los equipos que intervienen en la generación del flujo de aire, el cual permitirá dar las especificaciones técnicas para realizar el diseño de la turbina esférica. Estos ya seleccionados de una planta de producción de cemento, como CEMENTOS DEL ORIENTE S.A. sede Sogamoso – departamento de Boyacá. Se presentarán datos actuales de su operación, características técnicas y componentes.

### 2.1 Molienda de crudo en Cementos del Oriente S.A.

Consiste en recibir la extracción de las explotaciones mineras, generalmente canteras con arranque por voladura, para el caso del componente de la piedra caliza, el mineral de hierro y las arcillas (materias primas) son de características químicas, recibidas algunas de ellas en diámetros que oscilan entre 12 mm y 50 mm, y convertirlas en un polvo (crudo o harina de cemento) de composición homogénea y de características extremadamente precisas. Dicho proceso está relacionado, básicamente, con la selección de los métodos de ingeniería más eficientes para la molienda, mezclado y transporte del crudo entre las distintas etapas, ver Figura 2-1.

Los equipos principales para el desarrollo de este proceso, básicamente de construcción metálica, son las tolvas de recibo, bandas transportadoras, molinos de masas verticales, ciclones de alta eficiencia, transportadores de cadena, ventiladores centrífugos, aerodeslizadores, válvulas rotativas y filtros de mangas.

Figura 2-1. Diagrama de Flujo, Zona de Intervención para el Proyecto.



Fuente: Tomado de Archivo Departamento de Proyectos, Empresa Cementos del Oriente S.A.

Los pasos para la obtención de la harina, en CEMENTOS DEL ORIENTE S.A. sede Sogamoso – departamento de Boyacá, son recibir las materias primas en la tolva de recibo, en la zona de descarga, se encuentran instaladas bandas transportadoras que alimentan el molino de masas vertical con la dosificación determinada, este molino pulveriza las materias hasta reducirlas a un tamaño característico, definido por un modelo cuantitativo dispuesto por la dirección de planta. La extracción de la harina se hace por medio de un flujo de aire en presión negativa, generado por el sistema de filtración, este constituido por varios equipos que son la base para la investigación planteada este proyecto. El sistema de filtración, es un proceso en el cual intervienen el filtro de mangas (filtrado), ventilador centrífugo (presión negativa, generador del flujo de aire) y chimenea para la evacuación del flujo de aire filtrado.

### **2.1.1 Filtro de mangas**

El filtro se encuentra en la fase final del proceso de molienda de crudo, el cual sustrae el flujo de aire que genera el molino de masas vertical y separando la harina de crudo que es el producto terminado para dicho proceso, ver Figura 2-2, diseñado por la compañía NANTONG XINYE M&E ENVIRONMENT PROTECTION EQUIPMENT CO., LTD, ver



Fuente: Tomado de Archivo Departamento de Proyectos, Empresa Cementos del Oriente S.A.

**Tabla 1-1.** Valores y Características, Filtro de Mangas

<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>FILTRO MOLINO DE CRUDO</b>
Filtro Marca		NANTONG XINYE
Tipo de manga		SNAP BAND
<b>Volumen de aire</b>	<b>am3/hora</b>	<b>60.000</b>
	am3/min.	1.000
	ACFM	35.320
<b>Temperatura Normal de Operación</b>	<b>°c</b>	<b>80</b>
Temperatura Máxima de Operación	°c	260
Carga de material particulado	grs/m3.	50-100
Dimensiones manga (d x l)	mm.	158 x 3650
Superficie por manga	m2	1,81
Cantidad de mangas por módulo	Und.	640
Numero de Válvulas	Und.	40
Mangas por Válvula	Und.	16
Número de módulos	Und.	1
Cantidad de mangas	Und.	640
Superficie total	m2	1.159,5
Relación de filtración	m3/minxm2	0,86
Área carcasa	m <sup>2</sup>	32,00
Can velocity	m/min.	51,4
Max. Presión diferencial	Pulga. ca.	6,0
	mm.ca.	150,0
Aire comprimido 5 a 7 bar.	m3/min.	5 - 10

Fuente: Elaboración Propia

Nota: Valores de operación, filtro de mangas para el molino de masas vertical.

### 2.1.1.1 Principio de operación

Según, Ingemol S.A., (2015) el aire contaminado es aspirado de la zona de proceso y conducido generalmente por un ducto, el cual lo descarga por la parte inferior del colector en la cámara de aire sucio; allí se expande y produce una pérdida de velocidad, logrando así una pre-separación de partículas, de tal modo que las más grandes caen al fondo del filtro y las más pequeñas se depositan en la parte exterior de las mangas filtrantes.

El aire limpio, que sale por efecto de la succión o la presión del ventilador, las atraviesa y es recogido en la cámara superior para su evacuación al ambiente. A medida que pasa aire, más polvo se deposita, formando una capa gruesa (precapa), que, con el incremento de espesor, presenta mayor resistencia al paso del aire limpio, aumentando a la vez su capacidad de retención de partículas más finas (colmatación). (Ingemol S.A., 2015).

Esto hace que la resistencia al paso de aire aumente hasta llegar a limitar su flujo, por lo que llega un momento en que es necesario desprender esta capa para que la tela quede limpia otra vez y empiece un nuevo ciclo. Esto se logra con el sacudido de las mangas, por el efecto de inyección de aire comprimido en sentido inverso (parte interna de la manga), el cual produce una onda de choque que desprende el polvo exterior.

Esta inyección, que se hace por hileras, se realiza por medio de un tubo (blow pipe), con pequeños orificios, cada uno de los cuales está exactamente sobre el centro de cada manga. Para evitar que ésta se comprima y se cierre, se coloca en su interior una canasta metálica o jaula de alambre.

El tamaño de la manga debe ser ligeramente mayor que el de la jaula de alambre, para que, en funcionamiento normal, se pueda deformar desprendiendo parte del material particulado retenido en su exterior. El volumen de aire de barrido se absorbe por las mangas y sólo una pequeña parte de éste llega al volumen del filtro, haciéndose notar por un insignificante aumento en la contrapresión durante el choque de barrido. Para que se mantenga entre límites mínimos, el efecto perturbador del choque del aire en contracorriente sobre el sistema, se debe ajustar la duración del pulso entre 20 y 200 m/s, y la frecuencia entre 5 y 60 segundos, de acuerdo con el producto y la carga de material particulado a manejar. (Estos ajustes los realiza automáticamente el programador electrónico). Lo importante es que el impulso de limpieza sea lo más corto posible y con toda la capacidad en cuanto al volumen de gas. (Ingemol S.A., 2015).

### **2.1.1.2 Mangas filtrantes**

Material filtrante: Por las condiciones de los gases a depurar, se propone la utilización de mangas con recubrimiento de acrílico, de manera que se evite la prematura hidrolización de las mangas y en general, su afectación por humedad.

Mangas filtrantes autoajustables, con la boca de resorte (Snap Band): La unidad requiere mangas de extracción por la parte superior, permitiendo que éstas sean instaladas por la cámara de aire limpio, haciendo un sello perfecto que evita escapes de aire contaminado. Se elimina toda una serie de accesorios de sujeción y de herramientas, se reducen los costos de mantenimiento y facilita el trabajo efectivo. (Ingemol S.A., 2015)

### **2.1.1.3 Componentes técnicos**

Válvulas de alto flujo y de mando, de doble diafragma, han sido diseñadas específicamente para manejar mayores volúmenes de aire comprimido, más que las válvulas de diafragma sencillo con admisión de aire mayor que la salida, creando un efecto venturi, induciendo gran velocidad de aire; con esta efectividad se logra una reducción en el número de veces que la válvula tiene que dispararse para poder limpiar, ahorrando aire comprimido y prolongando la vida útil de las mangas.

La lámina portamangas con soporte estructural es fabricada en lámina de acero A36 de ¼" con perforaciones de alta precisión en frío y reforzada con platina de ¼" x 4", montadas sobre una estructura metálica capaz de soportar el peso del conjunto canastillas –mangas, sin sufrir ninguna deformación.

Los tubos distribuidores de aire comprimido con pasamuro, se fabrican en tubo de acero SCH - 40, reforzados con ángulo de 1" para aumentar su rigidez, son construidos usando alineamientos especialmente desarrollados, para asegurarse que los orificios de los tubos coincidan exactamente con el centro de las mangas, se insertan directamente en las válvulas de alto flujo y se aseguran mediante un pasa muro en un extremo, y en el otro mediante una tuerca, para facilitar su desmontaje.

El tanque para aire comprimido, está constituido por una sección de tubo para alta presión, donde se instalan las válvulas de alto flujo, una válvula de purga automática y el filtro para sistema de aire comprimido.

Se incluye una válvula de purga automática de 1/2" en cada tanque de aire comprimido, para asegurarse que cualquier acumulación de humedad sea evacuada, evitando la contaminación del aire de limpieza, por ende, la generación de hidrólisis de las mangas por alta humedad interior. Dicha válvula está instalada en la parte inferior del tanque y se activa automáticamente por acumulación de condensados.

La unidad de aire comprimido es una combinación de filtro de aire con purga automática, válvula de seguridad, manómetro, llave de paso, válvula de purga, y una toma rápida, reduciendo los contaminantes del sistema de aire comprimido, minimizando la humedad y permitiendo que, en caso de baja presión del aire, se cierre la línea, para permitir una rápida recuperación de la presión de operación.

Las canastillas constituidas en su estructura de 10 varillas verticales trefiladas de 4,0 mm. electrosoldadas, con separadores tipo estrella en toda su longitud a cada 250 mm.

El control operativo del colector, tienen tecnología de punta orientada a maximizar la vida útil del material filtrante, a racionalizar el consumo de aire comprimido, a eliminar las variaciones que el filtro pueda introducir al proceso y a conservar la gestión ambiental. Logrando formación adecuada de precapa y manteniendo la superficie de la manga, en el nivel adecuado de colmatación y realizando los ciclos de limpieza estrictamente necesarios, únicamente en la cantidad de elementos filtrantes que se requieran. Manteniendo un valor de caída de presión constante en el filtro.

El depurador de aire y/o filtro de mangas está compuesto por dos secciones, la sección inferior del filtro, donde ingresa el flujo de aire con partículas, someténdolo a un proceso de separación por medio de un deflector, el cual por gravedad caen las partículas de mayor tamaño a la tolva de configuración piramidal, y las de menor tamaño son absorbidas por las mangas filtrantes con canastillas, a través de éstas pasa el gas limpio para ser entregado a la sección superior del filtro, donde se recolecta el flujo de aire depurado para su evacuación por medio del VTI (ventilador centrífugo de tiro inducido), a la atmósfera,

además, en esta se ubican los tubos de pulsión, las válvulas de alto flujo, los controles de accionamiento o disparo y lámina portamangas.

### 2.1.2 Ventilador centrífugo

En los procesos industriales como en la fabricación de cemento, se utilizan ventiladores de tipo centrífugo, para vencer las altas resistencias provocadas por las caídas de presión de los equipos, a través de los cuales circulan los gases o el aire que manejan los ventiladores, el impulsor se diseña para que, de manera conjunta con la velocidad de rotación conveniente, produzcan la fuerza necesaria para el movimiento de gases.

Se considera el equipo fundamental para que el filtro de mangas mantenga su rendimiento óptimo, puesto que es el que genera la caída de presión para que el flujo de aire circule por los conductos y realice la filtración, separando las partículas de harina cruda del flujo de aire.

El flujo de aire que es separado en la filtración, circula por el ventilador centrífugo ya como aire limpio, este flujo no contiene material particulado por tanto las partes internas del ventilador no sufren desgastes considerables. A sí mismo, el ventilador, por tener características de grandes caudales, presiones y velocidad del flujo, es conectado a una chimenea, la cual, a cierta altura, según diseño, evacuará el flujo de aire limpio a la atmosfera, el ventilador centrífugo fue diseñado por la compañía Jiangsu Jintongling Fluid Machinery Technology Co., Ltd. (conocida en el gremio cementero como JTL), para CEMENTOS DEL ORIENTE S.A. ver figuras 2-4 y 2-5, está compuesto por componentes mecánicos y por un motor de alimentación eléctrica, ver Tabla 2-2.

**Tabla 2-2.** Valores y Características, Ventilador Centrífugo

CARACTERISTICAS	UNIDAD	FILTRO MOLINO DE CRUDO
Velocidad de rotación	r/min	1776
<b>Volumen de aire</b>	<b>am3/hora</b>	<b>60.000</b>
<b>Presión total</b>	<b>Pa</b>	<b>3800</b>
<b>Atmosférica</b>	<b>Pa</b>	<b>74680</b>
Temp. Máxima de trabajo	°C	180
<b>Densidad media</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>0.55</b>
Potencia en el eje	Kw	76.5
Potencia motor	Kw	110
Voltaje	V	440
Vel. Rotación motor	r/min	1782

Fuente: Elaboración propia

Nota: Valores de operación, filtro de mangas para el molino de masas vertical.

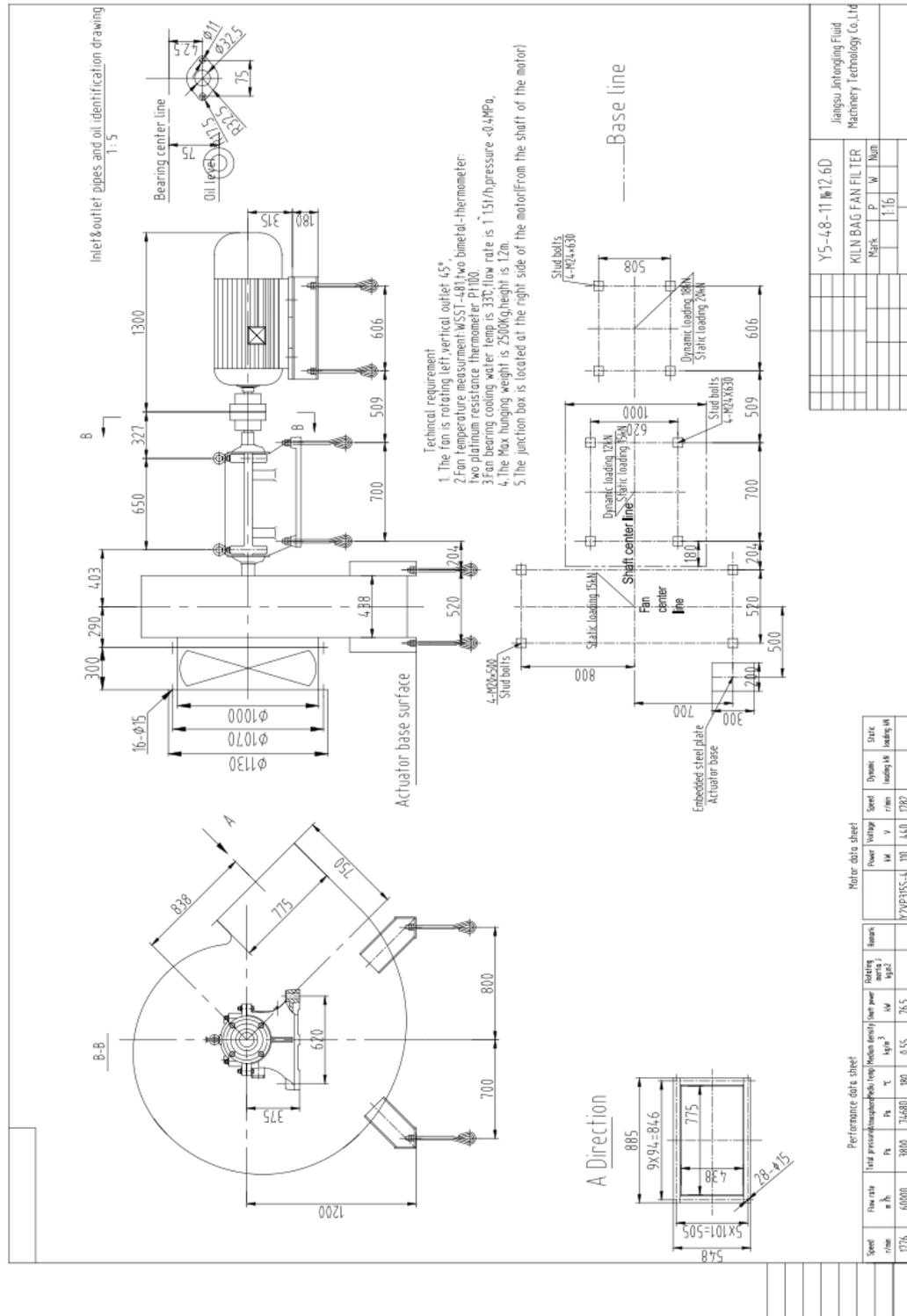
**Figura 2-4.** Ventilador Centrífugo



VENTILADOR  
CENTRÍFUGO

Fuente: Tomado de Autor, Empresa Cementos del Oriente S.A. (2020) Sogamoso

**Figura 2-5.** Plano General Ventilador Centrífugo Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.



Fuente: Tomado de Archivo Departamento de Proyectos, Empresa Cementos del Oriente S.A.

### **2.1.3 Ducto de salida o chimenea.**

Para la evacuación del flujo de aire ya filtrado y por medio del ventilador centrífugo el cual extrae el aire, se realiza por medio de un ducto o chimenea de construcción cilíndrica con materiales metálicos, es en este equipo es donde se realizará la instalación del prototipo de turbina esférica.

Como ya es mencionado en el capítulo 1, la forma de construcción de una chimenea varía según su altura y forma, pero se deben tener en cuenta las normas o códigos dispuestos por la zona y la localización donde se construya dicho equipo. Para este proyecto, la chimenea está regida por el (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010), indica que; de acuerdo con lo establecido en el artículo 70 de la Resolución 909 del 2008 o la que la adicione, modifique o sustituya, se adopta la aplicación de Buenas Prácticas de Ingeniería para la determinación de la altura de la chimenea, metodología que obedece al análisis de diferentes variables que involucran las condiciones del entorno de la fuente de emisión. Dentro de estas condiciones se incluyen las dimensiones de la estructura en la cual se encuentra la fuente de emisión y de las estructuras cercanas, la dirección predominante del viento en la zona y la influencia que pueden tener las estructuras cercanas en la dispersión de los contaminantes emitidos por la fuente.

La aplicación de Buenas Prácticas de Ingeniería no contempla la determinación de frecuencias para recalcular la altura de la chimenea de las fuentes de emisión cuando se presenten variaciones de las condiciones del entorno.

Para el proyecto, la chimenea se encuentra en la parte final del sistema de filtrado, ver Figura 2-6, el cual evacua el aire limpio ya sustraído por el ventilador centrífugo y emitido a la atmosfera cumpliendo con todas las normas.

Este equipo está construido en secciones por material metálico, lamina hot roller A-36, con uniones pernadas grado 8.8. anclado en su base a una cimentación en concreto.

**Figura 2-6.** Chimenea Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.



Fuente: Tomado de Autor, Empresa Cementos del Oriente S.A. (2020) Sogamoso

Constituida por 7 secciones de altura individual de 4806 mm, una corona con altura de 2402 mm, para una altura total de 36.065 mm y un diámetro interno de 1500 mm, en la parte inferior es conectada con el ventilador mediante un ducto rectangular.

### 2.1.4 Características del flujo de aire actual en la circulación de la chimenea.

Como referente principal para el proyecto, y con base en la chimenea ya descrita anteriormente, se aplicarán los estudios del flujo de aire realizados por la empresa CEMENTOS DEL ORIENTE S.A., teniendo en cuenta un informe de monitoreo ambiental realizado por la compañía A&MA ASISTENCIA & MONITOREO AMBIENTAL LTDA. para la simulación en CFD.

Según Cementos del Oriente S.A., (2017) las emisiones generadas por la planta están compuestas por contaminantes como material particulado (MP), Óxidos de Azufre (SO<sub>2</sub>) y Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), estas han sido cuantificadas por medio de monitoreo isocinetico en chimenea, aplicando los métodos 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8 de la EPA (USA) establecidos y aprobados por la legislación ambiental colombiana. Composiciones químicas del flujo de aire que no se estudiaran en esta investigación, arrojando datos de propiedades del flujo de aire discriminados en la tabla 2-3:

**Tabla 2-3.** Características del Flujo de Aire en la Chimenea

CARACTERISTICAS	UNIDAD	FILTRO MOLINO DE CRUDO
ALTURA	mm	30.065
DIÁMETRO	mm	1500
DIÓXIDO DE CARBONO	%	4.5
OXIGENO	%	16.5
MONÓXIDO DE CARBÓN	%	0.0
NITRÓGENO	%	79.0
HUMEDAD	%	3.1
TEMPERATURA	°C	83.7
<b>VELOCIDAD</b>	<b>m/s</b>	<b>9.54</b>
CAUDAL ESTÁNDAR	m <sup>3</sup> /s	13.22

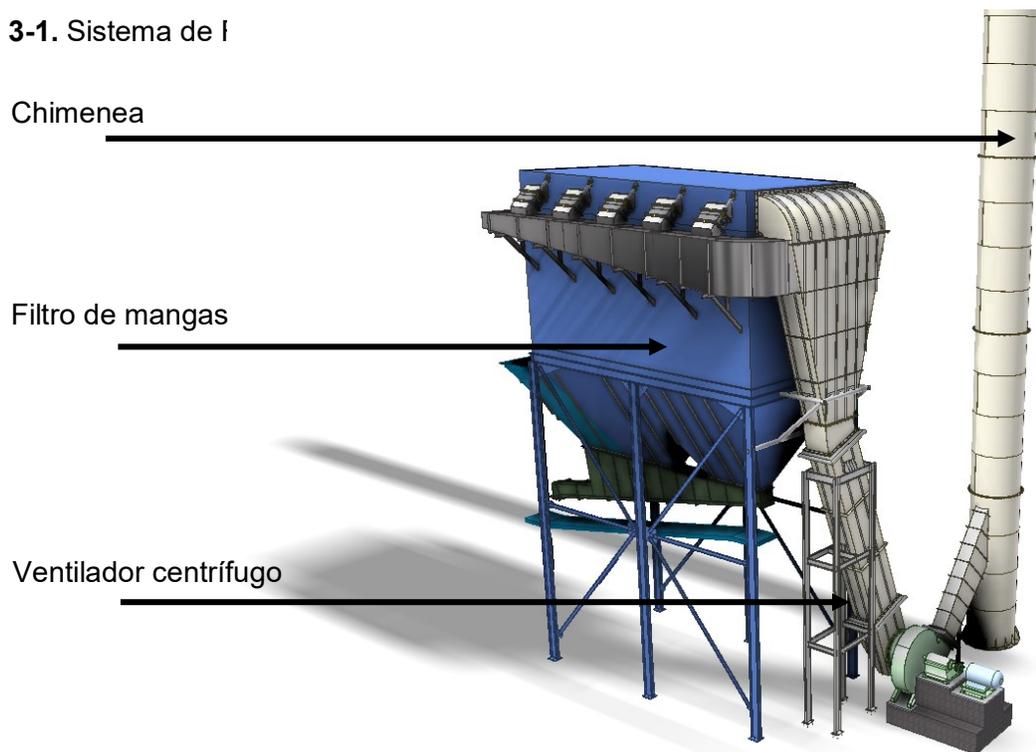
Fuente: Elaboración propia

Nota: Datos estipulados en el PROTOCOLO PARA EL CONTROL Y VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA POR FUENTES FIJAS en su método 2, DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD Y TASA DE FLUJO VOLUMÉTRICA DE GASES EN CHIMENEA (TUBO PITOT TIPO S), el cual describe que la velocidad de la chimenea debe estar sobre un rango cercano a los 15 m/s y un mínimo de 5 m/s, aplicable en todo el territorio nacional.

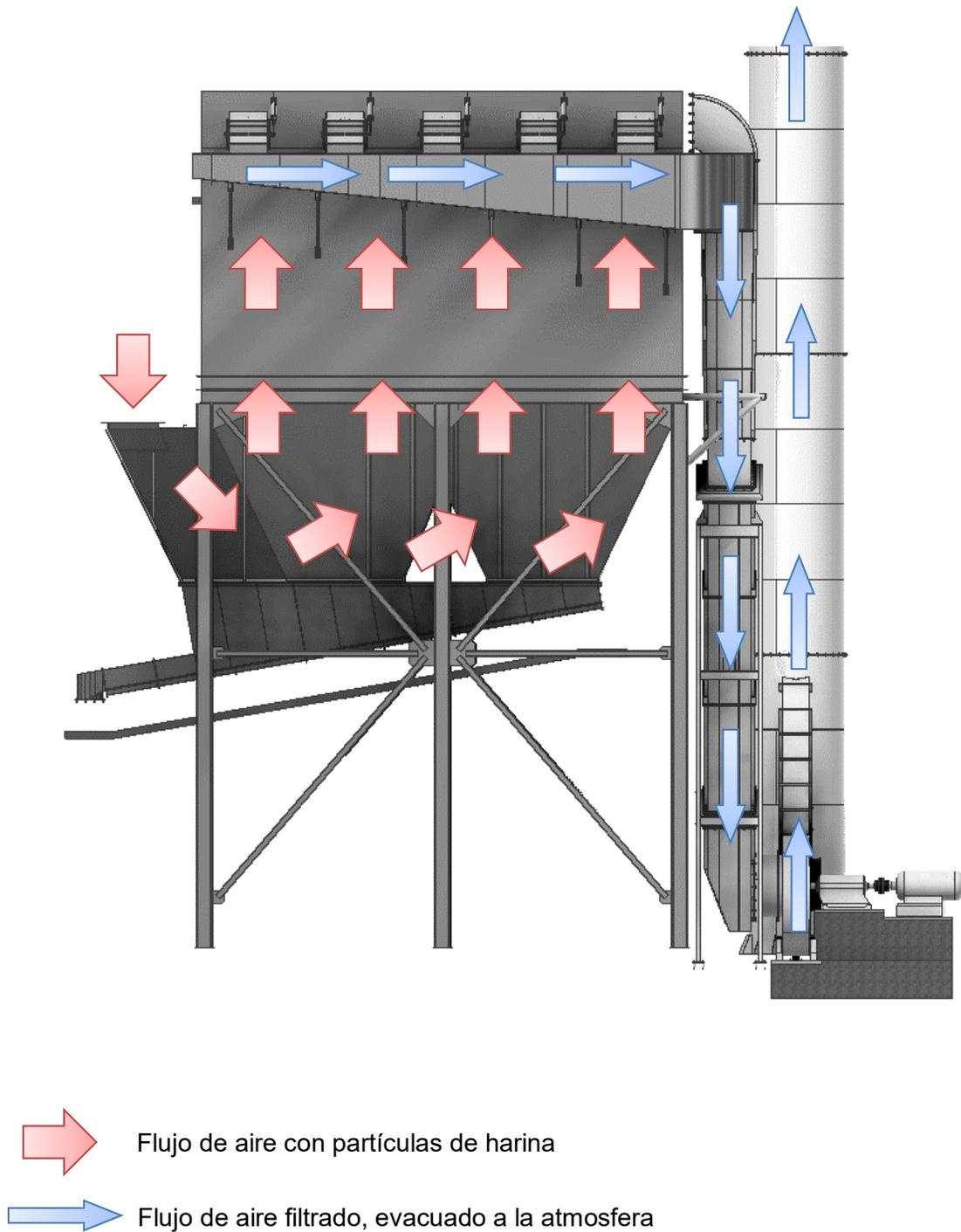
### 3. Modelado en CAD del filtro de mangas, chimenea y turbina esférica

Seleccionado el proceso y los equipos que intervienen en el proyecto, se realiza un levantamiento en campo de cada uno de ellos y se modela en mediante un software de diseño especializado en sistemas mecánicos AUTODESK INVENTOR, ver Figura 3-1, y un esquema de recorrido del flujo a través del filtro, ver Figura 3-2.

**Figura 3-1.** Sistema de I



Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

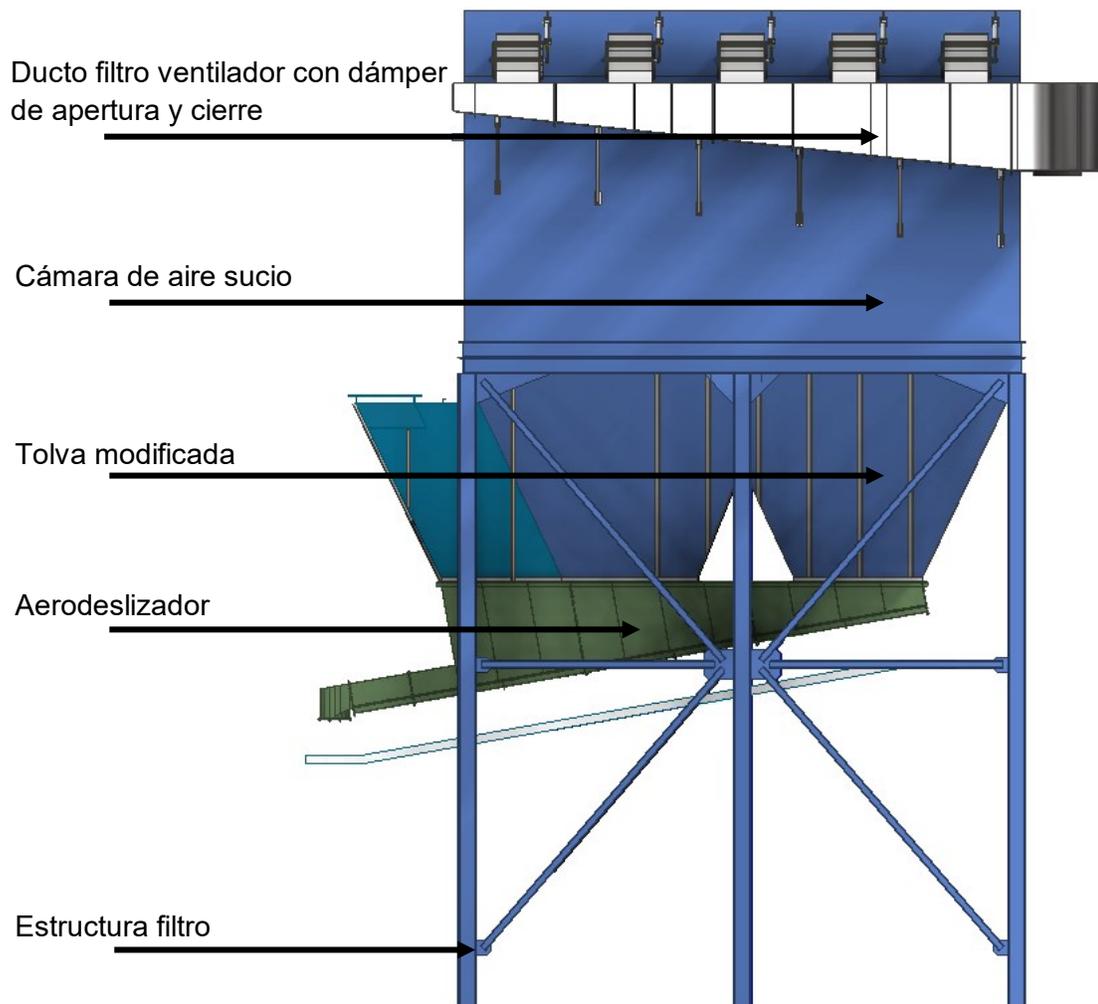
**Figura 3-2.** Sentido del Flujo de Aire en la Molienda de Crudo.

Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

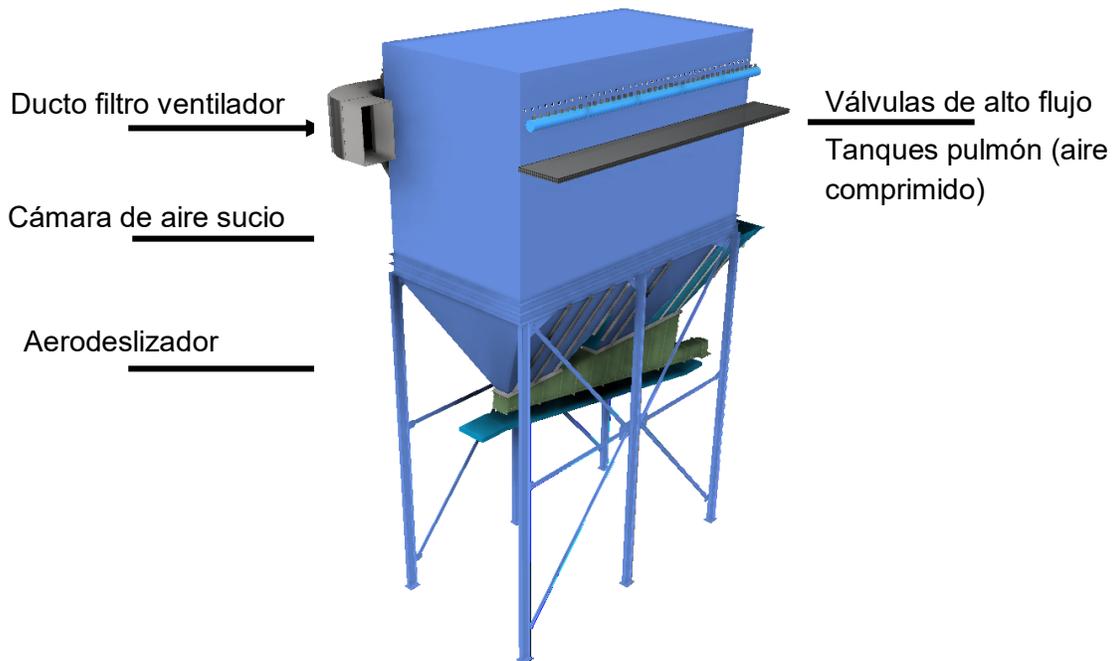
### 3.1 Filtro de mangas

Mencionado en el capítulo 2, dando explicación de su ubicación en el proceso, componentes y principio de operación, se muestra el resultado de la digitalización en el software AUTODESK INVENTOR, con unos cambios en su salida de aire limpio, tolva descarga de material particulado, con respecto al plano original de la compañía NANTONG XINYE M&E ENVIRONMENT PROTECTION EQUIPMENT CO., LTD, ver figuras 3-3, 3-4 y 3-5.

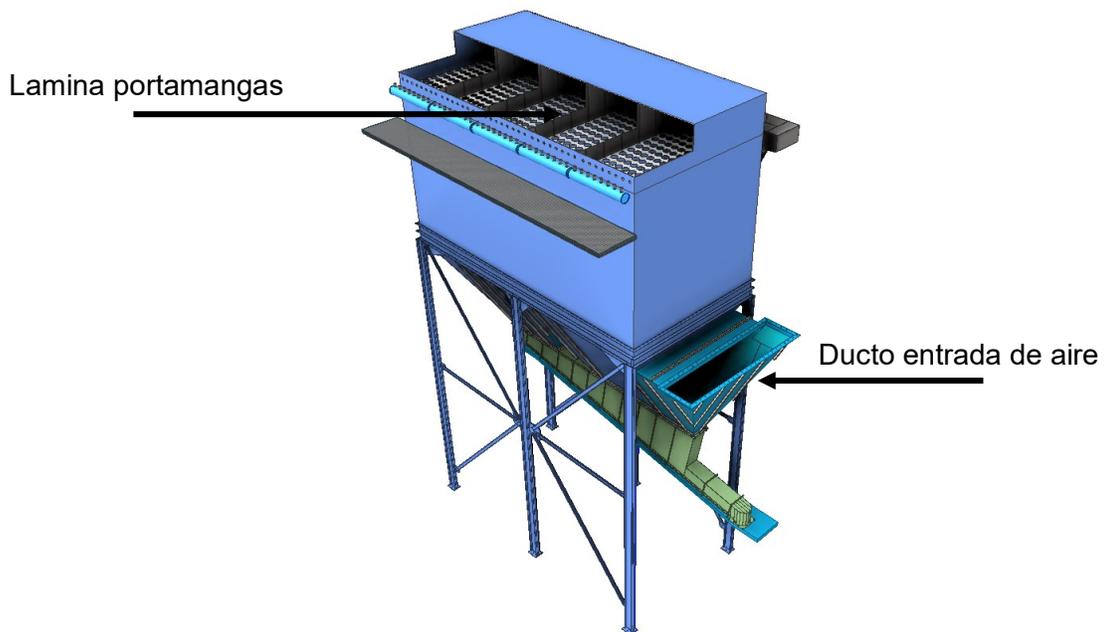
**Figura 3-3.** Vista Alzado Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.



Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

**Figura 3-4.** Vista Isométrica Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.

Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

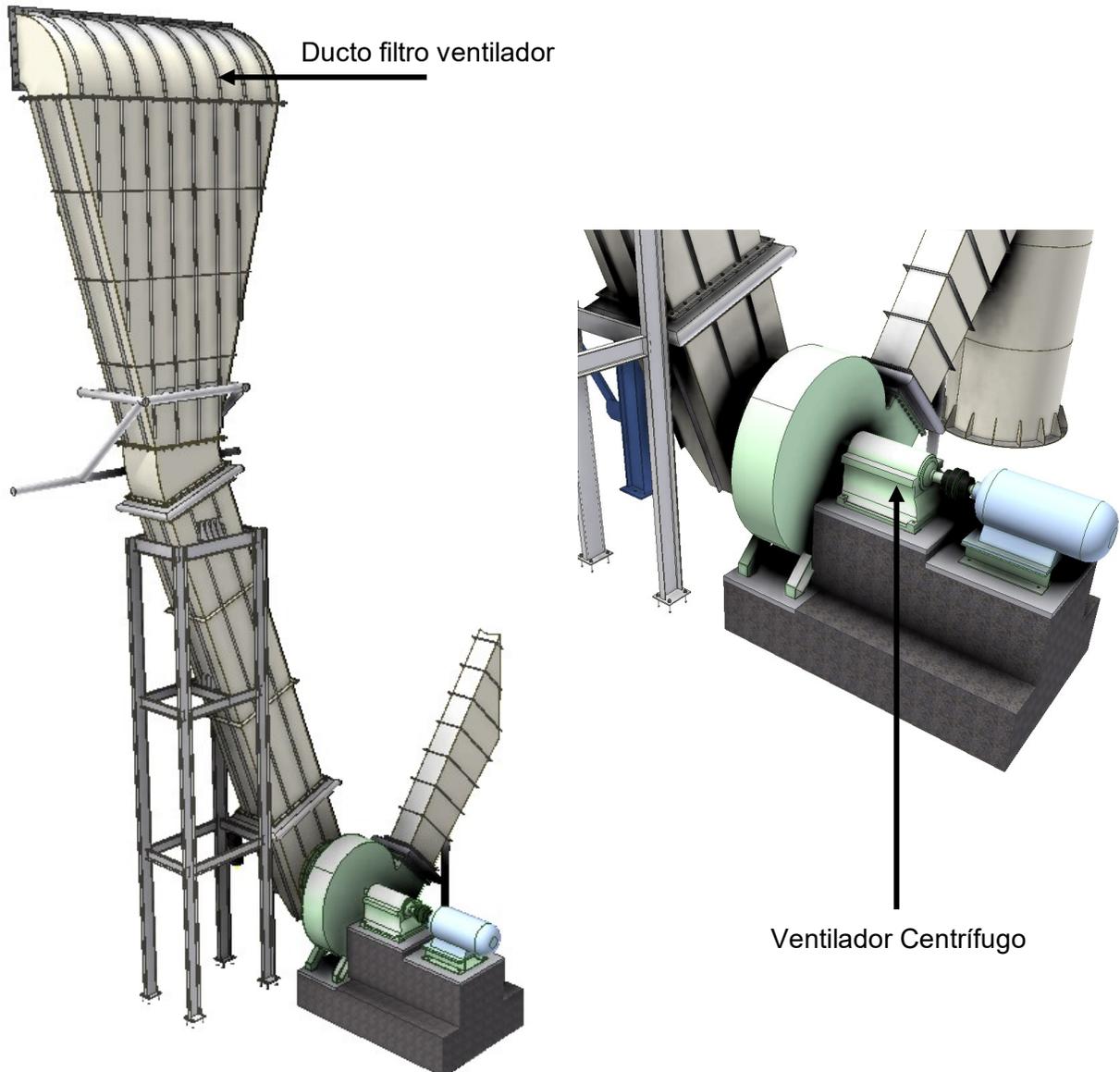
**Figura 3-5.** Vista Isométrica Filtro de Mangas, Molienda de Crudo.

Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

### 3.2 Ducto filtro a ventilador y ventilador centrífugo

Es un ducto conectado al filtro de mangas en la cámara de aire limpio con formas rectangulares, cónicas y descarga al ventilador centrífugo, ver Figura 3-6.

**Figura 3-6.** Vista isométrica ducto salida de aire y ventilador centrífugo, molienda de crudo.

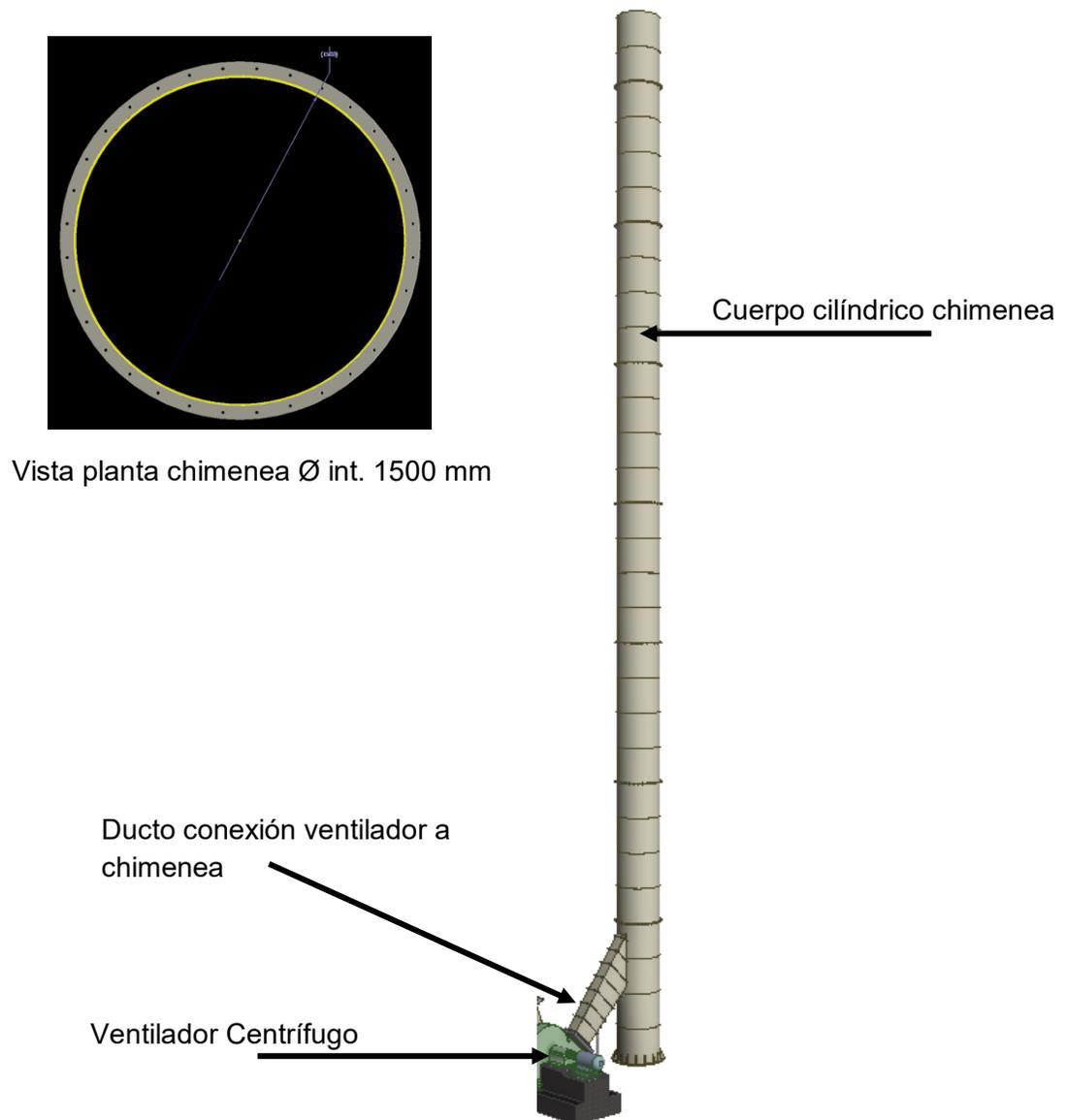


Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

### 3.3 Chimenea

Cuerpo cilíndrico mencionado en el capítulo 2, ducto de salida o chimenea, ver Figura 3-7, conectado en el ventilador centrífugo para direccionar el flujo de aire filtrado. Este equipo es donde se ubica el prototipo de turbina esférica, el cual será base para este proyecto.

**Figura 3-7.** Vista Planta e Isométrica Chimenea, Molienda de Crudo.



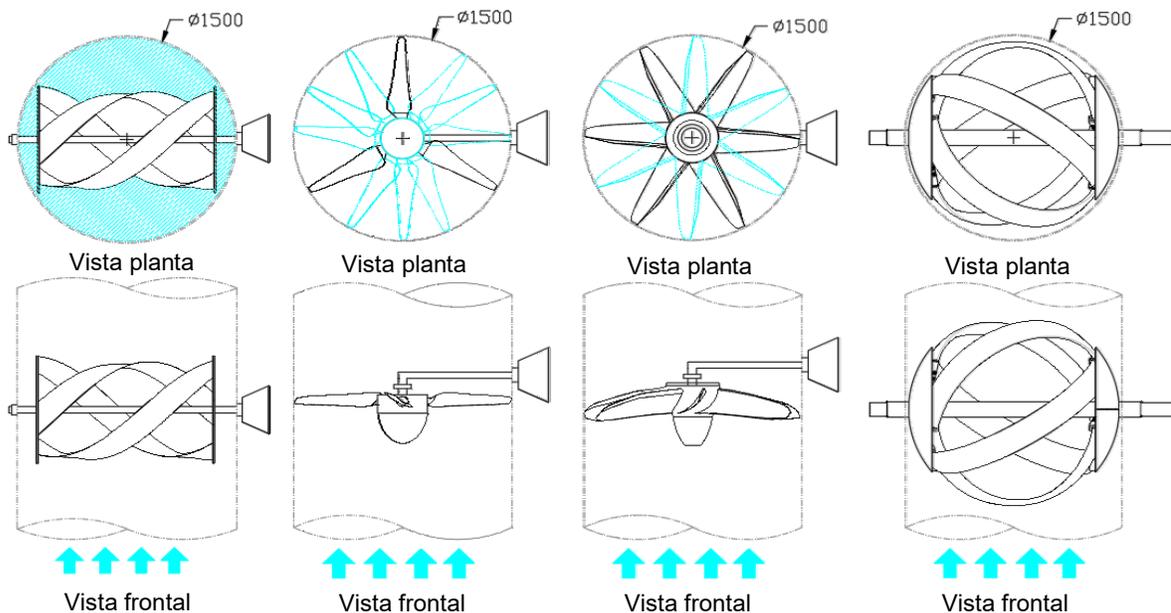
Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

### 3.4 Turbina esférica

Se adopta el diseño de una turbina esférica universal con eje de rotación sesgado, con geometría adaptable para cualquier tipo de fluido, con propiedades de operación en múltiples direcciones del flujo, según Gorlov, (2015), “una turbina de reacción esférica es ventajosa porque, su diseño, siempre permanece simétrico al flujo, además, en el campo de la ingeniería mecánica, un marco esférico es potencialmente al marco tridimensional más fuerte y confiable”.

Esta forma esférica se plantea en el proyecto por el diseño constructivo de las chimeneas, ya descrito anteriormente, donde se instala la turbina la cual se someterá para el análisis en CFD, en consecuencia, por la forma y la descripción de optimización de la turbina, se comparan en forma gráfica, diferentes clases de turbinas tratando de demostrar lo designado por Gorlov y en la chimenea seleccionada, ver Figura 3-8, dando lugar para su implementación y análisis computacional CFD.

**Figura 3-8.** Tipos de Turbinas en la Sección de la chimenea.



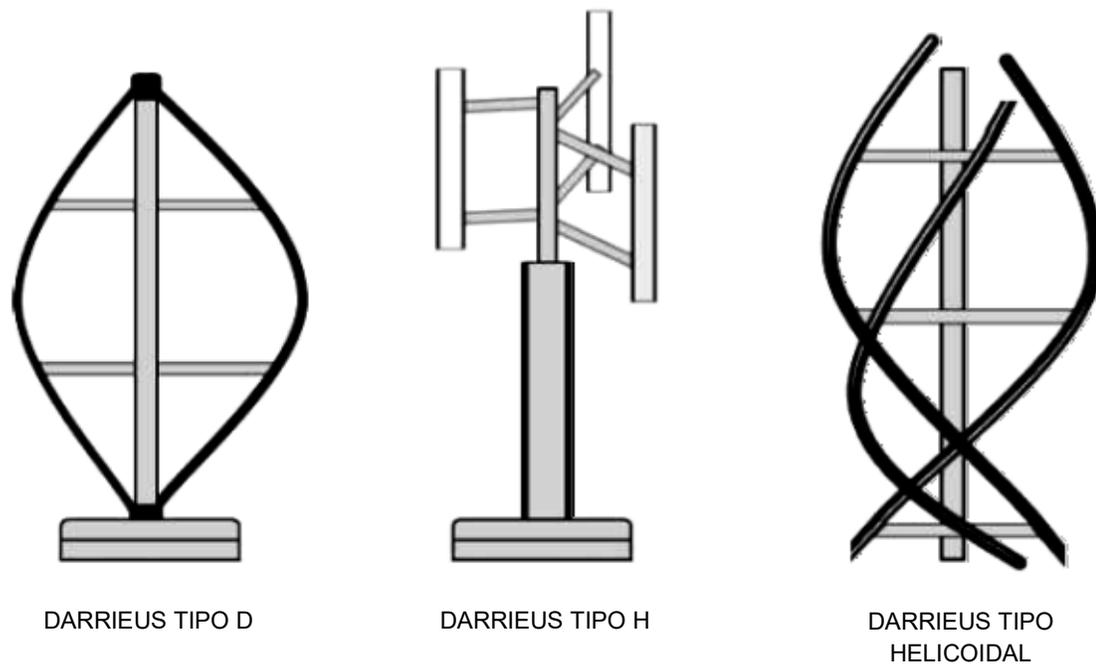
Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

### 3.4.1 Antecedentes de la turbina esférica

El desarrollo de la turbina esférica, parte base de una turbina tipo DARRIEUS de eje vertical clasificada como tipo “D”, ver Figura 3-9, inventada por el ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus, una de las cualidades no a favor, es que existen grandes dificultades para proteger la turbina de las condiciones de viento extremas y para que se inicie automáticamente.

En los años 70 aparece una modificación del diseño original de turbina Darrieus, clasificada como tipo “H”, compuesta por tres álabes con eje vertical, realizadas por el ingeniero Ulrich Stampa, este mismo le proporciona a la turbina Darrieus tipo “H”, ver Figura 3-9, un ángulo en las aspas para mejorar su rendimiento y arranque automático, creando un tercer tipo de turbina Darrieus tipo “Helicoidal”. (Carlos et al., 2017)

**Figura 3-9.** Tipos de Construcción para Turbinas Tipo Darrieus.



Fuente: Tomado de (Carlos et al., 2017)

Esta clase de turbina y sus derivados, fueron aplicados inicialmente para la generación de energía eléctrica a partir de un flujo de aire en zona abierta, para aprovechar las

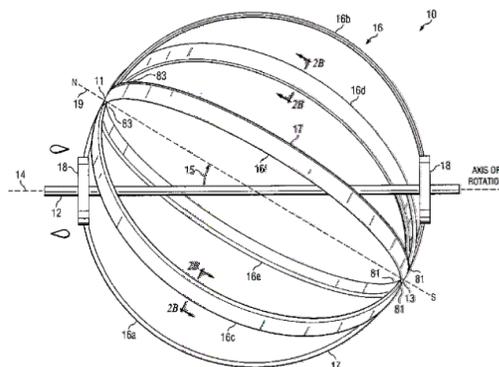
propiedades mecánicas del viento en ciertos lugares que cumplan las condiciones para que esta turbina tenga su óptimo rendimiento.

El científico Alexander M. Gorlov, inicia sus investigaciones con la turbina Darrieus tipo “Helicoidal”, pero aplicándola para flujos de agua abiertos, libres o por conductos direccionales, como los menciona en su patente US6155892A para los Estados Unidos de América.

Gorlov, (2000) describe un conjunto de turbina helicoidal, capaz de proporcionar una rotación unidireccional de alta velocidad, bajo un flujo de fluido multidireccional de altura ultra baja. El conjunto comprende una serie de unidades o módulos de turbinas helicoidales dispuestos, vertical u horizontalmente, para aprovechar, por ejemplo, agua o energía eólica. Cada unidad o módulo de turbina comprende una pluralidad de palas helicoidales que tienen un perfil aerodinámico. Los módulos para energía eólica pueden montarse en ejes giratorios, soportados por estructuras ligeras ancladas al suelo mediante cables de sujeción.

Según Gorlov, (2015) en primera apreciación de diseño define, que a pesar de las aparentes ventajas de las turbinas helicoidales, sería deseable proporcionar una turbina esférica universal, que sea absolutamente simétrica y funcione con cualquier fluido, por ejemplo, cualquier gas o cualquier líquido, a cualquier profundidad o altitud, y especialmente a altitudes relativamente altas como dentro de la troposfera. Ver Figura 3-10

**Figura 3-10.** Turbina Esférica, Alexander M. Gorlov.



Fuente: Tomado de la patente US8939708 USA, (Gorlov, 2015).

En el documento o patente propuesta por Alexander M. Gorlov, propone las características iniciales para su construcción, constituido por dos ejes, el eje de rotación principal de la turbina para su rotación meridional y el eje de los alabes a un ángulo oblicuo al eje de rotación, de inclinación mayor a 0 grados y menor a 180 grados, preferiblemente en un rango de 25 grados a 35 grados, asegurando que los alabes viajen en una trayectoria helicoidal con respecto al eje de rotación y a la dirección del flujo del fluido. Los extremos de los alabes, esta unidos fijamente en puntos diametralmente opuesto orientados al ángulo oblicuo al eje de rotación.

Los álabes de la turbina se pueden configurar en una disposición de aro completo de 360 grados, pueden incluir una combinación de dos secciones arqueadas hemisféricas de 180 grados. Cada uno de los álabes del meridiano de la turbina puede tener una sección transversal de lámina de aire cuyas dimensiones pueden ser constantes a lo largo de todo el meridiano o que puede tener una sección transversal de lámina de aire que es cónica, con una dimensión máxima en un punto medio, que es equidistante de los puntos norte y sur del eje meridiano geométrico, a una dimensión mínima en cada uno de los puntos norte y sur. El número de álabes de la turbina puede ser par o impar.(Gorlov, 2015).

Tahadjodi Langroudi et al., (2020) describen el cálculo numérico para seleccionar el número de álabes, señalando que depende de las fuerzas tangenciales en los álabes, a mayor número de álabes, la probabilidad de cavitación será alta, en consecuencia utiliza en su estudio un número determinado de álabes que servirá para realizar el modelo de turbina para este proyecto.

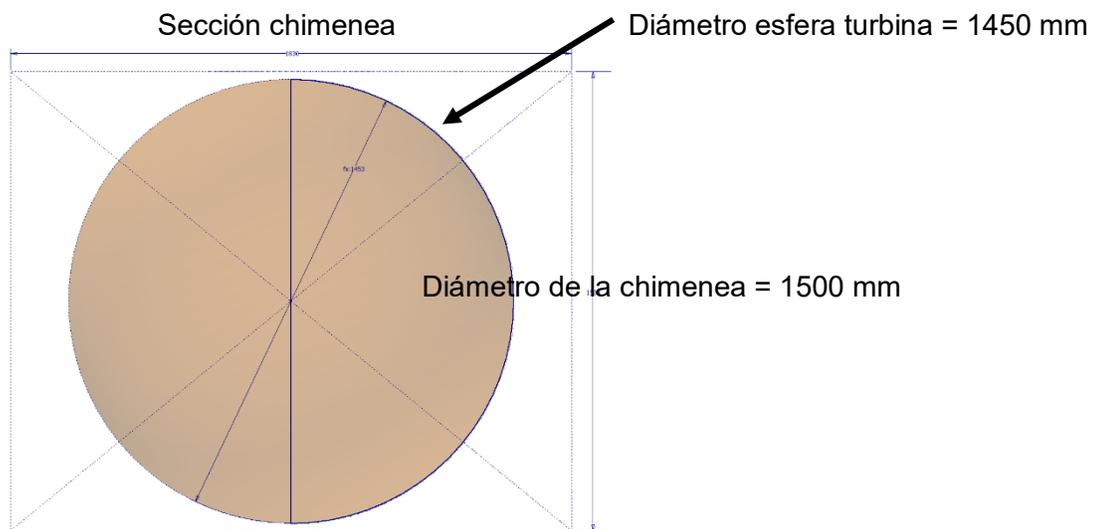
### **3.4.2 Modelado de la turbina esférica.**

El modelamiento se realiza por un software AUTODESK INVENTOR 2020, ya que ofrece un conjunto de herramientas fáciles de usar para diseño mecánico en 3D, documentación y simulación de productos. Es la herramienta ideal para diseño de detalle de dispositivos mecánicos de alta ingeniería, ya que logra validar los prototipos digitales por medio de análisis de elementos finitos y simulación dinámica.

### 3.4.2.1 Parámetros de la geometría

La configuración de la turbina viene dada por unos parámetros geométricos iniciales, como el diámetro de la turbina, la altura de la turbina y el número de álabes, esto compuesto bajo la forma de una esfera, en consecuencia, se debe iniciar con determinar el diámetro de incidencia para la turbina, ver Figura 3-11, este parámetro ya establecido por la chimenea seleccionada, la sección de la chimenea, tiene un diámetro interno de 1500 mm.

**Figura 3-11.** Área Esférica en la Chimenea



Fuente: Elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*)

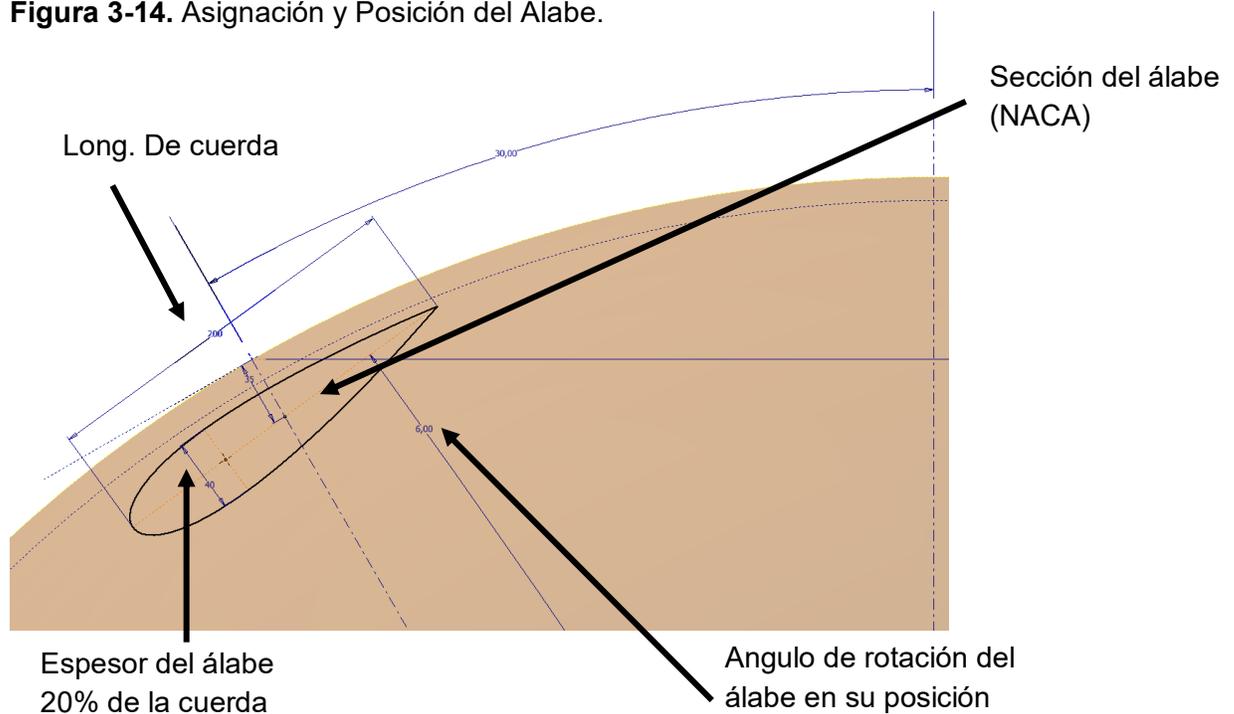
Se indica el ángulo de posición de los álabes respecto a la horizontalidad del eje de rotación, (Gorlov, 2015), recomienda asumirlos entre 25° y 35°, el modelo está definido en un ángulo promedio al rango propuesto por Gorlov, ángulo de 30°, ver Figura 3-12, este ángulo es planteado, su cálculo no se determina puesto que no está dentro de los procedimientos de este trabajo .



Definiendo el eje, se ubica la sección del álabes, con un ángulo rotacional de su punto medio o media de cuerda de  $6^\circ$ , para obtener un paralelismo con la esfera ya definida anteriormente, así se define un área externa de incidencia para el grupo de álabes de 1414 mm. en el modelo se toma un perfil aerodinámico (*Airfoil Tools*, 2020), referencia NACA de cuatro dígitos ver figuras 3-13 y 3-14, su cálculo no se determina puesto que no está dentro de los procedimientos de este trabajo.

NACA (National Advisory Comitee for Aeronautics, en sus siglas en inglés) es el comité aerodinámico para perfiles de diferentes tamaños y formas. Para nuestro caso se determina por la serie de 4 dígitos. donde el primer dígito describe la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (% c). El segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque en 1/10 del porcentaje de la cuerda. Los dos últimos dígitos describen el máximo espesor como tanto por ciento de la cuerda, en el caso de que los dos primeros dígitos sean 0, se toma como un perfil simétrico.

**Figura 3-14.** Asignación y Posición del Álabes.



Fuente: Elaboración propia, (*Inventor*, Autodesk, 2020)

Al tener la posición de la sección del álabe referencia NACA, en la geometría de la esfera, se procede a realizar una revolución en tres dimensiones 3D a  $180^\circ$ , en las puntas con el acabado de dirección para el soporte del álabe en la estructura de la turbina, ver Figura 3-15.

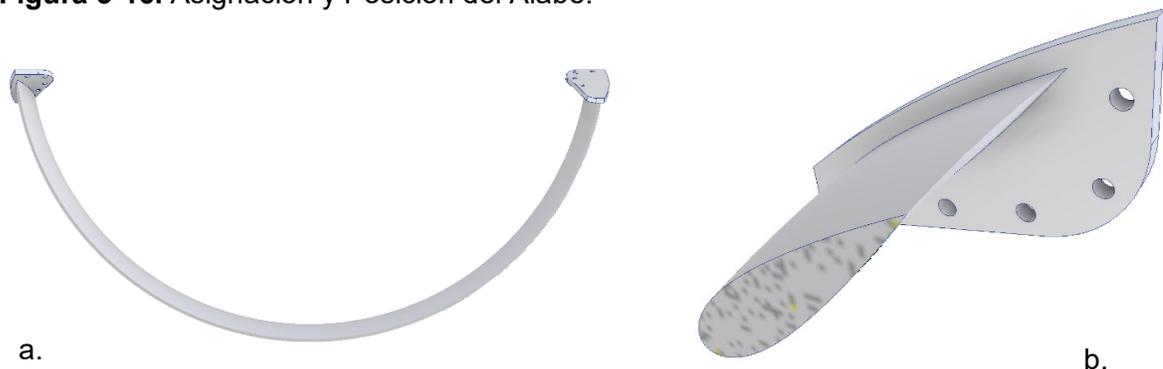
**Figura 3-15.** Revolución en tres dimensiones se la sección de álabe.



Fuente: a. Vista alzado b. Vista isométrica, elaboración propia, (Inventor, Autodesk, 2020)

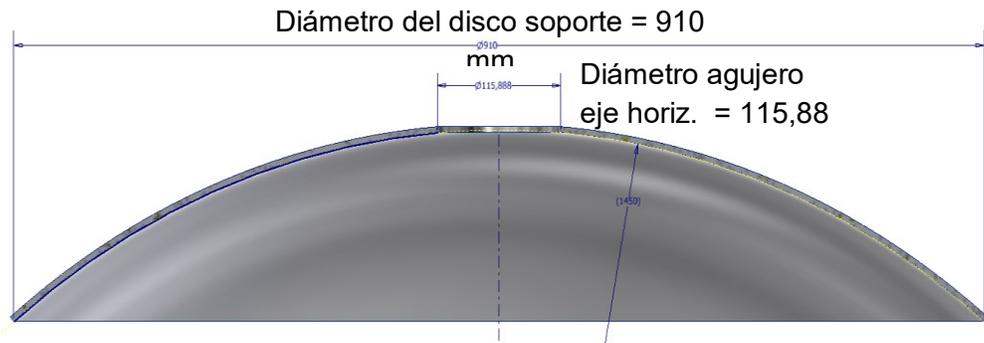
En las puntas de los álabes se incluyen placas con agujeros para los pernos y/o tornillos, esto servirá de acople para la estructura de la esfera, ver Figura 3-16.

**Figura 3-16.** Asignación y Posición del Álabe.



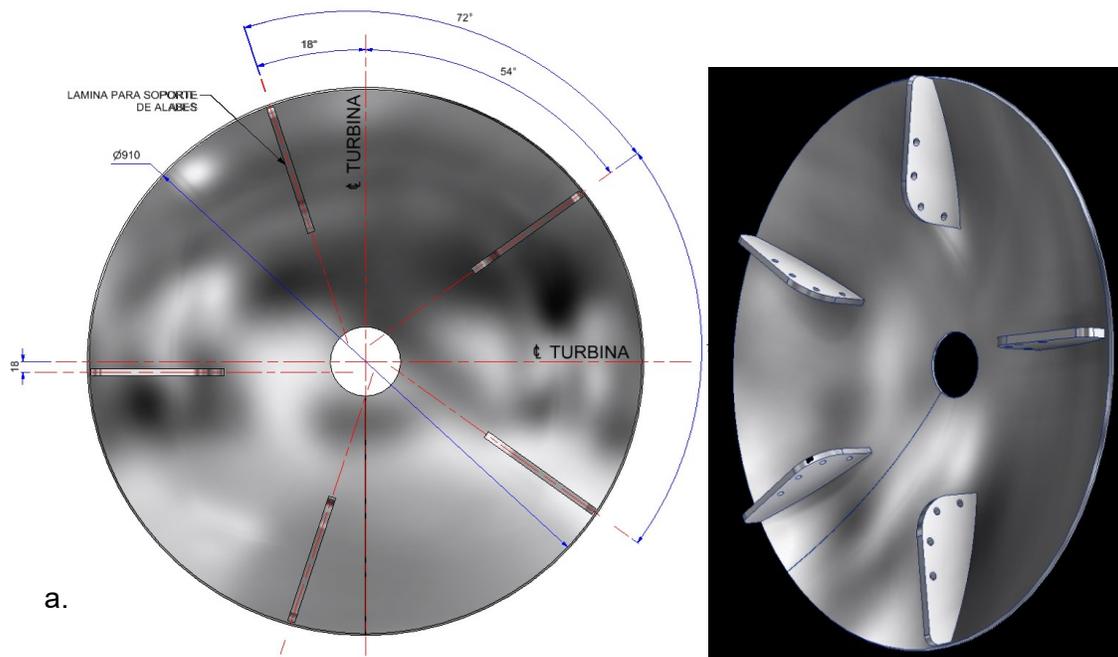
Fuente: a. Vista alzado álabe con placas, b. Vista sección isométrica del álabe con placa soporte, elaboración propia, (Inventor, Autodesk, 2020)

Para la estructura, se emplea un disco cóncavo con un agujero en centro para el eje horizontal, ver Figura 3-17.

**Figura 3-17.** Asignación y Posición del Ábabe.

Fuente: a. Vista alzado ábabe con placas, b. Vista sección isométrica del alaba con placa soporte, elaboración propia, (Inventor, Autodesk, 2020)

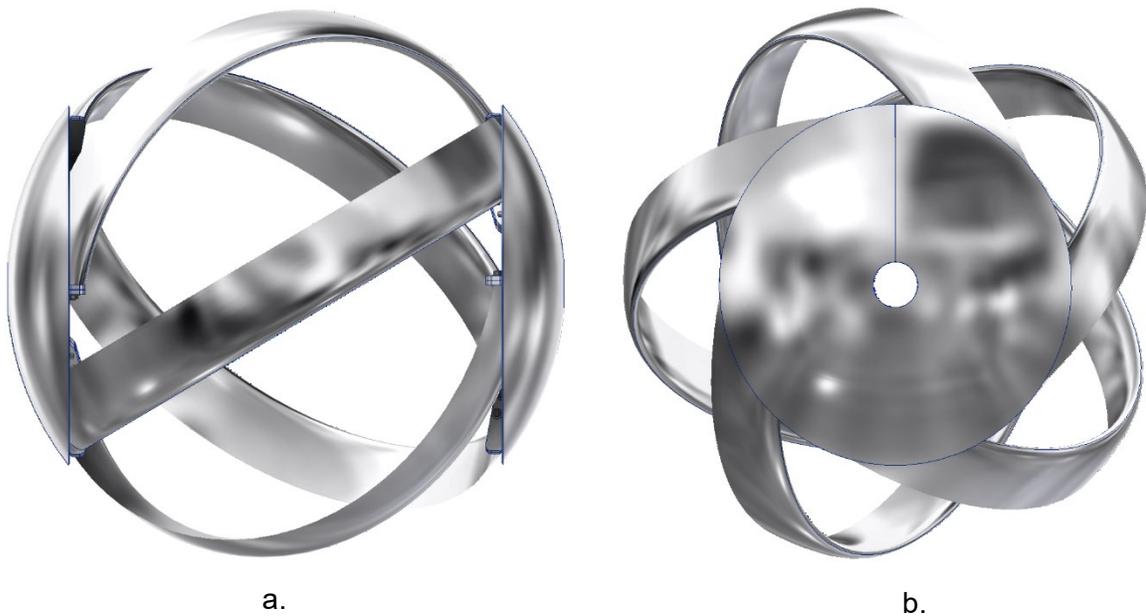
En este mismo disco se instalan placas para el soporte o montaje de los álabes, las placas están perforadas para la instalación de pernos y/o tornillos, ver Figura 3-18.

**Figura 3-18.** Disco Cóncavo con Placas de Soporte.

Fuente: a. Vista frontal disco con posición de las placas, b. isométrico disco con placas, elaboración propia, (Inventor, Autodesk, 2020).

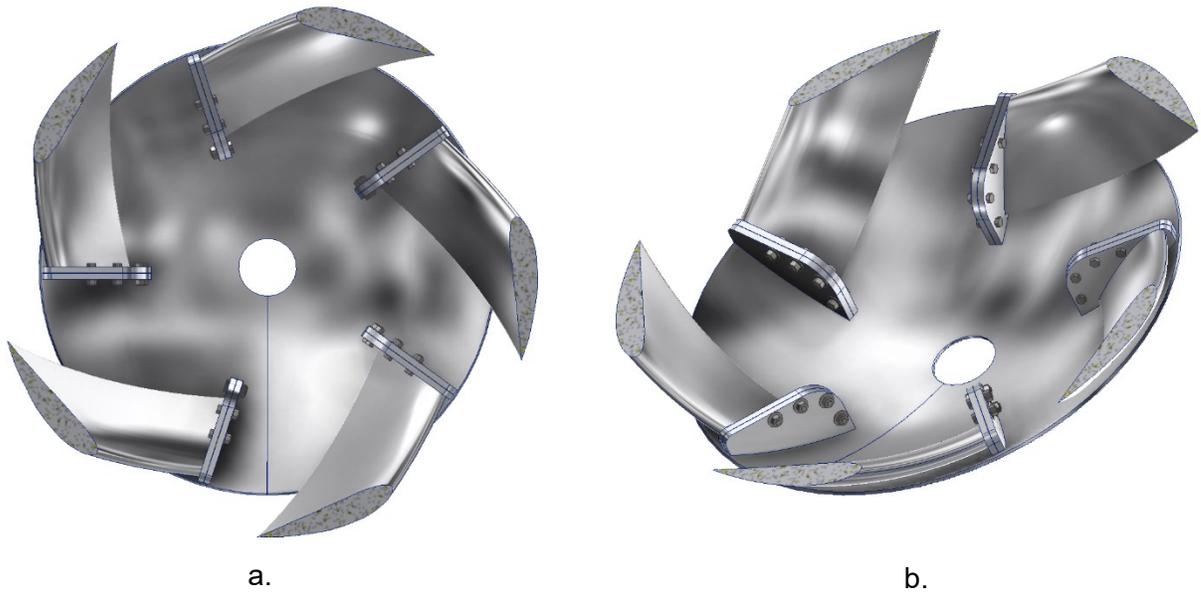
En el disco cóncavo con las placas soporte, se instalan 5 álabes con sus respectivas placas de fijación, puesto que por el tamaño del perfil aerodinámico y según las investigaciones que se analizan en el capítulo 4, son las más apropiadas para la búsqueda de un rendimiento óptimo de la turbina, ver figuras 3-19 y 3-20, según Gorlov la cantidad de álabes para turbina, está determinada por su tamaño (diámetro de diseño) y la forma del ábabe que se esté estudiando, ya que el propone álabes cilíndricos, planos y aerodinámicos.

**Figura 3-19.** Ensamble disco Cóncavo y Álabes.



Fuente: a. Vista frontal turbina con disco y álabes, b. Vista lateral turbina con disco y álabes, elaboración propia, (Inventor, Autodesk, 2020)

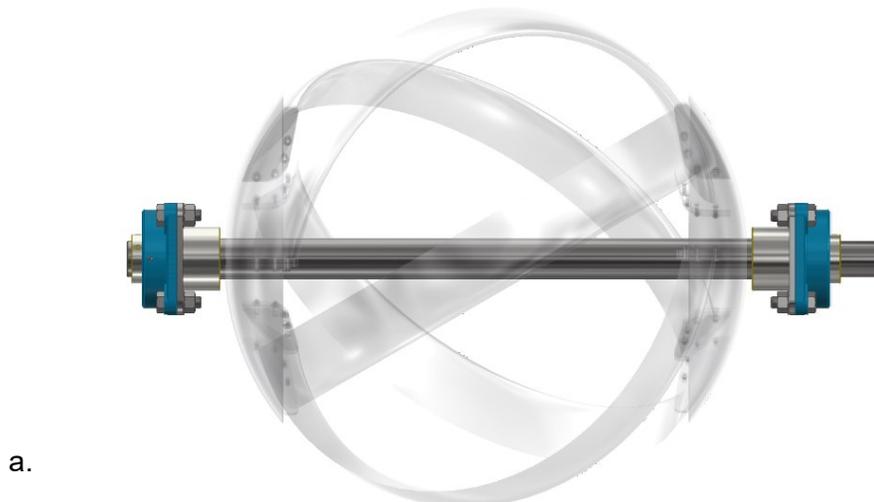
**Figura 3-20.** Vista Sección de Fijación Disco Cóncavo y Álabes.

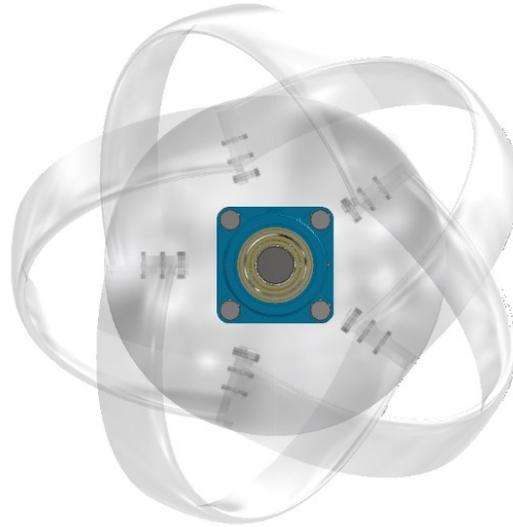


Fuente: a. Vista frontal disco con posición de las placas, b. isométrico disco con placas, elaboración propia, (Inventor, Autodesk, 2020)

Para el soporte de la turbina se emplea un eje horizontal macizo que atraviesa el cuerpo de la chimenea, con soportes por fuera de la misma, mediante chumaceras de tipo brida cuadrada, la fijación de las chumaceras va en una brida instalada en el cuerpo de la chimenea, con empaquetadura de caucho o similar, para que el flujo de aire de la chimenea no tenga fugas en la zona de instalación de la turbina esférica, ver figuras 3-21 y 3-22.

**Figura 3-21.** Eje Horizontal con Chumaceras de Soporte.

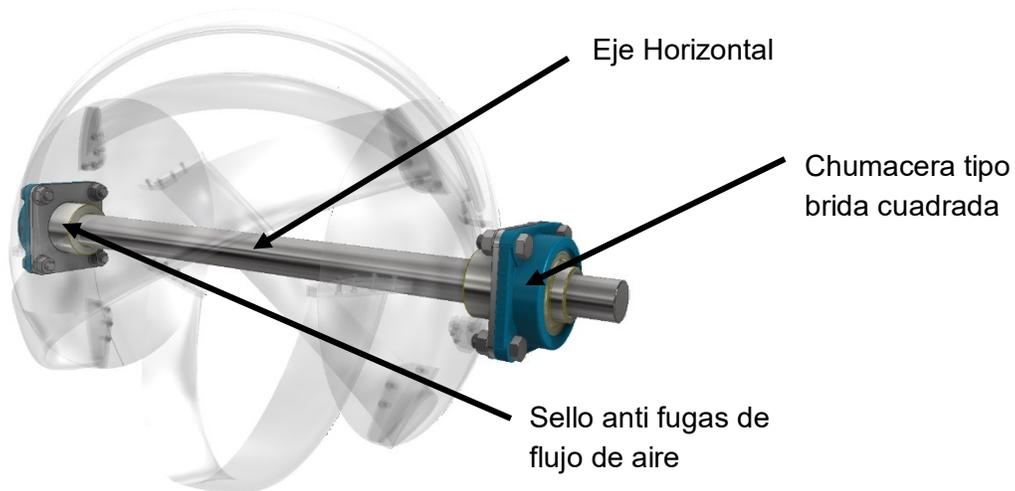




b.

Fuente: a. Vista frontal eje horizontal con chumaceras, b. Vista lateral eje horizontal con chumaceras, elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*).

**Figura 3-22.** Isométrico Eje Horizontal con Chumaceras de Soporte.

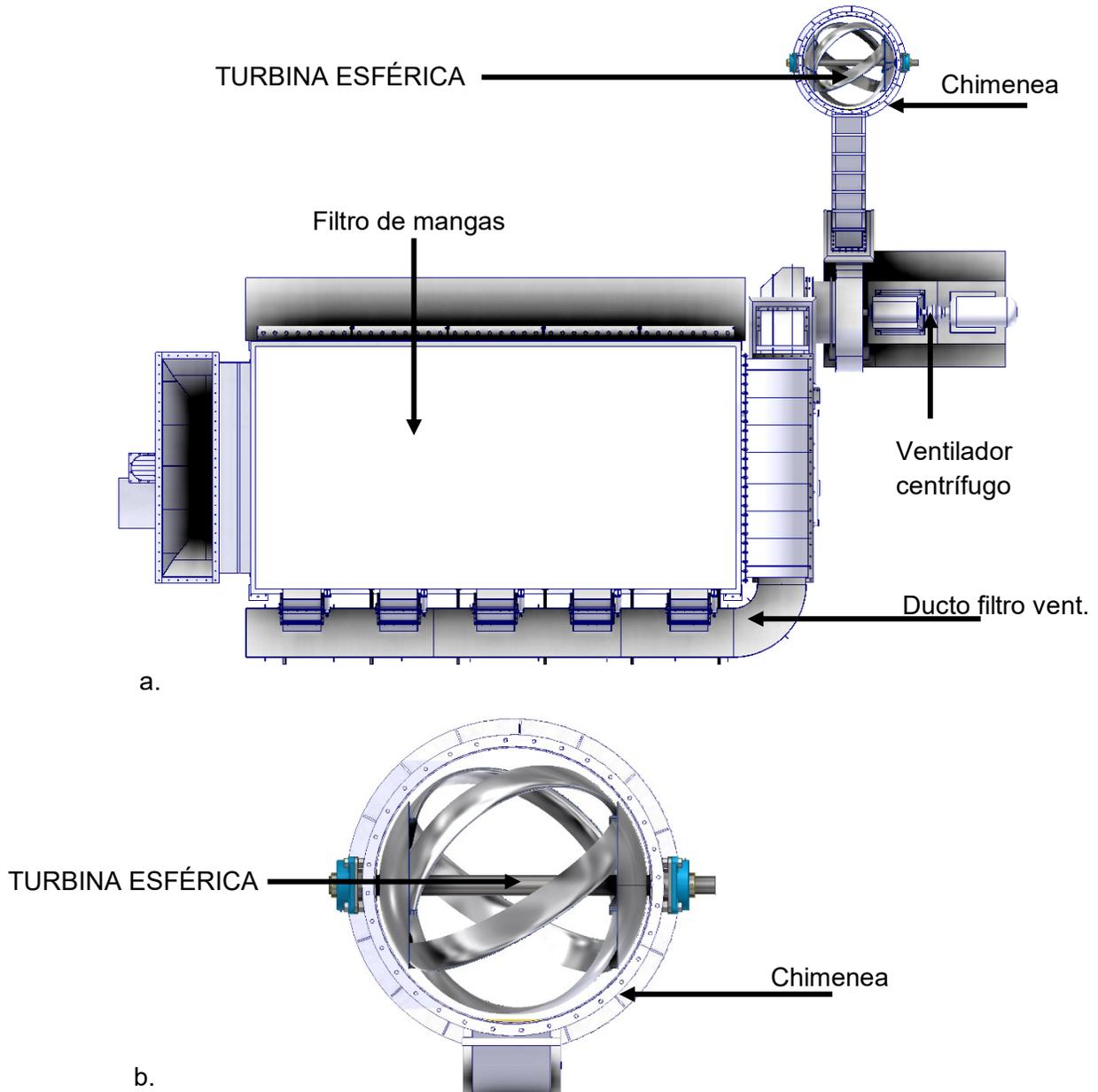


Fuente: elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*).

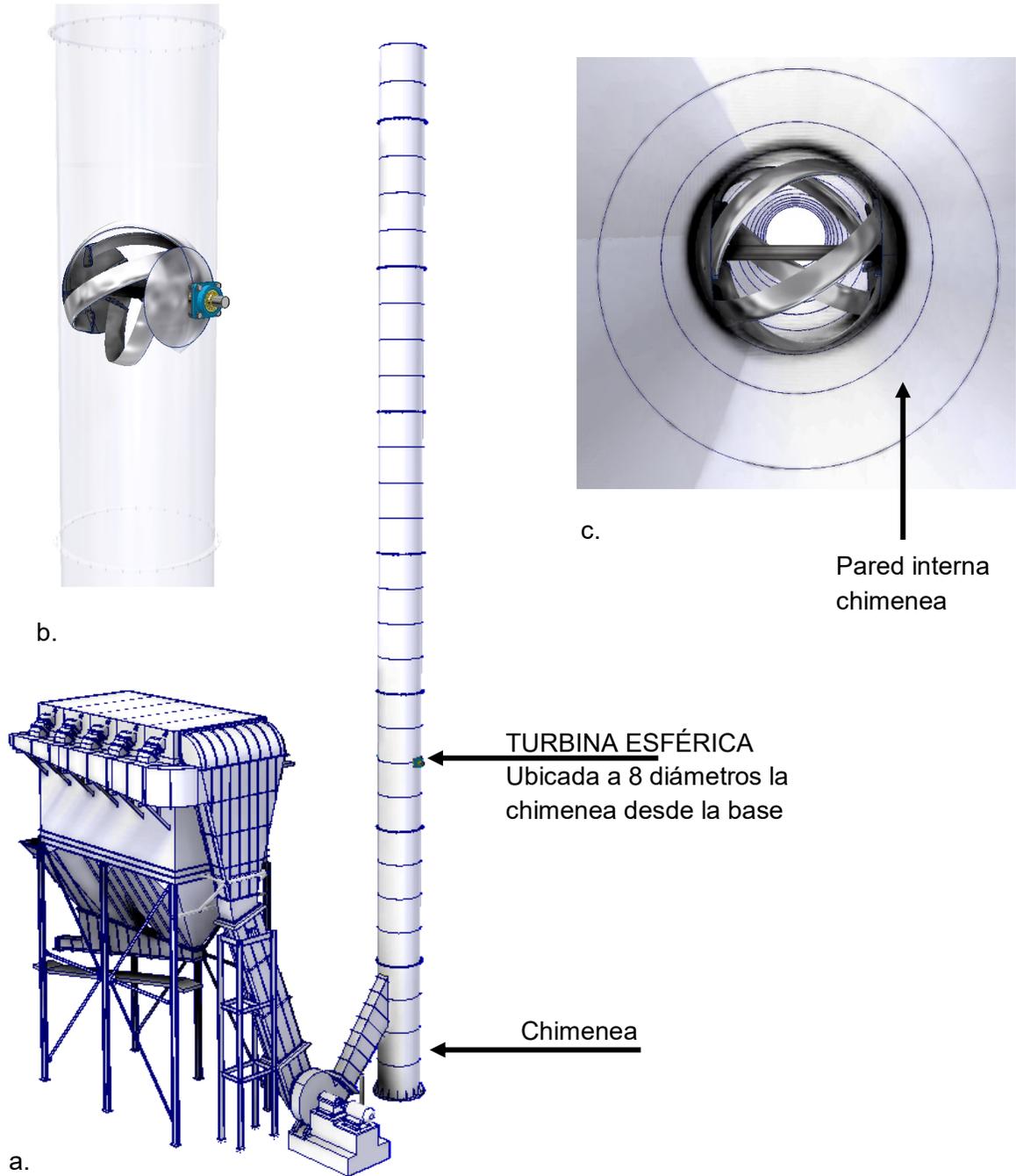
### 3.4.2.2 Vistas graficas de la turbina esférica en la chimenea

Las siguientes representaciones graficas muestran la turbina esférica acoplada con la chimenea en una altura probable, puesto que en el capítulo 5, se analizará el rendimiento de la turbina a una altura específica y así determinar un rendimiento óptimo para el análisis del proyecto, ver figuras 3-23 y 3-24.

**Figura 3-23.** Vista Planta Turbina Esférica Instalada en Proceso Seleccionado.



Fuente: a. Vista planta, b. detalle vista planta turbina esférica en chimenea elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*).

**Figura 3-24.** Vista Planta Turbina Esférica Instalada en Proceso Seleccionado.

Fuente: a. isométrico general, b. detalle de turbina esférica en sección de chimenea, c. vista perspectiva de la turbina dentro de la chimenea, elaboración propia, (*Inventor, Autodesk, 2020*).

Los planos de detalle para la construcción de la turbina se presentan en el ANEXO B.

## **4. Investigación y selección del tipo de álabe.**

La investigación parte a la aplicación de energías renovables y en función de aprovechar un flujo de aire producido por el mismo proceso de la industria, el estudio se enfoca en el fluido que evacuan las chimeneas en estos procesos industriales, descrito en capítulos anteriores.

Considerando que una de las bases principales de este proyecto es un flujo de aire, y ya seleccionada una geometría de turbina esférica, teniendo en cuenta de los numerosos estudios investigativos para las turbinas del tipo eje horizontal (HATT) y eje vertical (VATT), los estudios para las turbinas esféricas del tipo Gorlov son encaminados e implementados para flujos libres y cerrados.

Para el caso de un fluido cerrado, la compañía estadounidense LUCID ENERGY referencia a la turbina esférica en ductos de agua potable, nombrando a la turbina como LST (Lucid spherical turbine).

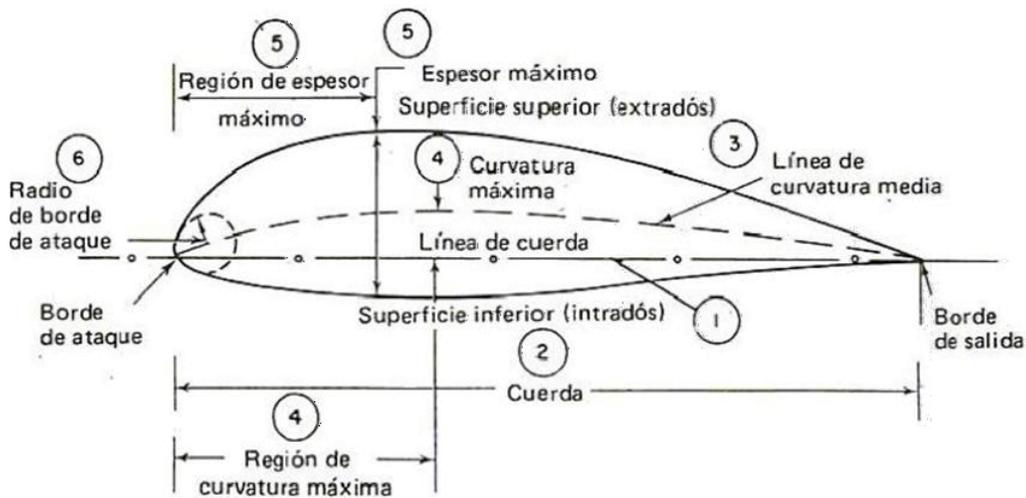
En el proceso investigativo para este trabajo de grado, no se evidencia documentación en la aplicación de la turbina esférica en proyectos del tipo eólico, ni para sistemas cerrados de aire (tuberías o ductos circulares).

## 4.1 Selección del tipo de álabe

Para la selección del álabe, se toman en cuenta investigaciones realizadas para el tipo de turbina esférica y turbina Darrieus, la forma de álabe es una de las principales características, este tipo de turbinas, en cada uno de los artículos y trabajos citados en la investigación.

La forma del álabe **NACA 0020**, es una referencia tomada de NACA (en inglés, National Advisory Committee for Aeronautics) ver Figura 4-1, comité especializado en el estudio de formas aerodinámicas, las dimensiones base para el diseño del proyecto son de cuerda 200 mm, ver plano PM TE 001 01 anexo B.

**Figura 4-1.** Parámetros de Selección para Perfil NACA.



Fuente: Tomada de (Marturet, 2012)

## 4.2 Referencias investigativas

Según son las características descritas anteriormente, se referencian trabajos y artículos investigativos con diseño de álabes similares.

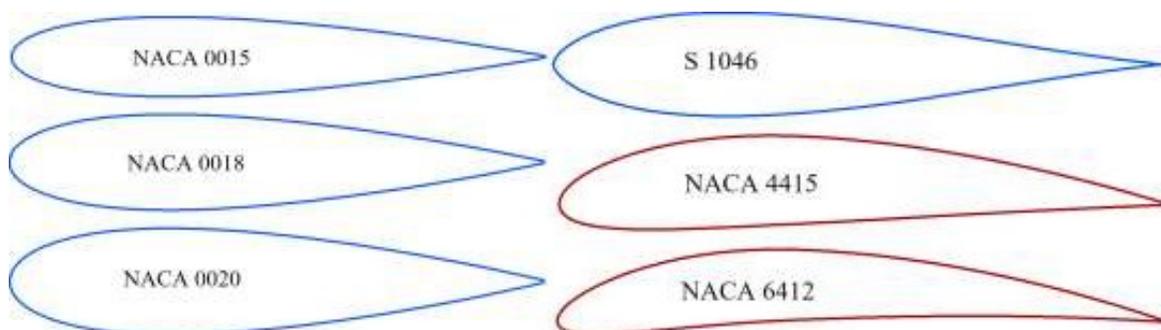
### 4.2.1 Parámetros geométricos y dinámicos

Muratoğlu & DemiR, (2020), realizaron un estudio experimental por medio de un software en diseño de álabes y analizaron la selección del perfil aerodinámico para el mejor rendimiento en una turbina Darrieus con un flujo de agua, concluyeron que:

“el efecto del tipo de perfil aerodinámico, el número de palas, la longitud de la cuerda, la solidez y la helicidad, son los parámetros de diseño más importantes para el rendimiento de las turbinas de eje vertical, se han investigado utilizando el código QBlade que emplea el algoritmo DMST. En consecuencia, las turbinas de eje vertical con perfiles de hoja simétricos proporcionan un rendimiento óptimo en el TSR rango de 2-3. Entre las secciones de pala simétricas, el perfil NACA 0020 resulta más adecuado para turbinas de eje vertical”.

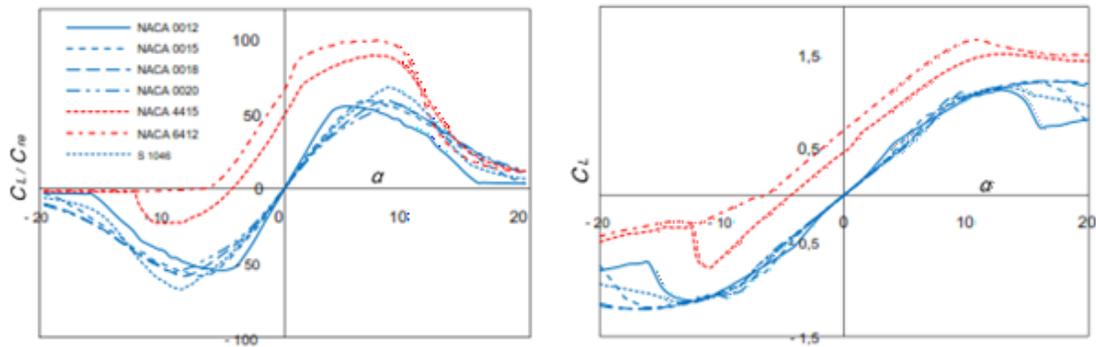
Compararon varios perfiles aerodinámicos simétricos y asimétricos, ver Figura 4-2, calculado mediante el software XFOIL y QBlade, mostrando los resultados en las figuras 4-3; 4-4 y 4-5.

**Figura 4-2.** Perfiles Aerodinámicos Simétricos y Asimétricos Analizados.



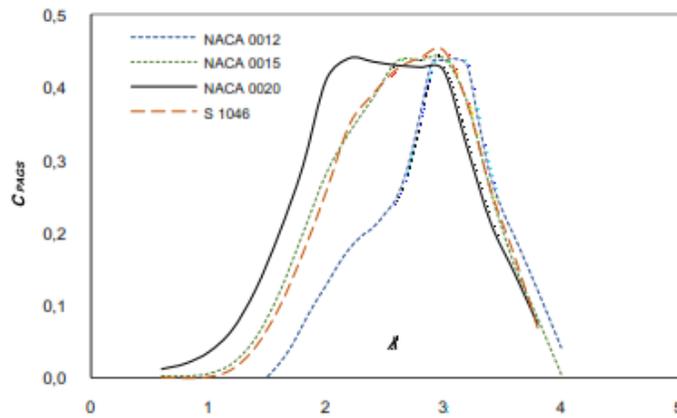
Fuente: Tomado de (Muratoğlu & DemiR, 2020)

**Figura 4-3.** Análisis de Rendimiento ( $Re = 0.33 \times 10^6$ ).



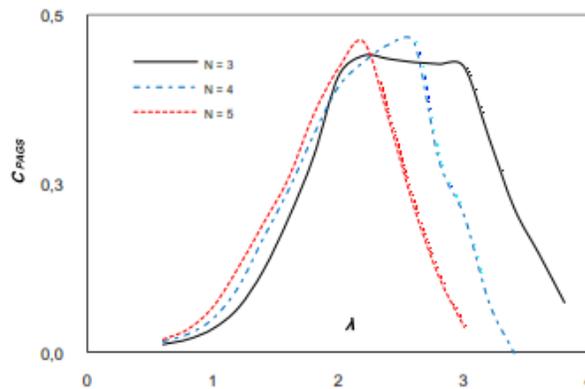
Fuente: Tomado de (Muratoğlu & DemiR, 2020)

**Figura 4-4.** Comparación del Número de Palas en el Rendimiento de las Turbinas Darrieus ( $H = 1,5 \text{ m}$ ,  $R = 0,5 \text{ m}$ ,  $c = 0,2 \text{ m}$ ),  $\lambda$  (TSR)



Fuente: Tomado de (Muratoğlu & DemiR, 2020)

**Figura 4-5.** Número de Palas Modeladas



Fuente: Tomado de (Muratoğlu & DemiR, 2020)

Arnáiz & Santos, (2017) Analizaron el perfil aerodinámico NACA 0020, para una hidrogeneradora del tipo turbina Darreius, aplicando modificaciones en sus ángulos de ataque de la marea sobre el perfil, dando como resultado que en ángulo  $0^\circ$  la eficiencia de la turbina es inestable, por lo tanto asumieron un ángulos en el rango de  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $5^\circ$ , para generar un coeficiente de potencia mayor y adecuado para el modelo.

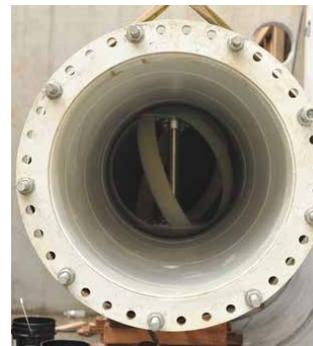
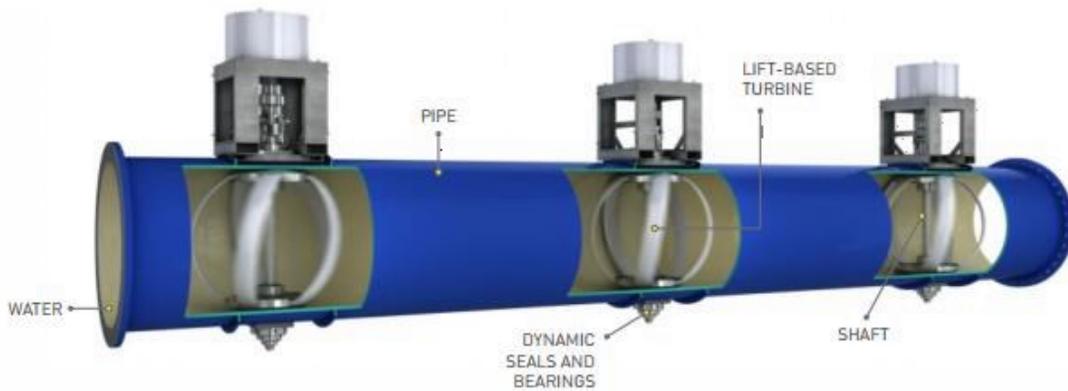
“Los resultados numéricos obtenidos, incluso después de la eliminación de la sobreestimación, a razón de las simplificaciones, son notablemente más altos que los estudios anteriores. Por ello, con rendimientos superiores al 50%, se obtienen resultados cercanos al límite de Betz. Lo que implica que al fin la turbina se convierte en una opción válida a la hora de la explotación de energías renovables, y la misma entra en competencia directa con los generadores de eje horizontal”.

#### **4.2.2 Trabajos y artículos, de la turbina esférica con perfil NACA 0020.**

Smith & Antonio, (2011) poseen una patente para LUCID ENERGY, en la cual utiliza la turbina esférica de Gorlov, instalada al interior de una tubería, sobre un soporte vertical, que gira por el flujo de agua que circula por la tubería, este sistema está conectado a un generador que puede ser de corriente continua o alterna (DC o AC), y monofásico o trifásico, sincronizado a 120 VAC o 240 VAC.

“De acuerdo con la realización ilustrada de la invención, la sección transversal de la lámina de aire de las palas esféricas de la turbina cumple con la norma reconocida NACA 20, aunque se contemplan secciones transversales alternativas de la lámina de aire dentro del espíritu y alcance de la invención.

La compañía LUCID ENERGY – POWER SYSTEM, realiza el montaje de turbinas esféricas con diámetros de 24”, 42” y 60”, en ductos de agua potable en la ciudad de Portland, Oregón de los Estados Unidos de América, para la generación eléctrica a partir de un flujo de agua, ver Figura 4-6.

**Figura 4-6.** Montaje de Turbinas Esféricas

Fuente: Tomado de (Home - Lucid Energy, 2020)

Rakesh et al., (2016) realizaron el estudio de la turbina esférica Lucid, mediante un análisis computarizado CFD para demostrar su rendimiento y capacidad de generación, el perfil del álabe (NACA 20) no fue modificado ni alterado según el diseño original por la patente ya descrita anteriormente. Presentando resultados muy prometedores para LUCID ENERGY – POWER SYSTEMS.

“Esto permite que LUCID SPHERICAL TURBINE (LST) se utilice en una amplia gama de aplicaciones para las instalaciones municipales, industriales, de riego, de petróleo y gas y desalinización entre otras. El factor de capacidad para aplicaciones de agua y aguas residuales de LUCID SPHERICAL TURBINE (LST) es 2-3 veces mayor que la energía solar y eólica”.

Oladosu & Koya (2018) Analizaron mediante sistemas computacionales CFD y CAD, una turbina esférica, para líneas de agua en las universidades del sureste de Nigeria, con

diámetros de 100 mm y 250 mm, en posición de aguas arriba y aguas abajo, utilizaron dos tipos de material para la simulación de la turbina como Aluminio 6061 y acero inoxidable 304. Dando como resultados que el Aluminio 6061 tiene mejor rendimiento en la generación de energía.

“Se descubrió que la potencia disponible depende de la densidad del material de las palas de la turbina, el caudal y el diámetro de la tubería. La potencia eléctrica magra y máxima estimada es de aproximadamente 415 y 1663 W, respectivamente, utilizando hojas de papel de aluminio, mientras que la hoja de acero inoxidable produce aproximadamente 242 W y 1080 W en la tubería de 250 mm. El resultado de este estudio reveló que el caudal de fluido, la altura efectiva, el diámetro de la tubería, el perfil del hidroala y el material de la turbina determinan la cantidad de potencial de aprovechamiento de la energía hidroeléctrica en cualquier sistema de distribución de agua”.

Bachant & Wosnik (2015) Evaluaron las características de dos tipos de turbinas, turbina helicoidal Gorlov de tres palas eje vertical (GHT) la turbina esférica helicoidal (LST), en tanque de ola experimental de laboratorio a velocidades de 1.5 m/s y 3 m/s, para determinar el rendimiento, en colaboración con LUCID ENERGY al proporcionar las turbinas para su estudio, con diámetros para la VATT de 1000 mm y para la LST DE 1410 mm, con la configuración del perfil NACA 0020, en aguas abiertas.

“El GHT fue más eficaz que el LST para capturar energía hidrocínética en un entorno de tanque de remolque, con coeficientes de potencia máxima medidos y corregidos por bloqueo de 28% y 21%, respectivamente. La diferencia de rendimiento entre el GHT y el LST se puede atribuir parcialmente a la mayor solidez del LST y al radio promedio más pequeño. La solidez también explica las relaciones de velocidad de punta operativas más bajas del LST”.

“Fue de interés para Lucid, el fabricante de turbinas, investigar cómo funciona el LST en un entorno de aguas abiertas en comparación con un GHT de tamaño similar”.

## **5. Evaluación de los resultados obtenidos mediante la simulación en CFD y determinación de su rendimiento.**

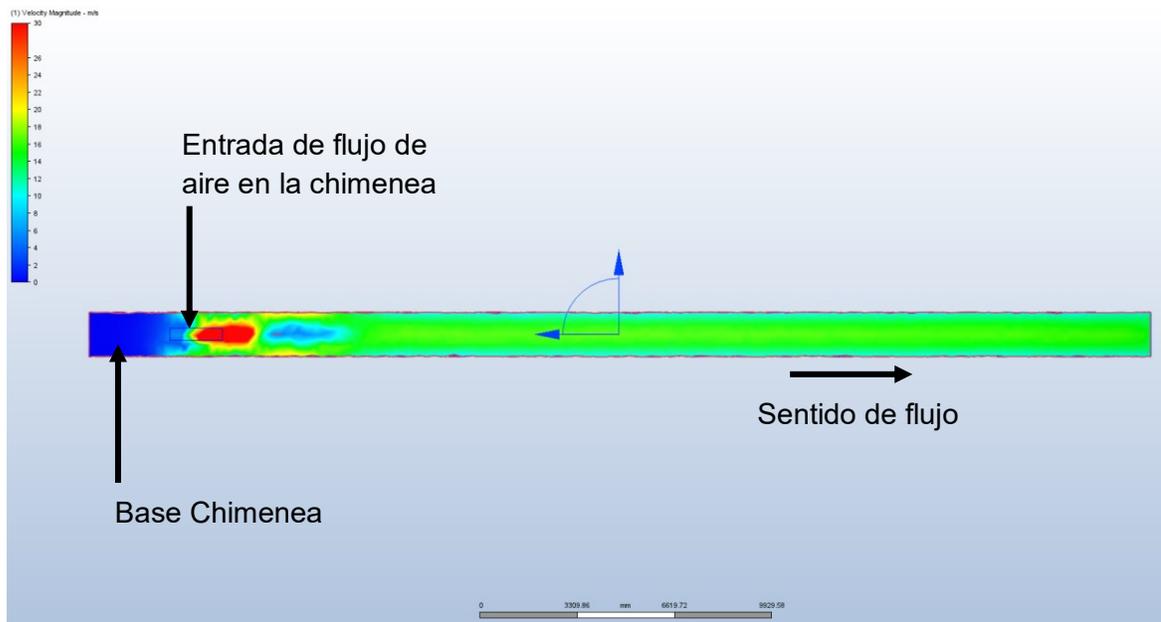
En el presente capítulo se muestra el flujo de aire al interior de la chimenea en estudio y las iteraciones que desarrolla el flujo en la turbina esférica ya descrita anteriormente.

### **5.1 Simulación del flujo de aire libre en la chimenea sin la turbina esférica**

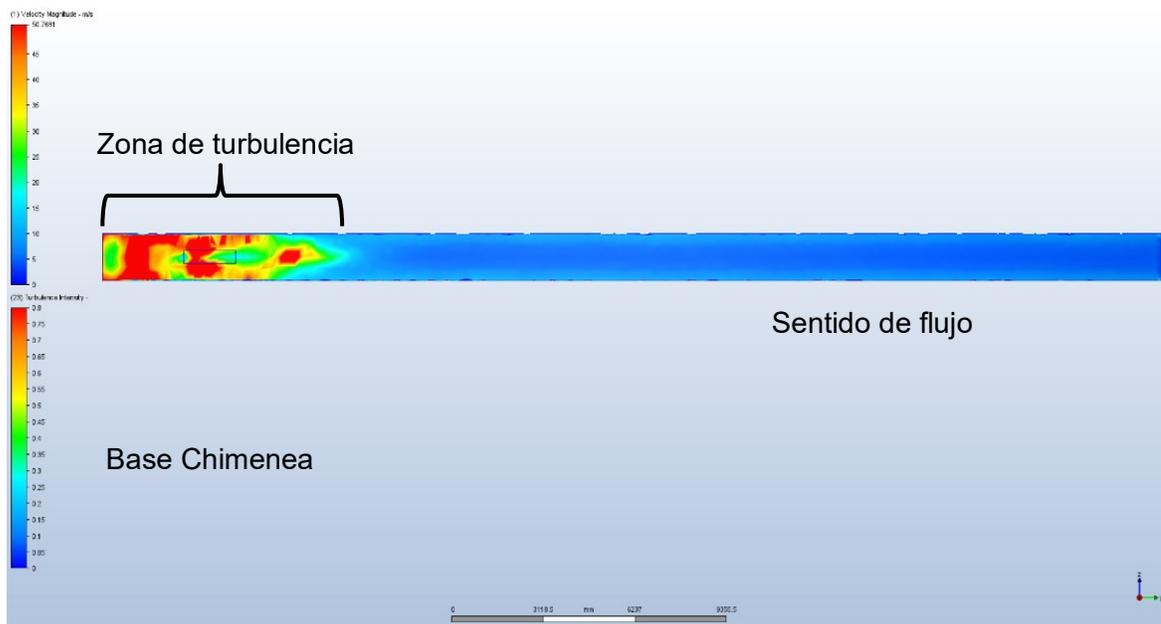
Como primer paso se sometió a la chimenea a una simulación de flujo de aire sin la perturbación de la turbina esférica, los datos como caudal, velocidad y presión se tomaron de las condiciones del ventilador centrífugo en el apartado 2.1.2., las dimensiones de la chimenea: diámetro 1500 mm y altura de 36000 mm.

El objetivo de esta simulación es determinar el área de sección más turbulenta en la entrada del flujo a la chimenea, y ver su comportamiento para definir una posible ubicación de la turbina.

En la Figura 5-1, se observa el comportamiento del flujo en la conexión del ducto ventilador a la chimenea, con velocidades en un rango de 26 m/s a 30 m/s, con una estabilidad del flujo que llega entre los 9 m/s y 12 m/s a lo largo de la chimenea.

**Figura 5-1.** Simulación Entrada y Velocidad del Flujo de Aire en la Chimenea.

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

**Figura 5-2.** Simulación Entrada del Flujo de Aire, Turbulencia en la Base Chimenea.

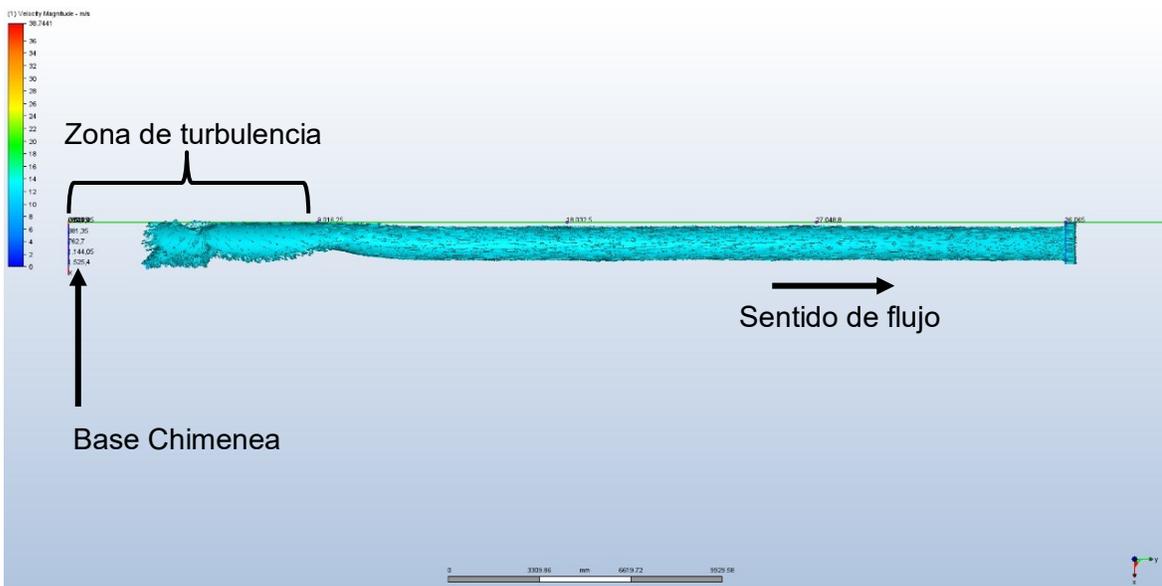
Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

En la Figura 5-2, se puede observar el grado de turbulencia que produce la entrada del flujo de aire en la base de la chimenea con una escala de  $0 \text{ ms}^{-1}$  y  $0.8 \text{ ms}^{-1}$ , con un pico máx. De  $0.8 \text{ ms}^{-1}$ , y concluir que a una altura de 9 mts el nivel de turbulencia baja sustancialmente a valores de  $0.15 \text{ ms}^{-1}$  a  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ , punto de partida para elegir la ubicación de la turbina esférica.

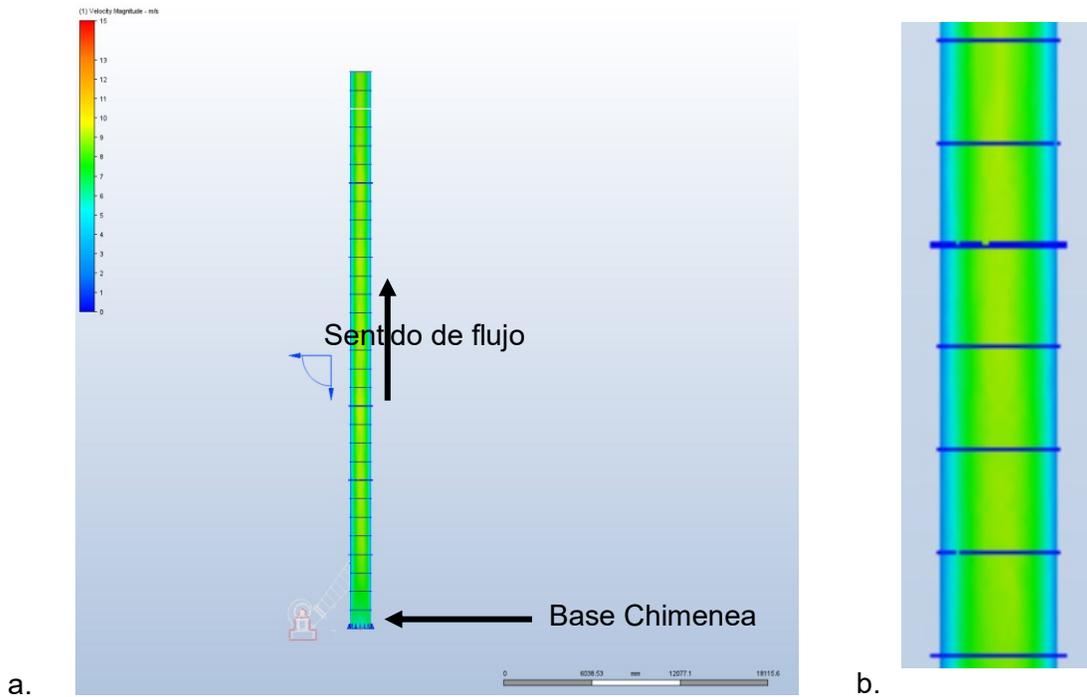
El posible punto de ubicación de la turbina, a 8 diámetros de la chimenea desde la cota más alta de la entrada del flujo de aire a la chimenea, ver plano PM TE 001 00 anexo B.

En la Figura 5-3, se demuestra el comportamiento de la masa del flujo de aire dentro de la chimenea.

**Figura 5-3.** Simulación masa del fluido con turbulencia en la base chimenea.



Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020)..

**Figura 5-4.** Simulación Velocidad del Flujo de Aire en la Chimenea.

Fuente: a. vista velocidad interna en la chimenea, b. sección de la chimenea, elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

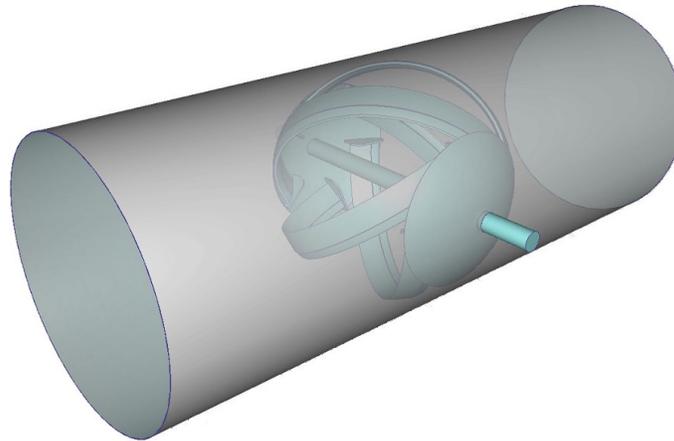
Para la Figura 5-4, se visualiza una escala de velocidad de rango entre 0 m/s y 15 m/s, deduciendo que en su eje concéntrico de la chimenea la velocidad se sitúa entre un rango de 9 m/s a 12 m/s, considerando que en la zona de las paredes de la chimenea baja la velocidad a un rango de 3 m/s a 6 m/s.

El informe final de la simulación para chimenea, sin la ubicación de la turbina esférica se encontrará en el anexo A.

## 5.2 Simulación del flujo de aire en la chimenea con la turbina esférica

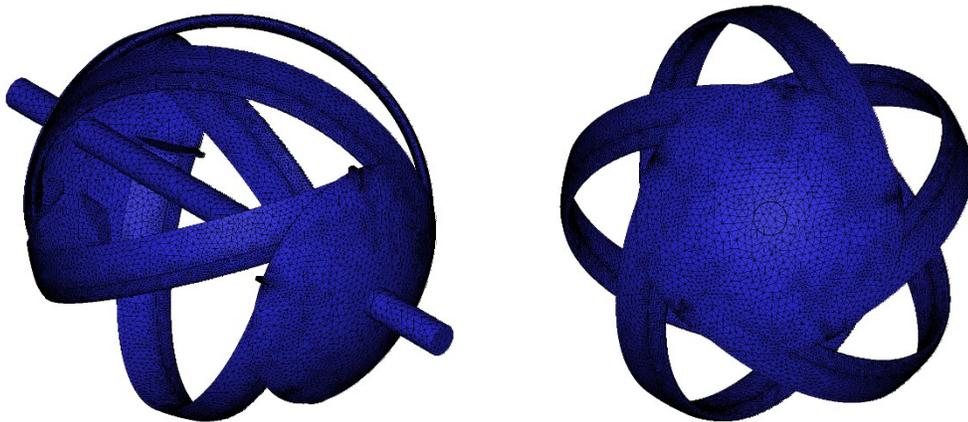
Para la simulación se crea un ensamble con una sección de la chimenea con el fin de delimitar las condiciones de frontera para los componentes principales (sección de chimenea, eje y turbina), como se muestra en las Figura 5-5, en la turbina se ajusta la forma del alabe acorde a las investigaciones realizadas, ya descritas en el capítulo 4, y en concordancia se asume el perfil NACA 0020, para la simulación.

**Figura 5-5.** Componentes para la Simulación.



Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

**Figura 5-6:** Malla en la Turbina



Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

En la Figura 5-6, se estable la malla para que los cálculos y la estabilidad del flujo sean lo más preciso posible, con la malla se mejoran propiedades como la densidad, suavidad del modelo, esquinamiento y la relación de los nodos. Ver Tabla 4-1.

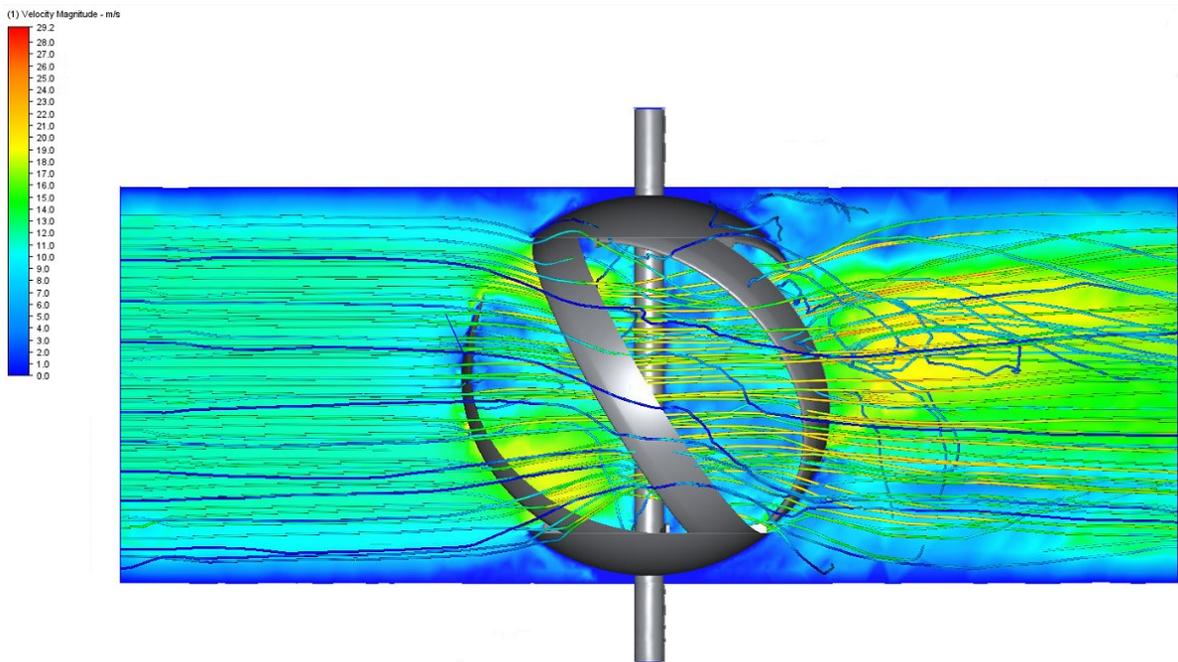
**Tabla 3-1.** Características de la Malla

Number of Nodes	258866
Number of Elements	1318466

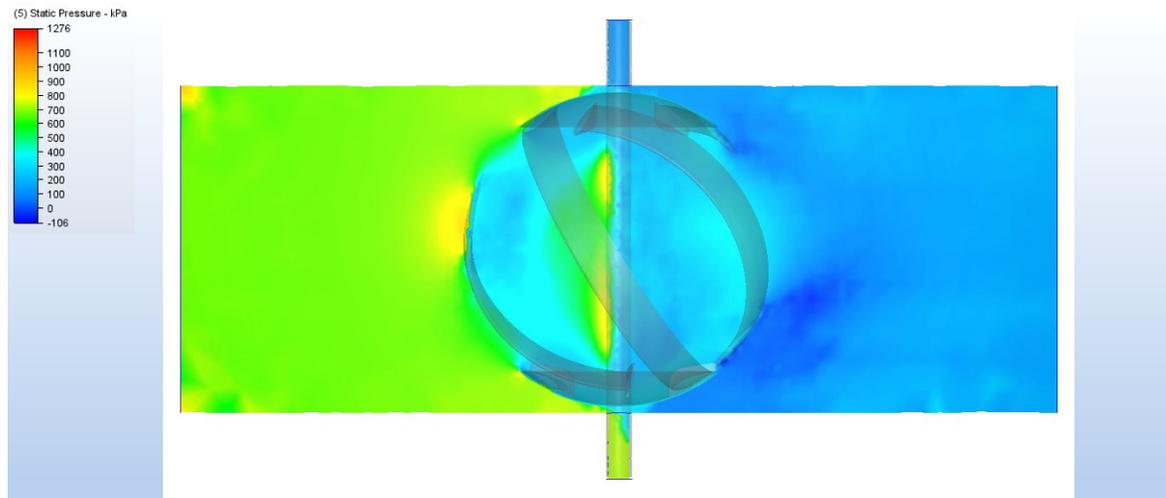
Fuente: Elaboración propia, (*Autodesk CFD*, 2020).

En las figuras 5-7 y 5-8, se muestra la simulación del flujo en la sección de la chimenea seleccionada, así mismo se puede ver en escalas, la velocidad y presión que ejerce el flujo al tener contacto con la turbina.

**Figura 5-7.** Simulación del Flujo de Aire en la Turbina.

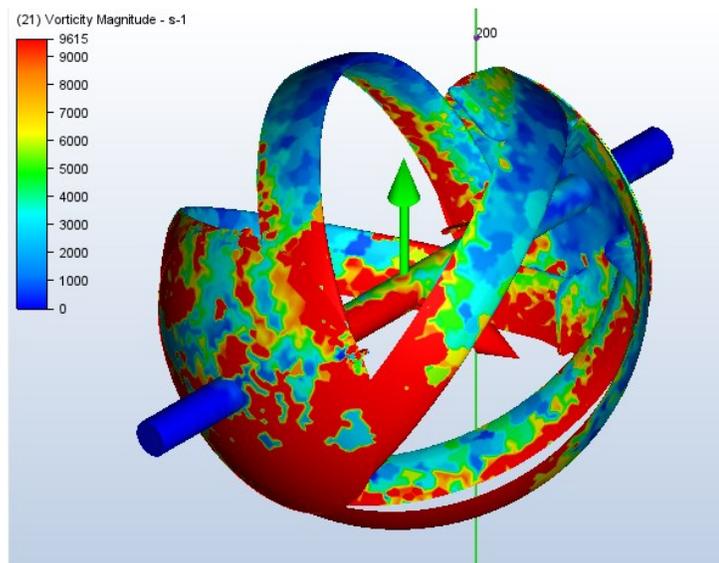


Fuente: Elaboración propia, (*Autodesk CFD*, 2020).

**Figura 5-8.** Simulación de la Presión en la Turbina.

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

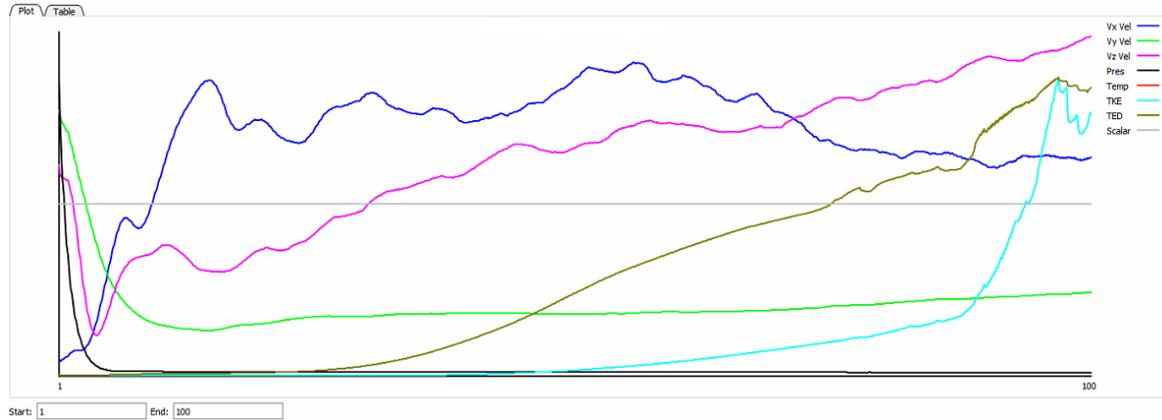
Para la Figura 5-9, la máxima velocidad del flujo de aire se aproxima a los 22 m/s situada en la salida de la turbina, eso quiere indicar un cambio en su recorrido cuando atraviesa la turbina creando vórtices al interior y exterior de la estructura. En la Figura 5-9 se observa la vorticidad sobre la turbina.

**Figura 5-9.** Vorticidad del Flujo de Aire en la Turbina.

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

En la Figura 5-10, se representa la cantidad de iteraciones que fueron necesarias para la generación de la simulación.

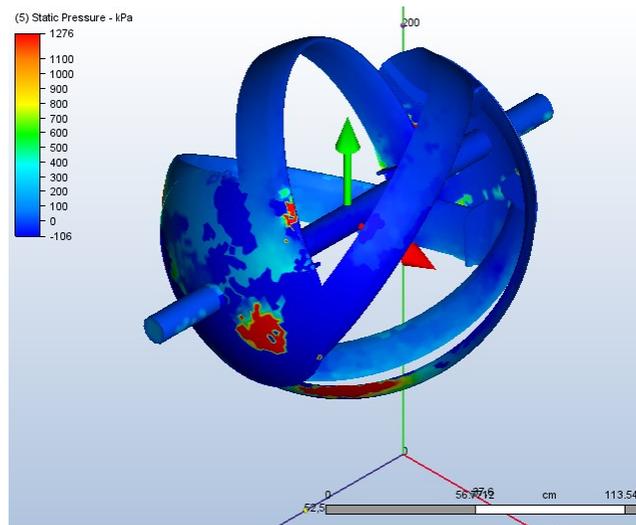
**Figura 5-10:** Iteraciones de la Simulación.



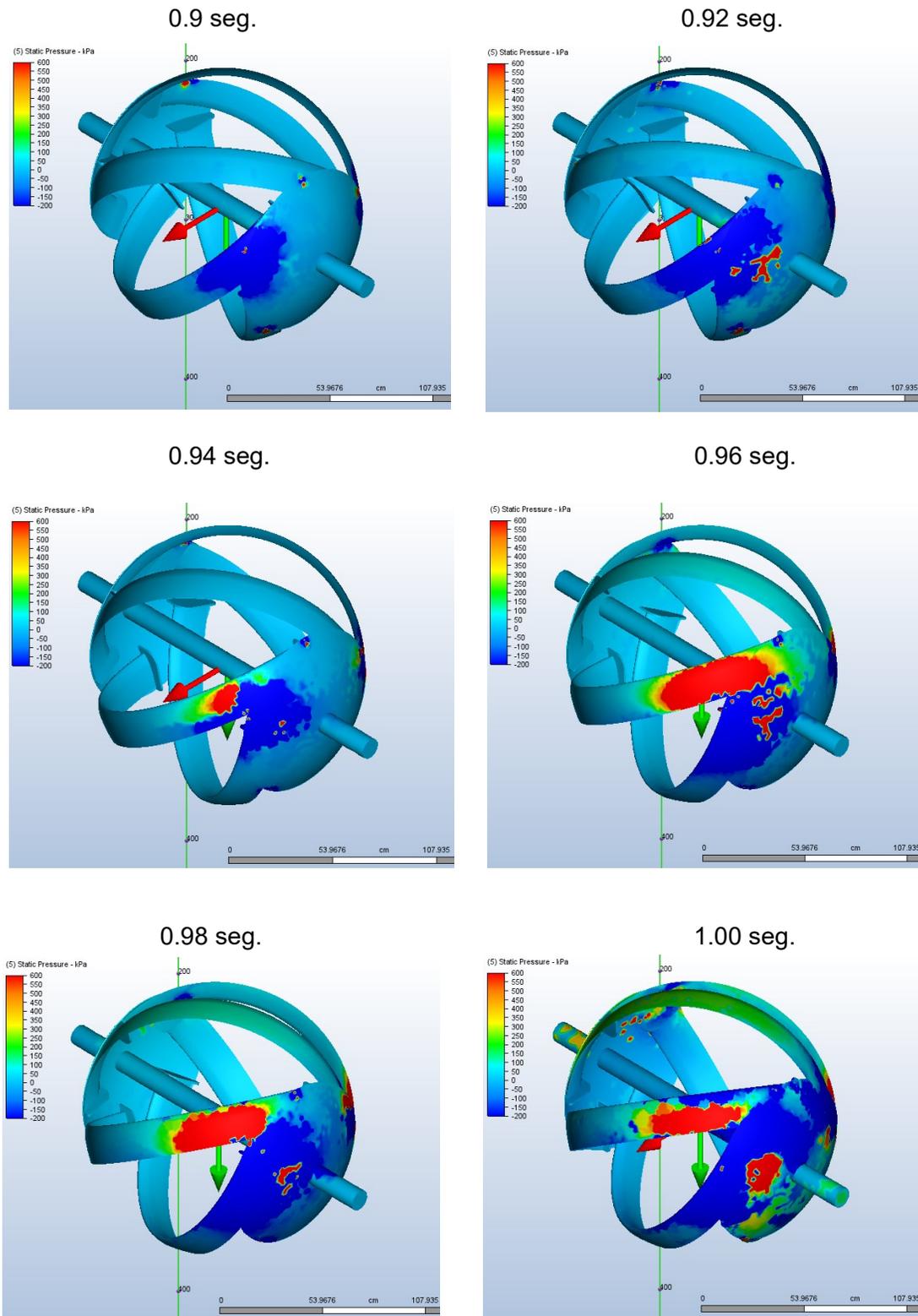
Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

Los datos obtenidos del total de iteraciones en un tiempo de simulación de 1 seg. Ver tabla 5-10, se observan la variación de las propiedades evaluadas, velocidad, presión, temperatura, energía cinética y factor escalar de 1:2 con respecto a un tiempo real, se configura de esta manera porque el software demanda de una CPU con características más complejas en sus componentes (procesador, RAM).

**Figura 5-11.** Presión en la Estructura de la Turbina en 0 seg.



Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

**Figura 5-12.** Presión en la Estructura de la Turbina en un Intervalo de Tiempo.

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

En las figuras 5-11 y 5-12, se observa la presión que ejerce el flujo de aire en la turbina en tiempo de 0 seg, y en un segmento de 0.9 seg. a 1 seg, de la simulación generada, en valores superiores a los 550 Kpa principalmente en el alabe, se observa que la presión sobre el alabe empieza aumentar progresivamente, hasta que aumenta la región de presión sobre el alabe, pero en un par de segundos después se ve que la presión disminuye, esto quiere decir que a medida que la turbina empieza a tener rotación, el nivel de presión sobre la turbina es creciente, pero decrece a través del tiempo.

**Tabla 4-2.** Resultados de la Simulación en CFD

Tiempo (seg)	rpm	Torque (N.m)	rev (rad/s)	Potencia (w)
0,01	0	0	0	0
0,02	-0,00007457	-0,00389525	-7,8089E-06	3,04178E-08
0,03	-0,00172213	-0,00510046	-0,00018034	9,19822E-07
0,04	-0,00371721	-0,0104215	-0,00038927	4,05673E-06
0,05	-0,00664819	-0,01531	-0,0006962	1,06588E-05
0,06	-0,0102909	-0,0190279	-0,00107766	2,05056E-05
0,07	-0,0145139	-0,0220594	-0,00151989	3,35279E-05
0,08	-0,0192641	-0,0248131	-0,00201733	5,00562E-05
0,09	-0,024465	-0,0270707	-0,00256197	6,93543E-05
0,1	-0,030006	-0,0290126	-0,00314222	9,1164E-05
0,11	-0,0358428	-0,0305176	-0,00375345	0,000114546
0,12	-0,0419464	-0,0318826	-0,00439261	0,000140048
0,13	-0,0547782	-0,0331003	-0,00573636	0,000189875
0,14	-0,0547782	-0,0339277	-0,00573636	0,000194621
0,15	-0,0613913	-0,0345446	-0,00642888	0,000222083
0,16	-0,0681051	-0,03507	-0,00713195	0,000250117
0,17	-0,074879	-0,0356473	-0,00784131	0,000279521
0,18	-0,0817033	-0,0358246	-0,00855595	0,000306513
0,19	-0,0885615	-0,0357645	-0,00927413	0,000331685
0,2	-0,0954082	-0,0357645	-0,00999112	0,000357327
0,21	-0,102246	-0,0357159	-0,01070717	0,000382416
0,22	-0,109043	-0,0355065	-0,01141895	0,000405447
0,23	-0,115837	-0,035488	-0,01213042	0,000430484
0,24	-0,122592	-0,0352856	-0,0128378	0,000452989
0,25	-0,129349	-0,0352965	-0,01354539	0,000478105
0,26	-0,13611	-0,0353171	-0,0142534	0,000503389
0,27	-0,142858	-0,0352799	-0,01496005	0,000527789
0,28	-0,14956	-0,0350089	-0,01566188	0,000548305
0,29	-0,156163	-0,0344918	-0,01635334	0,000564056

**Tabla 5-2.** Continuación

0,3	-0,16284	-0,0348778	-0,01705256	0,000594756
0,31	-0,169527	-0,0349296	-0,01775282	0,000620099
0,32	-0,176206	-0,0348892	-0,01845224	0,000643784
0,33	-0,182869	-0,0348037	-0,01914999	0,00066649
0,34	-0,189557	-0,0349334	-0,01985035	0,00069344
0,35	-0,196158	-0,0344853	-0,02054161	0,000708383
0,36	-0,202839	-0,0348987	-0,02124124	0,000741292
0,37	-0,209524	-0,0349199	-0,02194129	0,000766188
0,38	-0,21624	-0,0350794	-0,02264459	0,000794359
0,39	-0,222974	-0,0351761	-0,02334977	0,000821354
0,4	-0,229722	-0,0352498	-0,02405642	0,000847984
0,41	-0,236562	-0,0357282	-0,0247727	0,000885084
0,42	-0,24338	-0,0356156	-0,02548668	0,000907723
0,43	-0,250221	-0,0357319	-0,02620307	0,000936285
0,44	-0,257048	-0,0356623	-0,02691799	0,000959957
0,45	-0,263831	-0,0354329	-0,0276283	0,000978951
0,46	-0,270628	-0,0355054	-0,02834008	0,001006226
0,47	-0,277474	-0,0357612	-0,02905699	0,001039113
0,48	-0,284469	-0,0365353	-0,02978951	0,001088369
0,49	-0,291428	-0,036353	-0,03051825	0,00110943
0,5	-0,298282	-0,0358017	-0,031236	0,001118302
0,51	-0,305035	-0,0352742	-0,03194317	0,00112677
0,52	-0,311551	-0,0340412	-0,03262553	0,001110612
0,53	-0,317936	-0,033348	-0,03329416	0,001110294
0,54	-0,32404	-0,0315785	-0,03393337	0,001071565
0,55	-0,330085	-0,0307502	-0,0345664	0,001062924
0,56	-0,335972	-0,0309964	-0,03518289	0,001090543
0,57	-0,341906	-0,286417	-0,03580429	0,010254958
0,58	-0,347389	-0,0286417	-0,03637847	0,001041941
0,59	-0,352985	-0,0292313	-0,03696448	0,00108052
0,6	-0,357942	-0,0258923	-0,03748358	0,000970536
0,61	-0,363168	-0,0273002	-0,03803084	0,00103825
0,62	-0,367547	-0,0228717	-0,03848941	0,000880318
0,63	-0,372215	-0,0243832	-0,03897824	0,000950414
0,64	-0,375791	-0,0186822	-0,03935272	0,000735195
0,65	-0,379834	-0,0211197	-0,0397761	0,000840059
0,66	-0,384754	-0,0256971	-0,04029132	0,00103537
0,67	-0,387156	-0,0125505	-0,04054286	0,000508833
0,68	-0,39984	-0,0662562	-0,04187112	0,002774222
0,69	-0,39638	0,0180756	-0,04150879	0,000750296

**Tabla 6-2.** Continuación

0,7	-0,428306	-0,0166769	-0,04485208	0,000747994
0,71	-0,43928	-0,057326	-0,04600127	0,002637069
0,72	-0,5115957	-0,379633	-0,05357415	0,020338515
0,73	-0,564764	-0,275843	-0,05914192	0,016313884
0,74	-0,801432	-0,123626	-0,08392572	0,010375401
0,75	-1,1336	-0,173511	-0,11871025	0,020597535
0,76	-1,39153	-0,13473	-0,1457206	0,019632937
0,77	-1,44939	-0,0302274	-0,15177969	0,004587905
0,78	-3,34869	-0,992119	-0,35067381	0,347910152
0,79	-3,83111	-0,251996	-0,40119269	0,101098953
0,8	-12,7363	-46,5171	-1,33374152	62,04178743
0,81	-2,49675	53,4872	-0,26145891	13,98470506
0,82	-23,1065	-107,657	-2,41970575	260,4982617
<b>0,83</b>	<b>37,6483</b>	<b>317,359</b>	<b>3,94251868</b>	<b>1251,193786</b>
0,84	49,9613	64,3183	5,23193235	336,5089943
0,85	82,8639	171,87	8,67748275	1491,39896
0,86	647,96	2951,84	67,8541768	200294,6733
0,87	512,738	-706,342	53,6937695	37926,16456
0,88	564,671	271,272	59,1321777	16040,90411
0,89	485,895	-411,491	50,8827786	20937,80546
0,9	536,935	266,612	56,2276721	14990,97212
0,91	482,32	-285,289	50,5084057	14409,49255
0,92	340,282	-741,945	35,634229	26438,638
0,93	1200,32	4492,5	125,69715	564694,4477
0,94	1522,35	1682,15	159,420035	268168,4124
0,95	1358,31	-856,866	142,241816	121882,1757
0,96	524,167	-4357,24	54,890611	239171,5658
0,97	950,669	2227,88	99,5537725	221793,8586
0,98	116,329	-4358,26	12,181938	53092,05303

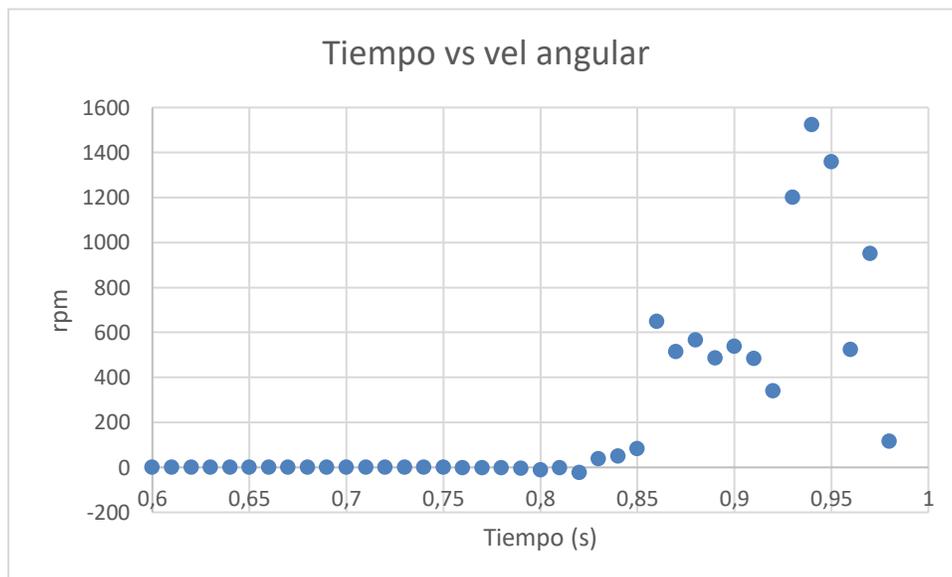
Fuente: Elaboración propia, (*Autodesk CFD*, 2020)

Se aprecia en los resultados en un tiempo de 0.83 seg de la simulación, el flujo de aire vence la inercia de la turbina y provoca el inicio de su rotación y comienza a generar datos positivos en todos sus valores, ver tabla 7-1, datos de 1251.19 w en rotación angular de 3.9425 rad/s y un torque de 317.359 N.m, a partir del tiempo de 0.93 seg se encuentran valores significativos no constates, pero con un rendimiento considerable a los

mencionados en los artículos de investigación del capítulo 4, como principal referencia a los elaborados por, (Rakesh et al., 2016).

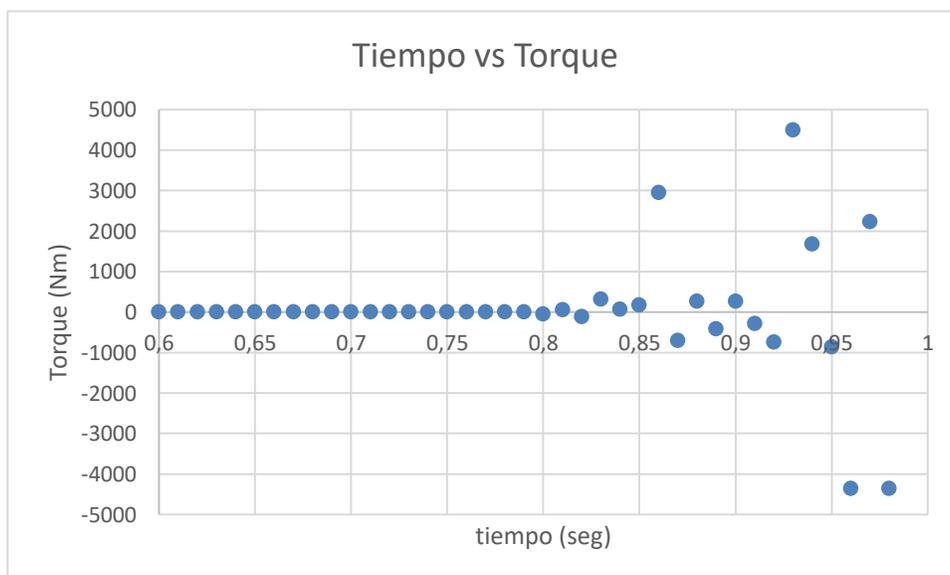
En la Figura 5-13, se observa las variaciones de la velocidad angular, en inicio de giro de la turbina en un tiempo de 0.83 seg y un pico máx. De 1522 rpm.

**Figura 5-13.** Relación Tiempo vs. Velocidad Angular de la Simulación.



Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

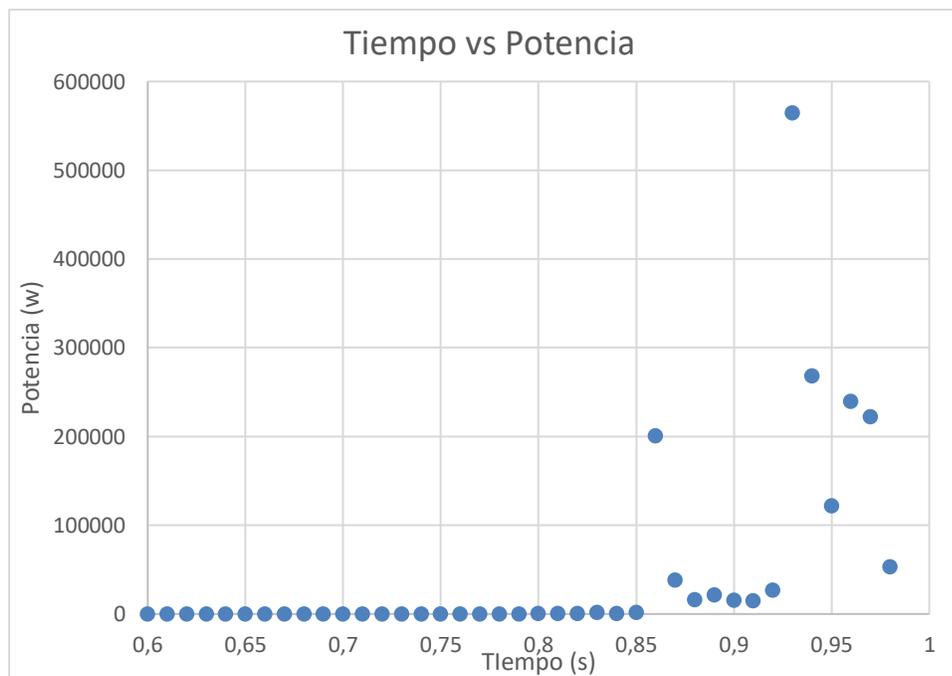
**Figura 5-14.** Relación Tiempo (seg) vs. Torque Nm, de la Simulación.



Fuente: Elaboración propia, (*Autodesk CFD*, 2020).

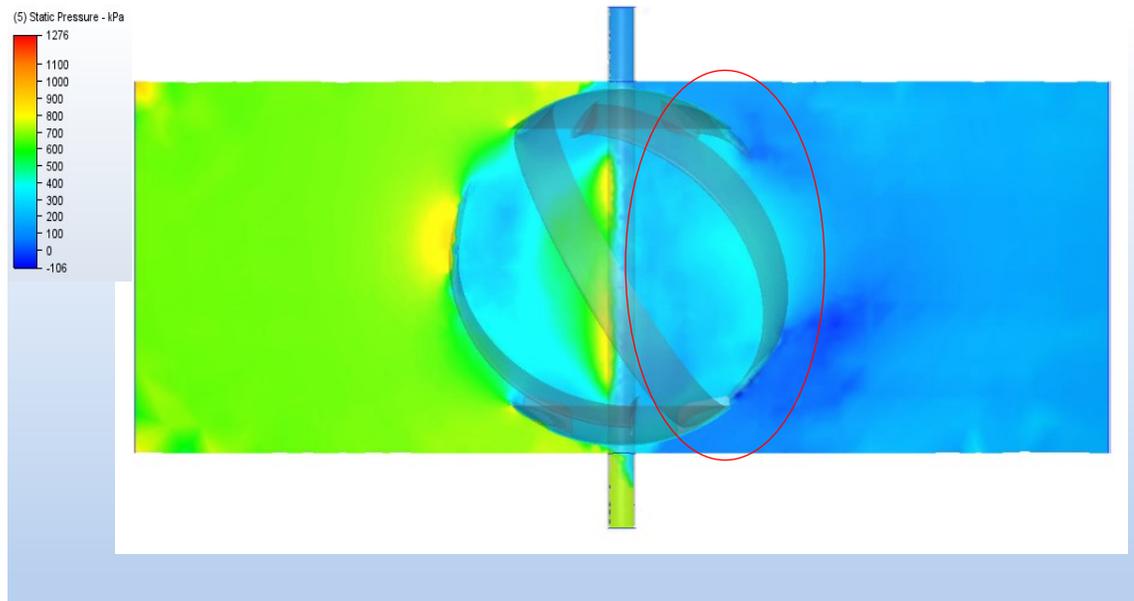
En la Figura 5-15, la generación de potencia (w) de la turbina representa datos a partir de los 0.86 seg. con valores no tan significativos como los que muestra a partir de los 0.93 seg. con variaciones no estables para predecir una generación de potencia nominal, aun así, se encuentra en el rango de resultados del estudio teórico de la turbina esférica de Lucid. (Rakesh et al., 2016), afirmando que el diámetro de 1920 mm, implementado en las tuberías de CAUVERY presa KRS de la ciudad de Bangalore, produce una potencia de 214.5 w.

**Figura 5-15.** Relación Tiempo (seg) vs. Torque Nm, de la Simulación.



Fuente: Elaboración propia, (*Autodesk CFD*, 2020).

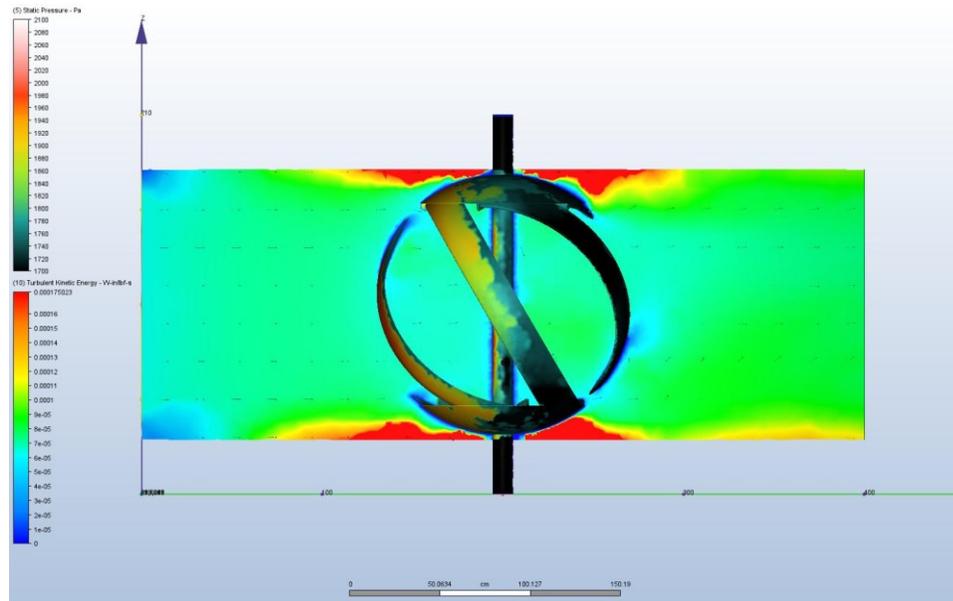
sin embargo, al observar los valores acumulativos desde el tiempo de 0.83 seg a 0.98 seg. se tienen variaciones en los resultados de la simulación, en consecuencia, se predice que el flujo de aire que atraviesa el interior de la turbina induce una presión adicional a los alabes posteriores al giro de la turbina, causando un freno en la rotación ideal de la turbina. Ver Figura 5-16.

**Figura 5-16.** Área de Presión Zona Posterior de la Turbina.

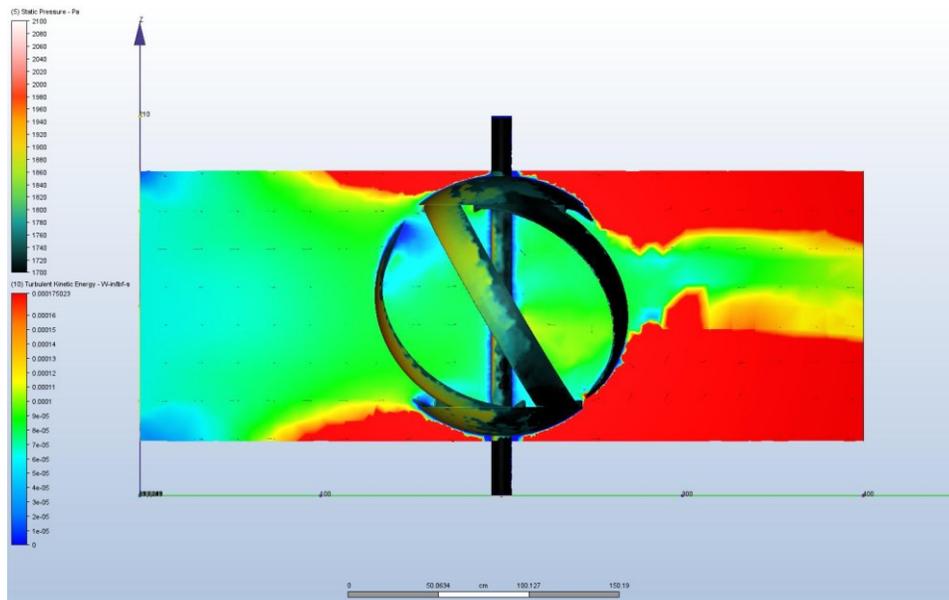
Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

En las figuras 5-17 a 5-21, se observa el comportamiento de la energía cinética turbulenta en un tiempo de simulación entre los 0.2 seg hasta 1.0 seg.

En las figuras 5-17 y 5-18, la escala de colores de la energía cinética turbulenta representada está entre un rango de 0 hasta 0.0001750 W-in/lbf-seg, detallando en las franjas de color rojo, formando zonas de vorticidad del flujo de aire entre la chimenea y la turbina.

**Figura 5-17.** Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.2 seg

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

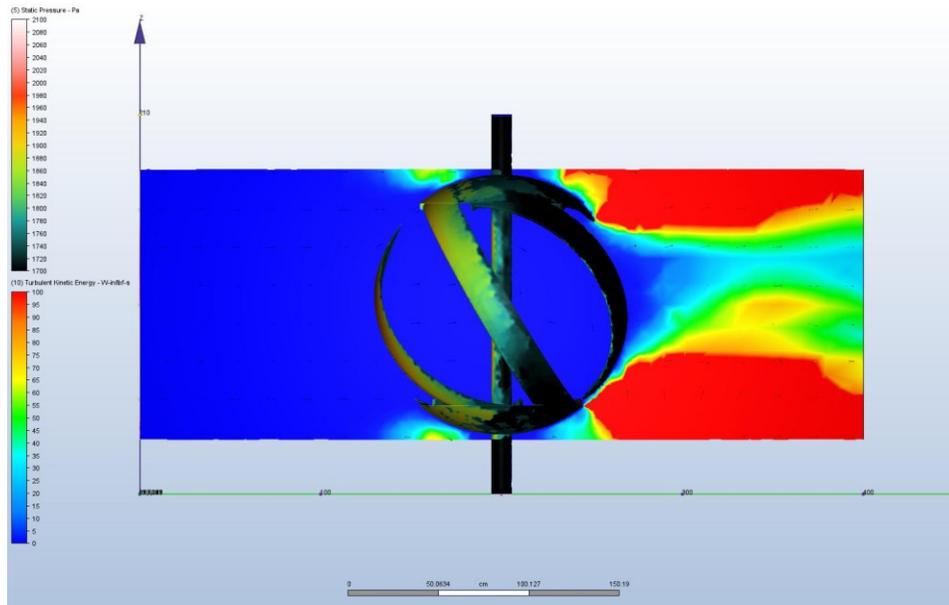
**Figura 5-18.** Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.4 seg

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

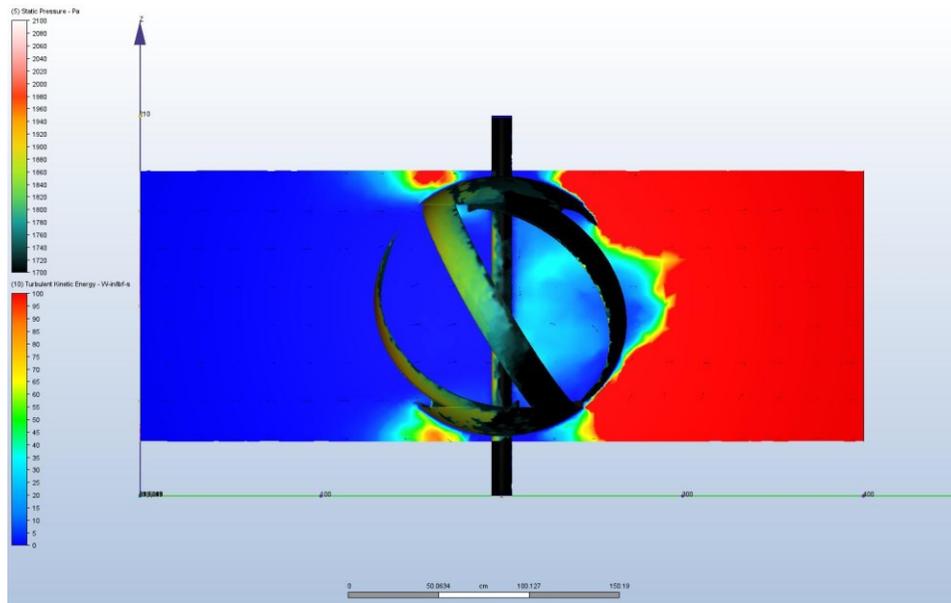
En las figuras 5-19 a 5-21, la escala de colores de la energía cinética turbulenta representada está entre un rango de 0 hasta 100 W-in/lbf-seg, detallando en las franjas de

color rojo, formando zonas de vorticidad del flujo de aire durante la interacción con la turbina y la turbulencia al paso.

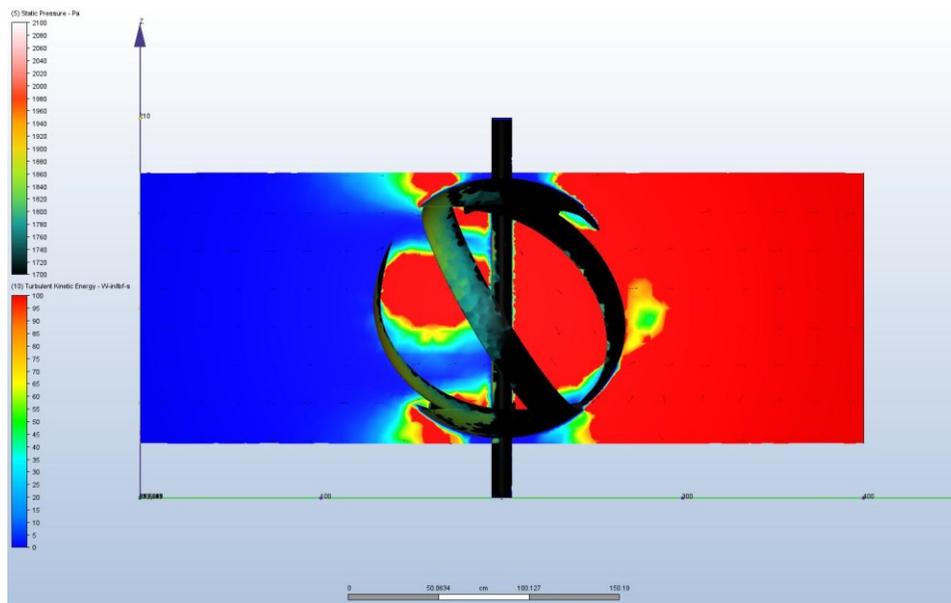
**Figura 5-19.** Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.6 seg



Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

**Figura 5-20.** Energía cinética turbulenta en un tiempo de 0.8 seg

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020).

**Figura 5-21.** Energía cinética turbulenta en un tiempo de 1.0 seg

Fuente: Elaboración propia, (Autodesk CFD, 2020)

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- En la evaluación realizada en procesos industriales, como los flujos de aire emitidos a la atmosfera por los filtros de mangas, sus propiedades mecánicas resultan muy favorables para la generación de energía renovable.
- Se ha determinado que el flujo de aire en el proceso de estudio, tiene características que lo hacen altamente aplicable, para que el diseño propuesto de turbina esférica sea expuesto a un prototipo físico, ya que su velocidad, presión y masa cumplen con los resultados en las investigaciones realizadas.
- La turbina esférica Gorlov, en su construcción geométrica, genera resultados favorables en sistemas cerrados de forma cilíndrica (tuberías), como lo plantea LUCID ENERGY, estudio el cual se aplicó para este trabajo.
- Se evidencio el comportamiento del flujo de aire al interior de la chimenea, determinando mediante los resultados por CFD, las zonas de alta turbulencia y así darle la ubicación al diseño propuesto de la turbina esférica.
- Esta configuración es capaz de aprovechar un flujo de aire residual de un proceso industrial para generar energía, y quizás ser reutilizada en el mismo proceso.
- Este dispositivo se puede evaluar en cualquier proceso industrial que tenga en su configuración un flujo de aire residual por evacuación de chimeneas.

- Se evidenció una contra presión en los alabes posteriores a la salida del flujo de aire en la turbina, creando fluctuaciones en los resultados.
- La potencia generada en un rango de 100 kw y 200 kw, demostrados, son buenos resultados para el prototipo implementado en base de los estudios y/o investigaciones realizadas para el desarrollo de este trabajo.

## 6.2 Recomendaciones

Es gratificante dar conocer una nueva alternativa para el tema de energía renovable aplicado para las industrias, puesto que ellas son altas consumidoras de energía eléctrica.

Para futuros trabajos:

- El estudio con diversos materiales base o aleaciones para que su rendimiento sea mayor a los resultados de esta investigación.
- La integración del sistema de generación eléctrica para el retorno de esta energía, la misma industria y posiblemente bajar sus consumos tanto eléctricos como económicos.
- Es conveniente realizar un estudio sobre el impacto en la masa del flujo de aire y presiones en los rendimientos de operación en los ventiladores centrífugos en varias ubicaciones cercanas y lejanas de la turbina.
- La posibilidad de estudio en filtros de mangas más pequeños, puesto que ellos poseen velocidades similares a las ya propuestas en esta investigación, pero con caudales mucho menores.

## Bibliografía

*Airfoil Tools*. (2020). <http://airfoiltools.com/>

Arnáiz, A. G., & Santos, T. P. (2017). *Análisis CFD sobre la influencia del pitch en hidrogenadores de eje vertical H-Darrieus con perfiles simétricos NACA 0020*. 73.

*Autodesk CFD*. (2020). <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>

Bachant, P., & Wosnik, M. (2015). Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency. *Renewable Energy*, 74, 318–325.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.049>

Carlos, J., Arilla, G., & Luis, E. (2017). *PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA*. 103.

Cementos del Oriente S.A. (2017). *INFORME MONITOREO EMISIONES EN CHIMENEA CEMENTOS DEL ORIENTE 2017.pdf*.

CEMEX S.A.B. de C.V. (1997). *Ventiladores \_Leyes, control y tipos.pdf*. Calculos.

CEMEX S.A.B. de C.V. (2002). *Ventiladores Industriales.pdf*.

Chimeneas Industriales. (2016). *Chimeneas Industriales | Construpedia, enciclopedia construcción*.

[https://www.construmatica.com/construpedia/Chimeneas\\_Industriales](https://www.construmatica.com/construpedia/Chimeneas_Industriales)

- Connor. (2019). *¿Qué es el flujo laminar vs turbulento? Definición*. Thermal Engineering.  
<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-flujo-laminar-vs-turbulento-definicion/>
- Creus, A. (2008). *AEROGENERADORES*. Cano PINA.
- Duda, W. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento.pdf*.
- Egia, V. (2016). Las chimeneas de ladrillo. *Ondaregia*. <http://ondaregia.com/las-chimeneas-de-ladrillo/>
- Gorlov. (2000). *Helical turbine assembly operable under multidirectional gas and water flow for power and propulsion systems* (United States Patent Núm. US6155892A).  
<https://patents.google.com/patent/US6155892A/en#patentCitations>
- Gorlov. (2015). *US8939708B2—Universal spherical turbine with skewed axis of rotation—Google Patents*. <https://patents.google.com/patent/US8939708>
- Home—Lucid Energy*. (2020). <http://lucidenergy.com/>
- Industrial Ventilation 20th 1988. (1992). *VENTILACION INDUSTRIAL*. Generalitat Valenciana.
- Ingemol S.A. (2015). *SISTEMAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL. INGEMOL S.A. INGENIERÍA DEL MEDIO AMBIENTE*.  
<http://www.ingemolsa.com/>
- Inventor, Autodesk*. (2020).  
<https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/overview>
- Marturet, P. (2012). *SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA DE UN MODELO DE TURBINA HIDROCINÉTICA TIPO GORLOV*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3611.4327>
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2010).  
*PROTOCOLO PARA EL CONTROL Y VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA POR FUENTES FIJAS*.

<http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/emisiones-por-fuentes-fijas>

- Muratoğlu, A., & DemİR, M. S. (2020). Investigating the Effect of Geometrical and Dynamic Parameters on the Performance of Darrieus Turbines: A Numerical Optimization Approach via QBlade Algorithm. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 413–426. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.677137>
- Oladosu, T. L., & Koya, O. A. (2018). Numerical analysis of lift-based in-pipe turbine for predicting hydropower harnessing potential in selected water distribution networks for waterlines optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(4), 672–678. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.05.016>
- Palazón, R. M. (2014). *CONSIDERACIONES ACERCA DEL DISEÑO DE CHIMENEAS*.
- Rakesh, Akshay, Anwin, Adhvaith, & Charan. (2016). *Theoretical Study and Performance Test of Lucid Spherical Turbine*. 3(02), 6.
- Smith, G., & Antonio, S. (2011). (US); Igor Palley, Madison, NJ (US); 11.
- Tahadjodi Langroudi, A., Zare Afifi, F., Heyrani Nobari, A., & Najafi, A. F. (2020). Modeling and numerical investigation on multi-objective design improvement of a novel cross-flow lift-based turbine for in-pipe hydro energy harvesting applications. *Energy Conversion and Management*, 203, 112233. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112233>

## **ANEXOS**

- A. Informe resultados del software CFD para la chimenea sin turbina.**
  
- B. Informe resultados del software CFD para la chimenea con turbina.**
  
- C. Planos de detalle para la construcción de la turbina esférica.**