

---

**INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÁXIMO  
APROVECHAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN  
FLUIDO LIBRE PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA POR  
MEDIO DE VIBRACIÓN INDUCIDA POR VÓRTICES**

---

Presentado por

**Daniel Santiago Umaña Salinas**



**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Fundación Universitaria Los Libertadores  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas  
Programa de Ingeniería Aeronáutica  
Bogotá D.C, Colombia  
2020

**Página dejada en blanco intencionalmente**

---

**INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÁXIMO  
APROVECHAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN  
FLUIDO LIBRE PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA POR  
MEDIO DE VIBRACIÓN INDUCIDA POR VÓRTICES**

---

Presentado por

**Daniel Santiago Umaña Salinas**

En cumplimiento parcial de los requerimientos para optar por el

Título de

**Ingeniero Aeronáutico**

*Dirigida por*

**Jaime Enrique Orduy Rodríguez M. Sc**

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

*Codirector*

**Hernán Darío Cerón Muñoz Ph.D**

Presentada a

Programa de Ingeniería Aeronáutica  
Fundación Universitaria Los Libertadores

Bogotá D.C, Colombia.

2020

**Página dejada en blanco intencionalmente**

**Notas de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



\_\_\_\_\_  
Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

\_\_\_\_\_  
**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del jurado

\_\_\_\_\_

Bogotá DC, junio de 2020.

**Página dejada en blanco intencionalmente**



# LOS LIBERTADORES

## FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico principalmente a mis padres y hermanas por haberme forjado, inculcado y apoyado en mi crecimiento profesional, por brindarme siempre palabras de apoyo enseñándome siempre el camino de la superación.

A mis maestros Jorge Nisperuza, Hernán Cerón y Jaime Orduy, personas de gran conocimiento, gracias por ser las personas que me formaron, me incentivaron, transmitiendo sus diversos conocimientos y dedicación en mi formación como profesional.

Igualmente, a mi novia quien siempre estuvo presente, transmitiéndome palabras de apoyo en la presentación de este proyecto.

*Daniel Santiago Umaña Salinas*

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# Agradecimientos

Agradezco a la Fundación Universitaria Los Libertadores que me abrió sus puertas para formarme profesionalmente, el apoyo que me ha brindado por medio de sus convenios, principalmente agradezco a la DRI (Dirección de Relaciones Interinstitucional) por tramitar mi semestre de intercambio en la Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP en Brasil, por siempre apoyarme en la participación de eventos de investigación que contribuyen a mi formación como profesional.

Agradezco a todos los profesores, compañeros por todo lo anterior en conjunto y ayudarme a llegar al punto en que me encuentro.

Agradezco a mi compañera Claudia Cañón que fue indispensable para la realización de este proyecto.

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# Resumen

La generación de energía juega un papel significativo en el siglo XXI y es materia de investigación por la importancia de la huella ambiental. La investigación trata de una forma no convencional de aprovechar la energía de un flujo de fluido en una corriente libre por medio de vibraciones y mediante materiales piezoeléctricos generar energía eléctrica. La representación experimental se basa en una geometría cilíndrica que es atravesada por un flujo de corriente libre a determinadas características, el cual presenta desprendimiento de vórtices cíclicos después de atravesar la barra; en la calle de vórtices se crean cambios de presiones y fuerzas que inciden en una placa en la cual esta implementada un piezoeléctrico el cual consigue generar energía. En la ingeniería aeronáutica y la ingeniería de estructuras, el fenómeno de las vibraciones generadas por vórtices ha sido ampliamente estudiado para evitarlo y así poder evitar fallas estructurales. En este trabajo, por el contrario, haciendo uso de los principios aerodinámicos y de la mecánica de fluidos, se explora analíticamente y mediante simulación en CFD los comportamientos óptimos para la generación de energía.

***Palabras claves:*** Flujo turbulento, Vortex, Vórtices de Von Karman, Piezoeléctricos, efecto estela.

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# Abstract

Power generation plays a significant role in the 21st century and is the subject of research due to the importance of the environmental footprint. The research deals with an unconventional way of harnessing the energy of fluid flow in a free current through vibrations and using piezoelectric materials to generate electrical energy. The experimental representation is based on a cylindrical geometry that is crossed by a free current flow to certain characteristics, which presents cyclical vortex detachment after crossing the bar; In the vortex lane, pressure and force changes are created that affect a plate in which a piezoelectric is implemented, which manages to generate energy. In aeronautical engineering and structural engineering, the phenomenon of vibrations generated by vortices has been extensively studied to avoid it and thus be able to avoid structural failures. In this work, on the contrary, using aerodynamic principles and fluid mechanics, the optimal behaviours for power generation are explored analytically and by CFD simulation.

**Keywords:** Turbulent Flow, Vortex, Von Karman Vortexes, Piezoelectric, Wake Effect, Vortex. Disturbance.

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# Contenido

Resumen .....	i
Abstract .....	iii
Índice de ilustraciones.....	vii
Índice de tablas .....	ix
Índice de Símbolos y Abreviaturas .....	xi
<b>1. Introducción.....</b>	<b>13</b>
<b>2. Planteamiento del Problema .....</b>	<b>15</b>
2.1 Rentabilidad.....	16
2.2 Impacto sobre la fauna.....	16
2.3 Pregunta de investigación.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
¿Se puede generar energía eléctrica a partir de la energía eólica sin la utilización de generadores con aspas.....	16
2.1 Objetivos.....	17
2.1.1 Objetivo General .....	17
2.1.2 Objetivos Específicos.....	17
2.2 Justificación .....	19
<b>3. Marco Teórico .....</b>	<b>21</b>
3.1 Análisis aerodinámico .....	21
3.2 Modelo de Turbulencia.....	22
3.2.1 Ecuación de Continuidad .....	22
3.2.2 Ecuación de Momentum .....	23
3.2.3 Ecuaciones de Navier-Stokes .....	23
3.3 Vórtices de Von Karman .....	24
3.4 Tecnología Vortex, fluido dinámica.....	24
3.4.1 Aprovechamiento de las vibraciones.....	25
3.5 Condiciones de Frontera.....	26
3.6 Malla .....	27
3.7 Túnel de viento .....	27
3.7.1 Tipos .....	27

Piezoelectricidad .....	31
3.7.9 Energía <i>Harvesting</i> .....	32
<b>4. Diseño Metodológico.....</b>	<b>33</b>
<b>5. Investigación Experimental .....</b>	<b>35</b>
5.1 Geometrías del Cilindro .....	36
5.2 Estructura.....	36
5.3 Pegado del Piezoeléctrico .....	37
5.4 Frecuencia y sintonizado.....	38
5.5 Series de Fourier .....	39
5.6 Numero Stronhal .....	40
5.7 Desarrollo Computacional.....	41
5.8 Condiciones de Frontera.....	42
5.9 Montaje en túnel de viento .....	42
5.10 Conversión De Energía.....	44
<b>6. Análisis y Resultados.....</b>	<b>45</b>
6.1 Vórtices generados .....	45
6.1.1 Pruebas Experimentales .....	48
6.1.2 Comparación Numérica vs Experimental .....	52
6.1.3 Señales obtenidas por el osciloscopio .....	53
6.2 Análisis de los resultados .....	56
<b>7. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>59</b>
7.1. Conclusiones .....	59
7.1. Recomendaciones .....	62
<b>Bibliografía .....</b>	<b>63</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>65</b>

# Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Efecto VORTEX [37] .....	25
Ilustración 2 Vórtices de Von Karman [14] .....	25
Ilustración 3 Componentes Túnel de viento Fuente [18] .....	28
Ilustración 4 Túnel de viento Fuente: Autor .....	31
Ilustración 5 Piezoelectricidad Fuente [19].....	32
Ilustración 6 Osciloscopio DSO-X 2002A. Fuente: Autor .....	35
Ilustración 7 Geometría cilíndrica con placa de aluminio. Fuente: Autor .....	37
Ilustración 8 Procedimiento de pegado del piezoeléctrico a la placa de aluminio. Fuente: Autor ....	38
Ilustración 9 Pegado del material piezoeléctrico a la placa de aluminio al vacío. Fuente: Autor.....	38
Ilustración 10 Dimensiones del dominio computacional .....	41
Ilustración 11 Montaje final túnel de viento – Generador de vórtices con placa, Diámetro 1 pulgada Fuente: Autor.....	43
Ilustración 12 Montaje final túnel de viento – Generador de vórtices con placa, Diámetro 2 pulgadas Fuente: Autor.....	43
Ilustración 13 Balanza. Túnel de viento Fuente Autor.....	44
Ilustración 14 Geometría ancladas al túnel de viento con piezoeléctrico. Fuente: Auto .....	48
Ilustración 15 Estructura cilíndrica instalada en túnel de viento. Fuente: Autor. ....	49
Ilustración 16 Grafica de Frecuencia vs Velocidad. Geometría diámetro 1 pulgada.....	51
Ilustración 17 Grafica de Frecuencia vs Velocidad. Geometría diámetro 2 pulgadas .....	51
Ilustración 18 Comparación ciclo de frecuencia simulación vs investigación experimental.....	52
Ilustración 19 Señal Eléctrica en forma de Voltaje.....	53
Ilustración 20 Frecuencias obtenidas por el osciloscopio del material piezoeléctrico.....	54
Ilustración 21 voltaje generado por el piezoeléctrico en milivoltios .....	55
Ilustración 22 Montaje de obtención del voltaje generado por el piezoeléctrico en milivoltios.....	55

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# Índice de tablas

Tabla 1 Resultado Simulación CFD a una velocidad de 10 y 20 m/s .....	46
Tabla 2 Comparación de velocidades de 20 y 25 m/s de la estructura cilíndrica. ....	47
Tabla 3 Efecto Von Karman simulado a 30 y 50 m/s .....	47
Tabla 4 Tabla de valores obtenidos geometría diámetro 1 pulgada variando las RPM .....	49
Tabla 5 Tabla comparativa de valores obtenidos geometría diámetro 2 pulgadas variando las RPM	50

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# Índice de Símbolos y Abreviaturas

## Símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>
	Densidad Media
	Velocidad en dirección x
	Velocidad unitaria en dirección y
	Velocidad unitaria en dirección z
$\omega$	Tasa de disipación específica
$K$	Energía Cinética Turbulenta
$\rho$	Densidad
$\mu$	Viscosidad
$\tau$	Fuerza cortante
$S$	Número Stronhal

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>T</b>	Temperatura
<b>P</b>	Presión
<b>V</b>	Velocidad
<b>m/s</b>	Metros por segundo
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto

**Página dejada en blanco intencionalmente**

# 1. Introducción

En el presente año, 2020, con el avance tecnológico y gracias a los estudios e implementación de la generación de energía renovable se han implementado diferentes diseños inspirados en aprovechar los recursos de la naturaleza con el fin de establecer nuevas tecnologías para la optimización y diseño de nuevos generadores de energía. En este proyecto se aplicó el efecto *Vortex* y *Von Karman*, Estos efectos son los más estudiados y conocidos en el campo de la mecánica de los fluidos; Técnicamente hablando en el caso de un cilindro (como obstáculo en un flujo), a medida que una partícula fluye sobre la superficie del cilindro, su presión aumenta desde la presión del flujo libre hasta la presión de estancamiento. La alta presión alcanzada por el fluido cerca de la superficie del cilindro impulsa al flujo sobre el mismo generando capas límites simétricas sobre la superficie del cilindro. Por otra parte. A altos números de *Reynolds*, la alta presión alcanzada no es suficiente para forzar el flujo sobre la parte trasera del cilindro. Cerca de la sección más ancha del cilindro, las capas límites generadas comienzan a separarse de la superficie del cilindro, debido a que la parte de la capa límite separada que está en contacto con la superficie del cilindro se mueve más lentamente que la parte que está en contacto con el flujo libre, la capa límite separada se enrolla, generando una serie de vórtices discretos y alternativos que viaja aguas abajo junto con el fluido y que finalmente dan forma a la estela conocida como los vórtices de *Karman*[22], este es un diseño que busca aprovechar la forma de un cilindro, el cual es un caso interesante de investigación a raíz de sus diferentes cualidades. Estas cualidades de geometría cilíndrica fueron estudiadas y analizadas para generar vórtices con el fin de generar vibraciones y convertir estas vibraciones en energía por medio de materiales piezoeléctricos. Los sistemas de *Energy Harvesting* son muy interesantes en entornos donde no existe red de suministro eléctrico, donde se deba minimizar la sustitución de baterías o donde no puedan instalarse baterías por motivos de seguridad. En algunos casos un sistema de alimentación basado en *Energy Harvesting* puede ser la mejor solución desde un punto de vista de la fiabilidad del sistema.

Este trabajo se centra en los sistemas de *Energy Harvesting* basados en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica utilizando piezoeléctricos.

Se verifica la viabilidad que tiene la implementación del efecto *Vortex* en esta geometría cilíndrica estudiando el comportamiento del flujo y sus propiedades a lo largo de cada una de las etapas previas y posteriores a la vibración inducida utilizando la herramienta de simulación

computacional *ANSYS-FLUENT*, donde se verifican las diferentes perturbaciones inducidas. Por lo tanto, al realizar estas simulaciones con cilindros de diferentes diámetros, la geometría de cada uno de ellos y simulando las condiciones en las que se obtiene una generación de energía, modificando los diámetros y las velocidades, así mismo se realiza una simulación en el túnel de viento de la *Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP* en Brasil con el fin de obtener los datos necesarios para el desarrollo del proyecto y así determinar si es viable la aplicación de este.

Este proyecto pretende mostrar una forma no tradicional para generar energía eléctrica utilizando energía eólica, pero sin utilizar generadores con palas habituales, en este proyecto se utilizaron estructuras ligeras hechas de materiales comunes y fáciles de adquirir como aluminio, lo que conlleva a una reducción de costos en el desarrollo del proyecto.

## 2. Planteamiento del Problema

La historia cuenta, a lo largo del tiempo, que para suplir nuestra necesidad se ha generado energía eléctrica con combustibles fósiles los cuales tienen un impacto ambiental al ecosistema bastante alto, estos combustibles también requieren de un alto costo para su extracción y procesamiento, estos son como recursos finitos que, indudablemente, van a agotarse; de ahí su nombre como recursos no renovables. En la actualidad se ha trabajado en proyectos para generar electricidad por medio de recursos renovables, los que se definen como formas de energía que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de un ser humano en el planeta, del cual el aprovechamiento de este tipo de energía es indispensable para dar paso a energías que no tengan alto impacto ambiental y tengan costos de extracción y producción reducidos. Dentro de estos tipos de energía se encuentran la eólica, que es la más viable debido a que el viento es un recurso infinito,

La energía eólica se puede aprovechar de una manera diferente a la convencional (generadores eólicos sin aspas) esto es por medio de la generación de energía utilizando el efecto de resonancia o vibraciones en un material piezoeléctrico, teniendo una geometría cilíndrica de manera que sometida a un flujo de aire se presenta un efecto de desprendimiento de vórtices llamado efecto de Von Karman, alrededor de la estructura cilíndrica lo que producen fuerzas laterales incidan en una placa que contiene un piezoeléctrico, haciendo que vibre la placa la cual esta sujeta sobre la parte posterior del cilindro, esto es una descripción satisfactoria de muchos sistemas físicos y aerodinámicos clásicos, en particular el análisis del movimiento de los cuerpos en un fluido, en este caso Aire, para la generación de energía utilizando como medio de conversión los materiales piezoeléctricos.

En la ingeniería aeronáutica y la ingeniería de estructuras, este fenómeno ha sido ampliamente estudiado para evitarlo y así poder evitar fallas estructurales. En este trabajo, por el contrario, haciendo uso de los principios aerodinámicos y de la mecánica de fluidos, se explorará analíticamente y mediante simulación en CFD los comportamientos óptimos para la generación de energía, analizando los resultados en pruebas del túnel de viento, con el fin de mostrar que es posible generar energía eléctrica cambiando la aerodinámica con la electrónica. Teniendo en cuenta la geometría, dimensiones y posiciones del aerogenerador y también usando como pieza clave los materiales piezoeléctricos. Como resultado, se mostrarán simulaciones de máxima eficiencia

energética y temporal. Finalmente, con base a la información mencionada se formula la siguiente pregunta: ¿Se puede generar energía eléctrica a partir de la energía eólica sin la utilización de generadores con aspas?

## 2.1 Rentabilidad

Una de las principales ventajas de este generador de vórtices es la reducción de coste asociada con la tecnología. Este diseño podría ser producido con un costo más bajo que los convencionales, lo que permitirá un retorno de la inversión más rápido. De todos modos, estudios más amplios sobre este tema serán realizados en el futuro para poder aportar más precisión a estos datos. [14]

Esto hace que esta tecnología sea altamente competitiva no solo con respecto a generaciones de energía alternativa o renovable, sino incluso en comparación con las tecnologías convencionales.

Estas reducciones de costos provienen de un diseño inteligente, así como de un uso más eficiente de las materias primas. No hay necesidad de una góndola, mecanismos ni palas, que son componentes de costes significativos en los aerogeneradores convencionales.

## 2.2 Impacto sobre la fauna

La forma de generar energía por este método no representa un mayor problema para la fauna, se espera que el impacto de la energía eólica sin palas en la población de aves sea mucho menor, ya que se observa que actualmente los generadores eólicos con palas tienen un impacto menor sobre la fauna. El diseño de este generador de vórtices de geometría cilíndrica permite que el movimiento oscilatorio de la placa sea pequeño y menos agresivo que el rotatorio de turbinas tradicionales, por lo que no perturbará la vida silvestre y permitirá que las aves y murciélagos detecten y eviten fácilmente los *Vortex* mientras vuelan. [14]

## **2.1 Objetivos**

### **2.1.1 Objetivo General**

- Determinar experimentalmente las condiciones favorables del fluido de corriente libre para el aprovechamiento máximo de generación de energía

### **2.1.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información teórica e investigativa relacionada con la generación de vórtices de Von Karman, energías que aprovechan las corrientes libres de un fluido y túneles de viento
- Desarrollar un modelo experimental que muestre y explique el comportamiento de la generación de energía por este fenómeno.
- Simular el modelo para explicar y demostrar el comportamiento de los fenómenos aerodinámicos de Von Karman, permitiendo así observar las perturbaciones que generan vibraciones y así transmitir la energía cinética del viento en energía mecánica con las frecuencias de los vórtices por medio de una estructura cilíndrica la cual lleva una placa con un material piezoeléctrico para la generación de energía.

**Página dejada en blanco intencionalmente**

## 2.2 Justificación

Los ingenieros, sea cual sea su especialidad, se encuentran en la búsqueda constante del mejoramiento de los elementos que rodean la sociedad; en este caso, más específicamente en el tema energético. Las soluciones que han nacido en el último siglo con relación a la generación de energía limpia tienen falencias y no están exentas de mejora debido a la eficiencia con la que se transforma la energía. [1]

Las energías renovables como: eólica, solar, geotérmica, biomasa y biocombustible han sido el auge de investigación en muchas potencias mundiales, esto se debe a su menor impacto ambiental, que, aunque se sabe que afectan su entorno biodiverso [2] [3], siempre se está buscando la disminución de este impacto.

Las energías eólicas o marítimas son fuentes que aprovechan las corrientes libres de un fluido. Sin embargo, se debe dejar en claro que no todos los generadores necesariamente utilizan turbinas [4,10]

Existe la posibilidad, para esta década (2020) de aprovechar las perturbaciones que generan los vórtices en el flujo por la presencia de un objeto externo. [6, 7, 8,9]

Cuando una estructura es sometida bajo un flujo laminar, en el flujo se forman una serie de vórtices (*Vórtices Von Karman*) que presentan un comportamiento cíclico lo que induce que la estructura oscile y adquiera una vibración a una determinada frecuencia, que al ser integrada en un sistema eléctrico adecuado puede llegar a generar electricidad.

Entonces, lo que se busca es poder determinar, por medio experimental, a qué condiciones específicas debe estar el fluido libre que atraviesa una barra para que sea más aprovechable la generación de la energía, de esta forma poder realizar una investigación y un proyecto de grado en el marco del convenio marco institucional entre la Fundación Universitaria Los Libertadores (Colombia) y la *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo* (Brasil).

**Página dejada en blanco intencionalmente**

## 3. Marco Teórico

En este capítulo se describe la fundamentación teórica indispensable para la comprensión del presente proyecto, se incluyen los conceptos principales, las ecuaciones desarrolladas para la obtención de los resultados tanto en la simulación computacional como las pruebas experimentales en el túnel de viento que permiten observar los principios aquí descritos.

En principio, se describen los principios aerodinámicos y los fenómenos de los cuales se presente obtener provecho, así mismo, se describen las ecuaciones principales necesarias para la simulación en CFD, los modelos de turbulencia, la caracterización del túnel de viento en el que fueron realizadas las pruebas y una introducción acerca de que son y cómo se puede obtener provecho de los materiales piezoeléctricos.

### 3.1 Análisis aerodinámico

La aerodinámica como rama de la mecánica de fluidos se encarga del estudio del comportamiento del flujo sobre el cuerpo y el movimiento relativo existente entre el objeto de estudio y el flujo gaseoso que lo rodea, es decir, la interacción entre estos dos. El sistema de ecuaciones que describen un análisis aerodinámico contiene como base fundamental los tres principios físicos fundamentales, los cuales son: [11]

- La conservación de la energía que enuncia que la energía en un sistema permanece constante, aunque se transforme en otro tipo de energía.
- La segunda Ley de Newton por la cual se tiene que la fuerza es igual a la multiplicación de la masa por la aceleración de esta.
- La conservación de la masa de *Lavoisier* describe que la masa no se crea, ni se destruye sino se transforma.

Antes del desarrollo computacional es necesario determinar el modelo de fluido a usar en el análisis aerodinámico a realizar, para ello se contemplan los 3 modelos que a lo largo de la evolución de la aerodinámica se han usado satisfactoriamente.[11]

## 3.2 Modelo de Turbulencia

La turbulencia es un fenómeno disipador de energía, el cual describe un movimiento en tres dimensiones lleno de torbellinos<sup>1</sup>. Esto sucede por inestabilidades en el flujo debido a variaciones de velocidades, de manera que el movimiento de los torbellinos da lugar a unos más pequeños y la energía se disipa en forma de calor, además la viscosidad del fluido empieza jugar un papel importante.

En los estudios aerodinámicos se hace uso de los modelos de turbulencia mediante los cuales se busca estudiar la vorticidad generada en las puntas de las alas y sobre la estructura como tal, estos se pueden agrupar en tres grupos como lo describe[11]:

- ✓ **RANS- Reynolds Averaged Navier Stokes:** se centra en los efectos de la turbulencia en las propiedades medias de flujo y el flujo medio.
- ✓ **LES- Large Eddy Simulation:** Se realiza un seguimiento del comportamiento de los remolinos más grandes.
- ✓ **DNS- Simulación numérica directa:** Calcula todas las variables sin que sea necesario promediar y/o tratar con las fluctuaciones.

### 3.2.1 Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad se origina al aplicar el principio físico fundamental de la conservación de la masa enunciado anteriormente, conocida también como ecuación de la conservación de la masa la cual describe el flujo neto de masa saliendo del volumen de control a través de la superficie de control[13]. Expresada de forma diferencial como:

---

<sup>1</sup> Según la RAE: 1. m. Remolino de viento. Disponible en: <https://www.rae.es/drae2001/torbellino>

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)[12]$$

### 3.2.2 Ecuación de Momentum

La ecuación de momentum o conservación de la cantidad de movimiento representa matemáticamente la segunda Ley de Newton, estableciendo que el momento lineal de salida del volumen de control más el incremento de este dentro del volumen de control lo que es igual a la suma de fuerzas que actúan sobre dicho volumen.

Las fuerzas actuantes sobre este son las fuerzas de cuerpo y las fuerzas superficiales, siendo las másicas o de cuerpo las que actúan directamente sobre la masa volumétrica como la fuerza gravitacional, la fuerza eléctrica, magnética y las superficiales las que se ejercen sobre la superficie de control del volumen, estas son la presión y las fuerzas viscosas[13]. La representación de la conservación de la cantidad de movimiento con lleva al desarrollo de 3 ecuaciones para cada dirección del sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z). [11] De forma diferencial:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx}; \text{ Momentum en dirección } x \quad (2.a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My}; \text{ Momentum en dirección } y \quad (2.b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz}; \text{ Momentum en dirección } z \quad (2.c)$$

Tomado de [11]

### 3.2.3 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un compendio de las mostradas anteriormente, el enfoque del proyecto permite establecer que para el análisis no es necesario tomar en cuenta el principio

físico de la conservación de la energía, ya que los parámetros a estudiar no requieren de la magnitud de esta variable, es decir, las ecuaciones desarrolladas por medio del *software* son las ecuaciones de continuidad, las cuales contiene intrínsecamente el principio de conservación de la masa y de momentum que expresan la segunda Ley de Newton en cada una de las direcciones o coordenadas cartesianas 'x', 'y' y 'z', de manera estacionaria dado que se estableció que no hay variación de esta respecto al tiempo. [11]:

### 3.3 Vórtices de Von Karman

El efecto de desprendimiento de vórtices por Vortex Shedding o “*Vortex Street effect*” se describió por primera vez y fue formalizado matemáticamente por *Theodore von Karman*, el genio de la aeronáutica, en 1911. Este efecto es producido por las fuerzas laterales del viento en un objeto sumergido en un flujo laminar. El flujo del viento genera un patrón cíclico de vórtices, que puede convertirse en un desafío de ingeniería para estructuras esbeltas, como torres, mástiles y chimeneas. [14]

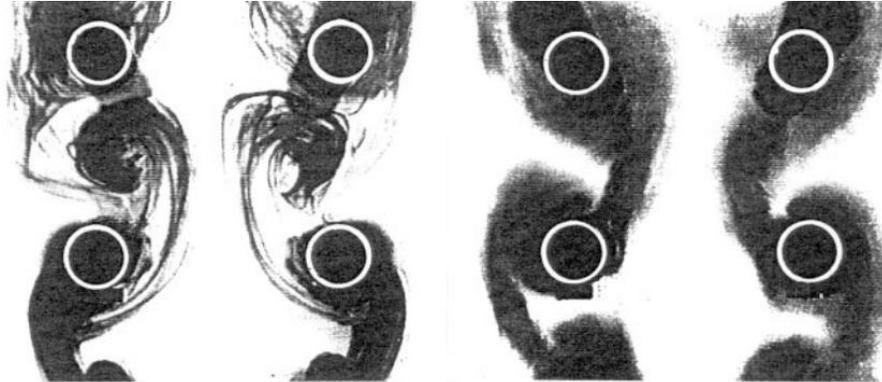
### 3.4 Tecnología Vortex, fluido dinámica

Tradicionalmente, profesionales de la ingeniería estructural, de la aeronáutica y de la arquitectura tratan de evitar las consecuencias negativas de este fenómeno VIV. Sin embargo, los generadores *Vortex* buscan maximizar esta inestabilidad aerodinámica, capturando de esta forma la energía contenida en ella. [14]

La geometría del cilindro está especialmente diseñada para lograr el máximo rendimiento de las velocidades promedio observadas del viento. Es capaz resistir a los flujos de aire turbulento que se observan comúnmente en entornos urbanos. [14]

La perturbación de la corriente de viento aguas abajo es la razón por la cual los molinos deben instalarse respetando una gran distancia entre ellas. Esto no afecta del mismo modo a los aerogeneradores por oscilación, implicando menos limitaciones asociadas con el “efecto estela”. [13] ejemplos es el colapso del puente *Tacoma Narrow* en 1940, USA [12].

En la ilustración 1 se presentan los vórtices generados por estructuras cilíndricas.

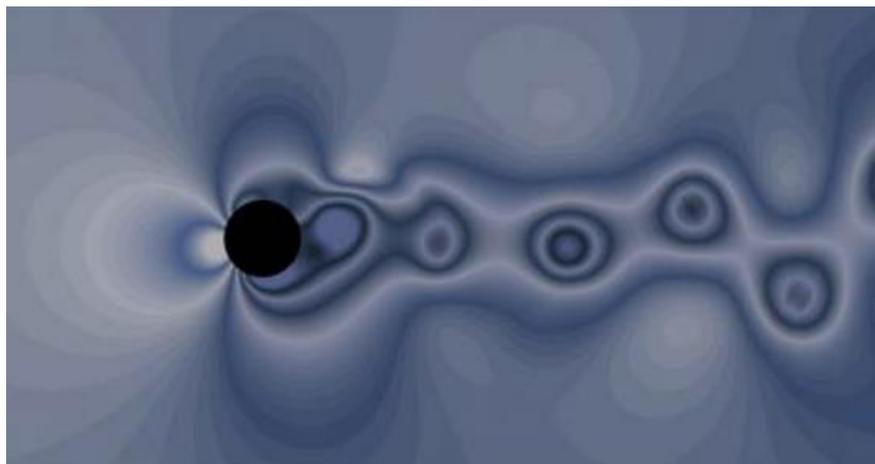


*Ilustración 1 Efecto VORTEX [37]*

### 3.4.1 Aprovechamiento de las vibraciones

La idea detrás de la nueva tecnología *Vortex* es la posibilidad de que puedan aprovecharse las fuerzas de sustentación de este desprendimiento de vórtices para producir energía. Cuando los vórtices del viento inciden en la placa puesta en la estructura del dispositivo, comienza a resonar, por lo tanto, a oscilar, de modo que el aerogenerador por medio de la vibración de los materiales piezoeléctricos adquiere una energía mecánica que posteriormente puede convertirse en energía eléctrica. [14]

En la ilustración 2 se evidencia los Vórtices de *Von Karman* generados por una estructura cilíndrica.



*Ilustración 2 Vórtices de Von Karman [14]*

## 3.5 Condiciones de Frontera

Todos los análisis de fluidos computacionalmente dependen de las condiciones iniciales y condiciones de frontera, cada problema planteado en CFD tiene su grado de dificultad o complejidad y conlleva al uso de las condiciones de frontera que más se ajusten al problema real, para así desarrollarlo y dar solución. Las condiciones de frontera más usadas según la guía de ANSYS [15] son nombradas a continuación:

- Entrada (*inlet*): Las condiciones de frontera usadas en la zona de entrada del flujo son las siguientes:
  - *Velocity Inlet*: usada para definir la velocidad y las propiedades escalares del flujo en la frontera de entrada.
  - *Pressure Inlet*: usada para definir la presión total y otras cantidades escalares a la entrada del flujo.
  - *Mass Flow Inlet*: usada en flujos compresibles para prescribir la rata de flujo de masa a la entrada.
- Salida (*outlet*): la condición de frontera más comúnmente empleada en la zona de salida es el *Pressure Outlet*, la cual es usada para definir la presión estática como variable de salida del flujo.
- Simetría (*symmetry*): es usada cuando la geometría física de interés y el patrón esperado de la solución del flujo o térmica tienen un espejo de simetría
- Pared (*Wall*): usado para unir regiones de fluido y sólidas. En flujos viscosos, la condición de límite antideslizante se impone en las paredes de forma predeterminada, pero puede especificar una componente de velocidad tangencial en términos del movimiento de traslación o rotación del límite de la pared, o modelar una pared de "deslizamiento" especificando el corte. [11]

## 3.6 Malla

En un análisis aerodinámico computacional caracterizar el tipo de malla que se va a utilizar es de suma importancia, esto con el fin de obtener resultados que se asemejen a la realidad y los cuales sean reales para que estos resultados puedan ser comparados con las simulaciones reales en el túnel de viento.

Existen dos tipos de mallas comúnmente usadas como se describe a continuación:

- **Malla Estructurada:** Es aquella cuyos elementos son estrictamente iguales, su distribución es más homogénea y se establece con el fin de analizar geometrías cuya forma no es compleja, normalmente en 2D. [11]
- **Malla No Estructurada:** Se elabora normalmente para geometrías complejas de analizar generalmente en 3D, esta malla se caracteriza por estar compuesta de elementos estructuralmente dispares. [11]

## 3.7 Túnel de viento

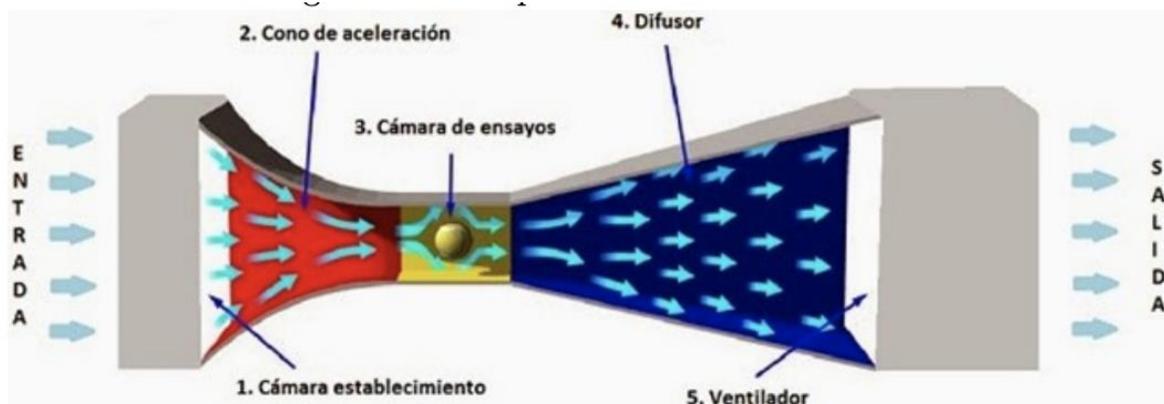
### 3.7.1 Tipos

Existen dos tipos de túneles de viento, el primero, es aquel que está abierto en ambos extremos y extrae el aire de la sala a la sección de prueba (túnel de retorno abierto). Este posee un bajo costo de construcción y su diseño es superior para la propulsión y visualización de humos. Sin embargo, presenta algunas desventajas tales como la poca calidad de flujo posible en la sección de prueba, ya que debe mantenerse alejado de los objetos en la habitación (paredes, escritorios, personas, entre otros) debido a que estos pueden producir asimetrías en la campana, al ser abierto a la atmósfera también se ve afectado por el viento y el clima, posee un alto costo operativo, su operación es ruidosa y esto puede limitar los tiempos de operación. [4]

El segundo, es aquel que se encuentra cerrado y recircula el aire a través de la sección de prueba (túnel de retorno cerrado), es decir, el aire es conducido desde la salida de la sección de prueba hasta el ventilador por una serie de paletas giratorias, al salir del ventilador, el aire regresa a la sección de contracción y vuelve a la sección de prueba. Los túneles de retorno cerrado presentan una calidad de flujo superior en la sección de prueba, su costo operativo es bajo, su operación silenciosa en relación con un túnel de retorno abierto y su ventilador no tiene que acelerar constantemente el aire. Adicionalmente, pueden funcionar de forma subsónica o supersónica. No obstante, este túnel también presenta ciertas desventajas como lo son su alto costo de construcción debido a las aspas y conductos agregados, su diseño es inferior para la propulsión y visualización de humos, debe estar diseñado para purgar los productos de escape que se acumulan en el túnel y sus condiciones de funcionamiento son más calientes que un túnel de retorno abierto. [15]

### 3.7.2 Componentes

Existen diferentes tipos de túneles de viento, sin embargo, todos poseen cinco componentes principales cuyo diseño permite al modelo que es sometido a prueba obtener las propiedades necesarias para el estudio de los fenómenos que se generan durante su interacción. En la ilustración 3, se presentan los principales componentes de un túnel de viento de cámara abierta los cuales son la sección de entrada, cámara de establecimiento, cono de aceleración, cámara de ensayos, difusor y ventilador. [15]



*Ilustración 3 Componentes Túnel de viento Fuente [18]*

### 3.7.3 Sección de entrada

Permite el suministro de aire el cual será un flujo espaciado, casi uniforme, y estable que finalmente llegará a la sección de prueba para los respectivos estudios. [15]

### 3.7.4 Cámara de establecimiento

Compuesto por mallas las cuales permiten dar al flujo los parámetros de calidad necesarios para lograr dar una mejor uniformidad a los perfiles de velocidad establecidos durante su paso por las diferentes secciones del túnel y también logra la eliminación los vórtices más grandes. Existen dos tipos de mallas las cuales son:

- Panel de abejas: cuando el fluido pasa por esta zona hay una reducción de la velocidad del flujo. También este panel permite que el fluido pueda tomar la dirección deseada y no ingrese ningún objeto extraño al túnel.
- Pantallas de turbulencias: logra la uniformidad del perfil de velocidades del fluido y gracias a ello se evitarán pérdidas de velocidad a lo largo del túnel, sin embargo, durante el paso del fluido por esta malla se evidencia una gran pérdida de presión lo cual casi no influencia en la variación de la velocidad de las líneas aerodinámicas, y también se sigue evidenciando presencia de algunas turbulencias pequeñas. [15]

### 3.7.5 Cono de aceleración

Se encuentra ubicado entre la cámara de acondicionamiento y la sección de pruebas. Este cono permite que sea determinada la velocidad que va a tener el flujo, por lo cual se reduce la variación de la velocidad para que al momento de salir de la zona el flujo se encuentre estable y uniforme. Tal aceleración es generada mediante una reducción gradual de su sección recta, produciendo así un incremento continuo y proporcional de la velocidad, reduciendo el grosor de la capa límite en cámara de ensayo y evitando la formación de vórtices. Se observa mediante la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales, que el incremento de velocidad a la salida de esta sección va acompañado de una reducción de presión de esta. [16]

### **3.7.6 Cámara de pruebas**

En esta sección se ubica el modelo aerodinámico sobre el cual se le realizará el estudio. En esta sección se verifica que el flujo del fluido esté cumpliendo con los parámetros de velocidad y turbulencia deseados para la simulación a estudiar, es muy importante que el paso del flujo sea bastante uniforme.

### **3.7.7 Difusor**

Cuando el aire sale de la sección de prueba el difusor se encargará de realizar la acción opuesta al cono de contracción, es decir, la presión aumentará mientras que la velocidad empezará a reducirse en la menor distancia posible para evitar la separación del flujo, teniendo en cuenta que debe haber una reducción de energía muy baja, ya que gracias ello se puede recuperar en su totalidad la presión. Para evitar la inversión de flujo, la presión de salida debe ser más alta que la atmosférica en el caso de un túnel de viento de circuito abierto. [17]

### **3.7.8 Túnel de viento Escuela de Ingeniería de Sao Carlos - Universidad de Sao Paulo**

Es un túnel de viento de tipo abierto, diseñado por estudiantes y docentes de Escuela de Ingeniería de Sao Carlos de la Universidad de Sao Paulo, como se observa en la ilustración 4. Este túnel posee una cámara de ensayo abierta y una salida de 1,05 m de largo por 0,8 m de alto, contiene un motor que genera una potencia de 25,2 kW y proporciona un flujo volumétrico de 115000 m<sup>3</sup> /h. Adicionalmente cuenta con una balanza aerodinámica de tipo TE81. [15]

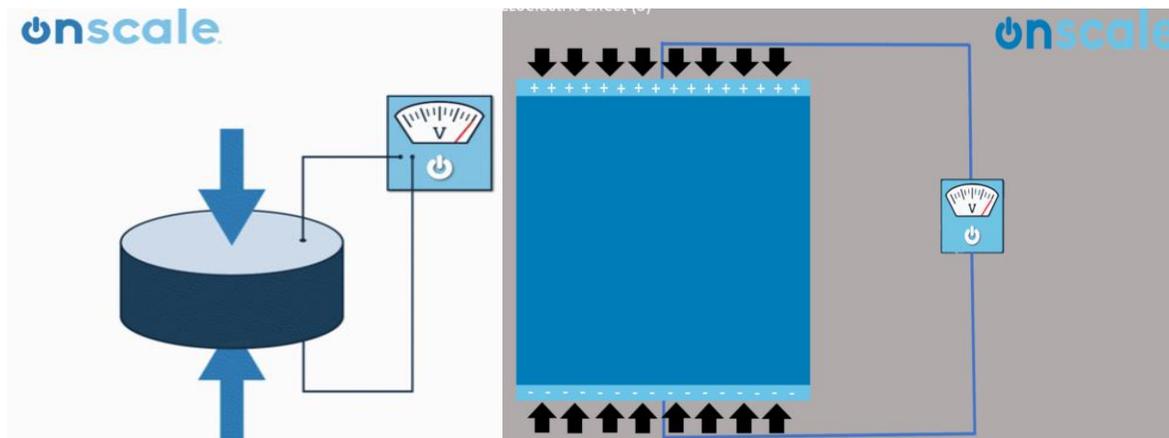


*Ilustración 4 Túnel de viento Fuente: Autor*

## **Piezoelectricidad**

La piezoelectricidad fue descubierta por Jacques y Pierre Curie en el año de 1880, y se refiere al fenómeno en el cual se genera electricidad en ciertos materiales, la mayoría de las veces cristales que, al ser sometidos a un esfuerzo o tensiones mecánicas, su masa adquiere una polarización eléctrica lo cual induce una diferencia de potencial o tensión y cargas eléctricas en su superficie. [19]

En la ilustración 5 se evidencia el proceso de generación de energía por medio de materiales piezoeléctricos.



*Ilustración 5 Piezoelectricidad Fuente [19]*

### **3.7.9 Energía *Harvesting***

Es un proceso por el cual la energía derivada de fuentes externas, tales como energía luminosa, energía térmica o energía mecánica, es convertida a energía eléctrica, que se almacena para poder servir como fuente de energía en la alimentación de sistemas electrónicos de bajo consumo. [20]

## 4. Diseño Metodológico

Partiendo de que la investigación que se realiza es del tipo experimental que, se refiere a una investigación prospectiva, la cual se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por que causa se produce una situación o acontecimiento particular [21].

La idea principal de este proyecto de investigación se describe por ser principalmente experimental, de carácter exploratorio, enfocado en el desarrollo de un diseño capaz de generar energía eléctrica de los materiales piezoeléctricos, en este caso captando el aire de impacto lo que produce una excitación mecánica que podrá ser.

En el proyecto de investigación se llevaron a cabo las siguientes etapas:

1. Búsqueda de fuentes de información relacionada con la descripción del efecto piezoeléctrico y los materiales que poseen las características requeridas.
2. Desarrollo de un prototipo que contenga la cerámica piezoeléctrica y reciba la excitación mecánica proveniente del efecto *Von Karman*.
3. Diseño, construcción y montaje de la geometría cilíndrica como dispositivo de prueba.
4. Implementación del sistema generador de energía en el túnel de viento.

Con el fin de observar y realizar una comparación con la simulación del dispositivo cilíndrico se llevaron a cabo diversos análisis aerodinámicos principalmente de los cilindros con el diámetro igual al de los tubos estudiados experimentalmente en el túnel de viento.

El análisis computacional se realizó mediante el *software ANSYS* el cual está basado en el método de volúmenes finitos; las simulaciones realizadas se configuraron de modo que se obtuvieran aproximaciones más reales con base a parámetros de rendimiento, eficiencia, sustentación y arrastre para cada una de las geometrías.[11]

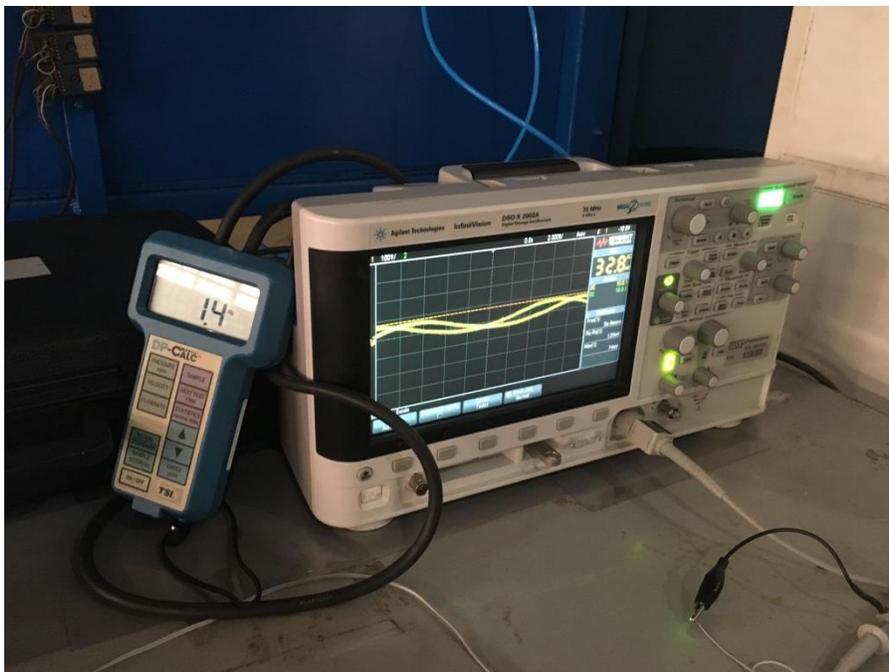
El modelo bidimensional es el utilizado en los estudios, ya que la geometría que se está estudiando es simétrica y de esta manera se puede ver de una mejor manera los vórtices generados.

## 5. Investigación Experimental

Ahora bien, para la realización de la parte experimental se tiene como fundamento el fenómeno piezoeléctrico, el movimiento de la placa ubicada en los tubos, sometida a los efectos aerodinámicos de *Von Karman* lo que induce un esfuerzo mecánico en el piezoeléctrico este movimiento cíclico produce que se estire y contraiga provocando una presión y descompresión que genera señales eléctricas las cuales se pueden observar por medio del osciloscopio quien es capaz de realizar la adquisición y registro de datos.

Se utilizó, en la parte experimental, un osciloscopio DSO-X 2002A *Digital Storage Oscilloscope* 70 MHz *Agilent Technologies*, una sonda de pruebas RP2200 de multiplicidad 10× (10:1, 500 MHz BW), y un *Pen Drive USB* para transferir los datos del osciloscopio, así mismo para las condiciones atmosféricas y velocidades en el túnel de viento se utilizó el barómetro Digital.

En la Ilustración 6 se evidencian los equipos utilizados para la obtención de datos de este proyecto.



*Ilustración 6 Osciloscopio DSO-X 2002A. Fuente: Autor*

## 5.1 Geometrías del Cilindro

Se elaboraron 2 geometrías del generador de vórtices, las cuales tenían un diámetro de 1 y 2 pulgadas.

La construcción del prototipo permitirá obtener, a partir de las pruebas en el túnel de la forma y magnitud de la respuesta eléctrica del material piezoeléctrico sometido a la excitación mecánica por parte de los efectos de vorticidad. Es indispensable tener los valores obtenidos por el osciloscopio, ya que permitirán conocer la frecuencia y la diferencia de voltaje producido por el piezoeléctrico y posteriormente permiten obtener un modelo eléctrico, lo que ayudará a realizar un análisis y así comparar las frecuencias que tiene el efecto *Vortex* sobre la placa vistas en simulación CFD y las obtenidas por las pruebas experimentales en el túnel de viento.

## 5.2 Estructura

El cilindro exterior es rígido y está con una placa la cual tiene un área de  $200 \text{ cm}^2$  (10 cm de alto por 20 cm de largo) en la parte posterior del flujo cuyo fin es oscilar, permaneciendo anclado a la varilla o núcleo. El movimiento de la placa del cilindro no está restringido, lo que puede llevar a encontrar aquí la máxima amplitud de oscilación. La estructura fue realizada por medio de tubos de PVC que son materiales ampliamente utilizados en la cotidianidad, más adelante podría estudiarse la utilización material compuestos.

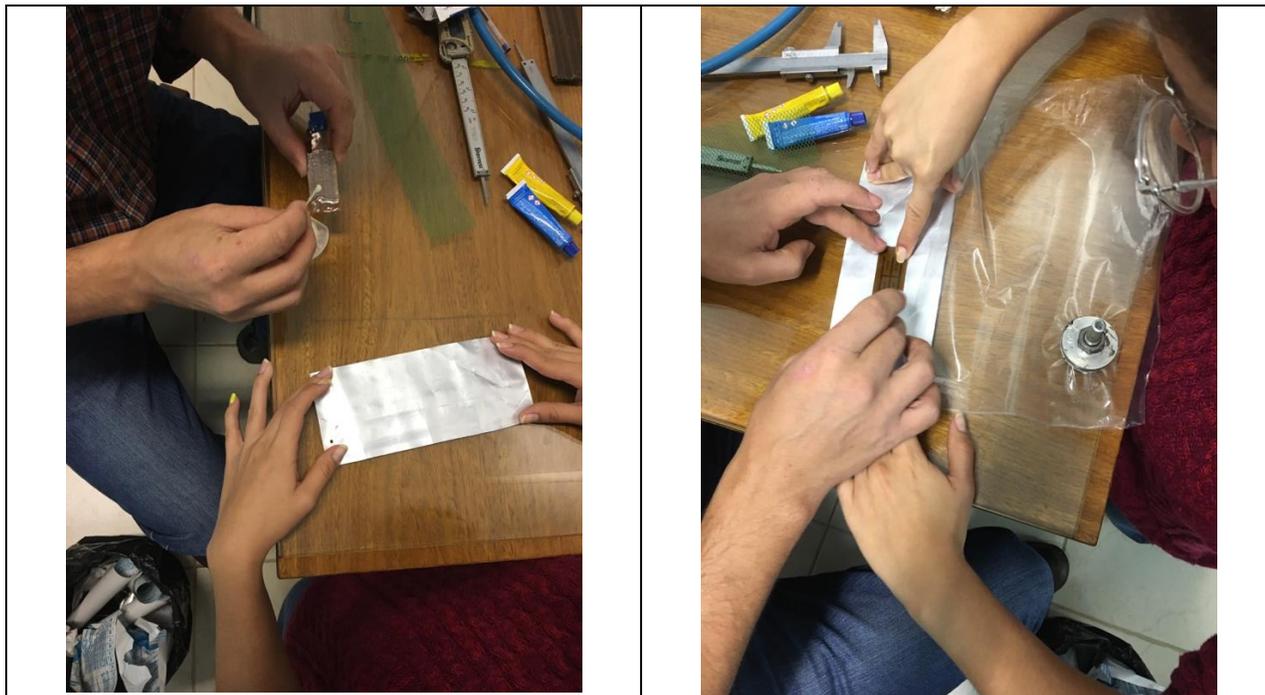
En la mitad del cilindro se ubica la placa de aluminio y su parte inferior está firmemente anclada al túnel de viento. Como ya se mencionó la estructura está construida de un tubo PVC y placa de aluminio, que proporciona una gran resistencia a la fatiga y tiene una pérdida de energía mínima cuando oscila. El montaje de la placa se muestra en la Ilustración 7.



*Ilustración 7 Geometría cilíndrica con placa de aluminio. Fuente: Autor*

### **5.3 Pegado del Piezoeléctrico**

El proceso de pegado del piezoeléctrico a la lámina es de gran importancia, ya que este proceso incide notoriamente en la eficiencia del piezoeléctrico. El proceso requirió de tiempo, el piezoeléctrico fue pegado con Cola Epoxi ARALDITE, el proceso se muestra en las ilustraciones 8,9. Se observa que es pegado al vacío con el fin de tener el mayor rendimiento por parte del piezoeléctrico.



*Ilustración 8 Procedimiento de pegado del piezoeléctrico a la placa de aluminio. Fuente: Autor*



*Ilustración 9 Pegado del material piezoeléctrico a la placa de aluminio al vacío. Fuente: Autor*

## 5.4 Frecuencia y sintonizado

La frecuencia de desprendimiento de vórtices es proporcional a la velocidad de la corriente de viento, sin embargo, las estructuras con diferentes diámetros tienen su propia frecuencia de oscilación natural.

Para hacer coincidir las frecuencias de desprendimiento de vórtices con la frecuencia de oscilación natural de un dispositivo, debe modificarse la velocidad (cuanta más velocidad, mayor es la frecuencia) y la rigidez de la placa, entre otros parámetros (mayor rigidez, frecuencia más alta). Por lo tanto, el dispositivo está diseñado para que la placa obtenga la misma frecuencia de los vórtices generados por el tubo. Estos diseños permiten capturar energía ante un rango más amplio de velocidades de viento, desde unas bajas velocidades.

Esto consigue la variación de la rigidez aparente de la placa que puede “sintonizarse” con la velocidad del viento incidente, para permanecer en resonancia sin ninguna interferencia mecánica o manual. De esta forma se aumenta en gran medida la transmisión de esa energía mecánica a los piezoeléctricos, y así, se puede generar energía. [12]

## 5.5 Series de Fourier

Las series de *Fourier* [22] permiten representar una función periódica como sumatorias de senoides para obtener el espectro de la serie en frecuencia. Cualquier función periódica práctica se puede representar como suma de senoides. Esta representación, junto con el teorema de superposición, permite encontrar la respuesta de circuitos a entradas periódicas arbitrarias utilizando técnicas fasoriales. Una función periódica es la que se repite cada  $T$  segundos, en otras palabras, satisface una función  $f(t)$ .

$$f(t) = f(t + nT) \quad (4.1)$$

Donde  $n$  es un entero y  $T$  es el periodo de la función. De acuerdo con el teorema de *Fourier*, toda función periódica práctica de frecuencia  $\omega_0$  se puede expresar como una suma infinita de funciones seno o coseno, que son múltiplos enteros de  $\omega_0$ . Por lo tanto,  $f(t)$  se puede representar como:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + a_3 \cos 3\omega_0 t + b_3 \sin 3\omega_0 t + \dots \quad (4.2)$$

Expresado de otra forma:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_0 t + B_n \sin \omega_0 t) \quad [4.3]$$

Donde:

$$\begin{aligned} \omega_n &= 2n\pi/T = 2n\pi f \\ (5) \quad A_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \theta_n &= \tan^{-1} (b_n / a_n). \end{aligned} \quad [4.4]$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad [4.5]$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos (2n\pi T t) dt \quad [4.6]$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin (2n\pi T t) dt \quad [4.7]$$

## 5.6 Numero *Stronhal*

En el análisis dimensional, el *número Stronhal* ( $St$ ) es un número adimensional que describe los mecanismos de flujo oscilante. El parámetro lleva el nombre de *Vincent Stronhal*, un físico checo que experimentó en 1878 con cables que experimentaban el desprendimiento de vórtices y sonaban con el viento. [23] El número de *Stronhal* es una parte integral de los fundamentos de la mecánica de fluidos.

El trabajo de investigación del fenómeno durante la década de 1950 y 1960 se enfocó sobre el estudio de la relación entre la generación de vórtices de Karman y las oscilaciones o vibraciones asociadas al mismo (*Flow-induced Vibrations*). Durante estas investigaciones se encontró la importancia del número adimensional de *Stronhal* en el modelamiento del fenómeno, este número está determinado por la siguiente ecuación:[24]

$$[4.8]$$

Donde:

$F_v$ : Frecuencia de generación de vórtices.

$h$ : Longitud característica de la geometría del obstáculo

$V$ : Velocidad media del flujo.

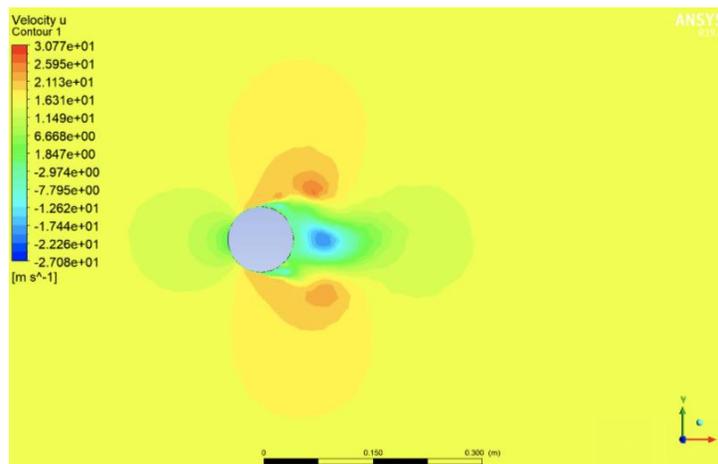
Por otra parte, los métodos de vorticidad son aquellos que permiten realizar una simulación de la dinámica de la vorticidad cerca de una frontera, esto quiere decir que son métodos que permiten de una manera aproximada resolver la ecuación de *Navier-Stokes* (Para ser más específicos la ecuación de

evolución de la vorticidad) en las vecindades de una superficie plana o curva con velocidad cero. “*Vortex Methods*” es el término utilizado en la literatura técnica para los métodos descritos y por supuesto existen muchas técnicas de simulación desarrolladas que se pueden clasificar de acuerdo con su dependencia de la generación de una malla para su solución. Para el desarrollo de esta investigación se escogió el método de caminatas al azar (*Random Walks*), desarrollado por *Alexandre Joel Chorin* en 1973 el cual han sido validado experimentalmente en diversas investigaciones realizadas a nivel mundial.[24]

## 5.7 Desarrollo Computacional

Se buscó realizar un entorno computacional que genere una similitud al túnel de viento real donde fueron probados los modelos generadores de vórtices.

El dominio computacional consiste en la elaboración de una caja con las dimensiones descritas en la Ilustración 10, posteriormente se procede a importar la geometría cilíndrica con el fin de realizar el dominio computacional final, seguido de esto se realizó una operación Booleana o de extracción, es decir, a la caja creada al inicio se le sustrajo la geometría cilíndrica.



*Ilustración 10 Dimensiones del dominio computacional*

## 5.8 Condiciones de Frontera

Las condiciones atmosféricas para establecer las condiciones de frontera establecidas para las simulaciones fueron tomadas por el barómetro, del hangar de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos de la Universidad de Sao Paulo de en donde se realizaron las pruebas experimentales en el túnel de viento para los dos modelos en flujo laminar.

T [c]	25,8
Patm	918,2
T [k]	298,8
P[Pa]	91820
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,07052

El algoritmo desarrollado puede simular con una buena aproximación, lo que sucede con la estela dejada por el obstáculo al variar el número de *Reynolds*.

El dominio computacional en el cual se realiza la simulación depende del flujo que se esté analizando, para el caso de la calle de vórtices de *Karman* es importante tener un dominio grande, ya que fuera de dicho dominio el flujo se considera irrotacional y por consiguientes se eliminan todos los elementos de vorticidad que estén presentes. En el caso del efecto *Von Karman* la ubicación de la frontera de aguas abajo juega un papel muy importante, ya que si esta se encuentra muy cerca del obstáculo puede inducir errores en el campo de velocidad simulado. [24]

## 5.9 Montaje en túnel de viento

El diseño cilíndrico se ubica de tal forma que cause un bloqueo al flujo de aire por lo que tiene que contornear el cilindro. Al forzar al flujo de aire alrededor del cilindro, la velocidad del flujo de aire experimenta un cambio. El flujo de aire cercano al cilindro experimenta fricción de la superficie del cilindro y reduce su velocidad. La velocidad del fluido producida por el cilindro no es constante en ambos lados del cuerpo del cilindro.

El montaje en el túnel se observa en las ilustraciones 11,12 y 13.



*Ilustración 11 Montaje final túnel de viento – Generador de vórtices con placa, Diámetro 1 pulgada Fuente: Autor*



*Ilustración 12 Montaje final túnel de viento – Generador de vórtices con placa, Diámetro 2 pulgadas Fuente: Autor*



*Ilustración 13 Balanza. Túnel de viento Fuente Autor*

## 5.10 Conversión De Energía

Este generador de vórtices captura la energía del viento cuando entra en resonancia debido a un efecto aerodinámico denominado desprendimiento de vórtices. En la mecánica de fluidos, cuando el viento pasa a través de un cuerpo romo, el flujo se modifica y genera un patrón cíclico de vórtices.[14] Una vez que la frecuencia de estas fuerzas incide en la placa que contiene el piezoeléctrico, se conecta directamente la señal proveniente del piezoeléctrico al osciloscopio, sin embargo se espera que a futuro se estudie la implementación de un circuito que sea capaz de convertir la energía eléctrica generada en DC y así mismo pueda ser almacenada con el fin de optimizar este diseño.

## 6. Análisis y Resultados

Una vez recogida, registrada y organizada la información del trabajo de campo realizado en las simulaciones y en el túnel de viento, el siguiente paso consiste en analizar si los planteamientos teóricos estudiados son sustentados y comprobados con los datos empíricos obtenidos.

A priori se puede observar que se puede dar respuesta a los objetivos y la hipótesis planteada a partir de las mediciones efectuadas y los datos resultantes.

El análisis de resultados permite observar mediante las simulaciones, los vórtices generados por la geometría cilíndrica, la cual tiene un comportamiento cíclico de donde se puede obtener una frecuencia de estos vórtices, los cuales son aprovechados para excitar mecánicamente el material piezoeléctrico.

Con el fin de concluir el proyecto y definir si es posible generar energía aprovechando el efecto *Von Karman* se realizó un análisis numérico en *CFD* el cual será comparado con los resultados del análisis experimental en túnel de viento soplador los cuales soportaran los resultados.

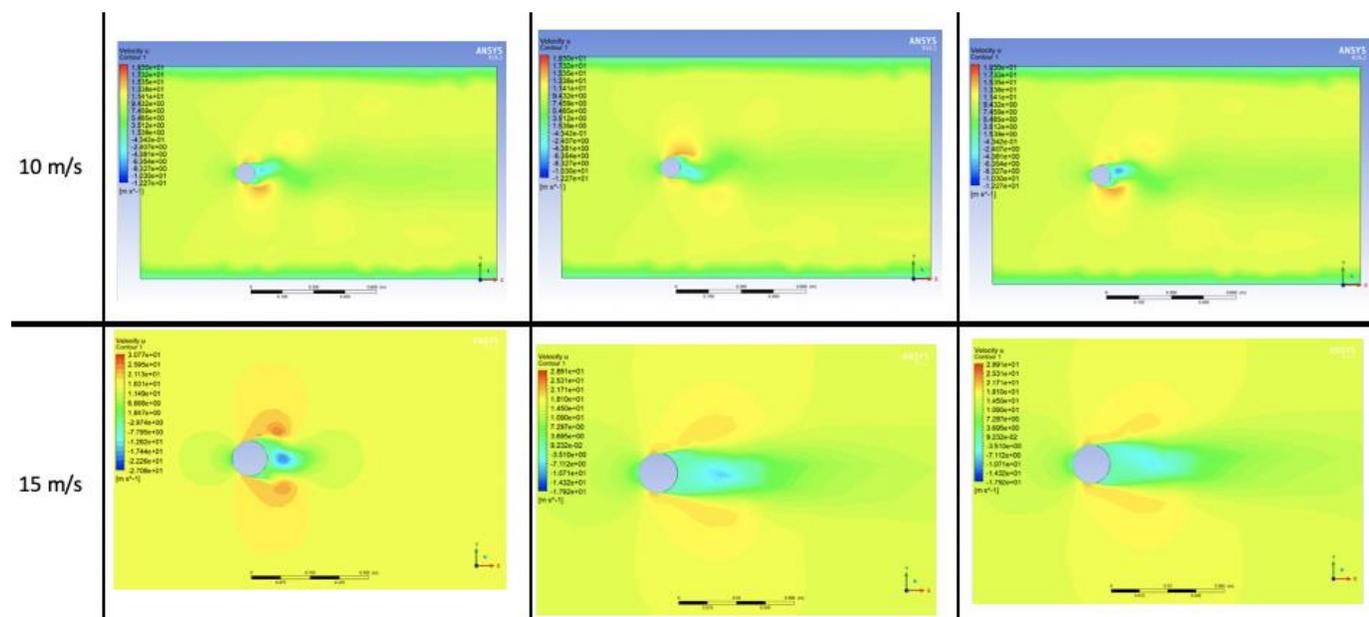
En este capítulo se describen los resultados obtenidos de forma numérica y experimental para posteriormente llevar a cabo una comparación entre ambos.

### 6.1 Vórtices generados

Con el fin de obtener datos más reales se realizaron diversas simulaciones para cada juego de diferentes configuraciones variando diámetro del cilindro que permite simular, captar el flujo y observar los vórtices generados, los cuales son de gran interés para que estos sean aprovechados y captados por la placa con el piezoeléctrico.

Las simulaciones mostradas en las Tablas 1, 2,3 y 4 son de gran importancia, ya que permiten observar el efecto *Vortex*, el cual es indispensable para realizar la siguiente fase experimental en el que los vórtices obtenidos en la simulación también se puedan observar mediante la vibración del modelo

cilindro con la placa que contiene el piezoeléctrico en el túnel de viento y así generar una señal eléctrica. De la simulación también se puede observar la frecuencia y para medir estos vórtices generados por la geometría cilíndrica sobre el flujo de aire que circula alrededor del cilindro, se pueden detectar, contar y visualizar en las simulaciones realizadas. Estos vórtices poseen una frecuencia proporcional a la velocidad del flujo de aire dividida por el diámetro del cilindro. El efecto *Von Karman* a diferentes velocidades y números como se muestra en las tablas 1, 2, 3 solo es visible en un número Reynolds de aproximadamente  $10^3 < Re_d < 10^5$ .



*Tabla 1 Resultado Simulación CFD a una velocidad de 10 y 20 m/s*

En las simulaciones descritas en las tablas 1, 2, 3 se puede observar la generación del efecto Von Karman, no obstante, mediante la tabla 1 se observa, como el efecto no se presenta a una velocidad de 15 m/s, así mismo en la tabla dos se puede observar que a una velocidad de 20 m/s tampoco se presenta el efecto por lo que se puede concluir que en este rango de velocidades no es óptimo el efecto, evitando el máximo aprovechamiento del viento.

En las tablas 2 y 3 se observa que el efecto Von Karman se presenta nuevamente a partir de una velocidad simulada de 25 m/s, de esta manera puede obtener y caracterizar el efecto Von Karman mediante el número Stronhal, obteniendo las frecuencias de los vórtices generados por la estructura cilíndrica.

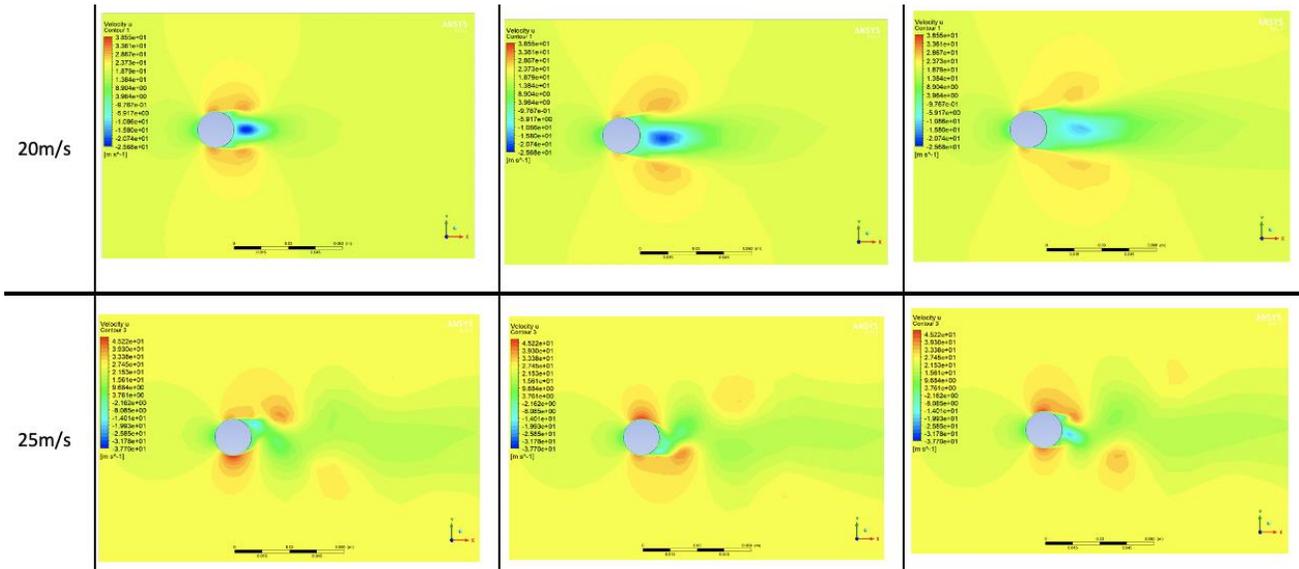


Tabla 2 Comparación de velocidades de 20 y 25 m/s de la estructura cilíndrica.

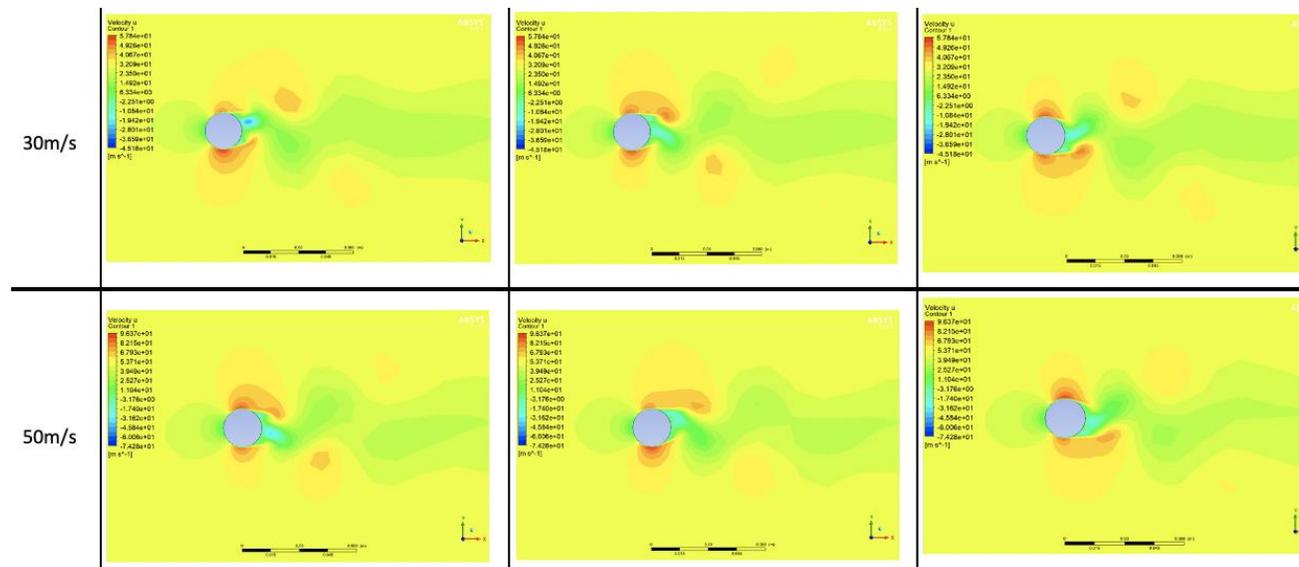


Tabla 3 Efecto Von Karman simulado a 30 y 50 m/s

La frecuencia de los vórtices y la velocidad del flujo tienen una relación casi lineal cuando se encuentran las condiciones ideales. La frecuencia de los vórtices estudiados es proporcional al número de *Stronhal*, la velocidad del flujo de aire y la inversa del diámetro del cilindro de este proyecto. La frecuencia de los vórtices es indispensable, ya que es esta misma frecuencia la que excita mecánicamente el piezoeléctrico.

## 6.1.1 Pruebas Experimentales

Con el fin de determinar y observar experimentalmente los vórtices generados por la geometría cilíndrica, se realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos mediante el análisis de CFD y los resultados de las pruebas en el túnel de viento soplador.

Se midieron las condiciones atmosféricas mediante el uso del barómetro, se realizó la calibración de la balanza, la cual se encuentra conectada al osciloscopio donde se realizaron las lecturas de las mediciones que se iban obteniendo del túnel.

El túnel fue encendido estableciendo una velocidad de aproximadamente 21 m/s, luego se realizó la toma de datos de presión dinámica con ayuda del micro manómetro y de los valores obtenidos por la balanza aerodinámica para 600, 700, 800, 900 y 1000 RPM. Como se puede observar en las ilustraciones 14 y 15, las pruebas experimentales en el túnel de viento.



*Ilustración 14 Geometría ancladas al túnel de viento con piezoeléctrico. Fuente: Auto*



*Ilustración 15 Estructura cilíndrica instalada en túnel de viento. Fuente: Autor.*

Seguido de esto se procedió a realizar la misma toma de datos anterior variando de 50 en 50 las RPM del túnel de viento, con los valores obtenidos se calculó la frecuencia, amplitudes de la señal y el voltaje generado, mostrado en la Tabla 4.

rpm	velocidad	f teórica	f exp	error
150	2,4	5	0,0	100,0
200	3,5	8	47	73,3
250	4,5	10	8	21,1
300	5,7	12	8	36,8
	5,7	12	8	36,8
350	6,7	15	16	6,4
	6,7	15	8	46,8
400	7,8	17	8	54,1
	7,8	17	16	8,2
500	9,9	22	23	7,8
	9,9	22	16	28,1
600	12,1	26	23	11,5
	12,1	26	23	11,5
700	14,3	31	16	50,3
	14,3	31	23	25,5
800	16,4	36	31	13,4
	16,4	36	31	13,4
900	18,7	41	31	24,0

*Tabla 4 Tabla de valores obtenidos geometría diámetro 1 pulgada variando las RPM*

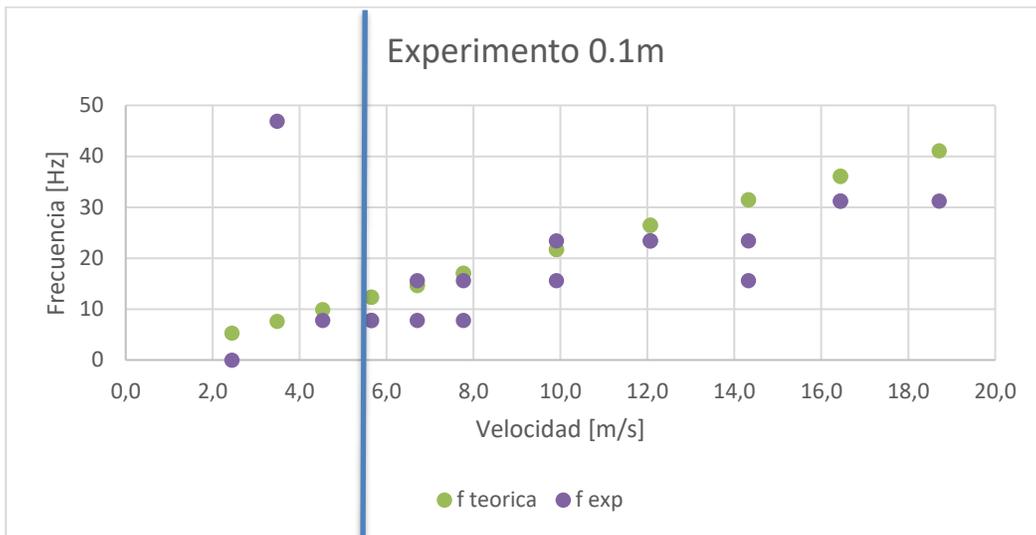
Se calculó el error porcentual con el fin de servir de indicador de la calidad de las medidas tomadas experimentalmente en el túnel de viento y las calculadas teóricamente. Un aspecto importante por la cual se calculó el error porcentual es observar que tan alejados están los datos calculados experimentalmente de los teóricos y así tener una mayor confiabilidad en los datos obtenidos.

Como se puede observar en las tablas 4 y 5 el error es alto cuando se encuentra a bajas RPM esto se debe a que el túnel de viento antes de una velocidad aproximada de 6 m/s presenta gran inestabilidad en el flujo lo que lleva a tener medidas imprecisas las cuales fueron reflejadas mediante el cálculo del error.

rpm	velocidad	f teórica	f exp	error
60	0,74864913	1,57479475	0	100
100	1,43355394	3,08158533	0	100
150	2,44507781	5,30693785	0	100
200	3,53797774	7,7113177	7,813	1,3
250	4,61498316	10,0807296	7,813	22,4
300	5,73421575	12,5430413	7,813	37,7
350	6,71005711	14,6898923	7,813	46,8
400	7,85189829	17,2019429	15,63	9,1
500	10,0348776	22,0044973	15,63	28,9
600	12,1717855	26,7056947	31,25	17,0
700	14,3290217	31,4516145	31,25	0,6
800	16,4418984	36,0999432	15,63	56,7
900	18,7112365	41,092487	31,25	23,9

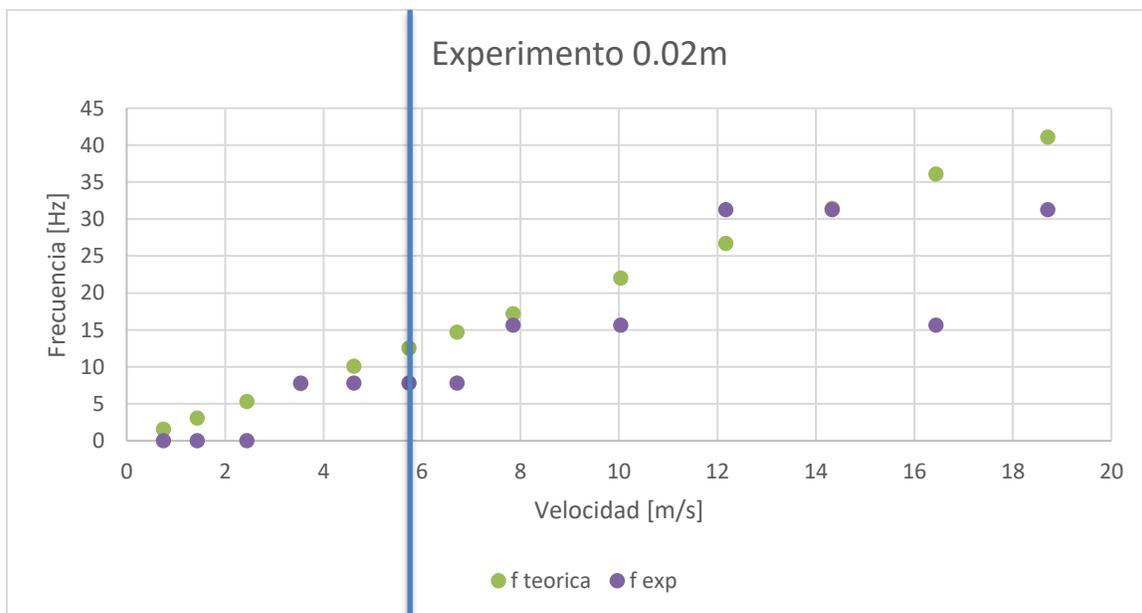
*Tabla 5 Tabla comparativa de valores obtenidos geometría diámetro 2 pulgadas variando las RPM*

Con el fin de corroborar que los valores eran los correctos y comprobar mediante el número *Strounhal*, se graficaron los valores de frecuencia vs la velocidad del túnel de viento, presentado en la ilustración 16. En la gráfica, de la ilustración 16, se demarca una línea azul en la cual, permite observar el rango en el que los datos son mas rigurosos, ya que antes de una velocidad aproximada de 6 m/s el flujo es muy inestable, antes de esta velocidad se tiene una incertidumbre y se pueden obtener datos imprecisos.



**Ilustración 16** Gráfica de Frecuencia vs Velocidad. Geometría diámetro 1 pulgada

Como se puede observar en la gráfica de la ilustración 17 la frecuencia obtenida, esta cumple con la proporcionalidad a velocidad del flujo de aire descrita en la ecuación del número adimensional *Stronhal*.

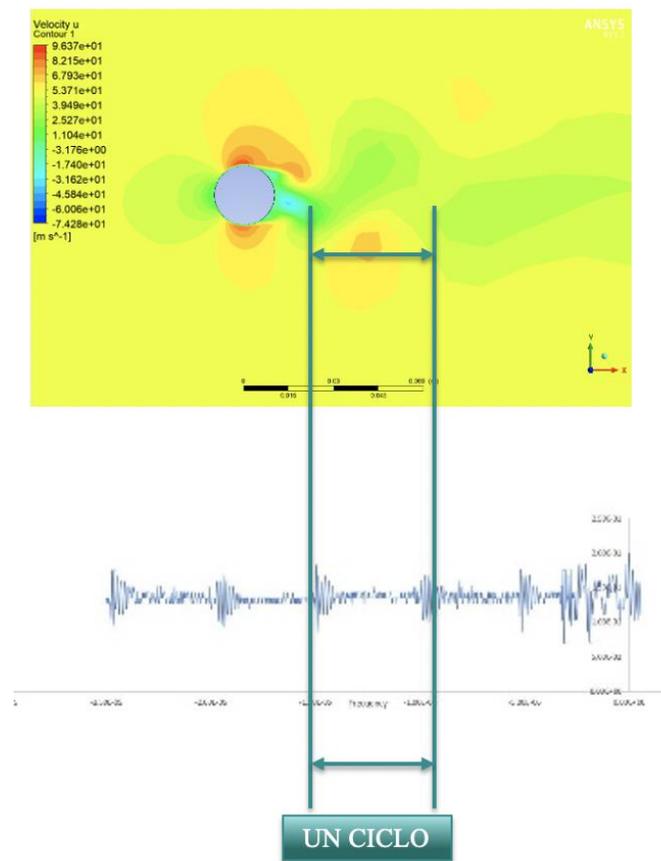


**Ilustración 17** Gráfica de Frecuencia vs Velocidad. Geometría diámetro 2 pulgadas

## 6.1.2 Comparación Numérica vs Experimental

Con base a la información obtenida de las simulaciones y las pruebas experimentales en el túnel de viento se puede observar claramente el efecto *Vortex*, el cual posee una frecuencia de vórtices necesaria para excitar mecánicamente el piezoeléctrico, como se muestra en la ilustración 18. El efecto *Von Karman* a diferentes velocidades y números Reynolds ( $Re$ ) de aproximadamente  $10^3 < Re_d < 10^5$  en los cuales es visible este efecto aerodinámico y nos permita realizar la comparación por medio de las frecuencias como se observa en la ilustración 18 y se puede observar, así mismo en el apéndice 2.

Como factor importante se debe tener en cuenta que las simulaciones se realizaron en 2D y las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un marco 3D lo que aumenta el error en el momento de la comparación entre la simulación vs la investigación experimental.



*Ilustración 18 Comparación ciclo de frecuencia simulación vs investigación experimental*

### 6.1.3 Señales obtenidas por el osciloscopio

Con el fin de determinar el voltaje eléctrico generado por los piezoeléctricos y la frecuencia de oscilación de la excitación mecánica producida por los vórtices en el piezoeléctrico, se muestran las siguientes figuras que permiten apreciar de forma cualitativa el comportamiento del fluido alrededor de la estructura cilíndrica, y aprovechar la energía proveniente del fluido convertida en señal eléctrica por el piezoeléctrico.

Las ilustraciones 19 y 20 muestran una oscilación de la placa pudiendo observar el voltaje eléctrico en el orden de milivoltios generado, entonces esta oscilación explica la forma como se induce vibraciones sobre la placa que se encuentra inmerso en el flujo de aire. La información contenida en las ilustraciones 19 y 20 se observa la gráfica es de suma importancia, ya que permite determinar que es posible generar energía por medio de los vórtices de *Von Karman*, por otra parte, mediante un análisis y de *Fourier* y la función del osciloscopio de Transformada rápida de Fourier (FFT) aplicada a las señales de dichos datos y la amplitud en forma de voltaje se puede determinar la frecuencia de vibración de la placa con el piezoeléctrico resultado de las frecuencias de los vórtices inducidos por el cilindro.

Para observar mas de las señales obtenidas por el osciloscopio en forma de voltaje, consultar apéndice 1.

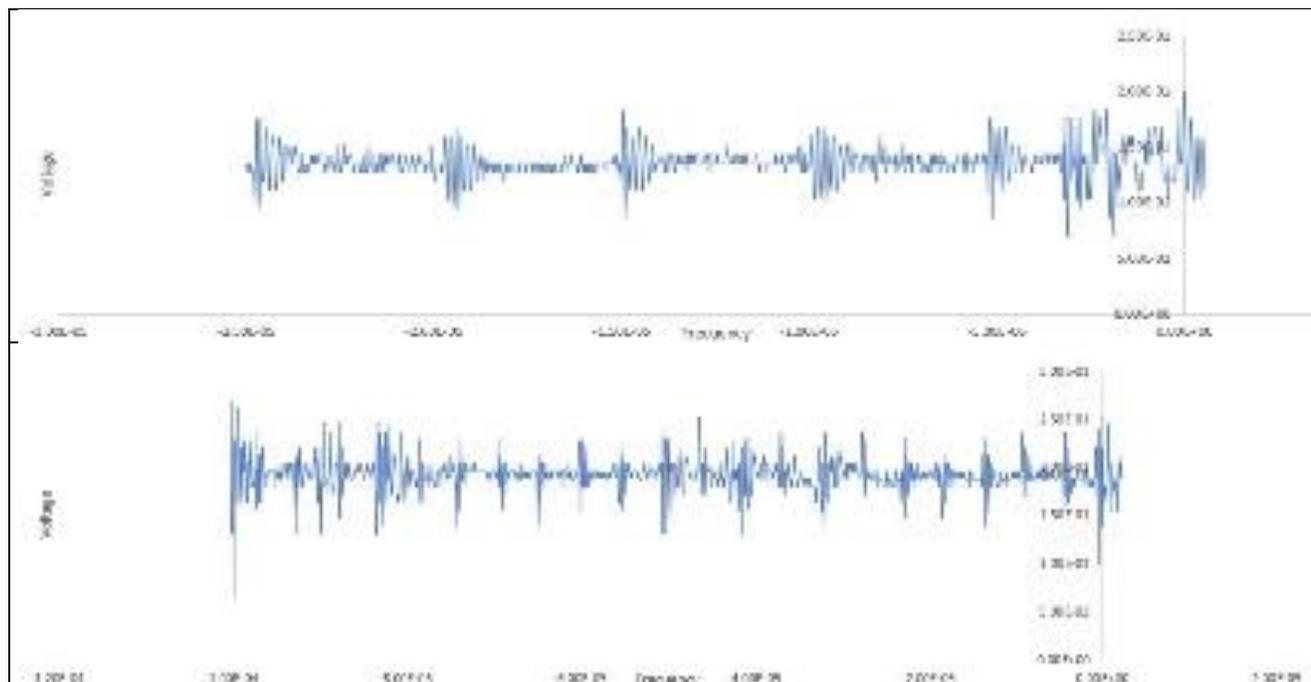
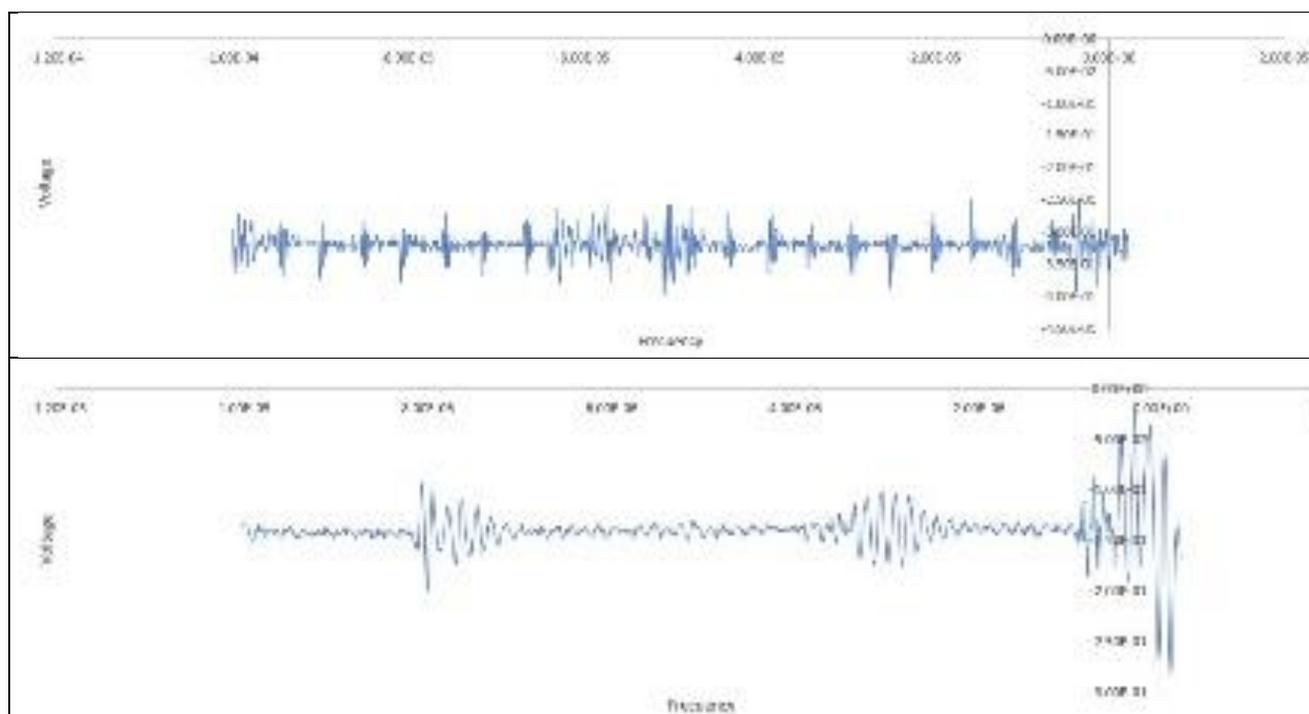


Ilustración 19 Señal Eléctrica en forma de Voltaje

En las ilustraciones 19 y 20 se observa las graficas obtenidas del voltaje generado por el material piezoeléctrico sometido a diferentes velocidades del túnel de viento, mediante estas graficas se puede ver claramente las frecuencias en las que el material piezoeléctrico es excitado, estas frecuencias se calcularon mediante el osciloscopio con el fin de ser comparadas con las frecuencias teóricas calculadas a partir de la simulación.

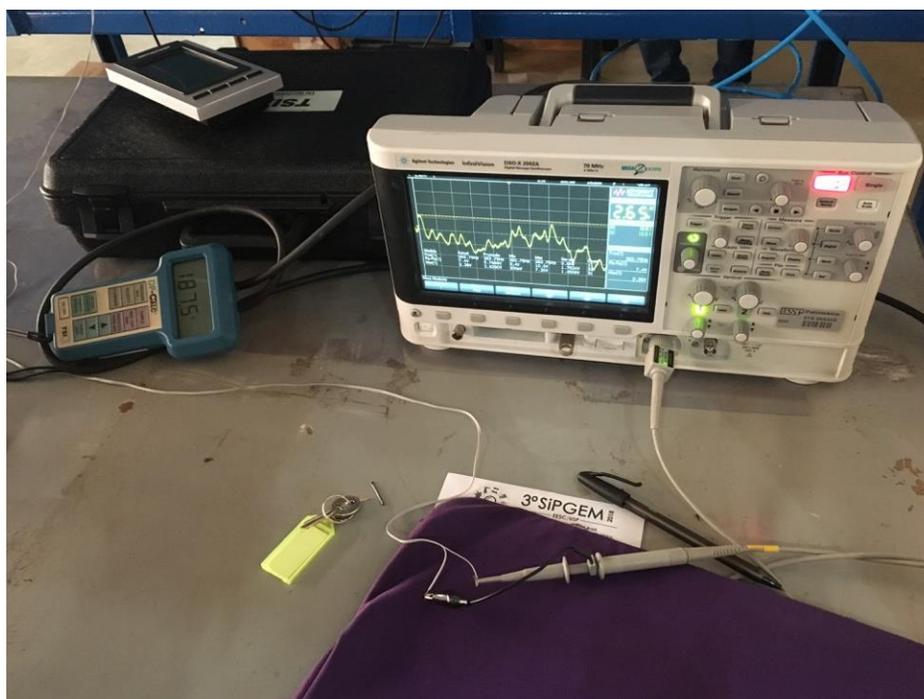


*Ilustración 20 Frecuencias obtenidas por el osciloscopio del material piezoeléctrico*

Así mismo en la investigación experimental, los valores de voltaje como se presenta en las ilustraciones 21 y 22 se obtienen la diferencia de potencial y como es de esperarse aumenta a razón de la velocidad del túnel de viento, los valores de la diferencia de potencial obtenido mostrada por el osciloscopio esta en el rango de entre 1 milivoltio a 3000 milivoltios, de esta manera se comprueba la generación de energía por parte del piezoeléctrico mediante las señales obtenidas por el osciloscopio a diferentes velocidades.



*Ilustración 21 voltaje generado por el piezoeléctrico en milivoltios*



*Ilustración 22 Montaje de obtención del voltaje generado por el piezoeléctrico en milivoltios.*

## 6.2 Análisis de los resultados

Para concluir, es importante destacar el grado de desarrollo de las diferentes tecnologías renovables de baja potencia como por ejemplo la estudiada en este proyecto de grado. No se puede realizar una comparación adecuada, ya que este tipo de tecnología no tiene el mismo nivel de madurez tecnológica, es decir, en el desarrollo de este proyecto se comprobó que es posible la generación de energía por medio de los materiales piezoeléctricos utilizando como principio la energía eólica; Todos los datos proporcionados en este proyecto son solo de carácter investigativo.

Uno de los mayores problemas con las energías renovables es la baja densidad de energía que tienen, esto se pudo constatar, ya que las señales de voltajes generados fueron relativamente pequeños, esto era de esperarse, ya que usó solo un piezoeléctrico, sin embargo, se espera que la implementación de más materiales piezoeléctricos en serie pueda producir una cantidad de energía suficiente para alimentar un circuito que requiera baja tensión.

El desarrollo de este proyecto permitió llegar a los siguientes resultados:

- El análisis mediante *CDF* permitió observar el fenómeno aerodinámico de *Von Karman*.
- Al realizar análisis experimental y numérico, en conjunto, se genera una garantía sobre el fenómeno aerodinámico de *Von Karman* y en el momento de validar los procesos con el fin de optimizar después la tecnología estudiada en este proyecto.
- Partiendo del análisis cualitativo se determinó que es posible generar vorticidad con una geometría, la cual puede ser aprovechada para la generación de energía eléctrica.
- Se observó que el efecto de la variación de la velocidad es directamente proporcional a la frecuencia de la vibración en la placa lo que genera un mayor estímulo mecánico aplicado al material piezoeléctrico, por tanto, a mayor velocidad se llegaría a un mayor aprovechamiento energético de la energía eléctrica generada en los mismos

A través del desarrollo de este proyecto se logró constatar que los efectos de vorticidad pueden ser muy útiles para la generación de energía. Se pudo comprender de manera precisa la dinámica de la generación de vórtices de *Karman* utilizando un diseño con geometría cilíndrica. De igual forma, gracias a la

utilización de la simulación en CFD se pudieron observar claramente los fenómenos de vorticidad, así mismo, se logró evidenciar como es el comportamiento de un flujo de aire sometido a una obstrucción de geometría lo que llevó a determinar que existe una correlación entre la frecuencia de generación de vórtices y la velocidad del fluido libre que pasa alrededor de un obstáculo. Estos resultados se muestran muy acorde con otros estudios teóricos y experimentales relacionados con el fenómeno de vórtices de *Karman*.

La mayor energía generada más la menor inversión da el mejor factor. Ambas formas de pensar son adecuadas para comprender la lógica de este estudio que demuestra la efectividad económica de invertir en diferentes tipos de tecnologías, se observa fácilmente que la tecnología *Vortex* espera ser tan competitiva como otras en el pequeño mercado eólico de acuerdo con estos resultados.

Sin los aspectos antes mencionados, se puede observar el grado de correlación de los vórtices obtenidos con las simulaciones y las pruebas en el túnel de viento.

Por otro lado, el prototipo de pruebas construido cuenta con un diseño y una estructura que facilitan la conversión de energía mecánica proveniente de las vibraciones de los vórtices en la placa, en energía eléctrica utilizando como herramienta fundamental, automatizada, versátil e indispensable el comportamiento de los materiales piezoeléctricos en aplicaciones relacionadas con la energía eólica, sin necesidad de un generador con palas.

Los resultados experimentales recogidos tanto en osciloscopio como en las simulaciones permiten reproducir el comportamiento de estos materiales en la realidad, demostrándose en los ensayos, un amplio rango de velocidades producidas en el túnel de viento lo cual demuestra que, con caudales bajos, no se generan impulsos grandes y el medidor puede dar lecturas bajas e incluso cero. De este análisis, se concluyó que es necesario un modelo eléctrico que convierta y almacene esta energía eléctrica y así poder ser utilizada, ya que los datos obtenidos por medio del osciloscopio muestran altos picos en las señales eléctricas generadas.

Finalmente, la generación de energía descrita en este proyecto podría tener una buena combinación con la tecnología fotovoltaica, ya que podría llegar a optimizarse lo que llevaría a una utilización de espacio mínima por tanto no produciría grandes áreas de sombra. También hay una ventaja muy clara del efecto

*Vortex* comparado con la tecnología eólica, ya que en la energía eólica se aprovecha del movimiento de la estructura, generalmente los generadores con palas giran de acuerdo con el flujo del viento a través de la estructura creando una turbulencia que afecta negativamente a los dispositivos aguas abajo y cercanos, lo que los hace menos eficientes, esto se minimiza en gran medida aprovechando las vibraciones como se describió en este proyecto. Son precisamente esas pequeñas características operativas y económicas las que marcarían la diferencia en la rentabilidad a lo largo del tiempo de una instalación de energía eólica basada en la manera de recolectar la energía teniendo como base fundamental los materiales piezoeléctricos.

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

En el desarrollo del proyecto se logró generar energía eléctrica por medio de dos principios físicos coordinados: generación de vórtices en fluidos por medio del efecto Von Karman y el acoplamiento de un material piezoeléctrico. Por lo anterior, se presenta como se describe en el objetivo general la determinación experimental del efecto Von Karman de un flujo de aire libre. Mediante el aprovechamiento de este efecto se logró la generación de energía eléctrica, descrito en detalle en el Capítulo 5 y en la Sección 6.12.

Se realizó la recopilación de información teórica relacionada con el efecto piezoeléctrico y así mismo la generación de vórtices por medio del efecto *Von Karman*; efecto que aprovechan las corrientes de un fluido libre, y los materiales piezoeléctricos los cuales convierten energía mecánica en energía eléctrica. Posteriormente teniendo el fundamento teórico descrito en el Capítulo 3, secciones 3.3, 3.4 y 3.4.1, se diseñó, construyó y probó el modelo experimental del generador de vórtices con geometría cilíndrica al cual se le implementó una placa constituida de aluminio con un material piezoeléctrico adherido al vacío. La simulación en CFD del prototipo se realizó en 2D con unas condiciones iniciales del problema las cuales son: el tiempo  $t = 0$  el fluido se encuentra en reposo y un tiempo de simulación de 1 segundo, donde es súbitamente puesto en movimiento a una velocidad constante ( $U_{\infty}$ ), permitiendo obtener el máximo aprovechamiento de los efectos descritos para la generación de energía eléctrica.

Por medio del modelo experimental, se explica el comportamiento de la generación de energía por el efecto aerodinámico de Von Karman combinado con el material piezoeléctrico, dando como resultado un rango de diferencia de potencial de entre 1 y 3000 milivoltios (véase ilustraciones 11, 12 y 13) y las frecuencias de los vórtices de Von Karman, calculadas como se ve en las tablas 1, 2 y 3, presentadas en el Capítulo 5, sección 5.9.

Finalmente, se simuló el modelo para explicar y demostrar el comportamiento de los fenómenos aerodinámicos de *Von Karman*, después del análisis teórico, se determinó que este comportamiento del fluido aguas abajo, solo es visible en un rango de números de Reynolds de: ( $10^3 < Re_d < 10^5$ ), en este rango se puede observar las perturbaciones que generan vibraciones y así transmitir la energía cinética del viento en energía mecánica con las frecuencias de los vórtices por medio de una estructura cilíndrica la cual lleva una placa con un material piezoeléctrico para la generación de energía, modelo presentado en el Capítulo 6, sección 6.1.

**Página dejada en blanco intencionalmente**

## 7.1. Recomendaciones

- Para futuros análisis se recomienda utilizar más de un material piezoeléctrico y que esté conectado en serie, ya que, en las pruebas experimentales, en el momento de tomar los datos las señales de la tensión obtenidas son bajas
- Se recomienda utilizar equipos de cómputo con buenas características en *hardware* y *software*, ya que durante las simulaciones se observó que los modelos afectan los tiempos de simulación.
- Se recomienda optimizar el circuito para la recolección de energía proveniente del piezoeléctrico.
- Lejos de ser un texto de promoción, se invita a investigar sobre los materiales piezoeléctricos como generadores de energía para tener más información sobre la toma de decisiones cuando se comparan las diferentes tecnologías de generación eléctrica.
- Se recomienda tener en cuenta que las vibraciones del cilindro pueden causar errores en la generación de vórtices
- Se debe mejorar la instalación correcta del piezoeléctrico es fundamental, ya que una punta del osciloscopio mal colocada o restos de soldadura pueden producir lecturas imprecisas.
- Se requieren modificar el prototipo, ya que se necesitan tramos largos de tubería sin obstáculos aguas arriba, igual que las placas orificio.

# Bibliografía

- [1] La eficacia como clave en la producción energética. 2018, «ambientum.com» [En línea]. Available: [http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/energia/La\\_eficacia\\_como\\_factor\\_clave.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/La_eficacia_como_factor_clave.asp).
- [2] A.P.P.A. “Impactos ambientales de la producción de electricidad, Estudio comparativo de ocho tecnologías de generación eléctrica” p. 16-28
- [3] Galir Martines, “Impacto de la energía en el medio ambiente. Las energías renovables” «eoi» [En línea]. Available: <http://www.eoi.es/blogs/galirmartinez-barros/2012/11/24/impacto-de-la-energia-en-el-medio-ambiente-las-energias-renovables/>
- [4] «Vortexbladeless,» [En línea]. Available: <http://www.vortexbladeless.com>.
- [5] A. Sierra, 2017 “Estudio experimental y numérico de vórtices generados en corrientes de fluidos para generación de energía.”
- [6] B. Zhang, B. Song, Z. Mao. “Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement” *Energy* 133 (2017) 723-736
- [7] M. Negri, D. Mirauda, S. Malavasi “VIV trajectories of fan elastically mounted sphere” *Applied ocean research* 70 (2018) 62-75
- [8] J. Lee, M. Bernitsas “High-damping, high Reynolds VIV test for energy harnessing using the vivace converter” *Ocean engineering* 38 (2011) 1697-1712
- [9] D. Wang, C. Chiu, H. Pham “Electromagnetic energy harvesting from vibrations induced by Karman vortex street” *Mechatronics* 22 (2017) 746-756
- [10] I. Alifdini, N. Alia “Analysis of ocean waves in 3 sites potential areas for renewable energy development in Indonesia” *Ocean engineering* 38 (2018) 34-42
- [10] P. D. Bravo-Mosquera, L. Botero-Bolívar, D. Acevedo-Giraldo, and H. D. Cerón-Muñoz, “Aerodynamic design analysis of a UAV for superficial research of volcanic environments,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 70, pp. 600–614, Nov. 2017.
- [11] S. Piedra, E. Martínez, C. A. Escalante-Velazquez, and S. M. A. Jiménez, “Computational aerodynamics analysis of a light sport aircraft: Compliance study for stall speed and longitudinal stability certification requirements,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 82–83, pp. 234–242, Nov. 2018.
- [12] Torres Suárez, D. V., & Rojas Olaya, D. J. (2020). Análisis aerodinámico computacional de dispositivos de punta de ala en la aeronave Vultur.
- [12] J. P. Holman, J. R. Lloyd, and J. D. Anderson, *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering Consulting Editors McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering Consulting Editor. 1995.
- [13] N. Alejandra, R. Muñoz, and D. De Ingeniería, “ESTUDIO NUMÉRICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR CON FLUJO TURBULENTO EN UNA CAVIDAD ALARGADA CON VENTILACIÓN Maestro en Ciencias de la Ingeniería PRESENTA: UNIVERSIDAD DE SONORA,” 2009.
- [14] Villarreal, D. J. Y., & SL, V. B. (2018). VIV resonant wind generators.
- [15] Amaya Ospina, M. A., & Díaz Molina, A. I. (2020). Análisis experimental del efecto aerodinámico de dispositivos de punta de ala en una aeronave commuter tipo STOL.
- [16] MUNOZ GARCIA Alberto. Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad. Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. Madrid, 2012.
- [17] NPTEL. Wind Tunnel Components. Module 8: Aerodynamic Test Facilities. Consultado en marzo 15 de 2019. url: <https://nptel.ac.in/courses/101103004/module8/lec1/3.html>.
- [18] PABLO DANIEL. Componentes Túnel de viento. Consultado en marzo 15 de 2019. url: <http://pdctdrlasallebonanova.blogspot.com/p/aviones-historicos.html>
- [19] Cyprien Rusu What is piezoelectricity, internet: OnScale, Available in <https://onscale.com/piezoelectricity/what-is-piezoelectricity/>, [www.oscale.com](http://www.oscale.com).

- [20] Martínez, F. J. J., de Frutos, J., Alonso, D., & Vázquez, M. (2015). Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting. *boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 54(6), 247-253.
- [21] Moguel, E. A. R. (2005). Metodología de la Investigación. Univ. J. Autónoma de Tabasco.
- [22] K. Y. Billah, and R.H. Scanlan, “Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks”, *Amer. J. Phys.* 59, 1991, pags 118-124. 5 June, 7th 2018
- [23] Idelsohn, S. R., Sonzogni, V. E., & Cardona, A. (2002). Modelamiento computacional de la calle de vórtices de karman por dinámica de vorticidad. *Mecánica Computacional*, 21, 274-292.
- [24] C. C. Feng, “The measurement of vortexinduced effects in a flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders” MSc thesis, University British Columbia, Vancouver, 1968.
- [25] D. A. Spera and T. R. Richards. “Modified power law equations for vertical wind profiles”, NASA Lewis Research Center, 1979.
- [26] A. Betz. “Das Maximum der theoretisch moglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren” *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, 1920, pags 307–309.
- [27] D. J. Yáñez “An electrical power generator and an electrical generator method”, Patent W PCT/EP2015/072802, 2015.
- [28] R. Bourguet, G. E. Karniadakis, M. S. Triantafyllou. “Lock-in of the vortex-induced vibrations of a long tensioned beam in shear flow”, *Journal of Fluids and Structures*, 2011, vol. 27, pags. 838-847.
- [29] K. Y. Billah, and R.H. Scanlan, “Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks”, *Amer. J. Phys.* 59, 1991, pags 118-124. 5 June, 7th 2018
- [30] C. C. Feng, “The measurement of vortexinduced effects in a flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders” MSc thesis, University British Columbia, Vancouver, 1968.
- [31] D. A. Spera and T. R. Richards. “Modified power law equations for vertical wind profiles”, NASA Lewis Research Center, 1979.
- [32] A. Betz. “Das Maximum der theoretisch moglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren” *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, 1920, pags 307–309.
- [33] D. J. Yáñez “An electrical power generator and an electrical generator method”, Patent W PCT/EP2015/072802, 2015.
- [34] R. Bourguet, G. E. Karniadakis, M. S. Triantafyllou. “Lock-in of the vortex-induced vibrations of a long tensioned beam in shear flow”, *Journal of Fluids and Structures*, 2011, vol. 27, pags. 838-847.
- [35] J. K. Vandiver, “Damping Parameters for flowinduced vibration”, *Journal of Fluids and Structures*, 2012, vol. 35, pags 105-119.
- [36] Alderete, E., Vega, W. A., Kolody, B., & Aguilar-Gaxiola, S. (2000). Lifetime prevalence of and risk factors for psychiatric disorders among Mexican migrant farmworkers in California. *American Journal of Public Health*, 90, 608 – 614.
- [37] American Psychological Association. (2010). *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (6 ed.). (M. G. Frías, Trad.) México, México: El Manual Moderno.
- [38] Rockwell, D. (1998). Interacciones vórtice-cuerpo. *Revisión anual de mecánica de fluidos* , 30 (1), 199-229.

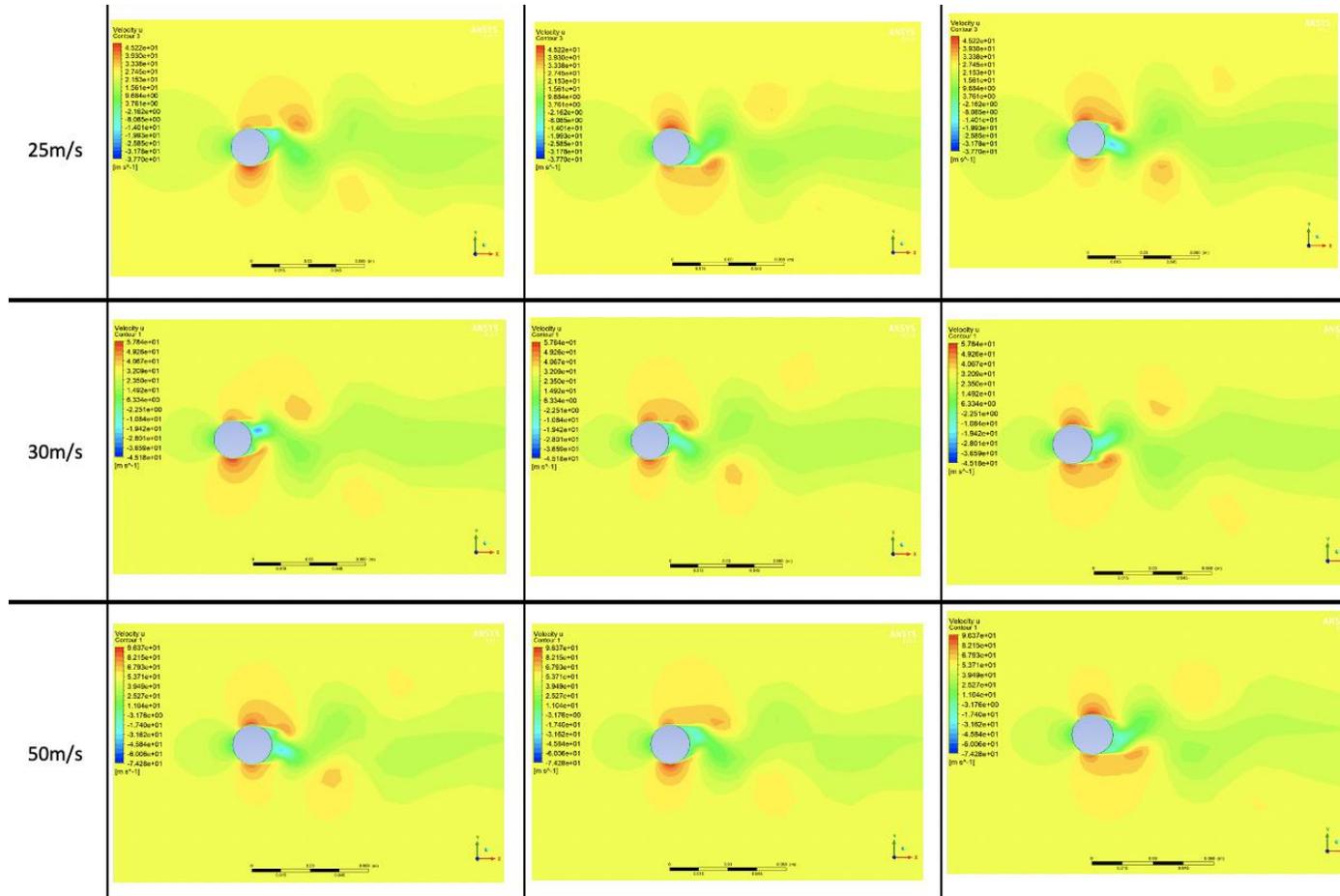
# Apéndices

## Apéndice 1

	39	40
300		
	43	44
400		
	45	46
500		
	47	48
600		

*Señales eléctricas en forma de voltaje*

## Apéndice 2



Simulación CFD del efecto Von Karman