



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio del estado del arte de  
un generador de electricidad  
por vibración inducida**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Alexander Renteria Moreno

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Eliseo Martínez Espinosa



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024**

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
1.1	ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
1.2	ASPECTOS GENERALES DE AEROGENERADORES Y GENERADORES VIV .....	7
1.2.1	<i>VORTEX BLADELESS.....</i>	<i>10</i>
1.3	OBJETIVOS.....	11
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>11</b>
2.1	VÓRTICES DE VON KÁRMAN .....	11
2.1.1	<i>GENERALIDADES.....</i>	<i>11</i>
2.1.2	<i>DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES.....</i>	<i>13</i>
2.1.3	<i>VÓRTICES DE CALLE DE VON KÁRMAN .....</i>	<i>15</i>
2.2	MASA AGREGADA.....	16
2.3	FRECUENCIA NATURAL .....	16
2.4	SINCRONIZACIÓN.....	17
2.5	AMORTIGUAMIENTO .....	19
2.5.1	<i>AMORTIGUAMIENTO DEBIDO A LA FRICCIÓN HÚMEDA.....</i>	<i>20</i>
2.5.2	<i>AMORTIGUAMIENTO DEBIDO AL ARRASTRE.....</i>	<i>21</i>
<b>3</b>	<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>23</b>
3.1	SIMULACIONES NUMÉRICAS.....	23
3.2	MODELADO MATEMÁTICO .....	25
3.3	ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....	28
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>31</b>
4.1	RECOMENDACIONES.....	32
4.2	TRABAJOS FUTUROS .....	33
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>34</b>

## TABLA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO [2] .....	7
ILUSTRACIÓN 2 AEROGENERADOR SIN PALAS VORTEX BLADELESS [5] .....	8
ILUSTRACIÓN 3 ESQUEMA DE UN MÓDULO DE VIVACE .....	9
ILUSTRACIÓN 4 “WATER CHANNEL” DE LA UNIVERSIDAD DE MICHIGAN [10] .....	10
ILUSTRACIÓN 5 VÓRTICES DE VON KÁRMÁN GENERADOS POR LAS ISLAS CANARIAS [30] .....	12
ILUSTRACIÓN 6 PATRONES DE FLUJO QUE PASAN ALREDEDOR DE UN CILINDRO .....	13
ILUSTRACIÓN 7 [16] .....	15
ILUSTRACIÓN 8 FRAGMENTO DE LA TABLA 8.2 FLOW INDUCED VIBRATIONS NAKAMURA ET AL 2014 .....	16
ILUSTRACIÓN 9 VELOCIDAD REDUCIDA VS AMPLITUD ADIMENSIONAL BLEVINS, 1990 .....	18
ILUSTRACIÓN 10 FRICCIÓN ENTRE DOS PLACAS DESLIZANTES .....	20
ILUSTRACIÓN 11 VELOCIDAD RELATIVA DEL FLUJO Y ÁNGULO DE ATAQUE .....	22
ILUSTRACIÓN 12 PROPUESTA DE NUEVO AEROGENERADOR ENRIQUE FLORES S 2019 [4] .....	24
ILUSTRACIÓN 13 PATRONES DE DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES (WILLIAMSON ET AL 1988) .....	26
ILUSTRACIÓN 14 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL GENERADOR DE WILLIAMS Y YATES (1996) .....	27
ILUSTRACIÓN 15 CONVERTIDOR VIVACE [13] .....	29

## NOMENCLATURA

$\nu$	Viscosidad cinemática del fluido.
$U$	Velocidad del flujo,
$f$	Frecuencia del flujo.
$m_a$	Masa del fluido desplazado, "added Mass"
$\rho$	Densidad del fluido,
$D$	Diámetro del cilindro,
$L$	Longitud del cilindro,
$f_n$	Frecuencia natural
$T$	Periodo de oscilación
$\omega_n$	Frecuencia natural circular
$k$	Constante de rigidez del sistema
$m_s$	Masa estructural
$m_a$	Masa del fluido desplazado
$F_{damp}$	Fuerza debida al amortiguamiento
$\dot{x}$	Velocidad de desplazamiento de la estructura
$c$	Coefficiente de amortiguamiento
$c_s$	Coefficiente de amortiguamiento estructural

$c_a$	Coefficiente de amortiguamiento debido a la disipación viscosa del fluido
$\zeta$	Relación de amortiguamiento del sistema
$\zeta_s$	Relación de amortiguamiento estructural
$\zeta_a$	Relación de amortiguamiento debido al fluido
$F_{vis}$	Fuerza de amortiguamiento viscosa
$\tau$	Esfuerzo cortante
A	Área de la superficie deslizando
$\mu$	Viscosidad del fluido
e	Espesor entre las placas
$\dot{x}$	Velocidad de la placa móvil
$F_{drag}$	Fuerza de arrastre
$U_{rel}$	Velocidad relativa del flujo
$C_d$	Coefficiente de arrastre
$\alpha$	Ángulo de ataque

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los retos tecnológicos que enfrenta México y el mundo es la obtención de energía eléctrica utilizando sistemas y métodos no contaminantes. Recientemente, la combinación del incremento en la demanda energética y el decaimiento progresivo de la producción de crudo convencional, de las últimas décadas, han motivado un creciente interés en el estudio de alternativas sostenibles para la generación de energía eléctrica, entre los que destacan por su crecimiento ascendente y dinámico en el mundo, los sistemas que aprovechan la energía eólica.

En entornos abiertos la energía eólica es aprovechada mediante un aerogenerador, el cual es un dispositivo que recoge la energía cinética del aire y la transforma a electricidad. Típicamente estos se combinan y se conectan a una red eléctrica convencional, para contribuir al suministro de energía de un país o región. Sin embargo, dichos sistemas de generación eólica precisan de zonas estratégicas de viento estable y de un sistema de fijación que los soporten a una altura conveniente.

La incorporación creciente de fuentes renovables de energía en los sistemas energéticos obedece a motivos, tanto de diversificación y seguridad energéticas, como de combate al cambio climático, creación de empleos, mejora en el acceso a la energía e impulso al desarrollo rural. La energía eólica sobresale por su notable desarrollo en años recientes.

En 2017, la capacidad eólica acumulada conectada a la red alcanzó 515 GW (497 GW eólica en tierra y 18 GW eólica marina) y la energía eólica representó casi el 4% de la generación eléctrica mundial [1]. Entre 2012 y 2017 en México la generación eólica mostró un crecimiento anual promedio el 43.5 %y la capacidad instalada creció 7 veces [2].

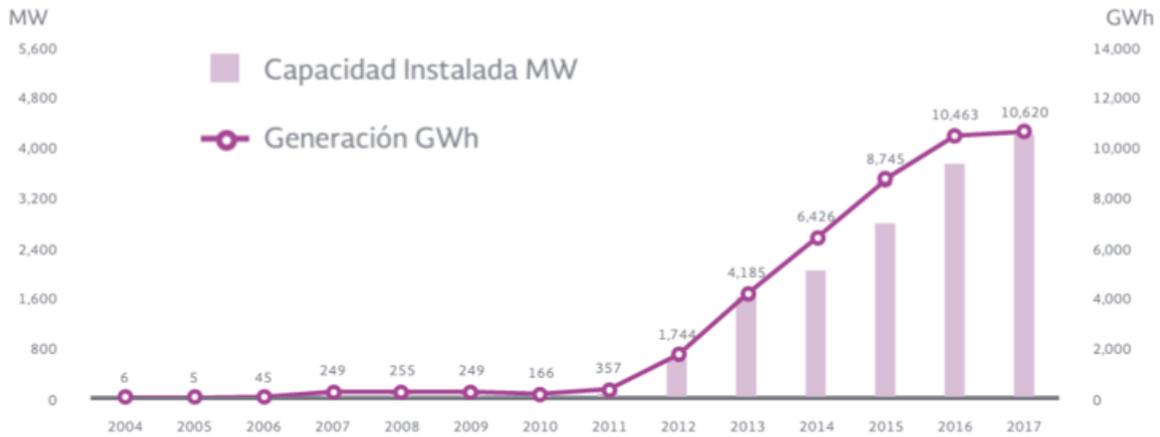


Ilustración 1 Evolución de la energía eólica en México [2]

## 1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La Tesis está dividida en cuatro capítulos principales que se discuten brevemente. El capítulo 1 introduce la necesidad de ampliar la capacidad de generación de electricidad por fuentes renovables. El capítulo 2 está dedicado a la descripción de los fenómenos físicos involucrados en la generación de electricidad por vibración inducida (VIV). El capítulo 3 presenta los trabajos numéricos, modelado matemático y experimentales enfocados a proyectos VIV que conducen a un mejor entendimiento del trabajo de tesis. El capítulo 4 muestra las conclusiones y recomendaciones basadas en la recopilación bibliográfica este trabajo.

## 1.2 ASPECTOS GENERALES DE AEROGENERADORES Y GENERADORES VIV

El dinamismo de la evolución de estas tecnologías provoca también un creciente interés en el desarrollo de aerogeneradores capaces de aprovechar la energía del viento en entornos urbanos en donde las velocidades del viento son más bajas y el flujo es más turbulento. Estos dispositivos pueden ser más compactos y pueden acoplarse con relativa facilidad a instalaciones eléctricas preexistentes para la generación distribuida de baja potencia.

En términos generales no se requieren grandes velocidades de viento para producir energía, en la mayoría de los casos, un equipo comienza a generar energía con una

velocidad del viento de 4 m/s, llamada "cut-in speed", entrega su potencia máxima cuando la velocidad es del orden de los 12 a 15 m/s y es necesario sacarla de servicio cuando alcanza 25 m/s, velocidad llamada "cut-out speed" [3].

La forma más eficiente de aprovechar la energía del viento la ofrecen los aerogeneradores eléctricos, estos se clasifican según la dirección de su eje de rotación en: aerogeneradores de eje horizontal y aerogeneradores de eje vertical.

Hoy en día, se encuentra en etapa de desarrollo un nuevo tipo de aerogenerador que no necesita aspas para funcionar y que tiene un futuro prometedor para la generación distribuida de energía. Este tipo de aerogenerador aprovecha un fenómeno aerodinámico que se descubrió tras el colapso del puente Tacoma Narrows, este fenómeno se produce cuando un caudal de viento choca con una estructura esbelta formando detrás un patrón cíclico de vórtices, una vez que este esquema de vórtices toma fuerza, la estructura comienza a oscilar, pudiendo entrar en resonancia como el caso del puente T. Narrows [4, 5]



*Ilustración 2 Aerogenerador sin palas Vortex Bladeless [5]*

Este dispositivo consta de un mástil fijo, un generador de energía y un cilindro hueco y semirrígido, diseñado para que tenga la capacidad de vibrar permaneciendo anclado a la barra inferior. La parte superior está unida a una varilla interior que puede penetrar en el mástil hasta en un 20% de su longitud [6]. También tiene un sistema de bobinas e imanes integrados en un mecanismo que; además de generar energía eléctrica permite que la estructura se sintonice a la frecuencia adecuada para oscilar con la aparición de los vórtices de Von Kármán [7].

A medida que el viento pasa alrededor del aerogenerador, se genera un patrón cíclico y antisimétrico de vórtices, una vez que las fuerzas son lo suficientemente fuertes, la estructura comienza a oscilar y puede entrar en resonancia con la frecuencia de aparición de estos vórtices. Esta inestabilidad aerodinámica se conoce como vibración inducida.

Bernitsas, Raghavan et al. (2008) presentan un dispositivo tipo masa resorte amortiguador capaz de convertir la corriente de ríos y mares en energía eléctrica basados en la idea de maximizar en lugar de suprimir el desprendimiento de vórtices de Von Kármán. En este documento, se discuten los conceptos subyacentes del dispositivo VIVACE (por sus siglas en inglés). Se presentan los diseños del modelo físico y se desarrolla un modelo matemático [9].

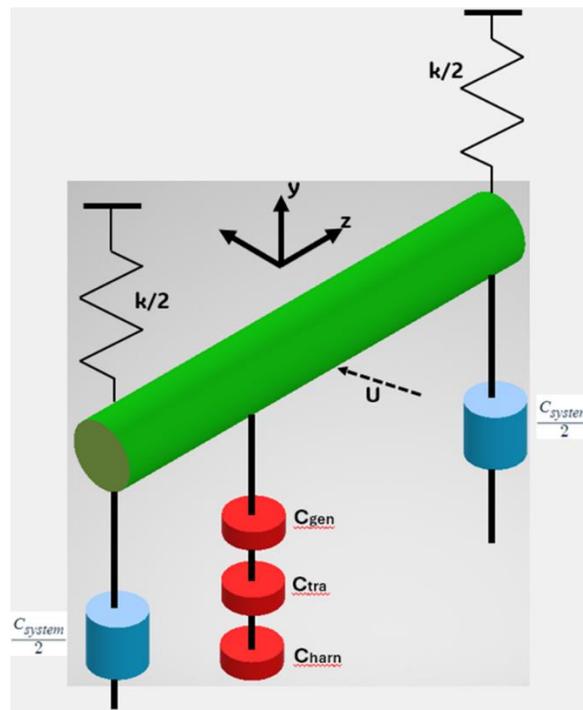


Ilustración 3 Esquema de un módulo de VIVACE

Bernitsas, Ben-Simon, et al. (2009). En este artículo, el módulo VIVACE se prueba en el “Water Channel” de la Universidad de Michigan para demostrar el concepto, generar electricidad, y calcular medidas básicas de evaluación comparativa como la densidad de energía. Se abandona el modelo analítico propuesto previamente para la estimación del amortiguamiento y se realizan pruebas experimentales orientadas a determinar el coeficiente de amortiguación adecuado para la generación de electricidad [10].



*Ilustración 4 "Water Channel" de la Universidad de Michigan [10]*

### **1.2.1 VORTEX BLADELESS**

El segundo caso de estudio es el de los aerogeneradores sin aspas (Vortex bladeless), los cuales fueron patentados en Yañez, Martín y Suriol en 2013. El Vortex Bladeless ofrece una alternativa a los aerogeneradores tradicionales ya que puede funcionar sin rodamientos o engranajes. Tiene una forma cilíndrica que oscila con el viento y genera electricidad a través de un alternador lineal.

La filosofía fundamental de su diseño se basa en la eliminación de los elementos móviles que entran en contacto con el aire, evitando así la necesidad de lubricación y el desgaste. Su forma cilíndrica elimina la necesidad de orientar el generador en la dirección del viento, como debe hacerse con un aerogenerador de eje horizontal convencional, sin embargo, a las mismas condiciones de viento la energía que recoge el Vortex Bladeless es aproximadamente un 30 % menor a la de un aerogenerador convencional. [5]

De acuerdo con los desarrolladores, estos generadores eólicos capturan alrededor del 40% de la energía disponible en el viento, cuando el máximo teórico es del 59 % de acuerdo con la ley de Betz [14]

### **1.3 OBJETIVOS**

Objetivo general: Estudiar bibliográficamente nuevas formas de generación de electricidad aprovechando la energía cinética de un fluido (fuentes renovables de energía)

Objetivos específicos:

- I. Estudiar los fundamentos de la Vibración Inducida (VIV)
- II. Estudiar los trabajos numéricos, modelado matemático, y experimentales enfocados a la generación de electricidad por VIV
- III. Establecer las ventajas de los generadores de electricidad VIV sobre los esquemas convencionales.

## **2 ANTECEDENTES**

El propósito de este capítulo es introducir al lector en la teoría detrás de los Vórtices de Von Kármán, el desprendimiento de vórtices, las vibraciones inducidas por vórtices (VIV) y sus aplicaciones, en la recolección de energía eólica.

### **2.1 VÓRTICES DE VON KÁRMAN**

Para comprender completamente la generación de energía a través de vibraciones inducidas por vórtices, debe haber una comprensión más profunda de las fuerzas involucradas. En esta sección se introducirán a los vórtices, sus causas, su comportamiento en el flujo y las repercusiones de la generación de vórtices.

#### **2.1.1 GENERALIDADES**

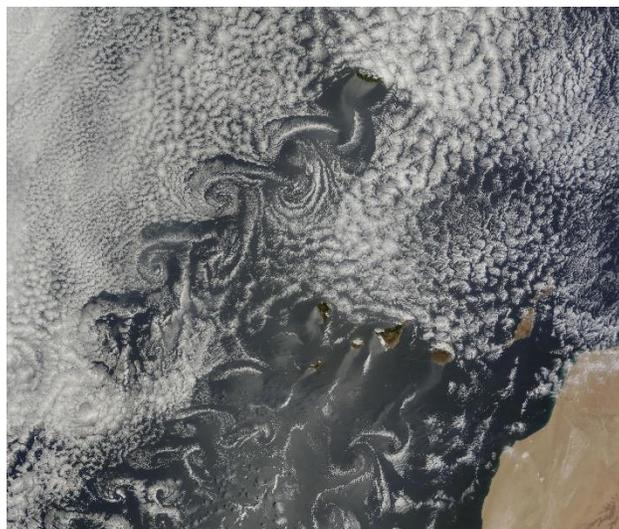
Todos los fluidos reales tienen una viscosidad de corte que es mayor que cero, y un fluido con una viscosidad de corte de cero es un fluido idealizado utilizado para simplificar los cálculos. Dado que todos los fluidos poseen cierta viscosidad de corte, a medida que un fluido fluye sobre un cuerpo rígido, se crea una capa límite de fluido en la superficie del cuerpo [15]. Una capa límite puede definirse como una "capa delgada de fluido adyacente a la superficie de la estructura a través de la cual la velocidad del flujo aumenta de 0 en la superficie a la velocidad de la corriente libre en el borde exterior de la capa límite" [16]. Los esfuerzos cortantes son el resultado de estas capas límite, que causan un flujo de rotación donde la capa límite se separa del cuerpo rígido. Estos flujos rotacionales son los que forman los vórtices y tienen

una concentración muy alta de energía. Dados ciertos números de Reynolds, los vórtices concentrados interactuarán entre sí, se volverán inestables y crearán turbulencias [15].

Los vórtices se pueden clasificar por 3 tipos separados. Estos tipos incluyen vórtices forzados (o rotacionales), vórtices libres (o irrotacionales) y vórtices combinados [15]. Los vórtices forzados ocurren cuando un tanque de líquido gira alrededor de su eje central. Cuando esto ocurre a cierta velocidad angular, la velocidad tangencial del fluido rotativo es proporcional a la distancia desde el eje central (núcleo del vórtice). En este caso, el fluido giratorio puede verse como un cuerpo rígido que gira sobre su eje central. La velocidad del fluido en el centro de los vórtices de este tipo será cero.

El siguiente tipo de vórtice que existe es un vórtice libre o de irrigación. Estos se ven más comúnmente cuando se drena un lavabo o una bañera. Para este tipo de vórtice, la velocidad tangencial del fluido es inversamente proporcional a la distancia desde el eje de rotación. El fluido más alejado del núcleo del vórtice girará más lentamente que el más cercano al núcleo. Para vórtices libres, la velocidad angular es mayor en el centro.

Los vórtices combinados a menudo se forman naturalmente. Un vórtice combinado consiste en un vórtice forzado "atrapado" dentro de un vórtice libre o de irrigación. La parte central del vórtice se comporta como un vórtice forzado, pero el "tanque" en el que se encuentra es un vórtice libre. Este vórtice libre giratorio hace que la parte interna gire y, por lo tanto, actúa como un vórtice de fuerzas.



*Ilustración 5 Vórtices de Von Kármán generados por las islas canarias [30]*

## 2.1.2 DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES

El desprendimiento de vórtices está determinado por dos propiedades; la viscosidad del fluido que pasa sobre un cuerpo (bluff body) y el número de Reynolds de ese flujo. El número de Reynolds relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas del fluido y se expresa como:

$$\Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2-1)$$

Donde:

- U Velocidad del fluido lejos del obstáculo
- D Longitud característica (en este caso el diámetro del obstáculo)
- $\nu$  Viscosidad cinemática del fluido.

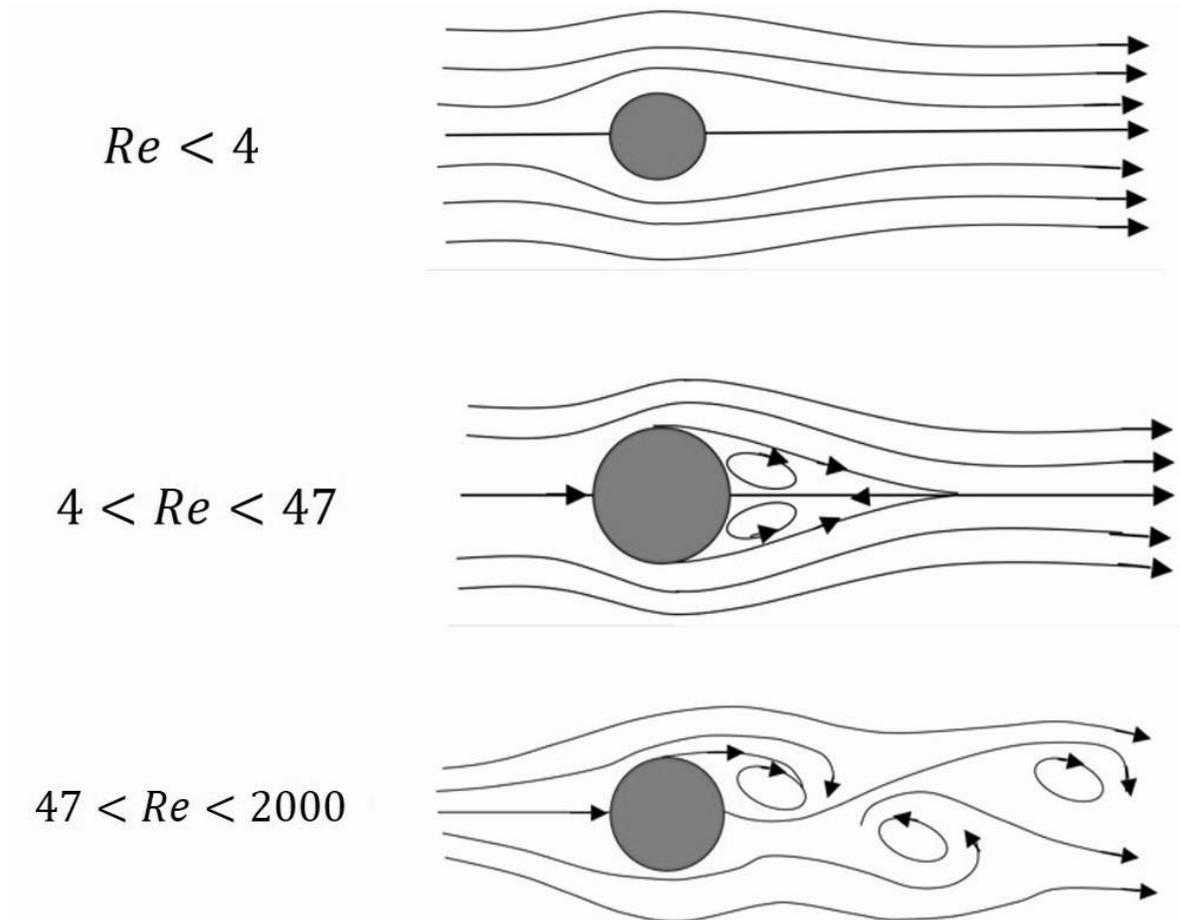


Ilustración 6 Patrones de flujo que pasan alrededor de un cilindro

En las regiones de mayor número de Reynolds, las fuerzas de inercia dominan el flujo y se encuentra turbulencia, mientras que, en las regiones de menor número de Reynolds, las fuerzas viscosas dominan el flujo y se desarrolla flujo laminar.

La creación de vórtices fuertes y limpios se produce en regiones con un menor número de Reynolds. Cuando el flujo se separa del borde posterior de un cuerpo sumergido, se producirá una región de presión extremadamente baja debido a los efectos viscosos. A medida que continúa el flujo de líquido sobre el cuerpo del acantilado, las perturbaciones harán que el vórtice se "desprenda" del borde posterior del cuerpo. Nuevamente, se creará una región de baja presión y el proceso anterior continuará.

"El desprendimiento de vórtices puede provocar vibraciones dañinas de gran amplitud de estructuras flexibles y producir intensas presiones acústicas en los conductos" [16]. La frecuencia del desprendimiento de vórtices es una función del número de Strouhal que relaciona la frecuencia con la velocidad de la corriente libre y el diámetro del cilindro. El número de Strouhal se expresa de la siguiente manera

$$St = \frac{Df}{U} \quad (2-2)$$

Donde:

- U Velocidad del flujo,
- D Longitud característica (en este caso el diámetro del obstáculo)
- f Frecuencia del flujo.

En los números más altos de Reynolds, el desprendimiento de vórtices varía en una banda estrecha de frecuencias, con amplitudes variables, y también varía a lo largo de un cilindro estacionario [16]. Las oscilaciones de presión que ocurren en los números de Reynolds por debajo de 400 tienden a ser las más fuertes. Las fuertes oscilaciones conducen a la formación de una calle de vórtices de Von Kármán. Los números de Reynolds superiores a 400 implican la destrucción de la calle debido a la turbulencia. Esto significa que el flujo no será recto, y habrá interrupciones en el flujo.

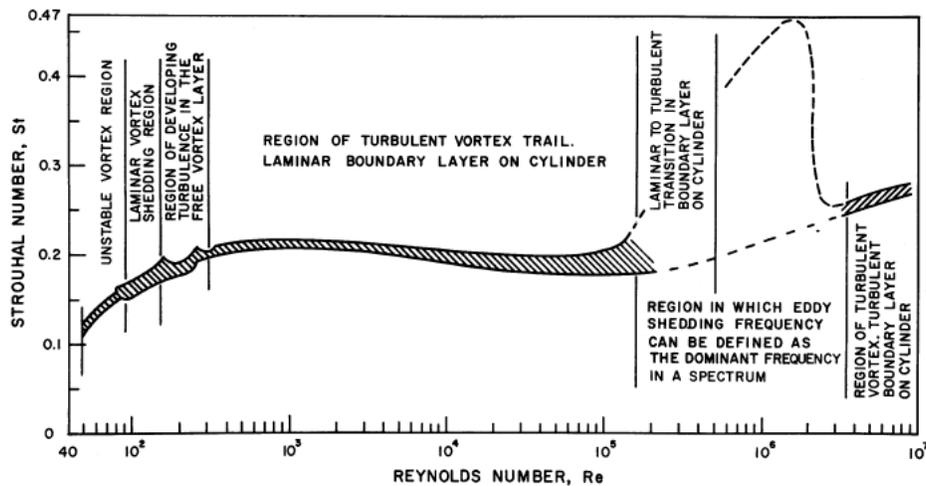


Ilustración 7 [16]

El desprendimiento de vórtices ocurre para números de Reynolds  $Re > 47$ . Este valor crítico fue determinado por Mathis et al (1984), quienes realizaron experimentos en un túnel de viento de circuito abierto con láser Doppler. Este valor fue evaluado para una relación  $L/D$  tendiendo hacia el infinito donde  $L$  es la longitud del cilindro, estiman el valor crítico del número de Reynolds modelando la aparición de una inestabilidad.

### 2.1.3 VÓRTICES DE CALLE DE VON KÁRMÁN

Una calle de vórtices Von Kármán es la descripción dada a un patrón alterno de vórtices. Cuando un fluido fluye sobre un cuerpo, se crean vórtices y se desprenden de forma alterna en la parte superior e inferior del cuerpo. Dado que el cuerpo es simétrico, este fenómeno inicialmente será simétrico, pero eventualmente se convertirá en el patrón alternativo clásico. Este comportamiento lleva el nombre de Theodore Von Kármán por sus estudios en el campo.

"Aunque la calle de vórtice ideal de Von Kármán (1912) se ha asociado durante mucho tiempo con la estela de un cilindro circular, el único requisito para la existencia de una calle de vórtice es dos capas paralelas de libre circulación opuestas que están separadas por una distancia  $h$ ". [16]. Von Kármán calculó que para que haya estabilidad en la calle de vórtices, la relación entre la distancia vertical entre los centros de vórtices alternos,  $h$ , y la distancia horizontal entre los centros de vórtices alternos  $l$ , idealmente debería ser aproximadamente 0.281.

## 2.2 MASA AGREGADA

La masa agregada o masa virtual es la inercia agregada a un sistema porque un cuerpo que acelera o desacelera debe mover (o desviar) parte del volumen del fluido circundante a medida que se mueve a través de él. Friedrich Bessel propuso el concepto de masa agregada en 1828 para describir el movimiento de un péndulo en un fluido.

La masa del fluido desplazada “added mass”, equivale a la masa que tendría un fluido del mismo volumen que el cilindro.

$$m_a = \frac{\pi}{4} \rho D^2 L \quad (2-3)$$

Donde:

- $m_a$  Masa del fluido desplazado, “added Mass”
- $\rho$  Densidad del fluido,
- $D$  Diámetro del cilindro,
- $L$  Longitud del cilindro,

El cálculo de la masa total del sistema está dado por la suma de la masa del cilindro más la masa del fluido desplazada.

$$m = m_s + m_a \quad (2-4)$$

Si la relación de aspecto  $L/D < 10$  es necesario agregar un factor de corrección al cálculo de la masa desplazada

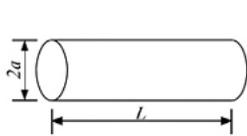
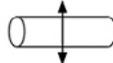
Circular cylinder of finite span			$\rho \pi a^2 L K$					
			$L/2a$	1.2	2.5	5.0	9.0	$\infty$
			$K$	0.62	0.78	0.90	0.96	1.0

Ilustración 8 Fragmento de la tabla 8.2 Flow Induced Vibrations Nakamura et al 2014

## 2.3 FRECUENCIA NATURAL

La frecuencia natural también llamada frecuencia de resonancia hace referencia a la cantidad de ciclos por unidad de tiempo a la que un sistema oscilante vibrará sin la acción de fuerzas externas después de una perturbación inicial y está dada por

$$f_n = \frac{1}{T} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2-5)$$

Donde:

$f_n$	Frecuencia natural
T	Periodo de oscilación
$\omega_n$	Frecuencia natural circular

Un sistema oscilante que tiene n grados de libertad tendrá n número de frecuencias naturales de oscilación distintas. La variable  $\omega_n$  representa la velocidad angular del movimiento cíclico y se calcula de la siguiente manera

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_s + m_a}} \quad (2-6)$$

Donde:

$k$	Constante de rigidez del sistema
$m_s$	Masa estructural
$m_a$	Masa del fluido desplazado

Nótese que la frecuencia natural es una propiedad física del sistema que puede ser manipulada escogiendo diferentes materiales con diferentes constantes de rigidez o cambiando la geometría del sistema para manipular la cantidad de fluido desplazado.

## 2.4 SINCRONIZACIÓN

Una característica clave de la vibración inducida por vórtices es la existencia de una región de sincronización o "bloqueo". En esta región, hay un aumento significativo en la amplitud de las oscilaciones del cilindro, lo que significa que la energía del sistema será máxima. La sincronización es similar a la resonancia lineal, ya que ocurre cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices se acerca a la frecuencia natural del oscilador. Sin embargo, a diferencia de la resonancia, la sincronización no es lineal y se producirá en una banda de frecuencias. Además, la sincronización no tiene un pico agudo en amplitud cuando la frecuencia de desprendimiento y la frecuencia natural son exactamente iguales. En la región de bloqueo, la vibración del cilindro controla la frecuencia de desprendimiento. La sincronización también se describe como autolimitante, porque cuando la amplitud crece demasiado, el patrón simétrico de vórtices se rompe.

La mayor parte de la comprensión actual del bloqueo se basa en estudios empíricos o semi empíricos; no se ha desarrollado completamente un modelo analítico de

bloqueo. Uno de los hallazgos más importantes sobre la región de bloqueo es su dependencia de la velocidad reducida. Suponiendo un valor de 0,2 para el número de Strouhal, la velocidad reducida,  $U^*$ , es igual a 5 cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices y la frecuencia natural son exactamente iguales. Se ha determinado experimentalmente que la sincronización se producirá generalmente para  $4 < U^* < 8$  (Blevins, 1990)

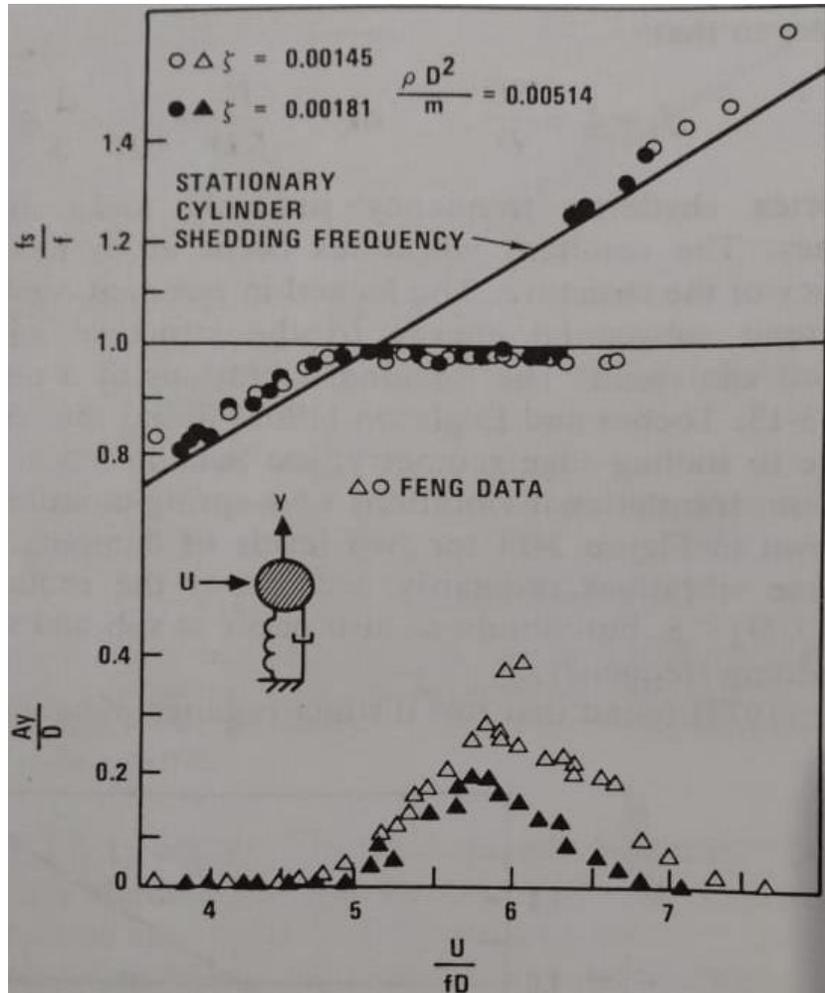


Ilustración 9 Velocidad reducida vs amplitud adimensional Blevins, 1990

## 2.5 AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento es un parámetro fundamental en el campo de las vibraciones, y en el desarrollo de modelos matemáticos que permiten el estudio y análisis de sistemas vibratorios. Técnicamente, el amortiguamiento es la capacidad que tiene un sistema de disipar energía cinética en otro tipo de energía.

Un sistema vibratorio que oscila en un medio fluido experimenta una resistencia al movimiento ofrecida por el fluido que hace que se disipe energía en forma de calor. Las fuerzas de amortiguamiento que nos podemos encontrar en este sistema son básicamente dos: la primera es la fricción húmeda que existe entre el cuerpo oscilante y su sistema guía y la segunda es la resistencia al movimiento ofrecida por la fuerza de arrastre, la fuerza de amortiguamiento podemos calcularla de la siguiente manera

$$F_{damp} = c\dot{x} \quad (2-7)$$

Donde:

$F_{damp}$	Fuerza debida al amortiguamiento
$\dot{x}$	Velocidad de desplazamiento de la estructura
$c$	Coefficiente de amortiguamiento

El coeficiente total de amortiguamiento 'c' será igual a la suma de los coeficientes de amortiguamiento debidos a la fricción estructural y al arrastre del fluido.

$$c = c_s + c_a \quad (2-8)$$

Donde:

$c_s$	Coefficiente de amortiguamiento estructural
$c_a$	Coefficiente de amortiguamiento debido a la disipación viscosa del fluido

O bien, podemos escribir la ecuación (2-8) en términos de las relaciones adimensionales

$$\zeta = \zeta_s + \zeta_a \quad (2-9)$$

Donde:

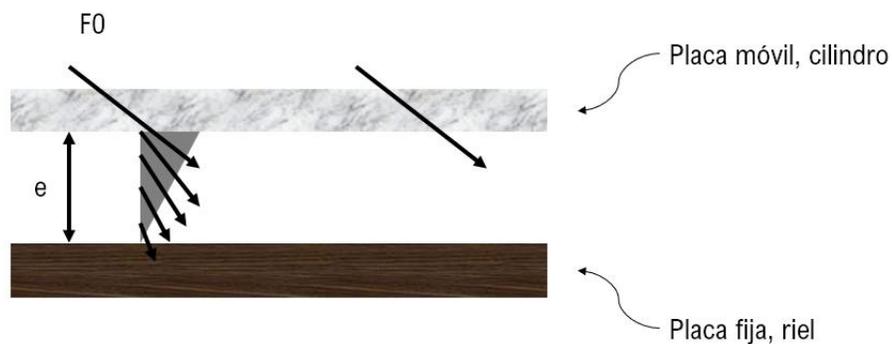
$\zeta$	Relación de amortiguamiento del sistema
$\zeta_s$	Relación de amortiguamiento estructural
$\zeta_a$	Relación de amortiguamiento debido al fluido

La relación adimensional de amortiguamiento se obtiene al dividir el coeficiente de amortiguamiento entre el amortiguamiento crítico que es igual a  $2m\omega_n$

$$\zeta_i = \frac{c_i}{2m\omega_n} \quad (2-10)$$

### 2.5.1 AMORTIGUAMIENTO DEBIDO A LA FRICCIÓN HÚMEDA

Cuando un sistema mecánico vibra en un medio fluido, la fricción entre las partes se considera húmeda si estas están inmersas en un fluido viscoso o turbulento. En este caso, podemos modelar el amortiguamiento viscoso como el que ocurre entre dos placas paralelas considerando al cuerpo oscilante y su riel guía dos placas paralelas, una fija y otra móvil respectivamente como se muestra en la siguiente ilustración



*Ilustración 10 Fricción entre dos placas deslizantes*

Luego entonces la fuerza de amortiguamiento resultara del producto entre el esfuerzo cortante y el área de la superficie deslizante

$$F_{vis} = \tau A \quad (2-11)$$

Donde:

$F_{vis}$  Fuerza de amortiguamiento viscosa

$\tau$  Esfuerzo cortante

A Área de la superficie deslizante

Debido a que la longitud de la placa deslizante es mucho mayor que el espesor entre las placas, el perfil de velocidad del fluido viscoso entre ellas tiene un comportamiento lineal, entonces la ley de viscosidad de Newton la podemos expresar de la siguiente manera.

$$\tau = \mu \frac{\dot{x}}{e} \quad (2-12)$$

Donde:

$\mu$  Viscosidad del fluido  
 $e$  Espesor entre las placas  
 $\dot{x}$  Velocidad de la placa móvil

Combinando las ecuaciones anteriores la expresión para el amortiguamiento viscoso es

$$F_{damp} = \mu A \frac{\dot{x}}{e} \quad (2-13)$$

Si quisiéramos expresar la fuerza de amortiguamiento como

$$F_{damp} = c_s \dot{x} \quad (2-14)$$

Entonces el coeficiente de amortiguamiento sería

$$c_s = \frac{\mu A}{e} \quad (2-15)$$

## 2.5.2 AMORTIGUAMIENTO DEBIDO AL ARRASTRE

Para un sólido que se mueve por un fluido, el arrastre es la suma de todas las fuerzas aerodinámicas o hidrodinámicas en la dirección opuesta al movimiento del objeto, cuando el movimiento del cuerpo es transversal a la corriente del fluido la fuerza de arrastre que experimenta el cuerpo la podemos expresar de la siguiente manera

$$F_{damp} = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 DLC_d \sin \alpha \quad (2-16)$$

Donde:

$F_{drag}$	Fuerza de arrastre
$U_{rel}$	Velocidad relativa del flujo
$C_d$	Coefficiente de arrase
$\alpha$	Ángulo de ataque

Para este caso particular, la velocidad relativa del flujo y en ángulo de ataque se muestran en la ilustración y están definidas como:

$$U_{rel}^2 = \dot{x}^2 + U^2 \quad (2-17)$$

$$\sin\alpha = \frac{\dot{x}}{U_{rel}} \quad (2-18)$$



Ilustración 11 Velocidad relativa del flujo y ángulo de ataque

Cuando la velocidad del flujo es mucho mayor a la velocidad de desplazamiento  $U \gg \dot{x}$  podemos asumir que el cuadrado de la velocidad relativa del flujo es aproximadamente igual a la velocidad del flujo

$$U_{rel}^2 \approx U^2 \quad (2-19)$$

y a su vez podemos expresar el ángulo de ataque como  $\sin\alpha \approx \dot{x}/U$

$$\sin\alpha \approx \dot{x}/U \quad (2-20)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2-19) y (2-20) en la ecuación (2-16) la expresión

Para el amortiguamiento debido al arrastre sería

$$F_{damp,drag} = \frac{1}{2} \rho U^2 D L C_d \frac{\dot{x}}{U} \quad (2-21)$$

De la expresión anterior podemos despejar el coeficiente de amortiguamiento el cual resultaría en

$$C_a = \frac{1}{2} \rho U D L C_d \quad (2-22)$$

## 3 ESTADO DEL ARTE

### 3.1 SIMULACIONES NUMÉRICAS

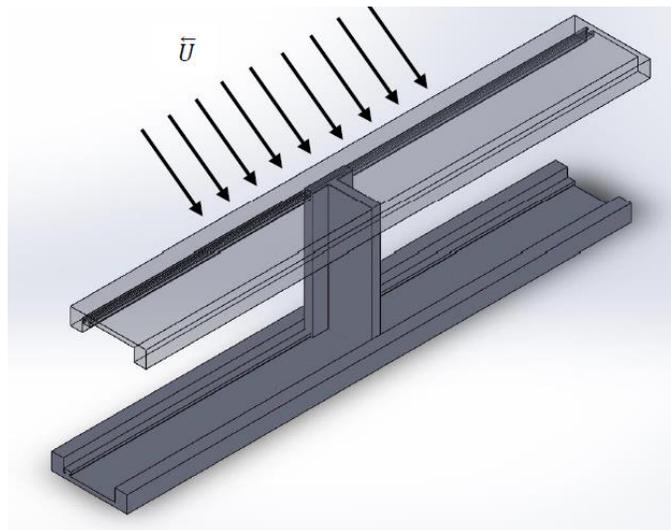
A. Placzek et al (2006) presentaron una simulación numérica de un flujo que pasa por un cilindro circular que puede oscilar transversalmente al flujo incidente para un número de Reynolds fijo igual a 100. Las ecuaciones 2D Navier-Stokes se resuelven mediante un método de volumen finito con un código CFD. Primero se realiza el trabajo para un cilindro fijo para verificar las características de estela para números de Reynolds menores de 150 en el régimen laminar donde se observan diferentes modos de desprendimiento de vórtices, similares a los que reportaron Williamson y Roshko. Finalmente, se realiza un segundo lote de simulaciones que involucran vibraciones libres (las llamadas vibraciones inducidas por vórtices o VIV), en donde se investiga la respuesta de amplitud y frecuencia del cilindro para una gama de velocidades reducidas [8].

Ding et al. (2015) plantean la generación de electricidad mediante la vibración inducida de un cuerpo cilíndrico acoplado a un resorte. En este trabajo de investigación los autores adicionan bandas rugosas al cuerpo cilíndrico con el objetivo de aumentar la fuerza inducida en el cuerpo. Los autores realizan una simulación numérica de la frecuencia de oscilación del cuerpo cilíndrico rugoso para números de Reynolds de  $30,000 < Re < 110,000$ . La potencia eléctrica se compara con los valores experimentales obtenidos en el "Water Channel" de la Universidad de Michigan [11] con resultados satisfactorios.

H. Zhu et al (2015) investigaron numéricamente la supresión de la vibración inducida por vórtices (VIV) de un cilindro circular de dos grados de libertad mediante el

acoplamiento de dos cilindros más pequeños colocados corriente abajo. Las trayectorias del movimiento del cilindro, la respuesta de amplitud y la evolución temporal del desprendimiento de vórtices se obtienen mediante la conducción de una serie de simulaciones. El modelo numérico se valida gracias a datos experimentales de VIV de un cilindro en corriente uniforme.

Enrique Flores (2019) propone el diseño de un nuevo aerogenerador por vibración inducida el cual transforma el movimiento inducido por los vórtices de Von Kármán en energía eléctrica al interrumpir un campo magnético mediante bobinas colocadas en los extremos del aerogenerador. Esta propuesta tiene una geometría T con relación T/H 1.75 que maximiza el desprendimiento de vórtices y está montado sobre unos rieles en donde ira colocados los imanes necesarios para la generación de electricidad [4].



*Ilustración 12 Propuesta de nuevo aerogenerador Enrique Flores S 2019 [4]*

Liu et al. (2019) simulan numéricamente un generador piezoeléctrico por vibración inducida mediante un cuerpo en forma de tenedor acoplado a un cilindro. Los autores estudian la mejora de la eficiencia del generador a bajas velocidades de viento (1-5 m/s). Los resultados exhiben que el generador propuesto aumenta 100% el voltaje de salida, con respecto a un generador convencional [26].

Gong et al. (2019) estudian numéricamente una propuesta de generador eléctrico por vibración inducida que opera en cualquier dirección de una corriente de agua mediante un ala guía. La simulación analiza la excitación del par y las oscilaciones de presión del vórtice inducido para el cálculo de las condiciones críticas de la

estructura giratoria. Los resultados muestran que el ala guía permite un alcance del ángulo de recolección de energía (40 a 360°) para un amplio rango de velocidades del flujo [27].

Zhang et al. (2022) estudian numéricamente un generador hidrocínético que aprovecha corrientes marinas a baja velocidad por vibración inducida. Los autores desarrollan una simulación numérica 2D y proponen un amortiguamiento no lineal para reducir la resistencia del sistema. Los resultados indican que el amortiguamiento no lineal mejora significativamente la potencia (6.9%) generada con respecto a un amortiguamiento constante [28].

Zou et al. (2023) proponen un generador de electricidad por vibración inducida en un cilindro ondulado, el cual está acoplado a un soporte recubierto con una capa piezoeléctrica para aprovechar corrientes de aire. El sistema es modelado matemáticamente con Matlab y numéricamente con FLUENT para el cálculo de la potencia generada. La propuesta exhibe un incremento en la generación de electricidad de 166% con un soporte triangular, con respecto a cilindros rectos [29].

### **3.2 MODELADO MATEMÁTICO**

La vibración inducida por vórtices (VIV) de estructuras es de interés práctico para muchos campos de Ingeniería. La importancia práctica del fenómeno destructivo de la Vibración Inducida por Vórtices ha llevado a una gran cantidad de estudios, muchos de los cuales se analizan en las revisiones exhaustivas de Sarpkaya (1979), Bearman (1984), Parkinson (1989) y en libros como los escritos por Blevins (1990), Williamson y Govardhan (2004) y Nakamura Kaneko et al (2014).

Williamson et al (1988a) estudiaron los patrones de desprendimiento de vórtices para un cilindro que oscila en una trayectoria sinusoidal variando tanto la amplitud como ( $A/D$ ) como la longitud de onda ( $L/D$ ). Definieron un conjunto completo de regímenes diferentes para los modos de estela de vórtice e introdujeron una terminología descriptiva para cada modo.

Williamson et al (1988b) mostraron que los vórtices de Von Kármán están sujetos a inestabilidades tridimensionales a partir de  $Re > 100$ . Visualizaron lateralmente los vórtices que se desprenden de un cilindro y descubrieron que bajo ciertas condiciones los vórtices ya no se desprenden de manera paralela al cilindro, sino que lo hacen de manera oblicua.

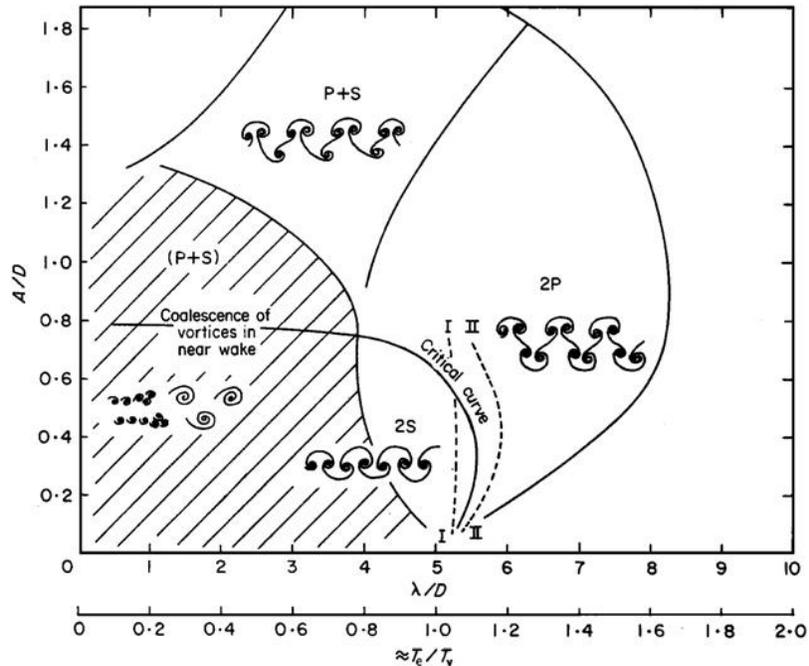
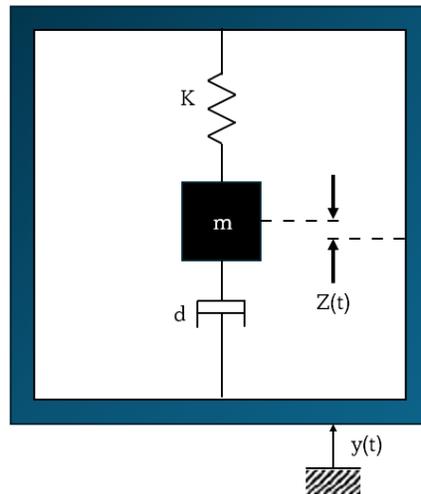


Ilustración 13 Patrones de desprendimiento de vórtices (Williamson et al 1988)

Recientemente el creciente interés por la generación de energía mediante fuentes sostenibles de energía ha conducido numerosos estudios enfocados en aprovechar la vibración generada por vórtices de Von Kármán para generar energía a continuación se describen algunos de los trabajos más sobresalientes.

Williams y Yates (1996) estudiaron la cantidad de energía que se puede extraer de un micro dispositivo basado en un sistema masa resorte amortiguador. Este micro generador tiene unas dimensiones de alrededor de 5 mm x 5 mm x 1 mm. El análisis desarrollado predice que la energía producida es proporcional al cubo de la frecuencia de oscilación y que, para maximizar la generación de energía, la masa debe ser tan grande como lo permita el volumen del dispositivo y la amplitud de la vibración debe ser tan grande como sea posible.

Para un dispositivo típico se encuentra que puede generar  $1\mu\text{W}$  a una frecuencia de excitación de 70 Hz y de 0.1 mW a 330 Hz, la principal limitación hallada para la generación de potencia de este dispositivo fue el tamaño del propio dispositivo [8].



*Ilustración 14 Diagrama esquemático del generador de Williams y Yates (1996)*

Chizfam et. al. (2018) Este artículo estudia el modelado dinámico de cuatro configuraciones de vibraciones inducidas por vórtices de un aerogenerador sin palas BWT ("Bladeless Wind Turbine). Los BWT consisten en un cuerpo cilíndrico montado sobre una estructura flexible en el campo de flujo. La forma del cuerpo y su estructura de montaje son diferentes entre las propuestas. El modelo dinámico derivado se valida mediante la comparación con una simulación numérica en 3D. Se verifica que la amplitud de las vibraciones aumenta significativamente cuando el desprendimiento de vórtices se sincroniza con las oscilaciones estructurales [12].

Kan et al. (2021) estudian matemáticamente la generación de electricidad de un generador piezoeléctrico por vibración inducida en un cilindro y un baffle con forma de diamante para aumentar el rendimiento y la potencia generada. El modelo matemático es validado con datos experimentales de un modelo físico que aprovecha corriente de aire. Los resultados muestran un incremento de 900% en el voltaje de salida, con respecto a un modelo físico sin el baffle en forma de diamante [17].

Zhao et al. (2021) proponen un modelo matemático para un generador eléctrico por vibración inducida en una viga en voladizo que aprovecha el efecto triboeléctrico. El sistema propuesto es de fácil y sencilla operación que opera a bajas frecuencias de vibración. El modelo matemático representa correctamente la generación de electricidad y los resultados indican que la propuesta es rentable desde un punto de vista económico [18].

Asok et al. (2024) plantean un estudio de optimización de generación de electricidad en un sistema oscilatorio elástico (vibración inducida) con movimiento cilíndrico en la dirección del flujo y en dirección transversal al flujo. El movimiento armónico del cilindro es modelado en Matlab con un método semi empírico, basado en la oscilación de la estela, para la estructura del movimiento del cilindro y la carga del fluido [19].

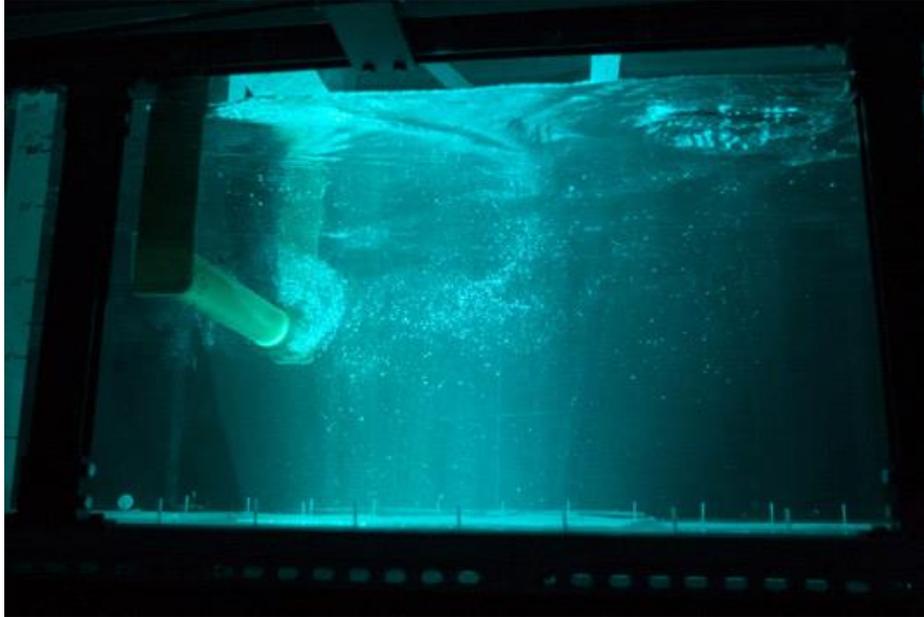
### **3.3 ESTUDIOS EXPERIMENTALES**

El grupo que más ha avanzado en la búsqueda de la energía mediante VIV es Bernitsas, Raghavan, Ben-Simon y García en su desarrollo del convertidor de Vibración Inducida por Vórtices en Energía Acuática limpia (VIVACE) en la Universidad de Michigan.

En su diseño, un cilindro se mantiene en alto por dos resortes unidos a las placas finales y restringidos para que pueda vibrar libremente hacia arriba y hacia abajo. El aparato está conectado a deslizadores magnéticos que viajan a lo largo de un riel que contiene una bobina. Cuando el sistema vibra, el movimiento de los imanes sobre la bobina genera una corriente de CC que luego puede convertirse en CA y utilizarse para energía [13]

En las pruebas, el sistema se mantuvo estacionario en un canal que producía flujo de agua. Los ingenieros de VIVACE también reconocieron que resultados de pruebas similares son posibles arrastrando el aparato a través de aguas tranquilas a una velocidad constante. Incluso a bajas velocidades, VIV puede transferir energía cinética a electricidad, a diferencia de las formas más comunes de energía hidroeléctrica, como represas y turbinas. Esto es una ventaja porque es un método

menos invasivo de energía hidroeléctrica que puede utilizarse en ubicaciones con corrientes menos potentes. Tiene un bajo impacto en el medio ambiente y puede ampliarse o reducirse según la necesidad.



*Ilustración 15 Convertidor VIVACE [13]*

Zhang et al. (2019) estudian experimentalmente la eficiencia de un generador piezoeléctrico por vibración inducida con cilindros de diferente sección transversal (circular, cuadrado, triangular, cuerpo en D). El generador considera una viga en voladizo con un recubrimiento de material piezoeléctrico y opera a bajas velocidades de aire. Los resultados muestran una generación eléctrica promedio de  $803.4 \mu\text{W}$  a una velocidad de viento de  $2.36 \text{ m/s}$  y que la potencia promedio aumenta en un 36% por la implementación de un plato en la parte trasera del cilindro [20].

Muthalif et al. (2022) proponen un nuevo generador eléctrico híbrido (piezoeléctrico-electromagnético) que aprovecha la vibración inducida en un cilindro por corrientes de agua. El generador híbrido combina un transductor piezoeléctrico y un transductor electromagnético dentro del soporte del cilindro. El generador eléctrico aumenta hasta un 23% en comparación con sistemas piezoeléctricos convencionales [21].

Tamimi et al. (2022) comparan experimentalmente el rendimiento de un generador eléctrico hidroelástico en un perfil hidrodinámico con generadores por vibración inducida (“galloping” y en la estela). Los resultados indican que el sistema que opera por una inestabilidad “galloping” tiene un gran potencial en la generación de electricidad, mientras que el sistema que opera por vibración en la estela presenta el mejor rendimiento [22].

Park et al. (2023) investigan experimentalmente la generación de electricidad en un generador por vibración inducida acoplado a un sistema pasivo de control de turbulencia en corriente de agua de baja velocidad. El estudio muestra que es posible la generación de electricidad a bajas velocidades si la frecuencia natural del oscilador es reducida con el sistema pasivo de control de turbulencia [23].

Barata et al. (2024) desarrollan un estudio experimental de la generación de electricidad por vibración inducida por corrientes de aire en cilindros circulares modificados. Tres tipos de cilindros son considerados (circulares, cónicos y escalonados) a velocidades de la corriente de aire de 0.9-6.0 m/s. Los experimentos muestran que el rendimiento del sistema depende de la frecuencia y amplitud de vibración y que la máxima potencia generada es de 2.3-8.5 mW [24].

Li et al. (2024) estudian experimentalmente el efecto de la interferencia entre cilindros y sus estelas en la generación de electricidad para un arreglo de cilindros. Los experimentos se realizaron para tres tándems de cilindros a diferente relación de espaciado ( $S/D$ ), rigidez del resorte y amortiguación. Los resultados muestran que bajas relaciones de espaciamiento ( $S/D=2.01$ ) proporcionan la mayor potencia de generación de electricidad [25].

## 4 CONCLUSIONES

- La generación de electricidad con corrientes de aire (valores del orden de mW) son
- menores a los reportados con corrientes de agua.
- Los trabajos muestran que la potencia de generación es función de la densidad del fluido.
- La utilización de una placa en parte trasera del cilindro, con respecto a la dirección del flujo, aumenta la potencia generada.
- Los generadores de electricidad por vibración inducida tienen alto potencial de uso por la diversidad de aplicaciones reportadas.
- Falta de estudios para entender la implicación de la vibración inducida en la generación de electricidad.

## 4.1 RECOMENDACIONES

- Enfocar el estudio de la generación de electricidad en corrientes de agua.
- Desarrollar un modelo matemático que representa al generador por vibración inducida mediante un movimiento armónico.
- Estudiar la generación de electricidad con diferentes geometrías con un tipo T.
- Estudiar el efecto de la frecuencia de oscilación y la fuerza de oscilación en la potencia generada.

## **4.2 TRABAJOS FUTUROS**

- Realizar un estudio analítico mediante un movimiento armónico amortiguado.
- Estudio con diferentes geometrías para maximizar la generación de electricidad.
- Desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio de la sustentación y arrastre de las diferentes geometrías.
- Desarrollo de un modelo físico para pruebas experimentales.
- Planteamiento de una propuesta de generación de electricidad con fuentes de energía renovables.

## 5 REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, IEA, «Wind Energy,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/topics/renewables/wind/>. [Último acceso: 12 agosto 2024].
- [2] SENER, «Reporte de avance de energías limpias,» 2017. [En línea]. Available: Chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte\_de\_Avance\_de\_Energ\_as\_Limpias\_Cierre\_2017.pdf [Último acceso: 12 agosto 2024].
- [3] Secretaría de Energía, «Energías Renovables 2008 - Energía Eólica,» 2008.
- [4] Flores, E. Estudio numérico de un aerogenerador por vibración inducida mediante vórtices de Von Kármán. Tesis de Maestría, UNAM, 2019.
- [5] Vortex Bladeless, «Energía eólica sin palas,» [En línea]. Available: <https://vortexbladeless.com/es/>. [Último acceso: 13 agosto 2024].
- [6] Altair Energy Solutions, 2017. <https://www.altair.de/c2r/ws2017/unique-design-enables-bladeless-wind-turbines-harness-energy>. [Último acceso: 12 agosto 2024].
- [7] T. Alameda, «MIT Technology Review,» diciembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.technologyreview.es/s/4658/vortex-un-molino-de-viento-sin-palas>. [Último acceso: 12 agosto 2024].
- [8] Placzek, A., Sigrist, J., Hamdouni, A. Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low Reynolds number: Forced and free oscillations. *Computers & Fluids* 38 (2009) 80-100.
- [9] Bernitsas, M., Raghavan, K., Simon, B., Garcia, E. VIVACE (vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 130 (2008).
- [10] Bernitsas, M., Simon, B., Raghavan, K., Garcia, E. The VIVACE converter: Model test at high damping and Reynolds number around  $10^5$ . *Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 131 (2009)
- [11] Ding, L., Zhang, L., Bernitsas, M., Chang, C.-C. Numerical simulation and experimental validation for energy harvesting of single-cylinder VIVACE converter with passive turbulence control, *Renewable Energy* 85 (2015) 1246-1259.

- [12] Chizfahn, A., Yasdi, A., Eghtesad, M. Dynamic modeling of vortex induced vibration wind turbines. *Renewable energy* 121 (2018) 632-643.
- [13] Bernitsas, M., Raghavan, K., Simon, B., Garcia E. VIVACE: A New concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow 130 (2018) 15.
- [14] Vortex Bladeless, «Indiegogo,» 1 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.indiegogo.com/projects/vortex-bladeless-a-wind-generator-without-blades--3#/>. [Último acceso: 28 agosto 2024].
- [15] Wu, J., Ma, H., Zhou, M. *Vorticity and Vortex Dynamics*. Berlin Springer (2006).
- [16] Green, S. *Fluid Vortices: Fluid Mechanics and its Applications*. Kluwer Academic Publishers (1995).
- [17] Kan, J., Liao, W., Wang, J., Wang, S., Yan, M., Jiang, Y., Zhang, Z. Enhanced piezoelectric wind-induced vibration energy harvester via the interplay between cylindrical shell and diamond-shaped baffle. *Nano Energy* 89 (2021) 106466.
- [18] Zhao, C., Yang, Y., Upadrashta, D., Zhao L. Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric harvester. *Energy* 214 (2021) 118885.
- [19] Asok, V., Kumar, R., Akbar, A. Energy extraction and optimization studies on vortex-induced vibration of the elastically mounted rigid cylinder using wake oscillator model. *Ocean Engineering* 300 (2024) 117515.
- [20] Zhang, B., Dai, L., Abdelkefi, A., Wang, L. Experimental investigation of aerodynamic energy harvester with different interference cylinder cross-sections. *Energy* 167 (2019) 970-981.
- [21] Muthalif, A., Hafizh, M., Renno, J., Paurobally, M. A hybrid piezoelectric-electromagnetic energy harvester from vortex-induced vibrations in fluid-flow; the influence of boundary conditions in tuning the harvester. *Energy conversion and management* 256 (2022) 115371.
- [22] Tamimi, V., Wua, J., Esfehiani, M., Zeinoddini, M., Naeeni, S. Comparison of hydrokinetic energy harvesting performance of a fluttering hydrofoil against other Flow-induced vibrations (FIV) mechanisms. *Renewable Energy* 186 (2022) 157-172.
- [23] Park, H., Mentzelopoulos, A., Bernitsas, M. Hydrokinetic energy harvesting from slow currents using Flow-induced oscillations. *Renewable Energy* 214 (2023) 242-254.

- [24] Ahmad, O., Kiwata, T., Sudarsono, S. Micro-electricity generation from wind-induced vibrations with magnetostrictive material-based energy harvester. *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 9 (2024) 100637.
- [25] Huaijun, L., Bernitsas, C., Congpuong N., Bernitsas, M., Sun, H. Experimental investigation on synergistic flow-induced oscillation of three rough tandem-cylinders in hydrokinetic energy conversion. *Applied Energy* 359 (2024) 122587.
- [26] Liu, F., Zhang, W., Peng, Z., Meng, G. Fork-shaped bluff body for enhancing the performance of gallopingbased wind energy harvester. *Energy* 183 (2019) 92-105.
- [27] Gong, Y., Shan, X., Luo, X., Pan, J., Xie, T., Yang, Z. Direction-adaptive energy harvesting with a guide wing under flowinduced oscillations. *Energy* 187 (2019) 115983.
- [28] Zhang, B., Li, B., Fu, Song., Mao, Z., Ding, W. Direction-adaptive energy harvesting with a guide wing under flowinduced oscillations. *Energy* 187 (2019) 115983.
- [29] Zou, L., Yan, Y., Liu, D., Zhang, X., Xia, H. Performance enhancement of the wavy cylinder-based piezoelectric wind energy harvester with different wave-shaped attachments. *Energy Reports* 9 (2023) 5965–5976.
- [30] Meteored tiempo, 2015. <https://www.tiempo.com/ram/183742/las-islas-canarias-y-vortices-de-von-karman/>. [Último acceso: 28 agosto 2024].