

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA MICROGENERADOR DE ENERGÍA  
EÓLICA A PARTIR DE ESTRUCTURAS ONDULANTES SOMETIDAS A  
CORRIENTES DE VIENTO VARIABLES

SEBASTIAN CASTAÑEDA ORREGO

JHON SLEYDER ZAPATA GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA  
MEDELLÍN

2014

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA MICROGENERADOR DE ENERGÍA  
EÓLICA A PARTIR DE ESTRUCTURAS ONDULANTES SOMETIDAS A  
CORRIENTES DE VIENTO VARIABLES

SEBASTIAN CASTAÑEDA ORREGO

JHON SLEYDER ZAPATA GARCÍA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Asesor

CESAR NIETO LONDOÑO

Doctor en Ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA  
MEDELLÍN

2014

**15 de Octubre de 2014**

**SEBASTIAN CASTAÑEDA ORREGO**

**JHON SLEYDER ZAPATA GARCÍA**

“Declaramos que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firmas

**SEBASTIAN CASTAÑEDA ORREGO**

**JHON SLEYDER ZAPATA GARCÍA**

*A la memoria de:*

*Nuestras madres. Quienes con su apoyo y amor estuvieron ahí para comprendernos y ayudarnos en todo momento; que con sus palabras de ánimo, de motivación hacían que los momentos difíciles se los llevara el viento, y así la calma, la paz interior y la fe se apoderaran de nosotros.....gracias mamás.*

*Nuestros padres. Por su apoyo incondicional, su amor, su sabiduría, su ejemplo que influyeron en nuestra madurez para lograr todos nuestros objetivos.*

*Nuestros hermanos/as. Por esos momentos de compañía, su apoyo, su confianza y por contagiarnos de su buena energía en aquellos momentos de stress.*

*Nuestros profesores/as. Que hacen de su experiencia una misión de acogida, de profesionalismo, de amor, entrega y que con su paciencia y sabiduría contribuyen en el crecimiento y autoestima para dar sentido a sus vidas y llenar de motivos a cada uno de sus alumnos para así tratar de construir nuevas generaciones más solidarias y humanas y por ende un mundo mejor.*

*Muchísimas gracias. Dios los bendiga.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a DIOS por darnos la oportunidad de llegar hasta aquí, por fortalecernos e iluminar nuestra mente; agradecemos a nuestros padres los cuales DIOS los puso en nuestra vida como pilar principal de educación y los formadores de nuestra personalidad, gracias porque siempre han estado allí y han trabajado duro para amarnos y darnos todo lo que necesitamos, agradecemos a nuestros hermanos por compartir grandes momentos en nuestra vida

Agradecemos también a aquellos compañeros y amigos que se cruzaron en nuestro camino que han sido soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecemos también a todos los profesores quienes a lo largo de esta carrera profesional aportaron su granito de arena para hacer posible este logro.

De igual manera nuestro más sincero agradecimiento al señor Jorge Iván García director de la facultad de ingeniería en la UPB y a nuestro director de la tesis Cesar Nieto Londoño por darnos instrucción, apoyo y consejos para que el día de mañana podamos ser nuevos emprendedores.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	19
INTRODUCCIÓN.....	20
OBJETIVOS.....	21
1 MARCO TEÓRICO.....	22
1.1 CAPA LÍMITE:.....	22
1.1.1 Flujo laminar:.....	23
1.2 PARÁMETROS AERODINÁMICOS:.....	24
1.2.1 Distribución de Presión sobre un cilindro circular:.....	24
1.2.2 Sustentación y arrastre de un cilindro circular:.....	26
1.2.3 Número de Strouhal:.....	28
1.3 PIEZOELECTRICIDAD:.....	29
1.3.1 Principales constantes piezoeléctricas:.....	30
1.3.2 Cálculo de voltaje, potencia y corriente:.....	32
1.4 AEROELASTICIDAD:.....	34
1.4.1 <i>Flutter</i> :.....	35
1.5 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD):.....	36
1.5.1 Volumen de control.....	36
1.5.2 Método de volúmenes finitos:.....	37
1.5.3 Interpolación <i>Upwind</i> (UDS):.....	39
1.6 AEROGENERADOR-CLASIFICACIONES:.....	40
1.6.1 Posición del aerogenerador:.....	40
1.6.2 Posición del equipo respecto al viento:.....	40
1.6.3 Según el número de palas:.....	41
2 ESTADO DEL ARTE.....	43
3 VALIDACIÓN METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	51
3.1 Independencia de Malla:.....	52
3.2 Independencia de los pasos temporales: <i>Time Steps</i> .....	55
4 RESULTADOS.....	60

4.1	Simulaciones 1:.....	60
4.2	Simulaciones 2:.....	63
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	79
5.1	Configuración 1: .....	79
5.2	Configuración 2: .....	80
5.3	Configuración 3: .....	80
5.4	Matriz de selección: .....	81
6	SELECCIÓN MECANISMO GENERADOR DE ENERGÍA.....	87
7	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DISEÑO CONCEPTUAL .....	92
8	CONCLUSIONES .....	96
9	BIBLIOGRAFÍA.....	99
10	ANEXOS.....	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Propiedades de la capa límite.

Figura 2. Flujo laminar.

Figura 3. Distribución de presión alrededor de un cilindro circular.

Figura 4. Puntos de estancamiento.

Figura 5. Fuerzas actuando sobre un cilindro.

Figura 6. Vórtices de Von-Kármán.

Figura 7. Estructura cristalina de un material piezoeléctrico.

Figura 8. Sistema ortogonal que describe la orientación de las propiedades de los piezoeléctricos.

Figura 9. Configuración piezoeléctrica en cantiléver a) en serie y b) en paralelo

Figura 10. Triángulo de Collar.

Figura 11. Fenómeno de Flutter sobre cilindro.

Figura 12. Malla generada por los nodos de CFD.

Figura 13. Aproximación al volumen de control.

Figura 14. Nodos centrados en los volúmenes de control.

Figura 15. Notación empleada para los nodos computacionales ubicados en cada CV.

Figura 16. Proyección del consumo de energía en cuatrillones de btu.

Figura 17. Micro-generador eólico windbelt.

Figura 18. Arreglo de cilindros en línea.

Figura 19. Nomenclatura empleada para la relación P/D.

Figura 20. Micro-generador cilíndrico con una viga piezoeléctrica en cantiléver

Figura 21. Capa límite del suelo sobre cilindro finito.

Figura 22. Modos oscilatorios de las vigas en cantiléver.

Figura 23. Geometría del dominio de estudio.

Figura 24. Coeficiente de sustentación, Time Step = 0,4.

Figura 25. Coeficiente de sustentación, Time Step = 0,1.

Figura 26. Coeficiente de sustentación, Time Step = 0,2.

Figura 27. Contorno de presiones; configuración lineal.

Figura 28. Contorno de presiones; configuración escalonada 15°.

Figura 29. Contorno de presiones; configuración escalonada 30°.

Figura 30. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2$ ; 2 cilindros.

Figura 31. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 32. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2,5$ ; 2 cilindros.

Figura 33. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 34. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D=3,3$ ; 2 cilindros.

Figura 35. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 36. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D=4$ ; 2 cilindros.

Figura 37. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 38. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2$ ; 3 cilindros.

Figura 39. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 40. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2,5$ ; 3 cilindros.

Figura 41. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 42. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 3,3$ ; 3 cilindros.

Figura 43. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 44. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 4$ ; 3 cilindros.

Figura 45. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 46. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2$ ; 4 cilindros.

Figura 47. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 48. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2,5$ ; 4 cilindros.

Figura 49. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 50. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 3,3$ ; 4 cilindros.

Figura 51. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 52. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 4$ ; 4 cilindros.

Figura 53. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 54. Ensamble del piezoeléctrico y del cilindro. Las dimensiones están dadas en milímetros

Figura 55. Vista isometría de un cilindro del diseño del micro-generador eólico.

Figura 56. Dimensionamiento total del conjunto micro-generador eólico. Dimensiones en milímetros.

Figura 57. Render del micro-generador eólico. Vista lateral.

Figura 58. Vista isometría del diseño del micro-generador eólico.

Figura 59. Esquema conceptual del tratamiento eléctrico.

Figura 60. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración lineal.

Figura 61. Coeficiente de sustentación cilindro aguas abajo; configuración lineal.

Figura 62. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal.

Figura 63. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración escalonada  $15^\circ$ .

Figura 64. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración escalonada  $15^\circ$ .

Figura 65. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración escalonada  $15^\circ$ .

Figura 66. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración escalonada  $30^\circ$ .

Figura 67. Coeficiente de sustentación cilindro aguas abajo; configuración escalonada  $30^\circ$ .

Figura 68. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración escalonada  $30^\circ$ .

Figura 69. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 70. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 71. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 72. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 73. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 74. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 75. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros,

Figura 76. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 77. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 78. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 79. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 80. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 81. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 82. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 83. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 84. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 85. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,

Figura 86. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,

Figura 87. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 88. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 89. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 90. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 91. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 92. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 93. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 94. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 95. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 96. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 97. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 98. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 99. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 100. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros,

Figura 101. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

Figura 102. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 103. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 104. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 105. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 106. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 107. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

Figura 108. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 109. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,

Figura 110. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 111. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 112. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

Figura 113. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 114. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 115. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 116. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 117. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

Figura 118. Voltaje, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ ;  $Re=150$ .

Figura 119. Potencia, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ ;  $Re=150$ .

Figura 120. Corriente, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ ;  $Re=150$ .

Figura 121. Eficiencia de los micro-generadores eólicos en función del diámetro de las palas.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros generales para la independencia de malla.

Tabla 2. Valores de referencia.

Tabla 3. Resultados y diferencia entre las mallas.

Tabla 4. Parámetros generales

Tabla 5. Valores de referencia para la obtención del tamaño de time step.

Tabla 6. Diferencia entre valor teórico y experimental para tamaño de time step de 0,4.

Tabla 7. Diferencia porcentual del número de Strouhal de diferentes tamaños de time step.

Tabla 8. Resultados obtenidos con una relación  $P/D=3,3$  a  $Re=150$ .

Tabla 9. % de incremento del coeficiente de sustentación máximo con una relación  $P/D=3,3$  a  $Re=150$ , en comparación con  $Cl=0,4$ .

Tabla 10. Configuraciones simuladas bidimensionalmente mediante Fluent.

Tabla 11. Coeficientes de sustentación máximos evaluados.

Tabla 12. Tiempo de estabilización oscilatoria evaluada.

Tabla 13. Frecuencia de oscilación evaluada una vez alcanzada la estabilidad oscilatoria.

Tabla 14. Criterios de evaluación de influencia.

Tabla 15. Matriz de impacto cruzado para el factor ponderado para la selección de la configuración.

Tabla 16. Criterios de evaluación de resultados.

Tabla 17. Matriz de impacto cruzado para el coeficiente de sustentación máximo.

Tabla 18. Matriz de impacto cruzado para la estabilidad de oscilación.

Tabla 19. Matriz de impacto cruzado para la perturbación por proximidad.

Tabla 20. Matriz de impacto cruzado para la cantidad de cilindros.

- Tabla 21. Matriz de selección para la configuración P/D.
- Tabla 22. Matriz de impacto cruzado para el factor ponderado del piezoeléctrico.
- Tabla 23. Matriz de impacto cruzado para la constante piezoeléctrica  $d$ .
- Tabla 24. Matriz de impacto cruzado para el factor de acoplamiento.
- Tabla 25. Matriz de impacto cruzado para el factor de calidad.
- Tabla 26. Matriz de selección del piezoeléctrico.
- Tabla 27. Características generales del diseño conceptual.
- Tabla 28. Voltaje pico máximo producido por cada cilindro,  $Re=150$ .
- Tabla 29. Corriente pico máximo producido por cada cilindro,  $Re=150$ .
- Tabla 30. Potencia pico máximo producido por cada cilindro,  $Re=150$ .
- Tabla 31. Características de la malla normal.
- Tabla 32. Principales materiales piezoeléctricos comerciales y sus respectivas constantes.

## GLOSARIO

$\Theta$  = Ángulo de distribución de presión sobre un cilindro circular.

$T_\infty, T_e$  = Temperatura del flujo libre

$C_D$  = Coeficiente de arrastre.

$C_F$  = Coeficiente de fuerza.

$C_d$  = Coeficiente de arrastre expresado de manera bidimensional.

$C_l$  = Coeficiente de sustentación expresado de manera bidimensional.

$C_p$  = Coeficiente de presión.

$T_w$  = Temperatura de la pared.

$U_\infty, V_\infty, u_e$  = Velocidad del flujo libre.

$V_w$  = Velocidad sobre la pared.

$p_e$  = Presión al borde de la capa límite.

$\dot{q}$  = Transferencia de calor a través de la pared.

$\delta_T$  = Espesor de la capa límite térmica.

$h$  = entalpía.

$\delta$  = Espesor de la capa límite.

AR = Relación de aspecto.

$C_p$  = Coeficiente de calor específico a presión constante.

$D$  = Diámetro.

H = Altura de los cuerpos.

P/D = Relación entre la distancia de los cilindros.

R = Constante universal de los gases.

Re = Número de Reynolds.

$St$  = Número de Strouhal.

$T$  = Temperatura.

$d$  = Fuerza de arrastre expresada de manera bidimensional.

$f$  = Frecuencia de oscilación del cuerpo.

$l$  = Fuerza de sustentación expresada de manera bidimensional.

$n$  = Vector normal.

$p$  = Presión.

$t$  = Periodo de desprendimiento de cada vórtice.

$u$  = Componente en X de la velocidad.

$\mu$  = Viscosidad dinámica.

$\nu$  = Viscosidad cinemática.

$\rho$  = Densidad del fluido.

$\tau$  = Constante de fricción de la piel.

$s$  = Distancia de separación entre placas paralelas.

$f^c$  = Flujo Convectivo.

$f^d$  = Flujo Difusivo.

$\Phi$  = Término cualquiera de una variable buscada, puede tratarse de temperatura, presión, velocidad, entre otras.

$\Gamma$  = Coeficiente de difusión.

$\frac{V_{in,ave}}{F}$  = Voltaje promedio inducido a través del material piezoeléctrico por unidad de fuerza.

$L_1$  = Longitud del material piezoeléctrico.

$E_p$  = Módulo de Young del material piezoeléctrico

$E_{np}$  = Módulo de Young del material no piezoeléctrico.

$w$  = Ancho del material.

$t_p$  = Distancia entre los electrodos del material piezoeléctrico.

$t_{np}$  = Distancia entre los electrodos del material no piezoeléctrico.

$t_{n1}$  = Posición del plano neutral.

$D_1$  = Módulo de Flexión por ancho.

$x_e$  = Posición del nodo aguas arriba.

$x_p$  = Posición del nodo en el punto P.

## RESUMEN

Este proyecto tuvo como finalidad diseñar conceptualmente un sistema micro-generador de energía eólica a partir estructuras ondulantes sometidas a corrientes de viento variables. Por medio de recopilaciones bibliográficas, y en base a lo planteado en el marco teórico, se tuvo una guía para encaminar el estudio realizado hacia un concepto nuevo de micro-generador.

Una vez establecidas las bases, se analizaron diferentes geometrías y configuraciones por medio de las herramientas de CFD, las cuales fueron validadas mediante comparaciones de estudios similares de resultados logrados por otros autores. Una vez validada dicha metodología, se llevaron a cabo diferentes simulaciones de acuerdo al estado del arte. A partir de allí se analizaron los resultados obtenidos, los cuales sirvieron para establecer las características más idóneas bajo las condiciones asumidas en las simulaciones.

Sin embargo, al evaluar las características finales del mismo, se pudo determinar su funcionalidad, pero se observó la poca eficiencia para transformar la energía, lo cual podría servir como motivación para comenzar nuevos estudios alrededor del mismo tema.

**Palabras Clave:** Efecto piezoeléctrico, CFD, micro generador.

## ABSTRACT

This project had as purpose the conceptual design of a system micro-generator of wind power from undulating structures submitted to variable currents of wind. By means of bibliographical summaries, and on the basis of the raised in the theoretical frame, a guide was had to direct the study realized towards a new concept of micro-generator.

Once established the basis, different geometries and configurations were analyzed through CFD's tools, which were validated by means of comparisons of similar studies of results achieved by other authors. Once said methodology is validated, different simulations of agreement were carried out to the state of art. From there the obtained results were analyzed, which served to establish the most suitable characteristics under the conditions assumed in the simulations.

Nevertheless, after evaluating the final characteristics of this one, it was possible to determine his functionality, but little efficiency was observed when tasked with transforming energy, which might serve as motivation to begin new studies about the same topic.

**Key words:** piezoelectric effect, CFD, micro-generator.

## INTRODUCCIÓN

Con la creciente demanda energética a nivel mundial y en conjunto con el desarrollo tecnológico de los países industrializados, se ha observado nuevas tendencias actuales que apuntan a que los sistemas modernos sean más eficientes en cuanto al uso de la energía eléctrica para su correcto funcionamiento, dando como resultado la aparición de proyectos e investigaciones con el objetivo de crear mecanismos capaces de captar la energía presente en la naturaleza para el uso cotidiano, siendo estos completamente amigables con el medio ambiente sin emplear métodos dañinos, o que puedan generar residuos que afecten al mismo. Esta conciencia de energía renovable se define comúnmente por el término de energía verde<sup>1</sup>.

Los desarrollos alrededor de este tema puede otorgarle a los países una independencia energética de los combustibles convencionales como lo son el gas o los derivados del petróleo, ya que aunque por lo general se necesite una inversión alta inicial, se asegura la producción de energía por un largo periodo de tiempo.

Mediante la combinación de los estudios y avances en aeroelasticidad se han propuesto nuevos diseños de aerogeneradores diferentes a los convencionales que se conocen hoy en día. Estos nuevos diseños se basan en “problemas estructurales”, que son producidos gracias a la interacción entre el fluido y la estructura.

Un diseño innovador de micro-generador sin palas y que funciona gracias a una estructura ondulante puede tener una gran ventaja frente a otros aerogeneradores, ya que sus componentes y diseño resulta más sencillo y con menos partes móviles, lo cual significaría un menor mantenimiento, lo que conllevaría a que fuera empleado en zonas de difícil acceso o en poblaciones con bajos recursos económicos y estén ubicados en zonas agrestes.

A pesar de lo anterior mencionado, los micro-generadores existentes funcionan por lo general a un alto número de Reynolds, lo cual restringe significativamente su diseño y su funcionamiento. Es por esto, que con este proyecto se espera entablar nuevas bases para micro-generadores eólicos que funcionen con estructuras ondulantes a bajo número de Reynolds, de tal manera que se asegure la producción de energía, inclusive cuando existan ráfagas de viento casi imperceptibles para el ser humano.

Mediante las bases y la documentación de otros autores, se llevó a cabo un análisis de geometrías y configuraciones que resultaran propicias para el diseño conceptual mediante la implementación de los programas de CFD como lo es Fluent. Al final, se determinara la utilidad del diseño y se espera motivar a otros investigadores a desarrollar nuevos proyectos en base a los resultados obtenidos.

---

<sup>1</sup>Castañeda, R. (26 enero del 2009), *blogspo*. Recuperado el 5 de septiembre de 2013.  
<http://ingcastaneda23.blogspot.com/>

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Realizar el diseño conceptual de un sistema micro-generador de energía eólica a partir de estructuras ondulantes sometidas a corrientes de viento variables.

### Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de los antecedentes existentes sobre el micro-generador de energía eólica que han existido.
- Explicar el fenómeno la interacción entre el fluido y la estructura que permita el proceso de generación de energía eólica, por medio de la compresión mecánica de un material transductor. Se hará énfasis en los fenómenos aerodinámicos presentes en este tipo de sistema.
- Revisar los diferentes mecanismos o sistemas empleados para transformar este tipo de energía en energía eléctrica. (piezoeléctrico).
- Establecer y validar la metodología de simulación mediante el estudio de un caso desarrollado y documentado por otros autores.
- Identificar las configuraciones que presenten características relevantes para el desarrollo del diseño conceptual del micro-generador en base a la documentación experimental propia de otros autores.
- Seleccionar la configuración más relevante mediante una matriz de selección.
- Establecer características generales de diseño y operación de manera conceptual para el micro generador mediante simulaciones computacionales.
- Evaluar la construcción de un modelo con el fin de contrastar resultados computacionales y experimentales.

# 1 MARCO TEÓRICO

## 1.1 CAPA LÍMITE:

Para describir éste término, se debe considerar un flujo viscoso sobre un cuerpo como se observa en la Figura 1. Los efectos que gobiernan el comportamiento del flujo sobre el cuerpo están influenciados por las fuerzas contenidas dentro de una pequeña capa adyacente a la superficie denominada capa límite.

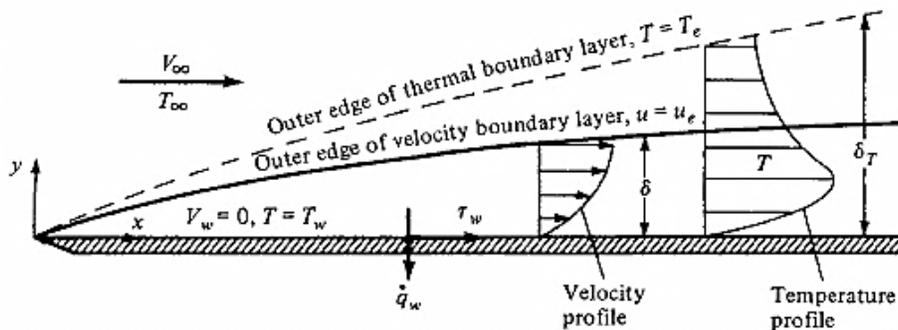


Figura 1. Propiedades de la capa límite<sup>2</sup>.

Dentro de esta capa, la velocidad del flujo se hace cero cuando las partículas tocan la superficie del cuerpo, debido a una condición de no deslizamiento ( $V_w = 0$ ) y la temperatura del flujo en esta región adquiere la misma temperatura de la superficie del objeto (esta temperatura se llama por lo general temperatura de pared o  $T_w$ ).

La magnitud del espesor de la capa límite " $\delta$ " está dado en función de un perfil ascendente de la velocidad del flujo desde el punto donde  $V_w = 0$ , hasta que se cumple con la siguiente condición:

$$u = 0.99u_e \quad (1)$$

En donde

$$u_e = V_\infty \quad (2)$$

En otras palabras y teniendo en cuenta lo anterior, la capa límite puede definirse como la perturbación de la velocidad de un flujo libre sobre un objeto, y su respuesta puede variar de acuerdo a la geometría del cuerpo, la temperatura y la rugosidad que posea éste.

<sup>2</sup>D. ANDERSON, John. 2007. Boundary-Layer Properties En su: Fundamentals of Aerodynamics. FourthEdition. New York, McGraw-Hill Education. Pp-870.

### 1.1.1 Flujo laminar:

El flujo laminar es una condición especial del flujo, en donde el movimiento del mismo se encuentra circulando de manera suave y cada línea de corriente se mueve sobre laminas paralelas sin entremezclarse, como se puede ver en el flujo sobre un cuerpo en la Figura 2.

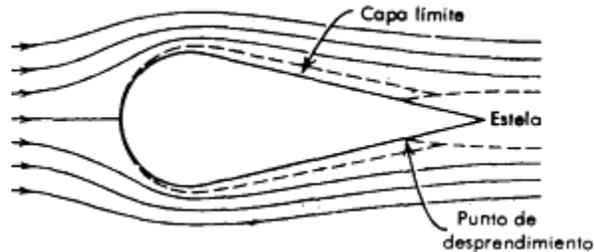


Figura 2. Flujo laminar<sup>3</sup>.

Este comportamiento se da cuando los gradientes de velocidades son bajos o la viscosidad es alta, lo que lleva a decir que las características de este tipo de flujo están determinadas por el número de Reynolds:

$$Re = (\rho U_{\infty} D) / \mu \quad (3)$$

Éste número adimensional es la relación entre los términos de la fuerza inercial y las fuerza viscosa, presentes en las ecuaciones de Navier–Stokes que gobiernan el comportamiento del fluido.

Las ecuaciones de Navier Stokes nos brindan una aproximación al comportamiento real del flujo, más no una solución completamente exacta. A pesar de lo anterior mencionado, puede llegarse hasta una solución aceptable que describa el comportamiento del flujo de manera simplificada, como lo son las ecuaciones de momento y continuidad. La ecuación de energía no se trabajará en esta ocasión, debido a que se considerarán isotérmicas las simulaciones.

A continuación, se muestran las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo en 2 dimensiones; la razón de la descripción del flujo adimensional se llevará a cabo en la descripción de parámetros aerodinámicos.

<sup>3</sup>Conceptos fundamentales de mecánica de fluidos, Mecánica de fluidos, Recuperado el 1 de junio de 2014, <http://www.monografias.com/trabajos10/resumen/resumen.shtml>

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Ecuación de momento en X:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp_e}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Ecuación de Momento en Y:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Las condiciones de frontera para las ecuaciones anteriores son:

En la pared:

$$y = 0 \quad u = 0 \quad (7)$$

Sobre la capa límite:

$$y \rightarrow \infty \quad u \rightarrow u_e \quad (8)$$

## 1.2 PARÁMETROS AERODINÁMICOS:

### 1.2.1 Distribución de Presión sobre un cilindro circular:

La velocidad en la superficie de un cilindro, al igual que la presión estática estarán en función del ángulo  $\Theta$ , en donde por convención con  $\theta = 180^\circ$  se corresponderá al plano de simetría de la superficie que le está dando la cara al flujo libre. Una vez que haya sido definida la distribución de presión sobre una superficie, ésta puede ser empleada para determinar las fuerzas y los momentos que actúan en una configuración o geometría determinada.

Empleando la ecuación de Bernoulli, se puede obtener una expresión para la distribución de la presión estática en función de  $\Theta$ :

$$p = p_\infty + \frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 - 2\rho_\infty U_\infty^2 \text{sen}^2(\theta) \quad (9)$$

Expresando la presión en términos adimensionales del coeficiente de presión se obtiene lo siguiente:

$$C_p = 1 - 4\text{sen}^2(\theta) \quad (10)$$

El coeficiente de presión calculado en la ecuación (10) puede verse en la Figura 3 en función de  $\Theta$  para el caso de un cilindro circular.

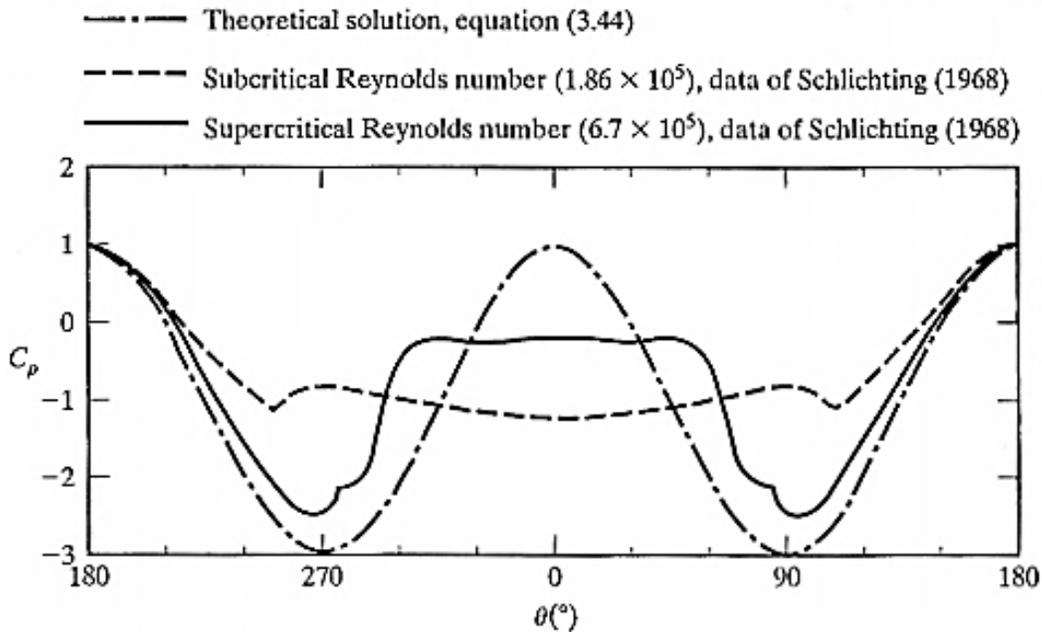


Figura 3. Distribución de presión alrededor de un cilindro circular<sup>4</sup>.

El flujo libre sin perturbación llega hasta las líneas de corriente que tocan la superficie del cuerpo en donde son desaceleradas hasta una velocidad igual a cero en el punto de estancamiento (cuando  $\theta = 180^\circ$ ) [punto A, Figura 4.]. El flujo es posteriormente acelerado a lo largo de la superficie del cilindro, alcanzando su máxima velocidad equivalente a 2 veces la magnitud de la velocidad del flujo libre cuando  $\theta = 90^\circ$  ó  $270^\circ$ , pero es nuevamente desacelerado en el punto de fuga del cuerpo, cuando  $\theta = 0^\circ$  [punto B, Figura 4.]. Esta desaceleración del flujo produce un incremento en la presión sobre el cuerpo como se pudo evidenciar en la Figura 3, sin embargo es evidente que el comportamiento real del fenómeno difiere un poco del modelo teórico debido a que los efectos viscosos del flujo cambian radicalmente la solución real, ya que las partículas en la

<sup>4</sup> J. Bertin, John. 2009. Pressure Distribution. En su: Aerodynamics for Engineers. Fifth Edition. New Jersey, Pearson Prentice-Hall. Pp-103.

capa límite se encuentran con un gradiente de presión adverso asociado a la desaceleración en el punto de fuga, lo cual conlleva a la separación de la capa límite sobre la geometría.

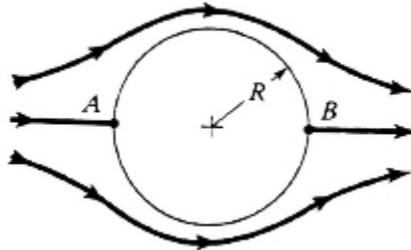


Figura 4. Puntos de estancamiento<sup>5</sup>.

Las características y la localización de la separación de la capa límite dependen directamente de las características geométricas del cuerpo sobre el cual fluye el flujo, y las características de éste último dependen en gran medida del número de Reynolds, del cual se ha demostrado que para un  $Re$  inferior a  $3 * 10^5$ , el ángulo de desprendimiento para un cilindro circular es de aproximadamente a un  $\theta = 100^\circ$ , o unos  $80^\circ$  desde el punto de estancamiento de la parte delantera de la figura.

### 1.2.2 Sustentación y arrastre de un cilindro circular:

El movimiento de las partículas alrededor de un cilindro produce fuerzas que pueden ser vistas como componentes normales (o de presión) y componentes tangenciales (o cortante).

Por lo general, la fuerza resultante de la componente perpendicular al movimiento del flujo libre recibe el nombre de sustentación (en inglés se conoce como lift) y la componente de la fuerza paralela al flujo libre recibe el nombre de arrastre (en inglés se conoce como drag). Las componentes anteriormente mencionadas pueden ser visualizadas en la Figura 5.

---

<sup>5</sup>J. Bertin, John. 2009. Pressure Distribution. En su: Aerodynamics for Engineers. Fifth Edition. New Jersey, Pearson Prentice-Hall. Pp-102.

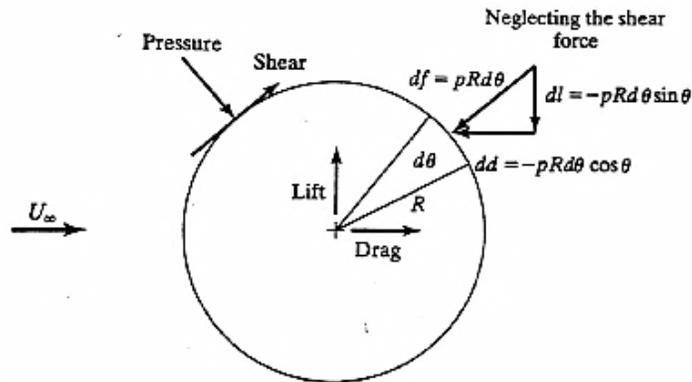


Figura 5. Fuerzas actuando sobre un cilindro<sup>6</sup>.

A partir de la medición de estas fuerzas, de manera experimental para un caso puntual o mediante programas de CFD, pueden ser calculados los coeficientes adimensionales respectivos para realizar un análisis especial en torno a éstos, los cuales sirvan de base para calcular algún otro tipo de fuerzas aerodinámicas.

Estos coeficientes pueden ser calculados fácilmente gracias a la forma general del coeficiente de fuerza, el cual está definido por la siguiente expresión:

$$C_F = \frac{\text{fuerza}}{(\text{presión dinámica})(\text{Área de referencia})} \quad (11)$$

Es importante destacar que el coeficiente de fuerza es independiente del tamaño, ya que solo será función de la configuración geométrica de la figura y de la actitud de la misma frente al flujo.

Ahora teniendo en cuenta el coeficiente anteriormente mencionado, se puede definir el coeficiente de sustentación en función de la componente perpendicular de la fuerza como:

$$C_l = \frac{l}{0,5\rho U_\infty^2 D} \quad (12)$$

Y el coeficiente de arrastre en función de la componente paralela de la fuerza como:

$$C_d = \frac{d}{0,5\rho U_\infty^2 D} \quad (13)$$

En ambos casos [coeficientes (12) y (13)] la variable D se refiere al diámetro del cilindro.

<sup>6</sup>J. Bertin, John. 2009. Lift and Drag. En su: Aerodynamics for Engineers. Fifth Edition. New Jersey, Pearson Prentice-Hall. Pp-105.

En el desarrollo de este proyecto se empleará de manera rigurosa la evaluación del coeficiente de sustentación, ya que con este se podrá observar la magnitud y la dirección de la fuerza perpendicular al flujo que se ejerce sobre cada cilindro. Además, los coeficientes de sustentaciones máximos evaluados indicaran la mayor deflexión del sistema generador de energía, lo que lo convierte en el parámetro más importante a tener presente en el momento del diseño conceptual.

Cuando se incrementa el valor del coeficiente de sustentación sobre un determinado cuerpo que está ubicado sobre un arreglo especial puede significar que las fuerzas perpendiculares al flujo que actúan sobre los cuerpos aguas abajo están en sintonía con los gradientes de presiones presentes en el flujo que ha sido perturbado por algún cuerpo aguas arriba.

### 1.2.3 Número de Strouhal:

El fluido puede presentar un comportamiento oscilatorio debido a la interacción entre las fuerzas viscosas y el gradiente de presión sobre el cuerpo, que provocaran un desprendimiento en la capa límite como se vio anteriormente.

Sin embargo, este desprendimiento de la capa por lo general no se da de manera simétrica en ambos lados de la geometría para los fenómenos que poseen un número de Reynolds entre  $10^2$  y  $10^7$ , sino que se da de manera asimétrica generando ciertos vórtices llamados vórtices de Von-Kármán, ilustrados en la Figura 6.



Figura 6. Vórtices de Von-Kármán<sup>7</sup>.

Los vórtices son el resultado de la interacción entre las fuerzas viscosas y los gradientes de presión del flujo.

---

<sup>7</sup>M. White, Frank . 2007. Oscillating Flows. En su: Fluid Mechanics. Fourth Edition. New York, McGraw-Hill Education.Pp-296.

Al igual como se ha visto hasta el momento, se puede determinar un número adimensional o coeficiente que relacione la frecuencia de oscilación del flujo sobre la velocidad media del mismo denominado número de Strouhal, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$St = \frac{\text{oscilación del flujo}}{\text{velocidad media del flujo}} = \frac{f * l}{U_{\infty}} \quad (14)$$

La variable  $l$  en este caso hace alusión al diámetro o a la longitud característica de la geometría.

El número de Strouhal es diferente para cada tipo de geometría, además es un parámetro importante a tener en cuenta en el momento del diseño de los aerogeneradores, ya que el  $St$  puede dar información sobre la oscilación del flujo mismo, el cual debe mantenerse alejado de la frecuencia de oscilación natural del cuerpo para que éste no entre en resonancia y sufra daños estructurales.

### 1.3 PIEZOELECTRICIDAD:

La energía piezoeléctrica se transforma cuando una fuerza mecánica actúa sobre un material piezoeléctrico, lo cual genera una corriente eléctrica.

Esto se debe a que la estructura cristalina del material es cúbica centrada en las caras, con dominios que poseen cargas tanto positivas como negativa; sus dominios con cargas son simétricos, lo que convierte al conjunto en un componente eléctricamente neutro como se puede apreciar en la Figura 7. (Física, Antônio, Alves, & Pereira, 2010).

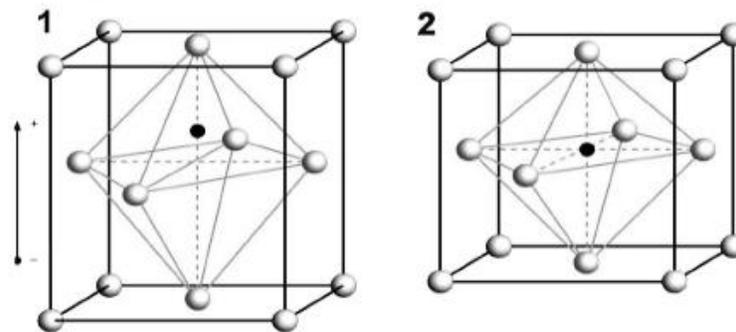


Figura 7. Estructura cristalina de un material piezoeléctrico.

Cuando existe un esfuerzo sobre alguna cara del material, los lazos entre la estructura cristalina se rompen ligeramente, generando un diferencial en el potencial eléctrico. Esto se

debe a que los átomos ionizados dentro de la estructura se desplazan de tal manera que provocan la polarización eléctrica de la micro estructura cristalina.

### 1.3.1 Principales constantes piezoeléctricas:

Para poder analizar los materiales piezoeléctricos, es necesario establecer las propiedades de éstos, las cuales dependen de las constantes de los piezoeléctricos.

La Figura 8 servirá para visualizar la nomenclatura de algunos subíndices de las constantes. En dicha figura se puede apreciar un material uniforme ubicado en el plano ortogonal (x,y,z), simbolizados por los subíndices(1,2,3) respectivamente. Los otros subíndices (4,5,6) representaran la rotación del material sobre su respectivo eje.

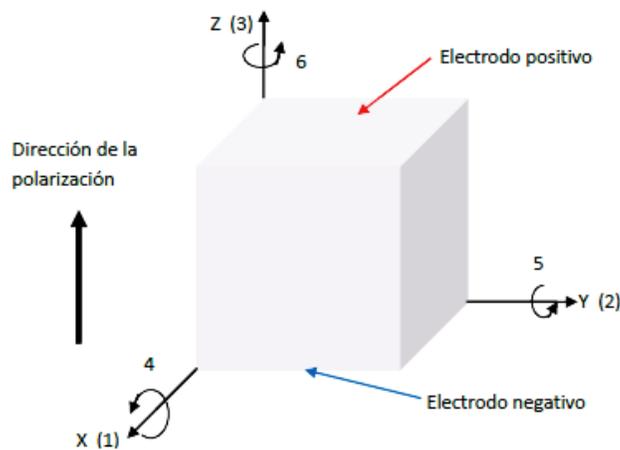


Figura 8. Sistema ortogonal que describe la orientación de las propiedades de los piezoeléctricos (GONZÁLEZ, 2011).

#### 1.3.1.1 Capacitancia C:

La capacitancia es una propiedad del material de almacenar carga y energía potencial eléctrica. Depende del tipo de material y sus dimensiones. Sus unidades se expresan en faradios y está dada por la siguiente expresión:

$$C = \frac{\psi \epsilon_0 A}{s} \quad (15)$$

En donde la constante  $\psi$  toma el valor la constante dieléctrica cuando se trabajan con frecuencias por debajo de la resonancia del piezoeléctrico, en donde los materiales son principalmente capacitivos. Si se trabajan con frecuencias por encima de la resonancia,  $\psi$  toma el valor del factor de acoplamiento.

### 1.3.1.2 Constante piezoeléctrica d:

Esta constante muestra el rendimiento del material para absorber energía por parte de algún tipo de fuente externa, ya que representa la tensión mecánica producida por un campo eléctrico aplicado.

$$d_{ik} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{Newton}} \quad (16)$$

Los subíndices “i” y “k” son remplazados por los índices (1,3) para especificar la dirección de la tensión mecánica producida por un campo eléctrico.

### 1.3.1.3 Coeficientes de acoplamiento k:

Es la constante más empleada para comparar diferentes tipos de materiales piezoeléctricos usados en ultra alta frecuencia, ya que establece la proporcionalidad entre la generación de cargas y la tensión mecánica aplicada o viceversa. Esta constante se emplea para el cálculo de la capacitancia cuando se trabajan con frecuencias por encima de la resonancia del material.

Este coeficiente está dado por la expresión:

$$k = \sqrt{\frac{\text{energía mecánica almacenada}}{\text{energía eléctrica aplicada}}} = \sqrt{\frac{\text{energía eléctrica almacenada}}{\text{energía mecánica aplicada}}} \quad (17)$$

### 1.3.1.4 Constantes dieléctricas K:

Proporcionalidad entre el desplazamiento eléctrico y el campo eléctrico aplicado. Esta constante es primordialmente tenida en cuenta para el caso del fenómeno piezoeléctrico inverso (aplicación de tensión mecánica para la obtención de energía eléctrica), además ésta constante es la relación entre la permitividad del material ( $\epsilon$ ) y la permitividad en el vacío ( $\epsilon_0$ ). Esta constante se emplea en el cálculo de la capacitancia cuando se trabaja por debajo de la frecuencia de resonancia del material.

$$K = \frac{\text{Permitividad del material}}{\text{Permitividad del vacío}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (18)$$

Por lo general K está relacionado con la capacitancia de los electrodos.

Dependiendo de las características de cada material, un piezoeléctrico puede transformar entre 30 y 75% de la energía mecánica aplicada en energía eléctrica, siempre y cuando tenga un diseño óptimo.

### 1.3.1.5 Constantes piezoeléctricas $g$ :

Correlaciona la respuesta en tensión eléctrica del material a una tensión mecánica aplicada; esto significa que si se multiplicase el campo eléctrico calculado por el grosor del material entre los electrodos se obtendría la tensión de salida del piezoeléctrico.

$$g = \frac{\text{campo eléctrico a circuito abierto}}{\text{tensión mecánica aplicada}} = \frac{\text{tensión desarrollada}}{\text{densidad de carga aplicada}} = \frac{V/m}{N} \quad (19)$$

Por lo general, los materiales con altos valores de  $g_{ij}$  constantes son buscados para la fabricación de sensores piezoeléctricos.

### 1.3.1.6 Módulo de Young “E”:

El módulo de Young es la relación elástica entre la presión externa aplicada y la deformación unitaria, dado de la siguiente manera:

$$Y = \frac{\text{Presión externa}}{\text{Deformación unitaria}} = \frac{N}{m^2} \quad (20)$$

### 1.3.1.7 Factor de calidad mecánico $Q_m$ :

Esta constante determina la pérdida de energía en el proceso de transducción. A partir de esta propiedad se evalúa si un material piezoeléctrico cumple para cierto requerimiento de potencia.

### 1.3.1.8 Tasa de envejecimiento:

Tasa temporal con la cual se alteran las propiedades del material debido a que la estructura cristalina del material tiende a despolarizarse, lo que conlleva a una disminución en la eficiencia.

De todas las características antes mencionadas, las constantes más importantes a la hora de seleccionar un material piezoeléctrico capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica son las constantes piezoeléctricas  $d$ ,  $g$ , dieléctrica  $k$  y  $Q_m$ .

## 1.3.2 Cálculo de voltaje, potencia y corriente:

La Figura 9 muestra la conexión de los electrodos del material piezoeléctrico, los cuales pueden ir en paralelo o en serie, según convenga la finalidad para la cual se esté diseñando. Sin embargo, esta forma de conectar los electrodos no influye en el desarrollo de este proyecto, ya que por medio de ambas conexiones se obtendrá el mismo resultado.

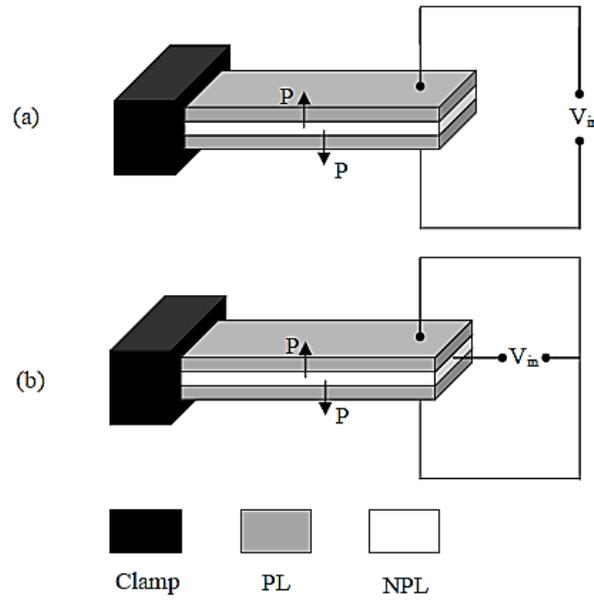


Figura 9. Configuración piezoeléctrica en cantiléver a) en serie y b) en paralelo (Gao Xiaotong, 2011a).

El voltaje promedio sobre unidad de fuerza para un material piezoeléctrico puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_{in,ave}}{F} = \frac{1}{2} L_1 g_{31} \frac{E_p}{w D_1} \left( t_{n1} t_p + \frac{1}{2} t_p^2 \right) \quad (21)$$

En donde

$$t_{n1} = \frac{E_{np} t_{np}^2 - E_p t_p^2}{2(E_{np} t_{np} + E_p t_p)} \quad (22)$$

$$D_1 = \frac{E_{np}^2 t_{np}^4 + E_p^2 t_p^4 + 2E_{np} E_p t_{np} t_p (2t_{np}^2 + 2t_p^2 + 3t_{np} t_p)}{12(E_{np} t_{np} + E_p t_p)} \quad (23)$$

La potencia generada del piezoeléctrico está dado por:

$$P = \frac{1}{2} C V_{in,ave} f \quad (24)$$

En donde en este caso  $C$  es la capacitancia del material piezoeléctrico y  $f$  es la frecuencia de oscilación del material.

Y la corriente producida por el piezoeléctrico se puede calcular mediante:

$$I = \frac{P}{V_{in,ave}} \quad (25)$$

#### 1.4 AEROELASTICIDAD:

La aeroelasticidad puede ser definida como el campo que estudia la respuesta de una estructura elástica ante fuerzas aerodinámicas e inerciales. En otras palabras, el fenómeno de aeroelasticidad se puede observar en el momento en que el flujo choca contra una superficie en reposo y la mueve.

Este concepto nace a partir de la unión entre la aerodinámica y el análisis de las estructuras, el cual es empleado comúnmente en el diseño de cuerpos inmersos en fluidos. Fue propuesto por Arthur Collar en 1947 para el estudio de la interacción mutua que ocurre dentro del triángulo de fuerzas, como se puede ver en la Figura 10. Inicialmente tuvo gran apogeo en el campo de la aerodinámica debido al estudio y al análisis de múltiples diseños que terminaban con roturas en algunas de sus partes como consecuencia de la oscilación de éstas, al igual que la caída de puentes, que era producto de una retroalimentación positiva al interactuar el fluido con la estructura que poseía un bajo factor de amortiguamiento.

El concepto de aeroelasticidad se divide en dos: la primera se define como aeroelasticidad estática, la cual estudia la interacción entre las fuerzas elásticas y aerodinámicas sin depender del tiempo y de la inercia. La segunda se define como aeroelasticidad dinámica, la cual combina todas las fuerzas de la Figura 10 para mostrar los fenómenos oscilatorios sobre una estructura.

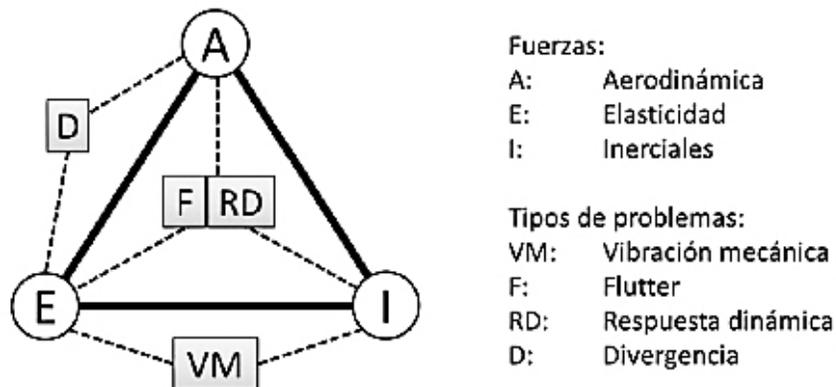


Figura 10. Triángulo de Collar (García Navarro, 2013).

El triángulo de la Figura 10 no solo destaca la interacción entre las componentes aerodinámicas, elásticas e inerciales, sino que además muestra la aparición de fenómenos gracias a la unión de dos o más fuerzas. Comúnmente estos fenómenos resultan ser perjudiciales para las estructuras modernas, especialmente para los aerogeneradores convencionales. Sin embargo, este tipo de fenómenos son primordialmente deseados para aerogeneradores sin palas que funcionen de acuerdo a estructuras ondulantes, en donde la oscilación de un material sea propicio para la generación de electricidad.

A continuación se describe el fenómeno más relevante para el diseño conceptual de un micro-generador de energía eólica que dependa directamente de estructuras ondulantes.

#### 1.4.1 *Flutter*:

Es una vibración autoinducida que defleca la estructura partir de una fuerza aerodinámica. Dicha deflexión tiende a desaparecer y restaura la posición inicial del cuerpo una vez que las fuerzas desaparecen. Este fenómeno por lo general aparece cuando existe una interacción entre el fluido y una estructura que tiene un factor de amortiguamiento insignificante para atenuar las oscilaciones aerodinámicas inducidas.

El *flutter* en un cilindro se da comúnmente cuando la estructura oscila con la misma frecuencia que el desprendimiento de la capa límite, en otras palabras, el sistema entra en resonancia.

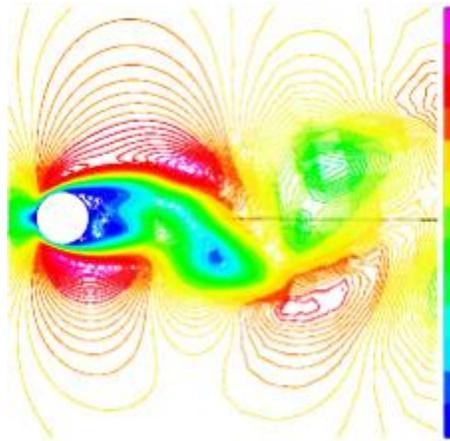


Figura 11. Fenómeno de *Flutter* sobre cilindro<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup>A proper Orthogonal Decomposition based Reduced Order Model for Vortex-Induced Vibrations. AeroelasticityDukeUniversity. Recuperado el 15 de Julio de 2014, <http://aeroelasticity.pratt.duke.edu/pod-rom-viv>

La Figura 11 muestra el desprendimiento de los vórtices de Von-kármán, los cuales son producto del desprendimiento de la capa límite sobre el cilindro. Dichos vórtices son el resultado de la interacción entre el fluido y la estructura. De lo anterior se podría decir que si el movimiento ondulatorio de los vórtices fuera acoplado con un segundo cilindro aguas abajo, se produciría un incremento en las fuerzas aerodinámicas que actúan en este último.

De esto último antes mencionado es donde se enfocará el desarrollo de este proyecto.

## 1.5 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD):

La dinámica de fluidos computacionales o CFD, permite lidiar con una vasta gama de ecuaciones no lineales como lo son continuidad, momento y energía, sin realizar ningún tipo de aproximación física o geométrica. Este tipo de programas permite obtener resultados de un flujo determinado mediante la solución de variables del mismo gracias a la discretización de puntos.

El programa establece ciertos puntos de acuerdo a los parámetros preestablecidos, generando líneas de comunicación a través de estos que en conjunto forman una especie de malla como se puede ver en la Figura 12, en la cual cada vértice resultante de la unión de dos o más líneas de la malla albergarán la posición de un nodo.

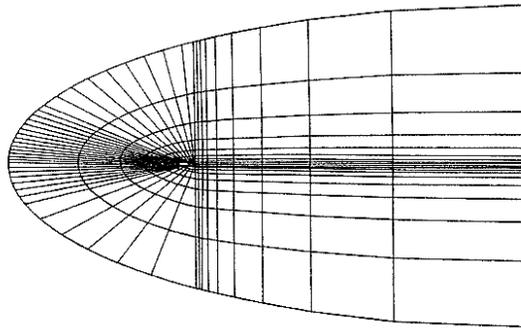


Figura 12. Malla generada por los nodos de CFD<sup>9</sup>.

Las ecuaciones de cada nodo pueden ser resueltas mediante diferentes tipos de métodos numéricos; para este caso de estudio se empleará el método de volúmenes finitos.

### 1.5.1 Volumen de control

Para definir este concepto, se debe considerar el movimiento de un flujo dado por las líneas de corrientes como se puede apreciar en ambos casos de la Figura 13. Existe un volumen

---

<sup>9</sup>D. ANDERSON, John. 2007. Numerical Solutions-Computational Fluid Dynamics (CFD). En su: Fundamentals of Aerodynamics. Fourth Edition. New York, McGraw-Hill Education. Pp-176.

imaginario cerrado que limita el paso del fluido a través de este. Dicho volumen se conoce comúnmente con el nombre de *volumen de control*  $\mathcal{V}$  y cuya superficie se define por la *superficie de control*  $\mathcal{S}$ .

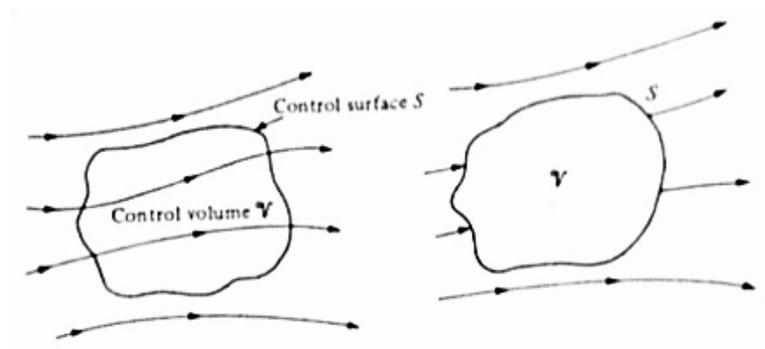


Figura 13. Aproximación al volumen de control.<sup>10</sup>

El primer caso de la Figura 13 muestra al volumen de control fijo en una posición, en donde las partículas del fluido pasan a través de éste. El segundo caso muestra al volumen de control en movimiento a la par con el fluido y cuyas partículas permanecen en la misma posición de su interior, por eso se toma como si no existieran líneas de corrientes que atravesaran este volumen. La atención en este proyecto será puesta al primer caso de la Figura 13.

### 1.5.2 Método de volúmenes finitos:

El método de volúmenes finitos es un método para la aproximación de sistemas simples o sistemas con ecuaciones de diferencias parciales, que expresen la conservación o el balance de una o más cantidades.

Este método usa la forma integral de las ecuaciones de conservación comenzando en un punto fijo:

$$\int_S f^c ds = \int_S f^d ds + \int_\Omega q_\phi d\Omega \quad (26)$$

En donde:

$f^c = \rho \Phi v \cdot n$ ; es el flujo convectivo.

$f^d = \Gamma \text{grad} \Phi \cdot n$ ; es el flujo difusivo.

<sup>10</sup>D. ANDERSON, John. 2007. Finite Control Volume Approach. En su: Fundamentals of Aerodynamics. Fourth Edition. New York, McGraw-Hill Education. Pp-110.

Para comenzar la solución por este método, primero se divide el dominio en un número finito de pequeños volúmenes de control (denotados como CV, por sus siglas en inglés *Control Volume*). Dicha división se da como resultado del proceso de mallado.

Luego se definen las fronteras del volumen de control del sistema físico para cada CV, las cuales están demarcadas por las líneas de la malla. Al contrario del método de diferencias finitas, éste método ubica cada nodo computacional en el centro de cada CV como se puede ver en la Figura 14, y no entre la unión de dos o más las líneas.

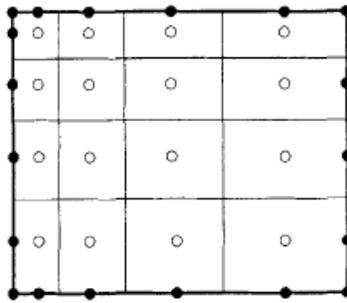


Figura 14. Nodos centrados en los volúmenes de control<sup>11</sup>.

La ventaja con este arreglo nodal, es que se tiene un valor medio sobre cada CV, proporcionando así una mayor precisión en la solución de las variables.

Sobre cada CV se resuelve la ecuación (26), de esta manera, si se suman todas las ecuaciones de cada arreglo nodal se obtendrá una ecuación global de conservación. La aproximación de las integrales sobre cada CV requiere de los valores adyacentes de los nodos vecinos. Además, para resolver las ecuaciones en cada nodo se asume que la velocidad del campo y las propiedades del fluido  $\rho$  y  $\Gamma$  son conocidas en todos los CVs. Para calcular los flujos convectivos y difusivos, se deben encontrar los valores de  $\Phi$  y los gradientes normales de cada celda de cada CV.

En la Figura 15 se puede observar la nomenclatura empleada sobre cada nodo computacional.

---

<sup>11</sup>H. FERZINGER, Joel. 2002. Finite Volume Methods. En su: Computational Methods for Fluid Dynamics. Tirdh Edition. New York, Springer-Verlag. Pp-71.

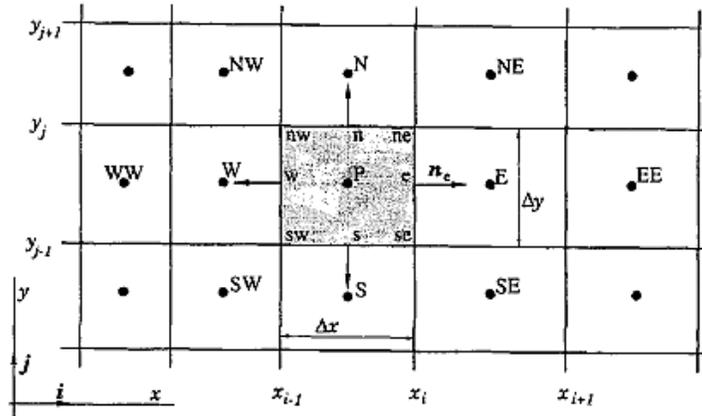


Figura 15. Notación empleada para los nodos computacionales ubicados en cada CV<sup>12</sup>.

A continuación se explicará cómo obtener dichos valores de  $\Phi$  partir de la discretización conocida como *Upwind*.

### 1.5.3 Interpolación *Upwind* (UDS):

Primero se debe dejar en claro que el término “e” hace alusión a la notación mostrada en la Figura 15. Este proceso será descrito a partir de esta posición, ya que para las demás posiciones serán completamente iguales.

Este método de discretización se asemeja a las diferencias finitas hacia atrás y hacia adelante, dependiendo de la dirección del fluido.

Para este caso la variable  $\Phi_e$  se aproxima de la siguiente manera:

$$\Phi_e = \begin{cases} \Phi_P & \text{si } (v \cdot n)_e > 0 \\ \Phi_E & \text{si } (v \cdot n)_e < 0 \end{cases}$$

Luego de definir lo anterior, se expande la serie de Taylor sobre el punto P dado [Figura 15], obteniéndose la siguiente expresión:

$$\Phi_e = \Phi_P + (x_e - x_p) \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_P + \frac{(x_e - x_p)^2}{2} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right)_P + H \quad (27)$$

En donde H denota los términos más elevados de la serie, lo que quiere decir que tan solo se tendrá en cuenta el primer término para obtener una precisión de primer orden.

Este tipo de discretización produce un error de truncamiento debido al flujo difusivo, el cual tiene una dirección normal al flujo y está dado por:

<sup>12</sup>H. FERZINGER, Joel. 2002. Finite Volume Methods. En su: Computational Methods for Fluid Dynamics. Tirdh Edition. New York, Springer-Verlag. Pp-73.

$$f_e^d = \Gamma_e \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_e \quad (28)$$

En donde  $f_e^d$  es el flujo difusivo del nodo aguas arriba.

Esta difusión numérica es magnificada cuando se incrementan las dimensiones trabajadas y cuando se tienen secciones oblicuas en la malla. Además, cuando existe una malla burda puede ocurrir que los valores se desbordan del problema. Por todo lo anterior se debe tratar de tener una malla adecuadamente refinada para cada fenómeno de estudio para obtener soluciones acertadas a cada caso.

## 1.6 AEROGENERADOR-CLASIFICACIONES:

La energía eólica es un tipo de energía que se fundamenta en el flujo de viento, pues se utiliza la velocidad de éste para lograr obtener energía eléctrica. Se debe tener en cuenta que en este tipo de energía renovable proviene a su vez del sol ya que la circulación de aire se debe precisamente a la diferencia de temperaturas entre los distintos lugares del planeta.

Una de las formas más comunes para la obtención de este tipo energía eléctrica es mediante el uso de aerogeneradores.

El aerogenerador es un dispositivo que se utiliza para generar energía eléctrica a partir de la transformación de la energía cinética del viento. Los aerogeneradores se pueden clasificar según los siguientes parámetros(Arias, 2011):

### 1.6.1 Posición del aerogenerador:

Los aerogeneradores se pueden clasificar según su eje:

- **Eje vertical:**  
Su eje principal se encuentra ubicado en forma perpendicular al suelo.
- **Eje horizontal:**  
Su eje principal se ubica de forma paralela al suelo.

### 1.6.2 Posición del equipo respecto al viento:

Los aerogeneradores se pueden clasificar según su posición respecto al viento:

- **Viento arriba:**  
En esta configuración el viento pasa primero sobre un rotor y después sobre la torre.

- **Viento abajo:**  
En esta configuración el viento pasa primero por la torre y luego sobre un rotor.

### 1.6.3 Según el número de palas:

Los aerogeneradores también se clasifican según el número de palas que poseen.

- **Una sola pala:**  
Consiste en un aerogenerador de una sola pala, en donde tiene un contrapeso al otro lado para contrarrestar la inercia del movimiento y mantener el equilibrio del sistema.
- **Dos palas:**  
Consiste en un aerogenerador con un par de palas ubicadas sobre el mismo eje.
- **Tres palas:**  
Consiste en ubicar las palas con una separación de 120°.
- **Múltipalas:**  
Consiste en un aerogenerador con más de 3 palas.
- **Sin palas:**  
Estos aerogeneradores no tienen palas sino que funcionan por lo general gracias a la acción de una estructura ondulante, debido a los diferentes tipos de perturbaciones aerodinámicas sobre una geometría en específico.

Este último tipo de aerogenerador es el propuesto en este diseño conceptual, ya que como se verá más adelante, es ideal para corrientes a bajo número de Reynolds e impulsar los sistema MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) que son sistemas de elementos mecánicos y eléctricos que han sido miniaturizados gracias al método de fabricación de los mismos, los cuales llegan a tomar dimensiones desde una micra hasta unos cuantos milímetros<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup>MEMS and Nanotechnology Exchange, Definition of MEMS, Recuperado el 10 de septiembre de 2013, <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>

Por lo general Los MEMS cumplen labores de toma de datos, mediciones de parámetros determinados, y transporte inalámbrico de los mismos. Comúnmente se sitúan en forma apartada del contacto humano y en zonas de difícil acceso, lo que complica el mantenimiento de los mismos. Dichos sistemas consumen entre 25-500 micro watts, lo que los convierte en microestructuras con un consumo insignificante de potencia requerida para su funcionamiento.

## 2 ESTADO DEL ARTE

La demanda energética actual a nivel mundial está llevando al desarrollo e investigación de múltiples proyectos para que disminuyan la dependencia de obtención de energía a partir de los hidrocarburos o cualquier otra que sea perjudicial para el medio ambiente. Según las estadísticas de la EIA (*U.S Energy Information Administration*) el periodo comprendido entre 2010 y 2040 se caracterizará por un aumento del 56% en cuanto al consumo de la energía a nivel mundial. En la Figura 16 se puede observar la proyección del consumo energético de los países miembros de la organización para el desarrollo económico conjunto OECD (por sus siglas en inglés: *Organization for economic Cooperation and development*) y los países no miembros. Esta organización tiene como finalidad asegurar el empleo de diferentes tipos de energía de manera segura, y obrar por el desarrollo de las energías renovables.

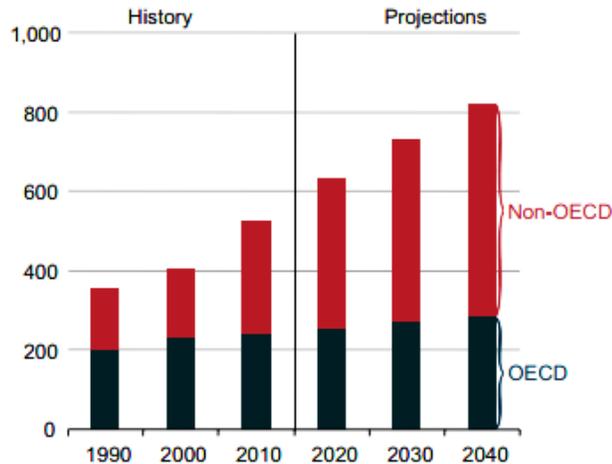


Figura 16. Proyección del consumo de energía en cuatrillones de btu<sup>14</sup>.

Debido a lo anterior mostrado, se puede deducir que existe un apuro a nivel mundial por impulsar en mayor medida la industria de energía verde (renovable no contaminante), es por esto que la demanda de aerogeneradores de todos los tipos ha aumentado en los últimos años.

Sin embargo, la creciente demanda de aerogeneradores convencionales (horizontales y verticales) ha llevado a nuevas investigaciones y desarrollos de sistemas que no posean un importante impacto visual, que puedan ser instalados en áreas remotas y no posean un mantenimiento continuado como el empleado otros tipos anteriormente mencionados. Es

<sup>14</sup>Consumo de energía 2010-2040. AnnualEnergy Outlook 2013. Recuperado el 13 de octubre de 2013, [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2013).pdf)

por todo esto que la tendencia actual apunta a los generadores sin palas o con el menor número de partes móviles, debido a que no requieren un mantenimiento tan riguroso como el de los aerogeneradores convencionales.

Además con la miniaturización de múltiples sistemas electrónicos que se están llevando a cabo hoy en día, se hace necesario la renovación de sistemas eólicos funcionales con bajas corrientes de viento en donde se suministre el voltaje, corriente y potencia necesaria para el funcionamiento de estos sistemas, debido a que los generadores eólicos actuales muestran una disminución en la eficiencia de los mismos conforme se disminuye el diámetro de sus palas [Ver Figura 121, ANEXO (7)].

Pero antes de mostrar el estado actual de las investigaciones recientes, se debe aclarar el término micro-generador eólico, el cual está definido por la clasificación española IEC 61400-2(Une-en, 2009), como aquellos capaces de producir hasta 50 Kw de potencia nominal y poseen un área de barrido inferior a los  $200m^2$ . Este concepto de micro-generadores se define con el nombre de aerogeneradores de mini eólica<sup>15</sup>.

Este último concepto definido como mini eólica está orientado hacia la generación de energía eléctrica para el autoabastecimiento de un sistema complejo (como el sistema eléctrico de un hogar) o para un sistema simple de actuación de sensores u otros equipos eléctricos.

Los sistemas de captación de energía o mejor conocido en inglés como *energy harvesting*, son sistemas que capturan el movimiento natural de la naturaleza, almacenan la corriente en algún componente electrónico y la acondicionan por medio de algún puente rectificador para que sea administrado de acuerdo a la demanda de energía que necesite un equipo acoplado a este. Estos equipos son de pequeño tamaño y comúnmente son empleados en grandes cantidades.

A pesar de que en la actualidad no existe teoría alguna sobre el diseño conceptual de los micro-generadores sin palas, es conveniente por ello realizar una recopilación bibliográfica en donde se muestren los estudios experimentales que se han desarrollado hasta la actualidad.

Un primer acercamiento de un tipo de micro-generador eólico sin palas denominado *windbelt*, mejor conocido con su nombre en español como “cinturón de viento”, posee unas dimensiones de 5 pulgadas de largo por 1 pulgada de alto, capaz de generar energía suficiente para alimentar pequeños componentes electrónicos como sensores o actuadores

---

<sup>15</sup>BORNAY, España [Fecha de consulta: 5 de enero de 2014] Disponible en:  
<http://www.bornay.com/eolica/es/aerogeneradores/4>

(Energy, 2008). Dentro de los parámetros característicos se explica su funcionamiento, el cual consiste en una banda magnética posicionada en el centro una estructura en medio de un embobinado. Dicha estructura está ubicada fijamente en un punto de baja o alta circulación de algún fluido (en este caso aire) gracias al cual comienza a oscilar de tal manera que el campo magnético induzca en la bobina una corriente que es posteriormente transportada para su almacenamiento, en donde es acondicionada para el uso de algún sensor en específico; lo cual indica que dicho sistema no necesitará jamás una batería alguna para su funcionamiento siempre y cuando exista algún tipo de flujo.

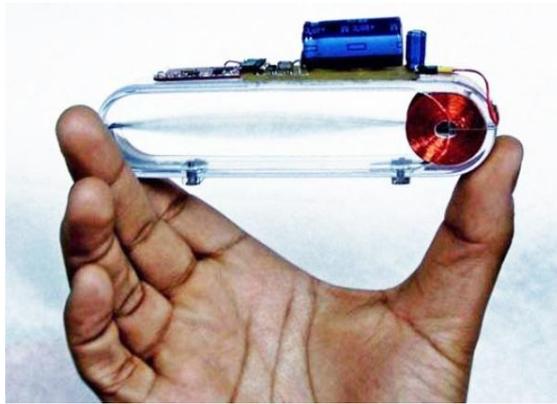


Figura 17. Microgenerador eólico *windbelt*<sup>16</sup>.

Se puede observar en la Figura 17 el pequeño espacio que ocupa este micro-generador eólico en comparación con una mano humana. Esto es una de las principales ventajas, ya que el espacio operacional necesario es mínimo para suplir de corriente algún sistema. Este sistema alcanza su funcionamiento óptimo con una velocidad mínima de 2m/s, sin embargo no posee un rango de velocidades para su operación.

Por otro lado, un estudio, llevado a cabo en *Drexel University*, muestra diferentes arreglos y mecanismos de transformación de energía, como los electromecánicos, electrostáticos y los piezoeléctricos, todos enfocados a la generación de energía de acuerdo al movimiento del fluido sobre una estructura ondulante (Gao Xiaotong, 2011b) similares al principio de funcionamiento del *windbelt*. Dentro de este estudio se analizó las ventajas que tenían los mecanismos piezoeléctricos frente a los electromecánicos, en donde los primeros producían un alto voltaje a una baja corriente y potencia de manera directa, además necesitan de un arreglo electrónico sencillo para adecuarlos a unos rangos útiles para diferentes sistemas miniaturizados.

---

<sup>16</sup>Tomado de: Micro generador Windbelt, Humdinger [Fecha de consulta: 5 de enero de 2014] Disponible en: <http://www.humdingerwind.com/>

Los sistemas piezoeléctricos no necesitaban una corriente inicial para comenzar su funcionamiento de transducción de energía, además no necesitan del diseño de un mecanismo de parada, lo que reduce las partes necesarias para la construcción de estos sistemas, siendo todo esto una clara ventaja. Por otro lado, una desventaja de éstos es que su funcionamiento estaría ligado a la geometría utilizada por los mismos.

Por medio del estudio anterior, se llevó a cabo en *Georgia Institute of Technologie*, Atlanta, un estudio en el cual se analizó la generación de energía eólica a partir cilindros conectados a una base piezoeléctricas circular. Este proyecto estuvo enfocado a los efectos aerodinámicos producidos por un banco de cilindros, y como la proximidad de cada uno alteraría considerablemente la amplitud de oscilación de los cuerpos (Hobbs & Hu, 2012).

Los resultados arrojaron que un arreglo de 4 cilindros ubicados a 3,3 veces el diámetro de cada uno, a una velocidad que permite la aparición de los vórtices de Von-Kármán, daría como resultado el aumento en 1,6 veces la frecuencia de oscilación del cilindro unido al piezoeléctrico ubicado aguas abajo a un Reynolds entre 3550 y 8900. Este rango de Reynolds analizado fue escogido teniendo en cuenta que fuera régimen laminar, sin embargo no descartaron la posibilidad del funcionamiento del sistema inclusive a un menor Reynolds, en donde hacen un profundo análisis, ya que un micro-generador que sea capaz de funcionar a un numero de Reynolds que no supere los 1000, sería ideal para posicionar inclusive en los lugares más aislados y con menos flujo de viento alguno. La Figura 18 muestra el arreglo experimental que se llevó a cabo. La potencia que se toma para este estudio de micro-generador está por el orden de microwatts, el cual es del mismo orden que brindan los dispositivos piezoeléctricos, gracias a la oscilación senoidal de estos materiales. Este tipo de voltaje es ideal para impulsar mecanismos de ultra bajo consumo energético, sensores, o transporte de datos de manera inalámbrica como se mencionó anteriormente.

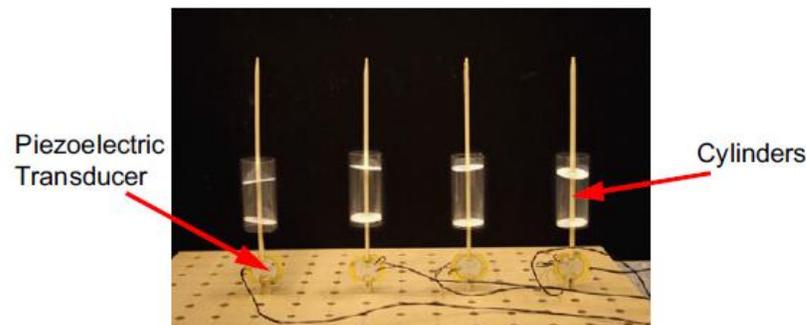


Figura 18. Arreglo de cilindros en línea.

El arreglo piezoeléctrico de los cilindros en línea se basó en lo descrito por A. KHALAK\* AND C. H. K. WILLIAMSON (Hall, 1999), en donde demuestran que el 95% de la

energía transversal al fluido (perpendicular al flujo libre) puede ser captado tan solo con 2 grados de libertad del sistema. Esta oscilación es provocada por el desprendimiento de la capa límite del fluido sobre la estructura, lo que provoca un vaivén de presión, variando la sustentación sobre el mismo (como fue mencionado en el marco teórico).

Además la configuración lineal de los 4 cilindros se referenció de acuerdo a los datos del número de Strouhal encontrado mediante simulaciones bidimensionales y verificadas mediante ensayos experimentalmente del departamento de ingeniería mecánica de la universidad de *Saskatchewan*(Sumner, Richards, & Akosile, 2008). En este trabajo se muestran diferentes arreglos de cilindros escalonados y lineales en donde por medio de la variación de la relación  $P/D$  se pudieron establecer los números de Strouhal adecuados para estas configuraciones, lo que se traduciría en la posición clave para aprovechar la oscilación del flujo sobre las estructuras

Éste estudio anterior fue retomado igualmente en la universidad de Pekín (Gu & Sun, 1999)en donde se mostró que para un bajo número de Reynolds se produciría una mayor oscilación cuando los cilindros estuviesen el línea, ya que el desprendimiento de la capa límite es mínimo para regímenes que no superan los 1000 Re; las configuraciones escalonadas tendrán gran influencia en la oscilación cuando el flujo analizado es turbulento. Todo lo anterior obedece al fenómeno de proximidad de los cuerpos, en donde una baja relación  $P/D$  producirá que los mismos se comporten como uno solo debido a una mínima separación; una relación  $P/D$  media producirá una interferencia en los cuerpos aguas abajo, otorgándoles a cada uno características especiales de acuerdo a la geometría transversal del mismo, y una relación  $P/D$  alta daría como resultados que los cuerpos se comportasen como independientes uno del otro. En la Figura 19 se puede evidenciar la nomenclatura empleada para este experimento, en donde  $P$  es la distancia entre centro y centro,  $D$  es el diámetro de los cilindros,  $U$  es la velocidad del flujo libre y  $\alpha$  es el ángulo de escalonamiento.

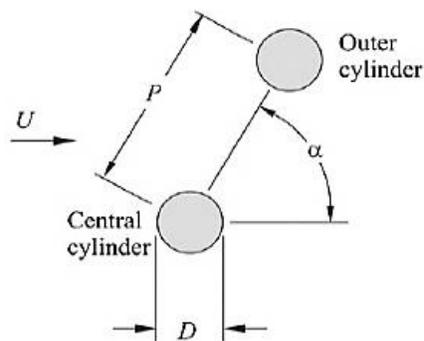


Figura 19. Nomenclatura empleada para la relación  $P/D$ .

Otro caso de estudio, el cual servirá en gran medida para este proyecto, muestra un cilindro unido a un material de cerámica piezoeléctrica, en donde el flujo pasaba alrededor del cilindro, en el cual se generaba presión en las partes laterales del mismo y no existía movimiento alguno. Sin embargo cuando alguna perturbación adicional existía por parte del fluido, se generaban los vórtices de Von-Kármán, al igual que en los estudios anteriores.

Este fenómeno analizado en régimen laminar, mostraba un comportamiento oscilatorio por parte de la fuerza de sustentación y arrastre. Esta oscilación era la variable necesaria para que se llevara a cabo la generación de energía como se puede apreciar en la Figura 20.

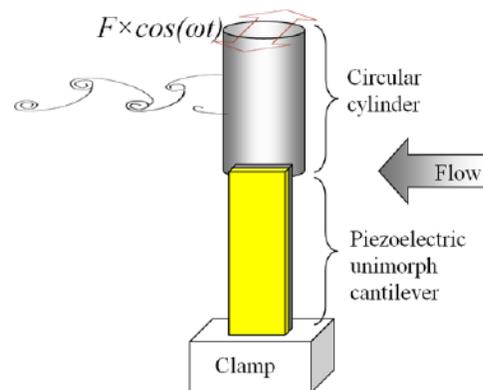


Figura 20. Microgenerador cilíndrico con una viga piezoeléctrica en cantiléver(Gao Xiaotong, 2011a).

De acuerdo a la figura anterior, es evidente que este sistema tan solo tenía dos grados de libertad sobre el mismo eje perpendicular al flujo, ya que la oscilación generada por el desprendimiento posterior de los vórtices no hacía fluctuar el arrastre en gran medida para justificar un sistema más complejo que el propuesto. En este caso de estudio, explicaron además que el cuerpo cilíndrico era la estructura más simple para la fabricación de un micro-generador, sin embargo era una estructura difícil de simular en los programas de CFD debido a las consideraciones que se deben tener al simular en 3 dimensiones.

Aunque hasta el momento se ha visto que todos los estudios apuntan a la creación física de un prototipo para que sea probado experimentalmente debido a la debilidad de los programas de CFD para el estudio de cilindros circulares, es importante entender que los fenómenos aerodinámicos que gobiernan el comportamiento general de un cuerpo cilíndrico inmerso en un flujo pueden ser fácilmente simulados en programas de CFD como lo es Fluent en 2 dimensiones (como si fuera un cuerpo infinito) con el fin de ahorrar

elementos de cómputo y tiempo del mismo, ya que la influencia de los fenómenos tridimensionales pueden ser reducidos para que puedan ser casi despreciables.

Esto último ocurre cuando se logra un control sobre la magnitud y el efecto del *downwash* (fenómeno tridimensional) en el extremo libre del cuerpo; además se debe controlar la altura del cilindro ya que ésta debe ser más grande que la capa límite de la pared o el suelo en donde este empotrado para que esto no interfiera con los fenómenos bidimensionales del caso de estudio (Li & Sumner, 2009). La Figura 21 ilustra el caso de estudio de un cilindro empotrado en el suelo, con las variables antes mencionadas. Para hacer del caso de estudio bidimensional y pueda ser simulado fácilmente en CFD se debe asegurar una relación de aspecto de 7.

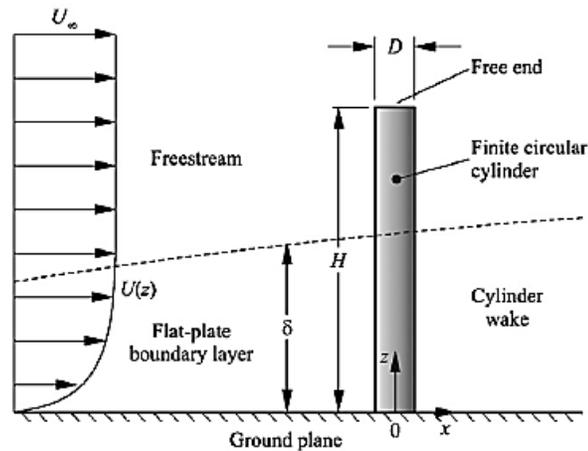


Figura 21. Capa límite del suelo sobre cilindro finito.(Li & Sumner, 2009)

Un aspecto importante a tener en cuenta en cuanto al manejo de los materiales piezoeléctricos fue llevado a cabo por la Universidad de Pennsylvania en donde se demostró que las vigas en cantiléver piezoeléctricas tienen 3 tipos de oscilación. El primer caso mostraría una mayor deflexión en las vigas, que por consiguiente produciría la mayor cantidad de energía sobre los materiales piezoeléctricos (Townley, n.d.). Los otros 2 casos consistían en amplios y cortos comportamientos senoidales como se puede apreciar en la Figura 22. Lo anterior repercute en la cantidad de energía que se quiera producir, ya que un comportamiento senoidal estable producirá energía alterna más eficientemente.

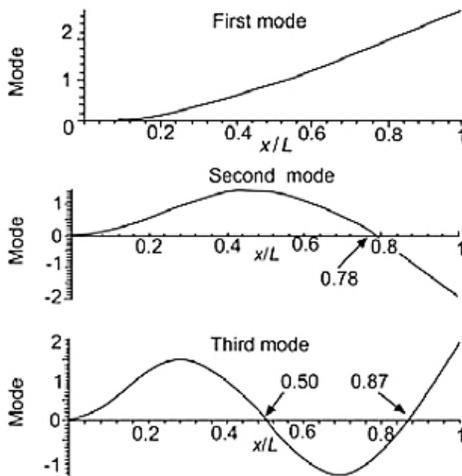


Figura 22. Modos oscilatorios de las vigas en cantiléver.

Además, también se constató en este último caso de estudio que los micro-generadores eólicos que poseen materiales piezoeléctricos están diseñados para funcionar mejor cuando la frecuencia de oscilación esta alrededor de los 120 Hz, aunque no es primordial que se cumpla estas especificaciones.

Todo lo anterior descrito fue entorno a la explicación del funcionamiento de los micro-generadores desarrollados, en donde se tomaran diferentes consideraciones de cada caso de estudio y de esta manera poder realizar un diseño conceptual.

Con todo lo que ha sido mencionado hasta el momento se puede comenzar con el desarrollo de este proyecto, pero es de suma importancia dejar en claro que los micro-generadores son equipos capaces de transformar pequeñas cantidades de energía para equipos alimentados por pequeños voltajes como lo son los MEMS, en ningún momento se pretende remplazar los generadores actuales debido a que las comparaciones de potencia son abrumadoras. Sin embargo gracias a los recientes estudios en este nuevo campo, es importante dejar una base que sirva como diseño conceptual para posibles proyectos futuros que profundicen aún más en el diseño de estos generadores.

### 3 VALIDACIÓN METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Aunque existen múltiples geometrías simétricas y asimétricas que han sido desarrolladas hoy en día para cumplir con alguna tarea determinada, es importante aclarar que la complejidad de una estructura repercute significativamente en la facilidad con la que pueda ser construida, simulada y puesta en funcionamiento, lo cual se traduce en costos.

Como se pretende diseñar conceptualmente un micro-generador a partir de lo descrito en el estado del arte por otros autores, es importante identificar que la geometría más empleada por todos ellos, debido a la facilidad de construcción y por ser una geometría ampliamente estudiada, es el cilindro circular. A partir de este se puede asegurar que el flujo analizado mediante las simulaciones se comportará de igual manera ante cualquier frente del que pueda provenir el flujo libre.

El comportamiento de los flujos alrededor de los cuerpos sumergidos en éste trabajo es estudiado con el programa Fluent 14. Esta herramienta computacional permitirá analizar la interacción entre el fluido y la estructura mediante los fenómenos aerodinámicos implicados anteriormente en el marco teórico.

Aunque muchas simulaciones se han llevado a cabo en este programa de CFD para observar el comportamiento del flujo alrededor de un cilindro, existe aún una discrepancia en el método más contundente para obtener un mínimo de error numérico entre los resultados de las simulaciones computacionales y los resultados experimentales ya registrados hasta el momento.

Para reducir el error numérico al mínimo posible sin incrementar en gran medida los elementos computaciones, se debe asegurar dos tipos independencias dentro de las simulaciones que permitan validar los resultados:

1. Para los fenómenos estacionarios es necesario determinar la independencia de malla del cuerpo, con el fin de comparar el coeficiente de arrastre con los ya enunciados por otros autores.
2. Para los fenómenos transitorios aparte de una independencia de malla, es necesario hacer una independencia en los tamaños de los *Time Steps*, en donde se pueda emplear un número de Strouhal adecuado.

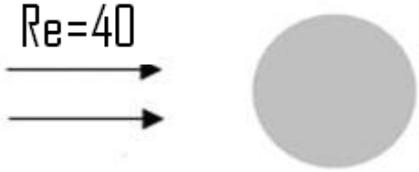
Para este proyecto, en donde se analizaran fenómenos oscilatorios transitorios, como lo es la sustentación sobre un cilindro circular, es necesario realizar las dos independencias antes mencionadas.

### 3.1 Independencia de Malla:

Para este caso de estudio, en donde es de suma importancia un buen volumen de control y un mallado adecuado que se acople correctamente a la geometría circular, se comenzó empleando un mallado sugerido en diferentes módulos de estudios de Ansys de la *Universidad de Cornell*, en los cuales se sugiere la creación de la misma gracias al programa *Gambit*<sup>17</sup>, que aunque un poco obsoleto para las versiones más recientes de *Workbench*, es ideal para controlar el crecimiento de la malla sobre el cilindro.

A continuación se resume los parámetros indicados [Ver Tabla 1] que se tuvieron en cuenta en Fluent para analizar diferentes refinamientos de malla, los cuales permitieron la selección de una malla adecuada para ser empleada en las simulaciones posteriores. La altura del cilindro que aparece en la Tabla 1 fue ingresada en la profundidad del cuerpo, dentro de los valores de referencia para incluir de una vez lo planteado en el estado del arte para una  $AR > 7$ .

Tabla 1. Parámetros generales para la independencia de malla.

 <p style="text-align: center;"><math>Re=40</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>\rho = 75 \text{ kg/m}^3</math></p> <p style="text-align: center;"><math>U = 1 \frac{m}{s}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>D = 2m</math></p> <p style="text-align: center;"><math>h = 14m</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\mu = 3,75 \text{ kg/ms}</math></p>
--	--

Antes de evaluar los coeficientes de sustentación máximos, se evaluarán los coeficientes de arrastre máximos, los cuales servirán como herramienta para comprobar los resultados obtenidos de acuerdo a lo planteado por otros autores bajo las mismas condiciones.

Las condiciones de frontera empleadas para las simulaciones fueron las siguientes:

A la entrada:

$$V_x = 1; V_y = 0 \quad (29)$$

<sup>17</sup>Steady flow past a cylinder [Última fecha de consulta: 12 de febrero de 2014] Disponible en: <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Steady+Flow+Past+a+Cylinder+-+Step+7>

Sobre la pared superior e inferior:

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = 0; v_y = 0 \quad (30)$$

Sobre la superficie del cilindro:

Se aseguró una condición de no deslizamiento de la siguiente manera:

$$v_x = 0; v_y = 0 \quad (31)$$

A la salida:

Se selecciona por defecto el “*out flow boundary condition*” en Fluent, en donde se asume como cero una difusión en el flujo para todas las variables, en donde:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0; \frac{\partial v_y}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

La geometría empleada como volumen de control se puede detallar en la Figura 23, en donde se dividió en segmentos independientes para permitir especificar la cantidad adecuada de elementos cuadriláteros.

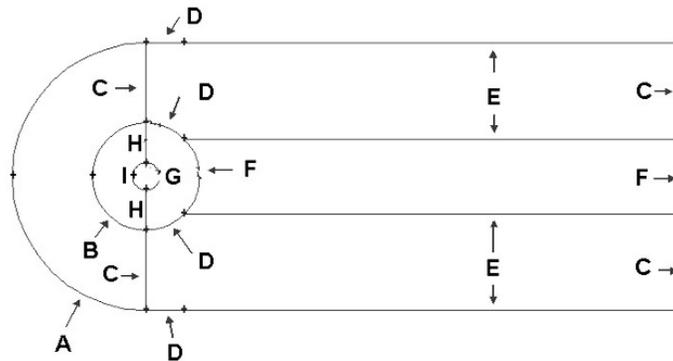


Figura 23. Geometría del dominio de estudio.

Con diferentes refinamientos como se verá a continuación, se obtuvieron resultados tales que permitieron la selección de la malla más adecuada para ser empleada en las próximas simulaciones.

Primero se empleó una malla normal o “*malla base*”, idéntica a la descrita en Cornell<sup>18</sup>, la cual fue escalada con un factor de 1.5 tanto para aumentar el tamaño de refinamiento, como para disminuirlo. Los parámetros de la malla con sus respectivas especificaciones y etiquetas de acuerdo a la Figura 23 pueden verse en el ANEXO (2), Tabla 30.

Se puede observar en la Tabla 2, los valores del coeficiente de arrastre de otros autores que servirán para corroborar los resultados obtenidos en las simulaciones. Los resultados evaluados con los diferentes refinamientos de malla serán mostrados en la Tabla 3, en donde se aprecia la diferencia respecto al documento seleccionado para la validación.

Tabla 2. Valores de referencia.

Autores	Re = 40		
	L	$\Theta$	$C_D$
Tritton	-	-	1,48
Coutanceau and Bouard	1,89	52,8	-
Fornberg	2,24	-	1,5
Dennis and Chang	2,35	53,8	1,52
Calhoun	2,18	54,2	1,62

Se empleó el valor de  $C_D = 1,62$  de la Tabla 2, debido a que ha sido empleado por otros autores en casos de estudios similares al actual realizado descritos en el estado del arte; además dentro de éste documento, el autor muestra que el valor de  $C_D$  tuvo el mínimo error numérico gracias a un código computacional especial empleado para este caso (Calhoun, 2002). A continuación se muestran los resultados evaluados por las tres mallas refinadas, con su respectiva diferencia al valor de *Calhoun*.

Tabla 3. Resultados y diferencia entre las mallas.

Tipo de Malla	Gruesa	Media	Refinada
Coficiente de arrastre ( $C_d$ )	1,7321	1,71824	1,7122
Diferencia con documento de validación (%)	6,920	6,064	5,691

<sup>18</sup>Steady flow past a cylinder [Última fecha de consulta: 12 de febrero de 2014] Disponible en: <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Steady+Flow+Past+a+Cylinder+-+Step+7>

De lo anterior se puede observar que a medida que existe un refinamiento mayor para la malla se disminuye la diferencia con el valor de referencia; sin embargo un mayor refinamiento puede significar un mayor tiempo de cómputo para cada una de las simulaciones, por lo que se decidió emplear una malla media o “normal” para proseguir con las simulaciones transitorias sin sacrificar tiempo de computo. Además, se puede apreciar que el coeficiente de arrastre en bidimensional ( $C_d$ ) mostrado en la Tabla 3 se aproxima considerablemente al coeficiente de arrastre tridimensional ( $C_D$ ) para un cilindro circular, según lo descrito en el estado del arte.

Las características generales de la malla normal pueden apreciarse en la Tabla 31 del ANEXO (2).

### 3.2 Independencia de los pasos temporales: *Time Steps*

Una vez obtenida la independencia de malla, se prosiguió con la independencia de los *Time Steps* para fenómenos transitorios, bajo la dependencia del número de Strouhal.

Este número adimensional antes mencionado sirve de ayuda para determinar la coherencia de los resultados mediante la variación de los mismos respecto a cierto número de pasos temporales bajo los cuales se simuló el fenómeno.

Para este proyecto, se encontró un valor teórico del número de Strouhal mediante la expresión planteada por *Williamson* (Williamson & Brown, 1998), que presenta una serie que relaciona el número de Reynolds y el de Strouhal mediante una serie de la forma:

$$St = A + \frac{B}{\sqrt{Re}} + \frac{C}{\sqrt{Re}} \quad (33)$$

En donde:

$$\begin{aligned} A &= 0,285 \\ B &= -1,3897 \\ C &= 1,8061 \end{aligned}$$

$$St = 0,285 + \frac{-1,3897}{\sqrt{150}} + \frac{1,8061}{150} \quad (34)$$

$$St = 0,183 \quad (35)$$

La anterior expresión es válida para valores de Reynolds entre 47 y 180. Es posible trabajar y emplear esta serie para calcular valores de Strouhal con Reynolds superiores, hasta de  $Re=600$ , sin embargo el autor enuncia que no se asegurará entonces que cumpla con una desviación estándar de  $\epsilon=0,0002$ .

Como los parámetros de la Tabla 1 están planteados para un Reynolds de 40, se hace necesario emplear los parámetros generales de la Tabla 4 para incrementar dicho número hasta un valor de 150.

Tabla 4. Parámetros generales

<p><b>Re = 150</b></p> 	<p><math>\rho = 75 \text{ kg/m}^3</math></p> <p><math>U = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}</math></p> <p><math>D = 2\text{m}</math></p> <p><math>h = 14\text{m}</math></p> <p><math>\mu = 1 \text{ kg/ms}</math></p>
--	---

Con el número de Strouhal calculado, se procede a emplear la malla media para comprobar la independencia en los pasos temporales (*Time Steps*). Para cada desprendimiento de vórtices sobre la superficie cilíndrica se deben emplear entre 20 y 30 *Time Steps* para observar dicho fenómeno. Para este caso se empleó unos 25 *Time Steps*.

Ahora para calcular el tamaño del mismo se parte desde el número de Strouhal:

$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (36)$$

$$f = \frac{St \cdot U}{D} = \frac{0,183 \cdot 1}{2} = 0,0915 \text{ Hz} \quad (37)$$

Luego se calcula el periodo de desprendimiento de cada vórtice:

$$t = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,0915} = 10,93 \text{ seg.} \quad (38)$$

Ahora se podrá calcular el tamaño definitivo de cada *Time Step* como se había mencionado anteriormente:

$$\text{Tamaño Time Step} = \frac{10,93}{25} = 0,4372 \quad (39)$$

En la Tabla 5 se muestran los anteriores valores.

Tabla 5. Valores de referencia para la obtención del tamaño de time step.

St teórico	0,183
Frecuencia de desprendimiento teórica	0,0915 Hz
Periodo de un ciclo de desprendimiento	10,93 segundos
Pasos temporales por ciclo de desprendimiento	25
Tamaño del time step	0,4372 segundos

Para simplificación de cómputo se aproxima el tamaño del *Time Step* a un valor de 0,4 s para obtener los resultados del coeficiente de sustentación para un cilindro. Los valores empleados para esta simulación se muestran en la Tabla 4.

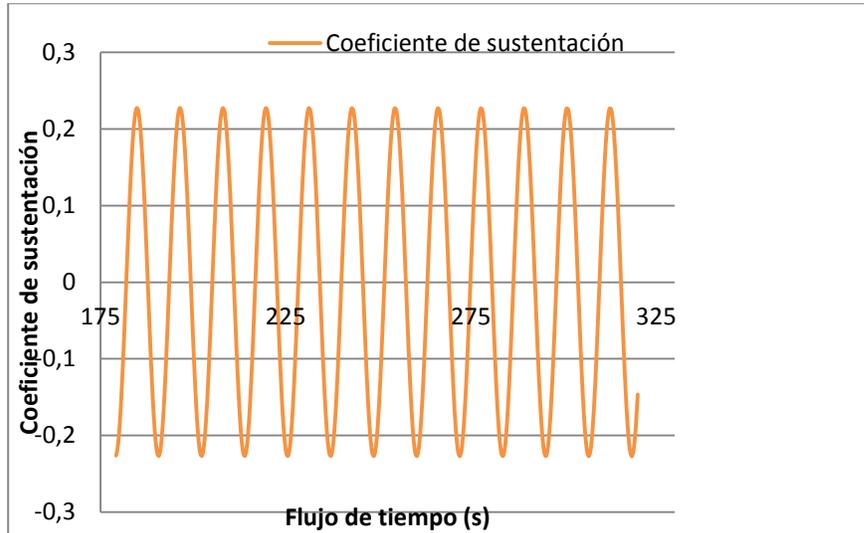


Figura 24. Coeficiente de sustentación, Time Step = 0,4.

La Figura 24 representa el comportamiento del coeficiente de sustentación del cilindro una vez se ha alcanzado la estabilidad transitoria.

Mediante los datos obtenidos, y los cuales fueron empleados para la Figura 24, se puede determinar que el valor de oscilación de la sustentación (el cual infiere un desprendimiento de vórtice) estaría cercano a los 12 segundos aproximadamente (11,7 segundos exactamente).

Con este periodo de desprendimiento experimental es posible calcular el valor del número de Strouhal experimental:

$$St = \frac{1/t*D}{u} = \frac{1/11,7*2}{1} = 0,17094 \quad (40)$$

A continuación se presenta en la Tabla 6 los valores teóricos y experimentales del Número de Strouhal.

Tabla 6. Diferencia entre valor teórico y experimental para tamaño de *time step* de 0,4.

Número de Strouhal (Teórico)	Número de Strouhal (Exp)	% De error
0,183	0,17094	6,59

Si bien la diferencia fue de un 6,59%, es un error mínimo si se tiene en cuenta que el error truncado generado por los programas de CFD al resolver este tipo de fenómenos por lo general puede ser más elevado. Además, debe tenerse en cuenta que el error pudo deberse al asumir un valor de 0,4 s para el tamaño de *Time Step*, y aunque la diferencia es muy poca, es claro que en el estudio de fenómenos transitorios pequeños parámetros pueden cambiar en gran medida el resultado final.

Teniendo en cuenta lo anterior, se estudió de igual manera los resultados a diferentes tamaños de *Time Steps* [Mostrados en la Tabla 7], los cuales arrojaron diferentes valores de número de Strouhal como se puede ver a continuación y cuyos comportamientos se pueden apreciar en las Figuras 25 y 26.

Tabla 7. Diferencia porcentual del número de Strouhal de diferentes tamaños de *time step*.

Tamaño de <i>time step</i>	Número de Strouhal (Teórico)	Número de Strouhal (Exp)	% De error respecto al <i>time step</i> de 0,4	% De error respecto al número de st. Teórico
0,4	0,183	0,17094	0	6,59
0,2	0,183	0,18390	7,58	0,492
0,1	0,183	0,1886	10,33	3,1

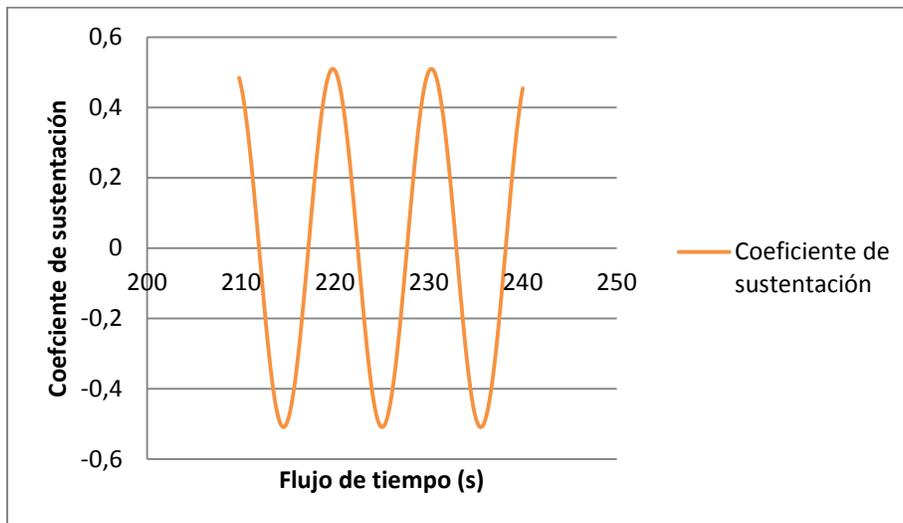


Figura 25. Coeficiente de sustentación, Time Step = 0,1.

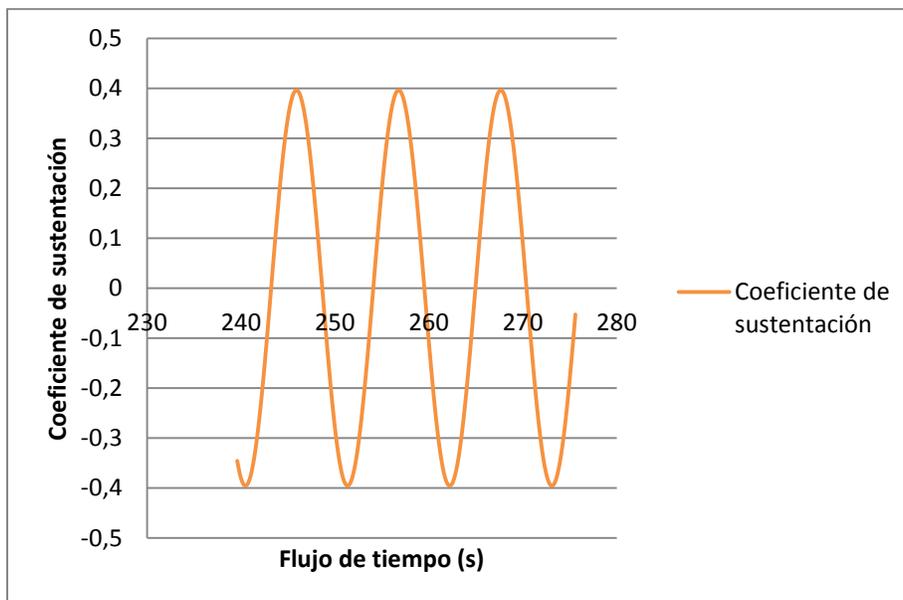


Figura 26. Coeficiente de sustentación, Time Step = 0,2.

Es evidente que una simulación con un tamaño de Time Step de 0,2 dará como resultado un porcentaje de error del 0,492% respecto al  $St$  teórico, lo cual significa un error casi despreciable. Este valor será tomado para realizar las simulaciones y determinar las configuraciones adecuadas para el diseño conceptual del micro-generator.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Simulaciones 1:

A partir de la información obtenida en la validación, se llevaron a cabo las simulaciones correspondientes en donde se muestren los arreglos más idóneos para un micro-generador piezoeléctrico con base en cilindros circulares. Las condiciones iniciales empleadas fueron las mismas descritas de la Tabla 4 para mantener las simulaciones dentro del número de Reynolds validado.

Dentro del documento con el cual se comparó el coeficiente de arrastre (Calhoun, 2002) el autor afirma que en general cuando se estudia regímenes entre  $40 \leq Re \leq 600$  el comportamiento del fluido sobre un cilindro tiende a permanecer similar, lo que quiere decir que un  $Re=150$  podría mostrar la tendencia del arreglo, mas esto no se asegura completamente, por lo cual si se trabajase a diferentes Reynolds habría que validar dicha metodología nuevamente, de acuerdo a lo que se realizó en el capítulo anterior.

Se tuvo en cuenta lo mencionado por (Gu & Sun, 1999), y (Hobbs & Hu, 2012) en el estado del arte, en donde se evaluaron diferentes tipos de arreglos geométricos. En éstos, se propusieron tres tipos de configuraciones, las cuales fueron simuladas en este proyecto para determinar la más idónea: Lineal, escalonada a  $15^\circ$  y escalonada a  $30^\circ$ . Además se empleó una relación de P/D inicial de 3,3 de acuerdo a lo establecido en el caso de estudio de los 4 cilindros en línea.

El término P/D enmarca la distancia de separación entre centro y centro de cada cilindro, sobre el diámetro del mismo, con esto se pretende tener cierta libertad de dimensionamiento final del micro-generador, siempre y cuando se mantenga dicha relación.

Dentro de cada simulación se buscó observar el comportamiento del coeficiente de sustentación máximo de cada cilindro para observar posteriormente el arreglo con mayor amplitud y con buena estabilidad en su oscilación (comportamiento senoidal continuo), siendo esta última característica la más buscada para el diseño.

Las figuras correspondientes del coeficiente de sustentación y la magnitud de vorticidad de cada cilindro para un arreglo determinado pueden apreciarse en el ANEXO (3). En este capítulo solo se mostraran los resultados relevantes agrupados en las tablas 8 y 9, al igual que el contorno de presión de cada configuración. Sin embargo se comentará a continuación un poco del comportamiento de cada una.

- Configuración lineal,  $P/D=3,3$ :

Las Figuras 60 y 61 del ANEXO (3) muestran que el cilindro ubicado aguas abajo tendrá una respuesta oscilatoria más fuerte que el cilindro ubicado aguas arriba. Además en la Figura 27 se puede apreciar el contorno de presión; sin embargo, esta última no indica información completa alguna, debido a que el fenómeno es transitorio; por esto se hace de vital importancia las Figuras 60 y 61 para observar los coeficientes en el tiempo.

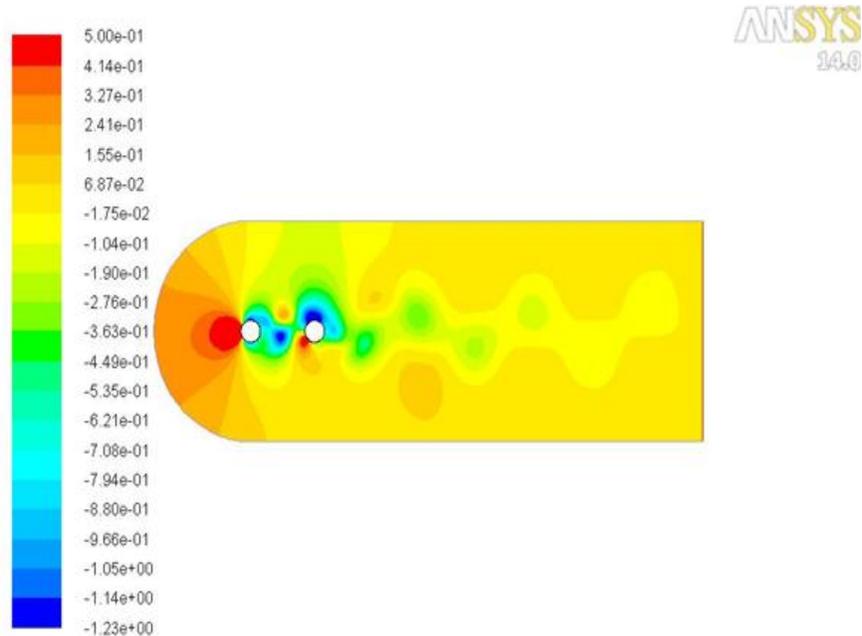


Figura 27. Contorno de presiones; configuración lineal.

- Configuración escalonada a  $15^\circ$ ,  $P/D=3,3$ :

Las Figuras 63 y 64 del ANEXO (3) muestran que el cilindro ubicado aguas abajo produce una oscilación máxima aproximadamente a los 20 segundos, en donde los diferentes gradientes de presiones que actúan sobre éste igualmente afectan el desprendimiento del cilindro aguas arriba. De esta manera se observa en la Figura 28 que el desprendimiento de la capa límite del cilindro 1 se atenúa consecuentemente.

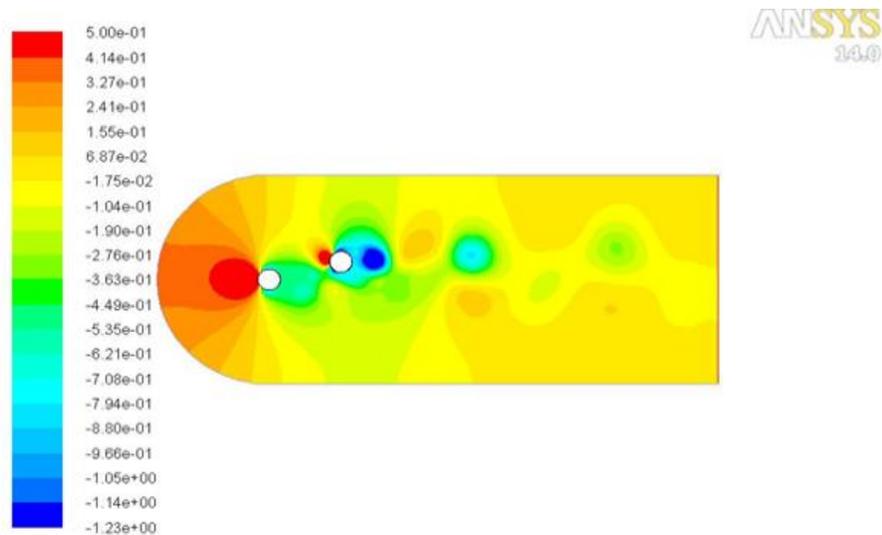


Figura 28. Contorno de presiones; configuración escalonada 15°.

- Configuración escalonada a 30°, P/D=3,3:

La Figura 66 y 67 del ANEXO (3) muestra un comportamiento que se amortigua conforme transcurre el tiempo, esto es más evidente cuando el cilindro aguas arriba deja de producir el camino de los vórtices de Von Kármán, debiéndose a la perturbación ocasionada por el segundo cilindro sobre el fluido. Además de lo anterior mencionado, existen desestabilizaciones como se pueden apreciar en el contorno de presiones de la Figura 29 Esta configuración al parecer presenta un comportamiento oscilatorio difícil de predecir en el tiempo.

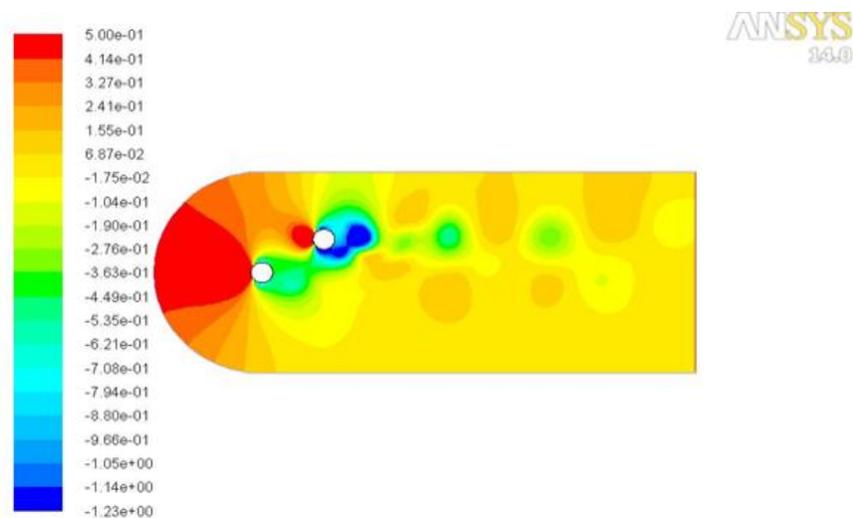


Figura 29. Contorno de presiones; configuración escalonada 30°.

Todo lo anterior mencionado se puede resumir en las Tablas 8 y 9, en las cuales se hace más clara la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla 8. Resultados obtenidos con una relación  $P/D=3,3$  a  $Re=150$ .

Configuración	Coeficiente máximo de sustentación		Tiempo de estabilización oscilatoria [segundos]		Frecuencia de oscilación [Hz]	
	Cilindro1	Cilindro2	Cilindro1	Cilindro2	Cilindro 1	Cilindro2
Lineal	0,6	1,82	25	29	0,0781	0,07936
Escalonada 15°	0,45	1,21	94	83,8	0,0694	0,0711
Escalonada 30°	0,35	1,17	82	46	0,1092	0,0869

Tabla 9. % de incremento del coeficiente de sustentación máximo con una relación  $P/D=3,3$  a  $Re=150$ , en comparación con  $C_l=0,4$ .

Configuración	Incremento del coeficiente de sustentación máximo en relación con un solo cilindro [%]	
	Cilindro1	Cilindro2
Lineal	50	355
Escalonada 15°	12,5	202,5
Escalonada 30°	-12,5	192,5

De acuerdo a lo planteado en el estado del arte y resultados que se obtuvieron hasta el momento, una configuración escalonada no es adecuada cuando el flujo es a tan bajo número de Reynolds a pesar de que la frecuencia de oscilación este cercana a los valores del arreglo lineal, la cual posee un mayor coeficiente de sustentación máximo y un menor tiempo de estabilización oscilatoria.

#### 4.2 Simulaciones 2:

Las siguientes experimentaciones consistieron en el análisis de cuatro tipos de arreglos lineales con diferentes cantidades de cilindros, las cuales fueron simuladas de manera bidimensional como lo planteado hasta el momento en las simulaciones anteriores, siguiendo de igual manera las condiciones iniciales planteadas en la Tabla 4.

Mediante Fluent se evaluó el coeficiente de sustentación de cada cilindro de forma individual y a partir de esto se analizó la influencia de la proximidad de los mismos:

Tabla 10. Configuraciones simuladas bidimensionalmente mediante Fluent.

<b>Configuración</b>	<b>N° de cilindros</b>	<b>Relación P/D</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	2,0
		2,5
		3,3
		4,0
<b>2</b>	<b>3</b>	2,0
		2,5
		3,3
		4,0
<b>3</b>	<b>4</b>	2,0
		2,5
		3,3
		4,0

Con base en la Tabla 10 se obtuvieron los resultados que a continuación se muestran de acuerdo a la relación P/D. El coeficiente de sustentación de cada cilindro y los contornos de vorticidad se especifican en el ANEXO (4).

A continuación se muestran los coeficientes de sustentación de cada cilindro dentro del arreglo, para detallar de mejor manera el comportamiento de las fuerzas que actúan sobre los cilindros y en donde influye la proximidad de los cuerpos, la cual puede ser observada en los contornos de presiones de cada caso. Posterior a estos resultados, se resumen en las Tablas 11, 12 y 13 los parámetros más importantes que se tendrán en cuenta en el análisis para la selección de la configuración del micro-generador. Se colocaron valores nulos [-] en los arreglos que presentaron comportamientos subamortiguados, ya fuera porque los coeficientes no alcanzaron a estabilizarse en el tiempo estipulado para las simulaciones, o debido a que la frecuencia no permanecía constante sino que cambiaba a lo largo del tiempo.

El término [N/A] fue colocado para indicar que dichos elementos no aplicaban para una relación P/D específica.

Los valores en rojo destacarán los términos más relevantes de cada columna, en comparación con los demás cilindros correspondientes. De esta manera se espera mejorar la comprensión de los resultados.

### Configuración 1:

- $P/D = 2$

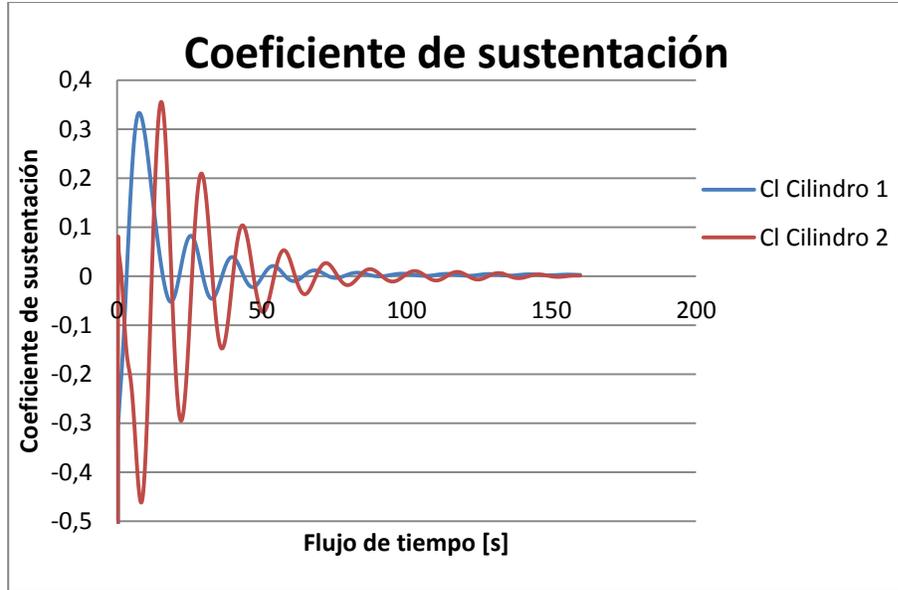


Figura 30. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2$ ; 2 cilindros.

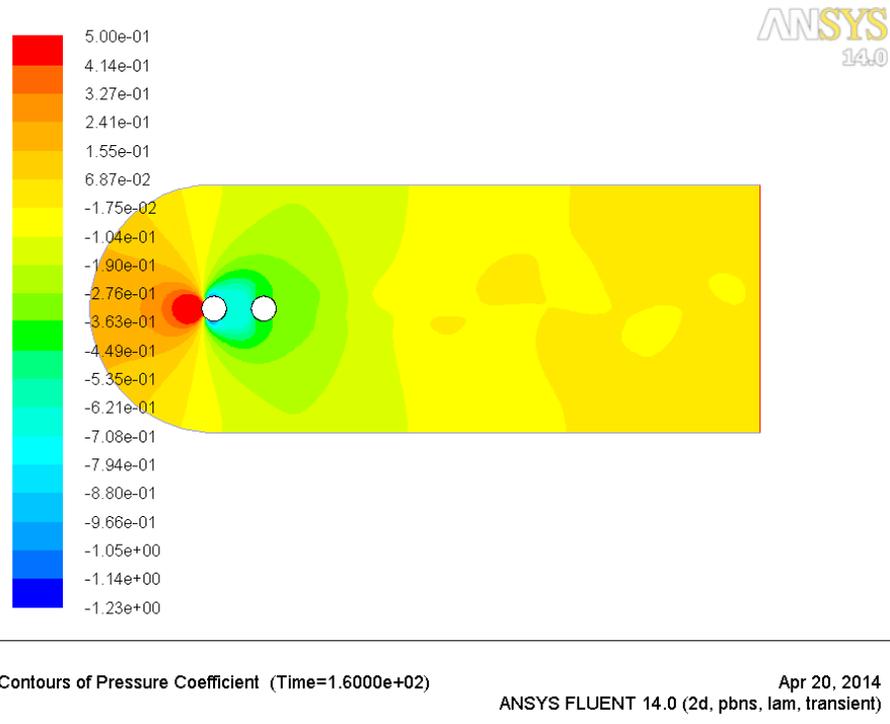


Figura 31. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2$ .

- $P/D = 2,5$

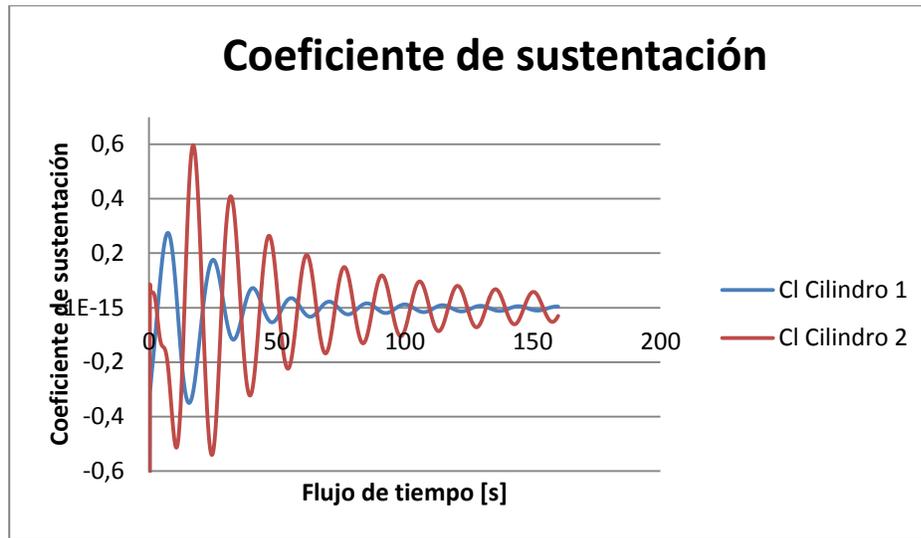


Figura 32. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2,5$ ; 2 cilindros.

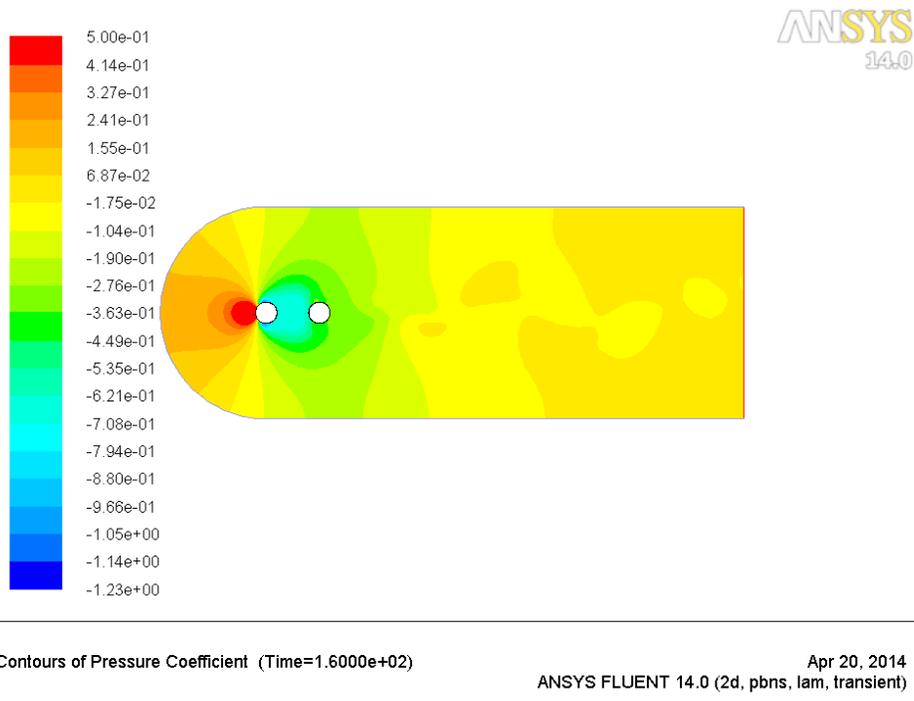


Figura 33. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2,5$ .

- $P/D = 3,3$

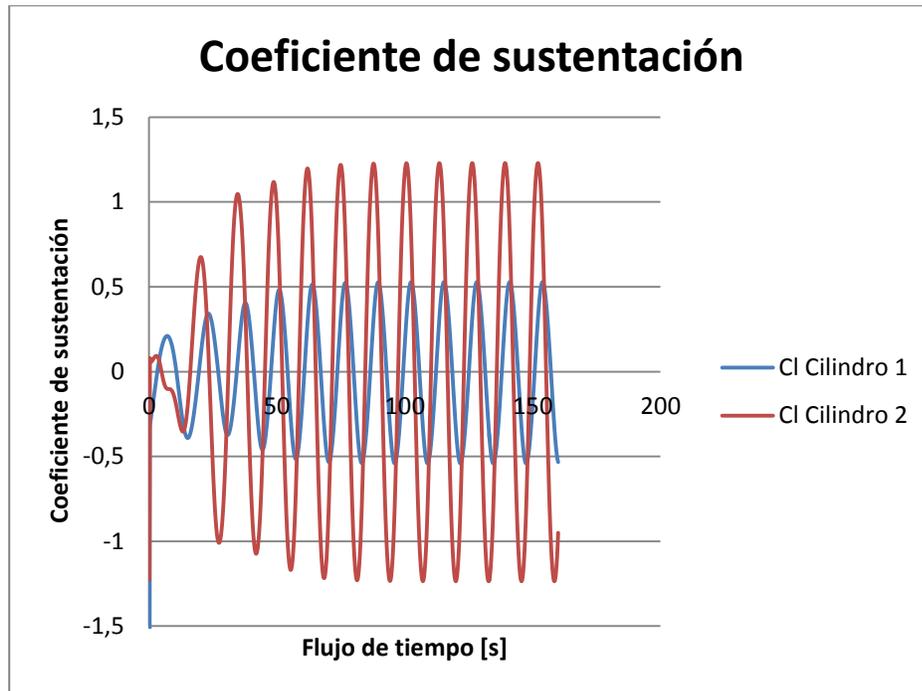


Figura 34. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D=3,3$ ; 2 cilindros.

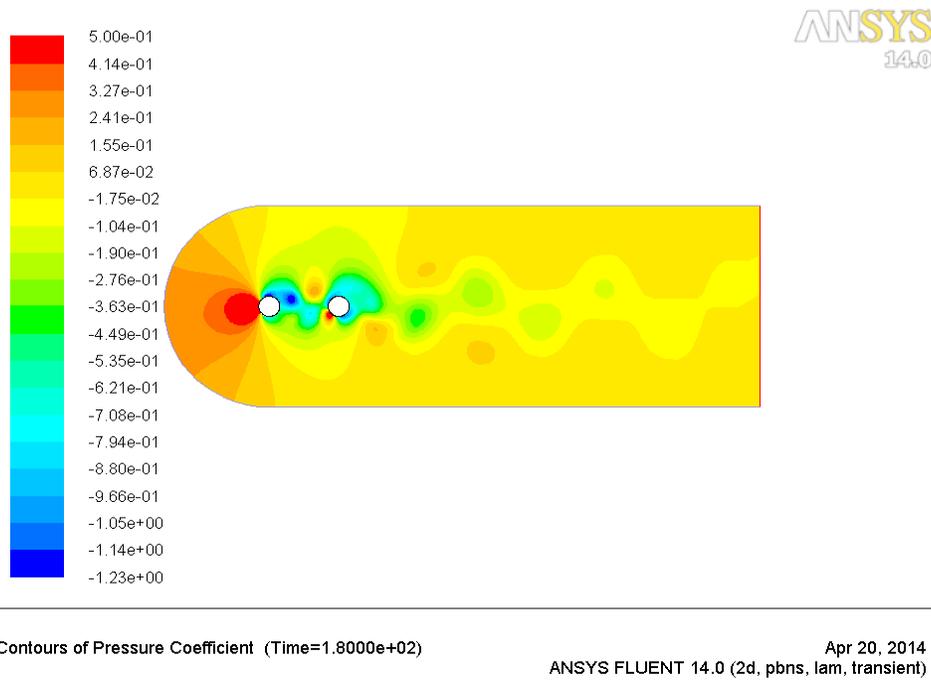


Figura 35. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=3,3$ .

- $P/D = 4$

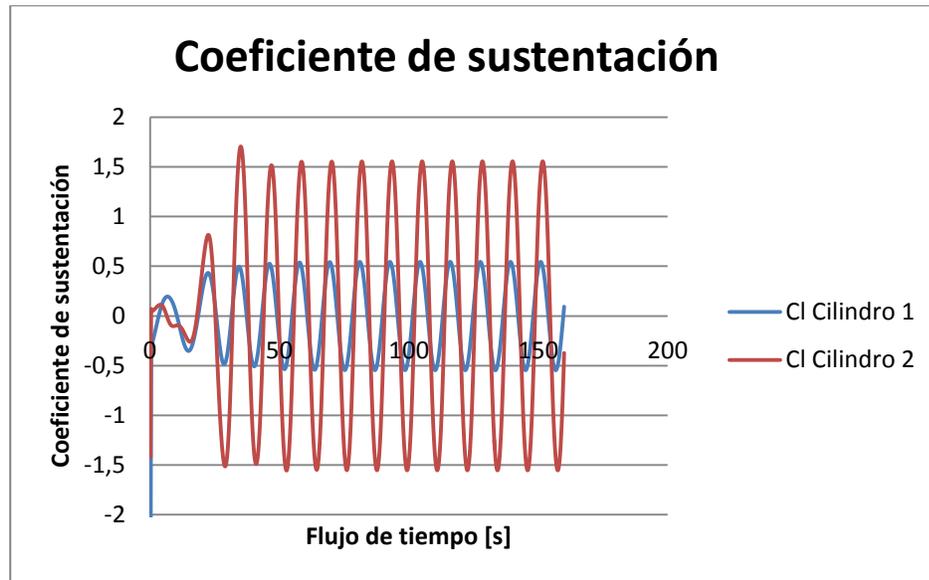


Figura 36. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D=4$ ; 2 cilindros.

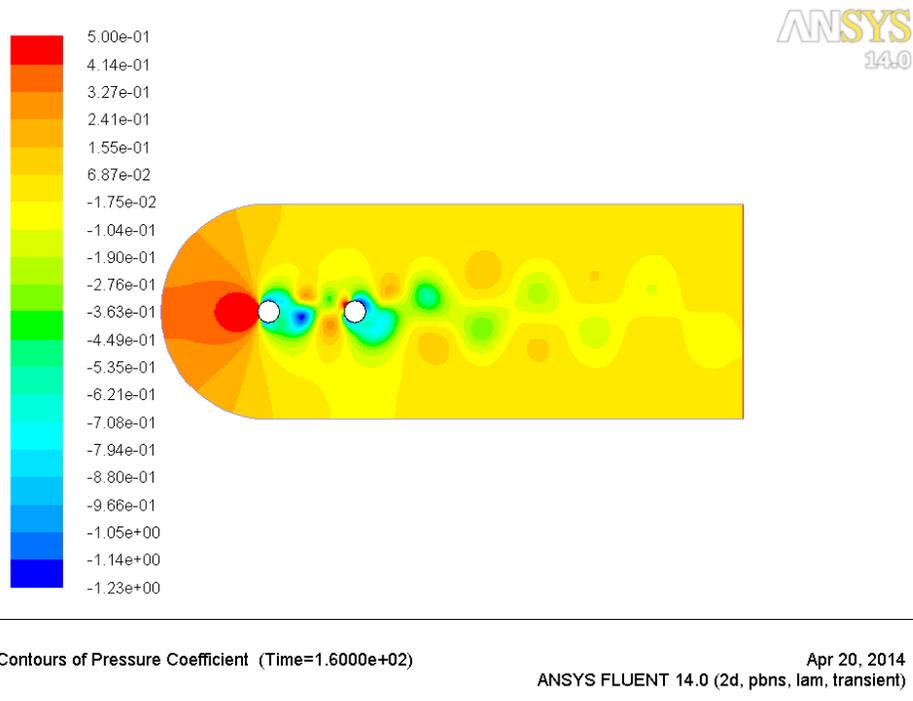


Figura 37. Contorno de presiones; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=4$ .

## Configuración 2:

- $P/D = 2$

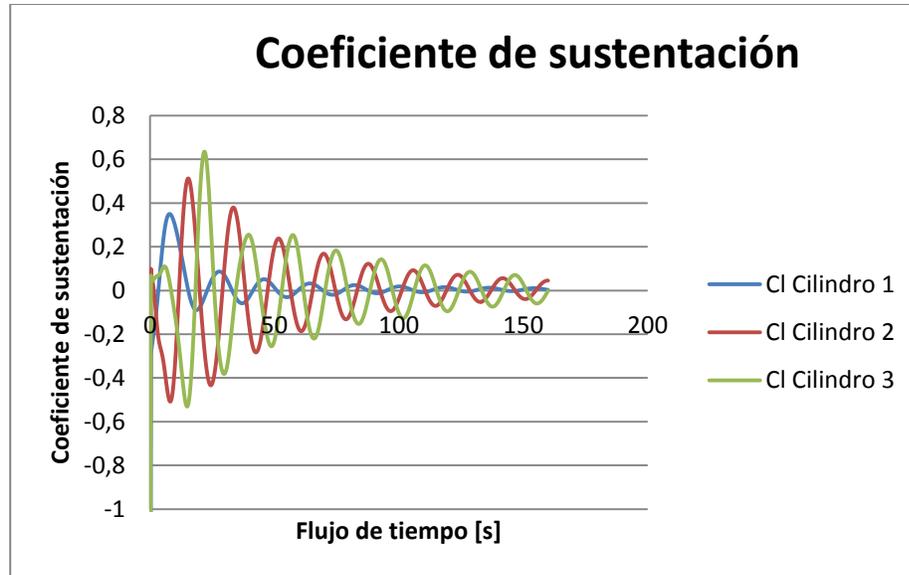


Figura 38. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2$ ; 3 cilindros.

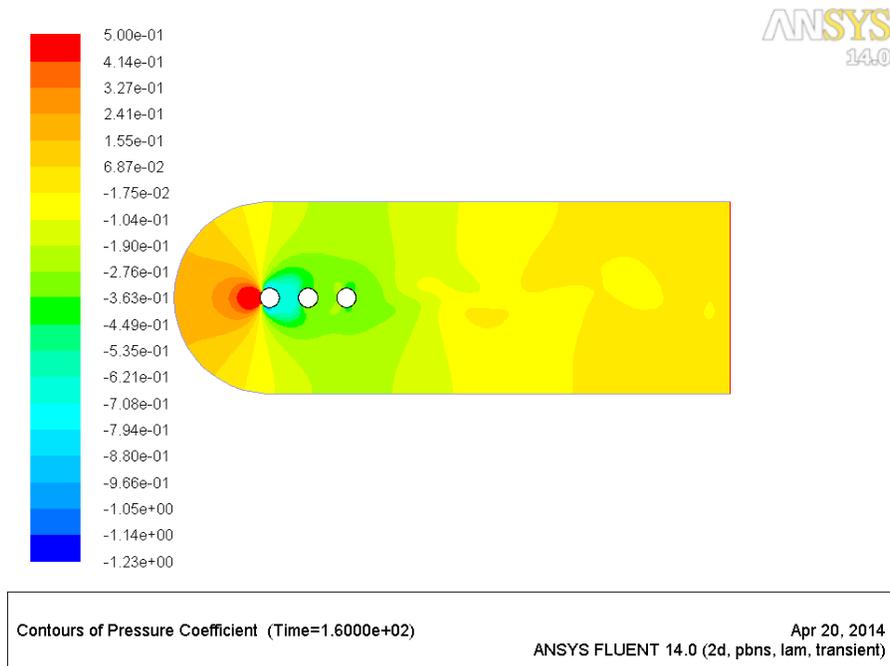


Figura 39. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

- $P/D = 2,5$

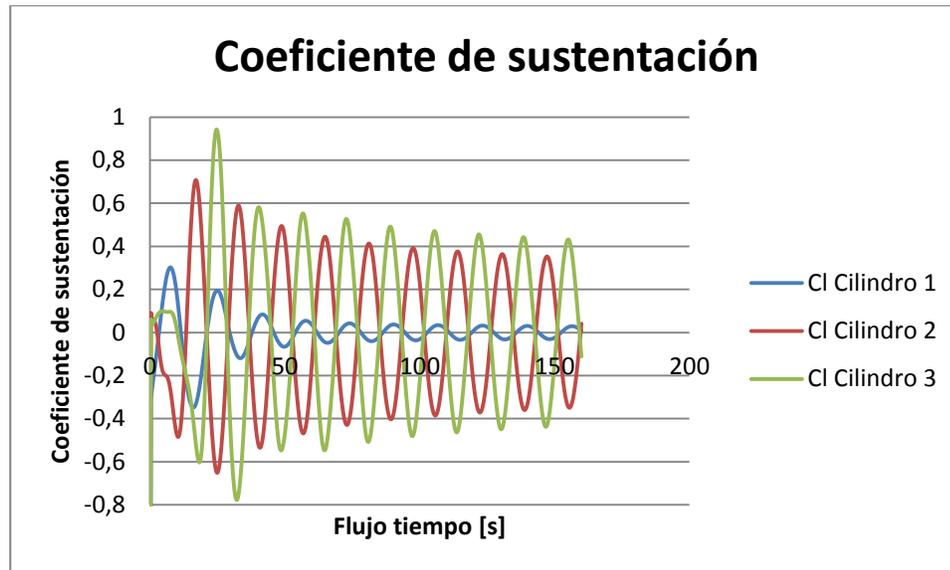
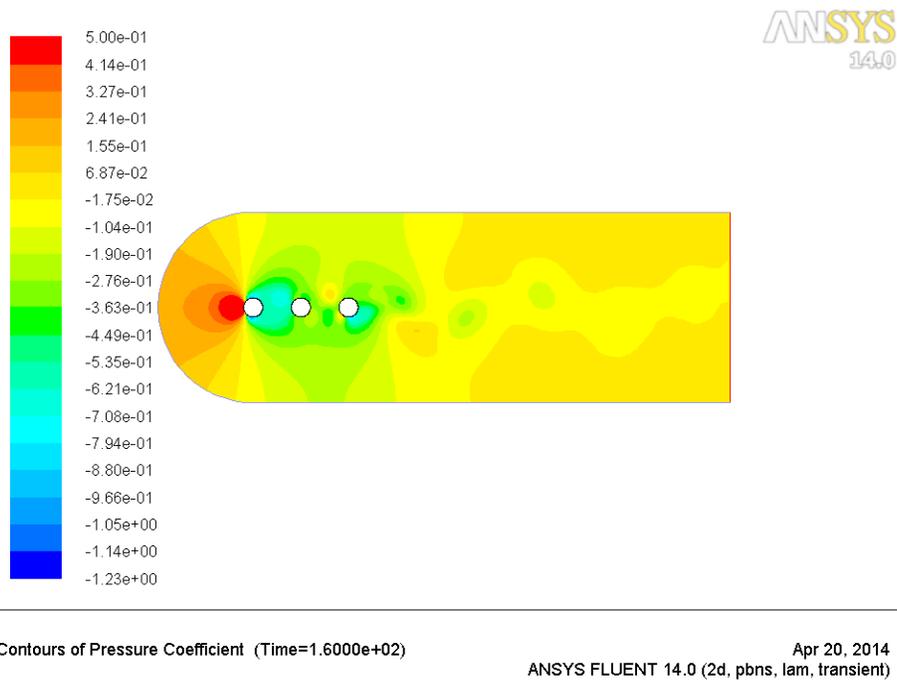


Figura 40. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2,5$ ; 3 cilindros.



Contours of Pressure Coefficient (Time=1.6000e+02) Apr 20, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 41. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2,5$ .

- $P/D = 3,3$

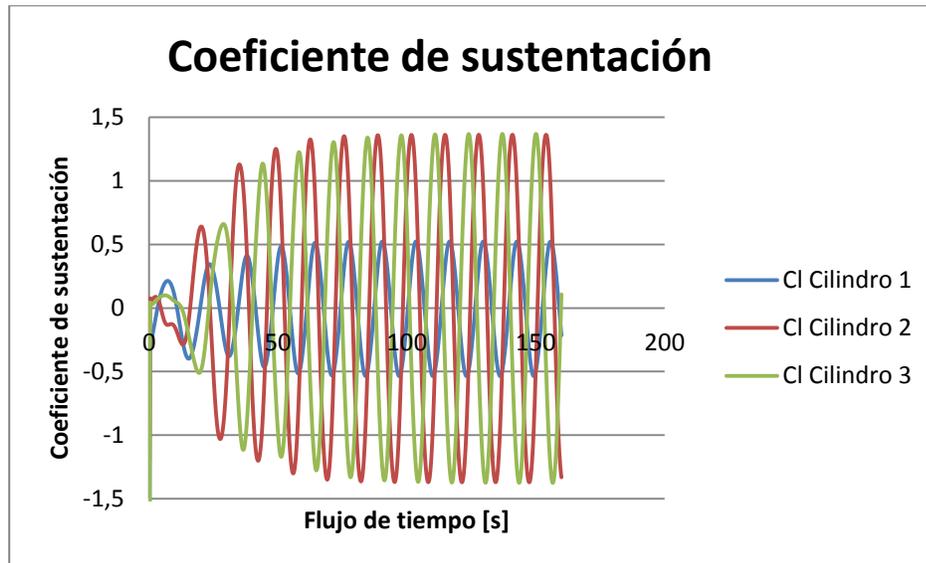


Figura 42. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 3,3$ ; 3 cilindros.

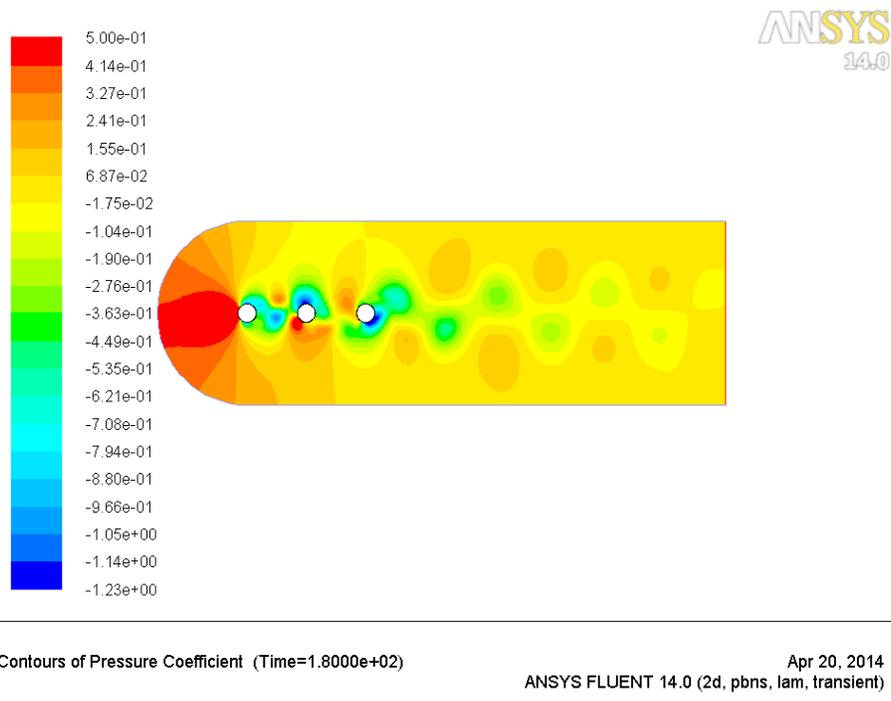


Figura 43. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

- $P/D = 4$

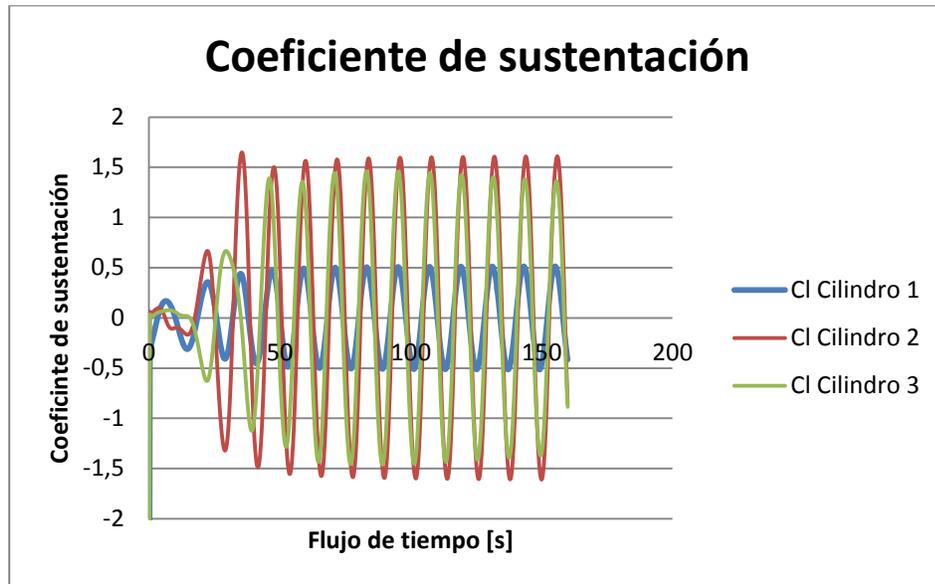
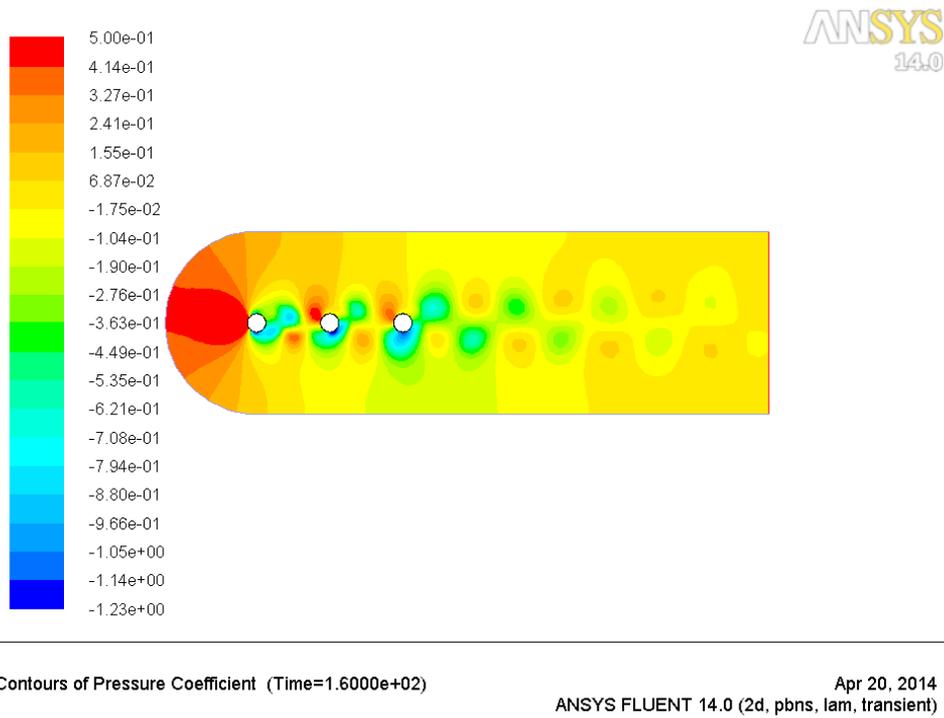


Figura 44. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 4$ ; 3 cilindros.



Contours of Pressure Coefficient (Time=1.6000e+02) Apr 20, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 45. Contorno de presiones; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

### Configuración 3:

- $P/D = 2$

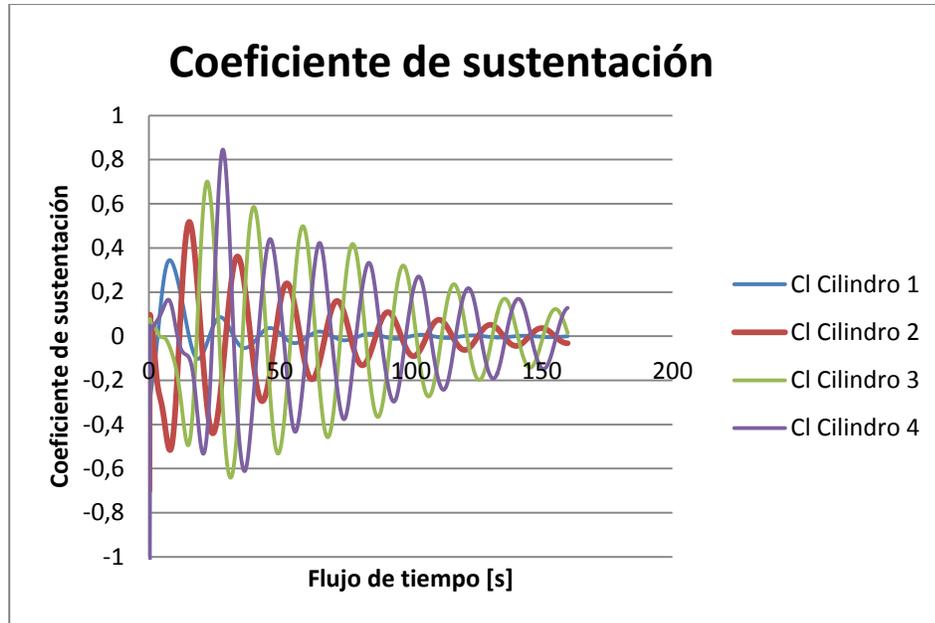


Figura 46. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2$ ; 4 cilindros.

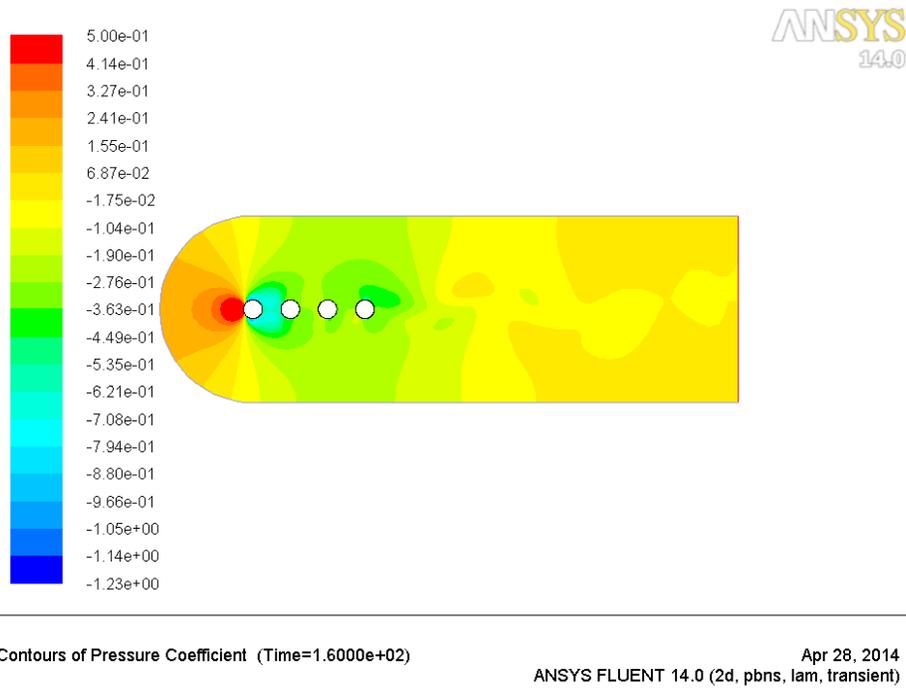


Figura 47. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

- $P/D = 2,5$

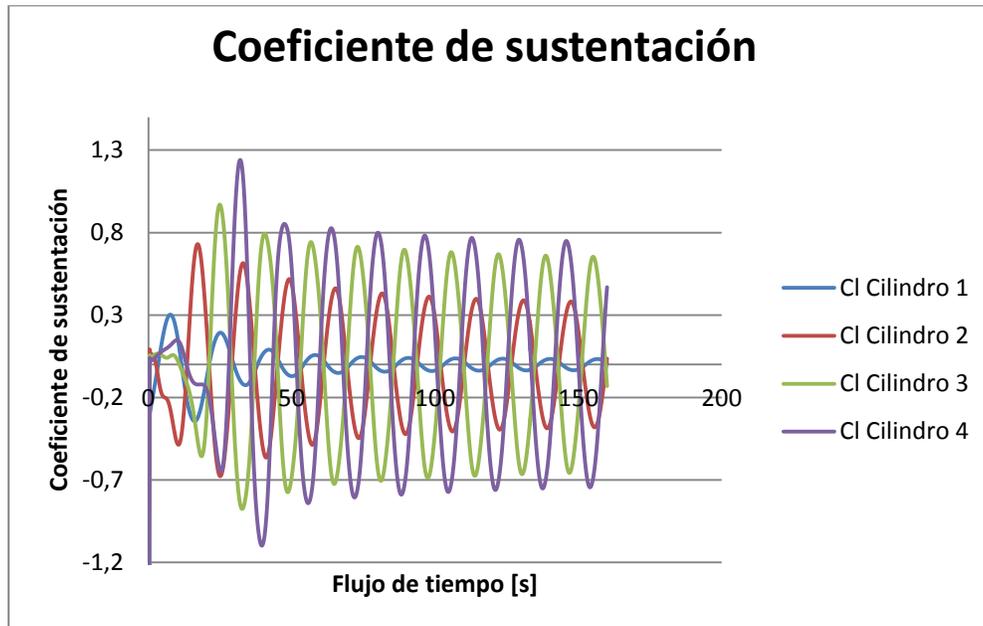


Figura 48. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 2,5$ ; 4 cilindros.

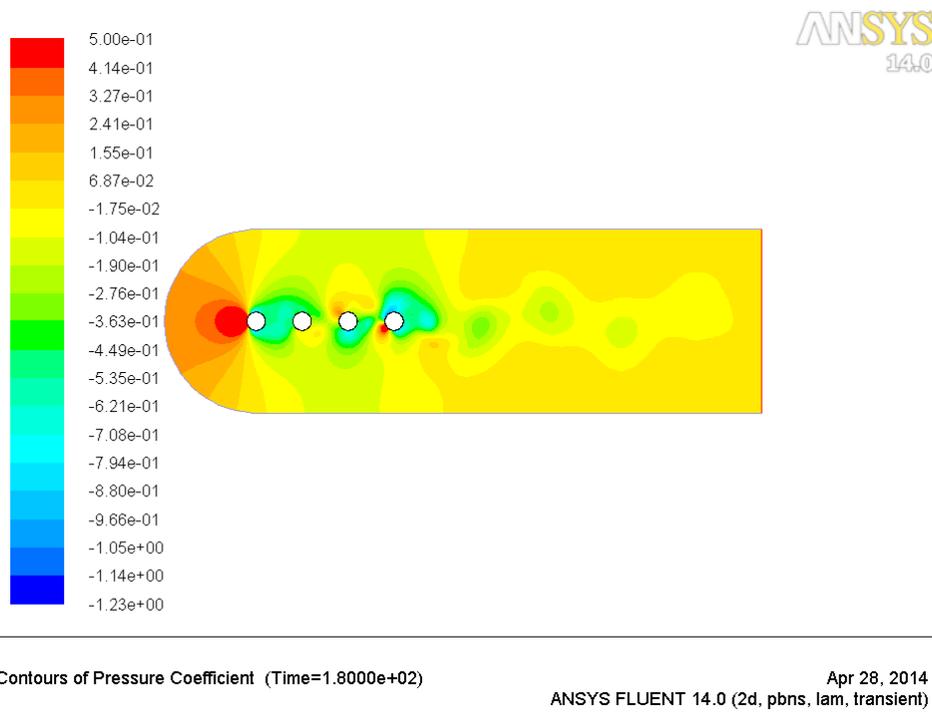


Figura 49. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

- $P/D = 3,3$

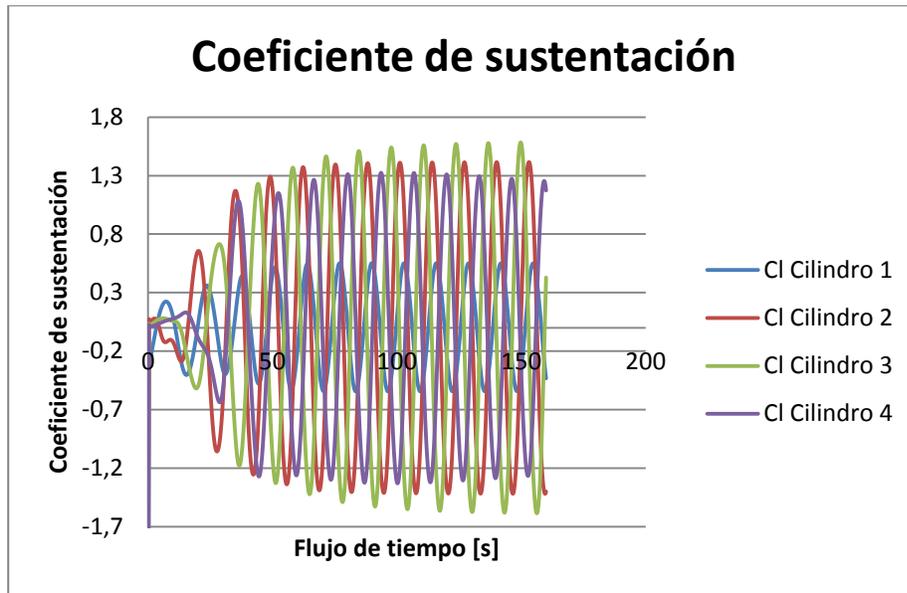
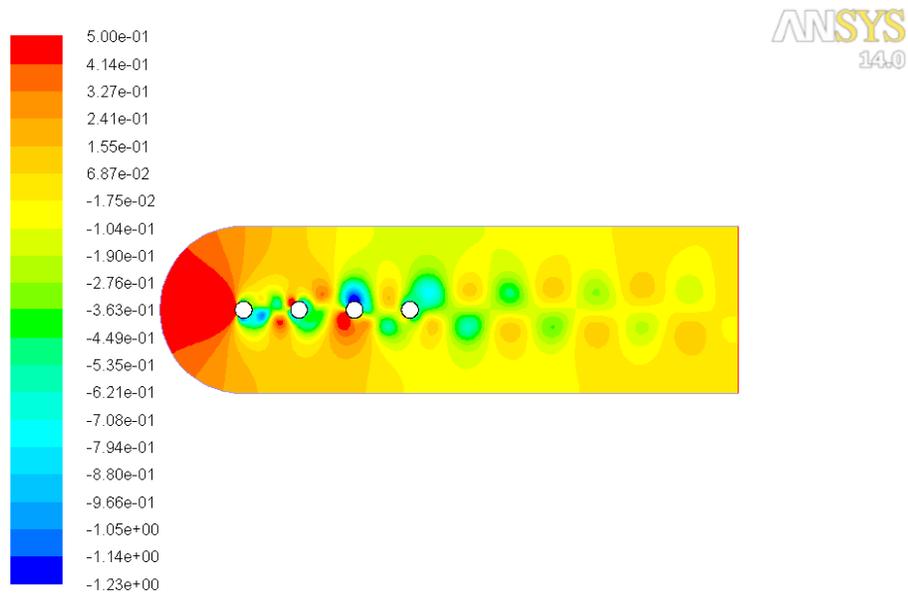


Figura 50. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 3,3$ ; 4 cilindros.



Contours of Pressure Coefficient (Time=3.8280e+02)

Apr 28, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 51. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

- $P/D = 4$

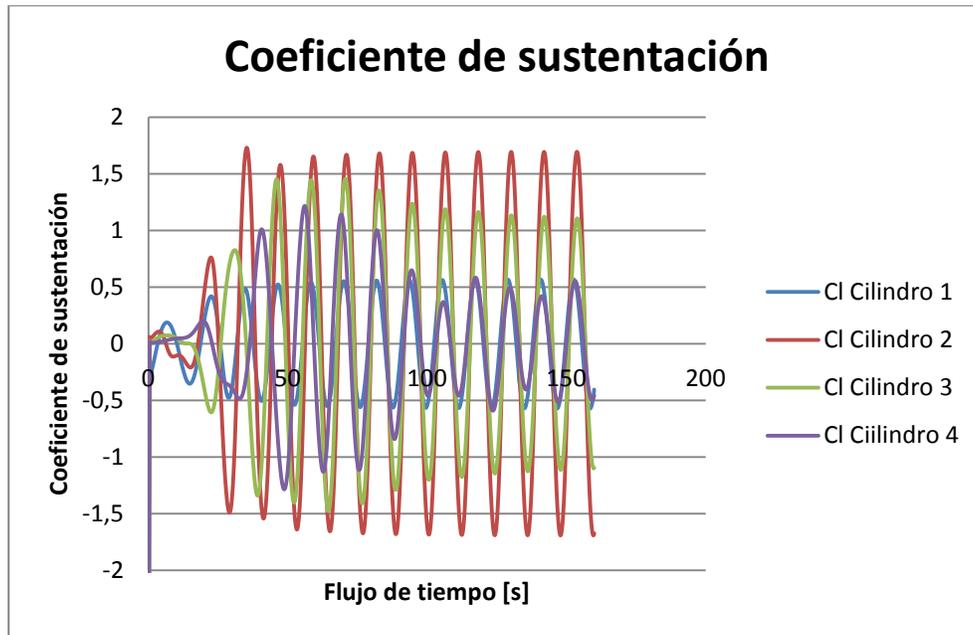


Figura 52. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 4$ ; 4 cilindros.

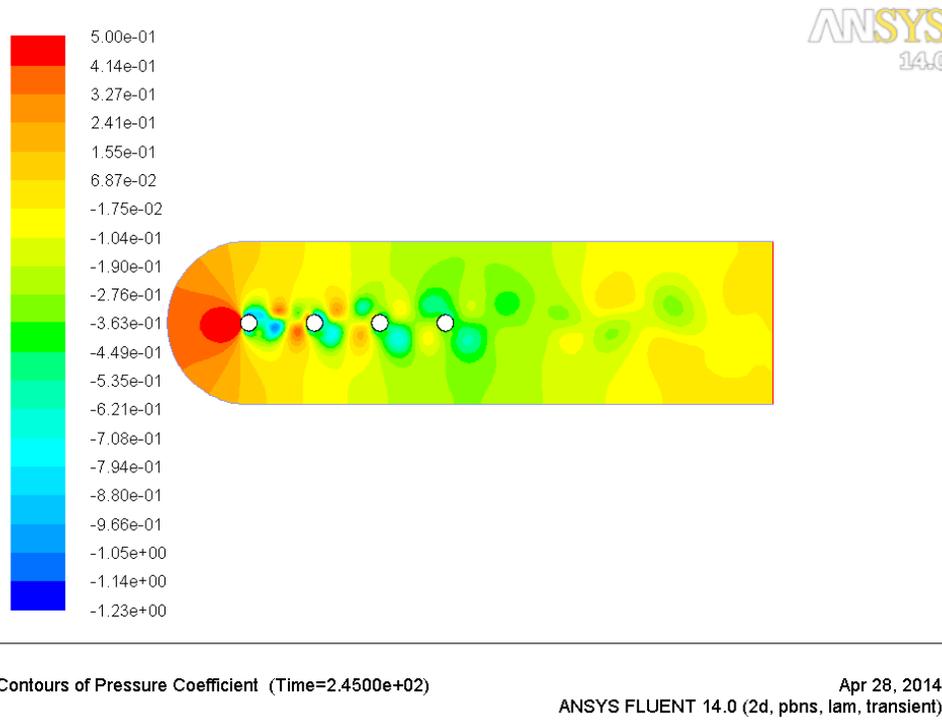


Figura 53. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

Tabla 11. Coeficientes de sustentación máximos evaluados.

Configuración	Relación P/D	Coeficiente máximo de sustentación			
		Cilindro1	Cilindro2	Cilindro3	Cilindro4
1	2	0,3	0,43	N/A	N/A
	2,5	0,35	0,5675	N/A	N/A
	3,3	0,45	1,16	N/A	N/A
	4	0,57	1,63	N/A	N/A
2	2	0,31	0,47	0,61	N/A
	2,5	0,261	0,681	0,898	N/A
	3,3	0,58	1,306	1,316	N/A
	4	0,55	1,645	1,44	N/A
3	2	0,305	0,474	0,64	0,79
	2,5	0,26	0,67	0,91	1,17
	3,3	0,495	1,46	1,51	1,26
	4	0,53	1,68	1,4	1,12

Tabla 12. Tiempo de estabilización oscilatoria evaluada.

Configuración	Relación P/D	Tiempo de estabilización oscilatoria [segundos]			
		Cilindro1	Cilindro2	Cilindro3	Cilindro4
1	2	-	-	N/A	N/A
	2,5	-	-	N/A	N/A
	3,3	59,4	61,4	N/A	N/A
	4	50,4	52	N/A	N/A
2	2	-	-	-	N/A
	2,5	-	-	-	N/A
	3,3	51,8	75,2	84,4	N/A
	4	43,2	59,2	64,4	N/A
3	2	-	-	-	-
	2,5	76	99	88,4	95
	3,3	39	61,6	84,2	72,6
	4	43,6	58,6	129,6	116,2

Tabla 13. Frecuencia de oscilación evaluada una vez alcanzada la estabilidad oscilatoria.

Configuración	Relación P/D	Frecuencia de oscilación [Hz]			
		Cilindro1	Cilindro2	Cilindro3	Cilindro4
1	2	-	-	N/A	N/A
	2,5	-	-	N/A	N/A
	3,3	0,0973	0,054	N/A	N/A
	4	0,1073	0,1073	N/A	N/A
2	2	-	-	-	N/A
	2,5	-	-	-	N/A
	3,3	0,0958	0,0958	0,0958	N/A
	4	0,1042	0,1042	0,1042	N/A
3	2	-	-	-	-
	2,5	0,061	0,06	0,0625	0,0619
	3,3	0,0869	0,077	0,076	0,061
	4	0,0909	0,094	0,0847	0,0833

En las tablas 11,12 y 13 se presentaron los valores máximos generados por cada cilindro en cuanto a sustentación, tiempo de estabilización y la frecuencia de oscilación una vez alcanzada la estabilidad ya que estos resultados son parte de fundamental del capítulo siguiente en el cual se realiza un análisis completo de los resultados obtenidos.

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A pesar que las figuras de los contornos anteriores nos muestran el desprendimiento de la capa límite sobre la estructura, los cuales provocan una oscilación que afecta directamente el comportamiento del cilindro aguas abajo, es necesario tener presente que se analiza un fenómeno transitorio, por lo que las figuras mostradas solo representan el momento exacto de la finalización de la simulación; para observar el cambio del contorno con el tiempo, sería necesario el empleo de herramientas visuales, o en forma de un video por ejemplo. Es por esto que se hace tan importante el coeficiente de sustentación, ya que nos brinda información sobre la distribución de fuerzas que ocurren en el cilindro a lo largo del tiempo.

A continuación se analizará cada configuración lineal de cilindros de manera separada:

### 5.1 Configuración 1:

Las Figuras 30 y 32 muestran un comportamiento subamortiguado, en donde las fuerzas ocasionadas por la presión sobre el cilindro son paulatinamente atenuadas conforme pasa el tiempo. Esto puede deberse en gran parte por la baja presión y la falta de circulación del flujo entre ambos cuerpos [Ver Figuras 31 y 33], lo que significaría que debido a la proximidad de ambos cilindros éstos se comportan como un solo cuerpo. De hecho, este comportamiento pareciera ser similar al cilindro en estado estacionario empleado en la validación debido a que no existe vorticidad generada por el cilindro aguas arriba que afecte al cilindro ubicado aguas abajo.

Por otro lado, las figuras 34 y 36 muestra un comportamiento oscilatorio en donde ambos cilindros de cada configuración P/D alcanzan su punto crítico, lo que conlleva a estabilizar la oscilación del flujo.

De igual manera, se puede observar en las Figuras 35 y 37, el instante que se genera una baja presión en la parte posterior del cilindro aguas arriba, produciendo una mayor presión en la parte contraria del cilindro aguas abajo, lo que significa que existe un gradiente de presión que gobierna el comportamiento del cilindro 2 a partir de la oscilación del cilindro 1, brindándole a éste una mayor amplitud de oscilación tanto para la relación P/D=3,3 como para 4. Estas últimas configuraciones por lo general han presentado comportamientos similares hasta el momento.

De hecho, la influencia de los cilindros aguas arriba es tal, que en las figuras 26 y 27 se evidencia una fluctuación al comienzo de las simulaciones, en donde las oscilaciones tratan de coincidir.

## **5.2 Configuración 2:**

Al igual que se mencionó antes para la configuración 1, cuando la relación P/D es de 2 y 2,5, existe un gradiente de presión entre los cuerpos que ayuda a la capa límite a mantenerse en gran medida adherida a la superficie de la geometría, lo cual evita que se genere algún tipo de vórtice.

Sin embargo, la oscilación del flujo representado por los coeficientes de sustentación de las Figuras 38 y 40, muestra una mayor amplitud para los cilindros ubicados aguas abajo, obteniendo valores más significativos que los vistos en las Figuras 34 y 36, llevándonos a pensar que existe el mismo comportamiento oscilatorio subamortiguado pero con un factor de amortiguamiento menor que el anterior.

Por otro lado, las Figuras 42 y 44 muestran un comportamiento oscilatorio en donde el coeficiente del cilindro 1 no se ve afectado en ningún momento por los arreglos establecidos; sin embargo este influye nuevamente en ambos cilindros aguas abajo, llevándolos a estabilizarse rápidamente. Al parecer existe una relación directa entre el incremento de la relación P/D y los coeficientes de sustentación de los cilindros 2 y 3 para ambos arreglos.

## **5.3 Configuración 3:**

La Figura 46 muestra que la oscilación del coeficiente del cilindro 3 y 4 es atenuada rápidamente por la oscilación del cilindro 1, lo que provoca que el sistema sea nuevamente subamortiguado.

Sin embargo, las oscilaciones del coeficiente de sustentación de la Figura 48 y el contorno de presión de la Figura 49 muestran que las oscilaciones de los cilindros 2, 3 y 4, le proporcionan estabilidad oscilatoria al cilindro 1, lo que demuestra por primera vez hasta este momento, que la cantidad de cilindros influye directamente en el comportamiento entre el fluido y la estructura, y aunque la relación P/D=2,5 estaba dominada por la influencia del cilindro 1 principalmente, es claro que ya no dependerá de éste.

Lo anterior quiere decir que ya no existe una dependencia del comportamiento del fluido según varíe la relación P/D, sino que depende en el incremento del número de cilindros.

Para la relación  $P/D=3,3$  de la Figura 50 se evidencian los coeficientes de sustentación de los cilindros 2,3 y 4, los cuales parecen ser similares tanto en frecuencia como en magnitud, además se puede ver que el comportamiento del cilindro 1 no se atenúa tan abruptamente como en la Figura 48 antes de alcanzar la estabilidad. Sin embargo el tiempo de estabilización oscilatoria es aproximadamente 39 segundos, lo cual podría significar un claro problema para este micro-generador, ya que no se puede asegurar jamás que por medios naturales se tenga una corriente de viento continua sin perturbación que impacte los cilindros durante tanto tiempo, antes de que la estructura comience a generar la potencia necesaria para el funcionamiento de algún sistema.

Por último, para la relación  $P/D=4$  en donde se puede observar en la Figura 52 que la oscilación del cilindro 2 parece haber sido armonizada con la oscilación del cilindro 1, lo cual en un rango mayor de Reynolds podría resultar en una entrada en resonancia y una posterior pérdida de la estructura.

Sin embargo, a pesar del comportamiento anterior, se puede evidenciar que la amplitud de oscilación del cilindro 3 disminuyó en comparación con la Figura 50. Esta última disminución en la amplitud de los cilindros aguas abajo es más visible en el cilindro 4, ya que tiende a igualar la magnitud del cilindro 1.

A pesar de que el análisis anterior muestre que un arreglo de 4 cilindros con una relación  $P/D= 3,3$  tenga el mejor tipo de comportamiento entre la interacción fluido-estructura, es necesario realizar una matriz de selección para asegurar cuantitativamente lo que se mencionó anteriormente de forma cualitativa.

#### **5.4 Matriz de selección:**

Para realizar esta selección, primero se definen las variables o parámetros más importantes a tener en cuenta para el diseño del micro-generador. Estos criterios que a continuación se muestran fueron establecidos por un análisis en el estado del arte, además de los resultados obtenidos hasta el momento:

- **Coefficiente de sustentación máximo (C.M):** Representa el mayor coeficiente de sustentación de una configuración y relación  $P/D$  determinada. Esto se puede traducir en la mayor amplitud que tenga cualquier cilindro en las figuras anteriormente analizadas. Este coeficiente está influenciado directamente por la geometría del cuerpo, las fuerzas medidas y los gradientes de presiones. Con este parámetro se puede analizar el comportamiento transitorio de la interacción entre el fluido y la estructura presente en el caso de estudio. Un coeficiente de sustentación máximo en la oscilación producirá una fuerza de deflexión mayor al material

transductor de energía, lo que quiere decir que producirá mayor voltaje, corriente y potencia.

- Estabilización de oscilación (E.O): Como se mencionó en el estado del arte, un comportamiento ideal en un material transductor es una oscilación senoidal, ya que aunque no produzca una deflexión significativa como el primer modo de la Figura 22, una oscilación continua y estable puede producir mucha más energía en un periodo de tiempo mayor. Además una estabilización evitará que la estructura alcance un régimen inestable al entrar en resonancia lo que podría ocasionar un daño estructural al micro-generador.
- Perturbación por proximidad (P.P): Como se mencionó en el estado del arte y en el análisis anteriormente realizado, la proximidad de los cuerpos puede influir directamente en el desprendimiento de la capa límite gracias a que los gradientes de presiones pueden mantener las partículas del flujo arraz de la superficie del cuerpo, de esta manera puede establecerse una relación P/D conveniente de acuerdo a los resultados obtenidos que ayuden a incrementar la amplitud de las oscilaciones sin perder su estabilidad.
- Cantidad de Cilindros en el arreglo (C.C): A medida que se incremente el número de cilindros, aumentará la complejidad del sistema, sin embargo este aumento puede traer como ventaja un mayor número de transductores de energía. Este criterio es de gran importancia porque permitirá establecer el número adecuado de cilindros.

Ahora, con los parámetros anteriormente establecidos, se realizará cierta evaluación de cada uno mediante el siguiente juicio. El juicio consiste en asignar un valor determinado para observar la influencia de dicho parámetro en el diseño, por lo general se emplea la siguiente convención:

Tabla 14. Criterios de evaluación de influencia.

Valor de influencia	Criterio de evaluación
10	Influye mucho
5	Influye
1	Influye igual
$1/5 \cong 0,2$	Influye poco
$1/10 \cong 0,1$	No influye en nada

Luego se organizan dentro de una matriz de impacto cruzado para determinar el factor ponderado de cada parámetro, esto con el fin de determinar la característica más importante dentro del diseño.

Tabla 15. Matriz de impacto cruzado para el factor ponderado para la selección de la configuración.

	C.M	E.O	P.P	C.C	Suma	Factor ponderado
C.M		0,2	0,1	0,1	0,4	<b>0,00787402</b>
E.O	5		0,1	0,2	5,3	<b>0,10433071</b>
P.P	10	10		0,1	20,1	<b>0,39566929</b>
C.C	10	5	10		25	<b>0,49212598</b>
				<b>Total</b>	50,8	

Como se puede ver en la Tabla 15, el factor más influyente en los criterios establecidos es la cantidad de cilindros en el arreglo, lo cual concuerda con lo observado en los resultados expuestos anteriormente.

Dicho lo anterior, se propone diseñar conceptualmente el micro-generador a partir de 4 cilindros en línea. Futuros estudios pueden llevarse a cabo para determinar si el aumento de éstos puede inclusive mejorar el rendimiento del micro-generador, sin embargo por lo visto en la Figura 50 en donde es evidente que la oscilación del coeficiente de sustentación del cilindro 3 es mayor que el cilindro 4, y en la Figura 52 la diferencia se hace aún mayor; por esto no se analizará un número mayor de cilindros en este proyecto, ya que podría atenuarse la oscilación de los cilindros centrales.

Luego de realizar la matriz de impacto cruzado para juzgar cada parámetro, se realizó una nueva matriz con cada criterio para evaluar las opciones que se tienen. Estas opciones se tratan de los arreglos de P/D, observando los mejores resultados de acuerdo a lo obtenido en las Tablas 11, 12 y 13. De la misma manera como se realizó anteriormente, se establece la siguiente convención para dicha evaluación

Tabla 16. Criterios de evaluación de resultados.

Valor de Resultados	Criterio de evaluación
10	Mejores resultados
5	Buenos resultados
1	Resultados iguales.
$1/5 \cong 0,2$	Malos resultados
$1/10 \cong 0,1$	Peores resultados

Ahora se realizó nuevamente una matriz de impacto cruzado, pero esta vez para obtener el peso de cada opción. Es importante aclarar que se juzgó una relación P/D frente a otras. Se comparan las relaciones P/D de acuerdo a los parámetros establecidos para la Tabla 15.

Tabla 17. Matriz de impacto cruzado para el coeficiente de sustentación máximo.

<b>Coeficiente de sustentación máximo (C.M)</b>						
<b>P/D</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>3,3</b>	<b>4</b>	<b>Suma</b>	<b>Peso de la opción</b>
<b>2</b>		1	0,1	0,1	1,2	<b>0,02362205</b>
<b>2,5</b>	1		0,2	0,1	1,3	<b>0,02559055</b>
<b>3,3</b>	10	5		0,2	15,2	<b>0,2992126</b>
<b>4</b>	10	10	5		25	<b>0,49212598</b>
<b>Total</b>					42,7	

Tabla 18. Matriz de impacto cruzado para la estabilidad de oscilación.

<b>Estabilidad de oscilación (E.O)</b>						
<b>P/D</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>3,3</b>	<b>4</b>	<b>Suma</b>	<b>Peso de la opción</b>
<b>2</b>		1	0,1	0,1	1,2	<b>0,02362205</b>
<b>2,5</b>	1		0,1	0,1	1,2	<b>0,02362205</b>
<b>3,3</b>	10	10		5	25	<b>0,49212598</b>
<b>4</b>	10	10	0,2		20,2	<b>0,3976378</b>
<b>Total</b>					47,6	

Tabla 19. Matriz de impacto cruzado para la perturbación por proximidad.

<b>Perturbación por proximidad (P.P)</b>						
<b>P/D</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>3,3</b>	<b>4</b>	<b>Suma</b>	<b>Peso de la opción</b>
<b>2</b>		0,2	0,1	0,1	0,4	<b>0,00787402</b>
<b>2,5</b>	5		0,1	0,2	5,3	<b>0,10433071</b>
<b>3,3</b>	10	10		5	25	<b>0,49212598</b>
<b>4</b>	10	5	0,2		15,2	<b>0,2992126</b>
<b>Total</b>					45,9	

Tabla 20. Matriz de impacto cruzado para la cantidad de cilindros.

<b>Cantidad de Cilindros (C.C)</b>						
<b>P/D</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>3,3</b>	<b>4</b>	<b>Suma</b>	<b>Peso de la opción</b>
<b>2</b>		0,2	0,1	0,1	0,4	<b>0,00787402</b>
<b>2,5</b>	5		0,1	0,1	5,2	<b>0,1023622</b>
<b>3,3</b>	10	10		0,2	20,2	<b>0,3976378</b>
<b>4</b>	10	10	5		25	<b>0,49212598</b>
<b>Total</b>					50,8	

Con los valores del factor de ponderación (F.P) y el peso de la opción (P.O) se puede establecer la siguiente matriz de selección, la cual se obtuvo multiplicando el peso de opción de cada relación P/D de acuerdo a un determinado criterio, por el factor de ponderación del mismo criterio.

Como se puede apreciar en el puntaje final de la Tabla 21, la relación más adecuada bajo los parámetros establecidos y los resultados obtenidos fue la relación P/D=3,3 con un arreglo de 4 cilindros en línea.

Tabla 21. Matriz de selección para la configuración P/D.

	<b>C.M</b>	<b>E.O</b>	<b>P.P</b>	<b>C.C</b>	<b>Puntaje final</b>
	<b>(F.P *P.O)</b>	<b>(F.P *P.O)</b>	<b>(F.P *P.O)</b>	<b>(F.P *P.O)</b>	
<b>P/D=2</b>	0,000186	0,0024645	0,00311551	0,00387501	<b>0,00964102</b>
<b>P/D=2,5</b>	0,0002015	0,0024645	0,04128046	0,0503751	<b>0,09432156</b>
<b>P/D=3,3</b>	0,002356	0,05134385	0,19471914	0,19568789	<b>0,44410689</b>
<b>P/D=4</b>	0,00387501	0,04148583	0,11838924	0,24218798	<b>0,40593806</b>

## 6 SELECCIÓN MECANISMO GENERADOR DE ENERGÍA

Como se mencionó anteriormente en Capítulo 2., existen diversos mecanismos transductores de energía mecánica a energía eléctrica, de los cuales se pueden resaltar los 3 más empleados: electromagnéticos, electroestáticos y piezoeléctricos.

*Los mecanismos electromagnéticos* empleados comúnmente en los aerogeneradores necesitan un alto flujo para su funcionamiento, ya que por medio de ciertas palas con un perfil aerodinámico mueven un rotor central, el cual induce una corriente en un estator para que por medio de un arreglo eléctrico, pueda ser empleada para ciertos fines. Aunque el mecanismo electromagnético es el más empleado hoy por hoy, no resulta conveniente emplear éste para la generación de energía eléctrica para microsensores o microactuadores, debido a que se podría generar más potencia de la demandada por el sistema. Además las partes móviles del aerogenerador traen consigo un mantenimiento periódico, lo cual podría ser un inconveniente si éste está ubicado en un lugar de difícil acceso<sup>19</sup>.

Otro mecanismo mencionado es la generación de energía por medio de *la electroestática*, el cual no es conveniente para este proyecto ya que se necesita de un flujo a un número considerable de Reynolds para poder generar una mayor fuerza que sea capaz de vencer la fricción de las partes mecánicas del conjunto. Sin embargo, como se trabajó a un régimen laminar con un Reynolds tan bajo en las simulaciones no es conveniente emplear este mecanismo.

Por último, *los mecanismos piezoeléctricos* ya mencionados en el marco teórico y en el estado del arte solo necesitan de cierta deformación mecánica para lograr altos picos de voltaje con una potencia y una corriente baja, lo cual los convierte en el mecanismo ideal para la producción de energía con el fin de alimentar algún tipo de MEMS. A pesar de esto, la transducción de energía piezoeléctrica dependerá directamente del material empleado y de las dimensiones que se manejen; como se producen picos de voltajes dependiendo de la magnitud de la tensión mecánica, es de gran importancia adecuar la electricidad generada a una tensión determinada. (Jauvtis & Williamson, 2003). Debido a que estos mecanismos producen una baja potencia es necesario adecuar el mecanismo ya sea en serie (para producir el doble de voltaje) o en paralelo (para producir el doble de corriente) con el fin de obtener el doble de potencia y minimizar las pérdidas que se puedan generar.

Para profundizar un poco más sobre estos materiales se pueden resaltar los tipos de los mismos que existen en la actualidad, los cuales son:

---

<sup>19</sup>Tomado de : <http://twenergy.com/energia-eolica/desventajas-de-la-energia-eolica-477>

- Cerámicas policristalinas: Conocidas comúnmente como PZT y como (PMN-PT) los cuales tienen altos coeficientes piezoeléctricos. Las cerámicas piezoeléctricas pueden convertir entre el 30 y 75% de la energía mecánica entregada en energía eléctrica, dependiendo de las características que posea el material.(GONZÁLEZ, 2011).
- Fluoruro de polivinilo (PVDF): Son piezoeléctricos ampliamente utilizados por sus bajos costos pero sus constantes piezoeléctricas son mucho menores que las cerámicas policristalinas.

Se decidió emplear una cerámica piezoeléctrica (PZT) debido a que posee mejores constantes que las PVDF. Luego, se revisaron las constantes más influyentes según el marco teórico para la transducción de energía mecánica en eléctrica (Constantes  $Q_m, K_{33}, d_{33}$  y  $g_{33}$ ).

Se realizó una matriz de selección de la misma manera que en el capítulo 5.4 para definir el material piezoeléctrico más adecuado del micro-generador, de igual modo, se emplearon las tablas 14 y 16 para definir los criterios de evaluación y resultados. Las constantes de las cerámicas piezoeléctricas pueden apreciarse en la Tabla 32 del ANEXO (5), las cuales también se tuvieron en cuenta para el análisis de selección dentro de esta matriz.

Tabla 22. Matriz de impacto cruzado para el factor ponderado del piezoeléctrico.

	<b>g</b>	<b>d</b>	<b>k</b>	<b>Qm</b>	<b>Suma</b>	<b>Factor ponderado</b>
<b>g</b>		1	5	5	11	<b>0,44715447</b>
<b>d</b>	1		5	5	11	<b>0,44715447</b>
<b>k</b>	0,2	0,2		1	1,4	<b>0,05691057</b>
<b>Qm</b>	0,2	0,,2	1		1,2	<b>0,04878049</b>
				<b>Total</b>	24,6	

Tabla 23. Matriz de impacto cruzado para la constante piezoeléctrica d.

Constante piezoeléctrica d						
Piezo	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H	Suma	Peso de la opción
PZT-8		0,1	0,1	0,1	0,3	<b>0,01219512</b>
PZT-5A	10		0,2	0,1	10,3	<b>0,41869919</b>
PZT-5J	10	5		0,2	15,2	<b>0,61788618</b>
PZT-5H	10	10	5		25	<b>1,01626016</b>
<b>Total</b>					50,8	

Tabla 24. Matriz de impacto cruzado para el factor de acoplamiento.

Factor de acoplamiento						
Piezo	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H	Suma	Peso de la opción
PZT-8		0,2	0,2	0,2	0,6	<b>0,02439024</b>
PZT-5A	5		0,2	0,2	5,4	<b>0,2195122</b>
PZT-5J	5	5		0,2	10,2	<b>0,41463415</b>
PZT-5H	5	5	5		15	<b>0,6097561</b>
<b>Total</b>					31,2	

Tabla 25. Matriz de impacto cruzado para el factor de calidad.

Factor de calidad						
Piezo	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H	Suma	Peso de la opción
PZT-8		10	10	10	30	<b>1,2195122</b>
PZT-5A	0,1		5	5	10,1	<b>0,41056911</b>
PZT-5J	0,1	0,2		5	5,3	<b>0,21544715</b>
PZT-5H	0,1	0,2	0,2		0,5	<b>0,0203252</b>
<b>Total</b>					45,9	

Tabla 26. Matriz de selección del piezoeléctrico.

	<b>g</b>	<b>d</b>	<b>k</b>	<b>Qm</b>	<b>Puntaje final</b>
	<b>(F.P *P.O)</b>	<b>(F.P *P.O)</b>	<b>(F.P *P.O)</b>	<b>(F.P *P.O)</b>	
<b>PZT-8</b>	0,36354022	0,0054531	0,00138806	0,0594884	<b>0,42986979</b>
<b>PZT-5A</b>	0,27629057	0,18722321	0,01249256	0,02002776	<b>0,49603411</b>
<b>PZT-5J</b>	0,09815586	0,27629057	0,02359707	0,01050962	<b>0,40855311</b>
<b>PZT-5H</b>	0,0072708	0,45442528	0,03470157	0,00099147	<b>0,49738912</b>

Se puede ver en la Tabla 26 que el puntaje mayor final para la selección del piezoeléctrico es el cerámico PZT-5H.

Para el dimensionamiento de la cerámica anterior se empleará los estudios realizados en el trabajo “*Vibration and Flow Energy Harvesting using Piezoelectric*”(Gao Xiaotong, 2011a), en donde se plantea el piezoeléctrico de la siguiente manera:

- Dos (2) láminas que funcionan como electrodos de 127 $\mu$ m de espesor, con 31X10mm sobre una placa de acero inoxidable tipo 304 del fabricante “*TRINITY BRAND INDUSTRIES, INC*”de 75 $\mu$ m de espesor con las mismas dimensiones generales del piezoeléctrico (31X10mm).

Como se establecieron las dimensiones iniciales dados por el piezoeléctrico, se tomará el ancho del mismo para limitar el diámetro del cilindro, el cual será de unos 10 milímetros. Como se había mencionado al comienzo del capítulo 3, para que los cuerpos sean dominados por fenómenos bidimensionales este deberá poseer un  $AR \geq 7$ , por lo que la altura de los cilindros será de 70 milímetros para cumplir con esto.

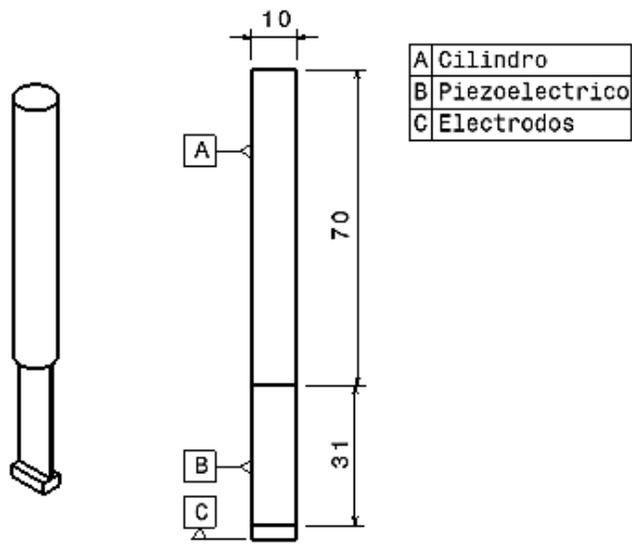


Figura 54. Ensamble del piezoeléctrico y del cilindro. Las dimensiones están dadas en milímetros.

## 7 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DISEÑO CONCEPTUAL

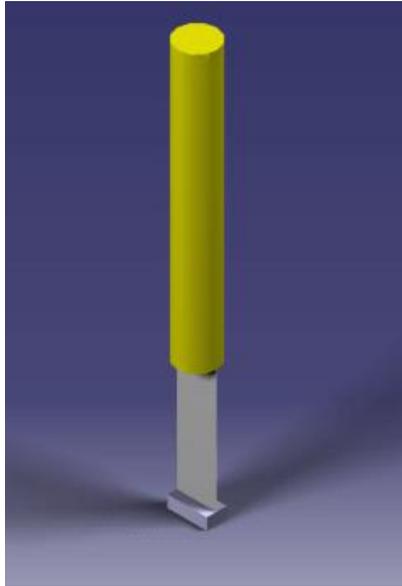


Figura 55. Vista isometría de un cilindro del diseño del micro-generador eólico.

Mediante una recopilación desde lo planteado en el estado del arte hasta los resultados y análisis realizados, se pretende establecer las características generales del diseño del micro-generador. Adicional a esto, se realizó una evaluación para observar el voltaje, corriente y potencia a un Reynolds de 150.

Con las ecuaciones (21), (24) y (25) enunciadas en el marco teórico se pudieron calcular las variables de voltaje, potencia y corriente respectivamente a lo largo del cambio de las fuerzas aerodinámicas en el tiempo. A continuación se escriben nuevamente dichas formulas:

$$\frac{V_{in,ave}}{F} = \frac{1}{2} L_1 g_{31} \frac{E_p}{wD_1} \left( t_{n1} t_p + \frac{1}{2} t_p^2 \right) \quad (21)$$

$$P = \frac{1}{2} C V_{in,ave} f \quad (24)$$

$$I = \frac{P}{V_{in,ave}} \quad (25)$$

En el ANEXO (6) se observa desde la Figura 117 hasta la 119 el comportamiento del voltaje, corriente y potencia a un Reynolds de 150.

La Figura 56 muestra un esquema del diseño conceptual. Las Figuras 56 y 57 muestran el diseño renderizado.

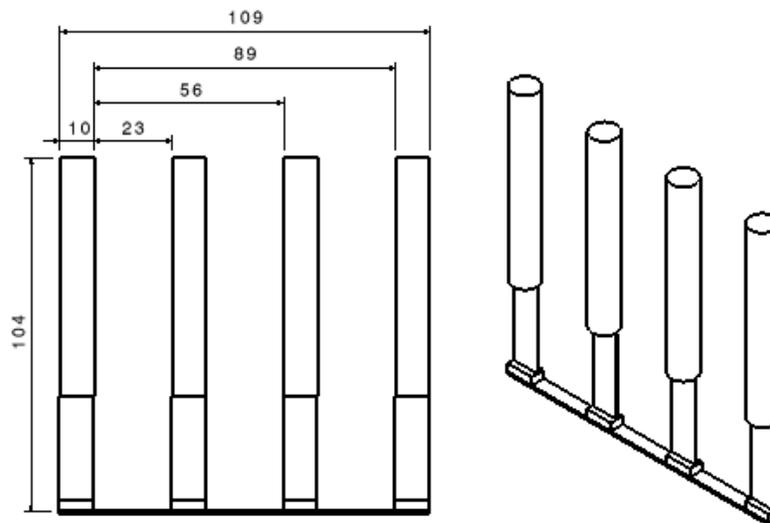


Figura 56. Dimensionamiento total del conjunto micro-generador eólico. Dimensiones en milímetros.

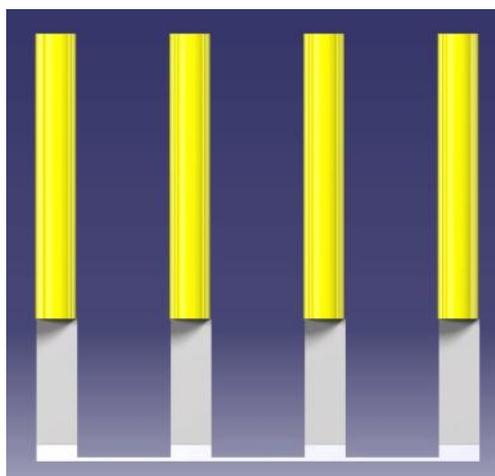


Figura 57. Render del micro-generador eólico. Vista lateral.

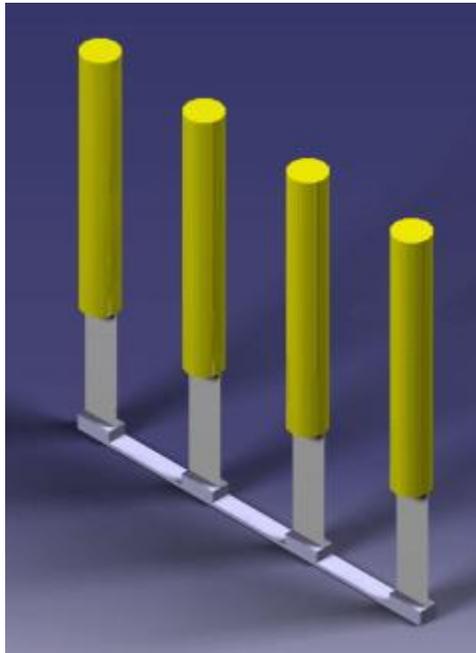


Figura 58. Vista isometría del diseño del micro-generador eólico.

A continuación se resume los parámetros generales del diseño conceptual del micro-generador, al igual que se muestran los márgenes de voltaje, potencia y corriente máximo producidos a un rango de 150 Reynolds.

Tabla 27. Características generales del diseño conceptual.

<b>Características generales del diseño conceptual</b>	
Configuración	Lineal
Número de cilindros	4
Separación entre cilindros (Relación P/D)	3,3
Relación de aspecto (H/D)	7
Reynolds de funcionamiento analizado	150-600
Tiempo de estabilización de funcionamiento.	43,4 segundos aproximadamente con Re=150.

Tabla 28. Voltaje pico máximo producido por cada cilindro, Re=150.

<b>Voltaje pico máximo producido por cada cilindro</b>	
Voltaje pico máximo, cilindro 1	17 [mili voltios]
Voltaje pico máximo, cilindro 2	46,4 [mili voltios]
Voltaje pico máximo, cilindro 3	48 [mili voltios]
Voltaje pico máximo, cilindro 4	43 [mili voltios]

Tabla 29. Corriente pico máximo producido por cada cilindro, Re=150.

<b>Corriente pico máximo producido por cada cilindro</b>	
Corriente pico máximo, cilindro 1	48,7 [pico amperios]
Corriente pico máximo, cilindro 2	131 [pico amperios]
Corriente pico máximo, cilindro 3	130 [pico amperios]
Corriente pico máximo, cilindro 4	120 [pico amperios]

Tabla 30. Potencia pico máximo producido por cada cilindro, Re=150.

<b>Potencia pico máximo producido por cada cilindro</b>	
Potencia máximo, cilindro 1	0,84 [pico watts]
Potencia pico máximo, cilindro 2	6,27 [pico watts]
Potencia pico máximo, cilindro 3	6,56 [pico watts]
Potencia pico máximo, cilindro 4	5,18 [pico watts]

Debido al comportamiento oscilatorio observado en el ANEXO (6) se hace necesario un planteamiento básico del tratamiento eléctrico, debido a que la corriente producida por el micro-generador es tan baja que no podría ser usada por un sistema MEMS de forma directa. La Figura 59 muestra éste esquema conceptual, el cual debe ser empleado para adecuar la corriente producida hasta algún valor útil deseado.



Figura 59. Esquema conceptual del tratamiento eléctrico.

El anterior tratamiento eléctrico presentará pérdidas en cada etapa, sin embargo como se mencionó en el capítulo 6, la cantidad de micro-generadores conectados entre sí dependerán de la potencia y corriente demandada por el sistema, ya que si se dispone de este micro-generador en serie se podría obtener una potencia y un voltaje suficiente para accionar los MEMS.

## 8 CONCLUSIONES

- Hasta el momento no existe un manual, instructivo, o estudio completo en donde se especifique los parámetros necesarios a tener en cuenta para la construcción de un micro-generador eólico piezoeléctrico como el propuesto anteriormente en este proyecto. Sin embargo, a través de una revisión bibliográfica sobre los antecedentes de casos similares en los cuales se exponen algunos micro-generadores eólicos que existen en el mercado o estudios realizados, se pudo determinar los parámetros de diseño que sirvieran como base para llevar a cabo este proyecto. Por medio de lo planteado en el marco teórico y en el estado del arte se espera que otros autores puedan basarse para comenzar futuros desarrollos.
- En el momento de análisis de la interacción entre el fluido y la estructura se debe tener presente las variables geométricas que alteren el comportamiento normal del flujo, ya que los gradientes de presiones a lo largo de los cuerpos podrían afectar directamente el comportamiento de la capa límite lo que conlleva a la aparición de vórtices, los cuales ayudarían a aumentar la oscilación de los cuerpos, siempre y cuando la frecuencia de desprendimiento de los mismos coincida con la frecuencia de oscilación de la capa límite aguas abajo; en el caso contrario se podrían atenuar estos movimientos oscilatorios, como se evidenció en algunos casos mostrados. Es por esto que el análisis a los coeficientes de sustentación de los cilindros del conjunto se realizó de manera exhaustiva.
- El método de transducción está en función siempre de los parámetros generales con el cual se esté diseñando, ya que aunque existen métodos más eficientes que el propuesto en este proyecto, el mecanismo de generación de energía mediante piezoeléctricos era el más conveniente en este caso, debido a que no se necesita un movimiento cíclico a altas frecuencias para generar un gran voltaje, sin embargo en casos de micro-generadores que funcionen a altos números de Reynolds, podría emplearse otros métodos. A pesar de todo, el mayor problema de los aerogeneradores en general es el mismo: No se puede asegurar que siempre existe un flujo continuo de viento, por lo cual los parámetros de funcionamiento de todos conllevan a un margen cerrado de tiempo efectivo de producción de energía, esto se debe a que una velocidad más baja que la establecida en las características de funcionamiento produciría una cantidad de energía casi despreciable.
- Para diferentes casos de estudios en donde exista cualquier tipo de interacción entre el fluido y la estructura es importante comprender que las herramientas de CFD tan

solo lanzan resultados numéricos en función de los parámetros de entrada con cierto grado de error, debido a que las condiciones simuladas son aisladas, lo que quiere decir que se debe prestar suma atención a validar de una manera adecuada cualquier caso de estudio, ya que esto dará credibilidad y justificación a los resultados obtenidos. Mediante los pasos de validación en este trabajo se pudo evidenciar que aunque el diseño conceptual sea en tres dimensiones, el fenómeno dominante de éste es bidimensional, lo que permitió el empleo de menor costo computacional para obtener resultados válidos.

- Como se mencionó en el desarrollo de este proyecto, existen múltiples geometrías que obedecen a cumplir una labor determinada. Por medio de la recopilación bibliográfica en el estado del arte, se pudo determinar que la configuración más adecuada para este caso era el cilindro circular debido a las ventajas que traía éste. Mediante esto, se pudo ahorrar tiempo de experimentación ya que se analizaron los resultados obtenidos por otros autores en donde se mostraban los beneficios de los cilindros circulares, y gracias a esto se comenzó con las simulaciones mostradas anteriormente.
- La relación P/D adecuada se obtuvo mediante los resultados de las simulaciones y la cuantificación de los mismos en la matriz de selección. El uso de este tipo de herramientas se hace necesario gracias a que se puede evaluar la funcionalidad o importancia de un parámetro a emplear. Sin embargo, la selección de la configuración no determinará el comportamiento final del sistema, lo que quiere decir que no se está asegurando mediante ésta que el micro-generador funcione eficientemente, tan solo se propone emplear la configuración adecuada para unos parámetros establecidos.
- Se establecieron los parámetros de funcionamiento y operación del micro-generador de manera conceptual mediante simulaciones en CFD, las cuales se llevaron a cabo a través del uso de un número de Reynolds establecido, logrando visualizar de esta manera el comportamiento del sistema ante una ráfaga de viento con una intensidad determinada. Sin embargo, como se pudo apreciar en estos resultados, la estabilización del funcionamiento del sistema se hace de forma demorada, lo cual significaría una clara desventaja ya que no se podría asegurar por si solo que el sistema este expuesto a estas condiciones durante un mínimo periodo continuo.
- Aunque no fue posible la construcción de un prototipo con el cual se pudieran contrastar los resultados obtenidos mediante las simulaciones debido a la dificultad

de la adquisición del material piezoeléctrico propuesto para el diseño, se pudo evaluar el funcionamiento de este micro-generador mediante lo planteado en el marco teórico, lo que llevo a concluir que este sistema es muy poco eficiente debido a la baja corriente producida. Por esto se hace necesario el empleo de un tratamiento eléctrico, en donde se adecue la energía almacenada, ya que por sí solo éste micro-generador es menos eficiente frente otros similares ya desarrollados y los cuales funcionan a Reynolds mayores; sin embargo el diseño planteado aquí es funcional. Futuros estudios pueden ser planteados para determinar una mayor eficacia de producción de energía y potencia a partir del incremento del número de Reynolds, pero al incrementar éste, la configuración lineal con  $P/D=3,3$  podría no ser la más adecuada, por lo que se sugiere que se lleve a cabo un nuevo estudio a las relaciones  $P/D$  descritas en este proyecto.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Arias, E. (2011). Instituto Politécnico Nacional. *cic.ipn.mx*.
- Calhoun, D. (2002). A Cartesian Grid Method for Solving the Two-Dimensional Streamfunction-Vorticity Equations in Irregular Regions. *Journal of Computational Physics*, 176(2), 231–275. doi:10.1006/jcph.2001.6970
- Energy, W. (2008). Introducing the  $\mu$ icroWindbelt, 2008.
- Física, A. E., Antônio, A., Alves, H., & Pereira, P. (2010). Cerámicas piezoeléctricas : funcionamiento y propiedades, 1–7.
- Gao Xiaotong. (2011a). Vibration and Flow Energy Harvesting using Piezoelectric, *Thesis*(March), 179.
- Gao Xiaotong. (2011b). Vibration and Flow Energy Harvesting using Piezoelectric, (March).
- García Navarro, J. G. P. B. (2013). EVALUACIÓN AEROELÁSTICA DE GENERADORES EÓLICOS, (Aeroelasticity), 82.
- GONZÁLEZ, R. A. (2011). FACULTAD DE INGENIERÍA Diseño y caracterización mediante el método de los elementos finitos de un transductor ultrasónico para aplicaciones médicas ., (Tesis), 105.
- Gu, Z., & Sun, T. (1999). On interference between two circular cylinders in staggered arrangement at high subcritical Reynolds numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80(3), 287–309. doi:10.1016/S0167-6105(98)00205-0
- Hall, U. (1999). MOTIONS , FORCES AND MODE TRANSITIONS IN VORTEX-INDUCED VIBRATIONS AT LOW, 813–851.
- Hobbs, W. B., & Hu, D. L. (2012). Tree-inspired piezoelectric energy harvesting. *Journal of Fluids and Structures*, 28, 103–114. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2011.08.005
- Jauvtis, N., & Williamson, C. H. K. (2003). Vortex-induced vibration of a cylinder with two degrees of freedom, 17, 1035–1042. doi:10.1016/S0889-9746(03)00051-3
- Li, H., & Sumner, D. (2009). Vortex shedding from two finite circular cylinders in a staggered configuration. *Journal of Fluids and Structures*, 25(3), 479–505. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2008.11.001

Sumner, D., Richards, M. D., & Akosile, O. O. (2008). Strouhal number data for two staggered circular cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6-7), 859–871. doi:10.1016/j.jweia.2007.06.013

Townley, A. (n.d.). VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING USING MEMS PIEZOELECTRIC GENERATORS Andrew Townley – Electrical Engineering, University of Pennsylvania Advisor: Gianluca Piazza.

Une-en, E. D. E. L. D. (2009). española.

Williamson, C., & Brown, G. (1998). A series in  $1/\sqrt{\text{Re}}$  to represent the Strouhal–Reynolds number relationship of the cylinder wake. *Journal of Fluids and Structures*, 1073–1085.

## 10 ANEXOS

### ANEXO 1

#### DOCUMENTO CIENTIFICO

#### DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA MICROGENERADOR DE ENERGÍA EÓLICA A PARTIR ESTRUCTURAS ONDULANTES SOMETIDAS A CORRIENTES DE VIENTO VARIABLES.

---

Jhon Sleyder Zapata García\*, Sebastián Castañeda Orrego\*

*\*Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia,*

**Resumen:** Este proyecto tiene como finalidad diseñar conceptualmente un sistema micro-generador de energía eólica a partir de estructuras ondulantes sometidas a corriente de viento variables. Durante el desarrollo del diseño, se analizaron diferentes geometrías, configuraciones de las piezas y materiales mediante simulaciones de CFD y de la documentación de otros autores, para de esta manera obtener la forma más conveniente para satisfacer un potencial eléctrico. Copyright © 2012 UPB.

**Abstract:** This project has a purpose the conceptual design of a system micro-generator of wind power from undulating structures submitted to variable currents of wind. During the development of the conceptual design, there was evaluated different geometries, configurations of the pieces and materials of the same ones, in order which will be simulated by means of CFD (computational Fluid Dynamics) and hereby it will obtain the most suitable form to satisfy a requirement of electrical potential.

**Keywords:** Piezoelectric effect, CFD, micro-generator, aerodynamic coefficients, CFD, renewable energy.

#### Glosario:

$C_D$  = Coeficiente de arrastre.

$C_F$  = Coeficiente de fuerza.

$C_d$  = Coeficiente de arrastre expresado de manera bidimensional.

$C_l$  = Coeficiente de sustentación expresado de manera bidimensional.

$C_p$  = Coeficiente de presión.

$T_w$  = Temperatura de la pared.

$U_\infty, V_\infty, u_e$  = Velocidad del flujo libre.

$V_w$  = Velocidad sobre la pared.

$p_e$  = Presión al borde de la capa límite.  
 $h$  = entalpía.  
 $\delta$  = Espesor de la capa límite.  
 $AR$  = Relación de aspecto.  
 $C_p$  = Coeficiente de calor específico a presión constante.  
 $D$  = Diámetro.  
 $H$  = Altura de los cuerpos.  
 $P/D$  = Relación entre la distancia de los cilindros.  
 $R$  = Constante universal de los gases.  
 $Re$  = Número de Reynolds.  
 $St$  = Número de Strouhal.  
 $d$  = Fuerza de arrastre expresada de manera bidimensional.  
 $f$  = Frecuencia de oscilación del cuerpo.  
 $l$  = Fuerza de sustentación expresada de manera bidimensional.  
 $p$  = Presión  
 $t$  = Periodo de desprendimiento de cada vórtice.  
 $u$  = Componente en X de la velocidad.  
 $\mu$  = Viscosidad dinámica.  
 $\rho$  = Densidad del flujo.

## 1. INTRODUCCIÓN

La demanda energética actual a nivel mundial está llevando al desarrollo e investigación de múltiples proyectos para que disminuyan la dependencia de obtención de energía a partir de los hidrocarburos o cualquier otra que sea perjudicial para el medio ambiente, ya que según las estadísticas de la EIA (*U.S Energy Information Administration*) el periodo comprendido entre 2010 y 2040 se caracterizará por un aumento del 56% en cuanto al consumo de la energía a nivel mundial. En la Figura 1 se puede observar la proyección del consumo energético de los países miembros de la organización para el desarrollo económico conjunto OECD (por sus siglas en inglés: *Organisation for economic Co-operation and development*)

y los países no miembros. Esta organización tiene como finalidad asegurar el empleo de diferentes tipos de energía de manera segura, y obrar por el desarrollo de las energías renovables.

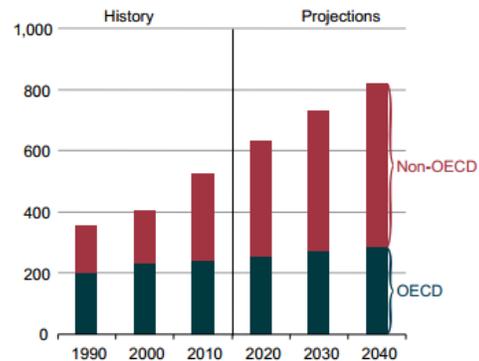


Figura 1. Proyección del consumo de energía en cuatrillones de btu<sup>20</sup>.

<sup>20</sup>Consumo de energía 2010-2040. AnnualEnergy Outlook 2013. Recuperado el 13 de octubre de 2013,

Hasta el momento solo se han desarrollado métodos donde se aproveche la energía renovable, para cubrir tan solo el 10% de la demanda energética de los hidrocarburos. Lo que significa que aún falta un largo recorrido y experiencia para que los métodos “verdes” de producción de energía lleguen a ser grandes competidores de estos.

Se puede nombrar la producción de energía renovable como aquella que podemos obtener por medio de fuentes naturales que son virtualmente inagotables, teniendo en cuenta que al referirnos al término inagotable se quiere decir que es una inmensa cantidad de energía existente o que son capaces de renovarse gracias a la propia acción de la naturaleza sin ayuda humana.

Una manera de producción de energía renovable, denominada producción de energía por medio de vibración natural, ha tomado mucho impulso en los últimos años con los avances a nivel de materiales, aeronáuticos y computacionales para realizar las simulaciones necesarias donde se puedan comprobar los modelos planteados. Por medio de esta producción de energía combinada con otros medios, se espera reemplazar en un futuro la dependencia de aquellos métodos que dejan como producto los elementos nocivos dentro de la atmosfera. Este tipo de producción de energía que aprovecha la vibración de los

cuerpos se conoce como energía piezoeléctrica.

Enfocándonos para dejar las bases para un micro-generador piezoeléctrico, se llevó a cabo las simulaciones en Ansys-Fluent para obtener las configuraciones más idóneas para aprovechar este tipo de energía obtenida a partir de estructuras ondulantes.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Capa límite:

La capa límite puede definirse como la perturbación tanto de la velocidad como de la temperatura de un flujo libre sobre un objeto, y su respuesta puede variar de acuerdo a la geometría del cuerpo, la temperatura y la rugosidad que posea éste.

La magnitud del espesor de la capa límite “ $\delta$ ” está dado en función de un perfil ascendente de la velocidad del flujo desde el punto donde  $V_w = 0$ , hasta que se cumple con la siguiente condición:

$$u = 0.99u_e \quad (1)$$

En donde

$$u_e = V_\infty \quad (2)$$

### 2.2. Flujo Laminar:

El flujo laminar es una condición especial del flujo, en donde el movimiento del mismo se encuentra circulando de manera suave y cada línea de corriente se mueve sobre láminas paralelas sin

entremezclarse, como se puede ver en el flujo sobre un cuerpo en la Figura 2.

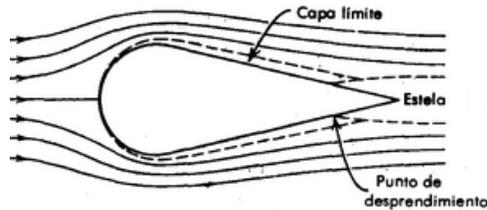


Figura 2. Flujo laminar<sup>21</sup>.

Este comportamiento se da cuando los gradientes de velocidades son bajos o la viscosidad es alta, lo que lleva a decir que las características de este tipo de flujo están determinadas por el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D}{\mu} \quad (3)$$

Éste número adimensional es la relación entre los términos de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas de las ecuaciones de Navier–Stokes que gobiernan el comportamiento del fluido.

A continuación, se muestran las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo en 2 dimensiones de Navier-Stokes:

<sup>21</sup>Conceptos fundamentales de mecánica de fluidos, Mecánica de fluidos, Recuperado el 1 de junio de 2014, <http://www.monografias.com/trabajos10/resumen/resumen.shtml>

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Ecuación de momento en X:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp_e}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Ecuación de Momento en Y:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Las condiciones de frontera para las ecuaciones anteriores son:

En la pared:

$$y = 0 \quad u = 0 \quad (10)$$

Sobre la capa límite:

$$y \rightarrow \infty \quad u \rightarrow u_e \quad (11)$$

### 2.3. Dinámica de Fluidos Computacionales:

Este tipo de programas permite obtener resultados de un flujo determinado mediante la solución de variables del mismo.

El programa establece ciertos puntos de acuerdo a los parámetros preestablecidos, generando líneas de comunicación a través de estos que en conjunto forman

una especie de malla como se puede ver en la Figura 3, en la cual cada vértice resultante de la unión de 2 o más líneas de la malla albergaran la posición de un nodo.

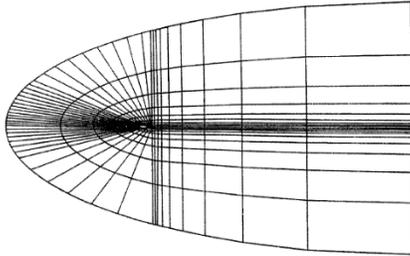


Figura 3. Malla generada por los nodos de CFD<sup>22</sup>.

Las ecuaciones de cada nodo pueden ser resueltas mediante diferentes tipos de métodos numéricos; para este caso de estudio se empleará el método de diferencias finitas.

#### **2.4. Sustentación y arrastre en un cilindro circular:**

El movimiento de las partículas alrededor de un cilindro produce fuerzas que pueden ser vistas como componentes normales (o de presión) y componentes tangenciales (o cortante). Las componentes de las fuerzas que actúan sobre un cilindro pueden ser observadas en la Figura 4.

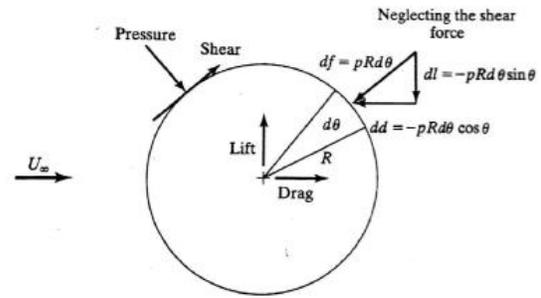


Figura 4. Fuerzas actuando sobre un cilindro<sup>23</sup>.

Los coeficientes que determinan la magnitud de la fuerza ejercida pueden ser calculados fácilmente gracias a la forma general del coeficiente de fuerza, el cual está definido por la siguiente expresión:

$$C_F = \frac{\text{fuerza}}{(\text{presión dinámica})(\text{Área de referencia})} \quad (12)$$

Ahora teniendo en cuenta el coeficiente anteriormente mencionado, se puede definir el coeficiente de sustentación en función de la componente perpendicular de la fuerza como:

$$C_l = \frac{l}{0,5\rho U_\infty^2 D} \quad (13)$$

Y el coeficiente de arrastre en función de la componente paralela de la fuerza como:

$$C_d = \frac{d}{0,5\rho U_\infty^2 D} \quad (14)$$

<sup>22</sup>D. ANDERSON, John. 2007. Numerical Solutions-Computational Fluid Dynamics (CFD). En su: Fundamentals of Aerodynamics. Fourth Edition. New York, McGraw-Hill Education. Pp-176.

<sup>23</sup>J. Bertin, John. 2009. Lift and Drag. En su: Aerodynamics for Engineers. Fifth Edition. New Jersey, Pearson Prentice-Hall. Pp-105.

## 2.5. Número de Strouhal:

El fluido puede presentar un comportamiento oscilatorio debido a la interacción entre las fuerzas viscosas y el gradiente de presión, el cual puede ser analizado mediante la expresión:

$$St = \frac{\text{oscilación del flujo}}{\text{velocidad media del flujo}} = \frac{f \cdot l}{U_{\infty}} \quad (15)$$

## 2.6. Calculo de voltaje, potencia y corriente:

El voltaje promedio sobre unidad de fuerza para un material piezoeléctrico puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_{in,ave}}{F} = \frac{1}{2} L_1 g_{31} \frac{E_p}{w D_1} \left( t_{n1} t_p + \frac{1}{2} t_p^2 \right) \quad (16)$$

En donde

$$t_{n1} = \frac{E_{np} t_{np}^2 - E_p t_p^2}{2(E_{np} t_{np} + E_p t_p)} \quad (17)$$

$$D_1 = \frac{E_{np}^2 t_{np}^4 + E_p^2 t_p^4 + 2 E_{np} E_p t_{np} t_p (2 t_{np}^2 + 2 t_p^2 + 3 t_{np} t_p)}{12(E_{np} t_{np} + E_p t_p)} \quad (18)$$

La potencia generada del piezoeléctrico está dado por:

$$P = \frac{1}{2} C V_{in,ave} f \quad (19)$$

La corriente producida por el piezoeléctrico se puede calcular mediante:

$$I = \frac{P}{V_{in,ave}} \quad (20)$$

## 3. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN

### 3.1 Independencia de malla:

Para este caso de estudio, se comenzó empleando un mallado sugerido en diferentes módulos de estudios de Ansys de la universidad de Cornell, en los cuales se sugiere la creación de la misma gracias al programa Gambit24.

A continuación se resume los parámetros indicados [Ver Tabla 1] que se tuvieron en cuenta en Fluent. La altura del cilindro que aparece en la Tabla 1 fue ingresada en la profundidad del cuerpo, dentro de los valores de referencia para incluir de una Relación de aspecto superior a 7 para que los fenómenos sean gobernados por fuerzas bidimensionales.

$\rho = 75 \text{ kg/m}^3, U = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
$D = 2\text{m}, H = 14\text{m}$
$\mu = 1 \text{ kg/ms}$

Tabla 1. Parámetros generales

<sup>24</sup>Steady flow past a cylinder [Últimafecha de consulta: 12 de febrero de 2014] Disponible en:

<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATIONS/FLUENT+-+Steady+Flow+Past+a+Cylinder+-+Step+7>

Las condiciones de frontera empleadas para las simulaciones fueron las siguientes:

A la entrada:

$$V_x = 1; V_y = 0 \quad (21)$$

Sobre la pared superior e inferior:

$$\frac{\partial V_x}{\partial y} = 0; V_y = 0 \quad (22)$$

Sobre la superficie del cilindro:

Se aseguró la condición No-slip Boundary condition con:

$$V_x = 0; V_y = 0 \quad (23)$$

A la salida:

Se selecciona por defecto el “outflow boundary condition” en Fluent, en donde se asume como cero una difusión en el flujo para todas las variables, en donde:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0; \frac{\partial v_y}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

La geometría empleada como volumen de control se puede detallar en la Figura 5, en donde se dividió en segmentos independientes para permitir especificar la cantidad adecuada de elementos cuadriláteros.

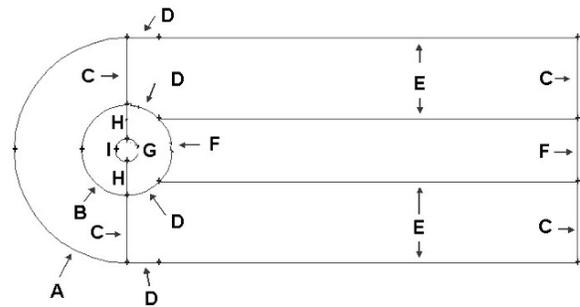


Figura 5. Geometría del dominio de estudio.

Dentro del ANEXO (2) del documento original se puede ver las etiquetas y características del mallado de la Figura anterior, en donde se establecen tres tipos de mallas, las cuales fueron simuladas para obtener una independencia de malla.

Con las mallas ya realizadas, se examinó los valores de coeficientes de arrastre de otros autores para corroborar los resultados obtenidos en las simulaciones.

Re = 40

	L	$\Theta$	$C_D$
Tritton	-	-	1,48
Coutanceau and Bouard	1,89	52,8	-
Fornberg	2,24	-	1,5
Dennis and Chang	2,35	53,8	1,52
Calhoun	2,18	54,2	1,62

Tabla 2. Valores de referencia.

La Tabla 2 se muestra varios casos de estudio a un número de Reynolds ( $Re$ ) = 40, lo que significó que los parámetros inicialmente planteados en la Tabla 1 para demostrar una independencia de malla. Sin embargo, se debe tener presente que esta modificación tan solo fue realizada para comprobar el coeficiente de arrastre. En la Tabla 3 se agrupan los resultados obtenidos por los diferentes tipos de mallas.

Tipo de Malla	Coefficiente de arrastre ( $C_d$ )	Diferencia con documento de validación (%)
Gruesa	1,7321	6,920
Media	1,7182	6,064
Refinada	1,7122	5,691

Tabla 4. Resultados y diferencia entre las mallas.

De lo anterior se puede observar que a medida que existe un refinamiento mayor para la malla se disminuye la diferencia con el valor de referencia; sin embargo un mayor refinamiento puede significar un mayor tiempo de cómputo para cada una de las simulaciones, por lo que se decidió emplear una malla media o “normal” para proseguir con las simulaciones transitorias sin sacrificar tiempo de computo. Además, se puede apreciar que el coeficiente de arrastre en bidimensional ( $C_d$ ) se aproxima considerablemente al coeficiente de arrastre tridimensional ( $C_D$ ) para un cilindro circular, esto se da

gracias a la alta relación de aspecto ingresada a Fluent.

### 3.1. Independencia del Time Step:

La independencia del Time Step sirve para determinar la coherencia de los resultados mediante la variación de los mismos, respecto a cierto número de pasos temporales bajo los cuales se simuló el fenómeno.

Para este proyecto, se encontró un valor teórico  $St$  mediante la expresión planteada por Williamson (Williamson & Brown, 1998), en donde se presenta una serie que relaciona el número de Reynolds y el de Strouhal mediante una serie de la forma:

$$St = A + \frac{B}{\sqrt{Re}} + \frac{C}{\sqrt{Re}} \quad (25)$$

En donde:  $A=0,285$   
 $B=-1,3897$   
 $C=1,8061$

$$St = 0,183 \quad (26)$$

La cual es válida para valores de Reynolds entre 47 y 180. Es posible trabajar y emplear esta serie para calcular valores de Strouhal con Reynolds superiores, hasta de  $Re=600$ , sin embargo el autor enuncia que no se asegurará entonces que cumpla con una desviación estándar de  $\varepsilon=0,0002$ .

Con el número de Strouhal calculado, se procede a emplear la malla media para comprobar la independencia en los Time Steps. Para cada desprendimiento de vórtices sobre la superficie cilíndrica se deben emplear entre 20 y 30 Time Steps para observar dicho fenómeno. Para este caso se empleó unos 25 Time Steps.

Ahora para calcular el tamaño del mismo se parte desde el número de Strouhal:

$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (27)$$

$$f = \frac{St \cdot U}{D} = \frac{0,183 \cdot 1}{2} = 0,0915 \text{ Hz} \quad (28)$$

Luego se calcula el periodo de desprendimiento de cada vórtice:

$$t = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,0915} = 10,93 \text{ seg.} \quad (29)$$

Ahora se podrá calcular el tamaño definitivo de cada Time Step como se había mencionado anteriormente:

$$\text{Tamaño Time Step} = \frac{10,93}{25} = 0,4372 \quad (30)$$

Para simplificación de cómputo se redondeara el tamaño del Time Step hasta un valor de 0,4; con esto se obtuvieron los siguientes resultados del coeficiente de sustentación del cilindro aclarando primero que nuevamente se retomaron los valores de los parámetros de la Tabla 1:

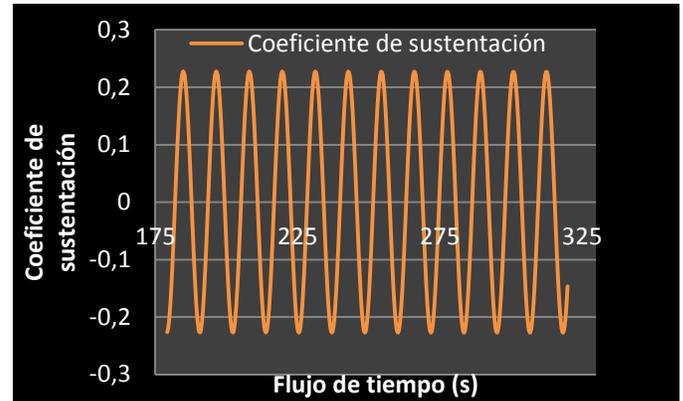


Figura 6. Coeficiente de sustentación, Time Step = 0,4.

La Figura 6 representa el comportamiento del coeficiente de sustentación del cilindro una vez se ha alcanzado la estabilidad transitoria.

Con la Figura 6 se puede calcular el periodo de desprendimiento, el cual permite calcular el valor del número de Strouhal experimental:

$$St = \frac{1/t \cdot D}{U} = \frac{1/11,7 \cdot 2}{1} = 0,17094 \quad (58)$$

A continuación se presenta en la Tabla 5 los valores teóricos y experimentales del Número de Strouhal.

Número de Strouhal (Teórico)	Número de Strouhal (Exp)	% De error
0,183	0,17094	6,59

Tabla 5. Diferencia entre valor teórico y experimental para tamaño de time step de 0,4.

Teniendo en cuenta lo anterior, se estudió de igual manera los resultados a diferentes tamaños de Time Steps [Mostrados en la Tabla 6], los cuales

arrojaron diferentes valores de número de Strouhal:

Tamaño de time step	0,4	0,2	0,1
Número de Strouhal (Teórico)	0,183	0,183	0,183
Número de Strouhal (Exp)	0,17094	0,1839	0,1886
% De error respecto al time step de 0,4	0	0,758	10,33
% De error respecto al número de st. Teórico	6,59	0,492	3,1

Tabla 6. Diferencia porcentual del número de Strouhal de diferentes tamaños de time step.

Es evidente que una simulación con un tamaño de Time Step de 0,2 dará como resultado un porcentaje de error del 0,492% respecto al St teórico, lo cual significa un error casi despreciable. Este valor será tomado para realizar las simulaciones y determinar las configuraciones adecuadas para el diseño conceptual del micro-generador.

#### 4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.

Las siguientes experimentaciones consistieron en el análisis de 4 tipos de arreglos lineales con diferentes cantidades de cilindros, las cuales fueron simuladas de manera bidimensional.

Mediante Fluent se obtuvo el coeficiente de sustentación de cada cilindro de forma individual y a partir de esto se analizó la influencia de la proximidad de los mismos:

Configuración	Nº de cilindros	Relación P/D
1	2	2,0
		2,5
		3,3
		4,0
2	3	2,0
		2,5
		3,3
		4,0
3	4	2,0
		2,5
		3,3
		4,0

Tabla 7. Configuraciones simuladas bidimensionalmente mediante Fluent.

Con base en la Tabla 7 se obtuvieron los resultados que se especifican en el ANEXO (4), sin embargo a continuación se muestran los 2 mejores resultados de estas simulaciones [Figura 7 y 8] y del cual se hace un profundo análisis.

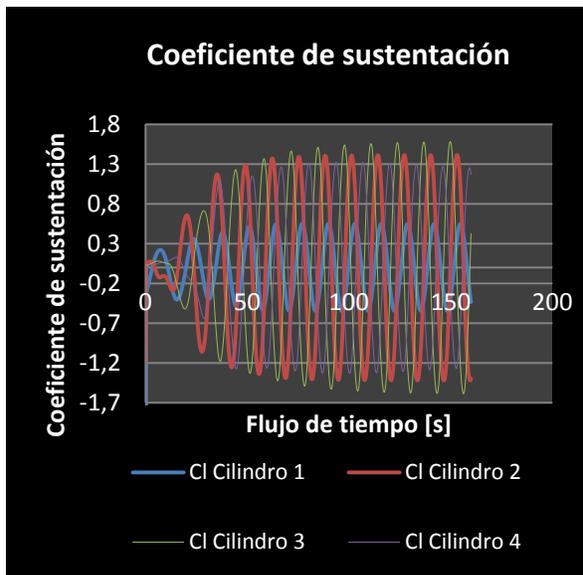


Figura 7. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 3,3$ ; 4 cilindros.

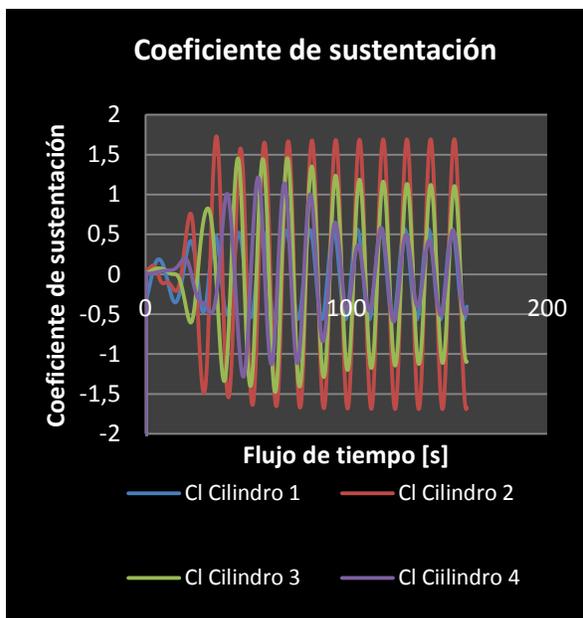


Figura 8. Coeficiente de sustentación vs Tiempo  $P/D = 4$ ; 4 cilindros.

Para la relación  $P/D=3,3$  de la Figura 7 se evidencian los coeficientes de sustentación de los cilindros 2,3 y 4, los cuales parecen ser similares tanto en frecuencia como en magnitud, además se

puede ver que el comportamiento del cilindro 1 no se atenúa tan abruptamente los resultados de las demás relaciones  $P/D$  antes de alcanzar la estabilidad. Sin embargo el tiempo de estabilización oscilatoria es aproximadamente 43,3 segundos, lo cual podría significar un claro problema para este micro-generador, ya que no se puede asegurar jamás que por medios naturales se tenga una corriente de viento continua sin perturbación que impacte los cilindros durante tanto tiempo, antes de que la estructura comience a generar la potencia necesaria para el funcionamiento de algún sistema.

Para la relación  $P/D=4$  en donde se puede observar en la Figura 8 que la oscilación del cilindro 2 parece haber sido armonizada con la oscilación del cilindro 1, lo cual en un rango mayor de Reynolds podría resultar en una entrada en resonancia y una posterior pérdida de la estructura.

Sin embargo, a pesar del comportamiento anterior, se puede evidenciar que la amplitud de oscilación del cilindro 3 disminuyó en comparación con la Figura 7. Esta última disminución en la amplitud de los cilindros aguas abajo es más visible en el cilindro 4, ya que tiende a igualar la magnitud del cilindro 1.

A pesar de que el análisis anterior muestre que un arreglo de 4 cilindros con una relación  $P/D= 3,3$  tenga el mejor tipo de comportamiento entre la interacción fluido-estructura, por lo que fue necesario

el desarrollo de una extenuante matriz de selección, en donde se comprobó nuevamente que el mejor arreglo era una relación de  $P/D=3,3$ .

## **5. SELECCIÓN MECANISMO GENERADOR DE ENERGÍA.**

Existen diversos mecanismos transductores de energía mecánica a energía eléctrica, de los cuales se pueden resaltar los 3 más empleados: electromecánicos, electroestáticos y piezoeléctricos.

Los mecanismos electromagnéticos empleados comúnmente en los aerogeneradores necesitan un alto flujo para su funcionamiento, ya que por medio de ciertas palas con un perfil aerodinámico mueven un rotor central, el cual induce una corriente en un estator para que por medio de un arreglo eléctrico, pueda ser empleada para ciertos fines. Aunque el mecanismo electromagnético es el más empleado hoy por hoy, no resulta conveniente emplear éste para la generación de energía eléctrica para microsensores o microactuadores, debido a que se podría generar más potencia de la demandada por el sistema. Además las partes móviles del aerogenerador traen consigo un mantenimiento periódico, lo cual podría ser un inconveniente si éste está ubicado en un lugar de difícil acceso<sup>25</sup>.

Otro mecanismo mencionado es la generación de energía por medio de la electrostática, el cual no es conveniente para este proyecto ya que se necesita de un flujo a un número considerable de Reynolds para poder generar una mayor fuerza y vencer la fricción de las partes mecánicas del conjunto. Sin embargo, como se trabajó a un régimen laminar con un Reynolds tan bajo en las simulaciones no es conveniente emplear este mecanismo.

Por último, los mecanismos piezoeléctricos ya mencionados en el marco teórico y en el estado del arte solo necesitan de cierta deformación mecánica para lograr altos picos de voltaje con una potencia y una corriente baja, lo cual los convierte en el mecanismo ideal para la producción de energía con el fin de alimentar algún tipo de MEMS. A pesar de esto, la transducción de energía piezoeléctrica dependerá directamente del material empleado y de las dimensiones que se manejen; como se producen picos de voltajes dependiendo de la magnitud de la tensión mecánica, es de gran importancia adecuar la electricidad generada a una tensión determinada. (Jauvtis & Williamson, 2003).

Para este diseño se empleó la generación de energía mediante la piezoelectricidad, además gracias a una matriz de selección en donde se establecieron las constantes piezoeléctricas más importantes, se obtuvo que el material ideal a emplear es el cerámico PZT-5H.

---

<sup>25</sup>Tomado de : <http://twenergy.com/energia-eolica/desventajas-de-la-energia-eolica-477>

Para el dimensionamiento de la cerámica anterior se empleará los estudios realizados en el trabajo “*Vibration and Flow Energy Harvesting using Piezoelectric*”(Gao Xiaotong, 2011a), en donde se plantea el piezoeléctrico de la siguiente manera:

2 láminas que funcionan como electrodos de  $127\mu\text{m}$  de espesor, con  $31 \times 10\text{mm}$  sobre una placa de acero inoxidable tipo 304 del fabricante “*TRINITY BRAND INDUSTRIES, INC*” de  $75\mu\text{m}$  de espesor con las mismas dimensiones generales del piezoeléctrico ( $31 \times 10\text{mm}$ ).

## **6. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DISEÑO CONCEPTUAL.**

Mediante una recopilación desde lo planteado en los resultados y análisis realizados, se pretende establecer las características generales del diseño del micro-generador. Adicional a esto, se realizó una evaluación para observar el voltaje, corriente y potencia a diferentes Reynolds que se comprenden desde 150 hasta los 600. Además, dentro del ANEXO (6) se muestra el comportamiento de la generación de voltaje, corriente y potencia para cada número de Reynolds establecido.

<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DISEÑO CONCEPTUAL</b>	
Configuración	Lineal
Número de cilindros	4
Separación entre cilindros (Relación P/D)	3,3
Relación de aspecto (H/D)	7
Reynolds de funcionamiento analizado	1
Tiempo de estabilización de funcionamiento.	39 segundos aproximadamente con $Re=150$ .

Tabla 8. Características generales del diseño conceptual.

## 7. CONCLUSIONES.

7.1 El método de transducción está en función siempre de los parámetros generales con el cual se esté diseñando, ya que aunque existen métodos más eficientes que el propuesto en este proyecto, el mecanismo de generación de energía mediante piezoeléctricos era el más conveniente en este caso, debido a que no se necesita un movimiento cíclico a altas frecuencias para generar un gran voltaje, sin embargo en casos de micro-generadores que funcionen a altos números de Reynolds, podría emplearse otros métodos. A pesar de todo, el mayor problema de los aerogeneradores en general es el mismo: No se puede asegurar que siempre existe un flujo continuo de viento, por lo cual los parámetros de funcionamiento de todos conllevan a un margen cerrado de tiempo efectivo de producción de energía, esto se debe a que una velocidad más baja que la establecida en las características de funcionamiento produciría una cantidad de energía casi despreciable.

7.2 Para diferentes casos de estudios en donde exista cualquier tipo de interacción fluido-estructura es importante comprender que las herramientas de CFD tan solo lanzan resultados numéricos en función de los parámetros de entrada con cierto grado de error, debido a que las condiciones simuladas son aisladas, lo que quiere decir que se debe prestar suma atención a validar de una manera adecuada cualquier caso de estudio, ya que esto dará credibilidad y justificación a los resultados obtenidos. Mediante los pasos de validación en este trabajo se pudo evidenciar que aunque el diseño conceptual sea en 3 dimensiones, el fenómeno dominante de éste es bidimensional, lo que permitió el empleo de menor costo computacional para obtener resultados válidos.

7.3 La configuración (en este caso relación P/D) adecuada se obtuvo mediante los resultados de las simulaciones y la cuantificación de los mismos en la matriz de selección. El uso de este tipo de herramientas se hace necesario gracias a que se puede evaluar la funcionabilidad o importancia de un parámetro a emplear. Sin embargo, la selección de la configuración no determinará el comportamiento final del sistema, lo que quiere decir que no se está asegurando mediante ésta que el micro-generador funcione eficientemente, tan solo se propone emplear la configuración adecuada para unos parámetros establecidos.

7.4 Se establecieron los parámetros de funcionamiento y operación del micro-generador de manera conceptual mediante simulaciones en CFD, las cuales se llevaron a cabo a través del uso de diferentes números de Reynolds, logrando visualizar de esta manera el comportamiento del sistema ante ráfagas de viento de diferente intensidad. Sin embargo, como se pudo apreciar en estos resultados, la estabilización del funcionamiento del sistema se hace de forma demorada (24,8 segundos a  $Re=600$ ), lo cual significaría una clara desventaja ya que no se podría asegurar por sí solo que el sistema este expuesto a estas condiciones durante un mínimo periodo continuo. Aunque no fue posible la construcción de un prototipo con el cual se pudieran contrastar los resultados obtenidos mediante las simulaciones debido a la dificultad de la adquisición del material piezoeléctrico propuesto para el diseño, se pudo evaluar el funcionamiento de este micro-generador mediante lo planteado en el marco teórico, lo que llevó a concluir que este sistema es muy poco eficiente debido a la baja corriente producida.

Por esto se hace necesario el empleo de un tratamiento eléctrico, en donde se adecúe la energía almacenada, ya que por sí solo éste micro-generador es menos eficiente frente otros similares ya desarrollados y los cuales funcionan a Reynolds mayores; sin embargo el diseño planteado aquí es funcional. Futuros estudios pueden ser planteados para determinar una mayor eficacia de producción de energía y potencia a partir del incremento del número de Reynolds, pero al incrementar éste, la configuración lineal con  $P/D=3,3$  podría no ser la más adecuada, por lo que se sugiere que se lleve a cabo un nuevo estudio a las relaciones  $P/D$  descritas en este proyecto.

## 8. REFERENCIAS

- Arias, E. (2011). Instituto Politécnico Nacional. *cic.ipn.mx*.
- Calhoun, D. (2002). A Cartesian Grid Method for Solving the Two-Dimensional Streamfunction-Vorticity Equations in Irregular Regions. *Journal of Computational Physics*, 176(2), 231–275. doi:10.1006/jcph.2001.6970
- Energy, W. (2008). Introducing the *microWindbelt*, 2008.
- Física, A. E., Antônio, A., Alves, H., & Pereira, P. (2010). Cerámicas piezoeléctricas : funcionamiento y propiedades, 1–7.

- Gao Xiaotong. (2011a). Vibration and Flow Energy Harvesting using Piezoelectric, *Thesis*(March), 179. doi:10.1016/S0889-9746(03)00051-3
- Gao Xiaotong. (2011b). Vibration and Flow Energy Harvesting using Piezoelectric, (March).
- García Navarro, J. G. P. B. (2013). EVALUACIÓN AEROELÁSTICA DE GENERADORES EÓLICOS, (Aeroelasticity), 82.
- GONZÁLEZ, R. A. (2011). FACULTAD DE INGENIERÍA Diseño y caracterización mediante el método de los elementos finitos de un transductor ultrasónico para aplicaciones médicas ., (Tesis), 105.
- Gu, Z., & Sun, T. (1999). On interference between two circular cylinders in staggered arrangement at high subcritical Reynolds numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80(3), 287–309. doi:10.1016/S0167-6105(98)00205-0
- Hall, U. (1999). MOTIONS , FORCES AND MODE TRANSITIONS IN VORTEX-INDUCED VIBRATIONS AT LOW, 813–851.
- Hobbs, W. B., & Hu, D. L. (2012). Tree-inspired piezoelectric energy harvesting. *Journal of Fluids and Structures*, 28, 103–114. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2011.08.005
- Jauvtis, N., & Williamson, C. H. K. (2003). Vortex-induced vibration of a cylinder with two degrees of freedom, 17, 1035–1042. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2008.11.001
- Li, H., & Sumner, D. (2009). Vortex shedding from two finite circular cylinders in a staggered configuration. *Journal of Fluids and Structures*, 25(3), 479–505. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2008.11.001
- Sumner, D., Richards, M. D., & Akosile, O. O. (2008). Strouhal number data for two staggered circular cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6-7), 859–871. doi:10.1016/j.jweia.2007.06.013
- Townley, A. (n.d.). VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING USING MEMS PIEZOELECTRIC GENERATORS Andrew Townley – Electrical Engineering, University of Pennsylvania Advisor: Gianluca Piazza.
- Une-en, E. D. E. L. D. (2009). española.
- Williamson, C., & Brown, G. (1998). A series in  $1/\sqrt{Re}$  to represent the Strouhal–Reynolds number relationship of the cylinder wake. *Journal of Fluids and Structures*, 1073–1085.

## **SOBRE LOS AUTORES**

### **Autor Uno y Autor Dos**

Estudiantes de Ingeniería Aeronáutica, decimo semestre.

## ANEXO 2

### CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA PARA LA VALIDACIÓN.

A continuación en la Tabla 30 se pueden observar el número de elementos correspondientes a cada una de las etiquetas mostradas en la Figura 23.

Tabla 30. Número de elementos y características de las mallas.

<b>Etiqueta</b>	<b>Refinamiento bajo (malla gruesa)</b>	<b>Refinamiento medio (malla normal)</b>	<b>Refinamiento alto (malla fina)</b>
<b>A</b>	24 elementos, “Double first length 0.7”	36 elementos, “Double first length 0.5”	54 elementos, “Double first length 0.3”
<b>B</b>	24 elementos, “Double first length 0.3”	36 elementos, “Double first length 0.2”	54 elementos, “Double first length 0.12”
<b>C</b>	20 elementos, “First length 0.2”	30 elementos, “First length 0.1”	45 elementos, “First length 0.09”
<b>D</b>	12 elementos	18 elementos	27 elementos
<b>E</b>	60 elementos, “First length 0.15”	90 elementos, “First length 0.1”	135 elementos, “First length 0.07”
<b>F</b>	24 elementos	36 elementos	54 elementos
<b>G</b>	48 elementos	72 elementos	108 elementos
<b>H</b>	20 elementos	30 elementos	45 elementos
<b>I</b>	24 elementos, “Double first length 0.07”	36 elementos, “Double first length 0.05”	54 elementos, “Double first length 0.03”

Tabla 31. Características de la malla normal.

<p><b>Mesh quality</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimum ortogonal quality=7,21608e-01</li> <li>• Maximum aspect ratio=1,07991e+01</li> </ul>
<p><b>Mesh size</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cells=14040</li> <li>• Nodes=14268</li> <li>• Faces= 28308</li> <li>• Partitions=1</li> <li>• 6 faces and 1 cell pone</li> </ul>

### ANEXO 3

### RESULTADOS.

#### CONFIGURACIÓN LINEAL

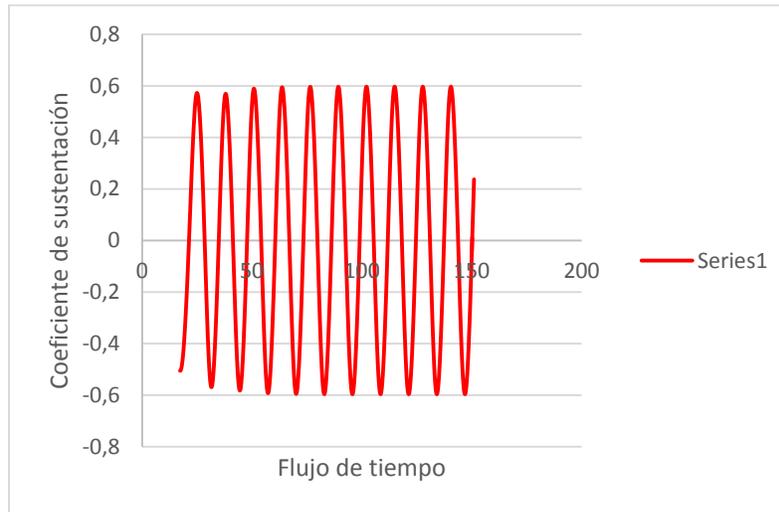


Figura 60. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración lineal.

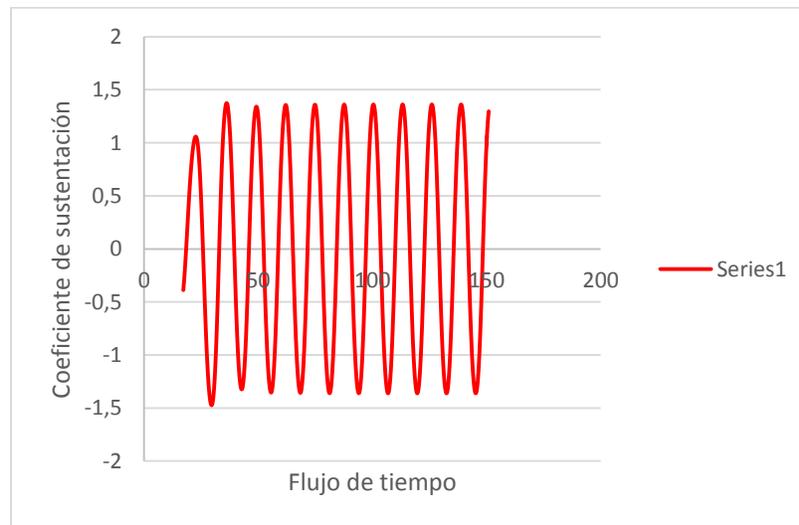


Figura 61. Coeficiente de sustentación cilindro aguas abajo; configuración lineal.

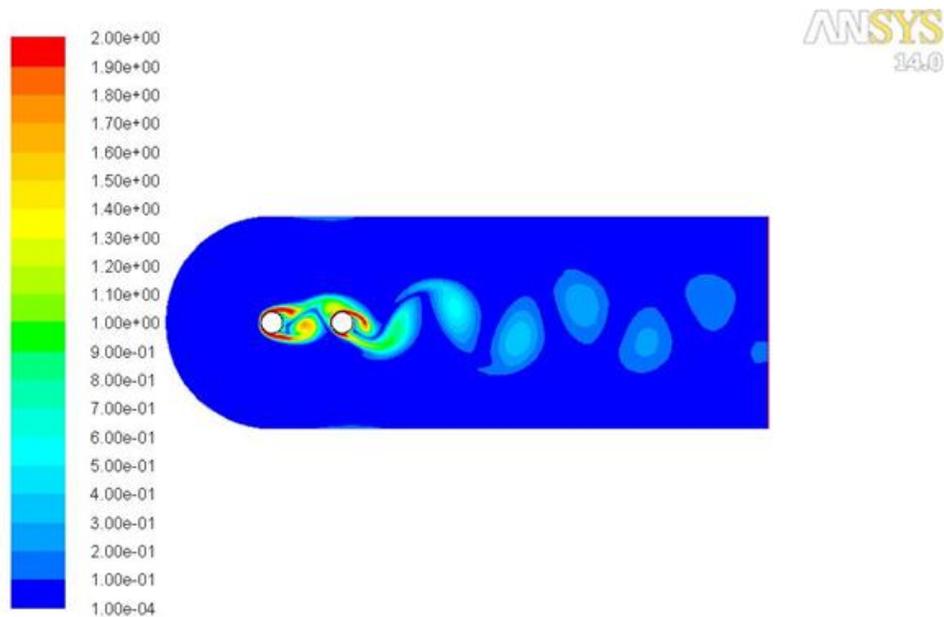


Figura 62. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal.

### CONFIGURACIÓN ESCALONADA A 15°.

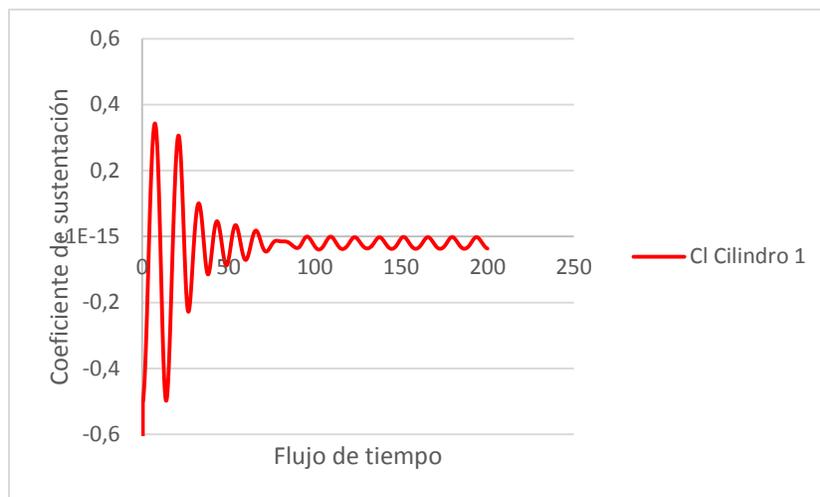


Figura 63. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración escalonada 15°.

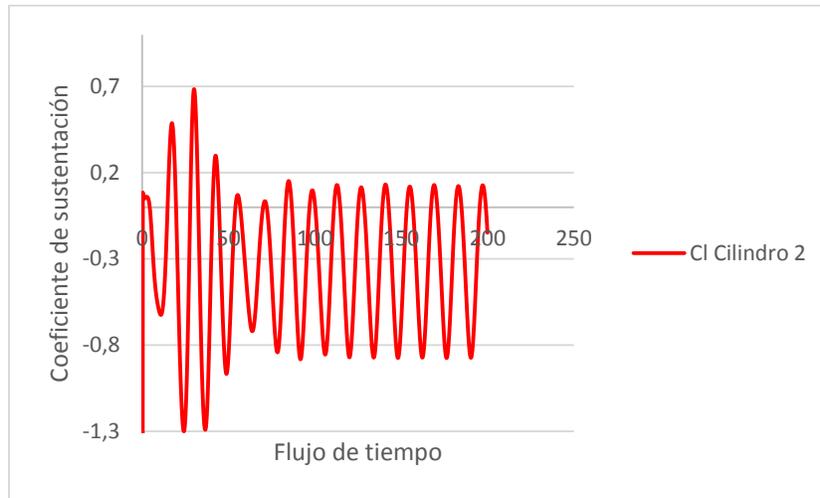


Figura 64. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración escalonada 15°.

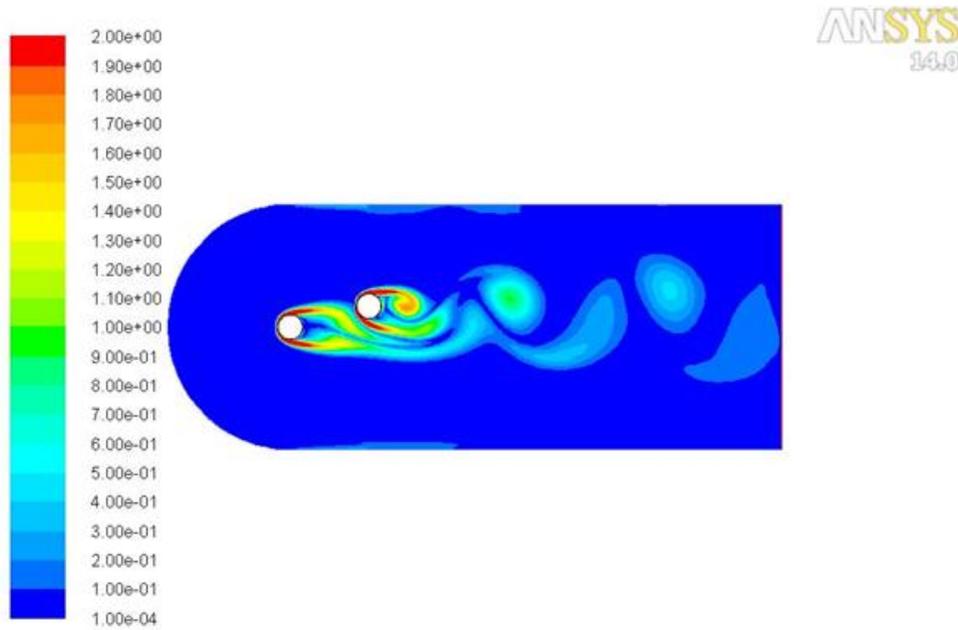


Figura 65. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración escalonada 15°.

## CONFIGURACIÓN ESCALONADA A 30°.

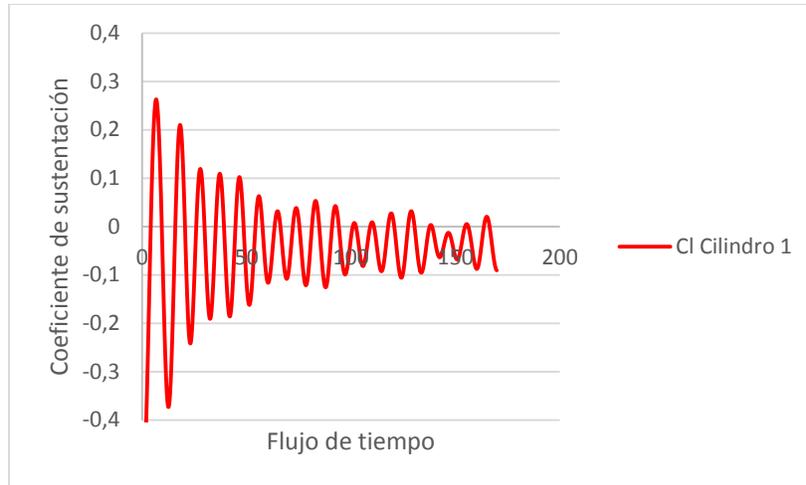


Figura 66. Coeficiente de sustentación cilindro aguas arriba; configuración escalonada 30°.

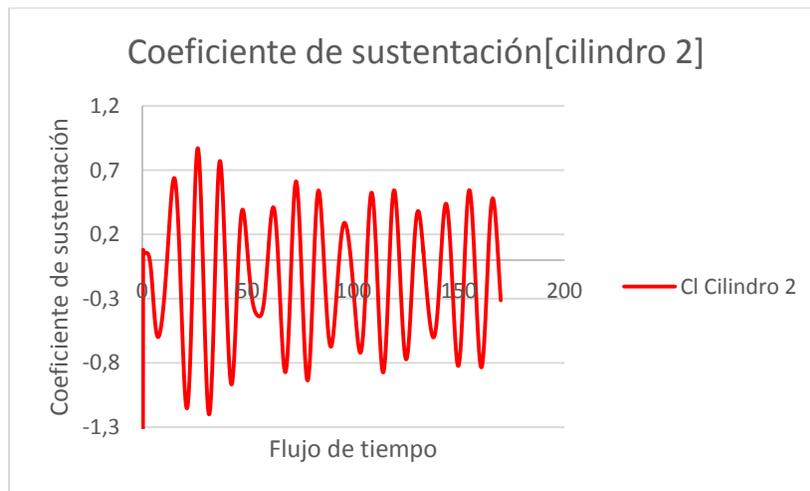


Figura 67. Coeficiente de sustentación cilindro aguas abajo; configuración escalonada 30°.

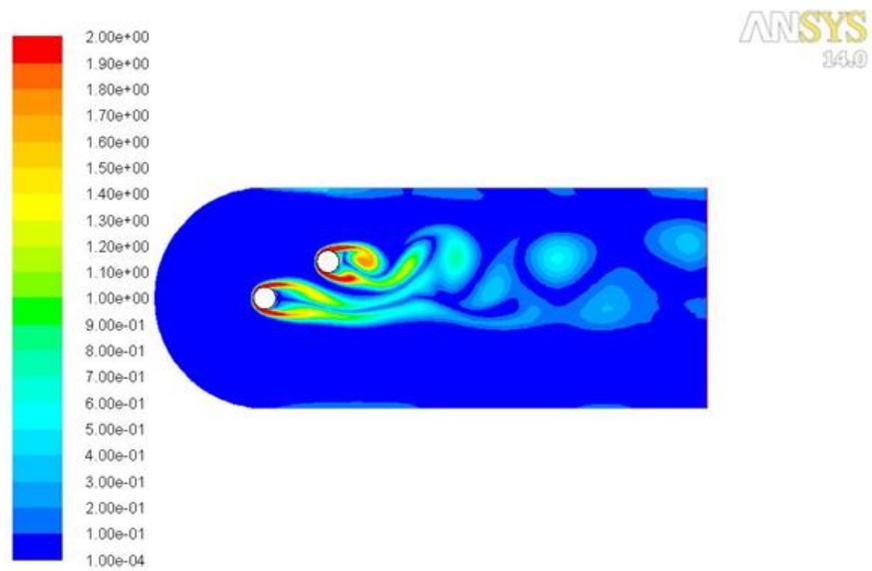


Figura 68. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración escalonada 30°.

## ANEXO 4

### ARREGLO DE CILINDROS EN LÍNEA.

#### CONFIGURACIÓN LINEAL

##### Configuración 1: 2 cilindros en línea:

- $P/D=2$

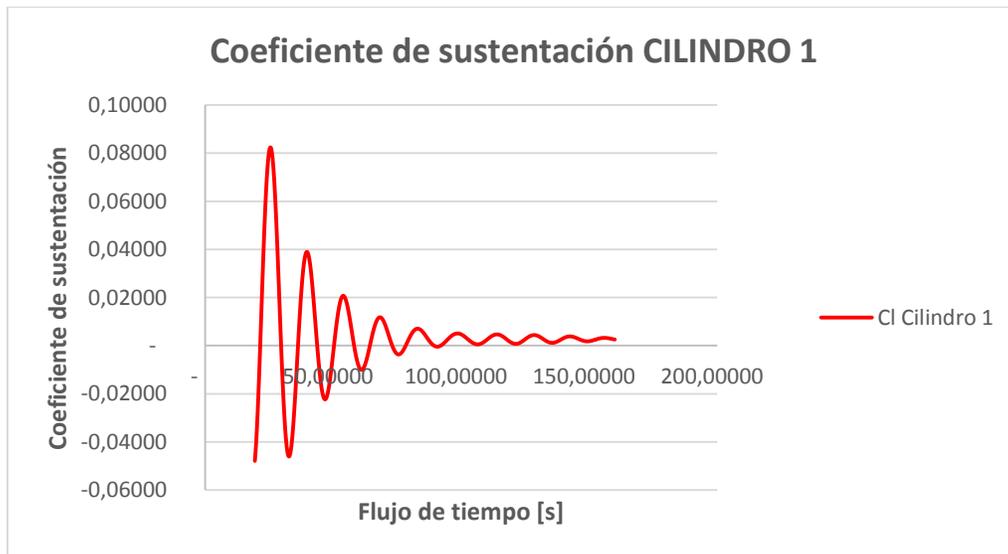


Figura 69. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2$ .



Figura 70. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=2$ .

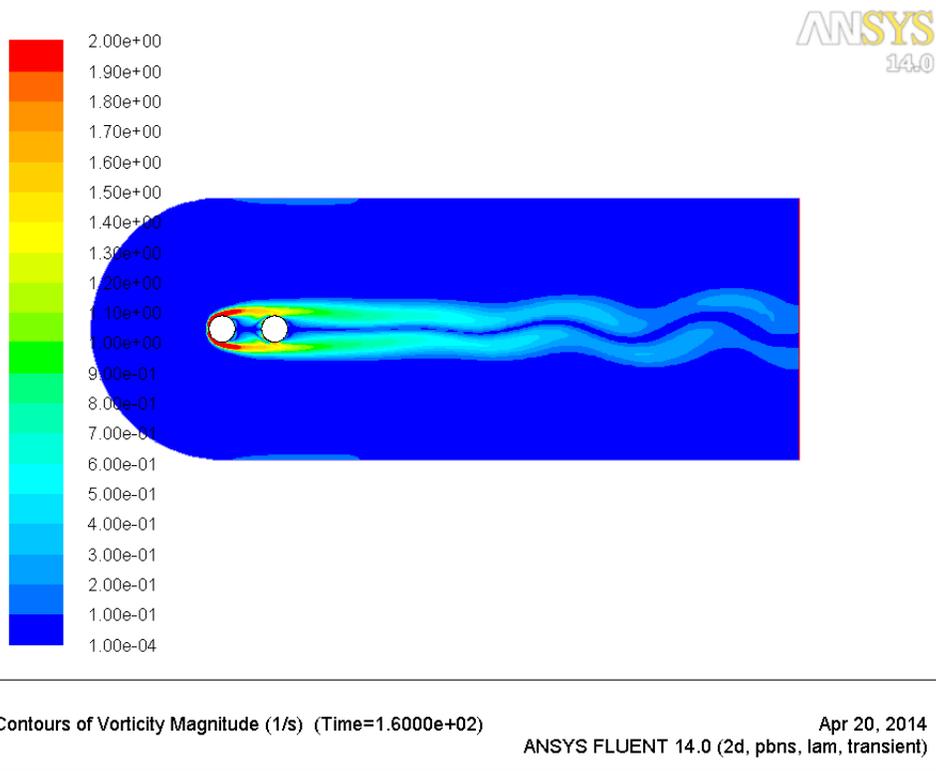


Figura 71. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=2.

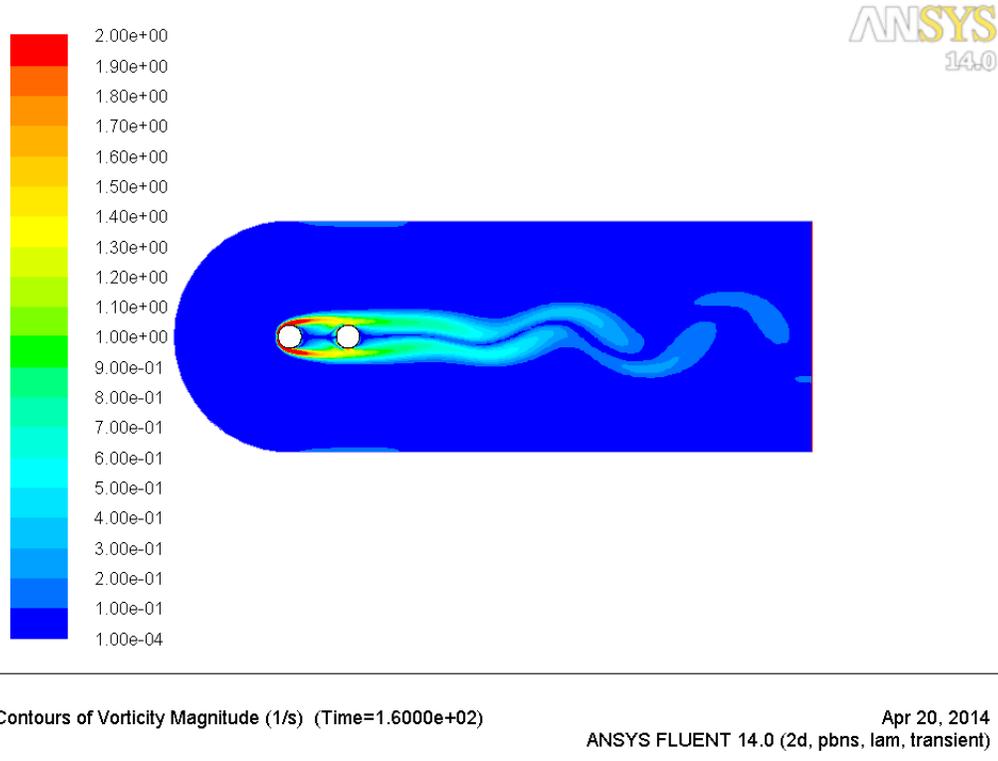
- P/D=2,5



Figura 72. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=2,5.



Figura 73. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=2,5.



Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=1.6000e+02)

Apr 20, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 74. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=2,5.

- $P/D=3,3$

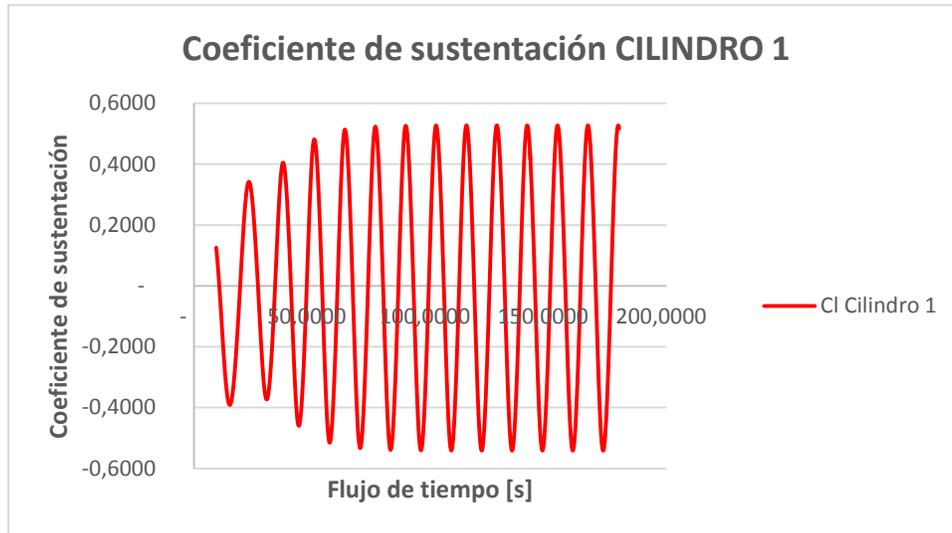


Figura 75. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=3,3$ .

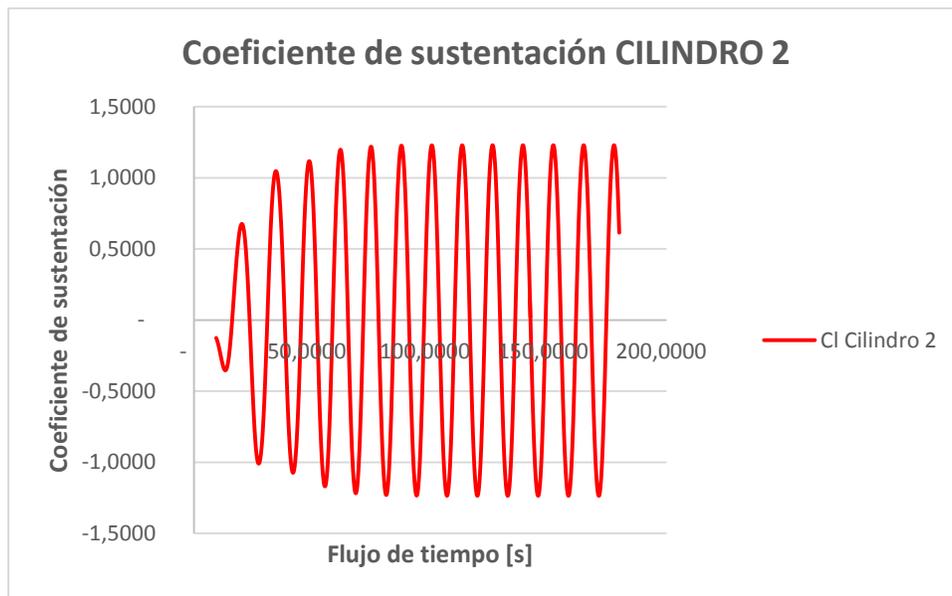
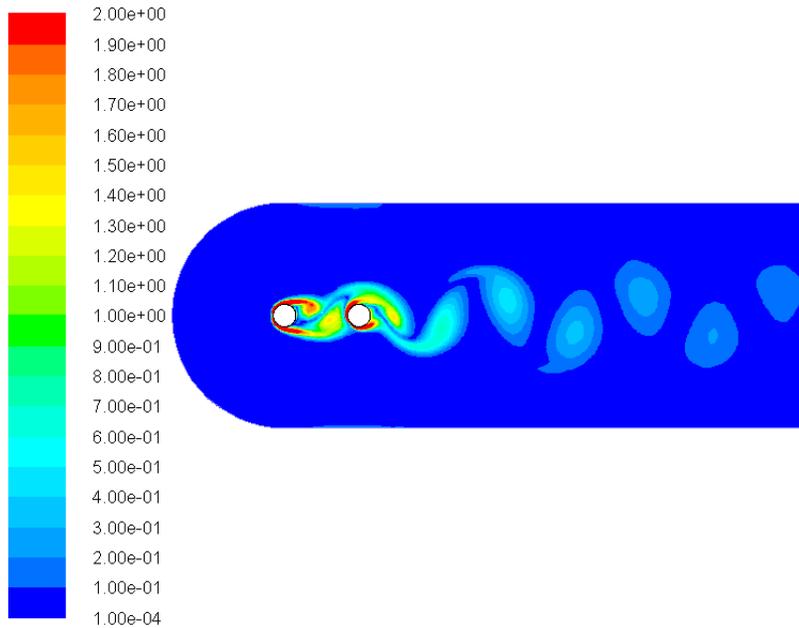


Figura 76. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros,  $P/D=3,3$ .



Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=1.8000e+02) Apr 20, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 77. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=3,3.

- **P/D=4**

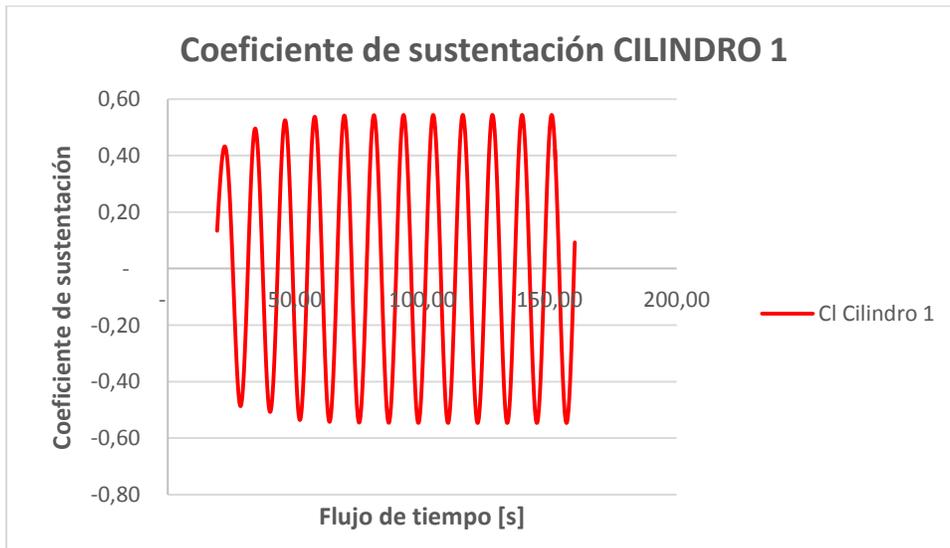


Figura 78. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=4.

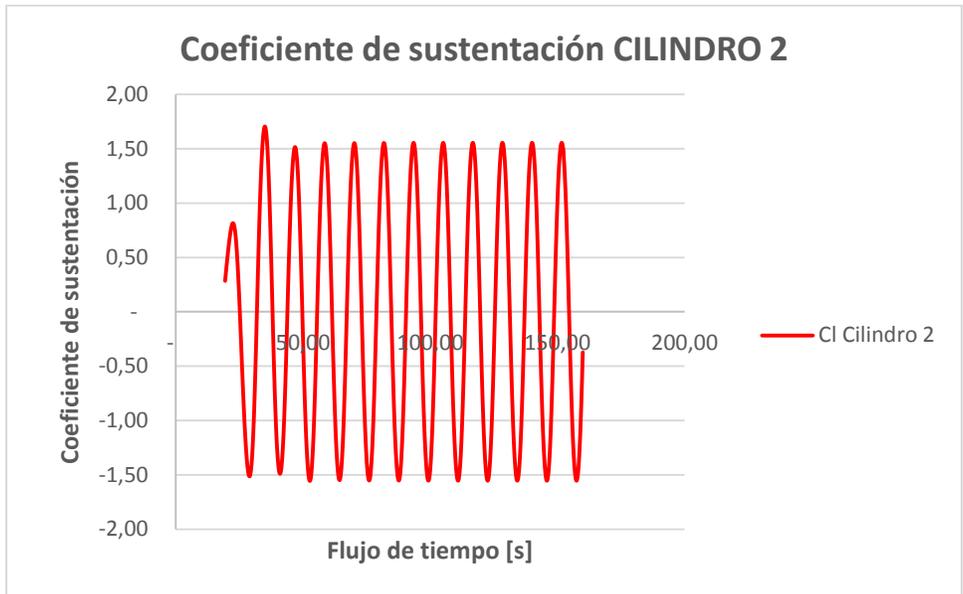
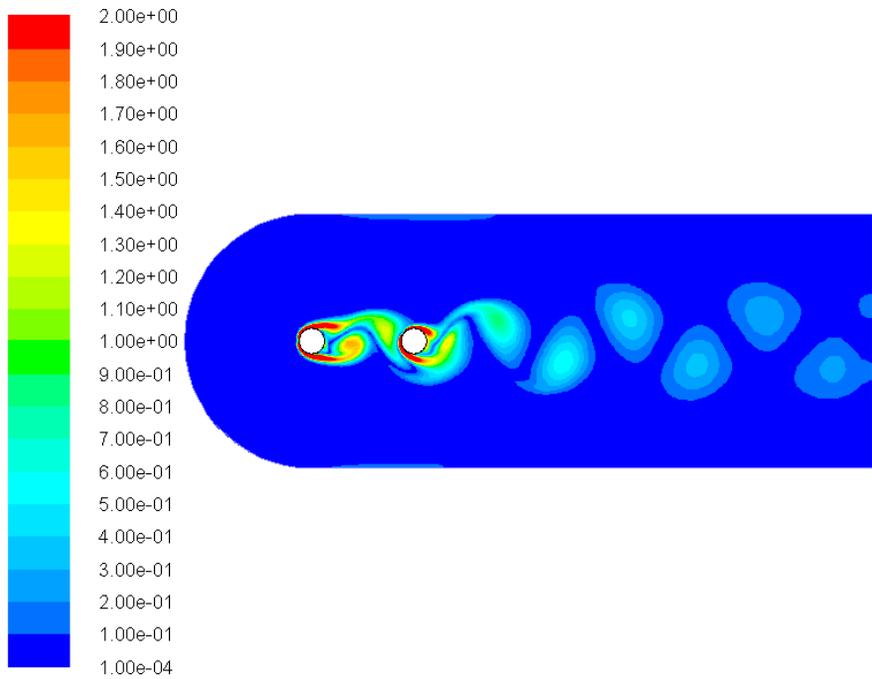


Figura 79. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=4.



Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=1.6000e+02) Apr 20, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 80. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 2 cilindros, P/D=4.

## Configuración 2: 3 cilindros en línea:

- $P/D=2$

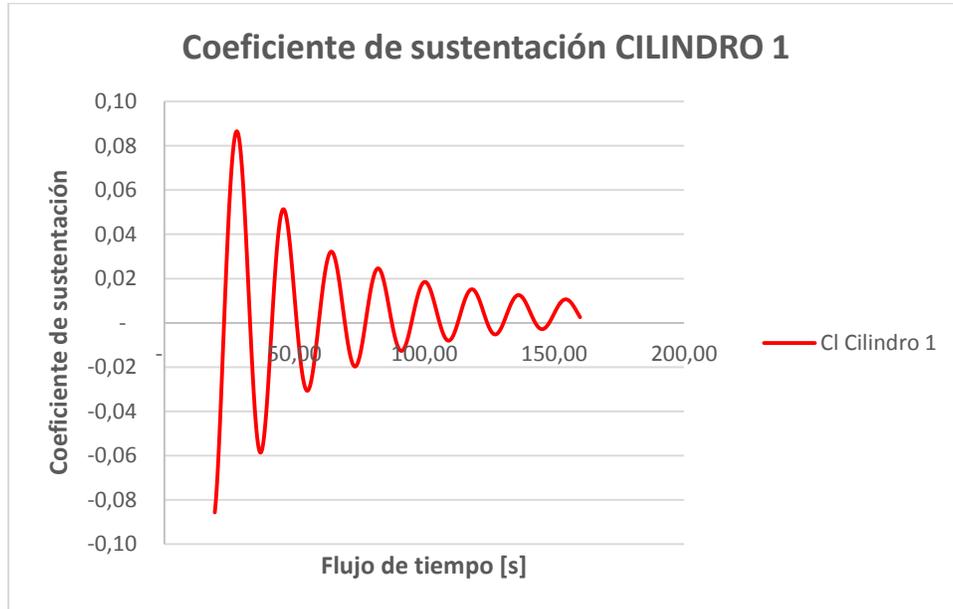


Figura 81. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

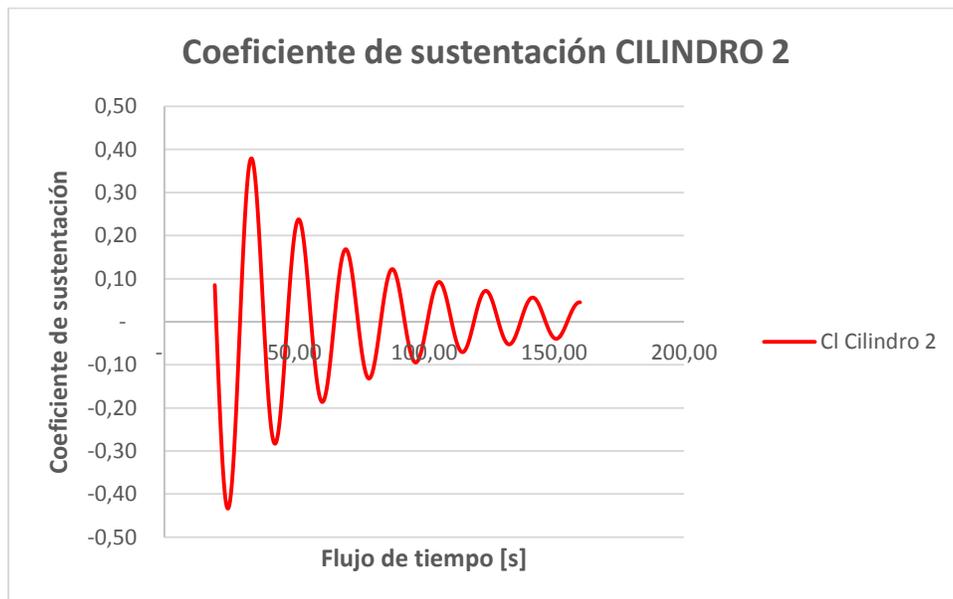


Figura 82. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2$ .

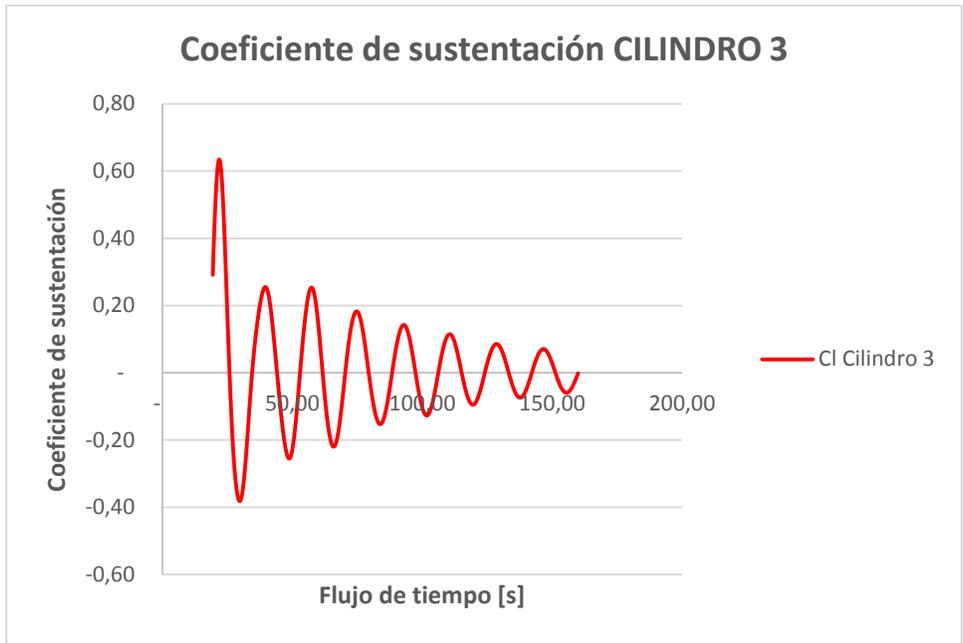


Figura 83. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros, P/D=2.

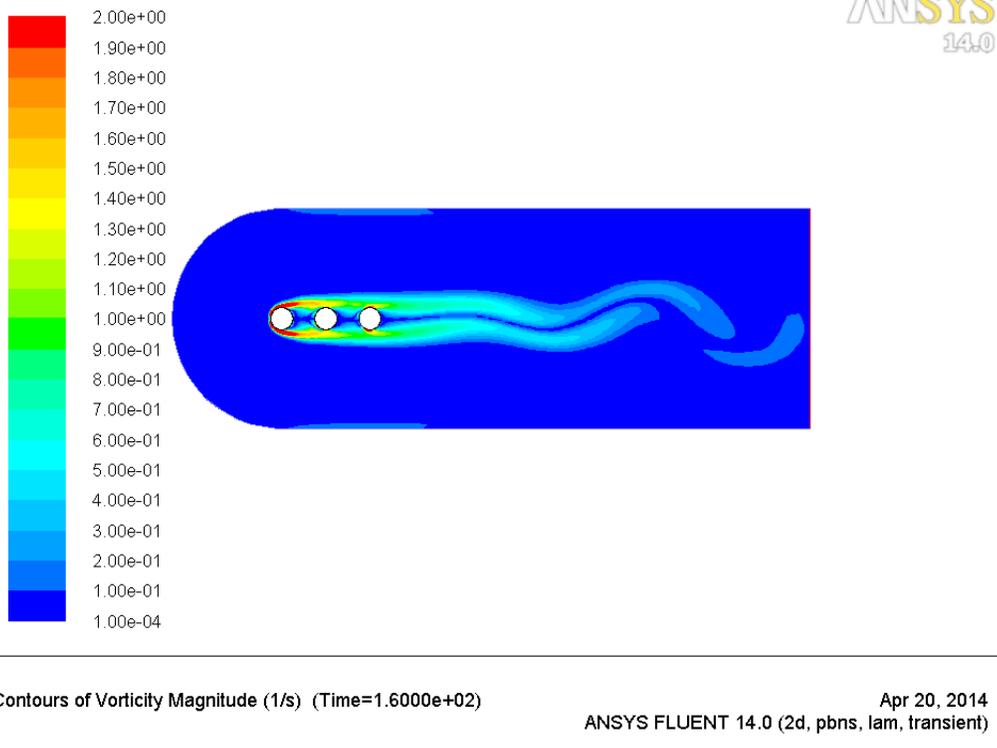


Figura 84. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros, P/D=2.

- $P/D=2,5$

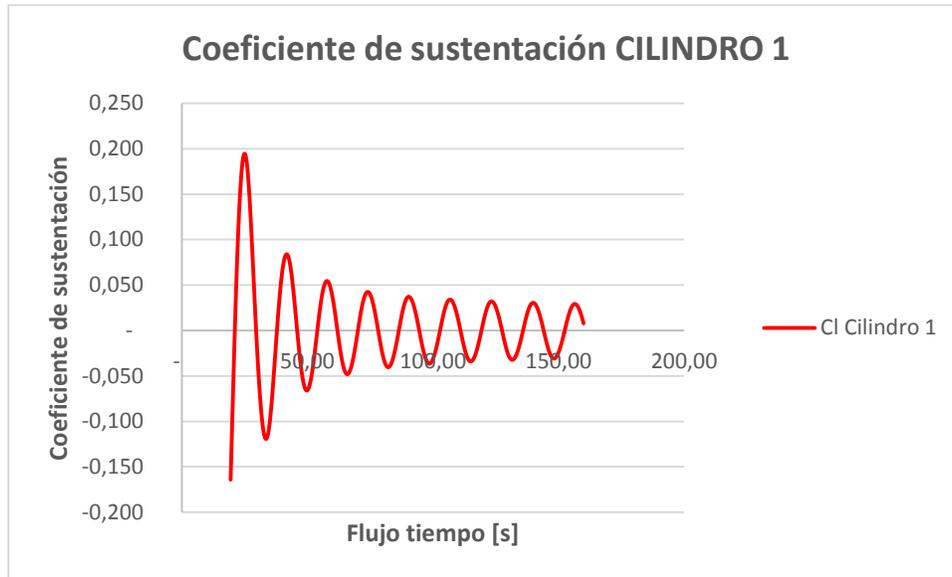


Figura 85. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2,5$ .

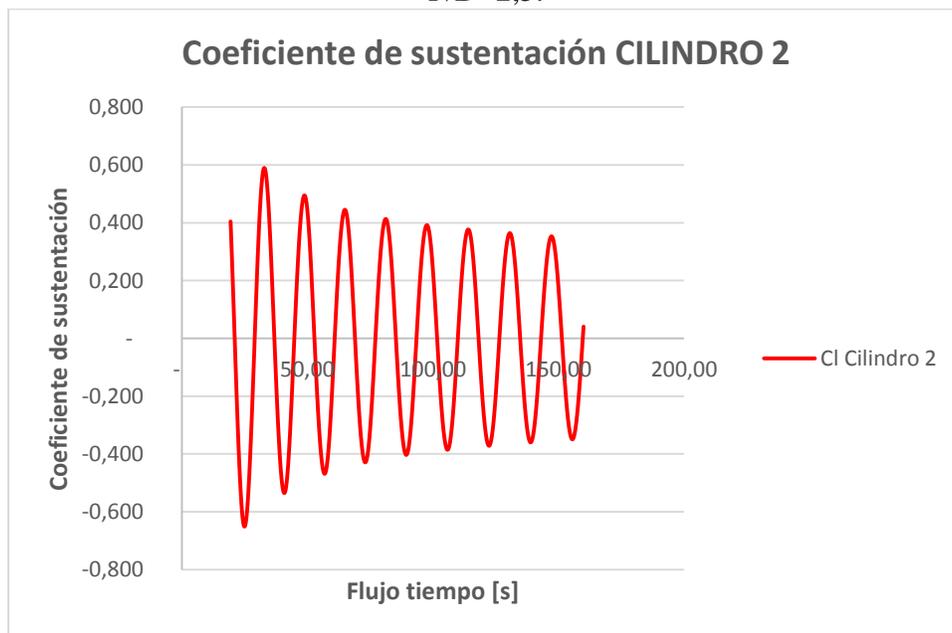


Figura 86. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=2,5$ .

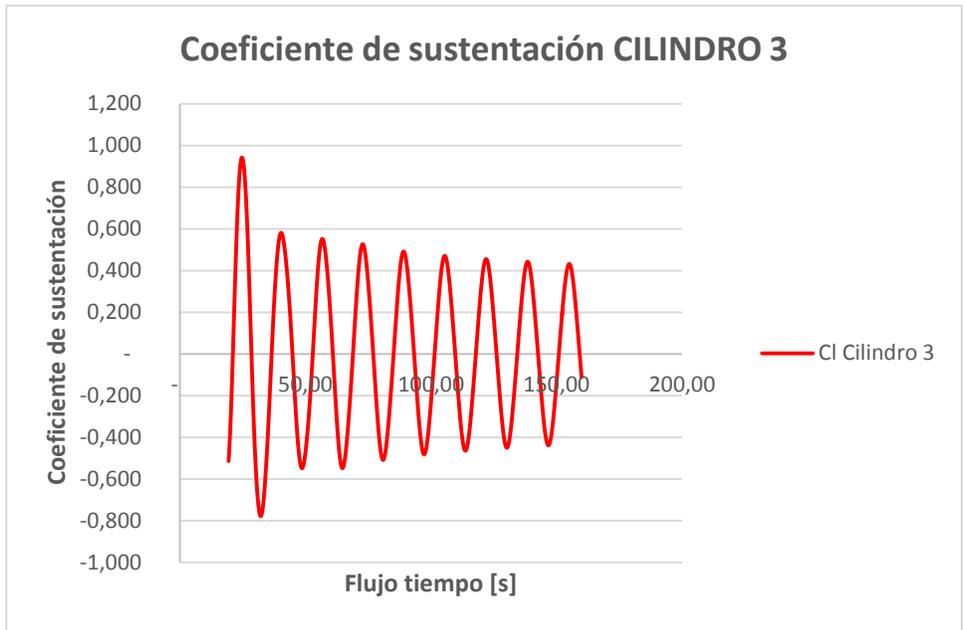


Figura 87. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros, P/D=2,5.

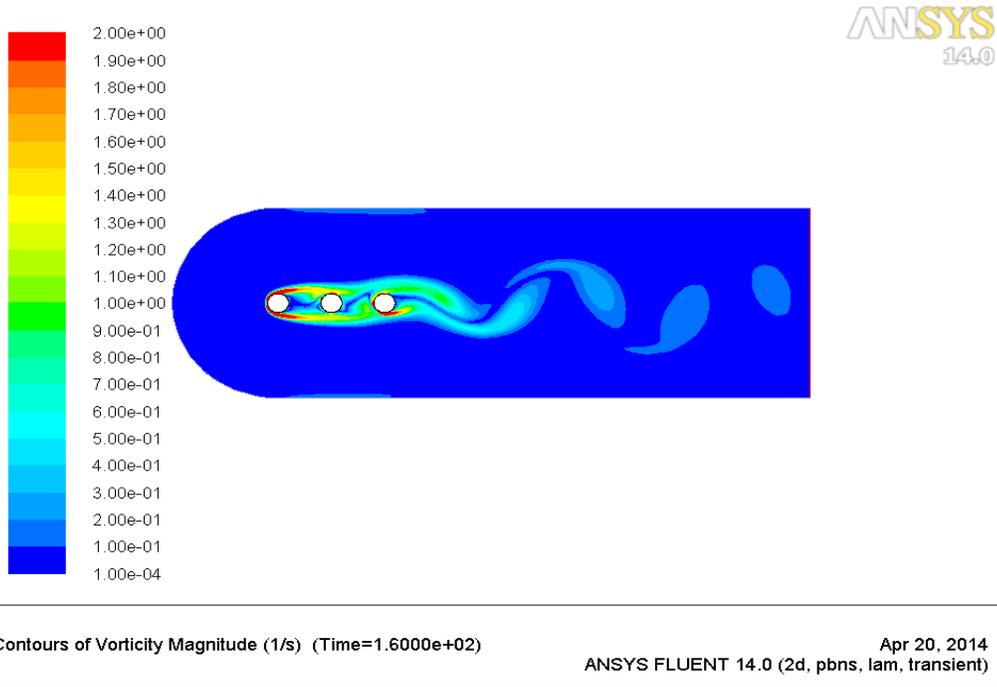


Figura 88. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros, P/D=2,5.

- $P/D=3,3$

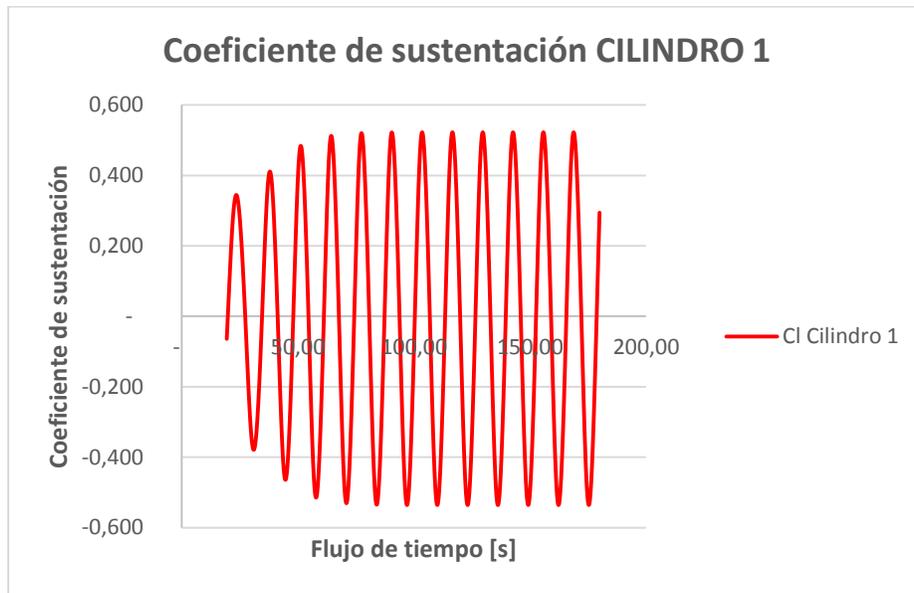


Figura 89. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

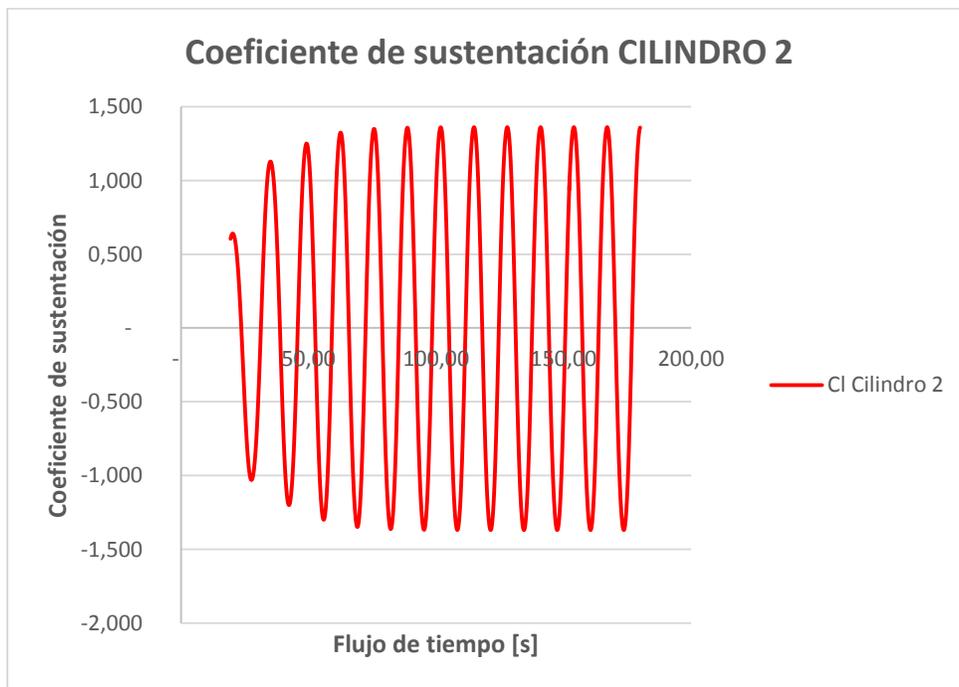


Figura 90. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

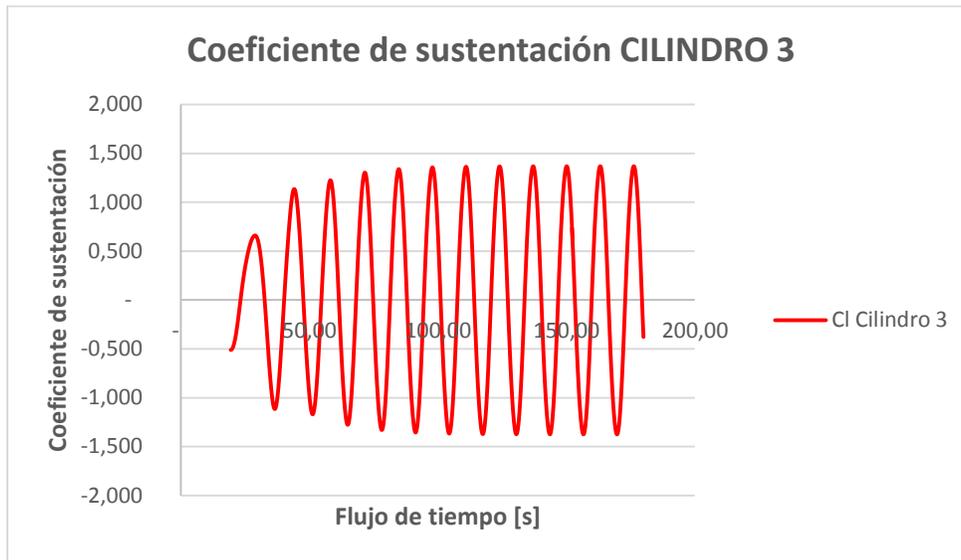


Figura 91. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

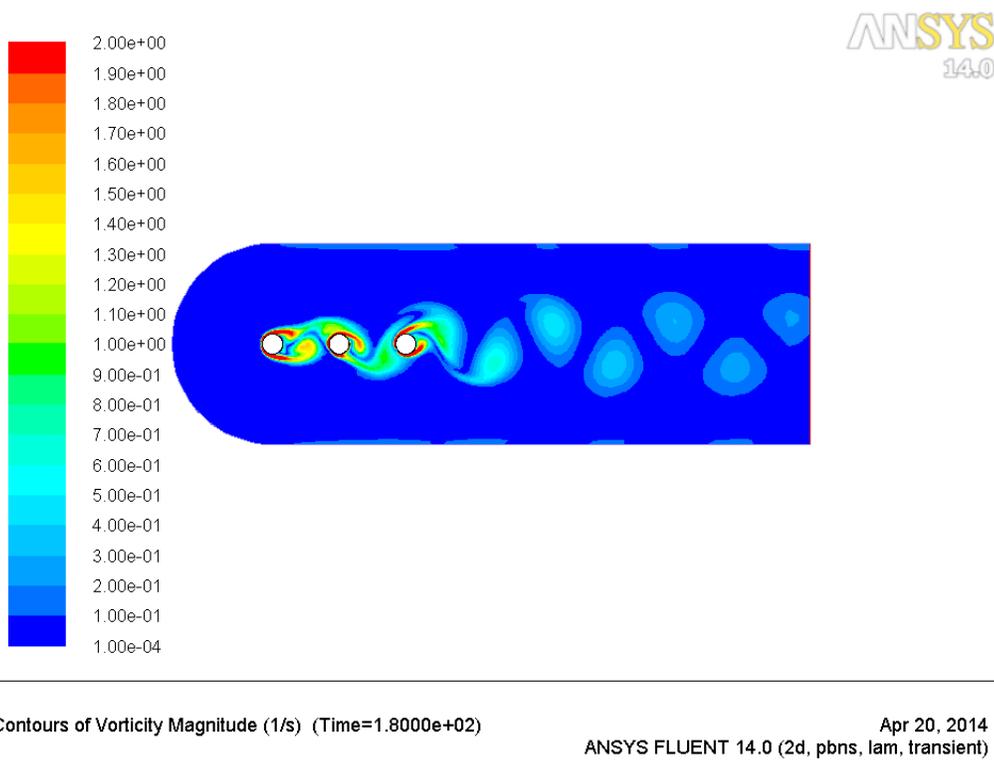


Figura 92. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=3,3$ .

- $P/D=4$

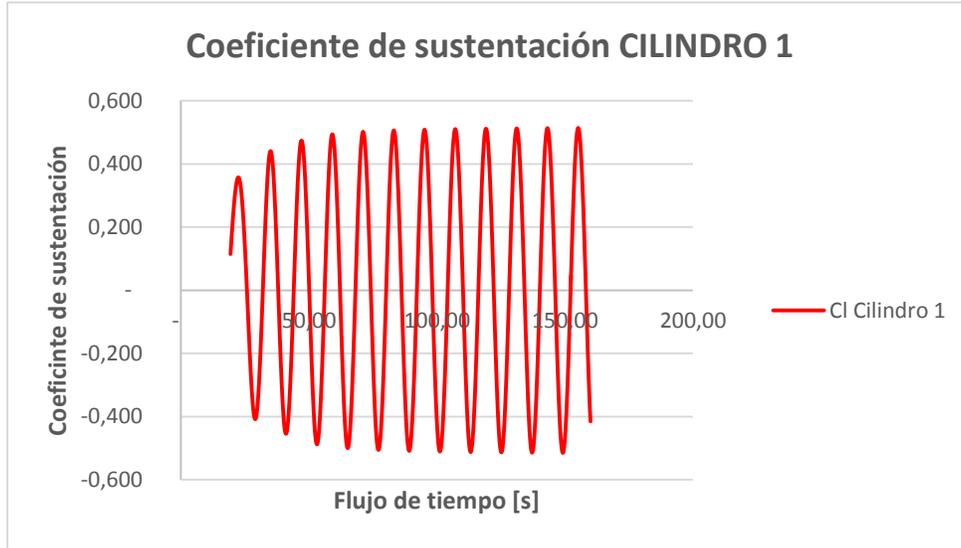


Figura 93. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

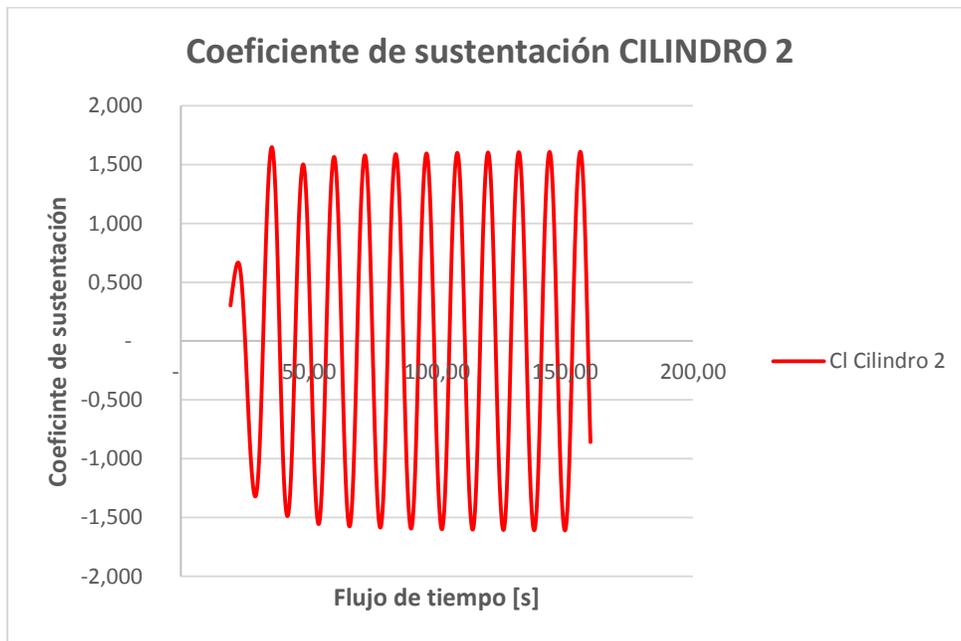


Figura 94. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 3 cilindros,  $P/D=4$ .

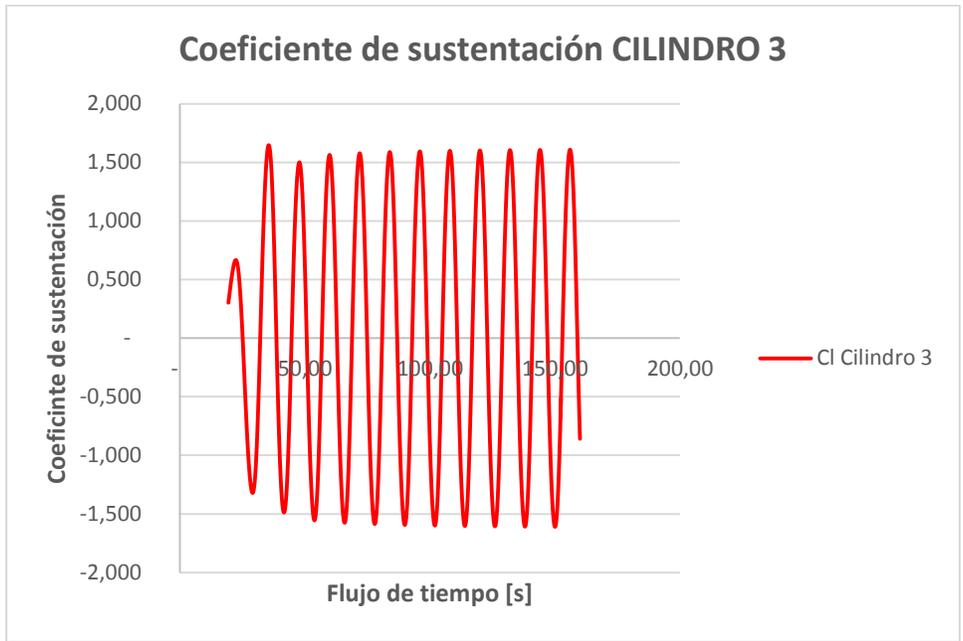


Figura 95. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 3 cilindros, P/D=4.

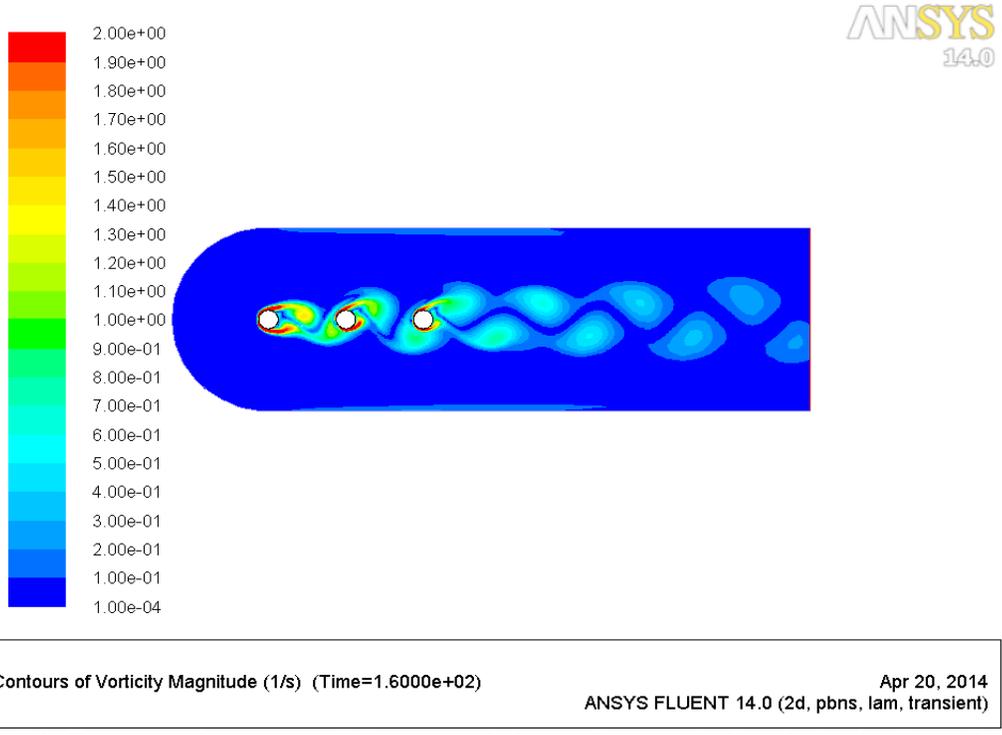


Figura 96. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 3 cilindros, P/D=4.

### Configuración 3: 4 cilindros en línea:

- $P/D=2$

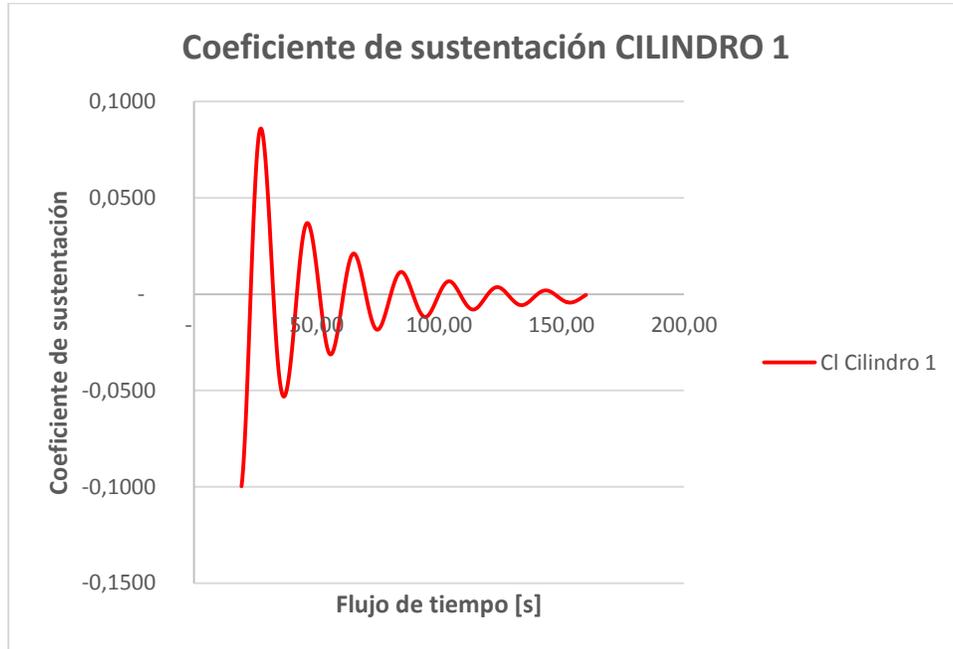


Figura 97. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

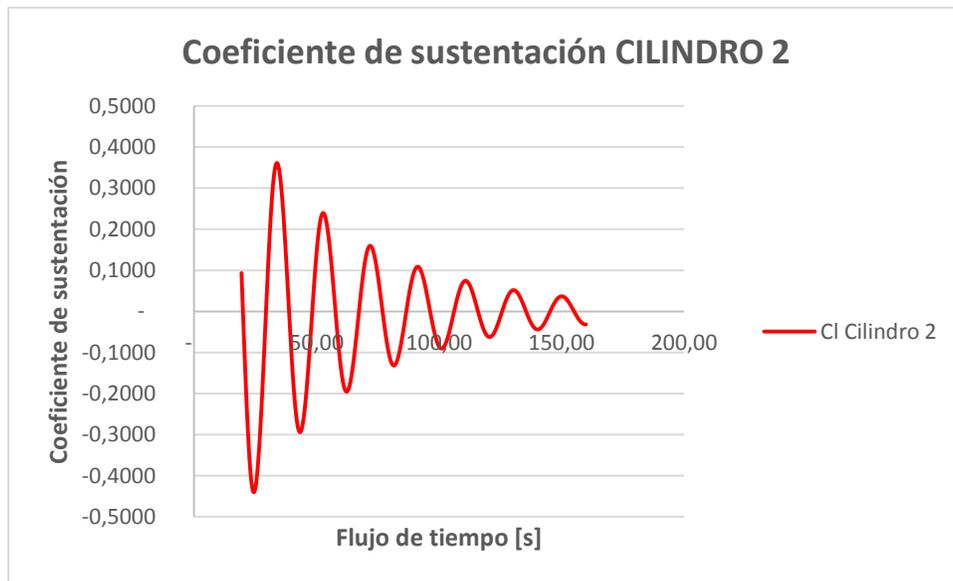


Figura 98. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

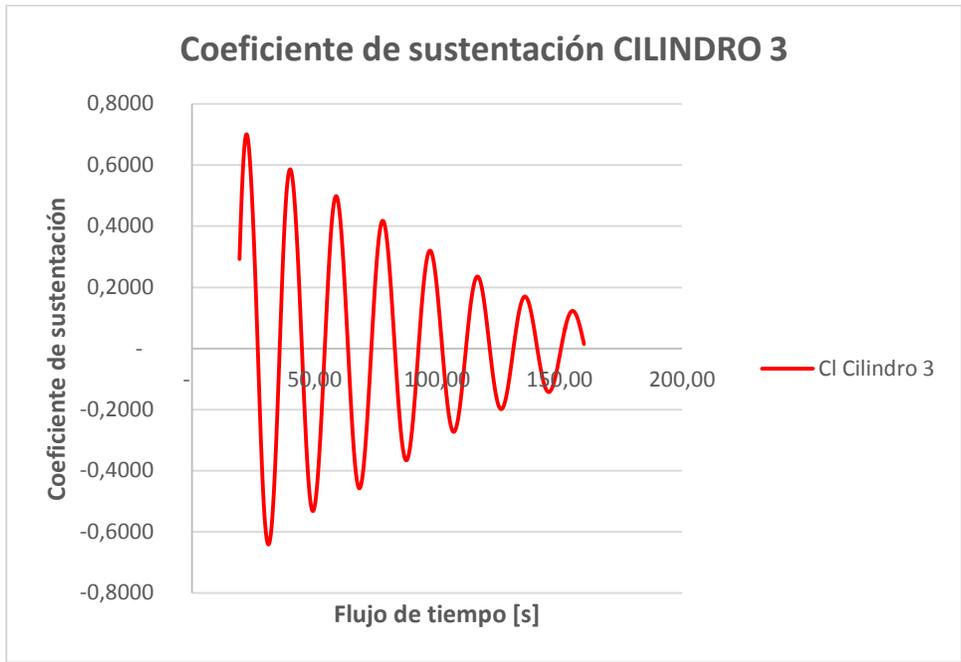


Figura 99. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=2.

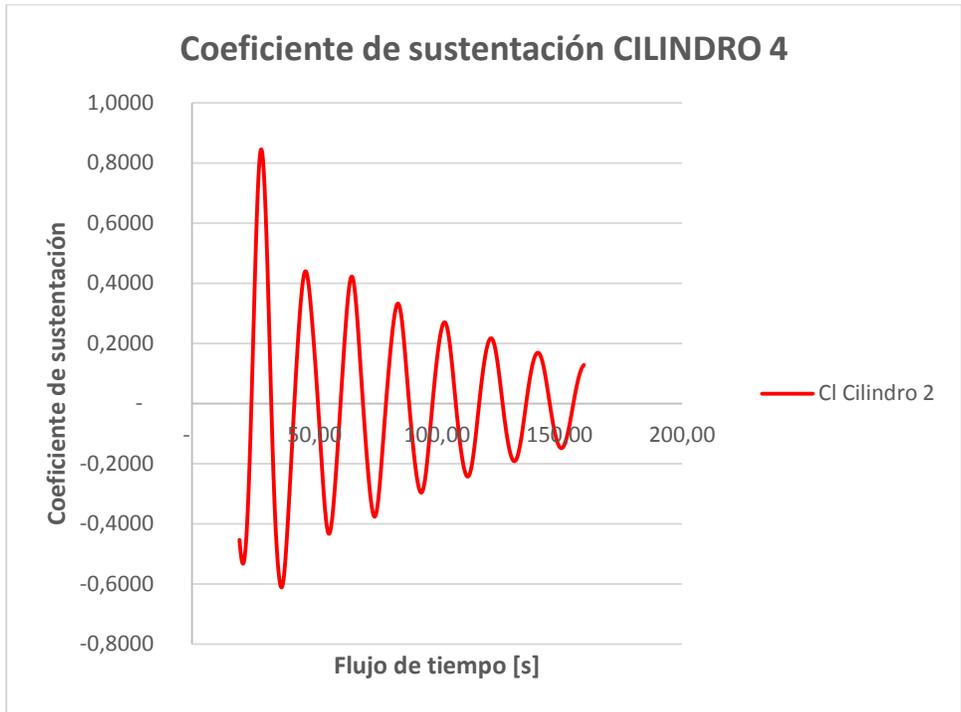
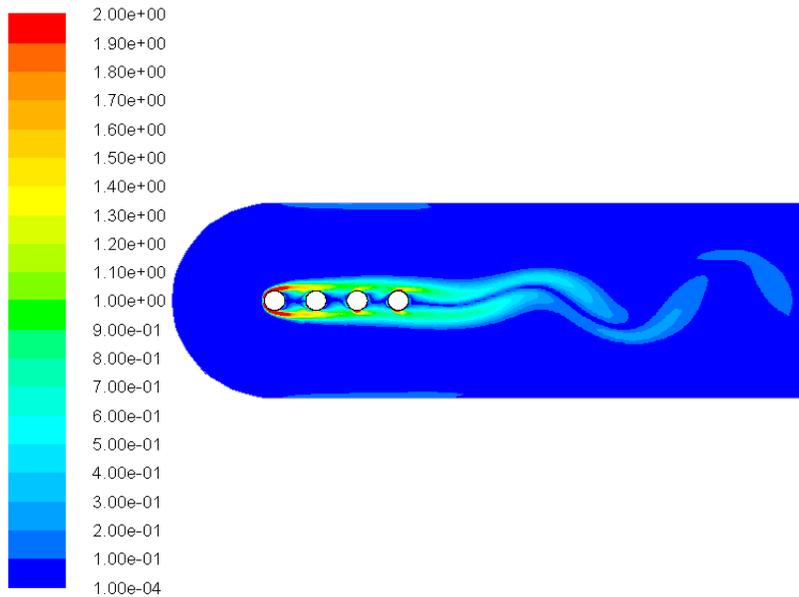


Figura 100. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=2.



Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=1.6000e+02)

Apr 28, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 101. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2$ .

- $P/D=2,5$

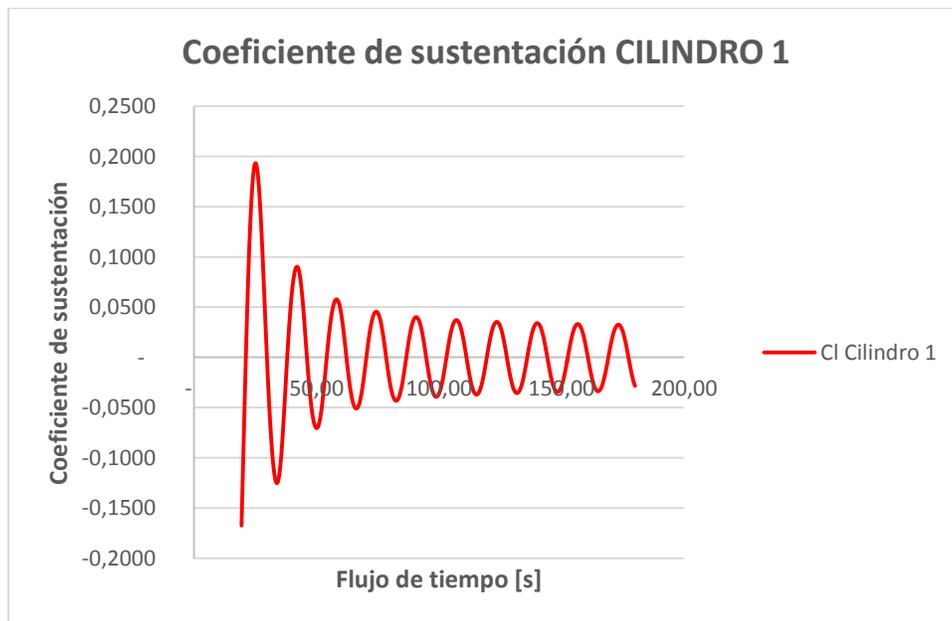


Figura 102. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

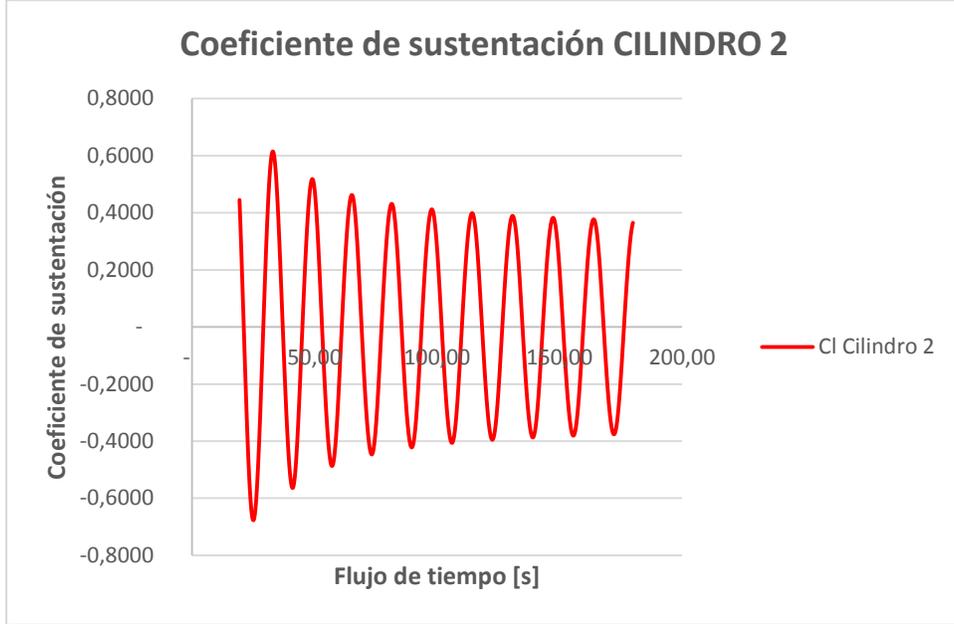


Figura 103. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

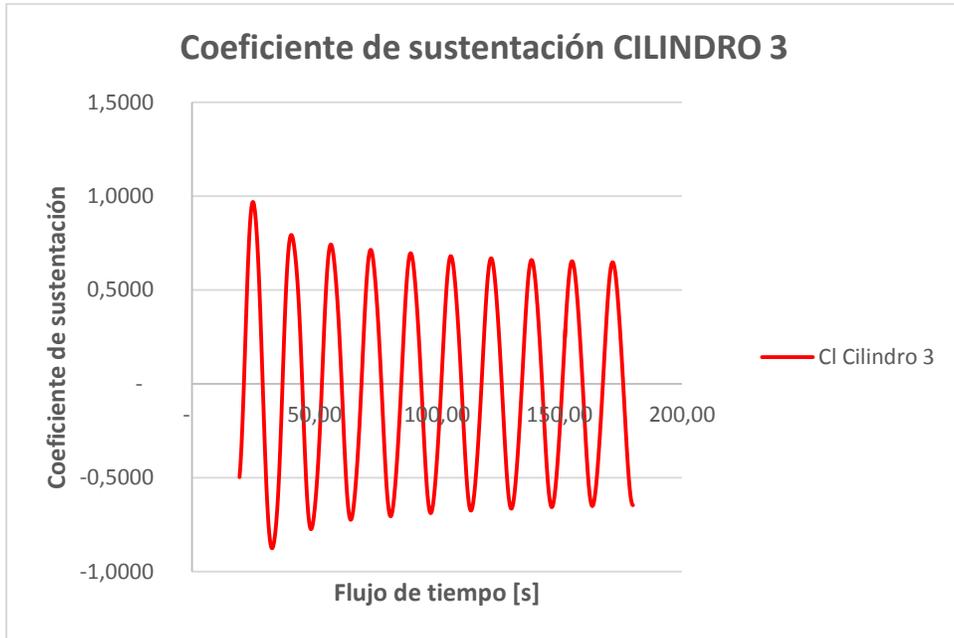


Figura 104. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .

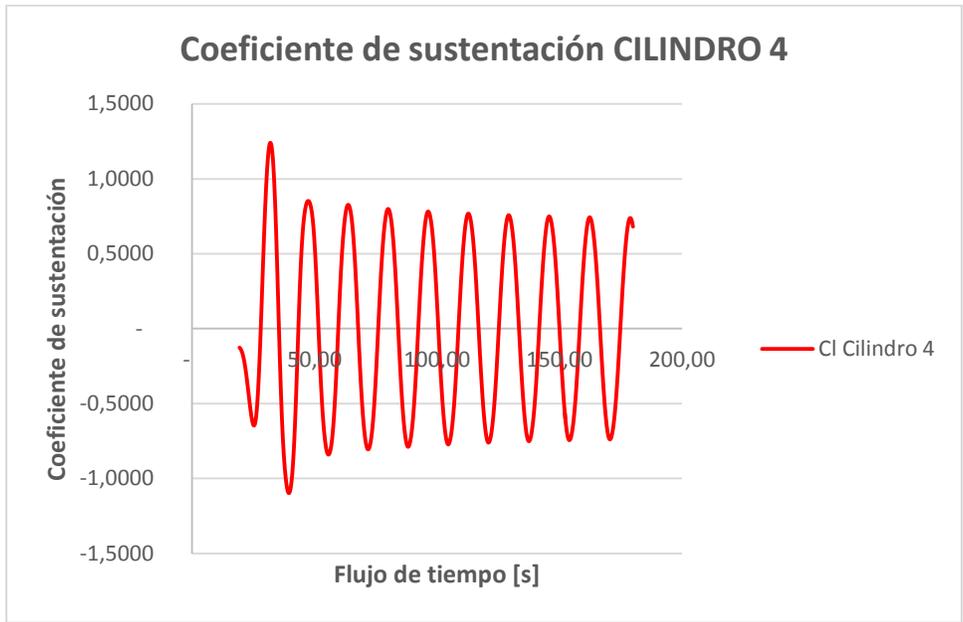
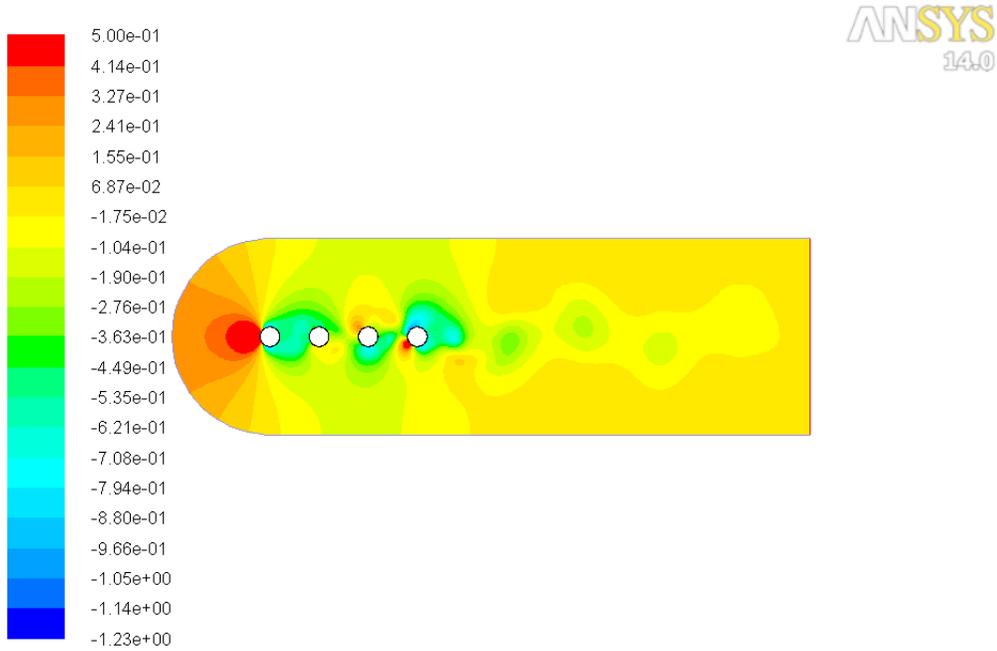


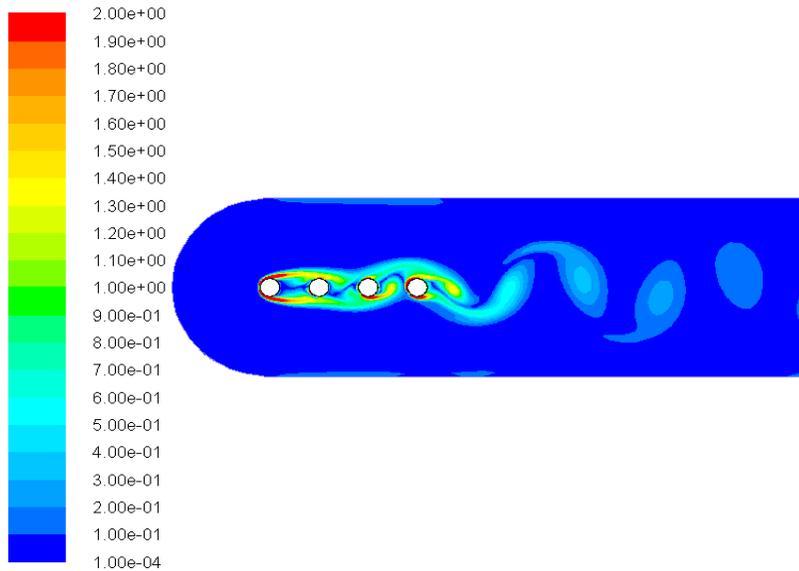
Figura 105. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .



Contours of Pressure Coefficient (Time=1.8000e+02)

Apr 28, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 106. Contorno de presiones; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=2,5$ .



Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=1.8000e+02) Apr 28, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 107. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=2,5.

- **P/D=3,3**

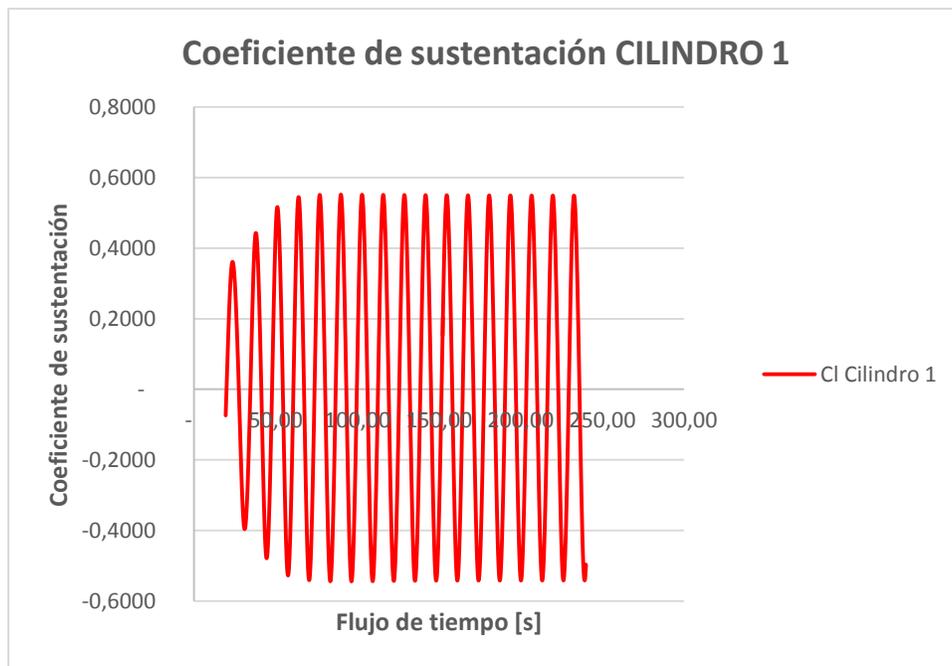


Figura 108. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=3,3.

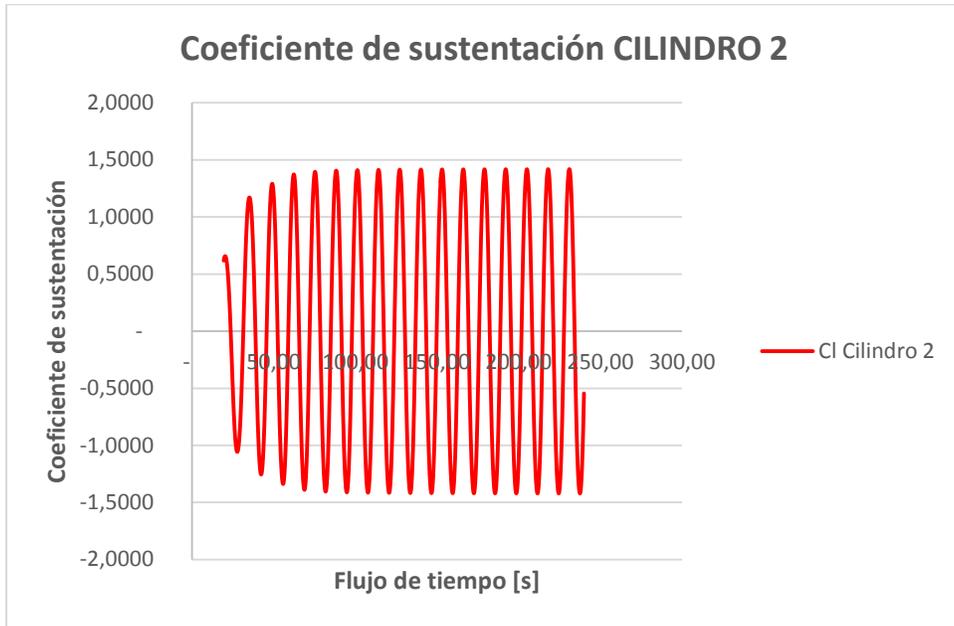


Figura 109. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

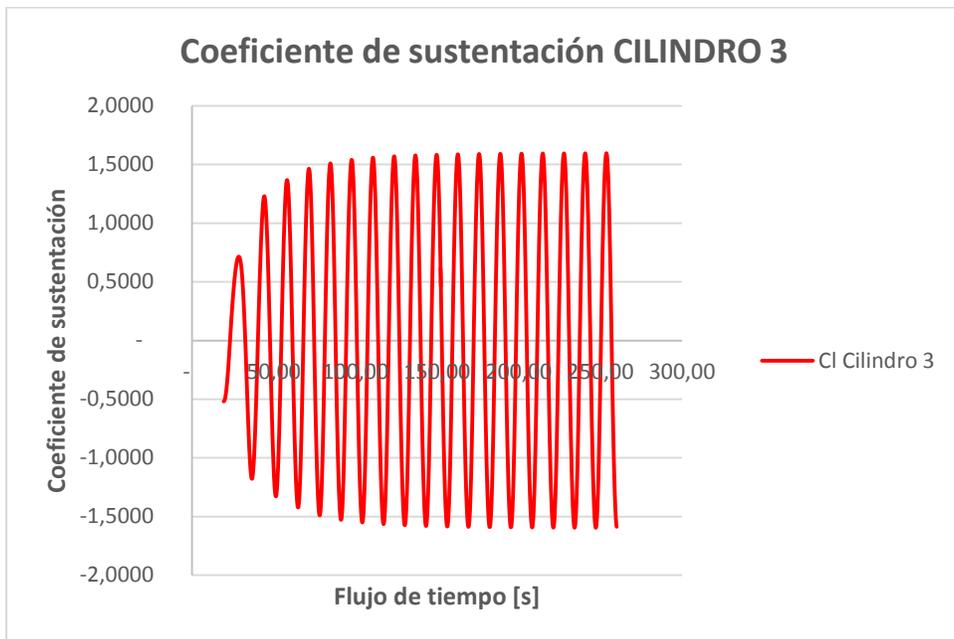


Figura 110. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ .

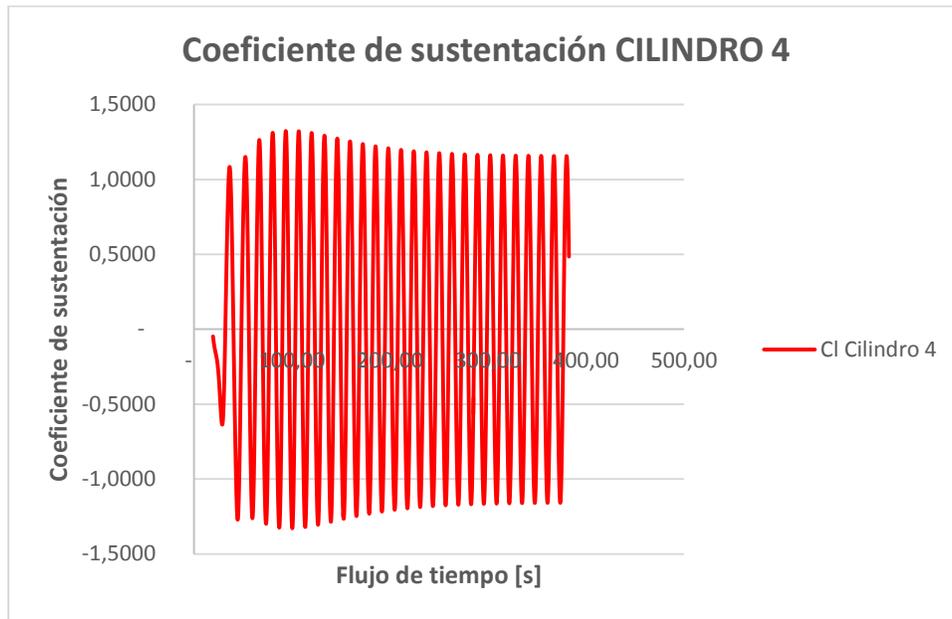


Figura 111. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=3,3.

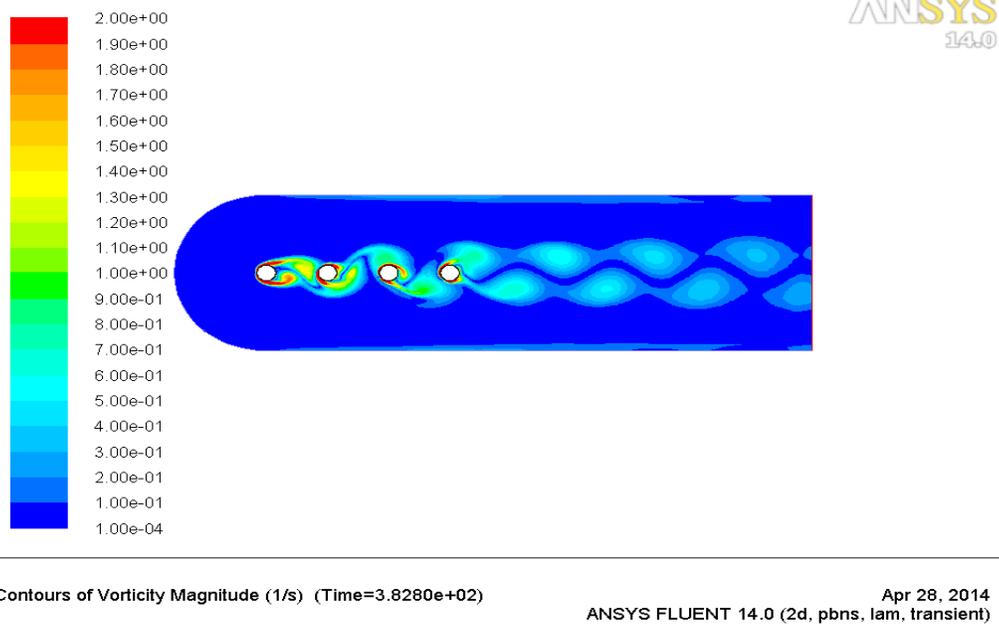


Figura 112. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=3,3.

- $P/D=4$

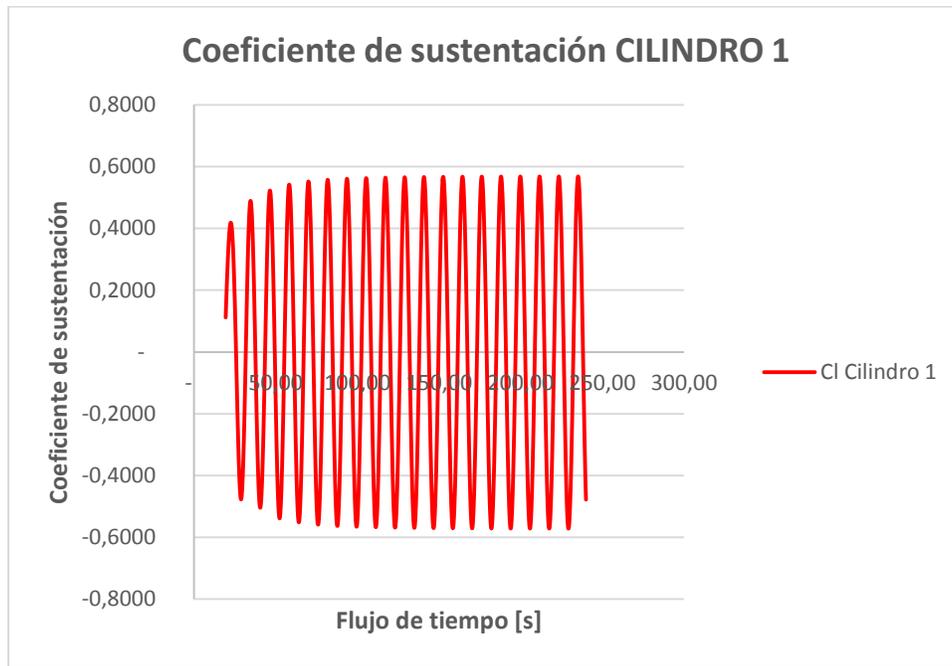


Figura 113. Coeficiente de sustentación cilindro 1; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

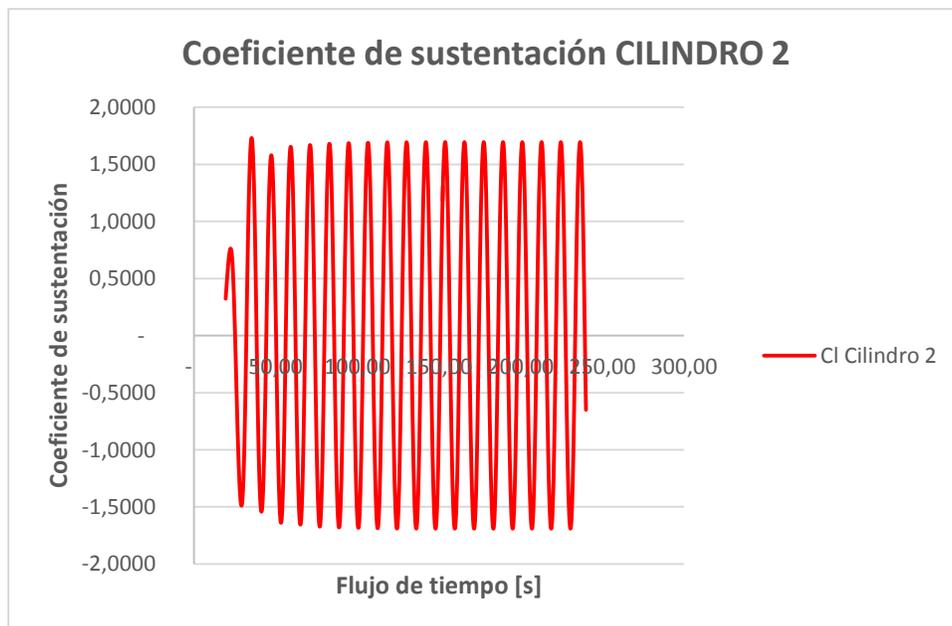


Figura 114. Coeficiente de sustentación cilindro 2; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

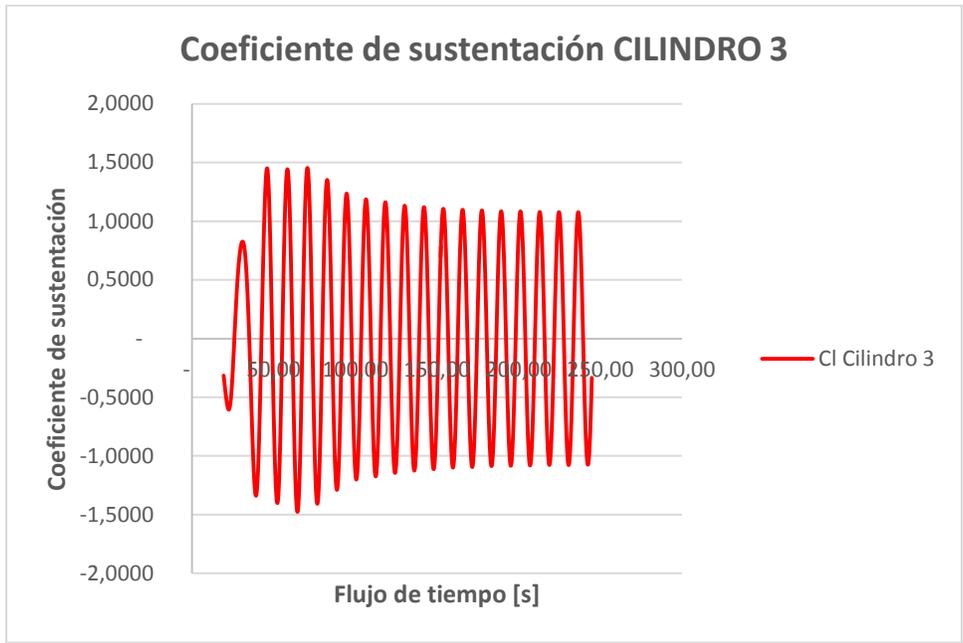


Figura 115. Coeficiente de sustentación cilindro 3; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=4.

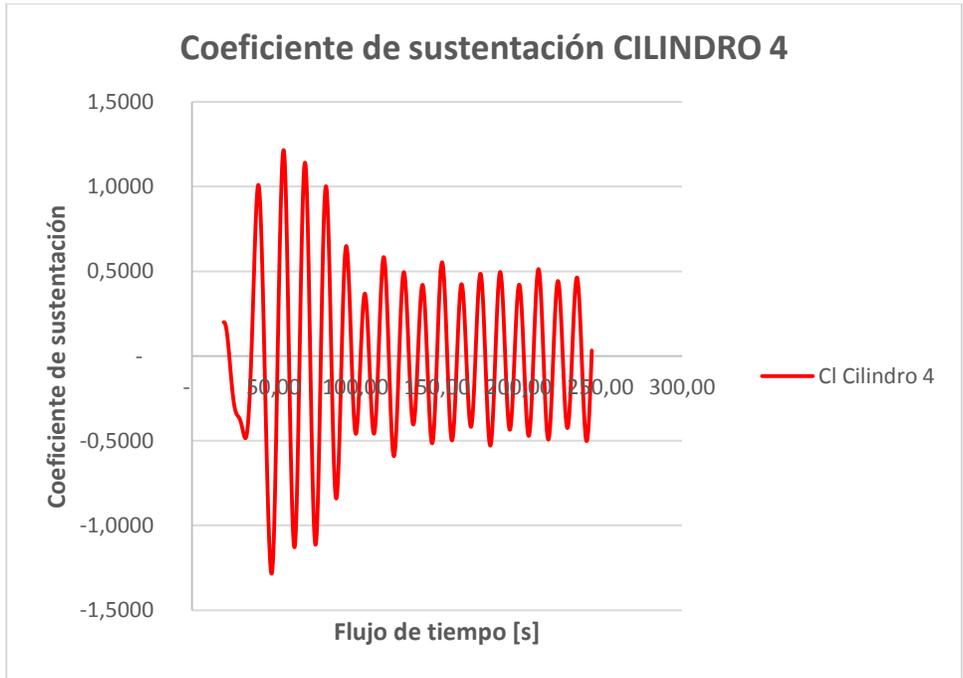
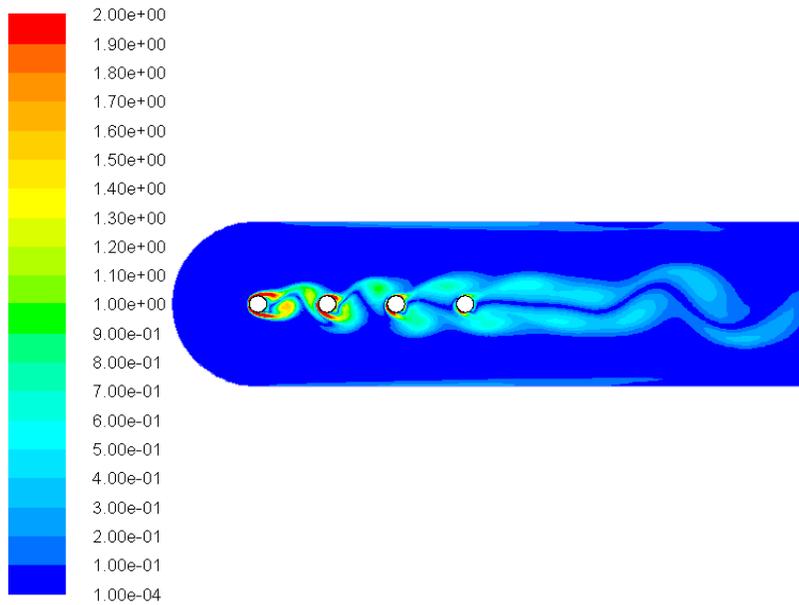


Figura 116. Coeficiente de sustentación cilindro 4; configuración lineal, 4 cilindros, P/D=4.



Contours of Vorticity Magnitude (1/s) (Time=2.4500e+02)

Apr 28, 2014  
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, lam, transient)

Figura 117. Contorno de magnitud de vorticidad; configuración lineal, 4 cilindros,  $P/D=4$ .

## ANEXO 5

### TABLA MATERIALES PIEZOELECTRICOS

Tabla 32. Principales materiales piezoeléctricos comerciales y sus respectivas constantes.  
(Física et al., 2010).

Material	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
$K_p$	0,5	0,61	0,6	0,63
$K_{33}$	0,63	0,7	0,71	0,73
$d_{33}(\frac{10^{-12}C}{N})$	215	400	460	550
$d_{31}(\frac{10^{-12}C}{N})$	-9,5	-170	-210	-265
$g_{33}(\frac{* 10^{-3}Vm}{N})$	25	26	22	19
$g_{31}(\frac{* 10^{-3}Vm}{N})$	-11	-11	-9	-9
$K_3^T$ (Señal baja) C. dieléctrica relativa).	1000	1750	2450	3100
Factor de disipación $\tan(\delta)$ (campo bajo).	0,004	0,02	0,02	0,02
Densidad( $\frac{Kg}{m^3}$ )	7600	7650	7500	7500
Temperatura de Curie (°C)	330	360	260	190
Factor de Calidad $Q_m$	1000	75	70	65
$s^E_{11}(\frac{10^{-12}m^2}{* N})$	11	19	23	21
$s^E_{33}(\frac{10^{-12}m^2}{* N})$	14	16	16	15
$N_p$ (Hz - m) (modo planar)	2270	1950	2000	1950
$N_t$ (Hz - m) (modo espesura)	2032	1800	1950	2000

## ANEXO 6

### VOLTAJE GENERADO

- $Re=150$

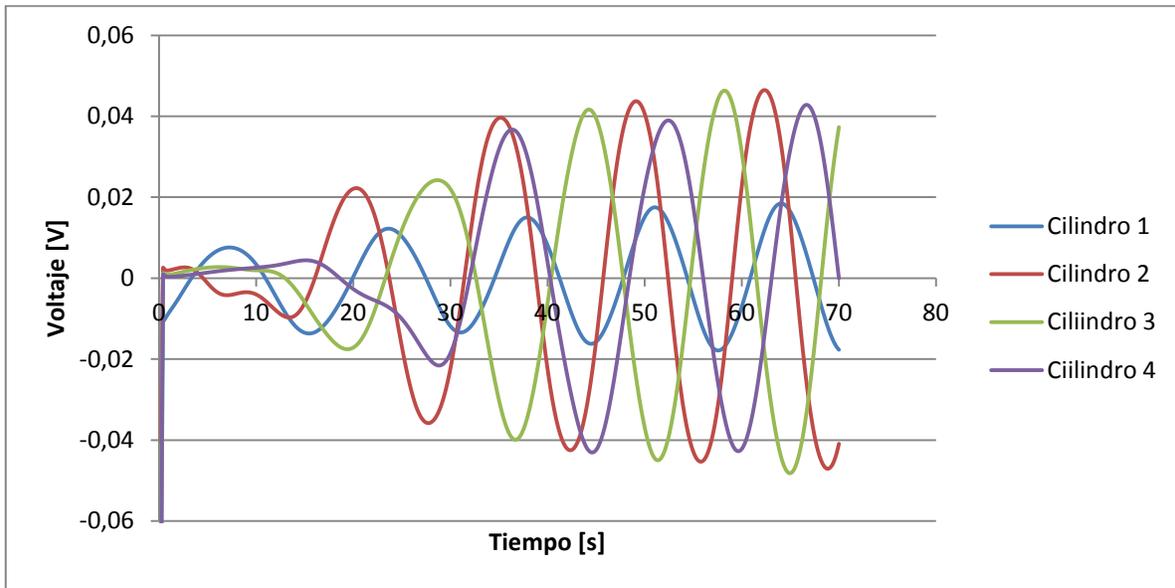


Figura 118. Voltaje, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ ;  $Re=150$ .

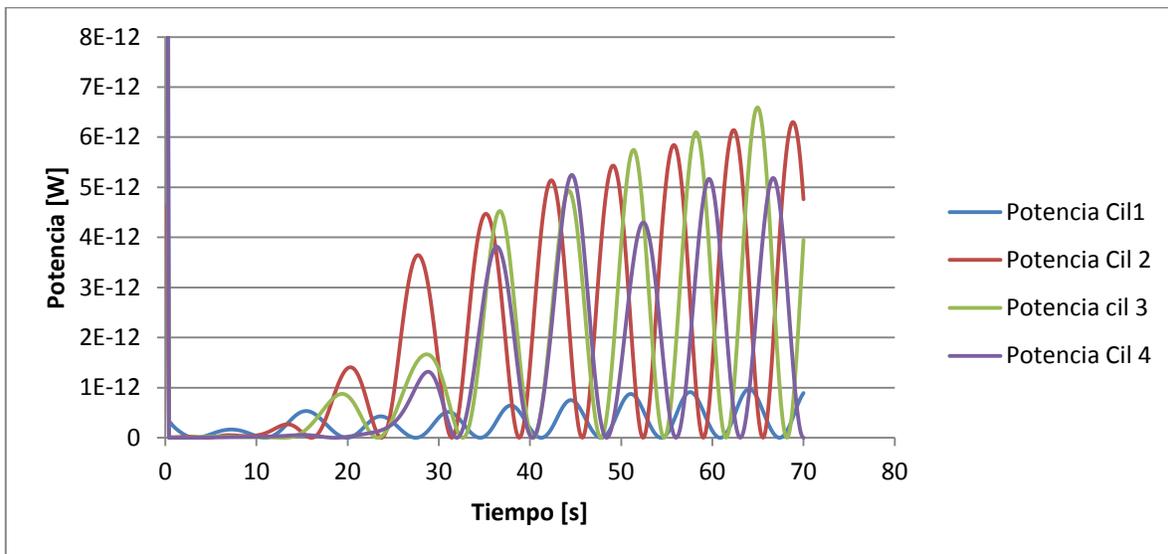


Figura 119. Potencia, 4 cilindros,  $P/D=3,3$ ;  $Re=150$ .

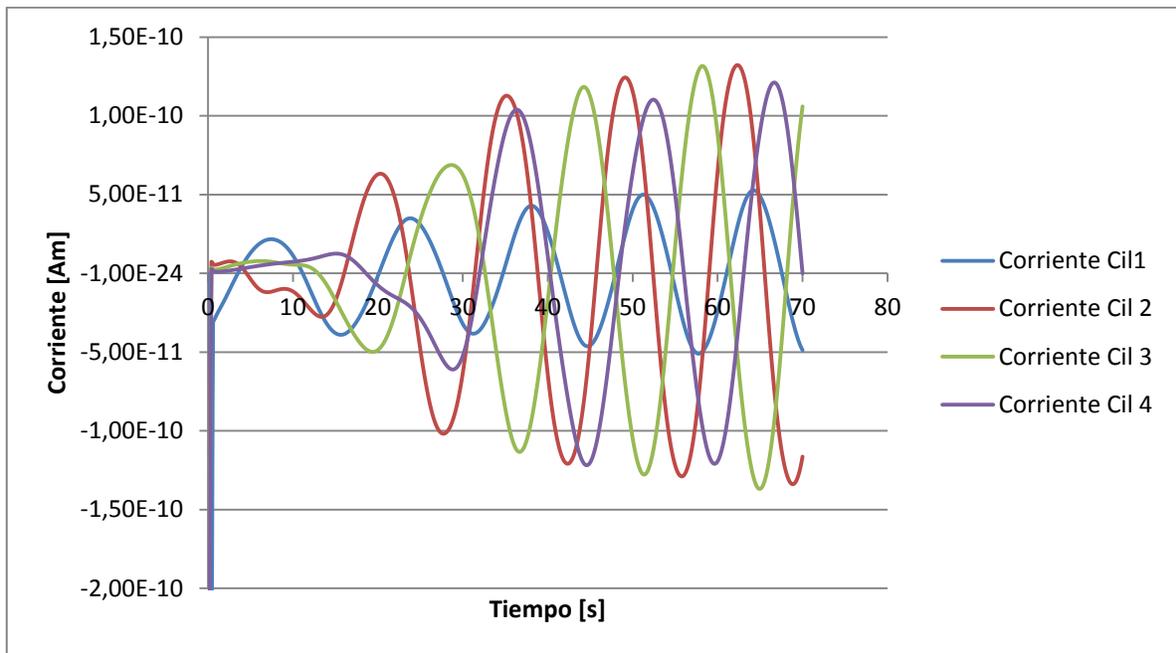


Figura 120. Corriente, 4 cilindros, P/D=3,3; Re=150.

## ANEXO 7

### EFICIENCIA DE LOS MICRO-GENERADORES EÓLICOS

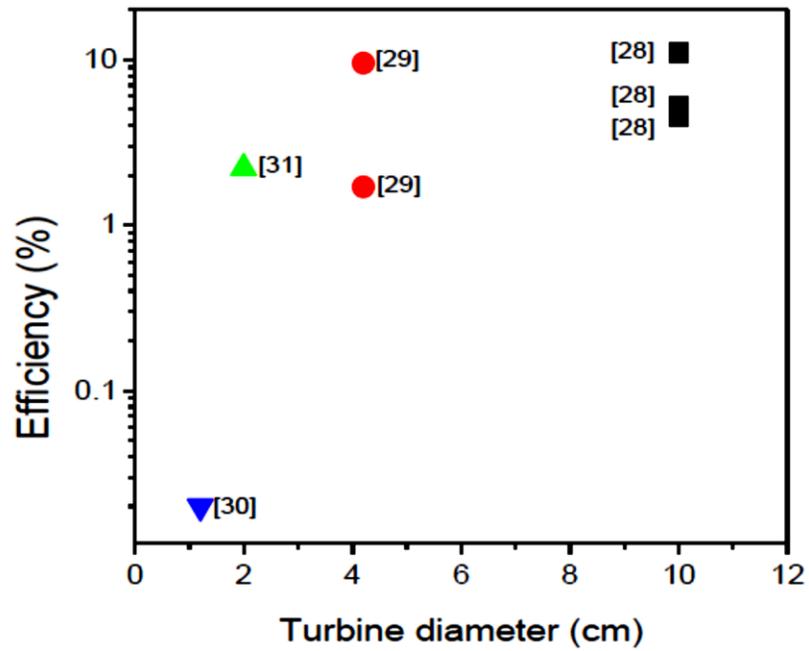


Figura 121. Eficiencia de los micro-generadores eólicos en función del diámetro de las palas.