

Tabla de Contenido

1	Introducción.	1
1.1	Motivación.	1
1.2	Definición del Problema.	2
1.3	Objetivos.	2
1.3.1	Objetivo General.	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
2	Antecedentes	3
2.1	Generadores de Vórtices.	3
2.1.1	Tipos de Objetos.	3
2.1.2	Tipos de Flujo Sobre un Cilindro.	4
2.1.3	Tipos de Formas.	5
2.1.4	Largo de Vórtices Estacionarios.	6
2.1.5	Calle de Von Kármán y Relación Strouhal-Reynolds.	7
2.2	Fenómenos sobre Cilindros	9
2.2.1	Vibraciones Inducidas por Vórtices (VIVs).	9
2.2.2	Galloping.	10
2.2.3	Flutter.	11
2.2.4	Wake Galloping.	12
2.3	Energía.	14
2.3.1	Energía Eólica.	16
2.3.2	Energy Harvesting.	18
2.3.3	Estado del Arte.	21
2.4	Modelación Computacional.	24
2.5	Caracterización Experimental.	26
2.5.1	Túneles de Viento.	26
3	Computacional	30
3.1	Fluidodinámica de VIV en ANSYS	30
3.1.1	Régimen de Flujo a $5 < Re < 45$	31
3.1.2	Régimen de Flujo a $45 < Re < 100$	34
3.2	Energy Harvester.	37
3.2.1	Malla y Dimensiones	37
3.2.2	Condiciones de Borde y Propiedades	38
3.2.3	Metodología.	39
3.2.4	Resultados.	40
3.2.5	Análisis.	41

4	Experimental	43
4.1	Montaje	44
4.2	Recursos	49
4.3	Procedimiento	50
4.4	Resultados	51
4.4.1	CdB y Prop. del Aire	51
4.4.2	Aceleración sobre el cilindro móvil	53
4.5	Análisis	61
4.5.1	Frecuencia Natural y Amortiguación	61
4.5.2	Aceleración Reducida	63
4.5.3	Frecuencia Característica	68
4.5.4	Potencia Disponible	73
4.5.5	Parámetros de Optimización	79
5	Conclusiones y Trabajo a Futuro	82
5.1	Conclusiones Computacionales	82
5.2	Conclusiones Experimentales	83
5.3	Trabajo a futuro	84
	Bibliografía	85

Índice de Tablas

2.1	Desempeño de diferentes dispositivos de energy harvesting [43].	18
2.2	Resumen de potencias generadas por sistemas del tipo <i>harvesters</i> en base a movimiento de aire.	23
3.1	Características de las mallas de estudio.	31
4.1	Dimensiones físicas de los resortes.	47
4.2	Detalle de valores estructurales del cilindro móvil.	48
4.3	Constantes de proporción para relaciones de tamaño y distancia.	60
4.4	Resultados y estadísticas del análisis de vibraciones.	62
4.5	Comparación de frecuencia natural experimental y teórica.	62
4.6	Pendientes de relación lineal entre frecuencia y velocidad.	71
4.7	Potencia máxima en la razón $Y = 0,7$ para velocidad $U = 1,5[m s^{-1}]$	78
4.8	Frecuencia de desprendimiento de vórtices para cada velocidad del viento en el túnel.	79

Índice de Figuras

1.1	Diagrama de arreglo de dos cilindros [2].	2
2.1	a) cuerpo aerodinámico. b) Diferentes generadores de vórtices [3]	4
2.2	Clasificación del tipo de flujo sobre un cilindro según su número de Reynolds [7]	5
2.3	Comportamiento del coeficiente de arrastre para diferentes geometrías [3]	6
2.4	Relación entre largo de vórtices y número de Reynolds [9]	7
2.5	Relación entre los números adimensionales de Reynolds y Strouhal [15].	8
2.6	Clasificación de desprendimiento de vórtices [16].	8
2.7	1) Dirección del flujo. 2) Desprendimiento vórtice superior, VIV hacia abajo. 3) Desprendimiento vórtice inferior, VIV hacia arriba.	9
2.8	Descripción gráfica de las fuerzas en el fenómeno de galloping [28]	10
2.9	Colapso del puente de Tacoma Narrows en 1940, en una imagen de una película filmada por Barney Elliott en una cámara 16 [mm] kodachrome.	11
2.10	Descripción gráfica del fenómeno de wake galloping [29]	12
2.11	Amplitud máxima del extremo de una chimenea como función del número de Scruton [31].	13
2.12	Evolución anual de la capacidad instalada acumulada en Europa por tipo de tecnología (PV: Photovoltaic) [34]	14
2.13	Distribución de sistemas eléctricos en Chile [35].	15
2.14	Imágenes de las primeras etapas en la explotación de energía eólica hasta la actualidad de California, USA [36]	16
2.15	Estado global de las ERNC en Chile [35].	17
2.16	Dispositivos para energy harvesting [43]	19
2.17	Dispositivos para energy harvesting basados en captar flujos de aire.	20
2.18	Diferentes configuraciones para análisis de arreglo de cables de tensión.	21
2.19	Montajes experimentales para estudios de interacción fluido estructura en dispositivos del tipo harvesters.	22
2.20	Resultados de programación numérica en para análisis de CFD.	24
2.21	Resultados de programación numérica para flujos sobre cilindros.	25
2.22	Clasificación de túneles de viento según circuito [53].	27
2.23	Diferentes secciones transversales de honeycombs. Izquierda, circular. Centro, cuadrado. Derecha, hexagonal [57]	28
2.24	Diferentes tipos de impulsores usados en sopladores centrífugos. Izquierda, tipo aspa radial. Centro, tipo perfil alar inverso. Derecha, tipo “S” inverso [59]	29
3.1	Dimensiones para el dominio computacional.	30
3.2	Ampliación del mallado sobre el contorno del cilindro.	31
3.3	Validación de malla en CFD.	32

3.4	Contornos de velocidad [ms^{-1}] junto con las distancias relevantes sobre una simulación computacional.	32
3.5	Relación del largo de vórtices en función del número de Reynolds.	33
3.6	Diagramas de malla en análisis del desprendimiento de vórtices.	34
3.7	Posición del monitor en análisis del desprendimiento de vórtices.	34
3.8	Contornos de vorticidad [$1/s$] para $Re = 50 - 60 - 70 - 80 - 90 - 100$ respectivamente, a $220[s]$ de iteración, en análisis transiente.	35
3.9	Relación del número de Strouhal en función del número de Reynolds ($D = 5\text{ cm}$).	36
3.10	Descripción gráfica del prototipo harvester.	37
3.11	Descripción gráfica de la transformación de Joukowski [64].	37
3.12	Malla para análisis de fluido-estructura sobre un dispositivo energy harvester.	38
3.13	Campo de vorticidad [$1/s$] para un período de movimiento en el caso $k_\alpha = k_h = 0,01$	40
3.14	Zonas de comportamiento en el plano $k_\alpha - k_h$	41
3.15	Descripción gráfica de las zonas de comportamiento.	41
3.16	Descripción gráfica de diferentes desprendimientos de vórtices.	42
4.1	Vista general del túnel de viento.	43
4.2	Vista frontal de modificación de panel cerrado por acrílico.	44
4.3	Descripción gráfica del <i>honeycomb</i> en el túnel de viento.	44
4.4	Volumen de control en el túnel de viento.	45
4.5	Montaje para análisis de wake galloping.	45
4.6	Sistema de deslizamiento vertical del cilindro móvil.	46
4.7	Configuración y especificaciones de rigidez.	46
4.8	Montaje para adquisición de aceleración del cilindro móvil.	47
4.9	VARIABLES DE ESTUDIO.	50
4.10	Descripción gráfica de las variables de estudio.	50
4.11	Descripción gráfica cualitativa del perfil de velocidades.	51
4.12	Descripción gráfica cualitativa del perfil de temperatura.	51
4.13	Velocidad y Temperatura medias en función del rendimiento del túnel.	52
4.14	Aceleración para el caso $Y = 1, X = 4, U = 7[ms^{-1}]$	53
4.15	Ampliación para el caso $Y = 1, X = 4, U = 7[ms^{-1}]$	53
4.16	Normalización de aceleración para el caso $Y = 1, X = 4, U = 7[ms^{-1}]$	54
4.17	Ampliación de aceleración normalizada y filtrada.	55
4.18	Aceleración RMS en ausencia del generador de vórtices	55
4.19	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $Y = 0,7$	56
4.20	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $Y = 1$	56
4.21	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $Y = 1,5$	57
4.22	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $X = 3$	58
4.23	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $X = 4$	58
4.24	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $X = 5$	59
4.25	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $X = 6$	59
4.26	Aceleración RMS en función de la velocidad del viento para $X = 7$	60
4.27	Análisis de vibraciones en ausencia de viento, $Y = 0,7$	61
4.28	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento en $Y = 0,7$	63
4.29	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento en $Y = 1$	63
4.30	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento en $Y = 1,5$	64

4.31	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento para $X = 3$	65
4.32	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento para $X = 4$	65
4.33	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento para $X = 5$	66
4.34	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento para $X = 6$	66
4.35	Aceleración reducida en función de la velocidad del viento para $X = 7$	67
4.36	Ampliación de aceleración filtrada para el caso $Y = 1, X = 4, U = 7[ms^{-1}]$.	68
4.37	Espectro de Fourier para el caso $Y = 1, X = 4, U = 7[ms^{-1}]$	69
4.38	Ampliación del espectro de Fourier para el caso $Y = 1, X = 4, U = 7[ms^{-1}]$	69
4.39	Frecuencia característica en función de la velocidad del viento para $Y = 0,7$.	70
4.40	Frecuencia característica en función de la velocidad del viento para $Y = 1$. .	70
4.41	Frecuencia característica en función de la velocidad del viento para $Y = 1,5$.	71
4.42	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $Y = 0,7$	74
4.43	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $Y = 1$	74
4.44	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $Y = 1,5$	75
4.45	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $X = 3$	76
4.46	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $X = 4$	76
4.47	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $X = 5$	77
4.48	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $X = 6$	77
4.49	Potencia RMS en función de la velocidad del viento para $X = 7$	78