

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN.....	iii
capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Solución propuesta.....	2
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.5 RESULTADOS ESPERADOS.....	2
1.6 Metodología.....	3
capítulo 2: Marco teórico.....	5
2.1 Situación de la energía eólica.....	6
2.1.1 Energías renovables.....	6
2.1.2 Energía eólica.....	6
2.1.3 Situación en Chile.....	6
2.1.4 Potencial eólico en Chile.....	8
2.2 Aerogeneradores.....	9
2.2.1 Turbinas de eje horizontal (HAWT).....	9
2.2.2 Turbinas de eje vertical (VAWT).....	10
2.2.3 Sub tipos de VAWTS.....	10
2.2.4 Tipos de rotores verticales Savonius.....	13
2.3 Criterios de diseño.....	15
2.3.1 Resistencia a la fatiga.....	15
2.3.2 Concentración de esfuerzos.....	15
2.3.3 Teoría de fallas.....	16
2.3.4 Diseño de ejes.....	17
2.3.5 Pernos.....	18
2.4 Consideraciones mecánicas del aerogenerador.....	20
2.4.1 Transmisión de potencia.....	20

2.4.2	Torque.....	20
2.4.3	Área barrida .....	21
2.4.4	Velocidad angular.....	21
2.4.5	Transmisión de bandas .....	22
2.4.6	Freno.....	26
2.5	Condiciones eólicas .....	28
2.5.1	Potencial eólico .....	28
2.5.2	Fuerza aerodinámica o fuerza de arrastre (Drag) .....	28
2.5.3	Coefficiente aerodinámico.....	31
2.5.4	Límite de Betz .....	33
2.5.5	Rendimiento de las turbinas eólicas .....	36
2.5.6	Relación de velocidad tangencial (TSR) .....	36
capítulo 3:	Desarrollo de la solución a la problemática .....	39
3.1	Velocidades del viento.....	40
3.2	Restricciones.....	40
3.3	Propuesta de diseño .....	41
3.4	estructura exterior .....	44
3.4.1	Cálculo de pernos en el deflector .....	47
3.4.2	Cálculo del espesor de la placa.....	52
3.5	Aspas del generador.....	54
3.5.1	Selección del material.....	54
3.5.2	Fuerzas sobre el aspa .....	56
3.5.3	Simulación del aspa.....	59
3.6	determinacion de banda y polea.....	71
3.6.1	Cálculo de la correa .....	72
3.6.2	Cálculo de las fuerzas ejercidas por la acción de las poleas sobre el eje .....	77
3.7	eje del rotor .....	82
3.7.1	Fuerzas sobre el eje principal .....	82
3.8	rodamientos de la estructura .....	88
3.8.1	Selección de los rodamientos .....	89
3.9	eje-cubo.....	92

3.9.1	Cálculo eje-cubo diámetro menor.....	92
3.9.2	Cálculo eje-cubo diámetro mayor.....	95
3.9.3	Sistema de frenado.....	96
3.9.4	Elementos de fijación adicional.....	98
3.9.5	Eficiencia total del aerogenerador .....	99
	CONCLUSIONES.....	101
	Referencias .....	104
	ANEXOS.....	106
	PLANOS AEROGENERADOR .....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Generación de energía mediante ERNC en Chile. (Fuente: ACERA 2020).....	7
Fig. 2 Capacidad instalada según avance de los proyectos Septiembre -20 (Fuente: Acera 2020) .....	8
Fig. 3 Potencial disponible de energía eólica por región (Fuente:MINENERGIA/GIZ) .....	9
Fig. 4 Aerogenerador Darrieus .....	11
Fig. 5 Aerogenerador Giromill .....	11
Fig. 6 Rotor de Savonius tradicional .....	12
Fig. 7 Configuraciones de rotores tipo Savonius.....	13
Fig. 8 Vista frontal de un rotor tipo Savonius. (Fuente: Domínguez, 2018).....	21
Fig. 9 Tensiones para una banda en V (Fuente: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley)...	23
Fig. 10 Parámetro de bandas en V para $K_b$ y $K_c$ en bandas en V (Fuente: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley).....	24
Fig. 11 Factores de servicio sugeridos para transmisiones de bandas en V (Fuente: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley).....	26
Fig. 12 Geometría y fuerzas de un freno de tambor con zapata externa corta (Fuente: Diseño de máquinas un enfoque integrado).....	27
Fig. 13 Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial. (Fuente: Ingeniería de la energía eólica) .....	29
Fig. 14 Rotor con apantallamiento y veleta. (Fuente: Ingeniería de la energía eólica) .....	31
Fig. 15 Coeficiente de arrastre $C_D$ para una barra rectangular (Fuente: Mecánica de fluidos Cengel) .....	32
Fig. 16 Coeficiente de arrastre $C_D$ para un cascaron semicircular (Fuente: Mecánica de fluidos Cengel) .....	33
Fig. 17 Tubo de corriente de aire (Fuente: ZUÑIGA, 2017).....	34
Fig. 18 Curva de eficiencia de Betz. (Fuente: Araújo, A. M. (2009). Simulación de la Producción de Energía Eléctrica con Aerogeneradores de Pequeño Tamaño.) .....	35
Fig. 19 Rendimiento del rotor Savonius. (Fuente: Ingeniería de la energía eólica).....	37
Fig. 20 Curvas de coeficientes de potencia según TSR para diferentes máquinas eólicas. (Fuente: ZUÑIGA, 2017) .....	38
Fig. 21 Velocidades de viento Curicó. (Fuente: ZUÑIGA 2017) .....	40
Fig. 22 Gráfico de velocidades máximas registradas de camiones/buses en movimiento. (Fuente: ZUÑIGA 2017) .....	42
Fig. 23 Aerogenerador con estructura exterior y estructura soportante. (Fuente: elaboración propia).....	43
Fig. 24 Vista seccionada a través del eje longitudinal del aerogenerador. (Fuente: elaboración propia).....	43
Fig. 25 Vista superior del aerogenerador con deflectores resaltados en amarillo. (Fuente: elaboración propia).....	45

Fig. 26 Vista superior del aerogenerador con deflectores enumerados. (Fuente: elaboración propia).....	46
Fig. 27 Área perpendicular expuesta al flujo. (Fuente: elaboración propia) .....	46
Fig. 28 Fuerza de arrastre por presión en cada deflector. (Fuente: elaboración propia) .....	47
Fig. 29 Diagrama de cuerpo libre del deflector. (Fuente: elaboración propia) .....	48
Fig. 30 Zoom deflector n°4. (Fuente: elaboración propia).....	48
Fig. 31 Cortante, momento y deflexión de vigas. (Fuente: diseño en ingeniería mecánica de Shigley).....	49
Fig. 32 Vista ampliada del grupo de pernos del punto A. (Fuente: elaboración propia).....	50
Fig. 33 Fuerzas cortantes primarias, secundarias y resultantes en cada perno. (Fuente: elaboración propia) .....	51
Fig. 34 Vista superior del deflector. (Fuente: Yunus A Cengel, 2006).....	53
Fig. 35 Vista transversal de un rotor Savonius con su arco de cazoleta. (Fuente: Domínguez, 2018).....	55
Fig. 36 Vista frontal de un rotor Savonius. (Fuente: Domínguez, 2018) .....	55
Fig. 37 Propiedades del aluminio (Fuente: www.gabrian.com).....	56
Fig. 38 Apartado de propiedades de Autodesk Inventor. (Fuente: elaboración propia) .....	59
Fig. 39 Modelo preliminar en 3D del aspa. (Fuente: elaboración propia).....	60
Fig. 40 Static Structural. (Fuente: elaboración propia) .....	61
Fig. 41 Model. (Fuente: elaboración propia).....	61
Fig. 42 Escala paramétrica para la simetría de los elementos. (Fuente: autodesk.com) .....	62
Fig. 43 Escala paramétrica de calidad ortogonal. (Fuente: autodesk.com) .....	63
Fig. 44 Zoom sección reforzada del aspa. (Fuente: elaboración propia).....	64
Fig. 45 Zoom mallado de la zona crítica y de interés. (Fuente: elaboración propia) .....	65
Fig. 46 Skewness. (Fuente: elaboración propia) .....	66
Fig. 47 Quality Orthogonal. (Fuente: elaboración propia) .....	66
Fig. 48 Aspa con sección de golilla destacada en verde. (Fuente: elaboración propia) .....	67
Fig. 49 Desplazamientos del aspa. (Fuente: elaboración propia).....	68
Fig. 50 Zona de mayor esfuerzo en el aspa. (Fuente: elaboración propia).....	69
Fig. 51 Sección inferior izquierda del aspa en donde se produce el mayor esfuerzo. (Fuente: elaboración propia).....	70
Fig. 52 Zoom zona crítica a 27 ms con el rotor detenido. (Fuente: elaboración propia).....	70
Fig. 53 Ficha técnica del generador.....	71
Fig. 54 Selección del tipo de banda. (Fuente: DUNLOP).....	73
Fig. 55 Distancia entre los ejes de las poleas. (Fuente: elvatron).....	74
Fig. 56 Dimensiones de la correa. (Fuente: DUNLOP) .....	77
Fig. 57 DCL del eje. (Fuente: elaboración propia).....	83
Fig. 58 Esfuerzos cortantes plano X-Z. (Fuente: elaboración propia).....	85
Fig. 59 Esfuerzos cortantes plano Y-Z. (Fuente: elaboración propia).....	85
Fig. 60 Momento flector plano X-Z. (Fuente: elaboración propia).....	86
Fig. 61 Momento flector plano Y-Z. (Fuente: elaboración propia).....	86

Fig. 62 Selección de rodamiento. (Fuente: catálogo SKF).....	91
Fig. 63 Dimensiones de chavetero. (Fuente: Norma DIN 6885).....	93
Fig. 64 Dimensiones de la chaveta/chavetero para un eje de 30 [mm]. (Fuente: elaboración propia).....	93
Fig. 65 Dimensiones de la chaveta/chavetero para un eje de 32 [mm]. (Fuente: elaboración propia).....	95
Fig. 66 Cilindro hidráulico de simple efecto. (Fuente: cistchile).....	98
Fig. 67 Potencia-eficiencia vs rpm. (Fuente: Oliveros, 2013).....	99
Fig. 68 Potencia y rpm del aerogenerador según la velocidad del viento. (Fuente: elaboración propia).....	100