

TABLA DE CONTENIDO

I.	CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1.	MOTIVACIÓN.....	2
1.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3.	SOLUCIÓN PROPUESTA.....	
1.4.	OBJETIVO GENERAL	5
1.5.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
1.6.	ALCANCES	
1.7.	METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS	6
1.8.	RESULTADOS ESPERADOS	7
1.9.	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	8
 II.	 CAPÍTULO 2: EL RECURSO EÓLICO	 9
2.1.	RECURSOS ENERGÉTICOS DE LA TIERRA	10
2.2.	ORIGEN DEL VIENTO	13
2.3.	MÉTODOS UTILIZADOS PARA MEDIR LA VELOCIDAD DEL VIENTO ...	16
2.3.1.	Información empírica.....	
2.3.2.	Anemómetros totalizadores.....	18
2.3.3.	Método de correlación	
2.3.4.	Instalación de pequeños equipos eólicos	19
2.3.5.	Adquisición de datos en tiempo real.....	
2.4.	VARIACIÓN DEL VIENTO CON LA ALTURA	
2.5.	HERRAMIENTAS DE CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO.....	22
2.5.1.	Histograma	

2.5.2. Rosa de los vientos	23
2.5.3. Distribución de Weibull.....	24
2.5.4. Nivel de turbulencia.....	26
2.5.5. Velocidad de sobrevivencia	28
2.6. INSTALACIÓN DE TURBINAS EÓLICAS	
2.7. TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS	30
2.7.1. Rotores de eje vertical.....	31
2.7.1.1. <i>Rotores Darrieus</i>	
2.7.1.2. <i>Rotores Savonious</i>	
2.7.2. Rotores de eje horizontal	32
2.7.2.1. <i>Rotores multipala</i>	33
2.7.2.2. <i>Rotores tipo hélice</i>	
2.8. IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL.....	35
2.8.1. Impacto visual	
2.8.2. Ruido.....	36
2.8.3. Parpadeo.....	38
2.8.4. Efectos electromagnéticos.....	
2.8.5. Seguridad	
2.8.6. Emisiones	40
2.8.7. Afectación de la vida animal.....	
III. CAPÍTULO 3: TEORÍA DE AEROGENERADORES	42
3.1. AERODINÁMICA	43
3.2. ANÁLISIS AERODINÁMICO DE LAS PALAS	49
3.3. CÁLCULO ENERGÉTICO	54

3.3.1. Disponibilidad	55
3.3.2. Rendimiento eléctrico	
3.3.3. Heladas y ensuciamiento de palas	
3.3.4. Retardo en el tiempo de respuesta del control de guiñada.....	
3.3.5. Histéresis por viento alto	56
3.4. TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA.....	
IV. CAPÍTULO 4: ELEMENTOS DE UN AEROGENERADOR	58
4.1. ROTOR	60
4.1.1. Palas.....	
4.1.2. Buje.....	61
4.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	
4.2.1. Generador eléctrico.....	63
4.2.1.1. <i>Generador asíncrono.....</i>	
4.2.1.2. <i>Generador síncrono.....</i>	
4.2.2. Multiplicador.....	64
4.2.3. Frenos.....	
4.2.4. Transformador.....	65
4.3. SISTEMA DE ORIENTACIÓN.....	
4.4. TORRE.....	
4.5. SISTEMAS AUXILIARES	67
4.6. APLICACIONES DE LAS TURBINAS EÓLICAS	
4.6.1. Sistemas de conexión a red	
4.6.2. Sistemas aislados para autoconsumo	68
4.6.3. Alimentación para telecomunicaciones	69

4.6.4. Sistemas de extracción de agua.....	70
V. CAPÍTULO 5: ESTUDIO DEL CASO.....	
5.1. ANTECEDENTES PREVIOS	73
5.1.1. Energías renovables en el país	
5.1.2. Costos de la energía eléctrica	74
5.1.3. Energía Eólica en la Región del Maule	77
5.1.4. Consumo eléctrico de algunos artefactos.....	
5.2. SELECCIÓN DEL PUNTO DE ESTUDIO.....	78
5.2.1. Punto 1: Piedra de las Ventanas	79
5.2.2. Punto 2: Sector Playa Los Gringos.....	80
5.2.3. Punto 3: Piedra de la Iglesia.....	
5.2.4. Punto 4: Cerro de Arena	
5.2.5. Punto 5: Estadio Enrique Donn.....	
5.2.6. Punto 6: Cerro Mutrún.....	
5.2.7. Punto 7: Rivera del río	81
5.2.8. Punto 8: Cerro Villa Copihue.....	
5.3. ANTECEDENTES DEL VIENTO EN EL PUNTO SELECCIONADO	
5.3.1. Descripción del lugar.....	
5.3.2. Intensidad del viento en el lugar seleccionado.....	87
5.3.2.1. <i>Velocidad del viento a 5 metros de altura</i>	
5.3.2.2. <i>Velocidad del viento a 15 metros de altura</i>	
5.3.3. Variación de la velocidad del viento entre día y la noche	88
5.3.3.1. <i>Variación a 5 metros de altura</i>	
5.3.3.2. <i>Variación a 15 metros de altura</i>	89

5.3.4. Rosa de los vientos	90
5.3.4.1. <i>Rosa de los vientos a 5 metros de altura</i>	
5.3.4.2. <i>Rosa de los vientos a 15 metros de altura</i>	92
5.3.5. Otros antecedentes de velocidad del viento	93
5.4. AEROGENERADORES.....	
5.4.1. Aerogenerador Antaris 2.5	94
5.4.2. Aerogenerador Antaris 3.5	95
5.4.3. Aerogenerador Antaris 4.5	96
5.4.4. Aerogenerador Windspot 3.5	
5.4.5. Aerogenerador SWT 3.0	97
5.5. POTENCIA DE CADA AEROGENERADOR	99
5.5.1. Aerogenerador Antaris 2.5	101
5.5.1.1. <i>Curva de potencia</i>	
5.5.1.2. <i>Coeficiente de potencia</i>	102
5.5.1.3. <i>Potencia generada</i>	
5.5.2. Aerogenerador Antaris 3.5	103
5.5.2.1. <i>Curva de potencia</i>	
5.5.2.2. <i>Coeficiente de potencia</i>	
5.5.2.3. <i>Potencia generada</i>	104
5.5.3. Aerogenerador Antaris 4.5	
5.5.3.1. <i>Curva de potencia</i>	
5.5.3.2. <i>Coeficiente de potencia</i>	105
5.5.3.3. <i>Potencia generada</i>	
5.5.4. Aerogenerador Windspot 3.5	106

<i>5.5.4.1. Curva de potencia.....</i>	
<i>5.5.4.2. Coeficiente de potencia.....</i>	
<i>5.5.4.3. Potencia generada.....</i>	107
<i>5.5.5. Aerogenerador SWT 3.0</i>	
<i>5.5.5.1. Curva de potencia.....</i>	
<i>5.5.5.2. Coeficiente de potencia.....</i>	108
<i>5.5.5.3. Potencia generada.....</i>	
<i>5.6. ENERGÍA PRODUCIDA</i>	109
<i>5.7. INSTALACIÓN DEL AEROGENERADOR</i>	
 VI. CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ECONÓMICO	113
<i>6.1. ANTECEDENTES ECONÓMICOS</i>	114
<i>6.2. INVERSIÓN INICIAL</i>	
<i>6.3. INGRESOS.....</i>	116
<i>6.3.1. Precio base de la potencia de punta.....</i>	
<i>6.3.2. Precio de venta por la energía producida.....</i>	117
<i>6.3.3. Venta de atributo ERNC</i>	119
<i>6.3.4. Venta de bonos de carbono</i>	
<i>6.4. EGRESOS</i>	
<i>6.5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....</i>	
<i>6.5.1. Aerogenerador Antaris 2.5</i>	121
<i>6.5.2. Aerogenerador Antaris 3.5</i>	122
<i>6.5.3. Aerogenerador Antaris 4.5</i>	123
<i>6.5.4. Aerogenerador Windspot 3.5</i>	124
<i>6.5.5. Aerogenerador SWT 3.0</i>	125

6.6. PARÁMETROS ECONÓMICOS	126
6.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	
 CONCLUSIONES	 130
 BIBLIOGRAFÍA.....	 134
 ANEXOS	 138

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: <i>Previsión de potencia eólica instalada total</i>	11
FIGURA 2.2: <i>Aerogenerador X.....</i>	12
FIGURA 2.3: <i>Circulación atmosférica general</i>	14
FIGURA 2.4: <i>Brisa marina (mediodía y tarde)</i>	15
FIGURA 2.5: <i>Brisa marina(noche y amanecer)</i>	15
FIGURA 2.6: <i>Índice de deformación de Griggs-Putnam</i>	17
FIGURA 2.7: <i>Capa límite terrestre</i>	20
FIGURA 2.8: <i>Histograma de velocidad del viento medida a 80 metros de altura en Sierra Gorda, Región de Antofagasta</i>	23
FIGURA 2.9: <i>Rosa de los vientos Cerro Sombrero, Región de Magallanes</i>	24
FIGURA 2.10: <i>Distribución de Weibull estimada para el mes de Enero a 15 metros de altura en el sector de Bahía Azul, Región de Magallanes.....</i>	25
FIGURA 2.11: <i>Pequeño monte como obstáculo al viento</i>	26
FIGURA 2.12: <i>Risco como obstáculo al viento</i>	27
FIGURA 2.13: <i>Meseta como obstáculo al viento</i>	27
FIGURA 2.14: <i>Instalación del aerogenerador considerando obstáculos</i>	28
FIGURA 2.15: <i>Turbulencia que provocan los obstáculos sobre el aerogenerador.....</i>	29
FIGURA 2.16: <i>Instalación de aerogenerador alrededor de vegetación poco densa</i>	29
FIGURA 2.17: <i>Instalación de aerogenerador alrededor de vegetación densa</i>	30
FIGURA 2.18: <i>Algunos tipos de turbinas eólicas de rotor de eje vertical</i>	32
FIGURA 2.19: <i>Aerogenerador de rotor multipala</i>	33
FIGURA 2.20: <i>Aerogeneradores de tipo hélice</i>	34
FIGURA 2.21: <i>Configuración general de turbinas de eje horizontal</i>	35

FIGURA 2.22: Niveles relativos de ruido	37
FIGURA 2.23: Ruido provocado por un aerogenerador a diferentes distancias	38
FIGURA 2.24: Aerogenerador Nordtank destruido tras una tormenta	39
FIGURA 3.1: Tubo de corriente que circunda la aeroturbina	44
FIGURA 3.2: Análisis de velocidad y presión en el tubo de flujo.....	45
FIGURA 3.3: Coeficiente de potencia versus factor de inducción axial	49
FIGURA 3.4: Flujos de aire que actúan sobre la pala del aerogenerador.....	50
FIGURA 3.5: Principales partes de una pala	51
FIGURA 3.6: Fuerza de sustentación y de arrastre sobre un perfil	52
FIGURA 3.7: Coeficiente de potencia de diversas turbinas	54
FIGURA 4.1: Elementos de un aerogenerador de eje horizontal	60
FIGURA 4.2: Tipos de buje.....	61
FIGURA 4.3: Tipos de configuración del tren de potencia (I)	62
FIGURA 4.4: Tipos de configuración del tren de potencia (II)	63
FIGURA 4.5: Multiplicador	64
FIGURA 4.6: Tipos de torres para aerogeneradores.....	66
FIGURA 4.7: Esquema de un sistema eólico-solar conectado a la red	68
FIGURA 4.8: Esquema de un sistema eólico-solar aislado.....	69
FIGURA 4.9: Alimentación para telecomunicaciones	70
FIGURA 4.10: Sistema de extracción de agua por bombeo	71
FIGURA 5.1: Velocidad del viento en diversos puntos de Constitución	79
FIGURA 5.2: Ubicación para la instalación del aerogenerador	82
FIGURA 5.3: Vista hacia el sur desde el punto seleccionado	83
FIGURA 5.4: Vista hacia el norte desde el punto seleccionado	84

FIGURA 5.5: Vista frontal del punto seleccionado.....	85
FIGURA 5.6: Vista panorámica del punto seleccionado.....	86
FIGURA 5.7: Variación del viento a 5 metros de altura	89
FIGURA 5.8: Variación del viento a 15 metros de altura	90
FIGURA 5.9: Rosa de los vientos anuales a 5 metros de altura.....	91
FIGURA 5.10: Rosa de los vientos anuales a 15 metros de altura.....	92
FIGURA 5.11: Aerogenerador Antaris.....	95
FIGURA 5.12: Aerogenerador Windspot 3.5.....	97
FIGURA 5.13: Aerogenerador SWT 3.0	98
FIGURA 5.14: Curva de potencia del aerogenerador Antaris 2.5	101
FIGURA 5.15: Curva de coeficiente de potencia del aerogenerador Antaris 2.5	102
FIGURA 5.16: Curva de potencia del aerogenerador Antaris 3.5	103
FIGURA 5.17: Curva de coeficiente de potencia del aerogenerador Antaris 3.5	103
FIGURA 5.18: Curva de potencia del aerogenerador Antaris 4.5	104
FIGURA 5.19: Curva de coeficiente de potencia del aerogenerador Antaris 4.5	105
FIGURA 5.20: Curva de potencia del aerogenerador Windspot 3.5	106
FIGURA 5.21: Curva de coeficiente de potencia del aerogenerador Windspot 3.5....	106
FIGURA 5.22: Curva de potencia del aerogenerador SWT 3.0	107
FIGURA 5.23: Curva de coeficiente de potencia del aerogenerador SWT 3.0	108
FIGURA 5.24: Esquema de conexión a red del sistema eólico	111
FIGURA 6.1: Precio medio de mercado del SIC y SING en el año 2013.....	118

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: <i>Distribución de la energía solar incidente sobre la Tierra</i>	11
TABLA 2.2: <i>Escala de Beaufort</i>	18
TABLA 2.3: <i>Clases y longitudes de rugosidad.....</i>	21
TABLA 2.4: <i>Emisiones en [ton/GW·h] de centrales eléctricas</i>	40
TABLA 3.1: <i>Rendimientos del sistema eólico</i>	57
TABLA 5.1: <i>Capacidad energética instalada en el país hasta diciembre 2011.....</i>	74
TABLA 5.2: <i>Capacidad energética instalada en el país hasta noviembre 2013.....</i>	75
TABLA 5.3: <i>Costos de la generación de energía eléctrica</i>	76
TABLA 5.4: <i>Costos de la generación de energía eléctrica para zonas rurales.....</i>	76
TABLA 5.5: <i>Parques Eólicos en la Región del Maule</i>	77
TABLA 5.6: <i>Consumo eléctrico de algunos artefactos</i>	78
TABLA 5.7: <i>Velocidad del viento en el punto seleccionado a 5 m. de altura.....</i>	87
TABLA 5.8: <i>Velocidad del viento en el punto seleccionado a 15 m. de altura.....</i>	88
TABLA 5.9: <i>Velocidad del viento en el punto seleccionado a 10 m. de altura</i>	93
TABLA 5.10: <i>Características del aerogenerador Antaris 2.5.....</i>	94
TABLA 5.11: <i>Características del aerogenerador Antaris 3.5.....</i>	95
TABLA 5.12: <i>Características del aerogenerador Antaris 4.5.....</i>	96
TABLA 5.13: <i>Características del aerogenerador Windspot 3.5</i>	97
TABLA 5.14: <i>Características del aerogenerador SWT 3.0.....</i>	98
TABLA 5.15: <i>Determinación del viento a 6, 9 y 12 metros de altura según LL</i>	99
TABLA 5.16: <i>Determinación del viento a 6, 9 y 12 metros de altura según LE</i>	100
TABLA 5.17: <i>Diámetro y área del rotor de los aerogeneradores.....</i>	100
TABLA 5.18: <i>Potencia del aerogenerador Antaris 2.5.....</i>	102

TABLA 5.19: <i>Potencia del aerogenerador Antaris 3.5.....</i>	104
TABLA 5.20: <i>Potencia del aerogenerador Antaris 4.5.....</i>	105
TABLA 5.21: <i>Potencia del aerogenerador Windspot 3.5</i>	107
TABLA 5.22: <i>Potencia del aerogenerador SWT 3.0.....</i>	108
TABLA 5.23: <i>Producción anual de energía de cada aerogenerador</i>	109
TABLA 6.1: <i>Costos de instalación y transporte para los aerogeneradores</i>	114
TABLA 6.2: <i>Costos de inversión de cada aerogenerador.....</i>	115
TABLA 6.3: <i>Inversión total de cada aerogenerador</i>	115
TABLA 6.4: <i>Algunos precios base de la potencia de punta</i>	116
TABLA 6.5: <i>Precio base de la potencia de punta de cada aerogenerador.....</i>	117
TABLA 6.6: <i>Flujo de caja aerogenerador Antaris 2.5, años 0 al 5</i>	121
TABLA 6.7: <i>Flujo de caja aerogenerador Antaris 3.5, años 0 al 5</i>	122
TABLA 6.8: <i>Flujo de caja aerogenerador Antaris 4.5, años 0 al 5</i>	123
TABLA 6.9: <i>Flujo de caja aerogenerador Windspot 3.5, años 0 al 5</i>	124
TABLA 6.10: <i>Flujo de caja aerogenerador SWT 3.0, años 0 al 5.....</i>	125
TABLA 6.11: <i>Parámetros TIR y VAN de cada flujo de caja</i>	126

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Factor de inducción axial.
A	Superficie de la pala.
C_p	Coeficiente de potencia.
C_r	Coeficiente de arrastre.
C_s	Coeficiente de sustentación.
D	Diámetro del rotor.
E	Energía eléctrica.
F	Fuerza axial.
F_a	Fuerza axial.
F_m	Fuerza motriz.
F_r	Fuerza de arrastre.
F_s	Fuerza de sustentación.
FC	Factor de capacidad.
H	Altura en la que se mide el viento.
I_x	Intensidad de turbulencia del viento.
p	Presión.
P_e	Potencia eléctrica generada por el aerogenerador.
P_m	Potencia mecánica.
P_n	Potencia nominal del aerogenerador.
P_w	Potencia cinética del viento.
q	Caudal másico.
r	Radio del rotor.
v	Velocidad del viento.
\vec{v}	Velocidad total del flujo de aire.
\vec{v}_1	Velocidad del viento paralela al eje del aerogenerador.
\vec{v}_t	Velocidad del viento perpendicular a \vec{v}_1
z_0	Rugosidad del terreno.

x	Coordenada de eje x.
α	Ángulo de inclinación.
β	Ángulo de paso.
δ	Ángulo constructivo.
η_m	Rendimiento mecánico.
η_e	Rendimiento eléctrico.
η_c	Rendimiento del convertidor de frecuencia.
η_t	Rendimiento del transformador.
θ	Rozamiento superficial.
λ	Velocidad específica de punta de la pala.
κ	Parámetro de forma de Distribución de Weibull.
ϕ	Parámetro de escala de Distribución de Weibull.
ρ	Densidad del aire.
Ω_r	Velocidad angular de rotación del rotor.