

TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES	2
1.3 ESTRUCTURA GENERAL	2
Capítulo 2. ANTECEDENTES DE ENERGÍA EÓLICA Y AEROGENERADORES.....	4
2.1 ENERGÍA EÓLICA	4
2.1.1 Energía del viento.....	4
2.1.2 Recurso eólico mundial.....	6
2.2 ESTADO DEL ARTE EN CHILE	7
2.2.1 Potencial eólico Chileno.....	7
2.2.2 Distribución de la matriz energética Chilena	8
2.2.3 Electrificación rural en Chile	9
2.2.4 Centrales eólicas en funcionamiento.....	10
2.2.5 Proyectos de generación eólica futuros.....	12
2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN AEROGENERADOR.....	13
2.3.1 Torre.....	13
2.3.2 Caja de engranajes o multiplicador	15
2.3.3 Aspas y Buje del rotor o hélice	15
2.3.4 Sistema de Control	17
2.3.5 Generador.....	18
2.4 IMANES PERMANENTES.....	19
2.5 COMENTARIOS	21
Capítulo 3. DISEÑO DEL GENERADOR SINCRÓNICO DE FLUJO AXIAL CON IMANES PERMANENTES.....	22
3.1 FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR.....	22
3.1.1 Estructura	22
3.1.2 Funcionamiento y ventajas.....	23
3.2 IMANES PERMANENTES.....	24

3.2.1	Programa QuickField	24
3.2.2	Ajuste de fórmula	28
3.3	ESPECIFICACIÓN APROXIMADA DE LA HÉLICE	33
3.4	NÚMERO DE POLOS	34
3.4.1	Frecuencia y polos.....	34
3.4.2	Bobinas y conexiones.....	36
3.5	VOLTAJE EN BORNES.....	38
3.5.1	Voltaje requerido.....	38
3.5.2	Voltaje fase-neutro del generador	39
3.6	PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN.....	40
3.6.1	Cables	40
3.6.2	Imanes	41
3.6.3	Metodología de optimización.....	42
3.6.4	Óptimo y característica en vacío	45
3.7	MODELO EQUIVALENTE DEL GENERADOR.....	47
3.7.1	Resistencia.....	47
3.7.2	Inductancia	48
3.8	ELECTRÓNICA DE POTENCIA.....	50
3.8.1	Baterías.....	50
3.8.2	Control de tensión continua.....	52
3.8.3	Filtro LC.....	53
3.8.4	Puente Rectificador	54
3.9	PROGRAMA COMPORTAMIENTO CON CARGA.....	57
3.9.1	Td min y Td max.....	57
3.9.2	Control de Td.....	62
3.9.3	Comportamiento en régimen estacionario.....	64
3.10	ECUACIONES DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO	70
3.10.1	Medidas de los discos de bobinas e imanes	70
3.10.2	Cálculo de inercia del aspa y eje del aerogenerador.....	71
3.10.3	Cálculo de inercia de los discos de imanes	72

3.10.4	Ecuaciones que rigen el comportamiento dinámico	73
3.11	COMENTARIOS	74
Capítulo 4.	IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIÓN EN LOCALIDAD RURAL.....	75
4.1	CARACTERÍSTICAS DE LA LOCALIDAD ESCOGIDA	75
4.1.1	Ubicación e información demográfica	75
4.1.2	Flora y fauna.....	75
4.1.3	Clima	76
4.2	MOTIVACIÓN.....	80
4.3	DESARROLLO DE PROYECTO DE ELECTRIFICACIÓN PARA OLLAGÜE.....	80
4.3.1	Consumo actual	80
4.3.2	Proyección de la demanda.....	83
4.3.3	Alternativa grupo electrógeno diesel.....	84
4.3.4	Alternativa puramente eólica.....	86
4.3.5	Análisis de alternativas.....	89
4.4	COMENTARIOS	90
Capítulo 5.	CONCLUSIONES.....	91
5.1	TRABAJOS FUTUROS.....	93
REFERENCIAS	95
ANEXO 1	98
ANEXO 2	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Capacidad instalada energía eólica a nivel mundial a final de 2010, [3].	7
Figura 2.2: Composición matriz energética Chilena 2011.	8
Figura 2.3: Cobertura de la electrificación rural en Chile, año 2010.	10
Figura 2.4: Partes de un generador eólico, [14].	13
Figura 2.5: Tipo de torres, tubular (E-126), celosía y mástil tensado (de izquierda a derecha).	14
Figura 2.6: Curvas de eficiencia según Raiambal y Chellamuthu, fuente [17].	17
Figura 2.7: Curvas de eficiencia en función del número de aspas, fuente [20].	17
Figura 2.8: Modelo monofásico máquina sincrónica, fuente [21].	18
Figura 2.9: Curva B-H imán y relación con otros parámetros.	20
Figura 2.10: Curvas característica de los imanes, teóricas (en azul) y reales (negro).	20
Figura 3.1: Partes de una máquina de flujo axial con imanes permanentes.	22
Figura 3.2: Curva de Desmagnetización para un imán cilíndrico de grado N42.	24
Figura 3.3: de Desmagnetización para un imán cilíndrico de grado N52.	25
Figura 3.4: Curva del hierro dulce.	25
Figura 3.5: Resultado gráfico en QuickField para la densidad de flujo magnético total (arriba) y la densidad de flujo magnético en el eje horizontal (abajo) entre dos imanes DX08-N52 separados a 42.56 [mm], sin hierro dulce.	27
Figura 3.6: Resultado gráfico en QuickField para la densidad de flujo magnético total (arriba) y la densidad de flujo magnético en el eje horizontal (abajo) entre dos imanes DX08-N52 separados a 42.56 [mm], con hierro dulce.	28
Figura 3.7: Volumen de integración considerado para la obtención de la densidad de flujo magnético promedio en el eje horizontal.	29
Figura 3.8: Comparativa imanes: B_x vs. Distancia entre imanes/2, sin hierro dulce.	29
Figura 3.9: Comparativa imanes: B_x vs. Distancia entre imanes/2, con hierro dulce.	30
Figura 3.10: Representación de un imán cilíndrico.	31
Figura 3.11: Voltaje trifásico (derecha) con configuración de 2 polos y 3 bobinas (izquierda).	37
Figura 3.12: Equivalencia en el paso de dos polos (izquierda) a p polos (derecha).	37
Figura 3.13: Esquema de conexión de bobinas con 18 polos y ubicación de imanes.	38
Figura 3.14: Consideraciones de las espiras y cálculo de radio.	43
Figura 3.15: Diagrama de flujo de la metodología de implementación.	44
Figura 3.16: Característica en vacío, frecuencia y velocidad angular en función del viento para la solución encontrada.	46
Figura 3.17: Modelo equivalente monofásico del generador diseñado.	47

Figura 3.18: Disco de hierro dulce (derecha) y lazos de flujo (izquierda).	49
Figura 3.19: Esquema de conexiones y dispositivos entre el generador y el consumo.	50
Figura 3.20: Rectificador trifásico más filtro LC.	54
Figura 3.21: Rectificador trifásico de onda completa o Puente de Graetz [35].	54
Figura 3.22: Ejemplo de salida de la onda rectificada por onda completa, Puente de Graetz.....	55
Figura 3.23: Corriente, Potencias y Coeficiente total de la máquina, $T_d \max = 1$	59
Figura 3.24: Potencias Activas con distintos transformadores y Potencia viento.	60
Figura 3.25: Corriente, Potencias y Coeficiente total de la máquina, $T_d \min$	61
Figura 3.26: T_d lineal (izquierda) y VD (derecha) en función de la velocidad del viento.....	62
Figura 3.27: Corriente, Potencias y Coeficiente total de la máquina, con control de T_d lineal.	63
Figura 3.28: Corriente, Potencias y Coeficiente total de la máquina, con control de T_d	65
Figura 3.29: T_d cúbico (izquierda) y VD (derecha) en función de la velocidad del viento.....	66
Figura 3.30: Potencia activa generada discreta en función del viento para distintas razones de transformación con control cúbico de T_d	67
Figura 3.31: Potencia activa generada discreta en función del viento para distintas razones de transformación con control lineal de T_d	67
Figura 3.32: Potencia activa probable o distribuida en función de la razón de transformación.....	69
Figura 3.33: Relación Pitagórica entre ángulo, lado y distancia.	70
Figura 4.1: II Región de Antofagasta, en rojo la Comuna de Ollagüe.	75
Figura 4.2: Perfil anual de temperaturas para Ollagüe.	76
Figura 4.3: Perfil diario de vientos en Ollagüe, curva celeste (inferior) a 10[m] y curva azul (superior) a 20[m].	78
Figura 4.4: Perfil anual de vientos en Ollagüe, curva celeste (inferior) a 10[m] y curva azul (superior) a 20[m].	78
Figura 4.5: Rosa de vientos de Ollagüe, Norte hacia arriba.	79
Figura 4.6: Distribución diaria de vientos en Ollagüe.....	79
Figura 4.7: Variación de la velocidad con la altura, curva celeste (inferior) y azul (superior) obtenidas con los datos a 10[m] y a 20[m], respectivamente.....	80
Figura 4.8: Curva de potencia diaria para distintos consumos en el periodo invierno, Ollagüe.	81
Figura 4.9: Curva de potencia diaria para distintos consumos en el periodo primavera, Ollagüe.	82
Figura 4.10: Curva de potencia diaria para distintos consumos en el periodo verano, Ollagüe.....	82
Figura 4.11: Curva de potencia del generador eólico diseñado.....	86
Figura 4.12: Estado de carga de las baterías durante un año.....	87
Figura 4.13: Potencias generadas en un año por el aerogenerador diseñado.	87
Figura 4.14: Ubicación, círculo negro, aerogenerador diseñado.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Proyectos eólicos en funcionamiento, Chile 2011, fuente [8].....	11
Tabla 2.2: Capacidad instalada en Chile en centrales eoloeléctricas, a lo largo de los años.....	11
Tabla 2.3: Proyectos eólicos en Chile, al 28 de Febrero 2010.	12
Tabla 3.1: Datos de la Curva de Desmagnetización para un imán cilíndrico de grado N42.	26
Tabla 3.2: Datos de la Curva de Desmagnetización para un imán cilíndrico de grado N52.....	26
Tabla 3.3: Datos de la curva del hierro dulce.....	26
Tabla 3.4: Errores máximos y promedios de la fórmula ajustada en relación a los resultados de QuickField.....	32
Tabla 3.5: Relación velocidad del viento y polos.	35
Tabla 3.6: Relación velocidad del viento y frecuencia.	36
Tabla 3.7: Datos de imanes cilíndricos desde K&J Magnetics, Inc.	41
Tabla 3.8: Especificaciones Chopper.....	52
Tabla 3.9: Especificaciones del rectificador.....	57
Tabla 3.10: Resumen Figura 3.23, razones, velocidades inicial y final, potencia activa.	59
Tabla 3.11: Resumen Figura 3.25, razones, velocidades inicial y final, potencia activa.	61
Tabla 3.12: Resumen Figura 3.29, máximo voltaje VD para distintas razones de transformación.	66
Tabla 3.13: Comparación potencias probables generadas.....	68
Tabla 3.14: Relación entre parámetros ingresados al modelo, versus los resultantes.	69
Tabla 3.15: Resumen características eléctricas máximas.....	69
Tabla 4.1: Temperaturas medias mensuales para Ollagüe. Recurso eólico	77
Tabla 4.2: Balance anual de energía y consumo sistema eléctrico Ollagüe.	83
Tabla 4.3: Balance anual de energía y consumo sistema eléctrico Ollagüe suministrando energía 24h/día.	83
Tabla 4.4: Proyección del consumo de energía, próximos 20 años.....	84
Tabla 4.5: Proyección del valor diesel, próximos 10 años.	85
Tabla 4.6: Costos asociados al grupo electrógeno Cummins QSL9.	85
Tabla 4.7: Indicadores económicos evaluación alternativa diesel.....	86
Tabla 4.8: Tarifa de la energía proyectada con alternativa diesel.	86
Tabla 4.9: Costos asociados a la instalación del aerogenerador.....	88
Tabla 4.10: Indicadores económicos evaluación alternativa eólica.	89
Tabla 4.11: Tarifa de la energía proyectada con alternativa eólica.....	89
Tabla A.1: Listado de características de cables esmaltados.....	98