



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# **DETERMINACIÓN DE RANGOS DE OPERACIÓN DE GENERADOR DE INDUCCIÓN PARA APLICACIÓN EN AEROGENERADORES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL ELECTRICISTA

**PAMELA ANDREA CASTILLO TORO**

PROFESOR GUÍA:  
JORGE ROMO LÓPEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
NELSON MORALES OSORIO  
AUGUSTO LUCERO ALDAY

SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2010

“DETERMINACIÓN DE RANGOS DE OPERACIÓN DE GENERADOR DE INDUCCIÓN PARA  
APLICACIÓN EN AEROGENERADORES”

En el presente trabajo de título se analiza teórica y experimentalmente el funcionamiento de una máquina de inducción de jaula de ardilla, operando como generador de un aerogenerador conectado a la red. El objetivo es analizar y caracterizar el comportamiento del aerogenerador, determinando valores de velocidad límites de operación, en la zona de generador de la máquina de inducción. En efecto, una máquina de inducción de jaula de ardilla simple, debe operar a velocidad mayor a la síncrona para generar; y a su vez, la máquina no debe superar determinado valor de velocidad, para evitar elevadas corrientes que la dañarían por temperatura.

Para estudiar experimentalmente este comportamiento, como máquina motriz se utiliza un motor de corriente continua, el cual emula a la hélice del aerogenerador movida por el viento. De esta forma, se obtienen experimentalmente los parámetros de la máquina de inducción y su rango de generación, que resulta ser relativamente pequeño (1500 a 1516 [rpm] en el caso estudiado). Con los parámetros mencionados, se realizan cálculos en base a modelos simplificados, para comparar los resultados experimentales con los teóricos y asegurar la confiabilidad del modelo.

Para ampliar el rango útil de velocidades de generación antes obtenido, se realizan pruebas experimentales conectando el generador a la red mediante un variador de frecuencia y empleando una máquina de inducción de rotor bobinado. En el primer caso, se muestra que controlando la frecuencia del variador, es posible generar en un amplio rango de velocidades. Y en el caso de rotor bobinado, se encuentra que agregando resistencias al rotor también se obtiene una ampliación en el rango de velocidades de generación, pero menos significativa que con el variador de frecuencia.

Finalmente, se hace una aplicación teórica para una instalación donde se conoce el régimen de viento y la curva de demanda. Primero se especifican la hélice y el generador, y luego – mediante modelos de la hélice y del generador – se evalúa el rango de velocidades en que se puede generar, tanto para el generador conectado directo a la red, como también conectado mediante un variador de frecuencia.

Al evaluar el ahorro de energía que se logra, se concluye que la solución propuesta con variador de frecuencia es notablemente mejor y se justifica estudiarla en más detalle en un trabajo próximo.

## **Agradecimientos**

Los más sinceros agradecimientos a mi profesor guía, Sr. Jorge Romo López, por su buena disposición y gran dedicación, fue un pilar fundamental que me orientó desde el comienzo, cuando el tema era otro, siempre estuvo atento a mis preguntas y resolvió mis dudas. De corazón, muchas gracias.

En segundo lugar, quiero destacar a mi gran colaborador, Sr. Jorge Villalobos, encargado del laboratorio de máquinas del Departamento de Ingeniería Eléctrica, quien me ayudó en cada una de las pruebas experimentales, me aclaraba dudas y me daba consejos.

Quiero dar las gracias también, a mis profesores integrantes de la comisión, Sr. Nelson Morales Osorio y Sr. Augusto Lucero Alday, por las observaciones realizadas y la buena disposición para hacerlas.

Por último, no puedo dejar de reconocer a mi familia y a mis amigos, quienes me han acompañado durante muchos años, compartiendo alegrías y penas, éxitos y fracasos, y son los que seguirán conmigo en este camino. Quiero destacar a mis padres, Adolfo y Ximena, por ser grandes maestros, a mis hermanos, Daniela, Gabriel y Claudio, por estar siempre conmigo y disfrutar la vida juntos, a mis amigas Andrea y Fabiola, por ser tan positivas y siempre estar inyectándome energía, a mis amigos Sebastián, Pablo y Nicolás, con los que compartí largas jornadas de estudios y también buenas celebraciones, que espero sigan durante muchos años más, por último, a mi abuela, Alicia Vega Pais, quien de alguna forma, debe haber puesto en mi el interés por la ingeniería, y específicamente, la ingeniería eléctrica. Los quiero mucho.

# Índice de Contenidos

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN .....	1
1.2	OBJETIVO GENERAL.....	1
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	1
1.4	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	2
<b>2</b>	<b>ENERGÍA EÓLICA Y GENERADORES EOLOELÉCTRICOS</b> .....	<b>4</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO [1,2] .....	5
2.2	CRONOLOGÍA DE LA GENERACIÓN EOLOELÉCTRICA [2,4] .....	5
2.3	INFORMACIÓN RELEVANTE DEL VIENTO PARA ESPECIFICACIÓN DE UN AEROGENERADOR [2] .....	7
2.4	IMPORTANCIA DEL EMPLAZAMIENTO DEL AEROGENERADOR [2,3] .....	8
2.5	GENERADORES DE INDUCCIÓN AISLADOS Y CONECTADOS A SISTEMAS ELÉCTRICOS EXISTENTES [3].....	10
2.6	ESTRUCTURA DE LOS AEROGENERADORES [2,3,7,8] .....	11
2.6.1	HÉLICE .....	11
2.6.2	CAJA DE ENGRANAJES O AMPLIFICADORA DE VELOCIDAD .....	12
2.6.3	GENERADOR ELÉCTRICO [5,7,8,9] .....	12
2.6.4	SISTEMAS DE CONTROL [2,3,10] .....	16
2.7	EMPLEO DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA EN AEROGENERADOR CONECTADO A LA RED [8,9].....	18
2.7.1	VENTAJAS Y DESVENTAJAS RESPECTO A OTRAS OPCIONES .....	18
2.7.2	POSIBILIDADES DE AMPLIAR EL RANGO DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN .....	19
2.8	RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE ROTACIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO [3] .....	19
2.9	COMENTARIOS .....	21
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO</b> .....	<b>22</b>
3.1	MODELO DE COMPORTAMIENTO DE LA HÉLICE [2,5].....	22
3.1.1	POTENCIA EXTRAÍBLE DEL VIENTO .....	23
3.1.2	EXTRACCIÓN DE LA ENERGÍA DEL VIENTO .....	24
3.2	MODELO DE COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR TRIFÁSICO [1,4,7,8,13] .....	26
3.2.1	PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.....	26
3.2.2	MODELO CIRCUITAL.....	28
3.2.3	ECUACIONES DE COMPORTAMIENTO .....	32

	3.2.4	CURVA TORQUE – VELOCIDAD .....	33
	3.3	COMENTARIOS .....	35
<b>4</b>		<b>ENSAYOS DE LABORATORIO DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA.....</b>	<b>36</b>
	4.1	PRUEBAS PARA OBTENER PARÁMETROS DE LA MÁQUINA.....	36
	4.1.1	PRUEBA EN VACÍO .....	36
	4.1.2	PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO .....	38
	4.2	PRUEBA DE GENERACIÓN.....	40
	4.2.1	CONEXIÓN DEL GENERADOR A LA RED .....	40
	4.2.2	PRUEBA DE GENERACIÓN.....	42
	4.2.3	COMPARACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL .....	44
	4.2.4	OPERACIÓN COMO MOTOR DE INDUCCIÓN (DESLIZAMIENTOS POSITIVOS).....	50
	4.3	COMENTARIOS .....	53
<b>5</b>		<b>ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE OPCIONES PARA AMPLIAR RANGO ÚTIL DE VELOCIDADES .....</b>	<b>55</b>
	5.1	GENERADOR DE ROTOR JAULA DE ARDILLA CON VARIADOR DE FRECUENCIA .....	55
	5.1.1	PRUEBA COMO MOTOR EN VACÍO PARA FRECUENCIAS HASTA LA NOMINAL.....	55
	5.1.2	PRUEBA CON MOTOR EN VACÍO PARA FRECUENCIAS SOBRE LA NOMINAL.....	57
	5.1.3	PRUEBA DE GENERACIÓN A 40 [Hz] .....	57
	5.1.4	PRUEBA DE GENERACIÓN A 45 [Hz] .....	59
	5.2	GENERADOR DE ROTOR BOBINADO .....	61
	5.3	COMENTARIOS .....	68
<b>6</b>		<b>APLICACIÓN TEÓRICA EMPLEANDO MÁQUINA DE INDUCCIÓN CONVENCIONAL .....</b>	<b>69</b>
	6.1	RÉGIMEN DE VIENTO .....	69
	6.2	MÁQUINA DE INDUCCIÓN CON ROTOR JAULA DE ARDILLA.....	71
	6.3	HÉLICE Y CAJA DE CAMBIOS.....	72
	6.4	RAZÓN DE VELOCIDAD DE PUNTA .....	73
	6.5	RANGOS DE GENERACIÓN DE LA MÁQUINA .....	74
	6.5.1	GENERACIÓN DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN CONECTADA A LA RED DE 50 [Hz].....	74
	6.5.2	GENERACIÓN CON VARIADOR DE FRECUENCIA .....	82
	6.5.3	GENERACIÓN CON MÁQUINA DE ROTOR BOBINADO .....	90
	6.6	COMPARACIÓN DE MÉTODOS.....	92
<b>7</b>		<b>CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>94</b>
<b>8</b>		<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>97</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Molino tipo torre, con rotor de vela, siglo XII. ....	4
Figura 2.2: Aerogenerador Enercon E-126. ....	6
Figura 2.3: Aerogenerador instalado en el mar, nivel de rugosidad 0.....	8
Figura 2.4: Elementos que componen un aerogenerador.....	11
Figura 2.5: Generador Sincrónico conectado directamente a la red. ....	13
Figura 2.6: Generador sincrónico con etapa de rectificación e inversión.....	14
Figura 2.7: Generador asincrónico jaula de ardilla conectado directamente a la red. ....	15
Figura 2.8: Generador asincrónico doblemente alimentado conectado directamente a la red.....	16
Figura 2.9: Gráfico con Factor de velocidad de punta para distintos aerogeneradores. ....	20
Figura 3.1: Velocidades del viento en la operación de una turbina.....	24
Figura 3.2: Circuito equivalente del rotor.....	29
Figura 3.3: Circuito equivalente del estator.....	29
Figura 3.4: Circuito equivalente del rotor referido al estator. ....	30
Figura 3.5: Representación del rotor.....	31
Figura 3.6: Circuito equivalente monofásico exacto.....	31
Figura 3.7: Circuito equivalente monofásico aproximado.....	32
Figura 3.8: Curva Torque v/s Velocidad.....	34
Figura 3.9: Diagrama torque-velocidad de la máquina de inducción. ....	35
Figura 4.1: Gráfico Corriente v/s Deslizamiento. ....	43
Figura 4.2: Gráfico Potencias v/s Velocidad. ....	47
Figura 4.3: Gráfico Torque y Potencia v/s Velocidad y Deslizamiento. ....	52
Figura 5.1: Gráfico Corriente generada v/s Deslizamiento, para resistencia de 200 [ $\Omega$ ]. ....	63
Figura 5.2: Gráfico Corriente generada v/s Deslizamiento, para resistencia de 85 [ $\Omega$ ]. ....	65
Figura 5.3: Gráfico Corriente generada v/s Deslizamiento, con resistencia de 70 [ $\Omega$ ]. ....	66
Figura 5.4: Gráfico Potencia v/s Velocidad, para las distintas resistencias incorporadas.....	67
Figura 6.1: Gráfico de Velocidad v/s Hora del día a 10 [m] de altura. ....	71
Figura 6.2: Potencia v/s Deslizamiento de la máquina escogida.....	78
Figura 6.3: Datos de hora y velocidad del viento.....	79
Figura 6.4: Curva de demanda de industria escogida.....	82
Figura 6.5: Control del Generador con Variador de Frecuencia.....	83

## Índice de Tablas

Tabla 4.1: Datos nominales de la máquina de inducción.....	36
Tabla 4.2: Datos de la prueba en vacío.....	37
Tabla 4.3: Datos de la prueba de rotor bloqueado.....	38
Tabla 4.4: Datos de placa de la máquina de corriente continua.....	40
Tabla 4.5: Primera medición de datos en MCC.....	41
Tabla 4.6: Medición de datos en MCC al conectar máquina de inducción.....	41
Tabla 4.7: Datos prueba de generación.....	42
Tabla 4.8: Datos de deslizamiento, corriente, voltaje y velocidad, en prueba de generación.....	44
Tabla 4.9: Diferencias entre corriente medida y corriente calculada.....	45
Tabla 4.10: Coseno experimental, ángulo teórico y su coseno respectivo.....	46
Tabla 4.11: Potencias mecánica y trifásica.....	46
Tabla 4.12: Diferencia entre potencias.....	48
Tabla 4.13: Pérdidas calculadas experimentalmente.....	49
Tabla 4.14: Comparación de pérdidas y eficiencia.....	49
Tabla 4.15: Primera medición de datos, máquina de inducción como motor.....	50
Tabla 4.16: Datos de prueba de máquina de inducción como motor.....	51
Tabla 4.17: Datos Figura 4.3.....	53
Tabla 5.1: Datos al ir aumentando la frecuencia hasta la nominal.....	55
Tabla 5.2: Datos a 40 [Hz] sólo con MCC.....	57
Tabla 5.3: Datos a 40 [Hz] ambas máquinas conectadas.....	57
Tabla 5.4: Datos prueba de generación a 40 [Hz].....	58
Tabla 5.5: Datos a 45 [Hz] sólo con MCC.....	59
Tabla 5.6: Datos a 45 [Hz] ambas máquinas conectadas.....	59
Tabla 5.7: Datos de prueba de generación a 45 [Hz].....	60
Tabla 5.8: Datos de placa de la máquina de inducción.....	61
Tabla 5.9: Datos de prueba de generación con rotor bobinado antes de generar.....	61
Tabla 5.10: Datos prueba de generación con máquina de rotor bobinado y resistencia de 200 [ $\Omega$ ].....	62
Tabla 5.11: Datos prueba de generación con máquina de rotor bobinado y resistencia de 85 [ $\Omega$ ].....	64
Tabla 5.12: Datos prueba de generación con máquina de rotor bobinado y resistencia de 70 [ $\Omega$ ].....	66
Tabla 6.1: Datos de hora y velocidad del viento.....	70
Tabla 6.2: Datos de placa de la máquina de inducción.....	72
Tabla 6.3: Variables de máquina de inducción escogida, obtenidas teóricamente.....	77

Tabla 6.4: Datos teóricos de velocidades y deslizamiento.....	79
Tabla 6.5: Datos de generación relacionados a velocidad del viento para máquina escogida.....	80
Tabla 6.6: Datos de Curva de Demanda. ....	81
Tabla 6.7: Frecuencia de salida del variador según velocidad del viento. ....	84
Tabla 6.8: Potencia generada en cada hora del día típico, con $s=-0,04$ . ....	88
Tabla 6.9: Potencia generada en cada hora del día típico, con $s=-0,03$ . ....	89
Tabla 6.10: Datos de generación relacionados a velocidad del viento, con máquina de rotor bobinado....	91
Tabla 6.11: Comparación máquina de inducción sin variador y con variador.....	92



# **1 Introducción**

## **1.1 Motivación**

El creciente uso de las energías renovables, gracias a las nuevas normativas con las que cuenta el país, es el impulso que motiva la realización del presente trabajo de título. En particular, la energía eólica es, dentro de las energías renovables no convencionales, una de las más usadas y con gran potencial, a lo largo y ancho de Chile. Por esta razón, estudiar sobre el rango de operación de un aerogenerador y cómo ampliar el mismo, son apuestas importantes que pueden resultar beneficiosas a la vez.

Por otra parte, estudiar, analizar y escribir sobre el tema de la energía eólica, es una forma más profunda de impregnarse de conocimientos y aprendizajes sobre las energías renovables, lo que se espera pueda contribuir al desarrollo laboral futuro.

Finalmente, destaca el aporte que estas tecnologías ofrecen a la protección del medio ambiente, las cuales pese a presentar leves desventajas, son menos destructoras del mismo, al compararlas con centrales termoeléctricas o hidroeléctricas.

## **1.2 Objetivo General**

El objetivo general de esta memoria es analizar teórica y experimentalmente el comportamiento de una máquina de inducción de rotor jaula de ardilla, operando como generador de un aerogenerador conectado a la red. La idea, después de realizado esto, es aplicar opciones con las cuales se amplíe el rango de generación de la máquina.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos del presente trabajo se explicitan a continuación:

- Determinar los límites de operación de la máquina de inducción estudiada, principalmente su rango de generación. Para esto se realizan pruebas experimentales sobre la misma, utilizando un motor de corriente continua que emula la hélice movida por el viento.

- Registrar las variables corriente, voltaje, potencia, factor de potencia, velocidad y deslizamiento, y calcular a partir de ellas, de forma teórica, el torque y la potencia mecánica.
- Analizar la ampliación del rango útil de velocidades del viento que puede alcanzarse con un variador de frecuencia. Al cambiar la frecuencia hacia la máquina, su velocidad síncrona varía, lo que implica que se puede generar a otras velocidades del rotor y por consiguiente, a otras velocidades de viento.
- Analizar la ampliación del rango útil de velocidades del viento que puede alcanzarse utilizando una máquina de inducción de rotor bobinado. Para esto se agregan resistencias en los enrollados del rotor.
- Realizar comparaciones de los resultados obtenidos, con ayuda de tablas y gráficos.
- Elaborar una aplicación teórica a partir de un motor de inducción típico, considerando cierto régimen de viento, cierta hélice y una caja de engranajes. Luego, aplicar el variador de frecuencia, y en segundo lugar, suponer que se cuenta con una máquina de rotor bobinado, de los mismos parámetros, y encontrar los rangos de ampliación de generación para ambos casos.
- Desarrollar diversos análisis de los resultados obtenidos.

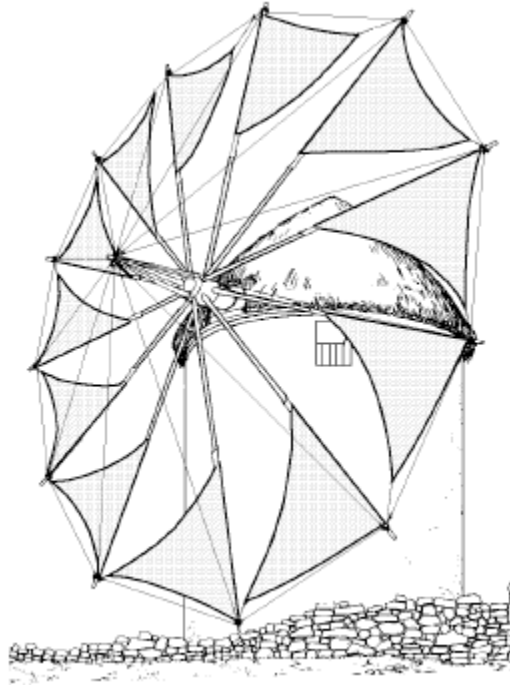
#### **1.4 Estructura de la memoria**

La memoria se divide en 8 capítulos, incluido el presente, correspondiente a la Introducción. El Capítulo 2 trata sobre la energía eólica y los aerogeneradores o centrales eolieléctricas, incluyendo, cronología, características, estructura de los aerogeneradores, entre otros tópicos. El Capítulo 3 corresponde al de Análisis de Comportamiento; en él se estudian los modelos de funcionamiento de la hélice y de la máquina de inducción. En el Capítulo 4 se explican las pruebas experimentales que se realizan, se encuentran los parámetros de la máquina y el rango de deslizamiento que presenta, al estar acoplada con determinado motor de corriente continua. En el Capítulo 5 se detallan las opciones para ampliar el rango útil de

velocidades, se exponen gráficos con las comparaciones y se realizan análisis. El Capítulo 6 muestra el caso con una máquina de inducción típica, a la cual se le calcula su rango de generación y luego se le aplican las técnicas para ampliar el mismo; trata sobre el ahorro de potencia que se tiene con el aerogenerador y se especifican datos con respecto a este punto. En el Capítulo 7 se exponen las conclusiones y el trabajo futuro que se podría realizar con base en la presente memoria. Finalmente, el Capítulo 8 corresponde a la bibliografía utilizada en el transcurso del trabajo.

## 2 Energía Eólica y Generadores Eoloeléctricos

La energía eólica ha estado presente desde los inicios de la historia de la humanidad, cuando se comenzaron a utilizar barcos a vela o a emplearse molinos para la extracción de agua o la producción de harina. En estos casos, se observa que la energía se transforma en mecánica o cinética para su uso.



**Figura 2.1: Molino tipo torre, con rotor de vela, siglo XII.**

En la actualidad el principal uso de la energía eólica es a través de generadores eoloeléctricos, es decir, máquinas que transforman la energía cinética generada por las corrientes de aire en energía eléctrica.

En el presente capítulo se exponen brevemente los principales aspectos relativos a energía eólica y aerogeneradores, como son, por ejemplo: las características del recurso eólico, los aspectos a considerar para el emplazamiento de un aerogenerador, los componentes de un aerogenerador, las opciones de conexión a la carga, tipos de generadores eléctricos y las ventajas y desventajas de emplear un generador de inducción trifásico de jaula de ardilla.

## **2.1 Características del viento [1,2]**

El viento se produce por las diferencias de temperaturas que alcanzan las distintas partes de la Tierra. Dado que el aire caliente es más ligero que el aire frío y que éste se encuentra ubicado alrededor de la línea del Ecuador, en esa región el aire sube hasta una altura de 10 [km] aproximadamente y luego comienza a desplazarse hacia el norte y hacia el sur.

Como consecuencia de la rotación terrestre se produce un efecto bastante complejo en el movimiento del aire: en el hemisferio norte las masas de aire altas tienden a desviarse hacia el Este, en cambio, las masas de aire bajas se desvían hacia el Oeste; esto ocurre por las fuerzas de inercia de Coriolis. En el hemisferio Sur en cambio, ocurre lo contrario.

Es importante notar las diferentes velocidades que puede tener el viento, debido a que según ellas, se podrá generar electricidad o no.

Cabe destacar, que el viento utilizado en la energía eólica es el que se encuentra en la superficie terrestre y, dada las características geográficas, se pueden encontrar diversos tipos de vientos, ya sea brisas marinas o vientos de montaña, los cuales se deben estudiar en profundidad para determinar la cantidad del recurso y su eventual utilización. Es decir, la rugosidad del terreno y los obstáculos que se encuentran a su paso, son elementos trascendentales que se deben considerar al momento de evaluar o diseñar un proyecto de estas características.

## **2.2 Cronología de la generación eoloeléctrica [2,4]**

Se considera que la primera turbina eólica para generar electricidad fue construida por Charles F. Brush, quien fue uno de los fundadores de la Compañía Eléctrica Americana, en el año 1887. Esta turbina poseía un rotor de 17 [m] de diámetro y 144 aspas, y estaba construida en madera de cedro. Pese al gran tamaño que tenía, sólo generaba 12 [kW], debido principalmente a la ineficiencia que presentaba.

El siguiente destacado en este tema fue el danés Poul La Cour, quien además de estudios sobre electrólisis, descubrió que en turbinas eólicas de giro rápido con pocas aspas, se produce una mayor eficiencia en relación a las de giro lento (como fue la construida por Charles F. Brush).

A mediados del siglo XX, la compañía danesa F. L. Smidth construyó aerogeneradores de tipo bipala y tripala. Sin embargo, se tuvo generación de corriente alterna a través de

aerogeneradores recién en 1956, cuando Johannes Juul, uno de los primeros discípulos de Poul La Cour, construyó para la compañía eléctrica SEAS, una turbina tripala, con orientación electromecánica y una máquina de inducción. Esta máquina funcionó por 11 años sin mantenimiento. Un elemento a destacar fue el invento del freno aerodinámico de emergencia en punta de pala, el cual, en casos de vientos muy fuertes, se suelta por la fuerza centrífuga.

En la década del 70, con la crisis del petróleo de 1973, los países comenzaron a pensar en otras tecnologías para la producción de energía eléctrica. Fue así como la energía eólica tomó mayor reconocimiento e inició un mayor desarrollo que continúa hasta nuestros días. De esta forma, países como Dinamarca, Alemania, Suecia y Estados Unidos fijaron su atención en la construcción de grandes aerogeneradores. Lamentablemente, en un comienzo los aerogeneradores construidos eran tan grandes y caros, que incidían en un alto costo de la energía, lo que se constituyó en un punto clave en contra de esta opción.

A pesar de estos inconvenientes, el desarrollo del uso de la energía eólica ha continuado y en la actualidad se pueden encontrar aerogeneradores de hasta 6 [MW]. Uno de ellos es el Enercon E-126, que tiene una altura de 138 [m] y un diámetro de sus aspas de 126 [m].



**Figura 2.2: Aerogenerador Enercon E-126.**

Actualmente se ha concluido que la mejor solución consiste en emplear numerosos aerogeneradores, “Parques o granjas eólicas”, para generar la energía requerida a un menor costo. Hoy, las centrales eoloeléctricas se proyectan en esta forma.

En Chile, el año 2008, se promulga la Ley de Fomento a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), la cual promueve el uso de energías no convencionales renovables. Esta ley tendrá un alto impacto en el desarrollo de la producción de energías renovables y especialmente de la energía eólica, dado que dispone la obligación para los generadores de proveer un 5% de generación eléctrica con ERNC, a partir del presente año 2010, aumentando en forma progresiva desde el 2014 hasta el 2024, donde este porcentaje debe alcanzar un 10%.

Esto se constituye en una oportunidad de desarrollo para la energía eólica, incentivando la investigación y crecimiento de este tipo de energía. Esto se puede observar en la gran cantidad de parques eólicos que ya han sido y están siendo construidos en el país.

### **2.3 Información relevante del viento para especificación de un aerogenerador [2]**

Al realizar el estudio de una zona para determinar la instalación de un parque eólico, son muchos los factores que se deben analizar para comprobar que éste será efectivo.

Claramente el punto clave es el viento que hay en el lugar, para lo cual se deben realizar investigaciones de su comportamiento y de la valoración energética que tiene. Es importante considerar también el espacio para la distribución de los aerogeneradores, así como los aspectos legales que dicen relación con el cumplimiento de normativas medioambientales, en cuanto a ruido, impacto visual, impacto en la flora y fauna, y en la comunidad de la zona.

Para determinar el aerogenerador más conveniente en la zona, además de los parámetros antes expuestos, se requiere conocer la forma en que el aerogenerador suministrará la energía eléctrica: si suministrará energía a una instalación aislada del sistema interconectado, o si operará conectado a dicho sistema. También la conducta del viento influirá en la elección de las máquinas, ya que si se presenta una gran variación de éste en las diferentes horas del día, un tipo de aerogenerador puede ser más beneficioso que otro.

Hay que destacar, sin embargo, que la inercia del rotor puede compensar las variaciones más rápidas de cambio de velocidad del viento, lo que resulta muy favorable y puede ser otro tema relevante en la elección del aerogenerador.

Por último, se deben tener en cuenta todos los obstáculos físicos que rodeen al aerogenerador, al menos en un kilómetro a la redonda, debido al efecto de frenado o de turbulencias que pueden producir.

## **2.4 Importancia del emplazamiento del aerogenerador [2,3]**

Enlazado con el punto anterior y debido al comportamiento de las corrientes de aire, el lugar de emplazamiento de un aerogenerador o de un parque eólico, es una parte trascendental en el estudio de la instalación de éstos.

Este aspecto tiene relación principalmente con las características físicas del lugar, ya sea la rugosidad del terreno, el cizallamiento que experimenta el viento, que se refiere a la variación de velocidades que tiene para las distintas alturas, y los efectos del viento que se pueden producir en las zonas, como son: el efecto túnel o el efecto colina.

En cuanto a la rugosidad, se definen diferentes niveles, de acuerdo a los tipos de obstáculos; por ejemplo la presencia de árboles y edificios, puede significar un nivel 3 ó 4; en cambio, la superficie del mar que es lo más liso que se puede tener, representa el nivel 0.



**Figura 2.3: Aerogenerador instalado en el mar, nivel de rugosidad 0.**



En el caso del cizallamiento, hay que notar que se puede producir una gran diferencia entre la velocidad del viento en el punto más alto del aspa, con respecto a la parte más baja de la misma. Hay programas computacionales que hacen estimaciones de velocidades del viento de acuerdo a datos que uno pueda entregar. Por ejemplo, si se midió el viento en una zona plana, como una gran explanada de hormigón (lo que se clasificaría con una clase de rugosidad 0,5), a una altura de 20 metros, el programa podrá estimar la velocidad para diversas combinaciones de altura y rugosidad.

Por el mismo motivo dado en la sección 2.3, es muy significativa la instalación de los aerogeneradores y el espacio que habrá entre ellos. En general se utiliza dejar, como mínimo, una distancia de tres diámetros en la dirección perpendicular a la dominante del viento y en la dirección del viento dominante, un trecho aún mayor, que puede llegar a los 9 diámetros. Esta distribución que se realiza corresponde al llamado efecto parque, es decir, de acuerdo a la colocación de los aerogeneradores se produce un apantallamiento entre ellos, por lo que se tendrá una pérdida de energía y ésta típicamente es del orden del 5%.

El caso del efecto túnel, es la misma representación de un bombín, es decir, por la parte más angosta el aire se mueve más rápido. De esta forma, para el caso de los aerogeneradores, si ponemos uno entre dos colinas, se puede producir un efecto túnel debido a la disminución de espacio que produce que el viento aumente su velocidad para pasar entre las dos colinas. Esta misma razón puede también ser un punto en contra, en el caso de que se produzcan muchos efectos túneles en distintas direcciones, lo que incluso podría provocar fallas o desgastes innecesarios.

El efecto colina se parece al anterior y se refiere a la consecuencia que hay de instalar un aerogenerador en un lugar desde donde pueda tener una amplia vista. Así, con el mismo principio del bombín, la velocidad del viento aumentará considerablemente y será muy conveniente producir energía en ese lugar. Aunque, claramente, también puede ocurrir que se produzcan turbulencias si se tiene una superficie muy accidentada lo que, finalmente, no sería provechoso.

En este mismo punto hay que tener en cuenta lo importante que es el suelo para el emplazamiento de los aerogeneradores, tanto por las cimentaciones de las mismas torres, como por los caminos de acceso que se necesitan tener para los pesados camiones que traen las diversas partes del aerogenerador.

## 2.5 Generadores de inducción aislados y conectados a sistemas eléctricos existentes [3]

Los generadores de inducción pueden encontrarse acoplados a la red o aislados de ella. En el caso de estar aislados, lo principal que se debe cumplir, es que la máquina esté conectada con capacitores que suministren la potencia reactiva que requiere el generador y las cargas añadidas.

Para el caso conectado al sistema eléctrico existente, se pueden dar diferentes modalidades, las cuales se explican a continuación:

1. *Acoplado directamente a la red:* en este caso el eje del generador gira a una velocidad fija dada por la frecuencia de la red. Esto se utiliza en generadores de baja potencia, ya que para potencias elevadas el consumo de reactivos sería muy alto. La principal desventaja de este sistema es que las perturbaciones, ya sean mecánicas o de potencia, afectan directamente a la red eléctrica.
2. *Acoplado a la red a través de un sistema conversor-inversor:* en esta configuración el generador se acopla a un rectificador, luego hay un sistema de corriente continua y por último un inversor para que entregue corriente alterna a la red. De esta forma ya no se tiene una velocidad fija como en el caso anterior y se transfieren pocas perturbaciones a la red. El problema de esta conexión es el alto costo que presenta, por lo que no es una aplicación común.
3. *Acoplado con deslizamiento mecánico:* este caso utiliza un rotor del tipo bobinado, al cual, utilizando electrónica de potencia, se le puede variar su resistencia, con lo que se consigue un cambio en la velocidad de giro del equipo. Debido a esto se altera también la eficiencia del generador, por lo tanto se debe considerar también este efecto si se usa esta opción.
4. *Doblemente alimentado o doblemente acoplado:* en este modo los devanados del estator se conectan de forma tradicional a la red trifásica, en cambio, los del rotor se conectan a través de un sistema conversor-inversor. Esta conexión es la que permite la

modificación de la magnitud y el ángulo de voltaje del rotor, así se logra controlar tanto la potencia activa como la reactiva.

## 2.6 Estructura de los aerogeneradores [2,3,7,8]

La estructura general de los aerogeneradores es, a grandes rasgos, la siguiente: en primer lugar la hélice, luego la góndola, donde se ubican entre otros la caja de engranajes y el generador, y por último, la torre.

En la Figura 2.4 se muestran los componentes anteriormente citados.

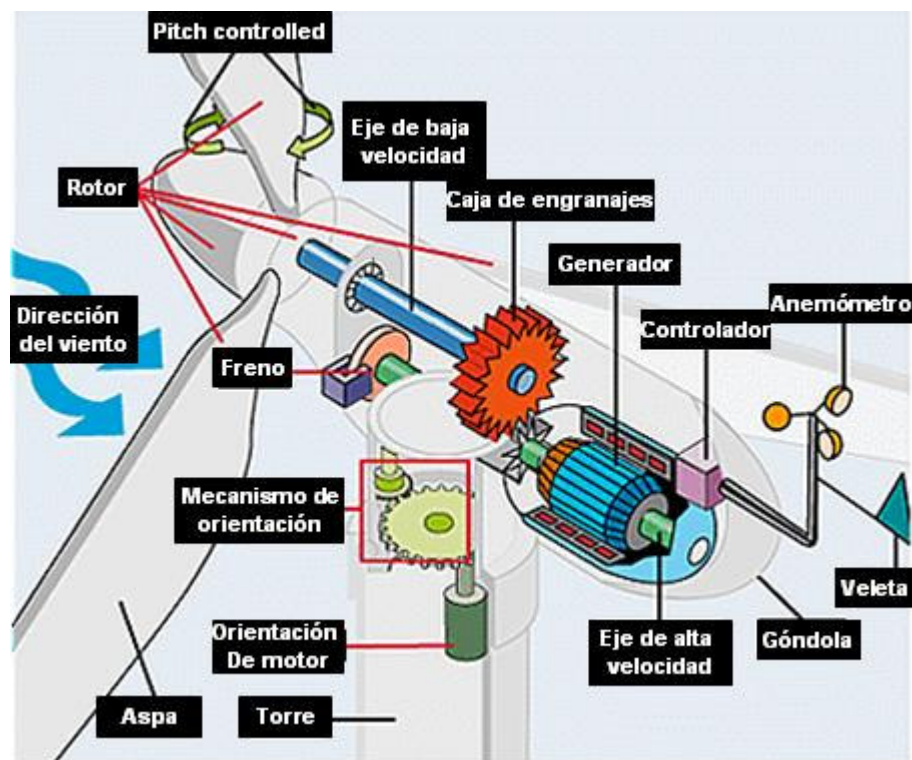


Figura 2.4: Elementos que componen un aerogenerador.

### 2.6.1 Hélice

La hélice es una parte fundamental del generador, debido a que es la encargada de recibir la energía cinética del viento para así mover el eje del generador al que está acoplada.

En la actualidad la mayoría de los aerogeneradores son tripala, es decir, de tres aspas, debido a las buenas características que presentan. Aunque de todas formas existen monopala, bipala y de mayor cantidad de aspas.

El material del que están contruidos depende de las condiciones ambientales donde va a funcionar el aerogenerador, no es lo mismo si es mar adentro o sobre un cerro; por lo tanto podría ser madera o fibra de vidrio, entre otros. El tamaño de la hélice puede variar de acuerdo a la función que va a cumplir y la potencia que se requiere que genere.

### **2.6.2 Caja de engranajes o amplificadora de velocidad**

La caja de engranajes corresponde a la parte que sirve para obtener otra velocidad de rotación: transforma la baja rotación de la hélice en alta rotación del eje del generador, es decir, convierte la potencia de alto torque, que tiene la hélice girando lentamente, en potencia de bajo torque y alta velocidad, que es la que utiliza el generador.

En general se utilizan cajas de engranajes que presentan una relación de multiplicación fija entre la rotación del rotor y del generador.

### **2.6.3 Generador eléctrico [5,7,8,9]**

Los generadores eléctricos son las máquinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Existen distintos tipos de generadores, que funcionan de diferente forma. En general, uno de los componentes del generador crea un campo magnético y éste influye sobre los conductores que haya y así se produce una fuerza electromotriz (f.e.m.), fenómeno basado en la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday.

A continuación se describe con mayor detalle la operación de tres tipos de generadores, todos conectados a la red (o sea al Sistema Interconectado), debido a que esa es la condición que se impone para este trabajo.

#### **2.6.3.1 Generador sincrónico**

La característica de las máquinas sincrónicas es la velocidad constante que presentan. Ésta queda definida por la cantidad de polos que tenga la máquina y por la frecuencia de la red, de acuerdo a la siguiente relación:

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{p} [rpm] \quad (2.1)$$

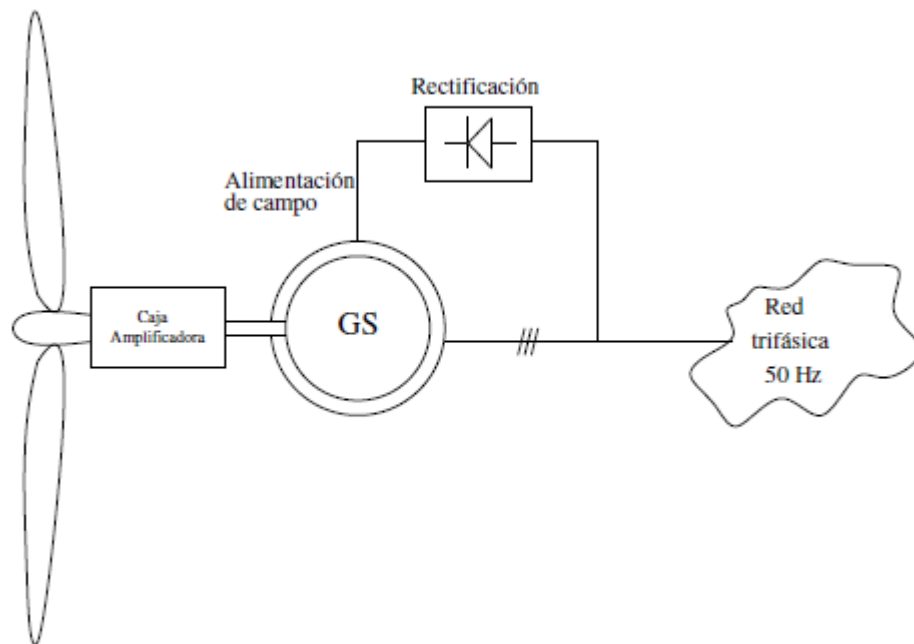
Donde

$\omega_s$  : corresponde a la velocidad de giro del eje [rpm].

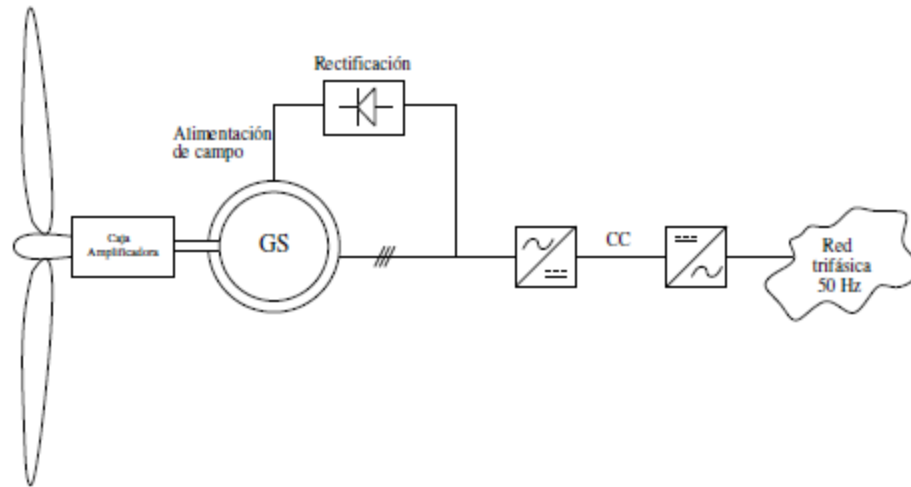
$f$  : corresponde a la frecuencia de la red a la que está conectado el generador [Hz].

$p$  : corresponde al número de polos del generador.

Para el caso de la energía eólica se pueden utilizar diferentes configuraciones, como las que se muestran en las Figuras 2.5 y 2.6. De acuerdo a esto, los precios son distintos y los usos también.



**Figura 2.5: Generador Síncrono conectado directamente a la red.**



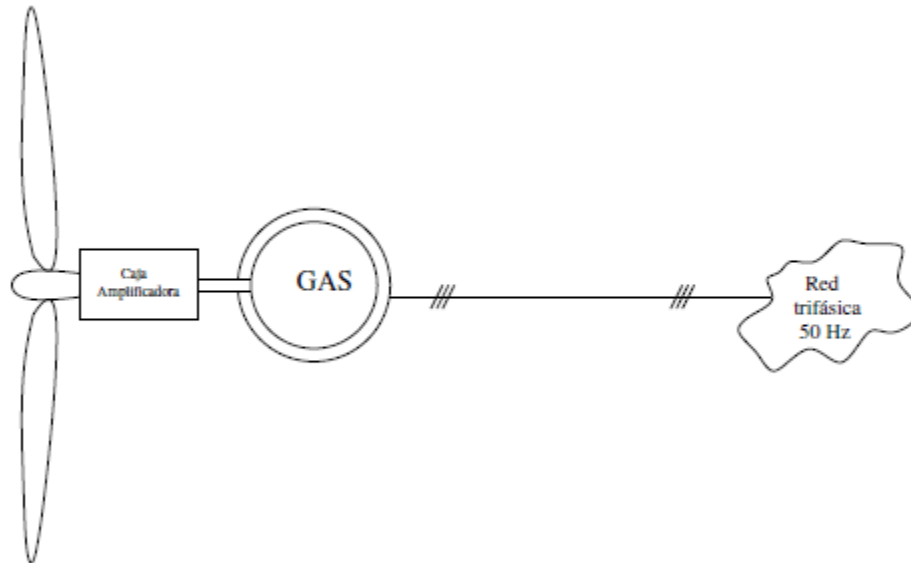
**Figura 2.6: Generador síncrono con etapa de rectificación e inversión.**

En ambas figuras está presente una rectificación para la alimentación de campo, esto se debe a la alimentación que corresponde proporcionar a los electroimanes del rotor. La diferencia principal es que la primera se conecta directamente a la red trifásica, por lo tanto es imprescindible que la velocidad del rotor del generador mantenga el sincronismo. Para el segundo caso, como hay una etapa rectificadora y luego una inversora, no es tan importante la velocidad de giro del generador, ya que la frecuencia de la señal de voltaje resultante es la adecuada con las etapas agregadas. La ventaja principal es la mayor capacidad de control de potencia activa y reactiva sobre la red. En cambio, la desventaja principal que presenta es el aumento de contaminación armónica sobre la red y también el elevado costo de inversión, debido a la mayor cantidad de etapas.

### **2.6.3.2 Generador de inducción jaula de ardilla**

Este generador (Figura 2.7) es el que se considera en este trabajo de título. Las razones principales para esto son: el bajo costo que presenta, el poco mantenimiento que se le debe realizar, la cualidad de ser robustos y que se pueden conectar directamente a la red, teniendo en cuenta protecciones y medios de desconexión adecuados.

Para funcionar se requiere que su velocidad de rotación sea mayor que la velocidad de sincronismo, porque si es menor estará actuando como motor y no como generador. Lamentablemente tampoco puede ser cualquier velocidad mayor, sino que debe cumplir un rango, de lo contrario se pueden alcanzar corrientes y temperaturas muy altas que pueden dañar la máquina y sus devanados.

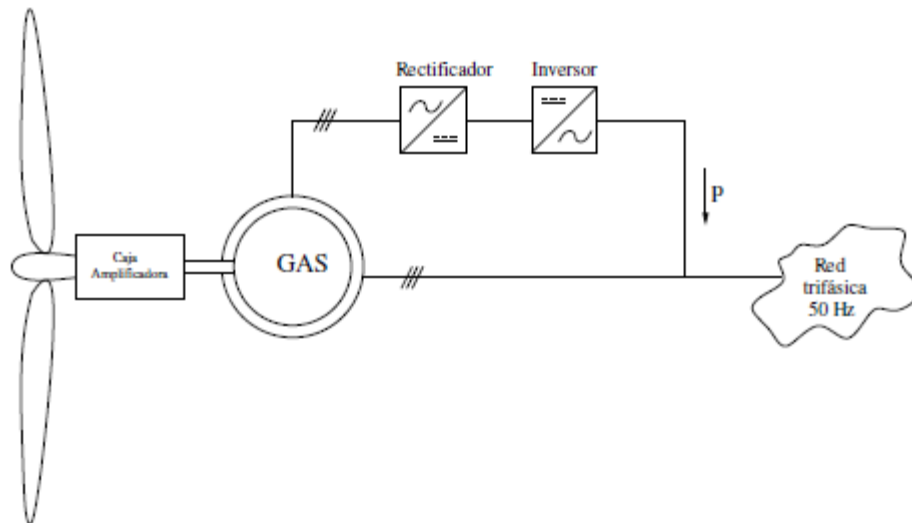


**Figura 2.7: Generador asincrónico jaula de ardilla conectado directamente a la red.**

Aparte de lo anterior, la principal desventaja de esta máquina es que eventualmente necesita una compensación de potencia reactiva, por ejemplo suministrada por bancos de condensadores y otra desventaja es que no se tiene control sobre la velocidad ni el deslizamiento, por lo tanto las variaciones en la velocidad del viento afectarán directamente las inyecciones de energía a la red.

### **2.6.3.3 Generador de inducción con doble alimentación**

El generador de inducción con doble alimentación o doblemente alimentado, se llama así debido a su característica de ser excitado tanto desde el estator como del rotor (Figura 2.8). De esta forma los devanados del estator están conectados directamente a la red, en cambio los del rotor se conectan a través de un convertidor electrónico de potencia.



**Figura 2.8: Generador asincrónico doblemente alimentado conectado directamente a la red.**

Las desventajas de este tipo de generador es que se tendrán mayores costos, dados por el acceso al rotor y el consecuente mantenimiento que se tendrá que hacer en éste, aparte de la necesidad del inversor.

#### **2.6.4 Sistemas de control [2,3,10]**

Existen diversos mecanismos de control en aerogeneradores. A continuación se detallan algunos de ellos.

##### **2.6.4.1 Mecanismo de orientación (“yaw control”)**

Este mecanismo funciona haciendo girar el rotor de la turbina para enfrentar el viento con el objetivo de evitar un error de orientación, que se produce cuando el rotor no está perpendicular al viento. Si este caso se mantuviese, las turbinas eólicas estarían funcionando con una carga de fatiga mayor, lo que podría tener graves consecuencias en el aerogenerador.

Para la activación del mecanismo de orientación se cuenta con un controlador electrónico, el cual vigila la posición de la veleta de la turbina varias veces por segundo. También hay que destacar que los aerogeneradores cuentan con un contador de la torsión de los cables, para determinar cuán torsionados están en cada momento y así, si se encuentran demasiado doblados, un interruptor se activaría.



#### **2.6.4.2 Regulación de ángulo de paso (“pitch control”)**

En este caso un controlador electrónico mide varias veces por segundo la potencia generada, así en el momento en que ésta sea demasiado grande, el controlador envía una orden para cambiar el ángulo de paso, lo que se traduce en un giro de las palas del rotor “fuera del viento”, en caso contrario las palas se ponen “hacia el viento”.

El funcionamiento de este mecanismo es de forma hidráulica y el rango de ángulo es entre 0° y 35° aproximadamente.

#### **2.6.4.3 Regulación pasiva por pérdida aerodinámica (“stall controlled (passive)”)**

Este sistema es diferente a los dos anteriores debido a que se usa en hélices que no presentan partes móviles, ni tampoco un gran sistema de control. El modo de funcionamiento es a través de un diseño aerodinámico del perfil de la pala, con el objeto de crear una turbulencia en la parte baja de la misma en el momento en que la velocidad del viento es muy alta. Esto produce una pérdida de sustentación que evita que haya una fuerza elevada que actúe sobre el rotor.

#### **2.6.4.4 Regulación activa por pérdida aerodinámica (“stall controlled (active)”)**

Esta técnica es una combinación de las dos anteriores, de la primera tiene la parte de poder cambiar el ángulo de paso, aunque en un rango mucho menor, ya que no supera los 10°; la principal diferencia radica en que en el momento en que el generador tenga sobrecarga, en vez de orientarse en el sentido que lo harían las turbinas reguladas por cambio de ángulo de paso, lo hacen al contrario con el fin de consumir el exceso de energía generando turbulencias, así se sitúan en una posición de mayor pérdida de sustentación.

La decisión para elegir esta regulación tiene que ver principalmente con un tema económico, para definir si vale la pena pagar tanto más por tener un sistema más complejo.

## 2.7 Empleo de un generador de inducción de jaula de ardilla en aerogenerador conectado a la red [8,9]

### 2.7.1 Ventajas y desventajas respecto a otras opciones

Hasta hace algunos años, la máquina de inducción trifásica se empleaba casi exclusivamente como motor, particularmente en instalaciones industriales y otras de potencias relativamente elevadas. Sin embargo, en la actualidad está siendo relevante su empleo como generador. En efecto, hoy en día la mayoría de las turbinas eólicas utilizan generadores asincrónicos trifásicos.

Como se explicará analíticamente en el Capítulo 3, puede afirmarse que cuando se hace girar el rotor a la velocidad síncrona nada sucede, debido a que el campo magnético gira a la misma velocidad, por lo que no se produce el fenómeno de inducción en el rotor y no interactúa con el estator. En cambio, cuando la velocidad aumenta y el rotor se mueve más rápido que el campo magnético giratorio del estator, entonces este último inducirá una corriente en el rotor. A medida que el rotor gira más rápido, mayor es la potencia transferida al estator, la cual finalmente es convertida en electricidad.

La ventaja de utilizar un generador asincrónico es que su sistema de control es sencillo y no requiere un sistema de control de velocidad para el arranque. En cuanto a las desventajas, se encuentran que requiere de excitación a través de la red, que necesita condensadores para corregir el factor de potencia eléctrico y, por último, que provoca perturbaciones en la red.

Además, como se indicó en la sección 2.6.3.2, debe destacarse como desventaja que el rango de velocidades de viento en que puede operar el generador de inducción está limitado:

- Por una parte, la velocidad del viento  $v$  debe ser mayor que aquella velocidad  $v_{\min}$  que haría girar el rotor del generador a la velocidad síncrona. De lo contrario operaría como motor. Luego, debe cumplirse que:  $v > v_{\min} [m/s]$ .
- Y por otra parte, la mayor velocidad del viento está limitada no tanto por razones mecánicas de la hélice, sino porque a velocidades muy altas del rotor, las corrientes en el enrollado del estator elevan peligrosamente la temperatura del generador. Así, debe ser  $v \leq v_{\max} [m/s]$ .

En consecuencia, la velocidad del viento aceptable debe estar entre  $v_{\min}$  y  $v_{\max}$ , rango que como se verá con ecuaciones en los capítulos siguientes, suele ser pequeño. Esto podría

limitar considerablemente las posibilidades de generar energía, particularmente si las variaciones del viento son muy fuertes y frecuentes durante un día típico.

## **2.7.2 Posibilidades de ampliar el rango de velocidades de operación**

Como se ha dicho, el uso de máquinas de inducción jaula de ardilla presenta tanto ventajas como desventajas. Entre las primeras destaca que tiene un bajo costo, pero entre las segundas, es que el rango de velocidades útiles del viento es muy pequeño, por lo que es relevante, de algún modo, lograr ampliar este rango. A continuación se presentan dos formas de conseguir esto, que se analizan en detalle en los capítulos siguientes.

### **2.7.2.1 Empleo de variador de frecuencia**

Esta solución consiste en conectar la máquina de inducción a la red a través de un variador de frecuencia. La idea es que se tendrá una frecuencia controlable, por lo tanto, al variar la frecuencia se podrá ajustar la velocidad síncrona de la máquina, tal que ésta sea levemente menor a la velocidad de rotación impuesta por el viento. Así se comportará como generador, sin riesgo en lo que se refiere a elevadas corrientes en los enrollados.

### **2.7.2.2 Motor con rotor bobinado**

Este caso es factible en máquinas de inducción con rotor bobinado (no con rotor jaula de ardilla). La idea es que mediante resistencias externas se aumenta la resistencia del enrollado del rotor, y por lo tanto se amplía el rango de velocidades aceptable para generar. De esta forma se podrá generar determinada potencia, sin riesgo para los enrollados, en un rango más amplio de velocidades de viento.

## **2.8 Relación entre velocidad de rotación y velocidad del viento [3]**

Para relacionar la velocidad de rotación de la hélice con la velocidad del viento, existe la llamada razón de velocidad de punta o también conocida como velocidad específica ( $\lambda$ ). Esta variable es la razón entre la velocidad del extremo de la hélice, es decir la velocidad tangencial ( $u$ ), y la del viento ( $v$ ). Desde este punto de vista, las hélices se clasifican como lentas, si su coeficiente es cercano a 1, o rápidas, si es entre 5 y 8.

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (2.2)$$

Cuanto mayor es la razón de velocidad de punta, más rápida es la hélice y viceversa. Con este factor se puede calcular también la velocidad de rotación de una hélice en función de su diámetro y de la velocidad del viento presente. La ecuación es la siguiente:

$$\omega_{hélice} (rpm) = \frac{60 \cdot v \cdot \lambda}{\pi \cdot D} \quad (2.3)$$

Donde  $v$  es la velocidad del viento,  $\lambda$  es la razón de velocidad de punta y  $D$  es el diámetro del rotor.

En general esta relación la entregan los fabricantes de aerogeneradores en curvas que muestran tanto la razón de velocidad de punta  $\lambda$ , como el rendimiento de las máquinas.

En la siguiente figura se muestra el factor de velocidad de punta para distintos tipos de aerogeneradores, como multipala, molino tradicional o una hélice moderna tripala.

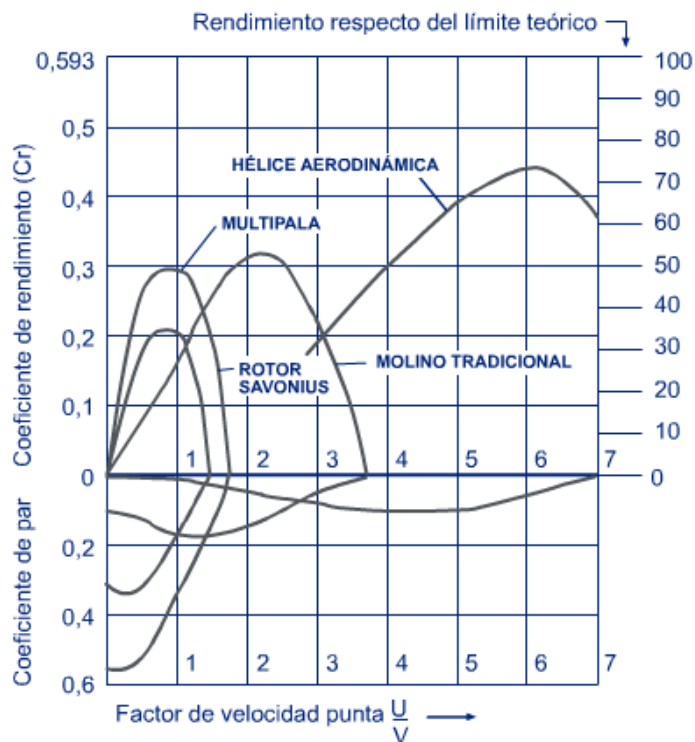


Figura 2.9: Gráfico con Factor de velocidad de punta para distintos aerogeneradores.

## **2.9 Comentarios**

En este capítulo se han expuesto en forma general, diversas características del recurso eólico y de aerogeneradores, centrandó la atención en el empleo de generadores de inducción trifásicos de jaula de ardilla y las opciones para lograr generar en un rango aceptable de velocidades de viento.

En los capítulos siguientes y específicamente en el capítulo siguiente, se detallan algunos aspectos, particularmente relacionados con los objetivos de esta memoria, como son la modelación de la hélice y del generador.

### **3 Análisis de Comportamiento**

En este capítulo se modela tanto el comportamiento de la hélice, como el del generador de inducción. Ambos son aspectos fundamentales a considerar en el desarrollo de la presente memoria, debido a que influyen directamente en el actuar del aerogenerador.

#### **3.1 Modelo de comportamiento de la hélice [2,5]**

La razón por la cual la hélice gira es el viento, pero no es lo único en lo que hay que fijarse; de hecho son muchos los factores que influyen y que permiten tener mayor eficiencia en la generación de electricidad. En particular, el diseño aerodinámico resulta fundamental.

La sustentación, que corresponde a la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, en el caso de la hélice queda descrita por el viento que pasa tanto sobre la misma o bajo ella. De esta forma se presenta una presión más baja en la superficie superior, lo que implica una fuerza de empuje hacia arriba, fenómeno que permite la rotación de la hélice. La sustentación se produce cuando el aspa presenta una superficie completamente uniforme y lisa; cualquier roce puede provocar su pérdida.

De todas formas en aerogeneradores, la pérdida de sustentación se utiliza como un mecanismo de control, ya que cuando se producen vientos muy fuertes, una forma de regular la generación es asegurando que, con el diseño del perfil de la pala, se produzca una turbulencia, lo que conlleva a la pérdida de sustentación.

Otro factor importante es la resistencia aerodinámica, lo cual tiene que ver con la oposición al movimiento, que en este caso sería producida por el aire.

En general, las palas o aspas de la hélice, están torsionadas, ya que así presentan un ángulo óptimo de ataque del viento a lo largo de toda la longitud de la misma. Claramente en el caso de aerogeneradores controlados por pérdida aerodinámica (expuesto anteriormente), el diseño debe estar muy bien acabado, para que así la pérdida de sustentación se produzca de forma gradual y no provoque daño alguno.

Hay que destacar que el viento afecta de distinta forma las aspas de la hélice; es por esto que en la base de la pala es mucho más brusco el cambio de ángulo de ataque del viento y por lo mismo afecta más este punto, que el extremo de ella.

### 3.1.1 Potencia extraíble del viento

El viento al moverse (debido a las diferencias de temperatura), posee energía cinética. Esta energía, para una masa  $m$  de aire, a velocidad  $v$ , queda representada por la siguiente fórmula

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Como la potencia es la derivada de la energía, se tiene que la potencia extraíble del viento es

$$P_{\text{viento}} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot v^2 \quad (3.2)$$

La masa en función de la densidad  $\rho$  del aire, del área transversal  $A$  y de su dimensión  $x$  en el sentido del movimiento, es

$$m = \rho \cdot A \cdot x \quad (3.3)$$

Por lo tanto, la derivada de la masa implica que aparezca la velocidad como factor:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (3.4)$$

Así, finalmente se obtiene que la potencia extraíble del viento es función de la densidad del aire, del área del bloque de aire (por donde viaja éste) y de la velocidad del viento al cubo.

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.5)$$

De la relación encontrada se puede observar que mientras mayor es el área de la masa interceptada por la turbina, mayor es la potencia extraíble; lo mismo ocurre con la velocidad del

viento. De todas formas se debe recordar que existe un rango de mayor eficiencia tanto para el área como para la velocidad del viento, lo que significa que la hélice más eficiente no es la más grande posible.

### 3.1.2 Extracción de la energía del viento

Los aerogeneradores en primer lugar transforman la energía del viento en energía mecánica, la cual luego se transforma en energía eléctrica. Para la primera transformación, lo que se requiere es reducir la velocidad de la masa de aire interceptada por la turbina, lo que se puede apreciar en la siguiente figura.

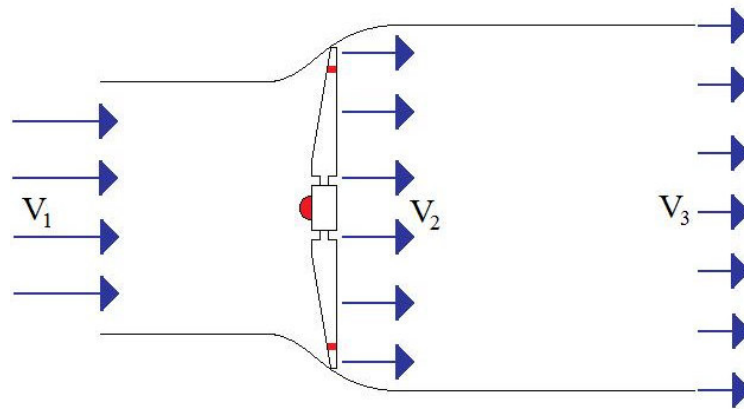


Figura 3.1: Velocidades del viento en la operación de una turbina.

De acá se obtiene que la energía extraíble del viento es

$$E_{\text{extraíble}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.6)$$

Por lo tanto, la potencia extraíble es

$$P_{\text{extraíble}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.7)$$



De todas formas no se puede extraer toda la energía del viento para convertirla en energía mecánica dado que si  $v_3 = 0$ , la consecuencia sería que  $\dot{m} = 0$ , lo que significa que se detiene el bloque de aire y así se tendría 0 potencia extraída.

Para conocer la potencia extraída se requiere conocer la velocidad  $v_2$ , es decir, justo en la turbina, por lo tanto se tiene

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v_2 \quad (3.8)$$

$$P_{extraible} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_2 \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.9)$$

De la ecuación anterior se puede advertir que debe existir una velocidad  $v_2$  óptima, es decir, para la cual se pueda maximizar la potencia del viento. Según Betz<sup>1</sup>  $v_2$  se puede obtener de la velocidad incidente  $v_1$  y la velocidad posterior a la extracción  $v_3$ . De acuerdo a la Ley de Betz, la velocidad  $v_2$  es el promedio entre las velocidades  $v_1$  y  $v_3$ . Por lo tanto, la potencia extraíble se puede expresar como sigue

$$P_{extraible} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left( \frac{v_1 + v_3}{2} \right) \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot C_{p,Betz}(v_1, v_3) \quad (3.10)$$

Donde

$$C_{p,Betz} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( 1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \cdot \left( 1 - \frac{v_3^2}{v_1^2} \right) \right] \quad (3.11)$$

De la expresión anterior se determina que la máxima potencia extraíble se obtiene para una razón  $v_3/v_1 = 1/3$ , con lo que se obtiene un valor de coeficiente  $C_{p,Betz} = 59\%$ , lo que

---

<sup>1</sup> Betz, Albert: físico alemán que formuló la ley del mismo nombre.

significa que sólo se puede extraer un 59% de la potencia del viento con una turbina ideal sin pérdidas.

En la actualidad existen turbinas con coeficiente de potencia,  $C_{p,Betz}$ , cercano al 50%, pero la mayoría está más próxima a un coeficiente igual a 40% o menor.

## 3.2 Modelo de comportamiento del generador trifásico [1,4,7,8,13]

### 3.2.1 Principios de funcionamiento

#### 3.2.1.1 Estator

El estator más simple consta de tres enrollados idénticos desfasados  $120^\circ$  entre sí. Cada uno de ellos está conectado a una fase del voltaje trifásico, por lo tanto se origina un campo magnético rotatorio que gira a velocidad constante,  $\omega_s$ . Se tiene que el flujo rotatorio da una vuelta por cada ciclo del voltaje alterno, por lo tanto se cumple que

$$\omega_s = 2\pi f [\text{rad} / \text{s}] \quad (3.12)$$

No obstante, se debe agregar a esta fórmula la cantidad de polos que tenga la máquina: mientras mayor es la cantidad de polos, menor es la velocidad de rotación del campo magnético.

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} [\text{rad} / \text{s}] \quad (3.13)$$

Donde  $p$  corresponde al número de polos, o si se expresa en  $[rpm]$  se tiene:

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{p} [rpm] \quad (3.14)$$

(Igual a la Ecuación (2.1) del Capítulo 2).

De la Ecuación (3.14) se encuentra que para una máquina de 4 polos, es decir,  $p = 2$ , la velocidad del campo magnético rotatorio del estator es igual a 1500 [rpm], que es justamente la velocidad síncrona de la máquina utilizada en el laboratorio para realizar las pruebas experimentales (ver Capítulo 4).

### 3.2.1.2 Rotor

El rotor de la máquina es un cilindro de hierro que puede girar libremente en torno a su eje. Debido a su estructura y al material que lo compone, el rotor gira y sigue al campo magnético rotatorio del estator, a una velocidad  $\omega_r$ , la cual en general es menor que  $\omega_s$ . Esto se produce por el roce y el torque resistente de la carga.

Para mejorar el torque del motor se utiliza comúnmente una estructura adicional en el núcleo del rotor, llamada “jaula de ardilla”, la cual consta de barras axiales cortocircuitadas en los extremos por anillos conductores. Lo que ocurre entonces es que se inducen voltajes y corrientes, los cuales finalmente se traducen en fuerzas tangenciales, las cuales elevan el torque del motor.

Al utilizar jaula de ardilla, en condiciones de carga mecánica nominal, se encuentra que la velocidad del rotor  $\omega_r$  es muy cercana a  $\omega_s$ , en estos casos se prefiere utilizar en las ecuaciones el deslizamiento, que corresponde a la diferencia relativa de velocidades.

### 3.2.1.3 Deslizamiento

Se define el deslizamiento como el cociente entre la diferencia de velocidades del campo magnético rotatorio del estator con la velocidad mecánica del rotor, y la velocidad del campo magnético rotatorio del estator.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (3.15)$$

El deslizamiento es un parámetro que sirve principalmente para caracterizar el comportamiento de la máquina de inducción. En efecto, la máquina se comporta como motor, si la velocidad del rotor es menor a la velocidad síncrona de la máquina, es decir  $s < 1$ . Si se tiene que la velocidad mecánica del rotor ( $\omega_r$ ) es mayor que la velocidad del campo magnético

rotatorio del estator ( $\omega_s$ ) en este caso  $s < 0$  y la máquina se comporta como generador. Por último, si la velocidad mecánica del rotor es negativa, entonces se cumple que  $s > 1$  y la máquina opera como freno. Todo esto se puede observar en la Figura 3.8.

### 3.2.2 Modelo circuital

Para realizar el modelo circuital de la máquina de inducción se deben referir los valores de las corrientes y voltajes del rotor al estator. Suponiendo que el estator tiene  $n_e$  espiras efectivas por fase y el rotor  $n_r$  espiras efectivas por fase, se obtiene una relación entre la fuerza magnetomotriz real del rotor  $E_r$  y la del rotor referida al estator  $E_{2s}$ , dada por:

$$\dot{E}_{2s} = \frac{n_e}{n_r} \cdot \dot{E}_r = a \cdot \dot{E}_r \quad (3.16)$$

También se debe cumplir una relación para las corriente equivalentes

$$\dot{I}_{2s} = \frac{n_r}{n_s} \cdot \dot{I}_r = \frac{1}{a} \cdot \dot{I}_r \quad (3.17)$$

y para las impedancias

$$\dot{Z}_{2s} = a^2 \cdot \dot{Z}_r \quad (3.18)$$

Por lo tanto, el circuito equivalente por fase presentará la siguiente relación

$$\frac{\dot{E}_{2s}}{\dot{I}_{2s}} = \dot{Z}_{2s} = r_2 + j \cdot s \cdot X_2 \quad (3.19)$$

Donde  $r_2$  corresponde a la resistencia efectiva por fase del enrollado y  $X_2$  a la reactancia de fuga del enrollado del rotor a la frecuencia  $f$  del estator. A continuación, se muestra una figura con el circuito equivalente del rotor.

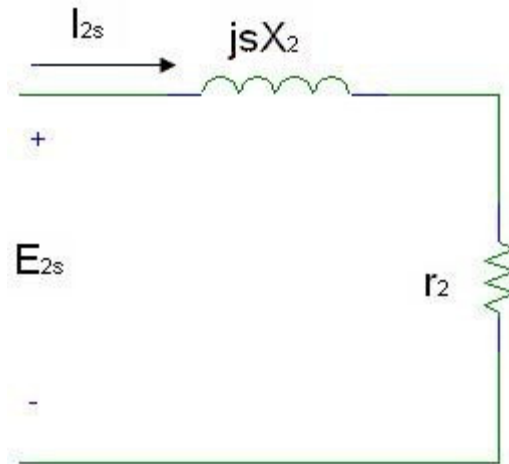


Figura 3.2: Circuito equivalente del rotor.

Por otra parte, el circuito equivalente del estator será el que se muestra a continuación

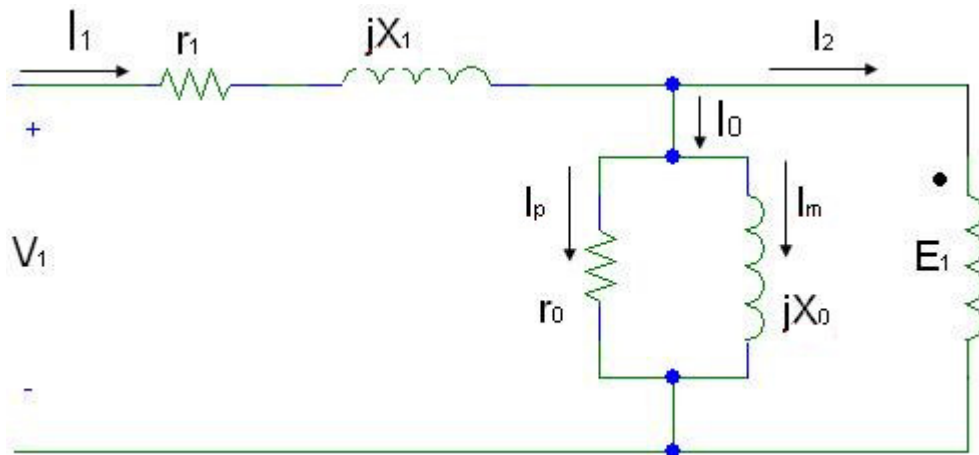


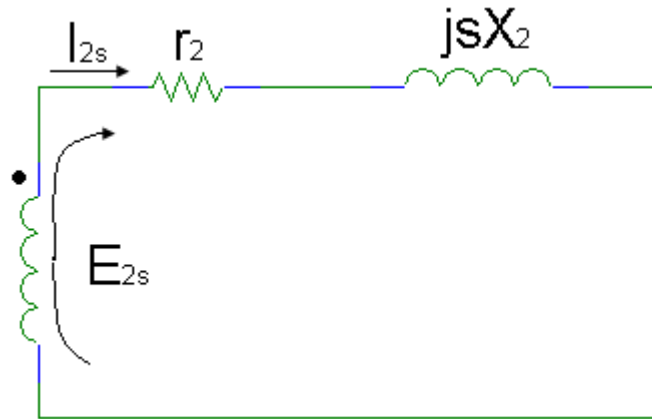
Figura 3.3: Circuito equivalente del estator.

En la figura anterior se puede observar  $r_1$ , que corresponde a la resistencia efectiva del estator por fase,  $X_1$ , que corresponde a la reactancia de fuga del estator por fase y  $r_0$ ,  $X_0$ , que corresponden a la resistencia y la reactancia en derivación por fase.

Con respecto a las corrientes, se tiene que:  $\dot{I}_0$  corresponde a la corriente en vacío, donde  $\dot{I}_m$  es la corriente necesaria para producir el flujo en el entrehierro, el cual a su vez induce la fuerza electromotriz  $\dot{E}_1$ , e  $\dot{I}_1$  corresponde a la corriente del estator necesaria para contrarrestar la fuerza magnetomotriz producida por las corrientes rotóricas.

La rama  $r_0$  incluye todas las pérdidas en vacío, tales como las pérdidas en el hierro del estator, en el hierro del rotor, por roce y otras pérdidas adicionales.

A continuación se puede observar el circuito equivalente del rotor, referido al estator.



**Figura 3.4: Circuito equivalente del rotor referido al estator.**

En el rotor el flujo de entrehierro induce una f.e.m. de frecuencia de deslizamiento  $\dot{E}_{2s}$ . Como se verifica que la velocidad relativa de los conductores del rotor con respecto al flujo es igual a  $s$  veces la velocidad de los conductores del estator con respecto al flujo, se cumple que

$$\dot{E}_{2s} = s \cdot \dot{E}_1 \quad (3.20)$$

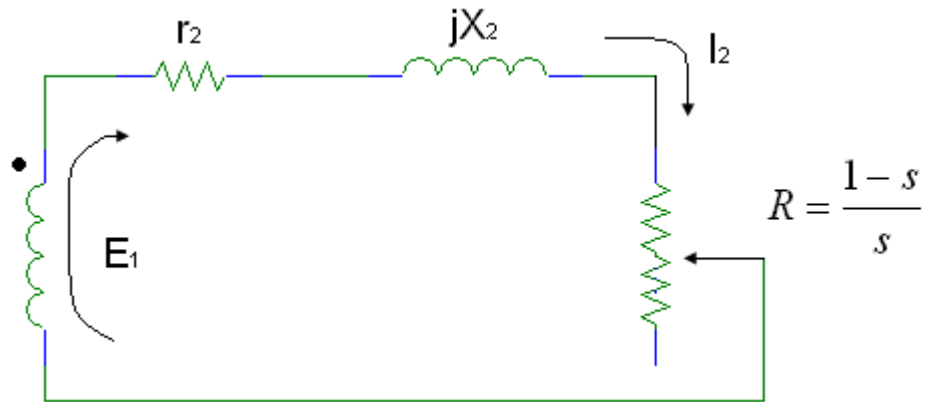
Como los amperes vuelta del estator y del rotor deben anularse, se cumple también

$$\dot{I}_{2s} = \dot{I}_2 \quad (3.21)$$

Observando lo anterior si se divide todo el circuito equivalente del rotor referido al estator por  $s$ , la corriente es la misma, el voltaje queda igual a  $\dot{E}_1$  y la resistencia queda  $r_2/s$ . Luego, para separar las pérdidas en el enrollado del rotor de la potencia mecánica se utiliza la siguiente relación

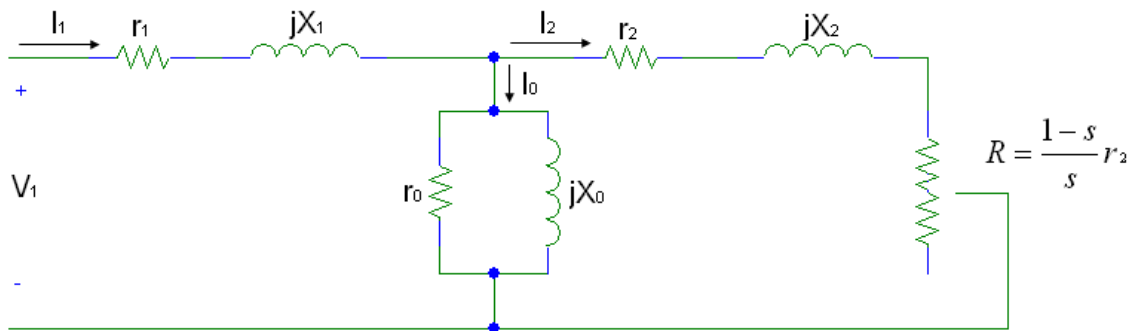
$$\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s} r_2 \quad (3.22)$$

Lo que significa que la resistencia se separa en dos para representar, con el segundo término, la carga mecánica acoplada en el eje. Por lo tanto, el rotor queda representado por la siguiente figura.



**Figura 3.5: Representación del rotor.**

Finalmente el circuito equivalente exacto será:



**Figura 3.6: Circuito equivalente monofásico exacto.**

En la práctica se trabaja con el circuito equivalente aproximado, ya que es más fácil realizar los cálculos con la rama paralela trasladada al comienzo, ésta corresponde a la corriente en vacío y al cambiarla de posición los resultados se ven afectados, pero poco, por esta razón se hace el cambio. El circuito aproximado se muestra en la siguiente figura.

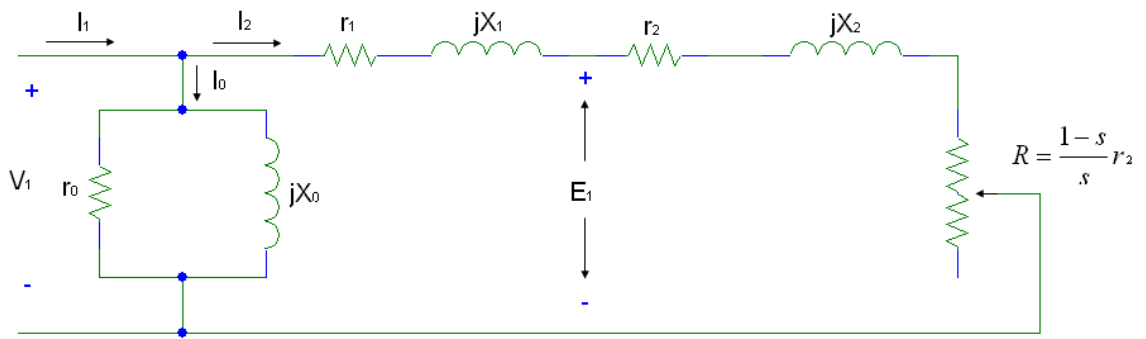


Figura 3.7: Circuito equivalente monofásico aproximado.

### 3.2.3 Ecuaciones de comportamiento

De acuerdo al circuito equivalente aproximado que se obtiene de la máquina de inducción, se modela el comportamiento electromecánico de la misma, a través de las siguientes ecuaciones:

$$I_2 = \frac{\dot{E}_1}{\frac{r_2}{s} + jX_2} = \frac{\dot{V}_1}{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right) + j(X_1 + X_2)}$$

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (3.23)$$

Para la potencia mecánica se tiene

$$P_{mec} = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot r_2 \cdot I_2^2 \quad (3.24)$$

El torque desarrollado por la máquina

$$\tau = \frac{P_{mec}}{\omega_{mec}} \quad (3.25)$$



Donde

$$\omega_{mec} = (1-s) \cdot \omega_s = (1-s) \cdot \frac{4\pi f}{p^*} \quad (3.26)$$

En la Ecuación 3.26,  $p^*$  corresponde al número de pares de polos.

Por lo tanto

$$\begin{aligned} \tau &= 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot r_2 I_2^2 \cdot \frac{1}{1-s} \cdot \frac{p^*}{4\pi f} \\ \tau &= \frac{3p^*}{4\pi f} \cdot I_2^2 \cdot \frac{r_2}{s} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Reemplazando  $I_2$ :

$$\tau = \frac{3p^*}{4\pi f} \cdot \frac{V_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (3.28)$$

### 3.2.4 Curva Torque – Velocidad

La curva torque-velocidad o torque-deslizamiento se obtiene de la Ecuación (3.28), la que se puede graficar tal como se muestra en la siguiente figura:

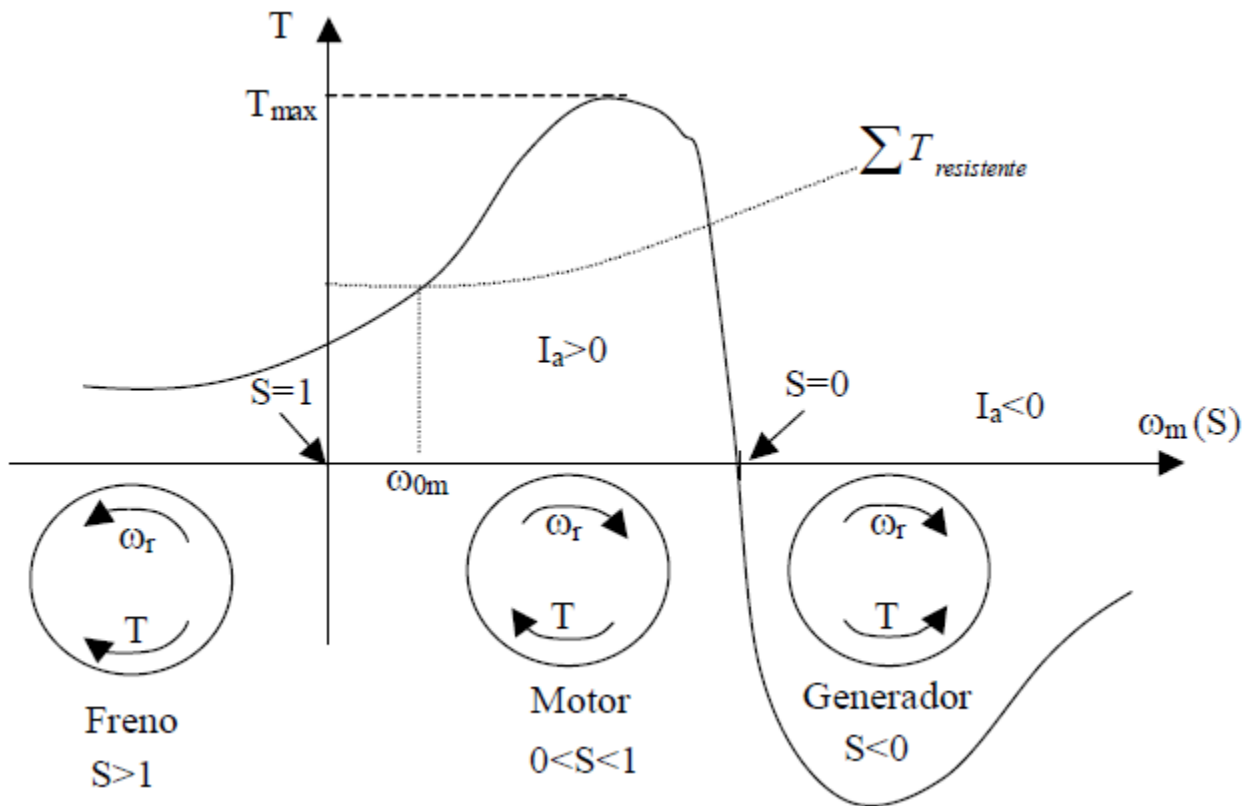


Figura 3.8: Curva Torque v/s Velocidad.

Se puede ver que la máquina presenta tres características claramente definidas, las cuales son:

1. Como motor: en este caso tanto la velocidad como el torque son positivos, de esta forma presentan el mismo sentido de giro, y el deslizamiento está entre 0 y 1.
2. Como generador: donde la velocidad es positiva, pero el torque es negativo (lo que significa que la potencia también es negativa), al igual que el deslizamiento, el cual es negativo.
3. Como freno: aquí el torque es positivo pero la velocidad es negativa, por esta razón se le conoce como freno, y el deslizamiento es mayor a 1.

Por último se muestra una figura que, además de presentar el torque, expone la potencia y la corriente del estator. Con esta figura se puede apreciar que la potencia no es simétrica, puesto que en la zona de generador, entrega una curva diferente que en la zona de motor.

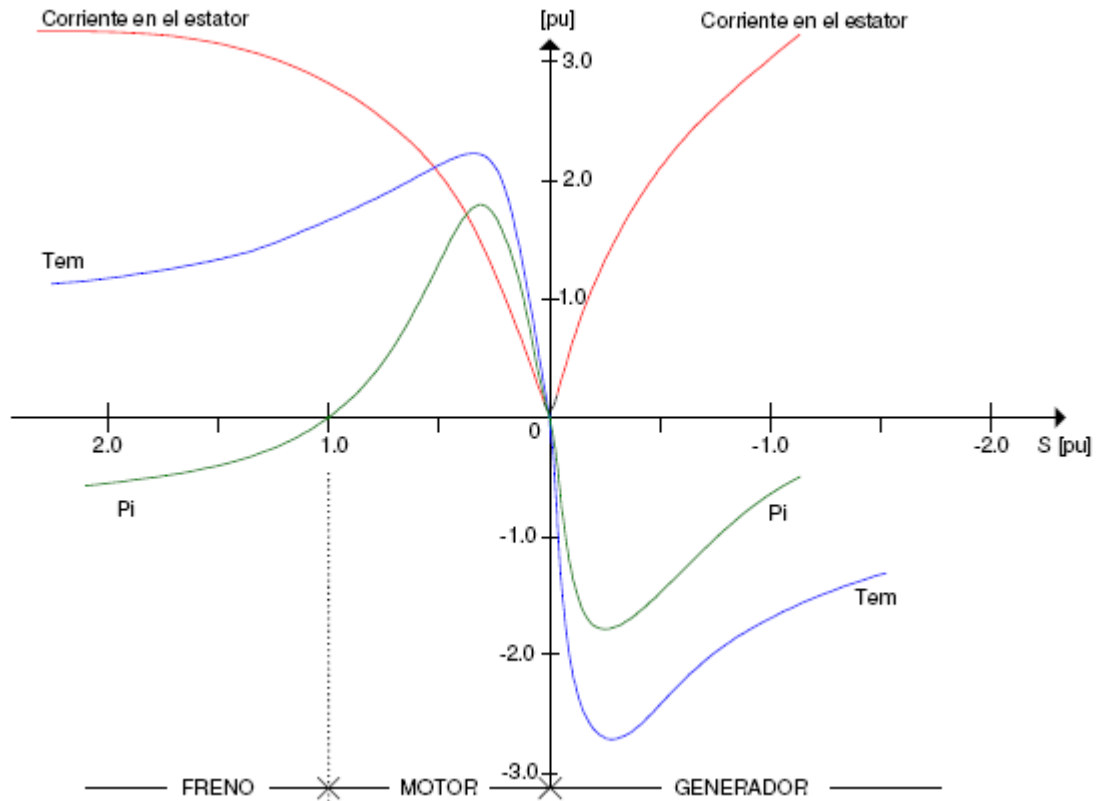


Figura 3.9: Diagrama torque-velocidad de la máquina de inducción.

### 3.3 Comentarios

En este capítulo se han expuesto los comportamientos esperados tanto de la hélice, como del generador. Estas características son importantes de tener claras, debido a que serán el sustento para los capítulos siguientes. Especialmente para visualizar los resultados esperados al realizar las experiencias en el laboratorio.

## 4 Ensayos de Laboratorio de un Generador de Inducción de Jaula de Ardilla

En primer lugar se requiere conocer la máquina de inducción que se utiliza en la experiencia. Ésta se encuentra en el Laboratorio de Máquinas del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Se expone a continuación una tabla con los datos de las características nominales de la máquina.

Conexión	Estrella
Voltaje [V]	380
Corriente [A]	12
Potencia [ch]	6
Velocidad [rpm]	1470
Frecuencia [Hz]	50

Tabla 4.1: Datos nominales de la máquina de inducción.

La potencia está medida en caballos de vapor métricos [ch], cada uno de los cuales corresponde a 736 [W], por lo tanto la potencia mecánica del motor es igual a 4416 [W] ó 4,416 [kW].

Para obtener los parámetros de la máquina se realizan dos pruebas diferentes, las cuales se exponen en seguida.

### 4.1 Pruebas para obtener parámetros de la máquina

Los parámetros del circuito equivalente monofásico de la máquina de inducción, mostrados en la Figura 3.6, se pueden determinar de forma experimental, mediante las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito, también denominadas “Prueba en vacío” y “Prueba de rotor bloqueado” respectivamente.

#### 4.1.1 Prueba en vacío

Corresponde a la prueba que permite obtener los parámetros de la rama paralela del circuito equivalente. Para efectuarla se deben tener el voltaje y la frecuencia nominales (Tabla

4.1) y la velocidad síncrona (1500 [rpm] en este caso) y se toman los datos de voltaje, corriente y potencia absorbida. La máquina está conectada en estrella y las mediciones se realizan en la fase R. La frecuencia de la red son 50 [Hz]. Se muestran en la Tabla 4.2 los datos tomados en la prueba.

Voltaje [V]	230,2
Corriente [A]	6,46
$\cos \phi$	0,139
Velocidad [rpm]	1499
Potencia [W] ( $P_0$ )	210

**Tabla 4.2: Datos de la prueba en vacío.**

La potencia  $P_0$  indicada es la potencia monofásica, medida con un multímetro de tenaza. Debiera corresponder a la multiplicación de  $V_0$  (voltaje fase neutro), por  $I_0$  (corriente de línea) y por el  $\cos \phi$ , donde  $\phi$  corresponde al ángulo entre el voltaje  $V_0$  y la corriente  $I_0$ . Esta potencia corresponde a las pérdidas que tiene la máquina, cuando no hay carga mecánica. Al calcular:

$$P_0 = V_0 \cdot I_0 \cdot \cos \phi = 230,2 \cdot 6,46 \cdot 0,139 = 206,7[W]$$

Se observa que difiere levemente del valor medido con el multímetro. No obstante, para el cálculo de los parámetros se utiliza la potencia que se encuentra con la tenaza. Con los datos expuestos se obtienen la resistencia y la reactancia de la rama paralela, del circuito equivalente aproximado de la máquina de inducción:

$$r_0 = \frac{V_0^2}{P_0} = \frac{230,2^2}{210} = 252,3[\Omega] \quad (4.1)$$

$$X_0 = \frac{V_0^2}{Q_0} \quad (4.2)$$

Donde

$$Q_0 = \sqrt{(V_0 \cdot I_0)^2 - (P_0)^2} = \sqrt{(230,2 \cdot 6,46)^2 - (210)^2} = 1472,2[VAr]$$

Por lo tanto

$$X_0 = \frac{V_0^2}{Q_0} = \frac{230,2^2}{1472,2} = 35,9[\Omega]$$

En resumen, se tienen los siguientes resultados:

$$r_0 = 252,3[\Omega]$$

$$X_0 = 35,9[\Omega]$$

#### 4.1.2 Prueba de rotor bloqueado

Corresponde a la prueba que permite obtener los parámetros de la rama serie del circuito equivalente aproximado. Para efectuarla, se debe aplicar voltaje reducido, de modo de tener la corriente y la frecuencia nominales, es decir, con los valores que aparecen en la tabla 4.1, y se debe impedir que el rotor gire. Se toman los datos del voltaje reducido aplicado, corriente de rotor bloqueado y la potencia disipada (por fase). La máquina se conecta en estrella, por lo tanto los datos que se miden (Tabla 4.3) son voltaje fase neutro y corriente de línea. La frecuencia de la red son 50 [Hz].

Voltaje [V]	39,8
Corriente [A]	12,04
$\cos \phi$	0,575
Potencia [W]	274

Tabla 4.3: Datos de la prueba de rotor bloqueado.

En este caso, para el factor de potencia  $\cos \phi$ , el ángulo  $\phi$  es el desfase entre el voltaje y la corriente. Por lo tanto, la multiplicación de los tres primeros términos de la Tabla 4.3, debe corresponder a la potencia monofásica de rotor bloqueado:

$$P_{rb} = V_{rb} \cdot I_{rb} \cdot \cos \phi = 39,8 \cdot 12,04 \cdot 0,575 = 275,5[W]$$

Valor que coincide aproximadamente a la potencia activa medida con la tenaza.

Al igual que en el caso anterior se utiliza la potencia medida con la tenaza para los próximos cálculos.

Con los datos expuestos se obtienen la resistencia y la reactancia de la rama serie reemplazando en las siguientes fórmulas.

$$r_1 + r_2 = \frac{P_{rb}}{I_{rb}^2} = \frac{274}{12,04^2} = 1,89[\Omega] \quad (4.3)$$

$$X_1 + X_2 = \frac{Q_{rb}}{I_{rb}^2} \quad (4.4)$$

Donde

$$Q_{rb} = \sqrt{(V_{rb} \cdot I_{rb})^2 - (P_{rb})^2} = \sqrt{(39,8 \cdot 12,04)^2 - (274)^2} = 393,1[VAr]$$

Por lo tanto

$$X_1 + X_2 = \frac{Q_{rb}}{I_{rb}^2} = \frac{393,1}{12,04^2} = 2,7[\Omega]$$

Con lo que se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 &= 1,89[\Omega] \\ X_1 + X_2 &= 2,7[\Omega] \end{aligned}$$

En general se asume que  $X_1 \approx X_2$ , es decir, cada una es igual a  $1,35[\Omega]$ . Para el caso de  $r_1$  y  $r_2$ , se utiliza un Puente de Wheatstone para obtener  $r_1$  y así despejar  $r_2$ .

Al medir cada enrollado con el Puente de Wheatstone se obtienen los siguientes valores:

$$\text{enrollado1} = 1,323[\Omega]$$

$$\text{enrollado2} = 1,317[\Omega]$$

$$\text{enrollado3} = 1,315[\Omega]$$

El promedio de los tres enrollados corresponde a  $r_1$ , que es igual a  $1,318[\Omega]$ .

En resumen:

$$r_1 = 1,318[\Omega]$$

$$r_2 = 0,572[\Omega]$$

$$X_1 = 1,35[\Omega]$$

$$X_2 = 1,35[\Omega]$$

## 4.2 Prueba de generación

### 4.2.1 Conexión del generador a la red

Para realizar esta prueba se acopla al eje del generador de inducción una máquina de corriente continua (MCC), la cual trabaja como motor. Es decir, la MCC sustituye al viento que mueve la hélice y la caja de engranajes del aerogenerador, en el que estaría instalada la máquina de inducción. Este es el punto principal en el cual se orienta el desarrollo del trabajo de título.

El ensayo experimental es el siguiente: primero se hace partir el MCC, utilizando dos reóstatos, uno en el campo y otro en la armadura de la misma, con el reóstato de armadura en su valor máximo y el reóstato de campo en su valor mínimo. A medida que el motor toma velocidad, se debe ir reduciendo gradualmente la resistencia de partida (reóstato de armadura), hasta cortocircuitarla, y luego se debe ir aumentando la resistencia de campo (reóstato de campo), con el fin de alcanzar exactamente la velocidad nominal que es igual a  $1500$  [rpm]. A continuación se muestran los datos de placa de esta máquina de CC.

	Motor	Generador
Voltaje [V]	220	220
Corriente [A]	22,3	17,9
Potencia	5,5 [ch]	4 [kW]
Velocidad [rpm]	1500	1500

**Tabla 4.4: Datos de placa de la máquina de corriente continua.**



En las condiciones descritas y antes de conectar el generador de inducción a la red, se realiza la primera medición de datos, los cuales se exponen en la siguiente tabla.

$I_{\text{campo}}$ [A]	1,388
$I_{\text{arm}}$ [A]	3,14
$V_{\text{carga}}$ [V]	239,4
$n$ [rpm]	1502

**Tabla 4.5: Primera medición de datos en MCC.**

Luego se conecta la máquina de inducción a la red, cuyo rotor girará a la velocidad síncrona y en el mismo sentido en que gira el motor de corriente continua (antes de realizar la prueba se comprueban los sentidos de giro de cada máquina). Se encontraron los siguientes valores al conectar ambas máquinas, es decir, cuando giran a velocidad síncrona (1500 [rpm]):

$I_{\text{campo}}$ [A]	1,383
$I_{\text{arm}}$ [A]	3,20
$V_{\text{carga}}$ [V]	238,1
$I_{\text{gen}}$ [A]	6,66
$V_{\text{gen}}$ [V]	230,8
$P$ [kW]	0,023
$\cos \phi$	0,017
$n$ [rpm]	1500

**Tabla 4.6: Medición de datos en MCC al conectar máquina de inducción.**

En la tabla anterior, se puede notar que efectivamente la velocidad que tienen ambas máquinas es la velocidad síncrona igual a 1500 [rpm]. A esta velocidad no se genera potencia, pues la velocidad del campo magnético rotatorio del estator es igual a la velocidad mecánica del rotor, por lo tanto se tiene un deslizamiento igual a 0 y una potencia nula también. La pequeña potencia indicada en la Tabla 4.6, se puede asumir como despreciable.

Por otra parte la corriente generada,  $I_{\text{gen}}$ , es similar en su valor a la obtenida al realizar la prueba en vacío (Tabla 4.2), y se debe a que en aquella prueba la velocidad que se debe tener es la síncrona, es decir, 1500 [rpm]. En este caso la máquina no está con carga, se encuentra en vacío, lo que aporta otra característica de semejanza.

#### 4.2.2 Prueba de generación

Después de conectar ambas máquinas se procede a generar potencia. Para esto se aumenta la resistencia de campo, así la velocidad aumenta sobre la sincrónica y la máquina comienza a generar. Se tomaron los datos presentes en la Tabla 4.7, donde la medición se realizó en la fase R de la máquina de inducción, por lo tanto la corriente generada,  $I_{gen}$ , es la corriente de línea, y la potencia P es monofásica.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
$I_{campo}$ [A]	1,320	1,245	1,173	1,134	1,121	1,092	1,060	0,996	0,967	0,937
$I_{arm}$ [A]	4,11	5,67	7,61	9,05	10,19	12,02	14,46	17,86	20,06	21,8
$V_{carga}$ [V]	234,7	230,6	226,3	224,0	224,0	223,0	223,1	220,8	219,1	218,7
$I_{gen}$ [A]	6,61	6,70	6,82	7,15	7,16	7,45	7,83	8,47	8,73	9,26
$V_{gen}$ [V]	230,7	230,3	231,9	230,9	231,1	230,9	232,4	230,7	230,1	230,8
P [kW]	-0,046	-0,139	-0,273	-0,374	-0,450	-0,558	-0,721	-0,904	-1,012	-1,145
$\cos \phi$	-0,031	-0,098	-0,164	-0,222	-0,280	-0,329	-0,386	-0,477	-0,504	-0,543
n [rpm]	1501	1502	1504	1505	1507	1508	1510	1511	1514	1516

Tabla 4.7: Datos prueba de generación.

Al analizar los datos se puede notar que la corriente de armadura,  $I_{arm}$ , va creciendo considerablemente. Con las máquinas aquí usadas, esta corriente resultó ser una limitante para la potencia a generar. En efecto, dicha corriente de armadura no debe superar el valor nominal de 22,3 [A]; y cuando se alcanza ese valor, la corriente generada por fase de la máquina de inducción son 9,3 [A], menor que su corriente nominal de 12 [A].

En cuanto al voltaje generado éste se mantiene siempre alrededor de 230 [V], impuesto por la red trifásica.

Cabe reiterar que la mayor corriente generada llegó a 9,2 [A] por limitaciones del MCC. Teniendo en cuenta que la corriente nominal de la máquina de inducción es 12 [A], se puede considerar que aún se puede generar más potencia. A continuación se muestra un gráfico de la corriente generada versus el deslizamiento.

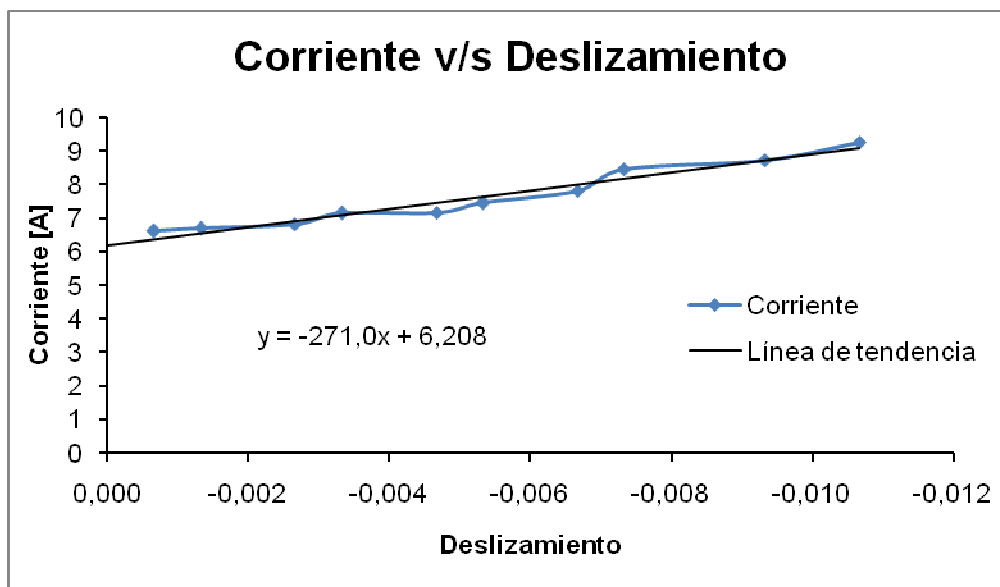


Figura 4.1: Gráfico Corriente v/s Deslizamiento.

En la figura anterior se muestra, además de la relación corriente v/s deslizamiento, la línea de tendencia que sigue ésta y su ecuación. El objetivo es analizar cuál es el máximo deslizamiento que puede presentar esta máquina de inducción, sin superar su corriente nominal de 12 [A]:

$$12 = -271,06 \cdot x + 6,2085$$

$$\Rightarrow x = -0,021$$

Lo que significa que teóricamente el deslizamiento máximo de esta máquina es igual a -2,1%.

Por otra parte, se observa que la potencia generada es negativa, esto es lo esperado debido a que cuando la máquina de inducción comienza a generar el deslizamiento es menor a 1 y la potencia es negativa, tal como se observa en la Figura 3.8. En cuanto a la magnitud de la potencia generada, se tienen aproximadamente 3,4 [kW] trifásico, dato que está dentro de lo esperado, debido a que la potencia que presenta la MCC como motor es 5,5 [ch] lo que equivale a 4,048 [kW], y a este valor hay que restarle las pérdidas que se producen en las máquinas.

El rango de deslizamiento, en que la máquina de inducción genera, se puede obtener con el último dato de velocidad que se toma y sabiendo que la velocidad nominal es 1500 [rpm].

$$s = \frac{1500 - 1516}{1500} = -0,0107$$

Por lo tanto, el rango de deslizamiento en el cual esta máquina puede generar experimentalmente, es entre 0 y -0,0107. El cual es muy pequeño, lo que significa que el rango de velocidad de viento para el cual funciona también es reducido. Esto se produce porque la MCC que se tiene acoplada a la máquina de inducción no es lo suficientemente mayor en cuanto a potencia que la segunda, por lo tanto no puede girar más que eso. Al intentar aumentar esta velocidad de giro, con la resistencia de campo, la corriente de armadura alcanza valores prohibitivos. Claramente esto no es lo que sucedería en la realidad, debido a que el viento sí puede ser más fuerte y, probablemente, sí se obtienen mayores potencias.

En la siguiente tabla se muestran los datos de: deslizamiento, el cual se calcula para cada velocidad de acuerdo a la Ecuación (3.15), corriente generada medida con la tenaza, voltaje generado medido con la tenaza y velocidad.

s	I <sub>gen</sub> [A]	V <sub>gen</sub> [V]	n [rpm]
-0,0007	6,61	230,7	1501
-0,0013	6,7	230,3	1502
-0,0027	6,82	231,9	1504
-0,0033	7,15	230,9	1505
-0,0047	7,16	231,1	1507
-0,0053	7,45	230,9	1508
-0,0067	7,83	232,4	1510
-0,0073	8,47	230,7	1511
-0,0093	8,73	230,1	1514
-0,0107	9,26	230,8	1516

**Tabla 4.8: Datos de deslizamiento, corriente, voltaje y velocidad, en prueba de generación.**

Se puede notar claramente el rango de deslizamiento y la velocidad a la que se produce cada uno.

### 4.2.3 Comparación Teórico Experimental

En la Tabla 4.9 se presenta la comparación de las siguientes corrientes: primero se muestra la corriente I<sub>gen</sub> medida con la tenaza (la misma de la Tabla 4.8), y que corresponde a I<sub>1</sub>

del circuito equivalente monofásico aproximado (Figura 3.7); luego está la corriente teórica de rotor  $I_{2teo}$ , que corresponde a  $I_2$  de la misma figura; y por último la corriente teórica de estator,  $I_{1teo}$ , que corresponde al valor de  $I_{gen}$ , calculado en forma teórica.

$I_{gen}$ [A]	$I_{2teo}$ [A]	$I_{1teo}$ [A]
6,61	0,269	6,441
6,7	0,538	6,413
6,82	1,087	6,459
7,15	1,355	6,45
7,16	1,905	6,541
7,45	2,178	6,589
7,83	2,749	6,779
8,47	3,006	6,838
8,73	3,832	7,178
9,26	4,405	7,507

**Tabla 4.9: Diferencias entre corriente medida y corriente calculada.**

Se observa que el modelo de circuito equivalente aproximado pronostica corrientes menores que las experimentales, con diferencias entre 2,5% y 18,9%.

La corriente de rotor, igual a  $I_{2teo}$ , se obtiene de la Ecuación (3.23).

$$I_{2teo} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

Por otra parte, la corriente de estator,  $I_{1teo}$ , se calcula como:

$$I_{1teo} = \frac{V_1 \angle 0}{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right) + j(X_1 + X_2)} + \frac{V_1 \angle 0}{\left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{jX_0}\right)^{-1}} \quad (4.5)$$

Al realizar este último cálculo se encuentra, también de forma teórica, el ángulo  $\phi$ , que corresponde al ángulo entre el voltaje y la corriente. En la siguiente tabla se muestra el  $\cos \phi$

que se obtiene con la tenaza, el ángulo calculado de forma teórica y su coseno, es decir, el  $\cos\phi_{teo}$ . Se aprecia cierta similitud teórico-experimental.

$\cos\phi$	$\phi_{teo}$	$\cos\phi_{teo}$
-0,031	-84,4	0,098
-0,098	-86,6	0,059
-0,164	-91,6	-0,028
-0,222	-93,8	-0,066
-0,28	-98,8	-0,153
-0,329	-100,9	-0,189
-0,386	-105,7	-0,271
-0,477	-107,7	-0,304
-0,504	-113,9	-0,405
-0,543	-117,8	-0,466

**Tabla 4.10: Coseno experimental, ángulo teórico y su coseno respectivo.**

Se pueden también comparar las potencias experimentales y teóricas, tal como se presenta en la siguiente tabla:

$P_{3\phi} \text{ exp [W]}$	$P_{mec} \text{ [W]}$	$P_{3\phi} \text{ teo [W]}$
-138	-186,7	435,0
-417	-373,6	262,8
-819	-763,2	-125,5
-1122	-949,2	-296,1
-1350	-1340,9	-693,8
-1674	-1535,4	-863,3
-2163	-1958,3	-1282,5
-2712	-2130,3	-1439,9
-3036	-2725,9	-2007,7
-3435	-3156,2	-2425,2

**Tabla 4.11: Potencias mecánica y trifásica.**

Donde la primera potencia corresponde a la obtenida con la tenaza multiplicada por tres (hay que recordar que la medida con la tenaza es monofásica) y para las siguientes, se utilizan las fórmulas mostradas a continuación, usando los datos de las Tablas 4.9 y 4.10:

$$P_{mec} = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot r_2 \cdot I_{2teo}^2 \quad (4.6)$$

$$P_{3\phi teo} = 3 \cdot I_{1teo} \cdot V \cdot \cos\phi_{teo} \quad (4.7)$$

Cabe indicar que la potencia mecánica,  $P_{mec}$ , corresponde a la potencia que el MCC entrega al generador de inducción en su eje.

En el siguiente gráfico se observan las potencias anteriormente expuestas.

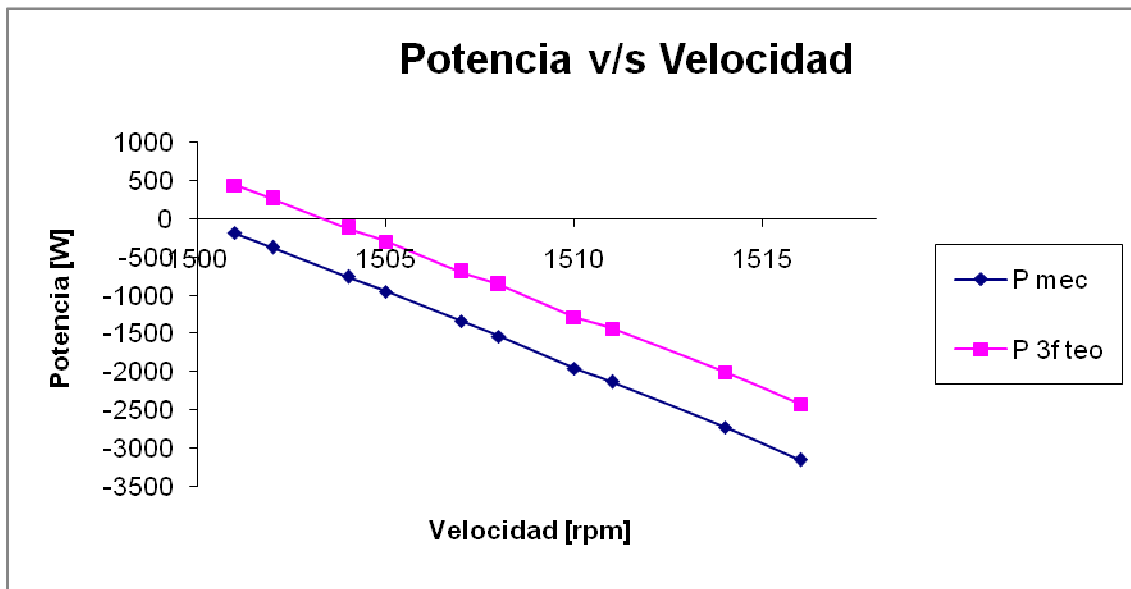


Figura 4.2: Gráfico Potencias v/s Velocidad.

Del gráfico anterior se puede notar que se cumple que  $|P_{mec}| > |P_{3\phi teo}|$  y esto se debe a que:

$$P_{3\phi teo} = P_{mec} - \text{Pérdidas} \quad (4.8)$$

Es por esto que, en la Figura 4.2, se puede ver la potencia trifásica teórica sobre la mecánica, es decir, el trecho que se produce entre ambas, corresponde a las pérdidas presentes.

La  $P_{3\phi} \text{ exp}$  para compararla con otra potencia, se tendría que tener la potencia mecánica experimental, la cual no se calculó, pero se estima que se encontraría por debajo de ella en la Figura 4.2, para cumplir la ecuación 4.8.

En la tabla siguiente se muestra la diferencia entre la potencia mecánica,  $P_{mec}$ , y la potencia trifásica teórica,  $P_{3\phi} \text{ teo}$ .

s	Diferencia entre $P_{mec}$ y $P_{3\phi} \text{ teo}$ [W]
-0,0007	636,378
-0,0013	637,693
-0,0027	653,154
-0,0033	647,159
-0,0047	672,051
-0,0053	675,726
-0,0067	690,347
-0,0073	718,112
-0,0093	730,986
-0,0107	730,986

**Tabla 4.12: Diferencia entre potencias.**

Se puede observar que la diferencia está entre 636 y 730 [W], lo que corresponde a las pérdidas que se producen, tanto las de Joule como las del fierro. En efecto, pueden compararse con las obtenidas de forma experimental, mediante las siguientes fórmulas:

$$\text{PérdidasdeJoule} = 3 \cdot (r_1 + r_2') \cdot I_{gen}^2 \quad (4.9)$$

$$\text{Pérdidasdelfierro} = 3 \cdot P_0 = 3 \cdot \frac{V_{gen}^2}{r_0} \quad (4.10)$$

$$\text{Péridastotales} = \text{PéridasdeJoule} + \text{Péridasdelfierro} \quad (4.11)$$

$$\text{Eficienciagenerador} = \frac{|\text{Poteciagenerada}|}{|\text{Poteciagenerada}| + \text{Péridastotales}} \quad (4.12)$$



En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos con las fórmulas recién mostradas; la corriente y el voltaje utilizados son los entregados por la tenaza (Tabla 4.8), las resistencias, son las encontradas con las pruebas en vacío y de rotor bloqueado, y la potencia generada es la medida con la tenaza (multiplicada por 3) o  $P_{3\phi teo}$  de la Tabla 4.11.

Pérdidas de Joule [W]	Pérdidas del hierro [W]	Pérdidas totales [W]	Eficiencia motor [%]
247,755	632,740	880,494	13,5
254,547	630,547	885,095	32,0
263,747	639,339	903,086	47,6
289,888	633,837	923,726	54,8
290,700	634,936	925,636	59,3
314,725	633,837	948,562	63,8
347,650	642,099	989,749	68,6
406,804	632,740	1039,544	72,3
432,163	629,453	1061,616	74,1
486,229	633,288	1119,517	75,4

**Tabla 4.13: Pérdidas calculadas experimentalmente.**

Se puede notar, en la Tabla 4.13, que la eficiencia del motor va aumentando a medida que aumenta la potencia generada; sus valores están dentro de los rangos esperados.

En la tabla expuesta a continuación se muestran las pérdidas y eficiencia en condición nominal de la máquina, obtenida tanto de forma experimental, como con los datos de placa.

Con datos experimentales	
Pérdidas de Joule [W]	816,547
Pérdidas del hierro [W]	630
Pérdidas totales [W]	1446,547
Eficiencia motor	0,753

Con datos de placa	
Rendimiento nominal	0,699
Pérdidas [W]	1901,6

**Tabla 4.14: Comparación de pérdidas y eficiencia.**

Las fórmulas que se utilizaron para calcular las pérdidas y la eficiencia con datos de placa fueron:

$$\text{Rendimiento nominal} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\sqrt{3} \cdot V_{ff} \cdot I_L \cdot \cos \phi} \quad (4.13)$$

$$\cos \phi = 0,8 \text{ (Valor supuesto)} \quad (4.14)$$

$$\text{Pérdidas} = [(1 / \text{Rendimiento nominal}) - 1] \cdot \text{Potencia mecánica} \quad (4.15)$$

Además de las fórmulas: 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12.

#### 4.2.4 Operación como motor de inducción (deslizamientos positivos)

Para analizar la máquina de inducción de forma más completa, se realiza la prueba como motor de la misma. Así, al tomar datos de la máquina operando como motor, se podrá graficar el comportamiento completo de la misma y analizar más fácilmente sus curvas. Para esto se utiliza la MCC como generador alimentando resistencias como cargas; a mayor carga la velocidad disminuye, y se logra obtener un rango de velocidades donde la máquina actúa como motor.

La primera medición que se realiza (Tabla 4.5) es cuando, conectadas ya ambas máquinas, la MCC aún se encuentra sin campo, por lo que no hay corriente ni voltaje en ella (motor de inducción prácticamente en vacío).

$V_{\text{carga}}$ [V]	7,67
$I$ [A]	6,42
$V$ [V]	229,1
$P$ [kW]	0,203
$\cos \phi$	0,137
$n$ [rpm]	1496

Tabla 4.15: Primera medición de datos, máquina de inducción como motor.

Posteriormente se agregan diversos valores de resistencias de carga a la armadura del generador de CC, originando diferentes corrientes de armadura como se muestra en la Tabla

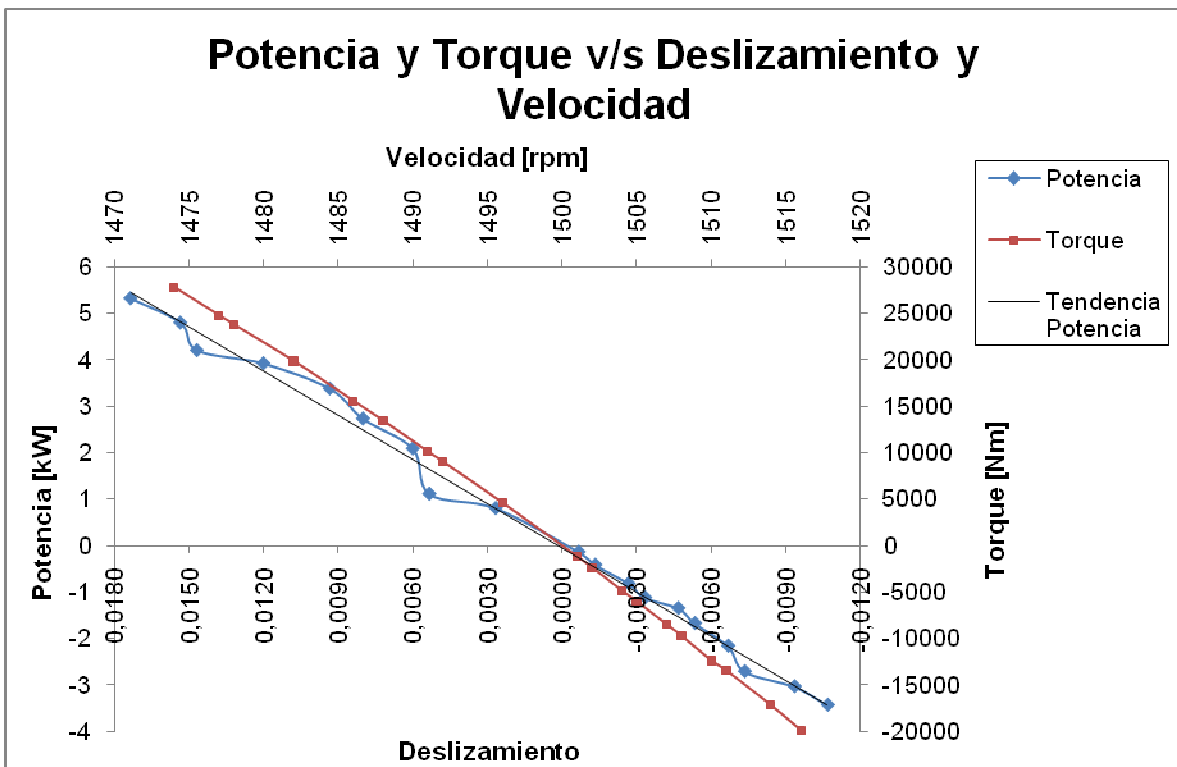
4.16, donde la primera columna de datos es cuando se conecta el campo, pero sin carga, por esta razón la corriente de armadura es cero.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$I_{\text{campo}}$ [A]	1,860	1,835	1,791	1,764	1,754	1,737	1,727	1,718	1,712
$I_{\text{arm}}$ [A]	0	1,30	4,92	7,17	9,77	11,81	12,86	15,06	17,04
$V_{\text{carga}}$ [V]	264,3	359,6	254,4	250,9	247,7	244,2	242,7	239,3	236,3
$I$ [A]	6,34	6,46	6,89	7,41	7,93	8,54	8,87	9,53	10,27
$V$ [V]	228,3	228,0	227,8	228,6	228,5	229,1	228,3	228,3	228,6
$P$ [kW]	0,268	0,371	0,696	0,911	1,127	1,308	1,402	1,600	1,775
$\cos \phi$	0,190	0,249	0,441	0,531	0,611	0,672	0,696	0,738	0,762
$n$ [rpm]	1496	1492	1491	1488	1486	1482	1478	1477	1474
$s$	0,002	0,005	0,006	0,008	0,009	0,012	0,014	0,015	0,017

**Tabla 4.16: Datos de prueba de máquina de inducción como motor.**

Se puede notar que al aumentar la carga ( $I_{\text{arm}}$ ), la velocidad disminuye y la corriente de la máquina de inducción crece. Esta corriente, según datos de placa, puede ser hasta 12 [A]. La corriente de armadura, al igual que en la prueba de generación, aumenta considerablemente y según los datos nominales, expuestos en la Tabla 4.4, esta corriente, al actuar la máquina como generador, a lo más puede aceptarse que sea 17,9 [A].

A continuación se muestra el gráfico de Potencia Trifásica Media y Torque (calculado en forma teórica) versus Deslizamiento y Velocidad (se pueden observar los cuatro parámetros), entre 1474 y 1516 [rpm].



**Figura 4.3: Gráfico Torque y Potencia v/s Velocidad y Deslizamiento.**

En la figura 4.3 se observa que tanto la potencia como el torque, cruzan el eje en el deslizamiento 0, el que es igual a la velocidad síncrona, 1500 [rpm]. Esto es justamente lo que se esperaba sucediera, por lo tanto se puede afirmar un comportamiento real y adecuado de la máquina de inducción en conjunto con la máquina de corriente continua. Por otra parte, la potencia presenta una conducta bastante cercana a la línea de tendencia que se muestra, lo que también demuestra una correcta actuación. El torque, como se calcula de forma teórica, su forma es prácticamente una línea recta, que de todas maneras sirve para conocer el proceder de la máquina.

La tabla con los datos de la figura 4.3, se muestra a continuación:

n [rpm]	s	$P_{3\phi}$ [kW]	T [Nm]
1474	0,0173	5,325	27785
1477	0,0153	4,8	24766
1478	0,0147	4,206	23769
1482	0,0120	3,924	19847
1486	0,0093	3,381	15560
1488	0,0080	2,733	13436
1491	0,0060	2,088	10104
1492	0,0053	1,113	9026
1496	0,0027	0,804	4582
1501	-0,0007	-0,138	-1188
1502	-0,0013	-0,417	-2375
1504	-0,0027	-0,819	-4846
1505	-0,0033	-1,122	-6023
1507	-0,0047	-1,35	-8497
1508	-0,0053	-1,674	-9723
1510	-0,0067	-2,163	-12384
1511	-0,0073	-2,712	-13463
1514	-0,0093	-3,036	-17193
1516	-0,0107	-3,435	-19881

**Tabla 4.17: Datos Figura 4.3.**

Los datos de velocidad y deslizamiento, son los presentes en las tablas 4.8 y 4.16, al igual que la potencia que corresponde a las de la tabla 4.11, columna de  $P_{3\phi}$ , y la tabla 4.16, aunque esta última se multiplica por tres, debido a que se desea la potencia trifásica. El torque se calcula con la Ecuación (3.28), donde los datos utilizados son: los parámetros encontrados al comienzo del presente capítulo, y los datos de corriente y voltajes dados en las tablas mencionadas anteriormente (Tablas 4.8 y 4.16).

### 4.3 Comentarios

Con la ejecución experimental de las diversas pruebas, se encuentran los parámetros de la máquina estudiada y el potencial de generación que presenta al estar conectada a cierta máquina de corriente continua.

El objetivo, que luego de este capítulo se tiene, es ampliar el rango de generación, el cual se notó, es muy pequeño. Esto es importante debido a la aleatoriedad del viento, pues así, mientras se tenga un rango de generación mayor, mayor será el tiempo en que el aerogenerador aportará energía y mayor será el ahorro de consumo desde la red. Esto es lo que se trata en los capítulos siguientes.

## 5 Análisis Experimental de Opciones para Ampliar Rango Útil de Velocidades

En este capítulo se revisan experimentalmente dos formas de ampliar el rango de generación. La primera es utilizando un variador de frecuencia en la máquina de inducción con rotor jaula de ardilla y la segunda, es empleando una máquina de inducción de rotor bobinado, a la cual se le agregan resistencias en los enrollados del rotor. A continuación se presentan ambos casos.

### 5.1 Generador de rotor jaula de ardilla con variador de frecuencia

En esta parte se experimenta con un variador de frecuencia para ampliar el rango de operación de la máquina de inducción como generador. Para esto se realizan pruebas a diferentes frecuencias y se analizan los resultados.

A continuación se relatan las diferentes experiencias realizadas.

#### 5.1.1 Prueba como motor en vacío para frecuencias hasta la nominal

En esta prueba se conecta la máquina de inducción como motor dejándola en vacío, es decir, sin carga mecánica, y se mide la corriente, el voltaje y la potencia activa en la fase R. La velocidad se mide con un tacómetro digital, el cual entrega las vueltas por minuto. Con el variador de frecuencia se va aumentando esta misma, desde 10 [Hz] hasta 50 [Hz] en intervalos de 10. Con esta prueba inicial se espera principalmente visualizar el comportamiento del variador. A continuación se muestra una tabla con los datos tomados.

	T1	T2	T3	T4	T5
Corriente [A]	3,3	3,31	3,42	3,67	3,63
Voltaje [V]	55	95	138	160	180
Potencia [kW]	0,032	0,03	0,065	0,127	0,18
$\cos \phi$	0,3	0,15	0,12	0,2	0,3
Velocidad [rpm]	295	593	893	1192	1491
Frecuencia [Hz]	10	20	30	40	50

Tabla 5.1: Datos al ir aumentando la frecuencia hasta la nominal.

Se puede notar que al aumentar la frecuencia sube la velocidad, que es lo esperado. De hecho, va aumentando proporcionalmente a la frecuencia: a un 20% de la frecuencia nominal, que corresponde a 10 [Hz], la velocidad es muy cercana al 20% de la velocidad síncrona, es decir, 300 [rpm]. Lo mismo se observa en el resto de las mediciones de velocidad.

Por otra parte, se observa que la corriente se mantiene casi constante, a pesar que el voltaje va aumentando. La explicación para la constancia de la corriente se fundamenta en lo siguiente: como se realiza la prueba en vacío, ocurre que la corriente circula por la rama paralela del circuito equivalente, puesto que la rama serie queda representada por una impedancia infinita, dada por el vacío. Por lo tanto, como se tiene que  $r_0 > X_0$ , la corriente transita prácticamente por la rama con la reactancia inductiva  $X_0$ , debido a que ésta le pone menos resistencia a su paso; de esta manera se tiene:

$$I_0 \approx \frac{V}{X_0} = \frac{\frac{220}{50} \cdot f}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_0} = \frac{220}{2 \cdot \pi \cdot L_0} = cte$$

Donde queda claro que la corriente no depende de la frecuencia y es una constante.

OBS.: en la ecuación anterior se asumió que el variador es tal que  $\frac{V_{fn}}{f} = \frac{220}{50} = cte$ , lo que no se cumple exactamente en este variador, como se observa en la tabla anterior.

Otro dato a observar es que el voltaje no llega a ser 220 [V] cuando la frecuencia es 50 [Hz] (lo que si ocurre en las experiencias del Capítulo 4). Esto se debe al diseño del variador de frecuencia, cuyos circuitos electrónicos pueden proyectarse con diferentes estrategias para cambiar la frecuencia, lo cual influye en la forma de onda y valor efectivo del voltaje. Si se pudiese observar la onda de voltaje de salida, probablemente esta no tendría una forma definida y presentaría un comportamiento aleatorio, lo que evidenciaría el actuar del variador.

También hay que destacar que se produce mucha fluctuación de las variables que se miden en esta prueba, en cada frecuencia que se especifica, probablemente por la forma no sinusoidal del voltaje.



### 5.1.2 Prueba con motor en vacío para frecuencias sobre la nominal

Cuando se aumenta la frecuencia del voltaje de salida del variador de frecuencia, sobre los 50 [Hz], se encuentra que la máquina no gira más rápido ni el voltaje se eleva más. Por lo tanto, se considera que el variador que se dispuso para los ensayos no es el apropiado para frecuencias sobre los 50 [Hz]. Luego, los ensayos siguientes se harán sólo para frecuencias entre 0 y 50 [Hz].

### 5.1.3 Prueba de generación a 40 [Hz]

Esta prueba busca demostrar que se puede generar a velocidades de rotación bajas, modificando la velocidad síncrona mediante la incorporación de un variador de frecuencia entre la red y el generador, con el cual se ajusta este parámetro, a uno menor que el de la red.

La presente prueba se realiza a 40 [Hz]. Para ello, inicialmente el motor de corriente continua se hace girar aproximadamente a 1200 [rpm], ya que esa es la velocidad síncrona para una frecuencia de 40 [Hz]. Los datos que se toman en el motor de CC cuando el generador asíncrono se conecta al variador, son los de la Tabla 5.2:

$I_{arm}$ [A]	3,06
$I_{cam}$ [A]	1,53
Velocidad [rpm]	1188

Tabla 5.2: Datos a 40 [Hz] sólo con MCC.

Luego, al conectar la máquina de inducción al variador (cuyo voltaje es de 40 [Hz]), se toman los siguientes datos:

$I_{arm}$ [A]	2,86
$I_{cam}$ [A]	1,588
$I$ [A]	3,32
$V$ [V]	152
Velocidad [rpm]	1200

Tabla 5.3: Datos a 40 [Hz] ambas máquinas conectadas.

Como se ha dicho, la velocidad síncrona a 40 [Hz] es:

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 40}{4} = 1200[rpm]$$

Luego de realizada esta conexión la idea es, al igual que en la prueba de generación del capítulo pasado (Punto 4.2), aumentar la resistencia de campo, con el fin de aumentar la velocidad sobre los 1200 [rpm] y de acuerdo a esto la máquina debería generar.

A continuación se muestran los datos tomados al aumentar la resistencia de campo. Se debe recordar que la medición se realiza en la fase R de la máquina de inducción, por lo tanto la corriente generada,  $I_{gen}$ , es la corriente de línea, y la potencia P es monofásica.

	T1	T2	T3	T4
$I_{campo}$ [A]	1,399	1,370	1,365	1,331
$I_{arm}$ [A]	3,64	3,65	3,63	3,63
$I_{gen}$ [A]	3,40	3,38	3,40	3,48
$V_{gen}$ [V]	210 ; 121	220 ; 130	214 ; 127	210 ; 130
P [kW]	-0,103	-0,109 ; -0,042	-0,09 ; -0,113	-0,067 ; -0,129
$\cos \phi$	-0,076 ; -0,12	-0,171 ; -0,113	-0,108 , -0,151	-0,099 ; -0,161
n [rpm]	1205	1217	1221	1231

**Tabla 5.4: Datos prueba de generación a 40 [Hz].**

Se aprecia que la máquina sí logra generar, debido a que al aumentar la velocidad sobre los 1200 [rpm] se obtienen potencias negativas, lo que significa generación. Lamentablemente, ésta no es estable, ya que varía significativamente tanto el voltaje generado,  $V_{gen}$ , como la potencia P y el  $\cos \phi$  (por ello en la Tabla 5.4 se indicaron los rangos en que variaban estas mediciones: se escribieron los 2 datos más lejanos que se observaron).

Por otra parte, el deslizamiento hasta el cual puede generarse es

$$s = \frac{1200 - 1231}{1200} = -0,026$$

Este rango de deslizamiento (entre 0 y -0,026), es mayor al encontrado a 50 [Hz]. Por lo tanto, lo favorable es que, además de poder generar a otra frecuencia y por ende a otras velocidades de viento, también se tiene un rango mayor de velocidades de viento en las cuales generar, dado por el mayor rango de deslizamiento.

El aspecto negativo, es que no se puede analizar mucho más esta información debido a la inestabilidad que presenta, en primer lugar por los pocos datos que se pudo obtener, y luego, relacionado con esto mismo, no se puede hacer una extrapolación de ellos, porque no entregan un comportamiento claramente definido.

#### 5.1.4 Prueba de generación a 45 [Hz]

En este caso se realiza la misma prueba anterior, pero a una frecuencia de 45 [Hz]. Al conectar la máquina de corriente continua se busca inicialmente obtener 1350 [rpm], que es la velocidad síncrona para la frecuencia señalada. Los datos que se toman en el motor de CC, con el generador desconectado del variador de frecuencia, son los siguientes:

$I_{arm}$ [A]	2,76
$I_{cam}$ [A]	1,836
Velocidad [rpm]	1333

Tabla 5.5: Datos a 45 [Hz] sólo con MCC.

Posteriormente se conecta la máquina de inducción al variador, luego de comprobado que ambas giran en el mismo sentido. Se toman los siguientes datos de la máquina de inducción:

$I$ [A]	3,33
$V$ [V]	173,2
Velocidad [rpm]	1349

Tabla 5.6: Datos a 45 [Hz] ambas máquinas conectadas.

Al igual que en 5.1.3, se aumenta la resistencia de campo, para intentar aumentar la velocidad y así poder generar. La velocidad síncrona a 45 [Hz] es 1350 [rpm], pues:

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 45}{4} = 1350[rpm]$$

A continuación se muestran los datos tomados al aumentar la resistencia de campo. Se debe recordar que la medición se realiza en la fase R de la máquina de inducción, por lo tanto la corriente generada,  $I_{gen}$ , es la corriente de línea, y la potencia P es monofásica.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
$I_{campo}$ [A]	1,196	1,744	1,717	1,694	1,661	1,627	1,614
$I_{arm}$ [A]	2,73	3,39	3,38	3,35	3,42	3,37	3,34
$I_{gen}$ [A]	3,31	3,34	3,54	3,48	3,35	3,44	3,45
$V_{gen}$ [V]	168	194 ; 144	228 ; 160	136 ; 216	151 ; 232	224 ; 149	228 ; 160
P [kW]	-0,025	-0,030 ; -0,107	-0,121 ; -0,038	-0,089 ; -0,115	-0,104 ; -0,040	-0,106 ; -0,048	-0,053 ; -0,133
$\cos \phi$	-0,017	-0,105 ; -0,160	-0,136 ; -0,078	-0,072 ; -0,160	-0,153	-0,183 ; -0,123	-0,068 ; -0,142
n [rpm]	1350	1353	1360	1367	1376	1389	1394

**Tabla 5.7: Datos de prueba de generación a 45 [Hz].**

En la prueba efectuada, se nota en los datos tomados que la máquina efectivamente genera. Lamentablemente, se puede apreciar también que hay mucha inestabilidad, por eso es que se registran rangos de voltaje, potencia y factor de potencia, al igual como pasó en la prueba de generación a 40 [Hz].

El mayor deslizamiento que se tiene en este caso es

$$s = \frac{1350 - 1394}{1350} = -0,033$$

El rango de deslizamiento es entre 0 y -0,033; el cual es mayor al encontrado tanto para 50 [Hz], como para 40 [Hz]. Por lo tanto, al igual que en el caso anterior, lo favorable es que, se puede generar a otra frecuencia y en esta frecuencia, en un mayor rango de velocidades de viento.

Se considera que esta es una alternativa factible para generar en un rango más amplio, pero es necesario estudiar más acerca de los efectos que produce el variador de frecuencia, tanto en la red como en la máquina.

## 5.2 Generador de rotor bobinado

En esta parte del trabajo de título, se estudia una máquina de inducción de rotor bobinado. La diferencia, es que en este caso se tiene acceso al bobinado del rotor, y la idea es comprobar la posibilidad de ampliar el rango de velocidad aumentando la resistencia por fase del rotor agregando resistencias externas. Los parámetros nominales de la máquina de inducción son los siguientes:

Conexión	Estrella
Voltaje [V]	380
Corriente [A]	12
Potencia [ch]	6
Velocidad [rpm]	1470
Frecuencia [Hz]	50

Tabla 5.8: Datos de placa de la máquina de inducción.

La potencia de 6 [ch] equivale a 4,4 [kW].

OBS.: los datos de placa y los parámetros del circuito equivalente son los mismos del motor de jaula de ardilla (Capítulo 4).

Por otra parte, el motor de corriente continua utilizado, que simula el viento moviendo la hélice y la caja de engranajes, es el mismo de antes y sus características se pueden revisar en la Tabla 4.4.

La primera prueba que se efectúa es agregando una resistencia de 200 [ $\Omega$ ] a cada enrollado del rotor.

Primeramente se hace funcionar el motor de CC a velocidad síncrona, con la máquina de inducción desconectada de la red. En la MCC se miden:

$I_{\text{campo}}$ [A]	1,368
$I_{\text{arm}}$ [A]	2,54
$n$ [rpm]	1500

Tabla 5.9: Datos de prueba de generación con rotor bobinado antes de generar.

Luego se conecta la máquina de inducción a la red de 50 [Hz], con la resistencia antes mencionada, conectada en el rotor. Se toman los datos expuestos en la Tabla 5.10. Al igual que

en el Capítulo 4, la corriente generada es de línea, el voltaje generado es fase-neutro y la potencia es monofásica.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$I_{cam}$ [A]	1,322	1,270	1,201	1,178	1,108	1,063	1,040	1,028	0,989
$I_{arm}$ [A]	3,24	3,88	5,26	6,04	7,86	9,74	10,72	12,11	13,58
$I_{gen}$ [A]	6,50	6,52	6,61	6,74	6,85	7,06	7,22	7,20	7,57
$V_{gen}$ [V]	229,3	228,7	228,3	229,8	229,5	228,5	228,6	228,3	228,3
P [kW]	-0,051	-0,102	-0,193	-0,231	-0,346	-0,467	-0,511	-0,581	-0,689
$\cos \phi$	-0,034	-0,075	-0,131	-0,152	-0,215	-0,277	-0,301	-0,332	-0,376
n [rpm]	1502	1505	1509	1514	1517	1522	1525	1528	1534

	T10	T11	T12	T13
$I_{cam}$ [A]	0,976	0,945	0,923	0,901
$I_{arm}$ [A]	14,42	16,21	17,81	19,25
$I_{gen}$ [A]	7,67	8,03	8,40	8,51
$V_{gen}$ [V]	229,1	228,2	229,4	228,5
P [kW]	-0,733	-0,830	-0,871	-1,026
$\cos \phi$	-0,435	-0,464	-0,504	-0,514
n [rpm]	1536	1541	1546	1549

**Tabla 5.10: Datos prueba de generación con máquina de rotor bobinado y resistencia de 200 [Ω].**

El rango de deslizamiento de generación, en este caso, es entre 0 y -0,032. Se obtienen 1549 [rpm] como velocidad máxima, ya que a esa velocidad la corriente de armadura está cercana a su valor nominal de 22,5 [A].

Claramente se puede notar la ampliación en el rango de velocidad para generar, ya que en la primera prueba de generación realizada (Capítulo 4.2), este rango de deslizamiento es, como máximo, -0,0107. Esto significa que, con resistencias adicionales en el rotor, para velocidades mayores de viento se puede generar de todas formas.

Si se piensa en la limitación de la corriente de generación, que corresponde a la corriente nominal de la máquina de inducción, la cual es 12 [A], se puede extrapolar este dato para

determinar cuál sería el máximo deslizamiento. A continuación se muestra el gráfico de corriente generada versus deslizamiento, con la línea de tendencia y la ecuación de ésta.

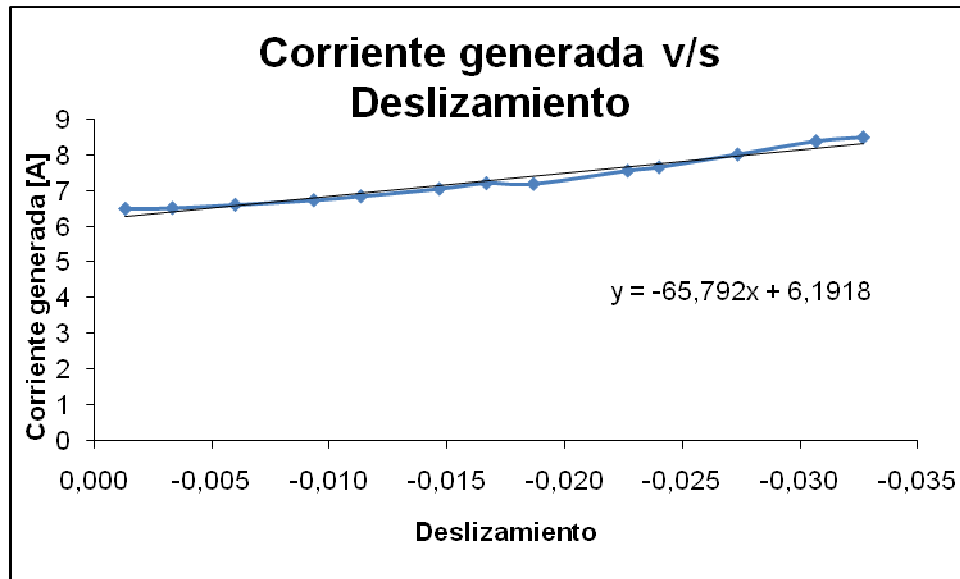


Figura 5.1: Gráfico Corriente generada v/s Deslizamiento, para resistencia de 200 [ $\Omega$ ].

De la ecuación de la línea de tendencia de la Figura 5.1, se puede calcular el deslizamiento que se tiene para la corriente nominal señalada, de la siguiente forma:

$$12 = -65,792 \cdot x + 6,1918$$

$$\Rightarrow x = -0,088$$

$$(1632[rpm])$$

Por lo tanto, se puede observar que el rango crece bastante más de lo obtenido experimentalmente. Esto, al igual que en el Capítulo 4, ocurre por las limitaciones que se tienen de la máquina de corriente continua.

En segundo lugar, se agrega al rotor de la máquina de inducción una resistencia de, aproximadamente 85 [ $\Omega$ ] a cada enrollado. Se toman los siguientes datos de generación.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$I_{cam}$ [A]	1,385	1,336	1,266	1,232	1,166	1,102	1,066	1,041	1,009
$I_{arm}$ [A]	2,59	3,22	4,18	5,12	6,36	7,83	9,57	11,01	12,23
$I_{gen}$ [A]	6,42	6,48	6,54	6,64	6,71	6,88	7,10	7,21	7,38
$V_{gen}$ [V]	228,9	228,2	227,8	229,2	228,6	228,0	228,4	227,8	228,1
P [kW]	-0,016	-0,046	-0,110	-0,174	-0,251	-0,350	-0,470	-0,521	-0,640
$\cos \phi$	-0,012	-0,033	-0,073	-0,117	-0,174	-0,219	-0,291	-0,318	-0,381
n [rpm]	1501	1503	1505	1508	1512	1515	1522	1524	1528

	T10	T11	T12	T13
$I_{cam}$ [A]	0,995	0,962	0,934	0,904
$I_{arm}$ [A]	13,73	15,27	18,00	19,62
$I_{gen}$ [A]	7,47	7,76	8,15	8,50
$V_{gen}$ [V]	228,3	227,6	229,0	228,4
P [kW]	-0,736	-0,803	-0,899	-1,037
$\cos \phi$	-0,392	-0,458	-0,476	-0,497
n [rpm]	1529	1536	1539	1545

**Tabla 5.11: Datos prueba de generación con máquina de rotor bobinado y resistencia de  $85 [\Omega]$ .**

El rango de deslizamiento de generación, en este caso, es entre 0 y -0,03. Se obtienen 1545 [rpm] como velocidad máxima. En este caso, también se nota el aumento del rango de velocidad de generación, con respecto al capítulo anterior.

Al graficar y buscar la línea de tendencia con su ecuación, se obtiene la siguiente figura:



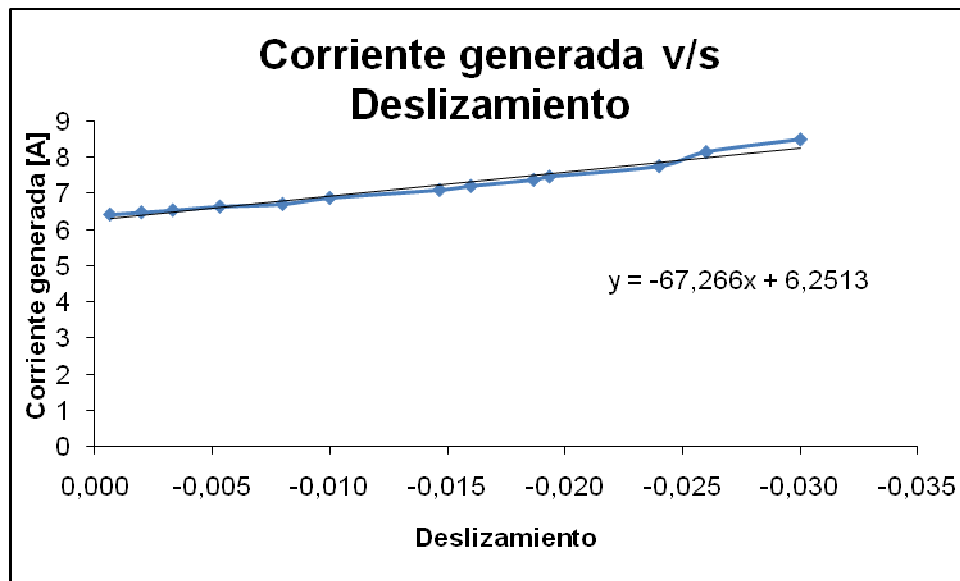


Figura 5.2: Gráfico Corriente generada v/s Deslizamiento, para resistencia de 85 [ $\Omega$ ].

En este caso, el deslizamiento a la corriente nominal, 12 [A], es:

$$12 = -67,266 \cdot x + 6,2513$$

$$\Rightarrow x = -0,085$$

$$(1627[rpm])$$

Por lo tanto, el deslizamiento es un poco menor al obtenido con la resistencia de 200 [ $\Omega$ ]. De todas formas, es un rango mucho más amplio al conseguido en el Capítulo 4.

Por último, se realiza la misma prueba, pero con una resistencia de 70 [ $\Omega$ ]. Se toman los siguientes datos de generación.

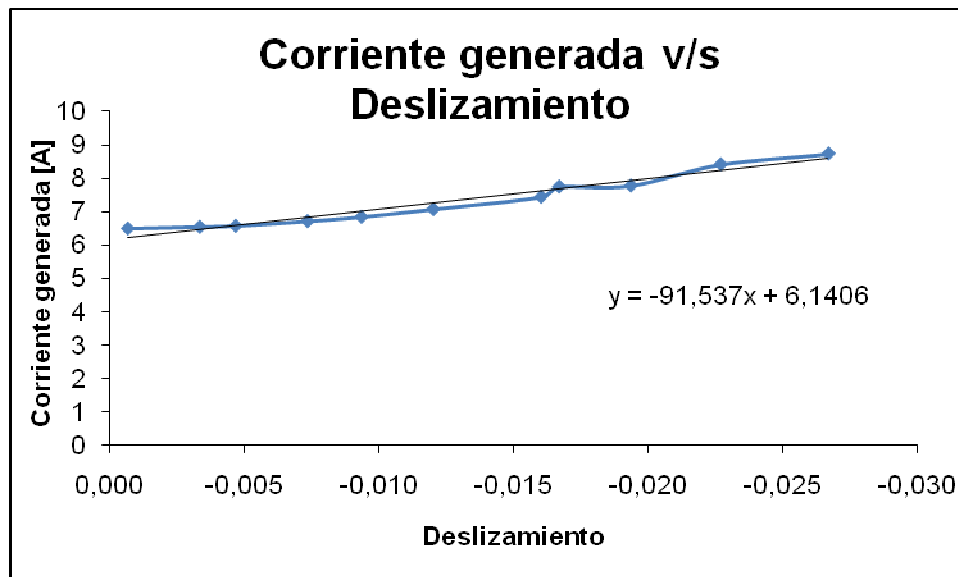
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$I_{cam}$ [A]	1,312	1,268	1,209	1,137	1,086	1,049	1,020	0,991	0,969
$I_{arm}$ [A]	2,72	4,26	5,43	7,17	8,60	10,20	12,71	14,26	15,88
$I_{gen}$ [A]	6,48	6,53	6,56	6,70	6,83	7,06	7,43	7,74	7,77
$V_{gen}$ [V]	228,3	227,7	227,9	228,1	227,8	226,7	228,3	228,0	228,4
P [kW]	-0,017	-0,125	-0,195	-0,296	-0,423	-0,511	-0,641	-0,732	-0,834
$\cos \phi$	-0,011	-0,091	-0,136	-0,202	-0,272	-0,322	-0,386	-0,436	-0,442
n [rpm]	1501	1505	1507	1511	1514	1518	1524	1525	1529

	T10	T11
$I_{cam}$ [A]	0,941	0,908
$I_{arm}$ [A]	18,06	20,69
$I_{gen}$ [A]	8,41	8,73
$V_{gen}$ [V]	228,7	228,7
$P$ [kW]	-0,954	-1,073
$\cos \phi$	-0,514	-0,516
$n$ [rpm]	1534	1540

**Tabla 5.12: Datos prueba de generación con máquina de rotor bobinado y resistencia de  $70 \text{ } [\Omega]$ .**

El rango de deslizamiento de generación, en este caso, es entre 0 y -0,026. Se obtienen 1540 [rpm] como velocidad máxima. Al igual que en los dos casos anteriores, también se nota el aumento del rango de velocidad de generación, con respecto al capítulo anterior.

Al graficar y buscar la línea de tendencia se obtiene el siguiente gráfico.



**Figura 5.3: Gráfico Corriente generada v/s Deslizamiento, con resistencia de  $70 \text{ } [\Omega]$ .**

En este caso, el deslizamiento a 12 [A] es:

$$12 = -91,537 \cdot x + 6,1406$$

$$\Rightarrow x = -0,064$$

$$(1596[rpm])$$

Este deslizamiento es el menor, entre los tres casos escritos, aunque de todas maneras, es superior al encontrado en el Capítulo 4.

Se puede notar que mientras mayor es la resistencia que se conecta a los enrollados del rotor, mayor es la velocidad que se puede alcanzar, pero menor es la potencia que se genera a la misma velocidad. Esto se puede observar mejor en el siguiente gráfico, para el cual se utilizaron los datos de las tablas 5.10, 5.11 y 5.12.

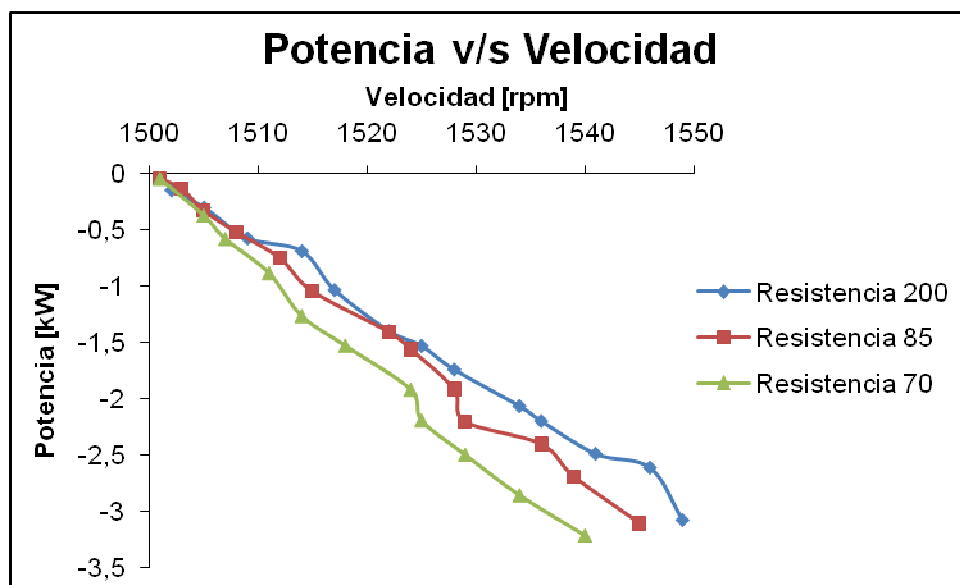


Figura 5.4: Gráfico Potencia v/s Velocidad, para las distintas resistencias incorporadas.

En la Figura 5.4 se observa justamente lo descrito en el párrafo anterior. Con la resistencia de 70 [ $\Omega$ ] se alcanza la mayor potencia, a la menor velocidad.

Esta característica es interesante de analizar, puesto que con toda resistencia adicional baja, para una velocidad de viento menor, se puede generar la misma potencia que con resistencia adicional alta a mayor velocidad. Así, ante variaciones de velocidad de viento, se podría mantener constante la potencia generada, ajustando adecuadamente el valor de las resistencias adicionales del rotor, según la magnitud de la velocidad del viento.

### **5.3 Comentarios**

Con el capítulo desarrollado se puede observar experimentalmente la ampliación de rangos de generación que se logra, tanto gracias al variador de frecuencia, como a la opción de agregar resistencias en el enrollado del rotor de una máquina de inducción de rotor bobinado. También se encontró un rango teórico de deslizamiento, al extrapolar la corriente generada de la máquina de inducción, hasta su corriente nominal, a partir de la línea de tendencia encontrada.

Para tener una visión aplicada de todo lo descrito, en el próximo capítulo se evaluará de manera teórica un aerogenerador empleando un generador de inducción conectado a la red y, a modo de comparación, empleando variador de frecuencia y resistencias adicionales al rotor. Se analizará cómo esto afecta el rango de velocidades de operación y el ahorro de energía que significa cada opción.

## **6 Aplicación Teórica empleando Máquina de Inducción Convencional**

El presente capítulo muestra una aplicación teórica de lo estudiado en los anteriores. La idea es considerar un régimen de viento típico diario en determinado lugar y una máquina de inducción trifásica de rotor jaula de ardilla convencional, a la cual se conozcan sus datos de placa, es decir: potencia mecánica, voltaje fase-fase, frecuencia, conexión, corriente de línea, factor de potencia y velocidad. Luego, en base a los datos conocidos, se calculan los parámetros de la máquina de forma teórica, los cuales son necesarios para obtener las características del comportamiento de la máquina.

Al tener el régimen de viento y el modelo de comportamiento de la máquina, mediante las ecuaciones de la hélice se relaciona la velocidad del viento con la velocidad de la máquina, para determinar a qué velocidad puede generar energía y cuáles son sus límites. Así, se puede obtener la cantidad de horas en que la máquina puede generar cuando está conectada a la red de 50 [Hz], o cuando se emplea un variador de frecuencia. Se efectúa un análisis comparativo en cuanto al rango de velocidades y al ahorro que se puede conseguir debido a su uso, es decir, cuánta menos energía se requiere de la red. Adicionalmente a estas 2 opciones, se incluye la posibilidad de usar una máquina de inducción de rotor bobinado, con resistencias externas agregadas al rotor.

### **6.1 Régimen de viento**

En primer lugar se muestra el régimen de viento en el cual se basa el estudio. El lugar se ubica en la segunda de región del país, a 10 kilómetros, aproximadamente, de la ciudad de Calama. Se asumirá una pequeña planta industrial que decida utilizar energía eólica como complemento a sus requerimientos de energía. El punto exacto del que se obtiene la información se encuentra a 22,48° latitud sur y 69,02° longitud este.

La Tabla 6.1 indica la velocidad media de viento (a 10 m de altura) en cada hora del día, en ese lugar, para un día típico.

Hora [h]	Velocidad [m/s]
1	4,4
2	4
3	4,8
4	6,8
5	8,6
6	9,5
7	10,1
8	10,2
9	10,3
10	10,4
11	10,5
12	10,3
13	9,3
14	7,1
15	4,4
16	4,4
17	4,9
18	5,8
19	6,1
20	6,1
21	6,05
22	5,9
23	5,7
24	5,6

**Tabla 6.1: Datos de hora y velocidad del viento.**

Además, en la Figura 6.1 se muestran gráficamente estos datos. Esta información fue extraída del Reporte Energía Renovable [6], del lugar indicado anteriormente.

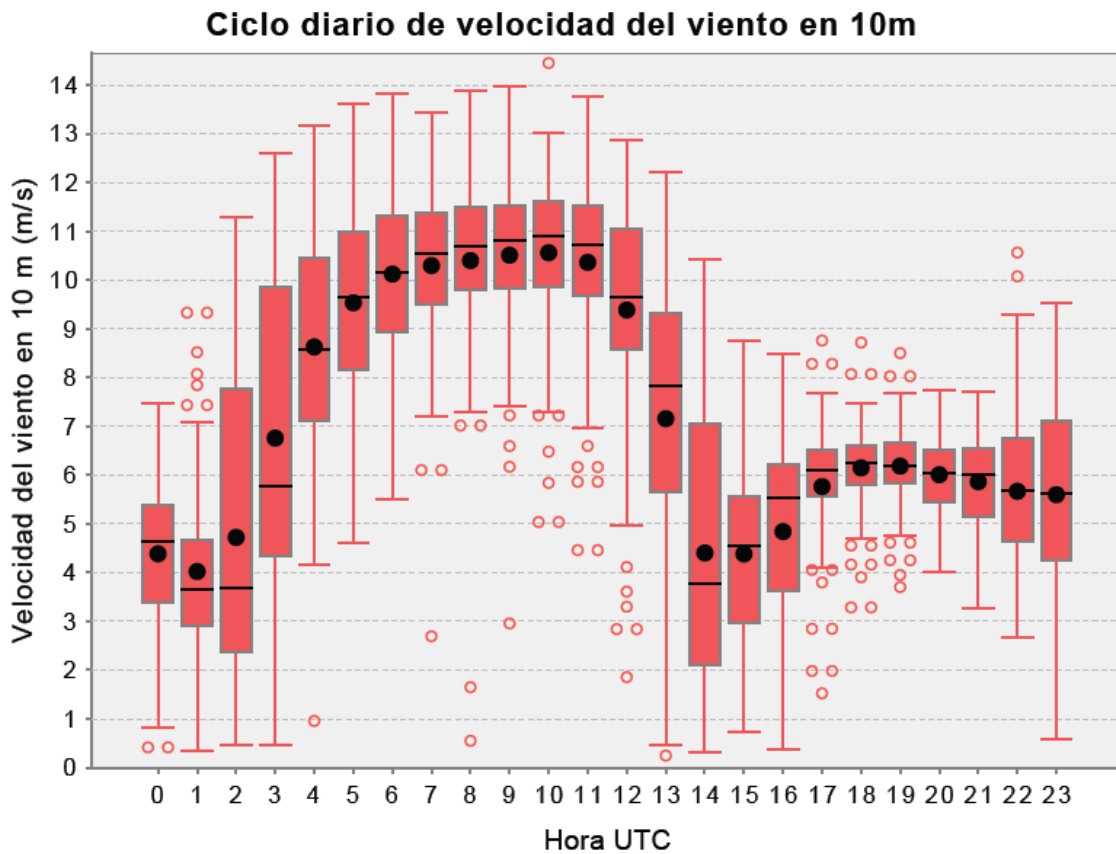


Figura 6.1: Gráfico de Velocidad v/s Hora del día a 10 [m] de altura.

La Figura 6.1 incluye diversa información con determinados objetivos, pero la que interesa para este capítulo son los puntos negros, los cuales corresponden al valor promedio de velocidad de viento de cada hora del día en el lugar antes señalado. De acuerdo a estos valores se realiza el presente estudio.

## 6.2 Máquina de inducción con rotor jaula de ardilla

A continuación se detalla la máquina de inducción trifásica con rotor jaula de ardilla que se considera para esta aplicación. La máquina es de marca Dutchi, trifásica, de 4 polos y velocidad sincrónica igual a 1500 [rpm] a 50 [Hz]. Sus características de placa se presentan en la siguiente tabla [3].

Conexión	Delta
Voltaje fase-fase [V]	380
Corriente de línea [A]	11,2
Potencia mecánica [kW]	5,5
Factor de potencia	0,85
Velocidad nominal [rpm]	1450
Frecuencia [Hz]	50
Rendimiento [%]	87,3

Tabla 6.2: Datos de placa de la máquina de inducción.

### 6.3 Hélice y caja de cambios

A continuación se analiza la hélice adecuada para utilizar en el aerogenerador y la caja de cambios que se requiere, debido a que, como se ha dicho, la velocidad con que gira la hélice es mucho menor a la velocidad síncrona de la máquina.

En el Capítulo 3 se dedujo la Ecuación (3.10) que modela la potencia mecánica que se obtiene en el eje de la hélice, en función del área  $A$  barrida por las aspas, de la velocidad  $V$  del viento, del coeficiente de potencia  $C_p$  (que depende del diseño de la hélice) y de la densidad  $\rho$  del aire. Si dicha potencia se multiplica por el rendimiento  $\eta_t$  del sistema de transmisión (caja multiplicadora de velocidad fundamentalmente) y por el rendimiento  $\eta_e$  del generador, se obtiene la potencia eléctrica (activa) que es capaz de generar el aerogenerador:

$$P = C_p \cdot \eta_e \cdot \eta_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (6.1)$$

De esta ecuación, considerando que  $A = \pi \cdot d^2 / 4$ , se encuentra el diámetro necesario de la hélice:

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_e \cdot \eta_t}} \quad (6.2)$$



Por otra parte, la potencia activa eléctrica de la máquina (como motor), en condiciones nominales, es:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{ff} \cdot I_L \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 11,2 \cdot 0,85 = 6265,8[W]$$

Se asumirá que aproximadamente esta es la potencia que puede generar la máquina de inducción.

Así, para el cálculo del diámetro  $d$  de la hélice se tienen los siguiente valores: potencia 6265,8 [W], velocidad nominal igual a 10 [m/s], densidad del aire igual a 1,2 [kg/m<sup>3</sup>], coeficiente de potencia  $C_p$ , supuesto igual a 0,4, eficiencia  $\eta_e$  igual a 0,873 (calculado con los datos nominales de la Tabla 6.1) y coeficiente de transmisión  $\eta_t$  supuesto, igual a 0,9. Luego:

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot 6265,8}{\pi \cdot 1,2 \cdot 10^3 \cdot 0,4 \cdot 0,873 \cdot 0,9}} \approx 6,5[m]$$

El diámetro del la hélice es entonces 6,5 [m] aproximadamente.

Si se considera que la hélice tiene una velocidad nominal de 100 [rpm], se requiere una caja de engranajes de relación de multiplicación igual a 1:15, ya que así, la velocidad a su salida, corresponde a 1500 [rpm] que es la velocidad síncrona de la máquina de inducción propuesta.

#### 6.4 Razón de velocidad de punta

Con todo lo descrito, sólo falta relacionar la velocidad del viento con la velocidad de la hélice en revoluciones por minuto. Para esto se usa la razón de velocidad de punta, también llamada velocidad específica,  $\lambda$ , descrita en el Capítulo 2 (Punto 2.8), la cual relaciona las velocidades antes descritas. Como ya se tiene el resto de parámetros necesarios para encontrar la velocidad específica, se utiliza la Ecuación (2.3), de la cual se despeja  $\lambda$ . Hay que destacar que la velocidad de viento utilizada en este caso es 10 [m/s], que es la velocidad nominal de la turbina, la cual corresponde a la velocidad del viento ideal para que alcance su máximo potencial de generación de energía eléctrica.

$$\lambda = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{60 \cdot v} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 6,5}{60 \cdot 10} = 3,4$$

Por lo tanto, se considera una razón de velocidad de punta igual a 3,4 (lo que está dentro de los rangos esperados de acuerdo a la Figura 2.6). En general, para una hélice generadora, de 3 palas, este parámetro está entre 3 y 6.

## 6.5 Rangos de generación de la máquina

En lo que sigue, se estudia el rango de generación de la máquina conectada a la red de 50 [Hz], y luego la aplicación del variador de frecuencia con el objetivo de ampliar este rango. Asimismo se simula la posibilidad de añadir resistencias en el rotor de una máquina de rotor bobinado, la cual se considerará, con los mismos parámetros de la máquina de jaula de ardilla.

### 6.5.1 Generación de la máquina de inducción conectada a la red de 50 [Hz]

En primer lugar, se estudia el comportamiento de la máquina a partir de ecuaciones expuestas a lo largo de la memoria. Para esto se determinan los parámetros circuitales de la máquina de forma teórica y luego se calculan los deslizamientos y potencias. Posteriormente, se analiza la relación entre la velocidad del viento y el deslizamiento correspondiente, utilizando la razón de velocidad de punta encontrada,  $\lambda = 3,4$ .

Para calcular los parámetros circuitales de la máquina, en primer lugar se realiza la siguiente suposición: las pérdidas del cobre corresponden a un 60% de las pérdidas totales, y las pérdidas del hierro, al 40% restante. A partir de esto se puede encontrar la resistencia  $r_0$ . En efecto, se tiene que las pérdidas totales del motor en condiciones nominales se relacionan con el rendimiento nominal mediante:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{mec} + \text{pérdidastotales}} \quad (6.3)$$

$$0,873 = \frac{5500}{5500 + \text{pérdidastotales}}$$

$$\Rightarrow \text{Pérdidastotales} = 800,1[W]$$

Ahora, si las pérdidas del hierro corresponden al 40% de las pérdidas totales, se tiene:

$$Pérdidas\ del\ hierro = 3 \cdot \frac{V_{ff}^2}{r_0}$$

$$0,4 \cdot Pérdidas\ totales = 3 \cdot \frac{380^2}{r_0}$$

$$\Rightarrow r_0 = 1354[\Omega]$$

Conociendo  $r_0$  se asume que  $X_0$  es un orden de magnitud menor, por lo tanto se considerará aproximadamente  $X_0 = 135[\Omega]$ .

OBS.: notar que estos parámetros son “por enrollado”; por ello se usa  $V_{ff}$ , ya que el motor está en  $\Delta$ .

Con los datos de los elementos de la rama paralela del circuito equivalente,  $r_0$  y  $X_0$ , se puede encontrar la corriente que circula por aquella rama, la cual es:

$$\dot{I}_0 = \frac{V_{ff}}{r_0 // jX_0} = \frac{380 \angle 0^\circ}{\left( \frac{1}{1354} + \frac{1}{j135} \right)^{-1}} = 2,83 \angle -84,3^\circ$$

Por otra parte, conocemos también la corriente de línea, que corresponde a  $\sqrt{3}$  veces la corriente por enrollado del estator  $I_{1nom}$ ; por lo tanto, se puede encontrar la corriente de rotor, con la siguiente ecuación:

$$\dot{I}_{2nom} = \dot{I}_{1nom} - \dot{I}_0 = \frac{11,2}{\sqrt{3}} \angle -(\cos^{-1}(0,85)) - 2,83 \angle -84,3^\circ$$

$$\dot{I}_{2nom} = 5,25 \angle -6,5^\circ$$

Con la corriente obtenida, se puede encontrar  $r_2$ , a partir de la ecuación de potencia mecánica 3.24, la cual es:

$$P_{mec} = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot r_2 \cdot I_2^2 \quad (6.4)$$

El deslizamiento se encuentra también en base a los datos nominales en que la velocidad nominal es 1450 [rpm], por lo tanto

$$s = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,0333$$

Como la potencia mecánica se tiene por datos de placa y la corriente  $I_2$  se calculó recién, sólo se debe reemplazar en la Ecuación (6.4), para encontrar  $r_2$ . En esta ecuación corresponde usar el módulo de la corriente por el rotor.

$$r_2 = \frac{5500 \cdot 0,0333}{3 \cdot (1 - 0,0333) \cdot 5,25^2} = 2,29[\Omega]$$

Para obtener  $r_1$  se utiliza la ecuación de las pérdidas del cobre, que corresponden a un 60% de las pérdidas totales. Así se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas del cobre} &= 3 \cdot (r_1 + r_2) \cdot I_{2nom}^2 \\ 0,6 \cdot \text{Pérdidas totales} &= 3 \cdot (r_1 + 2,29) \cdot 5,25^2 \\ \Rightarrow r_1 &= 3,51[\Omega] \end{aligned}$$

Por último, para el cálculo de las reactancias de fuga de estator y rotor,  $X_1$  y  $X_2$ , se utiliza la fórmula 3.23, de la corriente del rotor,  $I_{2nom}$ .

$$I_{2nom} = \frac{V_{1ff}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

$$5,25 = \frac{380}{\sqrt{\left(3,51 + \frac{2,29}{0,0333}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

$$\Rightarrow (X_1 + X_2) = 3,84[\Omega]$$

Se asume que  $X_1 \approx X_2$ , por lo tanto

$$X_1 = 1,92[\Omega]$$

$$X_2 = 1,92[\Omega]$$

Con los datos encontrados, para cualquier deslizamiento se pueden calcular las corrientes, tanto la de rotor,  $I_{2teo}$ , como la de estator,  $I_{1teo}$ , y con ellas calcular la potencia mecánica,  $P_{mec}$ , y la potencia eléctrica trifásica,  $P_{3\phi teo}$ , respectivamente. Para esto se utilizan las fórmulas (3.23), (4.5), (4.6) y (4.7). Para calcular la potencia eléctrica teórica, falta tener el factor de potencia teórico, sin embargo este se obtiene del cálculo de la corriente de estator calculada como fasor.

Hay que tener en cuenta que las corrientes que se calculan son por enrollado, debido a que la máquina está conectada en  $\Delta$ . Por lo tanto,  $I_{1teo}$  no debe superar los 6,5 [A], que corresponden a la corriente nominal, 11,2 [A] dividido en  $\sqrt{3}$ .

De esta forma, se obtiene la tabla de datos que se presenta a continuación.

Deslizamiento	$I_{2teo}$ [A]	$P_{mec}$ [W]	$I_{1teo}$ [A]	Ángulo [°]	$P_{generada}$ [W]
-0,003	0,500	-574,5	2,83	-94	-225,0
-0,008	1,344	-1563,3	3,03	-110	-1181,4
-0,013	2,201	-2592,2	3,45	-123	-2142,1
-0,017	2,895	-3445,0	3,9	-132	-2975,0
-0,022	3,775	-4548,7	4,58	-139	-3940,5
-0,03	5,211	-6404,6	5,81	-147	-5554,9
-0,034	5,941	-7375,2	6,48	-150	-6397,5

Tabla 6.3: Variables de máquina de inducción escogida, obtenidas teóricamente.

En la tabla 6.3 se muestran datos hasta el deslizamiento -3,4%, dado que a éste la corriente de estator está muy cerca de la nominal por enrollado, la cual es 6,5 [A]. A continuación se muestra el gráfico con los datos de la tabla.

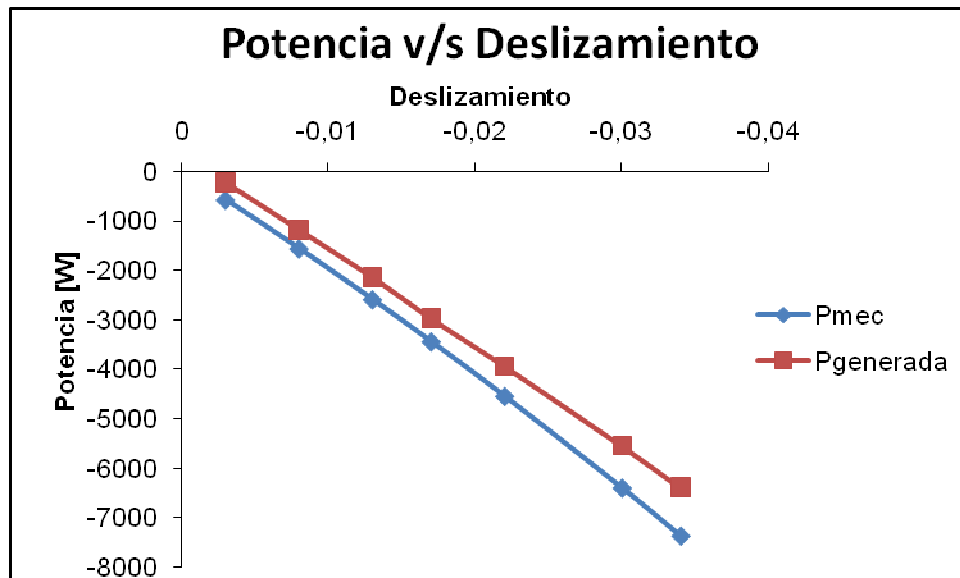


Figura 6.2: Potencia v/s Deslizamiento de la máquina escogida.

Se puede observar que la curva de potencia generada, se ubica sobre la curva de potencia mecánica, donde el trecho entre ambas corresponde a las pérdidas, las cuales están entre 350 y 980 [W]. Rango al cual pertenecen las pérdidas totales encontradas, iguales a 800,1 [W].

Ahora se relaciona lo encontrado con la velocidad del viento, para poder analizar el aporte que representa a la industria la máquina propuesta.

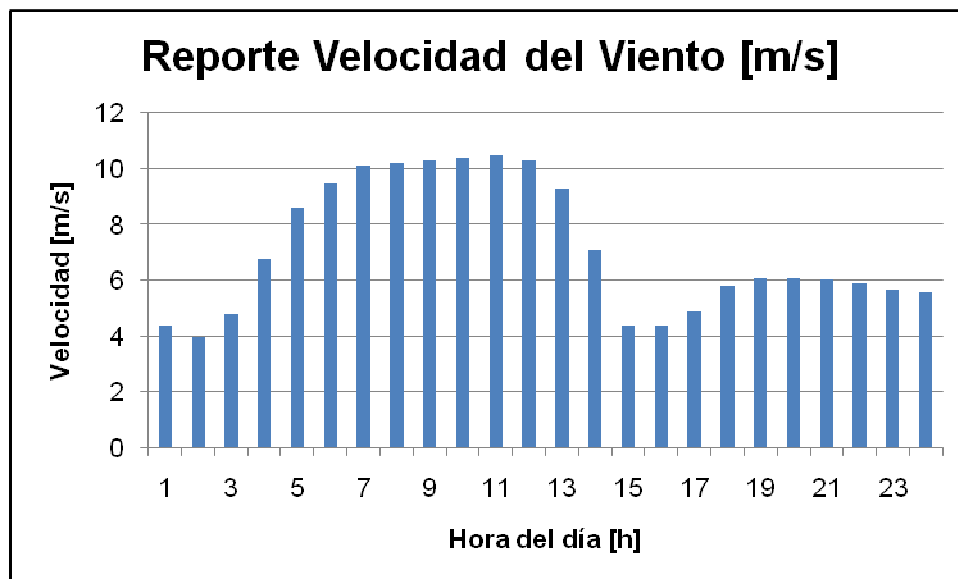
Al relacionar la velocidad del viento con la velocidad de rotación de la hélice y por consiguiente del generador, se encuentra el deslizamiento de la máquina. Por lo tanto, se utiliza nuevamente la Ecuación (2.3) para encontrar la velocidad en revoluciones por minuto, luego se multiplica por 15, debido a la caja de engranajes y por último, se aplica la fórmula para encontrar el deslizamiento, Ecuación (3.15), recordando que la velocidad síncrona es 1500 [rpm].

Velocidad del viento [m/s]	Velocidad de la hélice [rpm]	Velocidad del eje [rpm]	Deslizamiento
10,1	100,9	1513,5	-0,009
10,15	101,4	1521,0	-0,014
10,2	101,9	1528,5	-0,019
10,25	102,4	1536,0	-0,024
10,3	102,9	1543,5	-0,029
10,35	103,4	1551,0	-0,034

**Tabla 6.4: Datos teóricos de velocidades y deslizamiento.**

Como se determina que el deslizamiento máximo es -0,034, la velocidad del viento máxima para la cual va a generar la máquina es 10,35 [m/s], es decir, el rango de velocidad de viento al cual la máquina genera, es entre 10,1 y 10,35 [m/s].

De acuerdo a los datos del reporte de viento, en la zona que se examina, se pueden encontrar las horas en las cuales el aerogenerador produce electricidad. Esto se observa en la Figura 6.1, pero dado que ésta presenta más información de la necesaria, se exhibe a continuación un gráfico de barras más simple.



**Figura 6.3: Datos de hora y velocidad del viento.**

Se puede notar, de acuerdo a lo mostrado en las tablas 6.1 y 6.4, que hay 4 horas al día en las que el aerogenerador aporta a la instalación, las cuales son: 7, 8, 9 y 12 horas.

OBS.: para simplificar este análisis, se asume que la velocidad del viento es aproximadamente constante en cada intervalo de 1 hora.

Para determinar el aporte de potencia en cada hora, se utilizan las mismas fórmulas usadas para calcular los datos de la Tabla 6.3, buscando las potencias para los deslizamientos de la Tabla 6.4, debido a que esos deslizamientos, son los que están relacionados a velocidades del viento.

Velocidad del viento [m/s]	Deslizamiento	$I_{2teo}$ [A]	$I_{1teo}$ [A]	Ángulo [°]	$P_{mec}$ [W]	$P_{generada}$ [W]
10,1	-0,009	1,513	3,09	-113	-1764,5	-1376,4
10,15	-0,014	2,371	3,55	-126	-2800,5	-2378,8
10,2	-0,019	3,243	4,16	-135	-3877,7	-3353,4
10,25	-0,024	4,127	4,86	-142	-4997,3	-4365,9
10,3	-0,029	5,025	5,65	-147	-6160,2	-5401,9
10,35	-0,034	5,936	6,48	-150	-7367,4	-6397,5

**Tabla 6.5: Datos de generación relacionados a velocidad del viento para máquina escogida.**

Con la Tabla 6.5 se encuentra la potencia trifásica teórica generada para velocidades específicas, entre las cuales están las que se producen en el lugar escogido. Por lo tanto, la energía que se genera en las 4 horas mencionadas es 15533,5 [Wh]; es decir, pueden generarse 15,5 [kWh] al día.

Si se considera una industria con la siguiente demanda.



Hora [h]	Potencia [kW]
1	90
2	90
3	90
4	90
5	90
6	90
7	90
8	190
9	190
10	190
11	190
12	190
13	190
14	170
15	170
16	210
17	210
18	210
19	210
20	210
21	210
22	190
23	190
24	190

**Tabla 6.6: Datos de Curva de Demanda.**

Se obtiene la siguiente Curva de Demanda:

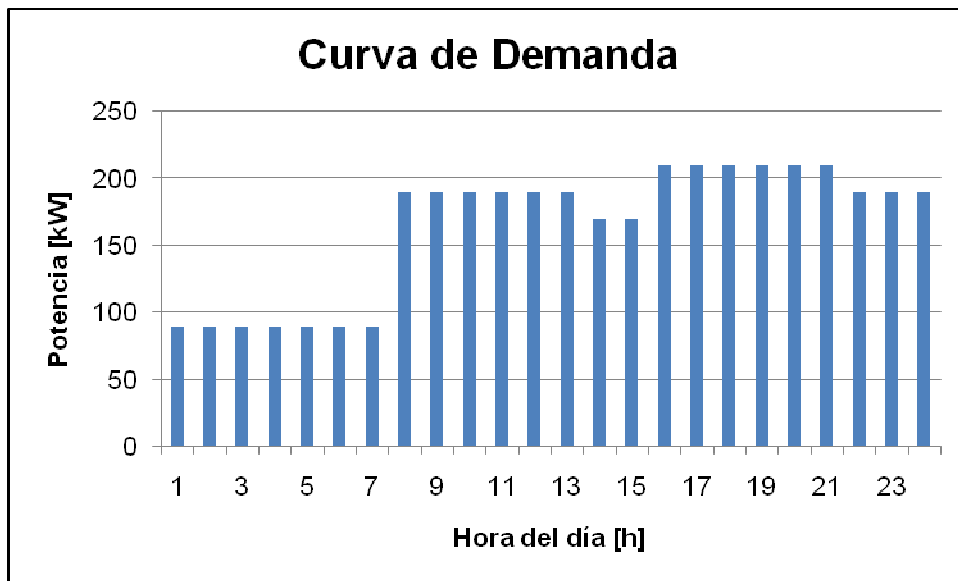


Figura 6.4: Curva de demanda de industria escogida.

La demanda total de la empresa es 3940 [kWh] al día. Por lo tanto el aporte que produce el aerogenerador, corresponde a un 0,39%.

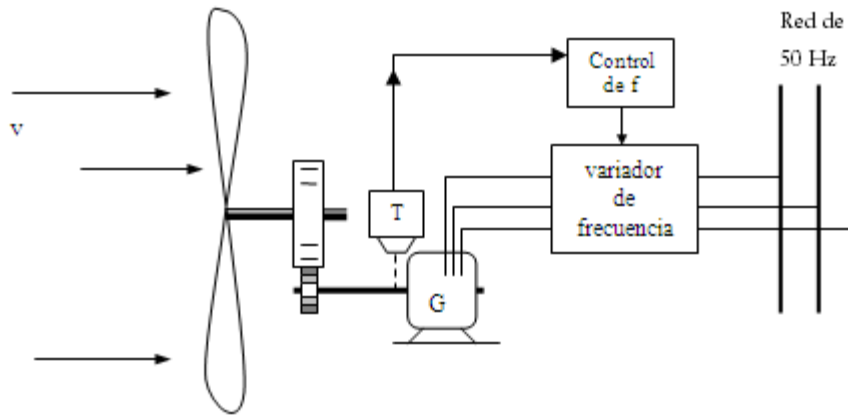
Con un parque de 10 aerogeneradores idénticos, el aporte sería un 3,9%.

## 6.5.2 Generación con variador de frecuencia

### 6.5.2.1 Control automático de la operación

Como se indicó en los primeros capítulos, es posible emplear un variador de frecuencia para ampliar el rango de velocidades de viento en que es posible generar.

Para ello, se propone emplear un variador de frecuencia conectado a la red trifásica ( $380 V_{ff}$ , 50 [Hz]) y el generador de inducción se conecta a la salida del variador, donde el voltaje trifásico tiene frecuencia controlable y voltaje  $V_{ff} \approx 380 \cdot f/50$ , como ilustra la Figura 6.5.



**Figura 6.5: Control del Generador con Variador de Frecuencia.**

La operación, controlada automáticamente, debiera ser la siguiente:

- i) incide un viento de velocidad  $v$  [m/s]
- ii) la hélice gira a velocidad  $\omega_{hélice} = (\lambda \cdot 60 / \pi \cdot d) \cdot v = (3,4 \cdot 60 / 6,5 \pi) \cdot v = 10 \cdot v$  [rpm]
- iii) el eje del motor, debido a la caja multiplicadora de velocidad, gira a  $\omega_{motor} = 15 \cdot \omega_{hélice}$  [rpm]
- iv) el tacómetro T sensa esta velocidad y envía una señal que ordena ajustar la frecuencia del variador a un valor  $f$  tal que la nueva velocidad síncrona  $\omega_s = 120 \cdot f / p$  sea levemente menor a  $\omega_{motor}$ , por ejemplo un 4% menor (valor que puede seleccionarse según la potencia que se desee generar); en estas condiciones, como el deslizamiento impuesto es en este ejemplo  $s = -0,04$ , significa que la velocidad síncrona debe ser  $\omega_s = 120 \cdot f / p = \omega_{motor} / 1,04$ . Y considerando que  $p = 4$  polos, de la relación anterior la frecuencia necesaria es  $f = \omega_{motor} / 31,2 = 15 \cdot \omega_{hélice} / 31,2 = 15 \cdot 10 \cdot v / 31,2$

$$\Rightarrow f = 4,808 \cdot v$$

Entonces, para cualquier velocidad de viento, el variador podrá ajustar la frecuencia  $f$  a un valor adecuado para que el deslizamiento sea  $s = -0,04$ . En efecto, de la relación anterior, para las velocidades de viento que se dan en un día típico, en la aplicación considerada, las frecuencias a las que se ajustaría el variador serían las siguientes:

Hora del día [h]	V <sub>viento</sub> [m/s]	f [Hz]
1	4,4	21,16
2	4	19,23
3	4,8	23,08
4	6,8	32,69
5	8,6	41,35
6	9,5	45,68
7	10,1	48,56
8	10,2	49,04
9	10,3	49,52
10	10,4	50,00
11	10,5	50,48
12	10,3	49,52
13	9,3	44,71
14	7,1	34,14
15	4,4	21,16
16	4,4	21,16
17	4,9	23,56
18	5,8	27,89
19	6,1	29,33
20	6,1	29,33
21	6,05	29,09
22	5,9	28,37
23	5,7	27,41
24	5,6	26,92

**Tabla 6.7: Frecuencia de salida del variador según velocidad del viento.**

### **6.5.2.2 Potencia generada a cada frecuencia**

En general, para un generador de inducción operando a una frecuencia dada, si se desea calcular la potencia generada en función de la velocidad del eje (o sea en función del deslizamiento), debe resolverse el circuito equivalente, al cual es necesario calcularle sus parámetros ( $r$ ,  $X$ ) a dicha frecuencia. Usualmente los datos conocidos del circuito serán los

parámetros a frecuencia nominal (50 [Hz]); pero en forma relativamente simple se pueden evaluar estos parámetros a cualquier frecuencia:

- Resistencias de los enrollados: si se desprecia el efecto pelicular o skin, las resistencias  $r_1$  y  $r_2$  no cambian con respecto a los valores a 50 Hz :

$$r_1 = r_{1original}$$

$$r_2 = r_{2original}$$

- Reactancias de fuga de los enrollados: como  $x = 2\pi f \cdot L$ , estas reactancias cambian en forma proporcional a la frecuencia:

$$X_1 = (f / 50) \cdot X_{1original}$$

$$X_2 = (f / 50) \cdot X_{2original}$$

- Reactancia de magnetización: como no se produce saturación a ninguna frecuencia (pues se asume que el variador, además de la frecuencia cambia proporcionalmente la magnitud del voltaje), la reactancia de magnetización sólo se modifica con la frecuencia:

$$X_0 = (f / 50) \cdot X_{0original}$$

- Resistencia de pérdidas en el hierro: representa las pérdidas de Histéresis y las pérdidas por corrientes de Foucault, ambas dependientes de la frecuencia y de la densidad de flujo máxima en el núcleo:

$$r_0 = V_1^2 / (P_{Histéresis} + P_{Foucault})$$

$$P_{Histéresis} = K' \cdot f \cdot B_{máx}^2$$

$$P_{Foucault} = K'' \cdot f^2 \cdot B_{máx}^2$$

Y como  $B_{m\acute{a}x}$  es proporcional a la raz3n  $(V_1 / f)$ , se tiene:

$$P_{Hist\acute{e}resis} = K_H \cdot V_1^2 / f$$

$$P_{Foucault} = K_F \cdot V_1^2$$

Es decir,

$$r_0 = V_1^2 / (P_{Hist\acute{e}resis} + P_{Foucault}) = 1 / [(K_H / f) + K_F]$$

As3,  $r_0$  a una frecuencia  $f$  en funci3n de su valor original  $r_{0original}$  a 50 [Hz], es:

$$r_0 = \left( \frac{[(K_H / 50) + K_F]}{[(K_H / f) + K_F]} \right) \cdot r_{0original}$$

Y si se tiene en cuenta que usualmente las p\acute{e}rdidas de Hist\acute{e}resis son alrededor del 70% de las p\acute{e}rdidas totales en el n\acute{u}cleo, es decir:  $(K_H / f) / K_F \approx 7/3$ , de la expresi3n anterior se concluye que:

$$r_0 \approx (3,4 / [(120 / f) + 1]) \cdot r_{0original}$$

- Otras condiciones que cambian con la frecuencia: aparte de los par\acute{a}metros circuitales, hay que considerar que al cambiar la frecuencia tambi\acute{e}n se modifican, con respecto a 50 [Hz]:

- La velocidad s3ncrona, pues  $\omega_s = 120 \cdot f / p [rpm]$ . Es decir:

$$\omega_s = (f / 50) \cdot \omega_{spara\ 50[Hz]}$$

- El voltaje por enrollado de estator, pues se asumir\acute{a} que el variador de frecuencia al modificar la frecuencia tambi\acute{e}n modifica la magnitud del voltaje para que  $V / f$  se mantenga constante. As3, si para 50 [Hz] se aplican 380 [V] entre fases,

$$V_{1ff} = (380/50) \cdot f$$

Habiendo evaluado con las ecuaciones anteriores los parámetros circuitales, la velocidad síncrona y el voltaje aplicado, a la frecuencia deseada se puede calcular la potencia generada como sigue:

$$P_{generada} = 3 \cdot V_{1ff} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

Donde  $I_1$  es la corriente por enrollado de estator (por la delta en este caso), la que se calcula como:

$$I_1 = I_1 \angle -\varphi = I_2 + I_0$$

Siendo:

$$I_2 = V_{1ff} \angle 0 / [(r_1 + r_2/s) + j(X_1 + X_2)]$$

$$I_0 = V_{1ff} \angle 0 / [r_0 // jX_0]$$

Con estas ecuaciones se puede elaborar la siguiente Tabla de potencias generadas por el aerogenerador para un día típico, donde las velocidades de viento en cada hora son las que se indicaron en la Tabla 6.1 y las frecuencias necesarias en cada hora para tener deslizamiento  $-0,04$  son las de la Tabla 6.7:

Hora del día	V <sub>viento</sub> [m/s]	f [Hz]	I <sub>1teo</sub> [A]	I <sub>línea</sub> [A]	P <sub>generada</sub> [W]
1	4,4	21,16	4,06	7,0	-3097,0
2	4	19,23	3,87	6,7	-2776,4
3	4,8	23,08	4,27	7,4	-3381,5
4	6,8	32,69	5,41	9,4	-4925,5
5	8,6	41,35	6,52	11,3	-6233,7
6	9,5	45,68	7,08	12,3	-6918,4
7	10,1	48,56	7,47	12,9	-7299,5
8	10,2	49,04	7,53	13,0	-7358,1
9	10,3	49,52	7,6	13,2	-7503,2
10	10,4	50,00	7,66	13,3	-7562,5
11	10,5	50,48	7,72	13,4	-7621,7
12	10,3	49,52	7,6	13,2	-7503,2
13	9,3	44,71	6,96	12,1	-6728,8
14	7,1	34,14	5,59	9,7	-5155,5
15	4,4	21,16	4,07	7,0	-3104,6
16	4,4	21,16	4,07	7,0	-3104,6
17	4,9	23,56	4,33	7,5	-3490,4
18	5,8	27,89	4,83	8,4	-4155,6
19	6,1	29,33	4,99	8,6	-4357,7
20	6,1	29,33	4,99	8,6	-4357,7
21	6,05	29,09	4,97	8,6	-4340,3
22	5,9	28,37	4,88	8,5	-4261,7
23	5,7	27,41	4,77	8,3	-4104,0
24	5,6	26,92	4,71	8,2	-3990,2

Tabla 6.8: Potencia generada en cada hora del día típico, con s=-0,04.

En estos cálculos debe ponerse atención que  $I_{línea} = \sqrt{3} \cdot I_{est} \leq 11,2[A]$  (valor nominal), para evitar problemas de temperatura elevada en los enrollados. Lamentablemente, en este caso se puede observar que entre la hora 5 y la hora 13, las corrientes superan la nominal, por lo tanto no sería conveniente tener un deslizamiento igual a -0,04.

Por esta razón se evaluará la potencia generada considerando que el deslizamiento sea -0,03.



Hora del día	V <sub>viento</sub> [m/s]	f [Hz]	I <sub>1teo</sub> [A]	I <sub>línea</sub> [A]	P <sub>generada</sub> [W]
1	4,4	21,36	3,49	6,04	-2282,0
2	4	19,42	3,38	5,85	-2041,9
3	4,8	23,30	3,62	6,27	-2483,6
4	6,8	33,01	4,33	7,50	-3610,1
5	8,6	41,74	5,07	8,78	-4676,0
6	9,5	46,11	5,46	9,46	-5160,3
7	10,1	49,03	5,72	9,91	-5468,8
8	10,2	49,51	5,77	9,99	-5578,3
9	10,3	50,00	5,81	10,06	-5617,0
10	10,4	50,48	5,86	10,15	-5665,3
11	10,5	50,97	5,9	10,22	-5704,0
12	10,3	50,00	5,81	10,06	-5617,0
13	9,3	45,14	5,37	9,30	-5075,2
14	7,1	34,46	4,45	7,71	-3828,6
15	4,4	21,36	3,49	6,04	-2282,0
16	4,4	21,36	3,49	6,04	-2282,0
17	4,9	23,78	3,65	6,32	-2561,8
18	5,8	28,15	3,96	6,86	-3078,8
19	6,1	29,61	4,07	7,05	-3223,1
20	6,1	29,61	4,07	7,05	-3223,1
21	6,05	29,37	4,05	7,01	-3207,2
22	5,9	28,64	3,99	6,91	-3102,1
23	5,7	27,67	3,92	6,79	-2990,2
24	5,6	27,18	3,89	6,74	-2967,3

**Tabla 6.9: Potencia generada en cada hora del día típico, con  $s=-0,03$ .**

En la tabla 6.9 se observa que la corriente de línea es menor que la corriente nominal, por lo tanto para el deslizamiento de  $-0,03$  la operación de la máquina está dentro de los parámetros de la misma.

### 6.5.2.3 Ahorros que se producen generando con variador de frecuencia

A partir de la tabla 6.9 se puede encontrar la energía posible de generar en estas condiciones durante un día típico. El cálculo indica  $E = 91$  [kWh] al día, que equivale a 2,3% del total de energía demandada al día.

Así, en 1 mes se generarían 2730 [kWh], lo que se traduciría en un ahorro mensual de \$327.600 (considerando \$120/KWh), o bien un ahorro anual de \$3.931.200.

Si se aumenta la cantidad de aerogeneradores, crece proporcionalmente este ahorro; por ejemplo con 10 aerogeneradores idénticos se ahorran 910 [kWh] / día = 23% de la energía demandada, con un ahorro mensual de \$3.276.000 y un ahorro anual de \$39.312.000.

### 6.5.3 Generación con máquina de rotor bobinado

En este caso se considera una máquina de inducción de rotor bobinado, con los mismos datos de placa de la máquina de inducción rotor jaula de ardilla, para que sea más fácil la comparación.

Se considerará al igual que en el Capítulo 5, sección 5.2, una resistencia adicional en el rotor, por fase. Este valor se calculará como la resistencia que produce torque máximo a la partida, es decir:

$$S_{T_{\max}} = 1 = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$
$$\Rightarrow r_2 = \sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2)^2} = \sqrt{3,51^2 + 3,84^2}$$
$$\Rightarrow r_2 = 5,2[\Omega]$$

A continuación se muestran los parámetros que se utilizan, los cuales corresponden a los mismos de la sección 6.5.1, sólo que en este caso la resistencia de rotor, referida al estator, en lugar de 2,29 [ $\Omega$ ] se considerará de 5,2 [ $\Omega$ ]. Así:

$$r_1 = 3,51[\Omega]$$

$$r_2 = 5,2[\Omega]$$

$$X_1 = 1,92[\Omega]$$

$$X_2 = 1,92\Omega$$

$$r_0 = 1354[\Omega]$$

$$X_0 = 135[\Omega]$$

Con estos valores, a continuación se relaciona la velocidad del viento con el deslizamiento de la máquina, y a la vez, para esos datos de deslizamiento se calculan las corrientes y potencias. En la siguiente tabla se muestran las variables calculadas.

Velocidad del viento [m/s]	Deslizamiento	$I_{2teo}$ [A]	$I_{1teo}$ [A]	Ángulo [°]	$P_{mec}$ [W]	$P_{generada}$ [W]
10,1	-0,009	0,661	2,84	-98	-765,2	-450,6
10,2	-0,019	1,405	3,05	-112	-1653,3	-1302,5
10,3	-0,029	2,159	3,42	-123	-2582,5	-2123,4
10,4	-0,039	2,923	3,93	-132	-3554,0	-2997,8
10,5	-0,049	3,697	4,52	-139	-4568,8	-3888,9
10,6	-0,059	4,48	5,17	-144	-5628,2	-4768,2
10,7	-0,069	5,28	5,88	-148	-6733,1	-5684,6
10,8	-0,079	6,08	6,61	-151	-7884,8	-6590,6
10,9	-0,089	6,90	7,38	-153	-9084,3	-7496,2
11	-0,099	7,72	8,17	-155	-10332,8	-8441,2
11,1	-0,109	8,56	8,99	-157	-11631,4	-9433,9
11,2	-0,119	9,40	9,81	-158	-12981,1	-10369,1
11,3	-0,129	10,26	10,67	-159	-14383,0	-11355,9

**Tabla 6.10: Datos de generación relacionados a velocidad del viento, con máquina de rotor bobinado.**

En la tabla 6.9 se puede notar que la corriente de estator aumenta a medida que la velocidad del viento aumenta. Se puede notar además que la máquina genera potencia en todo el rango de velocidades mostrado, es decir, entre 10,1 [m/s] y 11,3 [m/s], el cual es mayor al que presenta la máquina sola, mostrado en la Tabla 6.5; lo que implica que en este caso el rango de deslizamiento es mayor. El deslizamiento máximo que se puede tener es de -0,13%.

### 6.5.3.1 Ahorros que se producen generando con máquina de rotor bobinado

A partir de la Tabla 6.10 se puede encontrar la energía posible de generar en estas condiciones durante un día típico. El cálculo indica que  $E = 13$  [kWh] al día, que equivale a 0,32% del total de energía demandada al día.

Así, en 1 mes se generarían 390 [kWh], lo que se traduciría en un ahorro mensual de \$46.800 (considerando \$120/KWh), o bien un ahorro anual de \$561.600.

Si se aumenta la cantidad de aerogeneradores, crece proporcionalmente este ahorro; por ejemplo con 10 aerogeneradores idénticos se ahorran 130 [kWh] / día = 3,2% de la energía demandada, con un ahorro mensual de \$468.000 y un ahorro anual de \$5.616.000.

## 6.6 Comparación de métodos

A continuación se presenta una tabla, donde se compara la máquina de inducción de jaula de ardilla conectada a la red de 50 [Hz], la misma máquina generando mediante variador de frecuencia, y la máquina de rotor bobinado conectada a la red de 50 [Hz] con  $r_2$  aumentada a 5,2 [ $\Omega$ ].

	Máquina de inducción de jaula de ardilla conectada a 50 [Hz]	Máquina de inducción con variador de frecuencia	Máquina de inducción de rotor bobinado con $r_2 = 5,2$ [ $\Omega$ ]
Deslizamiento máx.	-0,034	-0,03	-0,129
Rango de velocidad del viento [m/s]	10,1 a 10,35	4 a 10,5	10,1 a 11,3
Potencia generada máx. [W]	-6397,5	-5704,0	-11355,9
Energía total generada [Wh/día]	15533,5	91000	13000
Ahorro de energía de la red [%]	0,39	2,3	0,32
Horas de generación diarias [h]	4	24	6

Tabla 6.11: Comparación máquina de inducción sin variador y con variador.

En la tabla mostrada, se puede observar que la máquina de inducción con variador de frecuencia puede generar las 24 horas del día, permitiendo mucho mayor ahorro que con la máquina conectada directamente a la red de 50 [Hz] o con la máquina de inducción de rotor bobinado.

Por otra parte, para la máquina con rotor bobinado, aumentando  $r_2$  a 5,2 [ $\Omega$ ] mediante resistencias externas, se logra generar en un mayor rango de velocidades que con la máquina de jaula de ardilla, lamentablemente en este caso, el ahorro es menor que cuando la máquina está sola. Esto se debe a que para este caso particular la velocidad del viento no es mayor que 10,6 [m/s], por lo tanto pese a aumentar el rango de velocidades de viento o de deslizamiento, esto no se ve reflejado y no se obtiene mayor generación de potencia ni mayor ahorro de energía.

De todas formas, la mejor opción es el empleo de variador de frecuencia, debido a que puede generar a todas las horas del día, ajustando la frecuencia. No obstante, un análisis de costos de inversión es necesario para decidir la mejor opción técnica y económica.

## 7 Conclusión y Trabajo Futuro

En la actualidad, la energía eólica tiene una gran importancia, tanto en el país, como en el mundo. Destacan entre sus características: ser una energía renovable, ya que se regenera por medios naturales; presentar un bajo impacto ambiental, debido a que es una energía limpia que no produce emisiones atmosféricas ni residuos tóxicos; poder instalarse en suelos no aptos para otros fines, tales como desiertos o laderas muy empinadas; y por último, ser una fuente económica de energía.

Todas las características mencionadas, son puntos a favor de la generación eoloeléctrica y por consiguiente, del estudio de la presente memoria. La investigación y el análisis de la determinación de los rangos de operación de un generador de inducción de rotor jaula de ardilla, son asuntos interesantes de ser abordados para el desarrollo de la energía eólica.

Con las experiencias de laboratorio realizadas se encuentran los rangos de generación para la máquina utilizada. Estos intervalos exhiben limitaciones, las cuales se explican por las restricciones con las que se cuenta para realizar el desarrollo de las pruebas experimentales. Una máquina de corriente continua, es la que representa a la turbina eólica y a la caja multiplicadora de velocidad, por lo tanto, debido a la potencia de la máquina, la cual es cercana a la potencia de la máquina de inducción, no se logra generar más allá de cierto deslizamiento. Por otra parte, existe un límite de deslizamiento negativo, en el caso que se produzcan elevadas corrientes que dañen la máquina por temperatura (este límite no fue alcanzado de manera experimental, debido a la primera limitación indicada).

Al aplicar en las experiencias el variador de frecuencia, con el objetivo de ampliar el rango de generación de la máquina, se encontró que, efectivamente, éste se incrementa. Lamentablemente, los constantes cambios en el registro de las variables, resultan un rasgo negativo para este propósito, debido a que dificultan las conclusiones que se pueden extraer de la experiencia, así como las extrapolaciones que se podrían realizar.

En cuanto a la prueba con la máquina de inducción de rotor bobinado, también se encuentra una ampliación en el rango de generación, gracias a la adición de resistencias en los enrollados del rotor. En este caso, se aprecia que al mismo deslizamiento, en la prueba de generación sin elementos adicionales, se obtiene una potencia mucho mayor, que la que se obtiene con la incorporación de resistencias en el rotor. En este último, se obtiene una potencia grande cuando el deslizamiento logrado es el mayor que puede conseguirse, sin sobrepasar la corriente nominal de la máquina.

Por otra parte, debe destacarse que el propósito principal del trabajo de título es aplicar, a una máquina de inducción de jaula de ardilla convencional, un variador de frecuencia para ampliar el rango de generación. Al respecto es relevante especificar el variador adecuado, ya que éste debe contar con características particulares que le permitan trabajar satisfactoriamente en esta aplicación. Entre ellas, es importante que sea bidireccional; es decir, que junto con cambiar la frecuencia de la red, permita el flujo de potencia activa de la red hacia la máquina y de la máquina hacia la red (que es como se utiliza en este caso). También hay que asegurarse de que sea capaz de operar dentro de los rangos en los cuales se trabaja, en lo que se refiere a voltaje, potencia y frecuencia.

Si se cumplen las condiciones citadas, se puede concluir que el variador de frecuencia sí es una alternativa para la ampliación del rango de generación de la máquina de inducción. En efecto, como se mostró en esta memoria, podría generar para cualquier velocidad de viento dentro de rangos razonables, similar a otras opciones de generadores. Las ventajas que ofrece el uso de esta máquina y que incentivan su eventual empleo, son su bajo costo de operación y mantenimiento, su sencillez en la construcción y el no requerir una regulación fija de velocidad.

En el caso de la máquina de inducción con rotor bobinado, éste es mucho más complicado de fabricar y de mantener, pero permite su acceso desde el exterior, a través de anillos que cortocircuitan el bobinado; gracias a ellos es que se varía la resistencia del rotor y se puede ampliar el rango de velocidad con frecuencia fija.

Como trabajo futuro, se propone:

- i) Mejorar modelación y especificación de hélice y multiplicador de velocidad.
- ii) Mejorar el trabajo realizado en lo que se refiere al variador de frecuencia:
  - Usar una modelación más precisa del motor.
  - Efectuar ensayos de laboratorio con una máquina de inducción adecuada a las características de la máquina motriz (motor de CC). En lo posible usar una máquina de inducción comercial y no de tipo docente.
  - Emplear instrumentos apropiados.
  - Emplear variador de frecuencia bidireccional y de características adecuadas a las máquinas.
- iii) Especificar y cotizar variadores de frecuencia aptos para aplicación con generadores de inducción.
- iv) Modelar el comportamiento del motor con voltaje no-sinusoidal como el que entrega el variador.

- v) Analizar necesidad de incorporar condensadores para suministrar la energía reactiva que requiere el generador.
- vi) Diseñar, especificar e implementar el sistema de control automático de la operación del conjunto. Analizar factibilidad de operación en una aplicación real y limitaciones de su operación.
- vii) Debería agregarse una comparación con la opción de máquina de inducción doblemente alimentada. Podría ser una buena opción para los propósitos de un trabajo de título, ya que, pese a ser más costosa y complicada en términos mecánicos, en términos eléctricos, presenta mayores posibilidades de control (no obstante, esta opción no se incluyó en esta memoria).
- viii) Por último, elaborar una comparación teórico-experimental de las 4 opciones mencionadas:
  - Máquina de inducción convencional conectada directamente a la red de 50 [Hz].
  - Máquina de inducción convencional conectada por medio de variador de frecuencia.
  - Máquina de inducción de rotor bobinado con resistencias variables en el rotor.
  - Máquina de inducción doblemente alimentada.



## 8 Revisión Bibliográfica

- [1] Baillarie, Paul. 2007. *Diseño de aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural*. Memoria de Ingeniero Civil Electricista. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [2] Bastianon, R. A. 2008. *Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas*. Argentina.
- [3] Catálogo de máquinas trifásicas de 4 polos, marca Dutchi. <[http://www.servorecambios.com/motores/tecnica/dutchi\\_trifasicos\\_4polos.pdf](http://www.servorecambios.com/motores/tecnica/dutchi_trifasicos_4polos.pdf)> [Consulta: Julio 2010].
- [4] Chapman, Stephen J. 2000. *Máquinas eléctricas*. 3ª Edición. McGraw-Hill.
- [5] Danish Wind Industry Association. Energía eólica. <<http://guidedtour.windpower.org/es/tour/wres/index.htm>> [Consulta: Marzo, Abril 2010].
- [6] Explorador de Energía Eólica y Solar. <<http://condor.dgf.uchile.cl/EnergiaRenovable/Chile/>>
- [7] Fernández Díez, Pedro. Energía Eólica. <<http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=16>> [Consulta: Marzo, Abril 2010].
- [8] Fitzgerald A. E., Kingsley Charles Jr. y Umans Stephen D. 2004. *Máquinas Eléctricas*. 6ª Edición. McGraw-Hill.
- [9] Fraile Mora, Jesús. 2003. *Máquinas eléctricas*. 5ª Edición. España, McGraw-Hill.
- [10] García Mauricio, Rafael Alejo. Centrales eólicas. <<http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo4a.html>> [Consulta: Marzo 2010].
- [11] Ghita, C., Deaconu, D. I., Chirila, A. I., Navrapescu, V. y Ilinca, D. 2009. *Lab Model for a Low Power Wind Turbine System*. En: INTERNATIONAL CONFERENCE on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ '09): 15 al 17 de abril de 2009, Valencia, España.
- [12] Porre, Francisco. 2003. *Análisis del funcionamiento de aerogeneradores y su aplicación en Chile*. Memoria de Ingeniero Civil Electricista. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Escuela de Construcción Civil.
- [13] Profesor en Línea. Energía Eólica: orígenes y usos. <[http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Energia\\_EolicaUsos.htm](http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Energia_EolicaUsos.htm)> [Consulta: Marzo 2010].

- [14] Romo Jorge, Morales Nelson, Valdenegro Ariel, Palma Rodrigo. 1996. *Máquinas Eléctricas*. Chile. Publicación C/5. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile.
- [15] Romo Jorge y Vargas Luis. 2007. *Apuntes EL42C, Conversión Electromecánica de la Energía*. 2ª Edición. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile. <<http://146.83.6.25/lvargas/courses/el42c/apunteMaquinas.pdf>>
- [16] Salvatori Artezán, Marco. 2003. *Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación voltaje/frecuencia*. Tesis de Licenciado en Ingeniería en Electrónica y Computadoras. Cholula, Puebla, México. Universidad de las Américas Puebla.

