



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

MODELO ESCALABLE GENERADOR FRENO MOTOR DE ALTO PAR

Autor: Marcos Pérez Díaz
Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid
Mayo de 2014

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO (RESTRINGIDO) DE DOCUMENTACIÓN

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. MARCOS PÉREZ DÍAZ, como alumno de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra "PROYECTO FINAL DE CARRERA: MODELO ESCALABLE GENERADOR FRENO MOTOR DE ALTO PAR"¹, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita (con las limitaciones que más adelante se detallan)* por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así

¹ Especificar si es una tesis doctoral, proyecto fin de carrera, proyecto fin de Máster o cualquier otro trabajo que deba ser objeto de evaluación académica

como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

(b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.²

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.³

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

² En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

³ En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- a) Deberes del repositorio Institucional:
 - La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
 - La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
 - La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 30 de mayo de 2014

ACEPTA



Fdo. Marcos Pérez Díaz

Proyecto realizado por el alumno/a:

Pérez Díaz, Marcos

Fdo.: Fecha: 30 / 5 / 2014

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Talavera Martín, Juan Antonio

Fdo.: Fecha: 30 / 5 / 2014

V° B° del Coordinador de Proyectos

de Cuadra García, Fernando

Fdo.: Fecha: / /

RESUMEN

MODELO ESCALABLE GENERADOR FRENO MOTOR DE ALTO PAR.

Autor: Pérez Díaz, Marcos.

Director: Talavera Martín, Juan Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

El objeto del presente trabajo es la elaboración de un proyecto denominado “Modelo escalable generador freno motor de alto par” y se centra en el ensayo, análisis, cálculo analítico y optimización de diversos modelos de máquinas rotativas eléctricas.

El proyecto se enfoca desde el punto de vista del par máximo que pueden absorber estas máquinas debido a que en las turbinas eólicas actualmente se está tendiendo a eliminar la multiplicadora, elemento que da lugar a un gran número de indisponibilidades. Por tanto la velocidad nominal de rotación del aerogenerador es muy baja, en torno a 10 – 12 rpm, y por tanto el valor del par aumenta considerablemente.

Además los modelos a pequeña escala podrían tener aplicación en la tecnología actual de vehículos eléctricos, funcionando como motor en la aceleración del vehículo y como freno y generador en la frenada, aprovechando así la energía que mediante el método de frenado convencional se disipa en calor.

A partir de un generador empleado en la automoción, se pretende estudiar la generación de energía eléctrica de dos máquinas de flujo radial a pequeña escala, una con excitación eléctrica mediante bobinado y otra con excitación mediante imanes permanentes.

Por último, se calcula de forma analítica el valor del par del modelo de imanes permanentes y se optimiza el modelo construido y un diseño existente de generador eólico.

Metodología

El proyecto combina aspectos prácticos, como el ensayo de los modelos y la modificación del rotor para incorporar imanes permanentes, con aspectos teóricos de diseño de generadores.

En primer lugar se ha realizado el ensayo de vacío y de cortocircuito de un generador empleado típicamente en la automoción que cuenta con un sistema de excitación en el rotor mediante energía eléctrica. En dichos ensayos se obtuvo la tensión de vacío y la intensidad de cortocircuito en función de la intensidad de excitación aplicada al rotor.

Posteriormente se ha modificado el modelo anterior para sustituir el sistema de excitación que incorpora de fábrica por una excitación mediante imanes permanentes de neodimio (aleación Nd-Fe-B) montados en la superficie del rotor. Las características de los imanes instalados se encuentran en la Tabla 1.

Medidas	33x8x7 mm
Peso	14 g
Magnetización	Axial
Calidad	N35
Fuerza de sujeción	6,2 Kg
Temperatura máxima	80°C

Tabla 1: características de los imanes de neodimio instalados

Una vez realizada la modificación, ha sido ensayado el nuevo modelo de manera análoga al original. En este caso no era posible obtener los resultados en función de la intensidad de excitación por lo que se han tomado en función de las revoluciones.

La frecuencia de generación en ambos ensayos realizados es de 30 Hz, por ser la frecuencia de generación del aerogenerador estudiado en el capítulo de optimización, con la finalidad de poder asemejar el modelo a gran escala con los modelos pequeños ensayados.

Con ambos modelos ensayados, se ha procedido a su comparación en cuanto al par resistente ofrecido y al rendimiento de cada uno de ellos.

De forma analítica se ha estudiado el funcionamiento del generador de imanes permanentes resolviendo el circuito magnético producido en la máquina, calculando la tensión de vacío generada, el par resistente y el rendimiento.

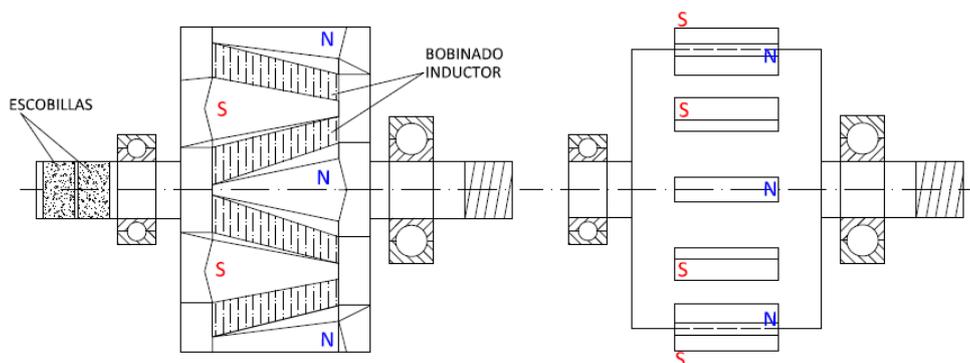


Figura 1: rotor original y modificado

Para completar el trabajo, se ha realizado el proceso de optimización para la obtención de un mayor par en el modelo construido de imanes permanentes y en un diseño a gran escala de un aerogenerador de unos 5 MW. En este proceso de optimización se ha estudiado el circuito magnético producido en la máquina, que permite obtener la tensión de vacío generada y a partir de este dato, se calcula la potencia de generación, el par y el rendimiento.

Resultados

Siguiendo la metodología expuesta, se han obtenido valores experimentales de potencia y par pico de frenado de ambos modelos ensayados, que a su vez han sido comparados con los respectivos valores obtenidos analíticamente.

En el apartado de optimización del par del modelo a pequeña escala se ha aumentado la anchura de los imanes hasta un 70 % del paso polar y se ha obtenido un aumento de par de 3,66 veces.

En cuanto a la optimización del diseño precedente del aerogenerador, se ha querido incrementar la potencia de generación en un 5 %, y para ello se ha optado por emplear imanes de mayor calidad, con un campo remanente de 1,2 T.

En la Tabla 2 se adjuntan los datos de partida y los valores finales consecuencia de la optimización.

	Prototipo	Prototipo optim.	Aerogenerador.	Aerogen. Optim.
bm (% de tp)	8 mm (33 %)	17,8 mm (70 %)	42,8 mm (70 %)	42,8 mm (70 %)
Br (remanencia)	1,185	1,185	1,1	1,2
Potencia	49,2 W	180,2 W	5,22 MW	5,49 MW
Par	1,57 Nm	5,74 Nm	4,98 MNm	5,24 MNm

Tabla 2: valores obtenidos en el proceso de optimización

En cuanto al presupuesto, se ha realizado un estudio de los costes asociados a la fabricación del prototipo de imanes permanentes realizado, del diseño optimizado a pequeña escala, del diseño de aerogenerador precedente y del diseño optimizado del aerogenerador. En la Tabla 3 se desglosan los costes involucrados en cada uno de los cuatro generadores.

	Presupuesto general (€)			
	Prototipo	Prototipo optim.	Aerogenerador	Aerogenerador optim.
Total coste comp. activos	25	43	218.111	269.056
Total costes directos	55	73	473.567	524.512
Costes indirectos	20	20	170.000	170.000
Gastos generales	15	15	135.000	135.000
Coste total	89	108	778.567	829.512

Tabla 3: presupuesto general

Conclusiones

Este proyecto recoge el ensayo de dos modelos de generador eléctrico, así como la comparación entre ambos. Se observa cómo el modelo original, que genera la excitación mediante bobinado, es capaz de ofrecer un par resistente mayor que el modelo de imanes permanentes, aunque su rendimiento se ve afectado por el consumo de potencia necesaria para generar el campo de excitación.

La principal causa del menor valor de par resistente obtenido en el modelo de imanes permanentes, es el hecho de no haber podido construir un modelo optimizado por la limitada disponibilidad de recursos para su ejecución.

Cabe destacar que el cálculo analítico realizado sobre el modelo de imanes permanentes se ajusta de manera razonablemente exacta a los valores obtenidos experimentalmente, a pesar de existir importantes incertidumbres en algunos aspectos por el hecho de emplear recursos sencillos, baratos y fácilmente disponibles.

En el capítulo de optimización se observa cómo variando únicamente algún parámetro de la máquina que no provoque un excesivo aumento del coste del generador, se puede llegar a obtener un aumento significativo de las prestaciones, lo que abre un gran abanico de posibilidades en el aspecto del aumento del par resistente de estos generadores, aprovechando al máximo los componentes utilizados.

HIGH TORQUE GENERATOR-BRAKE-MOTOR ESCALABLE MODEL.

Author: Pérez Díaz, Marcos.

Director: Talavera Martín, Juan Antonio.

Collaborating Organization: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

Introduction

The purpose of this work is the development of a project called “high torque generator-brake-motor scalable model” and focuses on the testing, analysis, analytical calculation and optimization of various models of electric rotating machines.

This project is focused on the standpoint of the maximum torque that can be absorbed by these kind of machines due to the currently tendency to eliminate the gearbox, which element gives rise to a large number of unavailability. Therefore, the turbine rotation nominal speed is very low, around 10 to 12 rpm and for this reason, the torque value increases considerably.

In addition to, small-scale models could be applicable to the current electric vehicle technology, running as an engine during vehicle acceleration and acting as a brake and generator under braking, taking advantage of the energy dissipated into heat in the conventional braking method.

From a generator used in the automotive industry, this job tries to study the generation of electrical energy in two small scale radial flux machines: one excited by an electrical winding and the other one excited by permanent magnets.

Finally, the permanent magnet model torque value is analytically calculated and the constructed model and an already existing wind turbine design are optimized.

Methodology

The project combines practical aspects such as testing of models and the due rotor modifications to incorporate permanent magnets to the rotor as well as theoretical aspects related to generator design.

On a first stage, a no-load test and a full-load test were conducted on a generator typically used in automotive which rotor is equipped with an electric power excitation system. In these tests, no-load voltage and full-load current values were obtained according to the excitation current applied to the rotor.

Subsequently, the previous model has been modified to replace the factory-equipped excitation system by a new one made of a number of permanent neodymium magnets (Nd-Fe-B alloy) mounted on the rotor surface. The characteristics of the magnets are installed in Table 1.

Measures	33x8x7 mm
Weight	14 g
magnetization	Axial
Quality	N35
Clamping force	6.2 Kg
Maximum temperature	80°C

Table 1: installed neodymium magnets features

After the modification, the new model has been tested in a similar way to the original. In this case it was not possible to obtain any results based on the excitation current, so they have been taken according to the speed.

The generation frequency in both tests is 30 Hz, as it is the generation frequency of wind turbine generator studied in Chapter *Optimization* in order to compare the large-scale model with the small ones tested.

Once both models have been tested, we have proceeded to compare the resistance torque and the performance of each one.

Analytically we have studied the permanent magnet generator operation by solving the magnetic circuit originated in the machine and calculating the generated no-load voltage and its torque and performance.

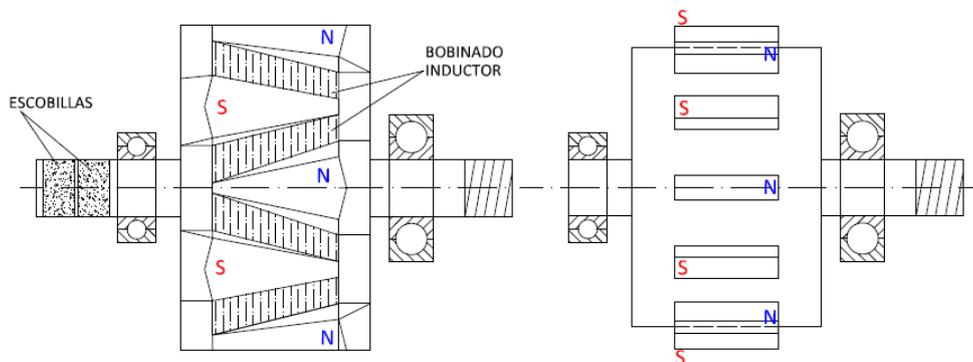


Figure 1: Original and modified rotor drawings

To complete the work, the optimization process to obtain a higher torque value in the constructed model based on permanent magnets has been carried out. The same process has been applied to a large-scale design of a wind turbine of about 5 MW. In this optimization process we have studied the magnetic circuit occurred in this machine, which allows to obtain the generated no-load voltage, and from that value, the generating power, torque and performance are calculated.

Test Results

Following the methodology set forth, experimental values of brake power and peak torque of both tested models have been obtained. These values had been compared with the corresponding values obtained analytically.

In the torque optimization section regarding the small-scale model, the width of the installed magnets has been increased up to 70% of the polar pitch, obtaining an increase in torque of 3, 66 times

As for the wind turbine previous design optimization, we have tried to increase power generation by 5%, and it has chosen to employ the highest quality magnets with a residual field of 1.2 T.

Table 2 shows the baseline data and the final values of the optimization process.

	Prototype	Optim. Prototype	Windmill.	Optim. Windmill
bm (% de tp)	8 mm (33 %)	17.8 mm (70 %)	42.8 mm (70 %)	42.8 mm (70 %)
Br (remanencia)	1.185	1.185	1.1	1.2
Potencia	49.2 W	180.2 W	5.22 MW	5.49 MW
Par	1.57 Nm	5.74 Nm	4.98 MNm	5.24 MNm

Table 2: values obtained from optimization process

Regarding the budget, a study has been made to calculate the costs associated with the manufacture of the permanent magnet prototype, the optimized small-scale design, the precedent wind turbine design and the optimized design of wind turbine. The costs involved in each of the four generators are shown in Table 3.

	Total Budget (€)			
	Prototype	Optim. Prototype	Windmill	Optim. Windmill
Cost of active components	25	43	218,111	269,056
Total direct costs	55	73	473,567	524,512
Indirect costs	20	20	170,000	170,000
Overheads	15	15	135,000	135,000
Total Cost	89	108	778,567	829,512

Table 3: total budget

Conclusions

This project includes the testing of two electric generator models, and the comparison between them. It shows how the original model, which generates excitement through an electric winding, is able to offer a larger load torque than the one given by the permanent magnet model, although its performance is affected by the power consumption required to produce the excitation field.

The main cause of the lower value of load torque obtained in the permanent magnet model is the fact that not being able to build an optimized model because of the limited resources availability.

Note that the analytical calculation results on the permanent magnet model show a reasonable similarity to the experimentally obtained values, although significant uncertainties exist in some aspects because of the use of simple, cheap and readily available resources.

Optimization chapter shows how varying only one parameter of the machine that does not cause an excessive increase in the generator cost, a significant increase in performance can be obtained, which opens a wide range of possibilities by increasing the resistance torque of these generators, maximizing thus the components.



Índice

Parte I	Memoria	1
Capítulo 1	Memoria descriptiva	3
1.1	Introducción al proyecto.....	3
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Estado de la cuestión.....	4
Capítulo 2	Estudio del generador original	6
2.1	Características del generador ensayado.....	6
2.2	Preparación y equipo necesario.....	13
2.3	Ensayo de tensión de vacío.....	15
2.4	Ensayo de intensidad de cortocircuito.....	22
2.5	Método de medición de potencia.....	29
2.6	Resolución del circuito equivalente.....	32
Capítulo 3	Estudio del generador modificado	36
3.1	Selección de imanes y modificación del rotor.....	36
3.2	Ensayo de tensión de vacío.....	39
3.3	Ensayo de intensidad de cortocircuito.....	41
3.4	Resolución del circuito equivalente.....	42
Capítulo 4	Comparación de ambos modelos	43
4.1	Par máximo de frenado.....	43
4.2	Establecimiento del valor nominal.....	44
4.3	Pérdidas en el cobre.....	47



4.4	Rendimiento	48
<i>Capítulo 5</i>	<i>Cálculo analítico del modelo de imanes permanentes</i>	<i>50</i>
5.1	Parámetros geométricos del modelo.....	50
5.2	Resolución del circuito magnético	51
5.3	FEM inducida.....	58
5.4	Resistencia y reactancia síncrona	60
5.5	Pérdidas en el hierro.....	63
5.6	Potencia y par de generación	65
<i>Capítulo 6</i>	<i>Optimización del diseño.....</i>	<i>67</i>
6.1	Optimización a pequeña escala.....	67
6.2	Optimización a gran escala	70
<i>Capítulo 7</i>	<i>Conclusiones y desarrollos futuros</i>	<i>75</i>
7.1	Conclusiones	75
7.2	Desarrollos futuros	76
<i>Bibliografía</i>	<i>77</i>
<i>Parte II</i>	<i>Planos.....</i>	<i>79</i>
1.1	Generador original	81
1.2	Rotor original y modificado	83
1.3	Sección transversal	85
1.4	Sección transversal modelo optimizado	87
<i>Parte III</i>	<i>Presupuesto.....</i>	<i>89</i>
<i>Capítulo 1</i>	<i>Mediciones</i>	<i>91</i>
<i>Capítulo 2</i>	<i>Costes</i>	<i>92</i>
2.1	Coste de las partes activas.....	92
2.2	Coste de los materiales aislantes.....	92



2.3	Coste de la estructura y elementos mecánicos.....	93
2.4	Coste de fabricación y mano de obra	93
2.5	Costes indirectos	94
2.6	Gastos generales.....	95
<i>Capítulo 3</i>	<i>Presupuesto general</i>	<i>96</i>



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

ÍNDICE



Índice de figuras

Figura 1: características del alternador ensayado	6
Figura 2: aspecto exterior del alternador	7
Figura 3: rotor bobinado (inductor)	7
Figura 4: estator (inducido)	8
Figura 5: puente rectificador de diodos	9
Figura 6: regulador de tensión	9
Figura 7: carcasa, ventilador y rodamiento	10
Figura 8: esquema eléctrico del alternador	10
Figura 9: esquema del devanado trifásico imbricado de doble capa	12
Figura 10: placa de características del motor	13
Figura 11: material empleado para el ensayo	15
Figura 12: esquema de conexiones, ensayo tensión de vacío	16
Figura 13: tensión de vacío	18
Figura 14: potencia activa en vacío	19
Figura 15: potencia reactiva en vacío	19
Figura 16: onda generada sin excitación	20
Figura 17: onda generada con 1,5 A de excitación	20
Figura 18: esquema de conexiones, ensayo intensidad de cortocircuito	22
Figura 19: intensidad de cortocircuito	25
Figura 20: potencia activa de cortocircuito	25
Figura 21: potencia reactiva de cortocircuito	26
Figura 22: variación de I_{cc} en función de la velocidad de giro	27
Figura 23: tendencia de la pendiente de corrección	27



Figura 24: Icc corregida por variación de velocidad	29
Figura 25: conexión de los vatímetros método de Aron.....	30
Figura 26: diagrama vectorial medición de potencia.....	30
Figura 27: esquema del circuito equivalente de Thévenin	32
Figura 28: conexiones realizadas para la medida de la resistencia equivalente	33
Figura 29: propiedades del imán elegido [www.aimangz.es/] / [www.demacmotor.net/]	37
Figura 30: dimensiones establecidas para el diseño	38
Figura 31: torneado del rotor, pegado de imanes y aspecto final	38
Figura 32: tensión de vacío (imanes permanentes)	40
Figura 33: onda generada a 300 rpm	40
Figura 34: intensidad de cortocircuito (imanes permanentes).....	42
Figura 35: curvas de rendimiento	46
Figura 36: parámetros geométricos	51
Figura 37: circuito magnético.....	53
Figura 38: curva B-H de diversos materiales [KOSO91].....	54
Figura 39: primer armónico de la onda cuadrada de campo de entrehierro	58
Figura 40: características del hilo de cobre esmaltado [www.tecnum.es/].....	60
Figura 41: flujo de dispersión en las ranuras.....	62
Figura 42: diagrama fasorial a 10 rpm	73



Índice de tablas

Tabla 1: parámetros del devanado inducido	11
Tabla 2: mediciones de tensión de vacío	17
Tabla 3: caída de velocidad al aplicar carga y cálculo de la nueva frecuencia	23
Tabla 4: mediciones de intensidad de cortocircuito	24
Tabla 5: variación de I_{cc} en función de la velocidad de giro	26
Tabla 6: corrección por variación de velocidad.....	28
Tabla 7: cálculo de la resistencia equivalente del devanado	33
Tabla 8: resolución del circuito equivalente.....	35
Tabla 9: mediciones de tensión de vacío (imanes permanentes).....	39
Tabla 10: mediciones de intensidad de cortocircuito (imanes permanentes)	41
Tabla 11: resolución circuito equivalente (imanes permanentes)	42
Tabla 12: cálculo de potencia pico de frenado	44
Tabla 13: cálculo del valor nominal	47
Tabla 14: cálculo de pérdidas en el cobre.....	47
Tabla 15: cálculo de rendimiento	49
Tabla 16: parámetros geométricos del modelo.....	50
Tabla 17: cálculo de entrehierro efectivo	52
Tabla 18: expresiones para el cálculo del circuito magnético	55
Tabla 19: cálculo de parámetros del circuito magnético	56
Tabla 20: comprobación de saturación.....	57
Tabla 21: parámetros geométricos del modelo optimizado.....	67
Tabla 22: parámetros del circuito magnético modelo optimizado	68
Tabla 23: magnitudes eléctricas	70



Tabla 24: parámetros del diseño precedente de aerogenerador.....	71
Tabla 25: parámetros del circuito magnético del diseño precedente.....	72
Tabla 26: estimación de masa de las partes activas.....	91
Tabla 27: masa de los materiales de las partes activas en cada diseño	91
Tabla 28: coste de los materiales activos en cada diseño.....	92
Tabla 29: coste de los materiales aislantes	93
Tabla 30: coste de los elementos mecánicos	93
Tabla 31: coste de fabricación y mano de obra	94
Tabla 32: costes indirectos	94
Tabla 33: gastos generales.....	95
Tabla 34: presupuesto general.....	96



Parte I MEMORIA



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Memoria descriptiva



Capítulo 1 MEMORIA DESCRIPTIVA

1.1 INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

El proyecto consiste en la construcción y análisis de un modelo de pequeña escala de un generador freno motor con imanes permanentes de alto par.

Dicho modelo será ensayado y analizado para determinar su comportamiento y establecer posibles mejoras constructivas. De esta manera se podría aumentar el rendimiento de la máquina.

Con los resultados obtenidos además se verificarán las relaciones constructivas y el comportamiento, principalmente de generadores a gran escala como turbinas eólicas, pero también de tamaño reducido como en automóviles eléctricos.

Por tanto, en el proyecto se estudiará la técnica de generación eléctrica mediante generadores síncronos de imanes permanentes, se comparará de forma práctica con el sistema que emplea un bobinado de excitación y se analizará su utilización a otras escalas, con especial importancia en aplicaciones que requieran un elevado par como vehículos eléctricos y turbinas eólicas marinas.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos que se han planteado en este trabajo son los siguientes:

- Estudio de los elementos de las máquinas en relación a su escalabilidad en par.
- Diseño y montaje de los circuitos de ensayo.



- Diseño y construcción de un prototipo en pequeña escala.
- Ensayos del prototipo y comparación de resultados de ensayos con generadores del mercado.
- Optimización teórica del diseño en pequeña escala.
- Diseño a gran escala optimizado (basado en uno precedente).

1.3 ESTADO DE LA CUESTIÓN

En el área de la eólica offshore o marina, el importante factor de la fiabilidad de los equipos y un menor mantenimiento, junto con la mejora de la electrónica de potencia, está provocando optar por generadores síncronos y adoptar la configuración de accionamiento directo entre turbina y generador, prescindiendo así de un gran número de partes móviles como es la caja multiplicadora. Esta configuración de acoplamiento directo provoca que el generador tenga que trabajar a un régimen bajo de giro y con un alto par nominal afectando considerablemente al diseño de la máquina.

En los aerogeneradores de pequeña potencia se utilizan mayormente generadores síncronos de imanes permanentes. Esto es debido, principalmente, a su robustez, su mayor eficiencia y su bajo mantenimiento. Aunque su precio es algo mayor, mediante este método se evita el uso del bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante, eliminando las pérdidas en este devanado.

Este tipo de generadores se está utilizando cada vez más en aerogeneradores de gran potencia, debido, a su reducido peso y volumen, al utilizar imanes de alto magnetismo.



Actualmente se construyen generadores de imanes permanentes de hasta unos 5 MW de potencia.

Estos imanes de alto magnetismo de neodimio y samario son de última generación en cuanto a materiales magnéticos y poseen propiedades muy superiores a los tradicionales.

Si bien estos imanes son más livianos y compactos, su principal desventaja es la desmagnetización que sufren después de un cierto tiempo de trabajo. Además, los imanes de gran duración involucran mayores costes de inversión, puesto que son producidos con metales escasos y los procesos son complejos y costosos. Otro factor a tener en cuenta es la relativamente baja temperatura de funcionamiento, unos 80-200 °C.

Las máquinas eléctricas rotativas son reversibles, es decir, pueden trabajar como generador o como motor. Este aspecto es importante en aplicaciones como los vehículos eléctricos. Se emplean, por tanto, para acelerar el vehículo y frenarlo aprovechando así la energía que mediante el método tradicional de frenado se disiparía.

En el caso de los aerogeneradores además de su función principal de producir energía eléctrica, también es necesaria la función de motor para operaciones de mantenimiento.



Capítulo 2 ESTUDIO DEL GENERADOR ORIGINAL

2.1 CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR ENSAYADO

El generador elegido para realizar el estudio es un alternador síncrono empleado comúnmente en la automoción. El fabricante de dicha máquina eléctrica es Valeo. En la Figura 1 se incluye la información del producto dada por el fabricante y en la Figura 2 un croquis del aspecto exterior.

General:	
Ref. EAN	3276424374578
Estado	Normal
Unidad de embalaje	1
Ref. comerciales	SG9MA283, 2542705, 2542839, SG15S031, TG15C023
Indicador	Pieza de intercambio
criterios:	
Tensión [V]	14
Corriente de carga alternador [A]	150
Posición/Grado	L 40
Sentido de giro	Sentido de giro a la derecha (horario)
Poleas	con polea
poleas - Ø [mm]	54
Tipo de sujeción	Sujeción de 4 puntos
Número de canales	6
Conexión / terminal/borne	sin conexión para cuentarrevoluciones
Artículo complementario/Información complementaria	con regulador incorporado

Figura 1: características del alternador ensayado

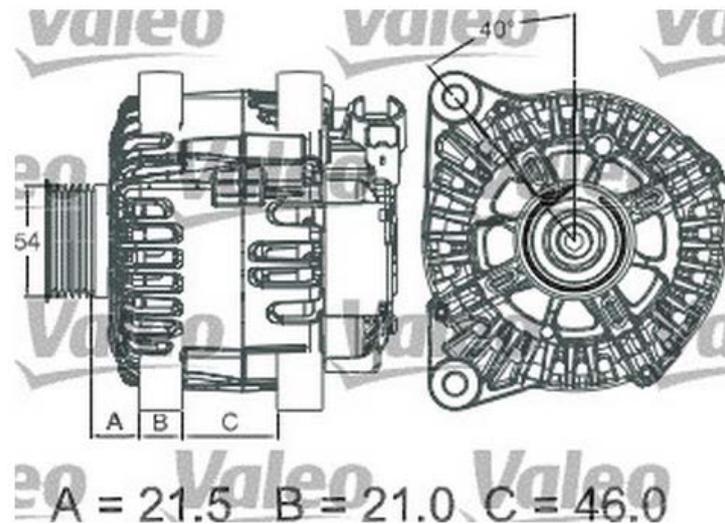


Figura 2: aspecto exterior del alternador [www.valeoservice.com]

La máquina empleada está compuesta por varios componentes, a continuación se detallan los más importantes y la función que desempeñan en el conjunto del alternador.

- **Una parte móvil o rotor que forma el conjunto inductor** (Figura 3). Es el componente que crea el campo magnético. Está formado por dos piezas de acero forjado que llevan 6 salientes o dedos entrelazados sin llegar a tocarse, que constituyen los polos del campo magnético inductor (un total de 12 polos). En el interior de los polos va montada la bobina inductora de hilo de cobre aislado.



Figura 3: rotor bobinado (inductor)

- **Una parte fija o estator que constituye el inducido** (Figura 4). Tiene un armazón de chapas magnéticas de acero laminado en forma de corona circular, troqueladas interiormente formando las ranuras (36) donde se alojan las bobinas inducidas. Dicho bobinado está compuesto por tres arrollamientos separados y repartidos perfectamente en las ranuras. El modo de conexión de los arrollamientos es en triángulo.



Figura 4: estator (inducido)

- **El puente rectificador de diodos** (Figura 5). Su función es transformar la corriente alterna generada en el inducido por corriente continua, adecuada para alimentar la batería y los elementos consumidores del vehículo. En el estudio llevado a cabo se ha eliminado dicho componente por no ser necesario ya que las mediciones se realizan en corriente alterna (antes de pasar por el rectificador).



Figura 5: puente rectificador de diodos

- **Regulador de tensión** (Figura 6). La función del regulador es mantener constante la tensión del alternador, independientemente de la velocidad de giro del motor o del valor de la carga, y es conseguido variando la excitación del rotor. También es desconectado por no ser necesaria dicha función. En la misma pieza van incorporadas las escobillas que rozan con los anillos del rotor para crear el circuito inductor.



Figura 6: regulador de tensión

- **Carcasas, ventilador, rodamientos** y demás elementos complementarios de la máquina (Figura 7).



Figura 7: carcasa, ventilador y rodamiento

Una vez estudiados los componentes principales del alternador se estudia el esquema eléctrico de la máquina (Figura 8). En él destaca la conexión en triángulo del inducido, el puente de diodos rectificadores, el regulador de tensión y el bobinado inductor.

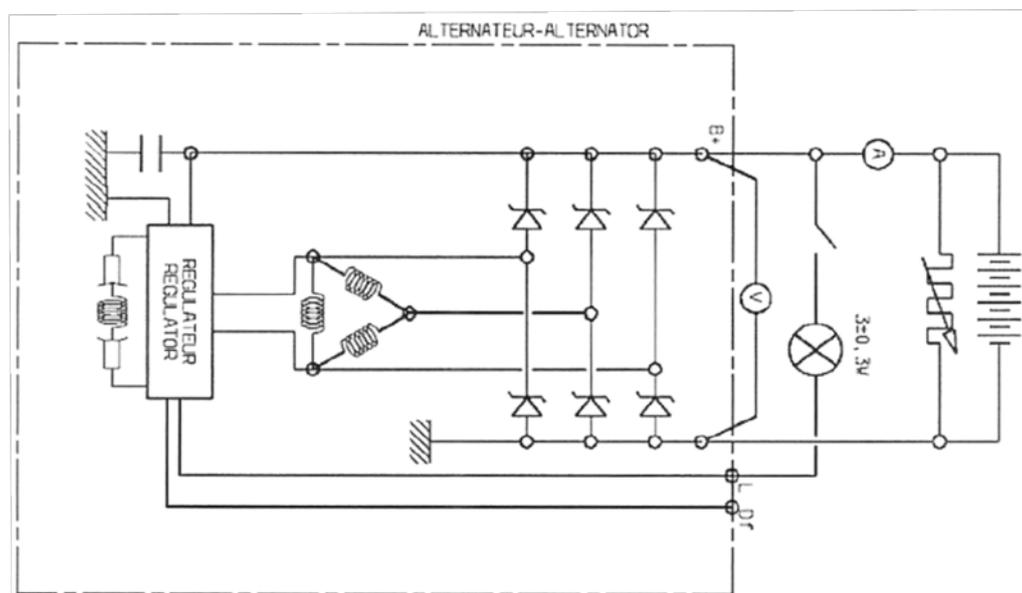


Figura 8: esquema eléctrico del alternador

Entrando en detalle, se determinan todos los parámetros correspondientes al devanado inducido de la máquina en la Tabla 1. Como puede observarse en Figura 9, es un devanado trifásico, de tipo imbricado y de doble capa.



Designación		Valor
Nº de ramas en paralelo de una fase	a'	3
Nº total de bobinas simples	b	36
Nº de bobinas simples de una fase por par de polos	B	2
Nº total de ranuras	K	36
Nº de fases	m	3
Nº de espiras de una bobina simple	N_r	12
Nº de espiras totales de una fase	N_f	144
Nº de espiras efectivas en serie de una fase	N_{ef}	48
Nº de pares de polos	P	6
Nº de ranuras por polo	Q	3
Nº de ranuras por polo y fase	q	1
Nº de conductores totales de una fase	Z_f	288
Nº de conductores efectivos en serie de una fase	Z	96

Tabla 1: parámetros del devanado inducido

Las expresiones que relacionan los parámetros de la Tabla 1 son las siguientes:

$$Q = m \cdot q ;$$

$$K = 2 \cdot p \cdot Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q ;$$

$$B = m \cdot p \cdot b$$

$$N_f = a' \cdot N ;$$

$$N = \frac{p}{a'} \cdot b \cdot N_r ;$$

$$N_f = p \cdot b \cdot N_r$$

En devanados de dos capas:

$$K = B ;$$

$$2q = b$$



N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

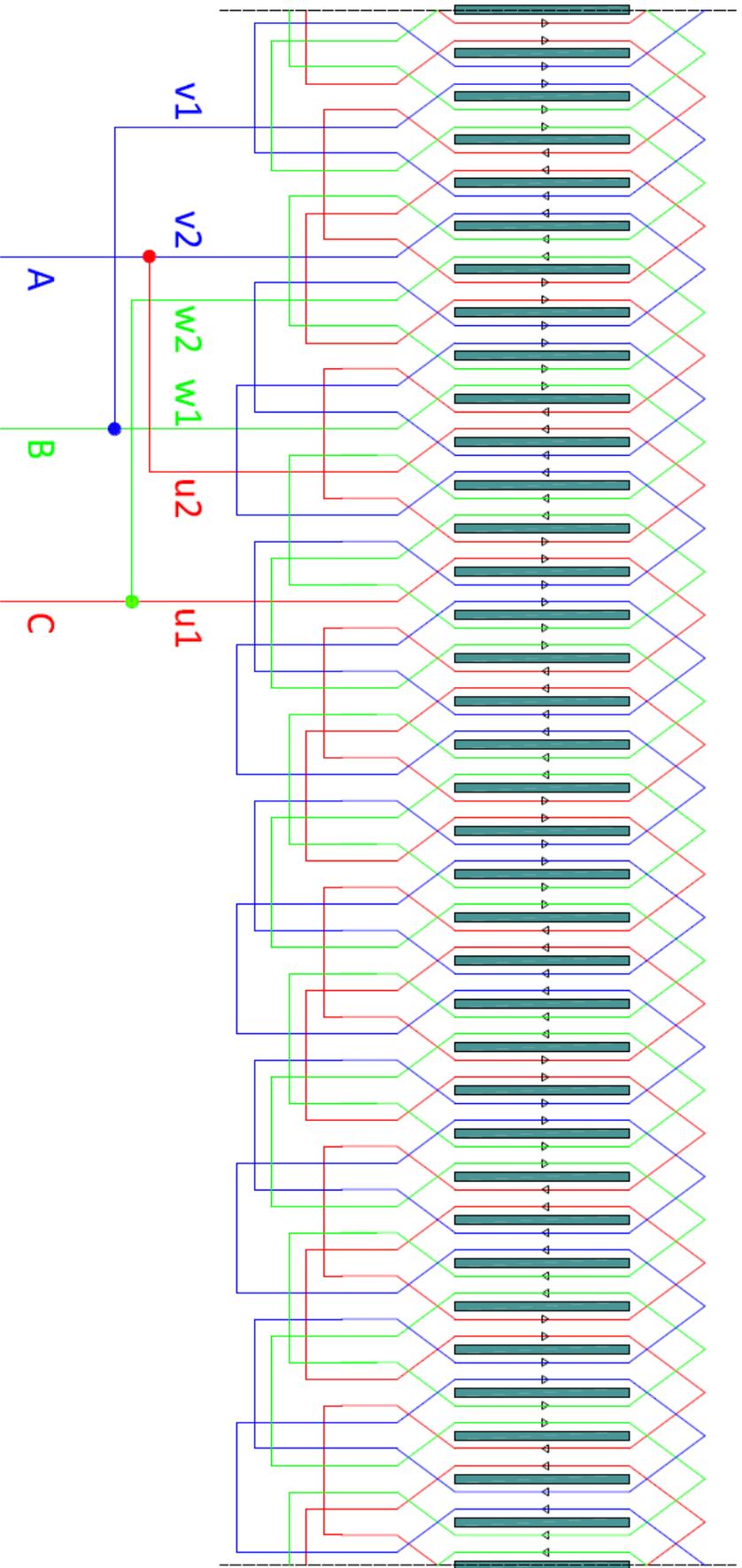


Figura 9: esquema del devanado trifásico imbricado de doble capa



2.2 PREPARACIÓN Y EQUIPO NECESARIO

La finalidad del ensayo del alternador es obtener las curvas de tensión en vacío e intensidad de cortocircuito en función de la intensidad de excitación.

Para realizar el ensayo, el alternador ha sido fijado a una bancada y acoplado a un motor que será el encargado de transmitir la energía mecánica. El motor empleado es un motor asíncrono con dos pares de polos.



Figura 10: placa de características del motor

Dicho acoplamiento se ha realizado con un tubo de material elástico y fijado con bridas a los ejes del motor y alternador. En este aspecto han surgido dos problemas que impedían realizar la prueba.

En primer lugar, el tubo elegido en un principio era poco resistente a la torsión y mostraba signos de excesivos esfuerzos en la transmisión de par. Por tanto se optó por cambiar el tubo y emplear uno reforzado con malla metálica que soporta dichos esfuerzos.

En segundo lugar, el tubo de material elástico tenía poco coeficiente de rozamiento con el acero de los ejes y había deslizamiento entre ambas partes. Fue suficiente para solucionar este problema aplicar adhesivo de contacto entre los ejes y el tubo aumentando así el rozamiento y anulando el deslizamiento.



Como se requiere que la frecuencia de generación sea de 30 Hz, igual que la frecuencia de generación de la turbina eólica, se ha empleado un variador de frecuencia para controlar la velocidad de giro del conjunto motor-alternador.

Para determinar la velocidad del conjunto motor-alternador:

$$n \text{ (rpm)} = \frac{60 \cdot f(\text{Hz})}{P(\text{pares de polos})} = \frac{60 \cdot 30}{6} = 300 \text{ rpm}$$

Para determinar la frecuencia a la que se debe alimentar el motor para obtener las 300 rpm:

$$f(\text{Hz}) = \frac{P(\text{pares de polos}) \cdot n \text{ (rpm)}}{60} = \frac{2 \cdot 300}{60} = 10 \text{ Hz}$$

Por tanto la frecuencia que se ha de ajustar en el variador es de 10 Hz para obtener una velocidad de giro de 300 rpm.

También ha sido necesaria una fuente de tensión para alimentar el devanado de excitación del alternador.

Para la toma de medidas se han empleado dos polímetros (uno mide la intensidad de excitación y el otro la tensión de vacío o la intensidad de cortocircuito según corresponda), dos vatímetros (indican la potencia consumida por el motor) y un osciloscopio (necesario para comprobar la frecuencia de generación y el valor de la tensión). Dicho material puede observarse en Figura 11.

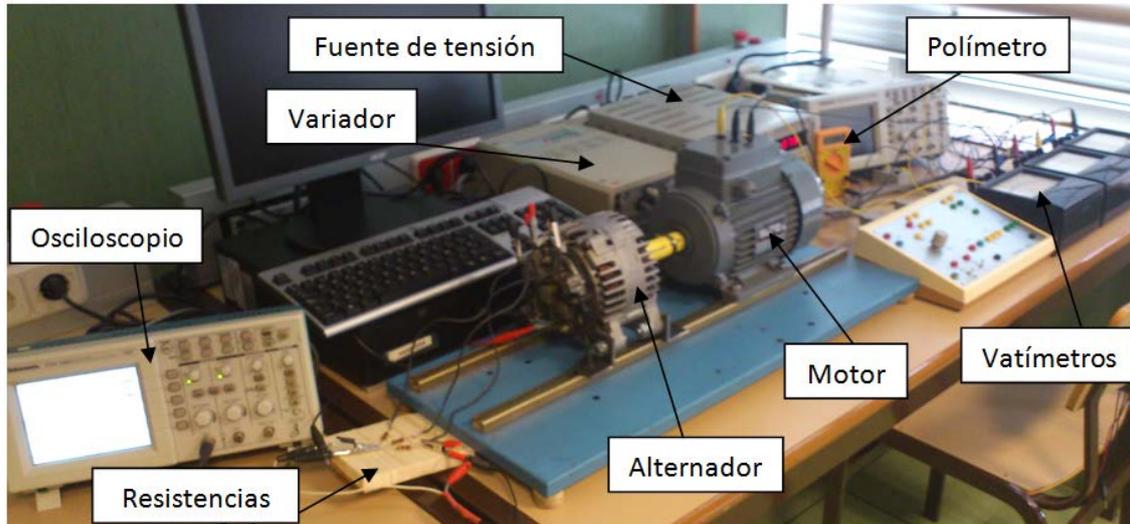


Figura 11: material empleado para el ensayo

2.3 ENSAYO DE TENSIÓN DE VACÍO

El ensayo de tensión de vacío consiste en medir la tensión generada por el alternador sin aplicarle ninguna carga eléctrica en la salida. En la Figura 12 se representa el esquema de conexiones seguido para la realización del ensayo.

Se debe ajustar el variador de frecuencia a 10 Hz, como se ha calculado en Parte I - 2.2 y conectarlo al motor para obtener la velocidad de giro adecuada (300 rpm).

Los dos vatímetros conectados mediante el método de Aron, explicado en Parte I - 2.5, se encuentran entre la salida del variador de frecuencia y el motor. De esta manera es posible obtener la potencia activa y reactiva consumida por el motor.

La fuente de intensidad se conecta a las escobillas para, a través de los anillos del rotor, suministrar corriente al circuito de excitación. Se incorpora un polímetro en dicho circuito para controlar la intensidad de excitación.

En un principio se intentó medir la tensión de vacío compuesta, es decir, entre dos fases. Este método tenía la problemática de que los ruidos generados por el alternador, se transmitían al instrumento de medida oscilando ampliamente los valores de medida. Se optó entonces por unir tres resistencias (de valor $100\ \Omega$) en estrella formando así un punto neutro que se conectaría a tierra para eliminar el ruido en la medida y obtener valores precisos. Por tanto la tensión de vacío medida es la tensión de fase o simple.

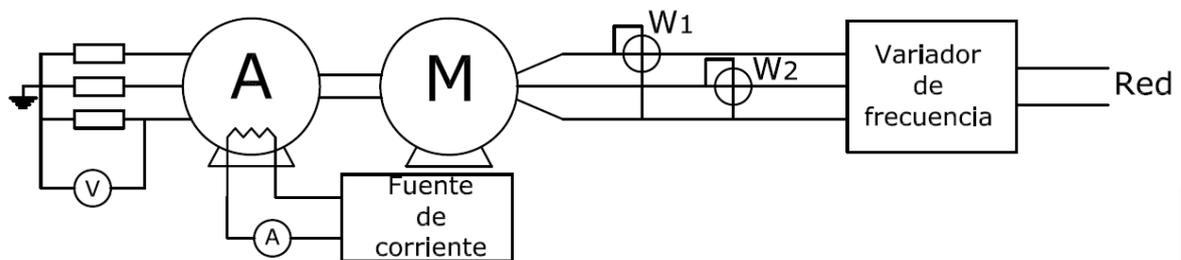


Figura 12: esquema de conexiones, ensayo tensión de vacío

Se adjuntan los datos obtenidos de las mediciones en Tabla 2. Se expresa la tensión de vacío (E_0), la potencia activa (P_0) y reactiva (Q_0) y el factor de potencia $\cos(\varphi)$, todo ello en función de la intensidad de excitación aplicada (I_{exc}).

Destacar que para la medición de los vatímetros se han tomado cuatro puntos significativos, (por la limitación de medida de los aparatos) y se ha aplicado una línea de tendencia parabólica para realizar el cálculo de potencia activa y reactiva en todos los casos.



Ensayo de tensión de vacío (300 rpm)						
I _{exc} (A)	E ₀ (V)	W ₁ (W)	W ₂ (W)	P ₀ (W)	Q ₀ (W)	cos(φ)
0	0,06	160	-20	140,00	311,77	0,4096
0,1	0,11			139,65	310,30	0,4104
0,2	0,17			139,37	308,94	0,4112
0,3	0,24			139,10	307,61	0,4120
0,4	0,32			138,85	306,31	0,4129
0,5	0,38			138,61	305,03	0,4137
0,6	0,46			138,39	303,78	0,4146
0,7	0,54			138,18	302,56	0,4154
0,8	0,6			137,99	301,36	0,4163
0,9	0,68			137,81	300,18	0,4172
1	0,76	155	-17,5	137,50	298,78	0,4181
1,1	0,82			137,50	297,91	0,4191
1,2	0,88			137,37	296,82	0,4200
1,3	0,95			137,25	295,75	0,4210
1,4	1			137,15	294,71	0,4219
1,5	1,07			137,06	293,69	0,4229
1,6	1,11			136,99	292,70	0,4239
1,7	1,17			136,93	291,73	0,4249
1,8	1,22			136,89	290,79	0,4259
1,9	1,27			136,86	289,88	0,4269
2	1,32	152	-15	137,00	289,25	0,4280
2,1	1,36			136,85	288,13	0,4290
2,2	1,39			136,87	287,29	0,4301
2,3	1,42			136,90	286,48	0,4312
2,4	1,44			136,95	285,70	0,4323
2,5	1,47			137,01	284,94	0,4333
2,6	1,48			137,09	284,21	0,4345
2,7	1,5			137,18	283,50	0,4356
2,8	1,51			137,29	282,82	0,4367
2,9	1,52			137,41	282,17	0,4378
3	1,53	150	-12,5	137,50	281,46	0,4389
3,1	1,55			137,70	280,94	0,4401
3,2	1,56			137,87	280,36	0,4413
3,3	1,56			138,05	279,81	0,4425
3,4	1,57			138,25	279,29	0,4436
3,5	1,58			138,46	278,79	0,4448
3,6	1,59			138,69	278,32	0,4460

Tabla 2: mediciones de tensión de vacío



Para un análisis más visual se han representado las variables anteriores en función de la intensidad de excitación.

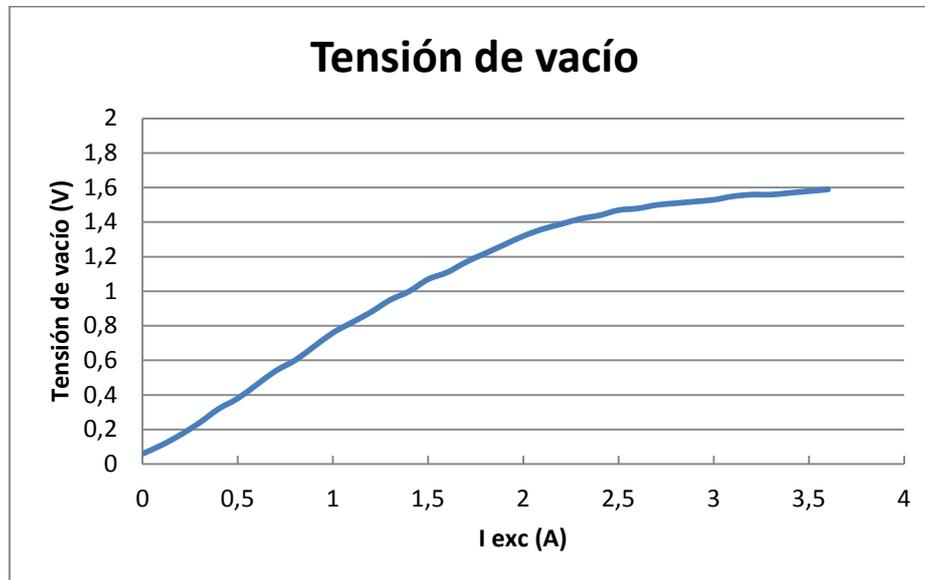


Figura 13: tensión de vacío

En la Figura 13, se observa como la tensión de vacío a partir de una intensidad de excitación de unos 2,5A el generador llega a punto de saturación de 1,5 V, es decir, si se aumenta la excitación, la tensión de vacío permanece prácticamente constante. Esta característica corresponde a un cambio de pendiente en la curva, tiende a ser horizontal a partir de la zona de saturación.

La potencia activa ha sido ajustada en la Figura 14 por una línea de tendencia parabólica aunque únicamente tiene una ligera variación en todo el rango de intensidad de excitación.

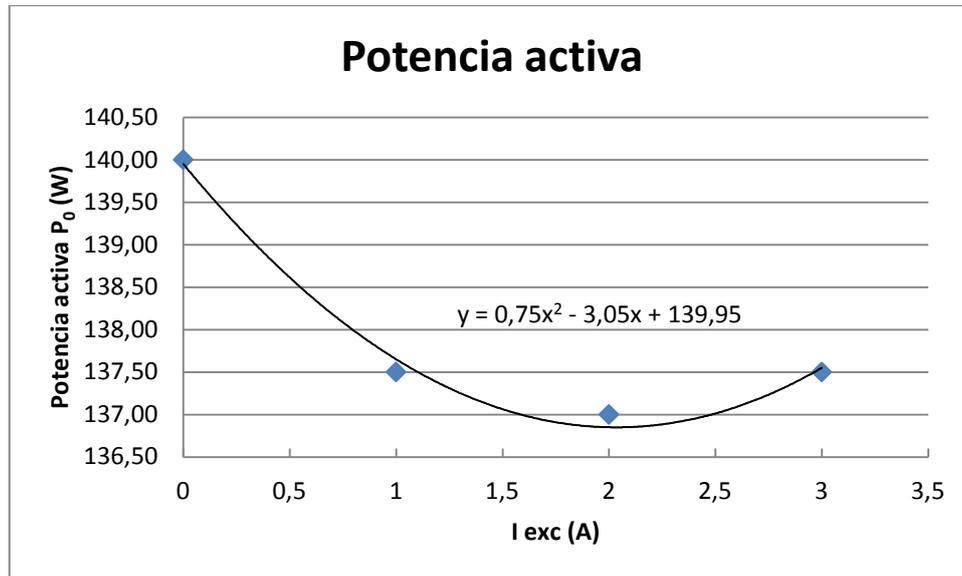


Figura 14: potencia activa en vacío

En la Figura 15 se observa una disminución de consumo de potencia reactiva a medida que se aumenta la excitación del generador.

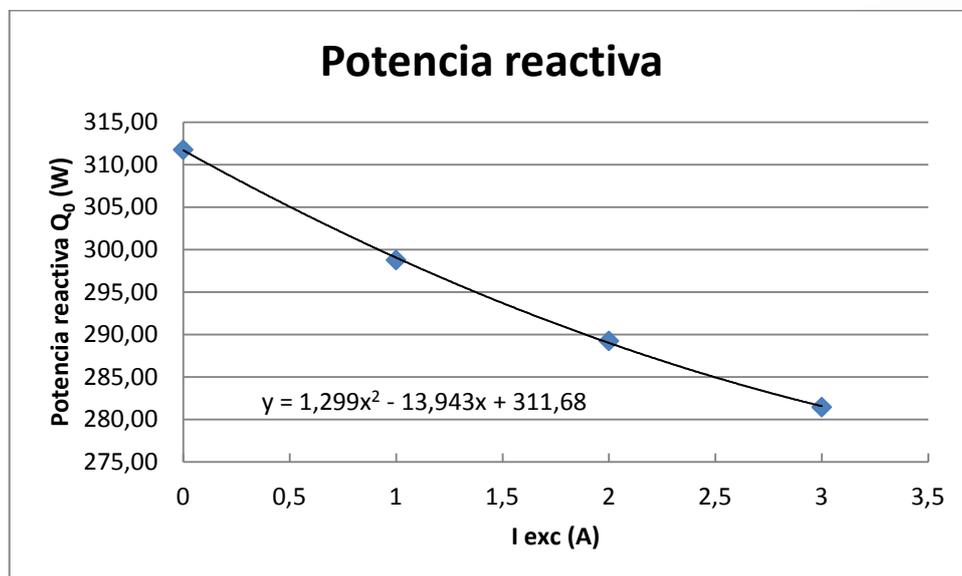


Figura 15: potencia reactiva en vacío

Como método de comprobación se ha medido el valor de tensión de vacío y la frecuencia de generación, en dos puntos, con un osciloscopio que además proporciona la imagen de la



onda generada. En la Figura 16 se observa la onda de generación sin corriente de excitación lo que demuestra un cierto magnetismo remanente en el rotor del alternador.

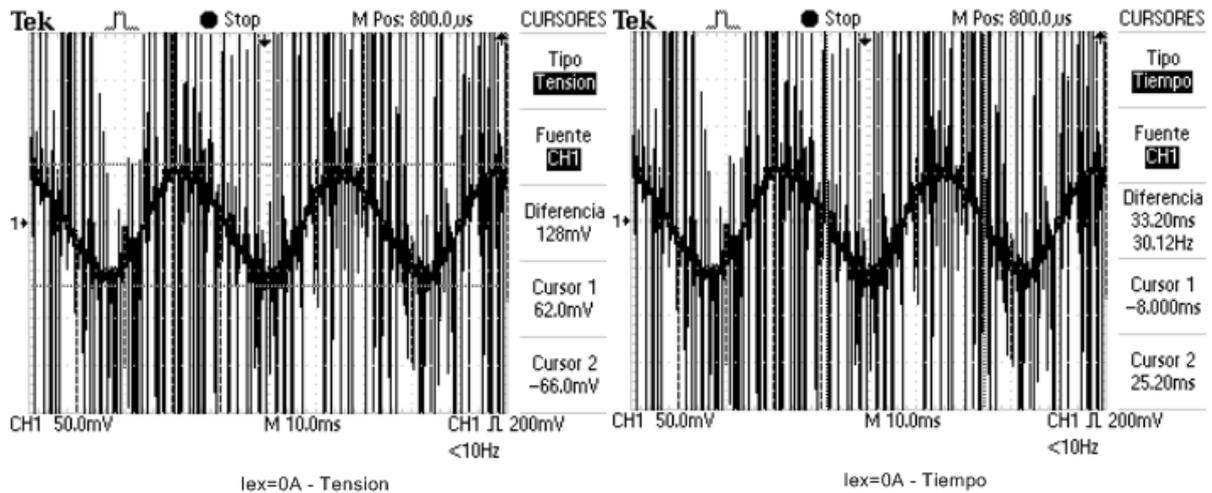


Figura 16: onda generada sin excitación

En la Figura 17 se muestra la onda de generación con 1,5 A de excitación.

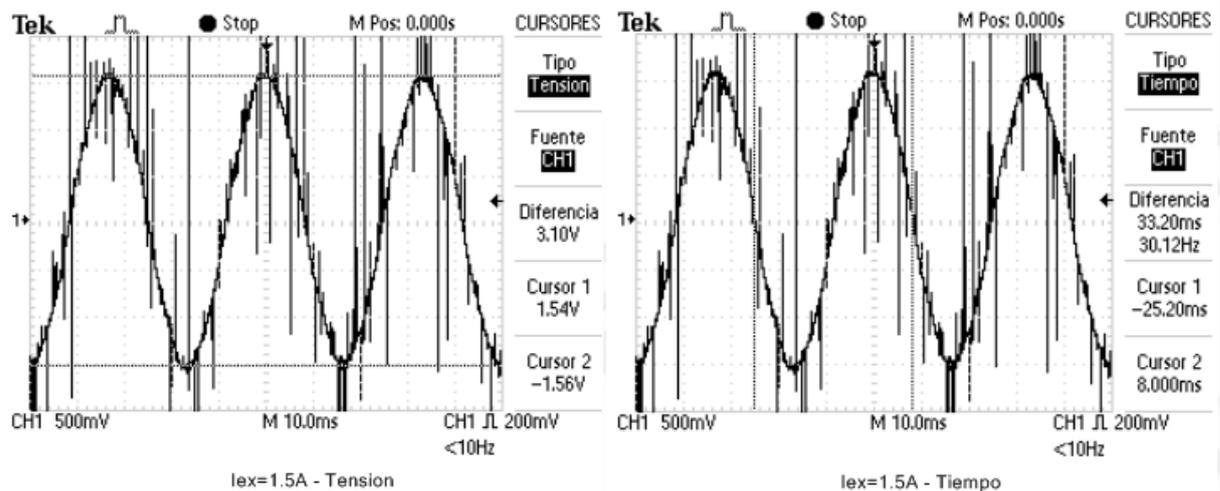


Figura 17: onda generada con 1,5 A de excitación

Resaltar que la tensión medida en el osciloscopio es el doble de la tensión de pico mientras que la medida con el polímetro es la tensión eficaz. Se comprueba que los valores medidos con ambos métodos coinciden. La frecuencia de generación es de 30,12 Hz.



$$\frac{0,128 V}{2} \cong \sqrt{2} \cdot 0,06 V ; \quad \frac{3,10 V}{2} \cong \sqrt{2} \cdot 1,07 V$$

Error cometido por evaluar la tensión de vacío a través del puente de resistencias de 100 Ω .

Al introducir en el sistema el puente de resistencias de 100 Ω , necesario para poder obtener un valor correcto de la tensión de vacío y minimizar el ruido en los instrumentos se comete un pequeño error de precisión.

A continuación se calcula el error cometido y se comprueba que es despreciable para el caso de 1 A de intensidad de excitación.

$$I_{100\Omega} = \frac{E_{0-medida}}{R_{100\Omega}} = \frac{0,76 V}{100 \Omega} = 7,6 \cdot 10^{-3} A$$

$$E_{Z_s} = I_{100\Omega} \cdot Z_s = 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot (0,0435 + j 0,1019) = (3,306 \cdot 10^{-4} + j 7,744 \cdot 10^{-4}) V$$

$$\begin{aligned} E_{0-real} &= E_{0-medida} + E_{Z_s} = 0,76 + (3,306 \cdot 10^{-4} + j 7,744 \cdot 10^{-4}) = \\ &= 0,760330994 \underline{0,05836^\circ} V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error de medida} &= E_{0-real} - E_{0-medida} = 0,760330994 \underline{0,05836^\circ} - 0,76 = \\ &= 8,42 \cdot 10^{-4} \underline{0,05836^\circ} V \end{aligned}$$

Se comprueba por tanto que el error cometido en la medida es despreciable en comparación con la incertidumbre que puedan tener los propios instrumentos de medida.

2.4 ENSAYO DE INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO

En el ensayo de cortocircuito se toma la medida de la intensidad que circula por los bornes del alternador estando estos unidos entre sí. La Figura 18 representa el esquema de conexiones empleado.

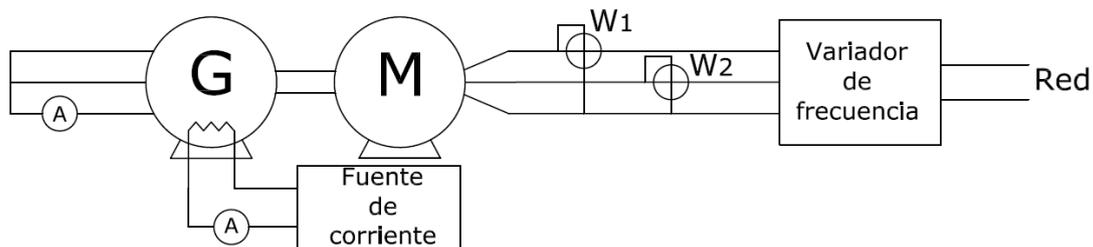


Figura 18: esquema de conexiones, ensayo intensidad de cortocircuito

La velocidad, igual que en el ensayo de vacío, debe ser de 300 rpm para conseguir una frecuencia de generación de 30 Hz. Como se ha empleado un motor asíncrono, al oponer el generador un par resistente, el motor baja de revoluciones por lo que la generación de corriente ya no se produce a los 30 Hz necesarios. Para corregir este fenómeno es necesario ir aumentando la frecuencia del variador (afecta a la corriente de alimentación del motor). Destacar también que el equipo variador de frecuencia solo permite una regulación de la frecuencia de alimentación con 1 Hz de precisión.

De forma teórica se puede calcular la variación de velocidad que supone el aumento de 1 Hz en la corriente de alimentación al motor.

$$\Delta rpm = \frac{60 \cdot f(\text{Hz})}{P(\text{pares de polos})} = \frac{60 \cdot 1}{2} = 30 \text{ rpm}$$

En primer lugar se han medido las velocidades de giro con una frecuencia de alimentación de 10 Hz para establecer la caída de revoluciones y el aumento de frecuencia necesario en cada caso para ajustarse a la velocidad deseada.



Caída de velocidad y cálculo del aumento de frecuencia					
Iexc (A)	Rpm medida a 10Hz	Caída de rpm	Δ Hz necesarios	Δ Hz posibles	rpm teórica conseguida
0	300	0	0,00	0	300
0,1	300	0	0,00	0	300
0,2	300	0	0,00	0	300
0,3	300	0	0,01	0	300
0,4	299	1	0,05	0	299
0,5	297	3	0,10	0	297
0,6	295	5	0,15	0	295
0,7	294	6	0,21	0	294
0,8	292	8	0,27	0	292
0,9	290	10	0,33	0	290
1	288	12	0,41	0	288
1,1	285	15	0,49	0	285
1,2	283	17	0,58	1	313
1,3	280	20	0,68	1	310
1,4	276	24	0,79	1	306
1,5	272	28	0,92	1	302
1,6	268	32	1,06	1	298
1,7	263	37	1,22	1	293
1,8	258	42	1,39	1	288
1,9	253	47	1,56	2	313
2	248	52	1,74	2	308
2,1	242	58	1,93	2	302
2,2	237	63	2,11	2	297
2,3	231	69	2,29	2	291
2,4	226	74	2,47	2	286
2,5	221	79	2,63	3	311

Tabla 3: caída de velocidad al aplicar carga y cálculo de la nueva frecuencia

Como se observa en Tabla 3, la velocidad calculada, que se consigue ajustando la frecuencia del variador, difiere ligeramente del valor deseado de 300 rpm. Por esta razón será necesario hacer un ajuste posterior a los datos de intensidad de cortocircuito medidos.



En la Tabla 4 se exponen los datos tomados experimentalmente del ensayo de cortocircuito. Se ha registrado la intensidad de cortocircuito (I_{cc}), la potencia activa (P_0) y reactiva (Q_0) y el factor de potencia $\cos(\varphi)$, todo ello en función de la intensidad de excitación aplicada.

Ensayo de cortocircuito (300 rpm)						
I_{exc} (A)	I_{cc} (A)	W_1 (W)	W_2 (W)	P_{cc} (W)	Q_{cc} (W)	$\cos(\varphi)$
0	0,68	150	-20	130	294,45	0,4039
0,1	1,30	150	-20	130	294,45	0,4039
0,2	2,50	150	-20	130	294,45	0,4039
0,3	3,45	150	-20	130	294,45	0,4039
0,4	5,10	150	-10	140	277,13	0,4509
0,5	6,05	150	-10	140	277,13	0,4509
0,6	7,05	150	-10	140	277,13	0,4509
0,7	8,30	145	-10	135	268,47	0,4493
0,8	9,30	145	-5	140	259,81	0,4744
0,9	10,15	145	-5	140	259,81	0,4744
1	11,60	140	0	140	242,49	0,5000
1,1	12,45	140	0	140	242,49	0,5000
1,2	13,80	150	0	150	259,81	0,5000
1,3	15,10	150	10	160	242,49	0,5507
1,4	15,60	150	15	165	233,83	0,5766
1,5	16,30	150	20	170	225,17	0,6025
1,6	17,10	150	30	180	207,85	0,6547
1,7	18,00	150	35	185	199,19	0,6805
1,8	18,60	150	40	190	190,53	0,7061
1,9	19,92	170	50	220	207,85	0,7269
2	20,72	175	60	235	199,19	0,7628
2,1	20,92	180	75	255	181,87	0,8142
2,2	21,33	190	80	270	190,53	0,8171
2,3	21,44	190	90	280	173,21	0,8504
2,4	21,55	195	95	290	173,21	0,8585
2,5	23,47	225	110	335	199,19	0,8595

Tabla 4: mediciones de intensidad de cortocircuito

Representando las variables medidas en función de la intensidad de excitación aplicada se obtiene la Figura 19, Figura 20 y Figura 21.

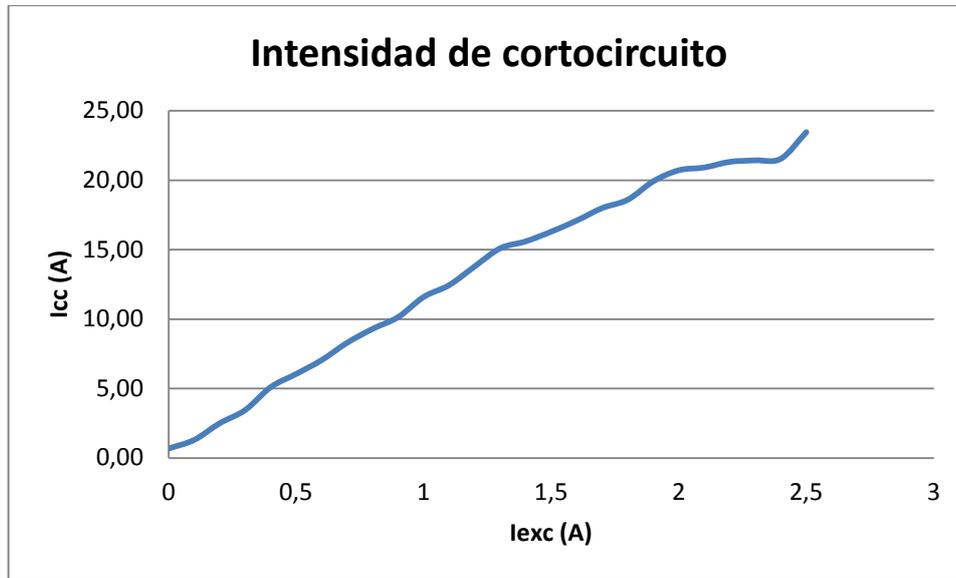


Figura 19: intensidad de cortocircuito

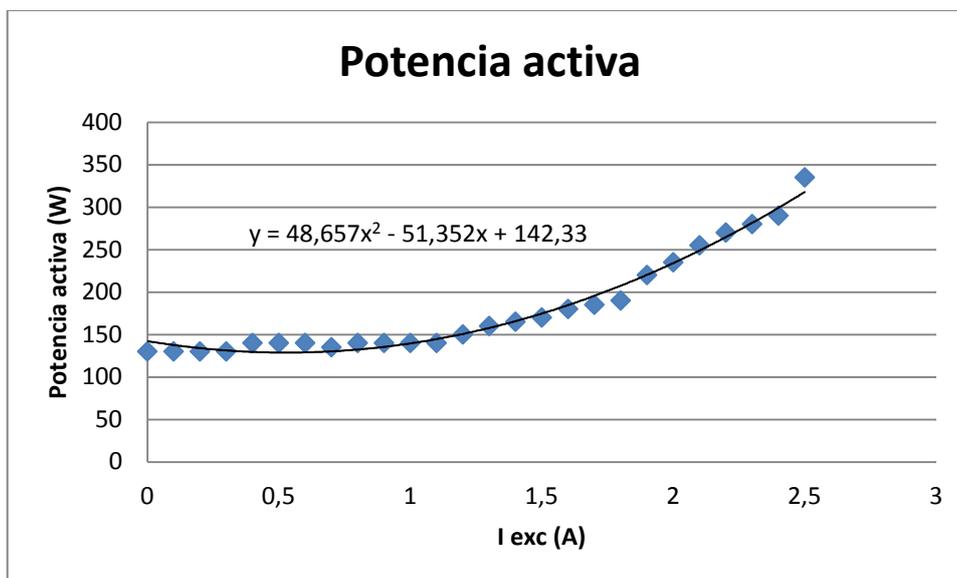


Figura 20: potencia activa de cortocircuito

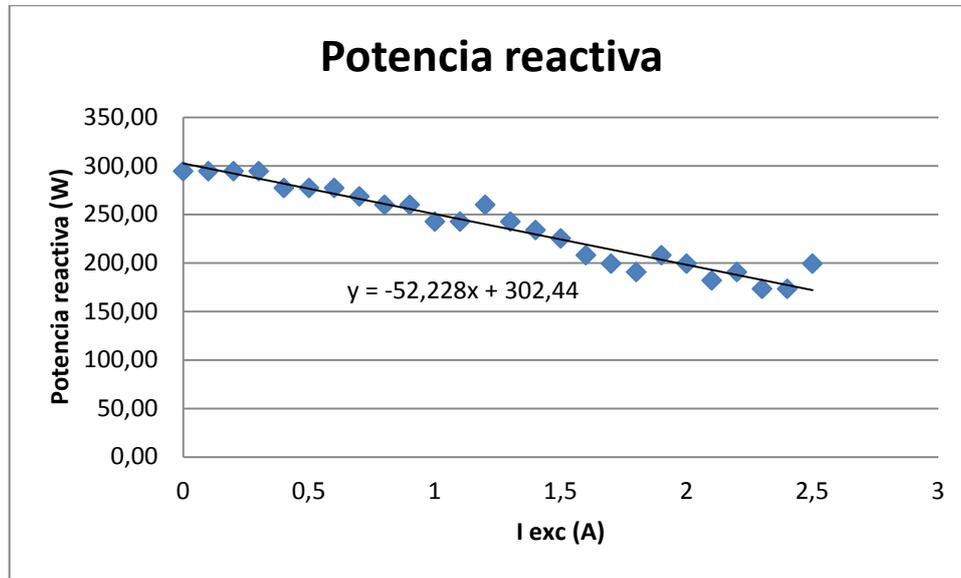


Figura 21: potencia reactiva de cortocircuito

Como ya se ha comentado, la intensidad de cortocircuito medida ha de ser corregida por motivo de las variaciones de velocidad. Para este fin se han tomado datos, Tabla 5, para establecer las tendencias de como varía la intensidad de cortocircuito en función de la velocidad de giro. Se han representado en la Figura 22.

		9Hz	10Hz	11Hz	12Hz	Pendiente línea de tendencia
0,5 A (I _{exc})	rpm	265	297	326	355	0,0137
	I _{cc} (A)	5,5	6	6,2	6,8	
1 A (I _{exc})	rpm	256	288	317	345	0,0234
	I _{cc} (A)	10,8	11,5	12	12,95	
1,5 A (I _{exc})	rpm	241	272	300	330	0,0332
	I _{cc} (A)	14,7	15,7	16,8	17,6	

Tabla 5: variación de I_{cc} en función de la velocidad de giro

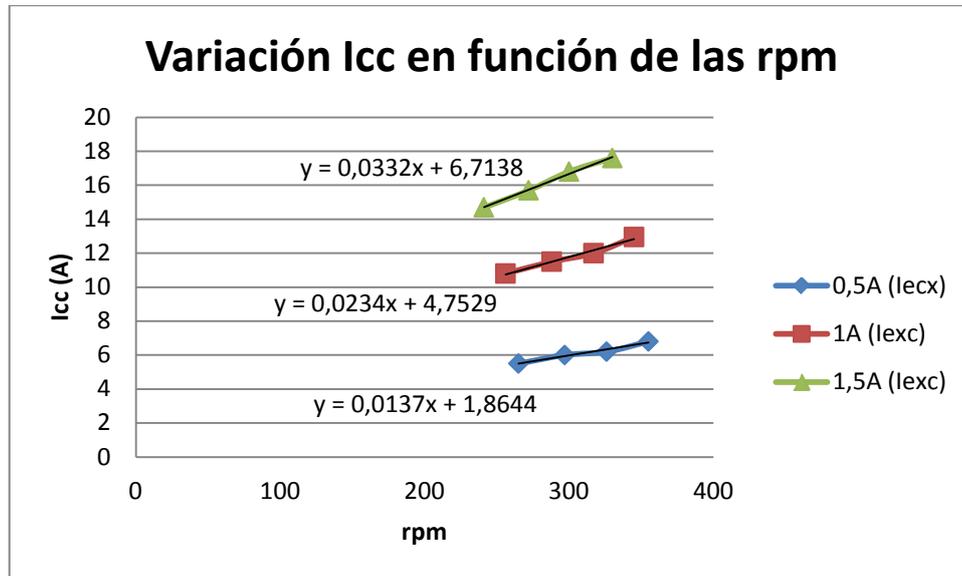


Figura 22: variación de Icc en función de la velocidad de giro

En la Figura 23 se establece una nueva línea de tendencia para la pendiente de las rectas representadas en la Figura 22.

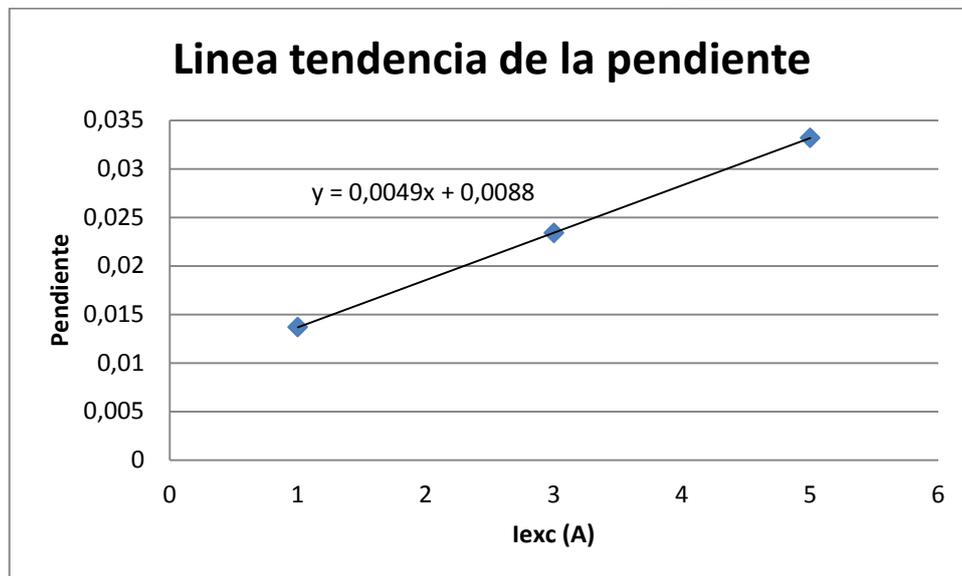


Figura 23: tendencia de la pendiente de corrección



Una vez establecidos todos los parámetros anteriores, se calcula la pendiente (con la línea de tendencia de la Figura 23) para cada valor de intensidad de excitación. Con esa pendiente calculada se obtiene el valor de la intensidad con el siguiente procedimiento:

Si rpm medidas \neq 300 rpm:

$$I_{cc.corregida} = I_{cc.medida} + (300 - \omega.medida) \cdot Pendiente$$

Los valores de intensidad de cortocircuito corregida por variación de velocidad se exponen en la Tabla 6 y se representan en la Figura 24. En los datos obtenidos se observa una curva más regular.

Corrección por variación de velocidad				
Iexc (A)	Icc (A)	Pendiente	rpm medidas	Icc corregida (A)
0	0,68	0,00390	300	0,680
0,1	1,30	0,00585	300	1,300
0,2	2,50	0,00780	300	2,500
0,3	3,45	0,00975	300	3,453
0,4	5,10	0,01170	299	5,118
0,5	6,05	0,01365	297	6,090
0,6	7,05	0,01560	295	7,121
0,7	8,30	0,01755	294	8,409
0,8	9,30	0,01950	292	9,457
0,9	10,15	0,02145	290	10,365
1	11,60	0,02340	288	11,885
1,1	12,45	0,02535	285	12,820
1,2	13,80	0,02730	313	13,454
1,3	15,10	0,02925	310	14,819
1,4	15,60	0,03120	306	15,407
1,5	16,30	0,03315	302	16,223
1,6	17,10	0,03510	298	17,168
1,7	18,00	0,03705	293	18,244
1,8	18,60	0,03900	288	19,052
1,9	19,92	0,04095	313	19,386
2	20,72	0,04290	308	20,390
2,1	20,92	0,04485	302	20,826
2,2	21,33	0,04680	297	21,487
2,3	21,44	0,04875	291	21,867
2,4	21,55	0,05070	286	22,260
2,5	23,47	0,05265	311	22,877

Tabla 6: corrección por variación de velocidad

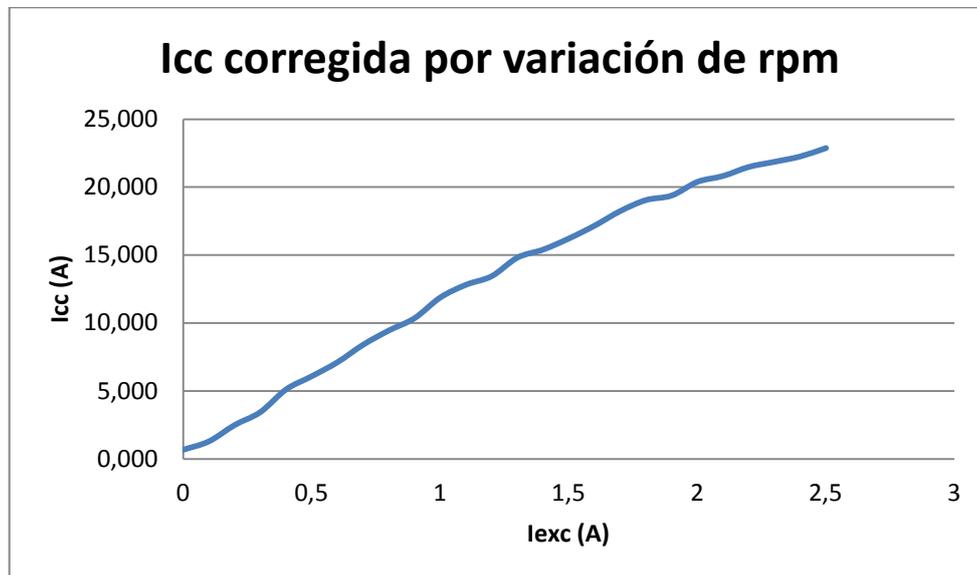


Figura 24: I_{cc} corregida por variación de velocidad

Destacar que para la potencia activa y reactiva no se ha efectuado el mismo procedimiento de corrección debido a que los instrumentos de medida no tienen la resolución necesaria para detectar la influencia de las variaciones de velocidad en dichas variables. Se ha optado como mejor método establecer una línea de tendencia con los valores tomados originalmente.

2.5 MÉTODO DE MEDICIÓN DE POTENCIA

Para realizar la medición de potencia consumida por el motor, tanto activa como reactiva, se ha empleado el método Aron o principio de los dos vatímetros. Este método es el más conveniente, teniendo en cuenta las características del sistema, trifilar y equilibrado.

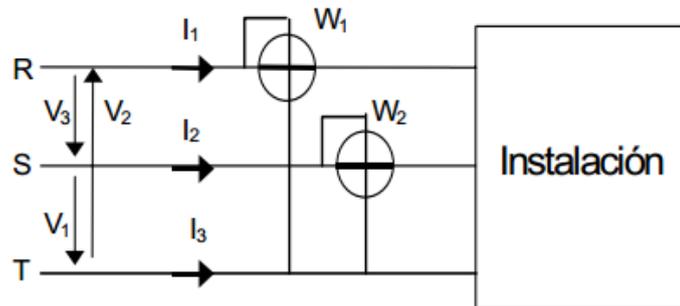


Figura 25: conexión de los vatímetros método de Aron

La potencia activa vendrá dada por la expresión:

$$\begin{aligned}
 P &= W_1 + W_2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (-v_2 \cdot i_1) \cdot dt + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (v_1 \cdot i_2) \cdot dt = \\
 &= V_2 \cdot I_1 \cdot \cos(\widehat{-\vec{V}_2; \vec{I}_1}) + V_1 \cdot I_2 \cdot \cos(\widehat{\vec{V}_1; \vec{I}_2})
 \end{aligned}$$

Realizando el diagrama vectorial, Figura 26:

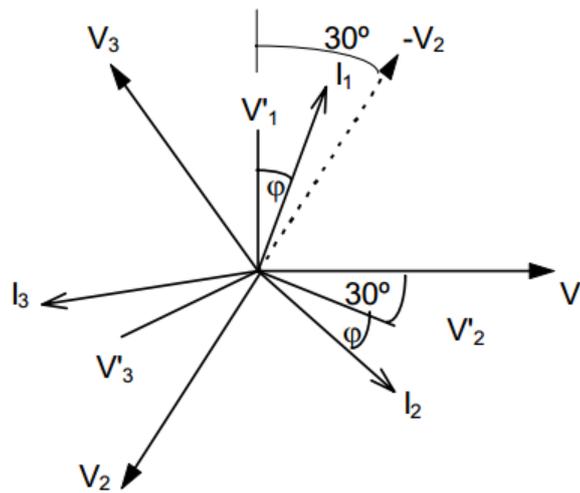


Figura 26: diagrama vectorial medición de potencia

Puede comprobarse que:

$$(\widehat{-\vec{V}_2; \vec{I}_1}) = 30 - \varphi$$



$$(\vec{V}_1; \vec{I}_2) = 30 + \varphi$$

Por ser un sistema equilibrado, los módulos son iguales.

$$I_1 = I_2 = I_3 = I ; V_1 = V_2 = V_3 = V$$

Por lo tanto se deduce:

$$\begin{aligned} P &= V \cdot I \cdot \cos(30 - \varphi) + V \cdot I \cdot \cos(30 + \varphi) = 2 \cdot V \cdot I \cdot \cos(30) \cdot \cos(\varphi) \\ &= \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi) \end{aligned}$$

Cuando una lectura negativa no pueda efectuarse debido al que el vatímetro no sea capaz de dar lecturas negativas, se puede recurrir a cambiar la polaridad de una de las bobinas con lo que la lectura dará positiva pero se debe tener en cuenta su verdadero signo negativo.

A partir de las lecturas de los dos vatímetros se puede determinar, en sistemas equilibrados, el factor de potencia según se indica a continuación.

$$\text{Sabiendo que: } P = W_1 + W_2 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Calculando la diferencia de las dos lecturas:

$$\begin{aligned} W_1 - W_2 &= V \cdot I \cdot \cos(30 - \varphi) - V \cdot I \cdot \cos(30 + \varphi) = 2 \cdot V \cdot I \cdot \sin(30) \cdot \sin(\varphi) \\ &= V \cdot I \cdot \sin(\varphi) \end{aligned}$$

Dividiendo la diferencia de lecturas entre la suma:

$$\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} = \frac{V \cdot I \cdot \sin(\varphi)}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)} = \frac{\tan(\varphi)}{\sqrt{3}}$$

Y finalmente:

$$\tan(\varphi) = \frac{\sqrt{3} \cdot (W_1 - W_2)}{W_1 + W_2}$$

La potencia reactiva en un circuito trifásico equilibrado es: $Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin(\varphi)$

Y como se ha deducido anteriormente: $W_1 - W_2 = V \cdot I \cdot \sin(\varphi)$



Por tanto: $Q = \sqrt{3} \cdot (W_1 - W_2)$

Esto significa que la potencia reactiva, en un sistema trifásico equilibrado, puede determinarse instalando dos vatímetros y multiplicando por $\sqrt{3}$ la diferencia de sus lecturas.

2.6 RESOLUCIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Para obtener el circuito equivalente tipo Thévenin de la máquina síncrona, Figura 27, es necesario obtener el valor de la resistencia y de la reactancia síncrona.

En la Figura 27, ω es la velocidad de rotación, ϕ_e es el flujo de excitación, X_s es la reactancia síncrona, R es la resistencia del arrollamiento del inducido e I es la intensidad que circula por dicho circuito.

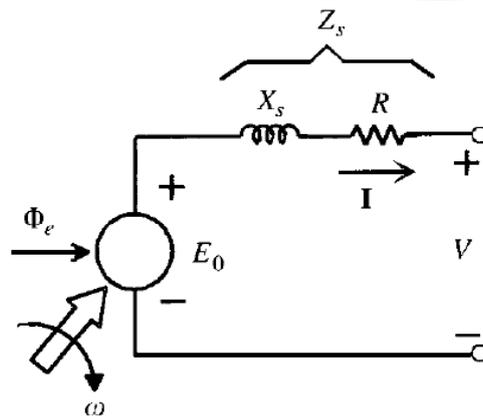


Figura 27: esquema del circuito equivalente de Thévenin

Para empezar a determinar las variables implicadas es necesario medir la resistencia. Dicha medición no es posible realizarla directamente con un polímetro dado que se obtiene una



medición incorrecta por incorporar a la medida la resistencia eléctrica existente en las conexiones polímetro-bobina.

Por tanto se ha optado por hacer pasar una intensidad conocida a través del devanado y medir la caída de tensión. De esta manera mediante la ley de Ohm se determina la resistencia equivalente del devanado (Tabla 7).

I (A)	V (mV)	Req _{20°C} (mΩ)
1	23,6	23,6

Tabla 7: cálculo de la resistencia equivalente del devanado

La resistencia equivalente medida tiene en cuenta los arrollamientos de las tres fases. Al estar conectadas en triángulo, se comporta como dos resistencias en serie y a su vez en paralelo con otra (Figura 28). Al ser un sistema equilibrado, los tres arrollamientos tienen la misma resistencia.

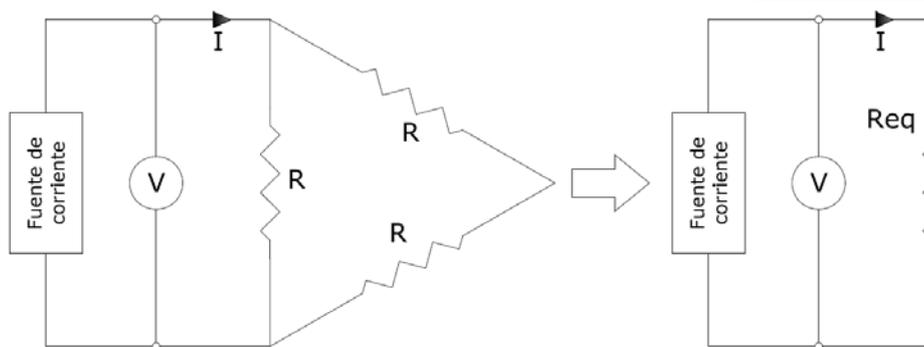


Figura 28: conexiones realizadas para la medida de la resistencia equivalente

Calculando la resistencia de cada una de las fases a partir de la resistencia equivalente:

$$\frac{1}{Req_{20^{\circ}\text{C}}} = \frac{1}{R_{20^{\circ}\text{C}}} + \frac{1}{2R_{20^{\circ}\text{C}}}; \quad R_{20^{\circ}\text{C}} = 0,0354 \Omega$$



Cabe destacar que el valor medido de resistencia corresponde con una temperatura del cobre cercana a la ambiente, es decir unos 20°C. Durante el funcionamiento nominal el devanado del inducido se encontrará a una temperatura mayor, unos 80°C.

Dicha diferencia e temperatura provoca un aumento en el valor de la resistencia. Se toma como coeficiente de aumento de la resistencia por temperatura $\alpha = 3,81 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

$$R_{80^{\circ}\text{C}} = R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$R_{80^{\circ}\text{C}} = 0,0354 \cdot (1 + 3,81 \cdot 10^{-3} \cdot 60) = 0,0435 \Omega$$

Con la tensión de vacío y la intensidad de cortocircuito de los ensayos anteriores se calcula el valor de la impedancia síncrona Z_s y con el valor de la impedancia y la resistencia medida se obtiene la reactancia síncrona y la fase de la impedancia. Los valores obtenidos se adjuntan en la Tabla 8.

$$Z_s = \frac{E_0}{I_{cc}/\sqrt{3}}; \quad X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2}; \quad \varphi = \frac{X_s}{R}$$



Resolución del circuito equivalente de Thévenin						
I_{exc} (A)	E_0 (V)	I_{cc} (A)	Z_s (Ω)	R_s (Ω)	X_s (Ω)	$\cos(\varphi)$
0	0,06	0,680	0,1528	0,0435	0,1465	0,285
0,1	0,11	1,300	0,1466	0,0435	0,1400	0,297
0,2	0,17	2,500	0,1178	0,0435	0,1095	0,369
0,3	0,24	3,453	0,1204	0,0435	0,1123	0,361
0,4	0,32	5,118	0,1083	0,0435	0,0992	0,402
0,5	0,38	6,090	0,1081	0,0435	0,0989	0,403
0,6	0,46	7,121	0,1119	0,0435	0,1031	0,389
0,7	0,54	8,409	0,1112	0,0435	0,1024	0,391
0,8	0,6	9,457	0,1099	0,0435	0,1009	0,396
0,9	0,68	10,365	0,1136	0,0435	0,1050	0,383
1	0,76	11,885	0,1108	0,0435	0,1019	0,393
1,1	0,82	12,820	0,1108	0,0435	0,1019	0,393
1,2	0,88	13,454	0,1133	0,0435	0,1046	0,384
1,3	0,95	14,819	0,1110	0,0435	0,1022	0,392
1,4	1	15,407	0,1124	0,0435	0,1037	0,387
1,5	1,07	16,223	0,1142	0,0435	0,1056	0,381
1,6	1,11	17,168	0,1120	0,0435	0,1032	0,388
1,7	1,17	18,244	0,1111	0,0435	0,1022	0,392
1,8	1,22	19,052	0,1109	0,0435	0,1020	0,392
1,9	1,27	19,386	0,1135	0,0435	0,1048	0,383
2	1,32	20,390	0,1121	0,0435	0,1033	0,388
2,1	1,36	20,826	0,1131	0,0435	0,1044	0,385
2,2	1,39	21,487	0,1120	0,0435	0,1033	0,388
2,3	1,42	21,867	0,1125	0,0435	0,1037	0,387
2,4	1,44	22,260	0,1120	0,0435	0,1033	0,388
2,5	1,47	22,877	0,1113	0,0435	0,1024	0,391

Tabla 8: resolución del circuito equivalente



Capítulo 3 ESTUDIO DEL GENERADOR MODIFICADO

Una vez estudiado y ensayado el alternador original de rotor bobinado, la idea es modificar dicho rotor y sustituir el circuito inductor por imanes permanentes.

Como consecuencia de no disponer los mejores medios, ni los componentes más apropiados para realizar la modificación, no se podrá construir una máquina óptima. Por tanto se ha dado prioridad a la sencillez del modelo, a la facilidad para encontrar los componentes necesarios y a la rapidez de ejecución.

Posteriormente, en el Capítulo 6, se tratará de estimar los valores que se obtendrían si se hubiese podido ejecutar la modificación con mejores recursos y de una manera óptima.

3.1 SELECCIÓN DE IMANES Y MODIFICACIÓN DEL ROTOR

La primera acción realizada en la modificación del rotor es la búsqueda de imanes comerciales apropiados. Se ha optado por imanes de neodimio que poseen propiedades muy superiores a los imanes tradicionales. Aunque la principal desventaja de estos imanes es la relativamente baja temperatura de funcionamiento, entre 80 y 200 °C, en la máquina estudiada no se sobrepasará dicha temperatura.

Para efectuar la selección del imán, se ha tenido en cuenta la longitud de la máquina (33 mm), el diámetro interno del estator (105 mm) y el paso polar del rotor (30°). Según la

publicación técnica [DUBO04] la anchura de los imanes ha de situarse en torno a un 70% del paso polar.

Con todos estos parámetros, el imán elegido por ser más adecuado (a pesar de que no es posible cumplir la relación del 70% del paso polar) es el de dimensiones 33x8x7 mm con magnetización de tipo axial. En Figura 29 se indican las principales características de este imán. El proveedor de los imanes de aleación Nd-Fe-B es *AimanGz*.



Calidad	Remanencia		Coercitividad				Producto energético		Temperatura máxima de empleo
	Br		bHc		iHc		(BxH)max		
	KG	T	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m3	
N35	11.7-12.2	1.17-1.201	10.9	868	≥12	≥955	33-36	263-287	≤80

Figura 29: propiedades del imán elegido [www.aimangz.es]/ [www.demacmotor.net]

Para poder acoplar los imanes al rotor se ha decidido tornearse los polos inductores originales e incorporar un tubo de acero estándar [$\varnothing_{ext} = 88,9 \text{ mm}$; $e = 3,2 \text{ mm}$] a modo de yugo del rotor. El tubo va soldado al eje y en la superficie del yugo van pegados los imanes con adhesivo *Araldite* apropiado para este cometido. En la Figura 30 se observan las dimensiones calculadas y en Figura 31 el proceso de fabricación y el resultado final.

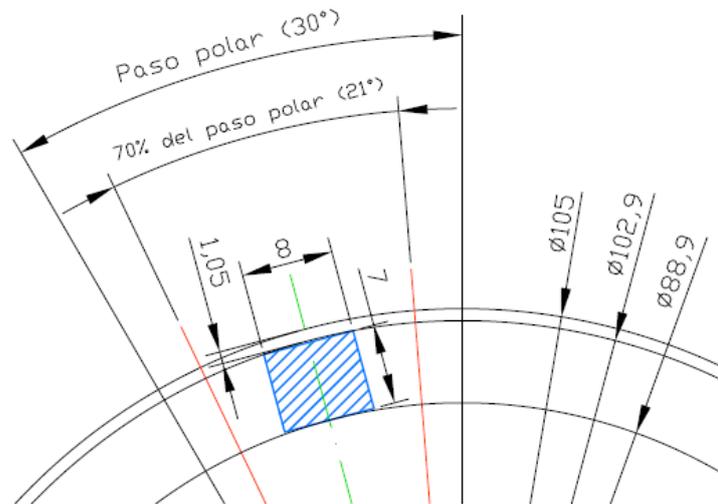


Figura 30: dimensiones establecidas para el diseño



Figura 31: torneado del rotor, pegado de imanes y aspecto final



3.2 ENSAYO DE TENSIÓN DE VACÍO

Para realizar el análisis de la máquina incorporando los imanes permanentes, debido a que en este caso la excitación es contante, se ha ensayado variando el régimen de velocidades de giro.

El esquema de conexiones es igual que en la Figura 12, pero eliminando la fuente de corriente que generaba el flujo de excitación.

Los datos obtenidos en las mediciones se exponen en la Tabla 9. Se indican la tensión de vacío (E_0), la potencia activa (P_0) y reactiva (Q_0) y el factor de potencia $\cos(\varphi)$, todo ello en función de la velocidad de rotación del generador (ω real).

Ensayo de tensión de vacío (imanes permanentes)						
ω (rpm)	E_0 (V)	W_1 (W)	W_2 (W)	P_0 (W)	Q_0 (W)	$\cos \varphi$
180	0,51	90	20	110	121,24	0,67
210	0,59	95	15	110	138,56	0,62
240	0,68	105	-15	90	207,85	0,40
270	0,76	110	-20	90	225,17	0,37
300	0,84	120	-25	95	251,15	0,35
330	0,93	125	-30	95	268,47	0,33
360	1,01	130	-30	100	277,13	0,34

Tabla 9: mediciones de tensión de vacío (imanes permanentes)

En la Figura 32 se representa la tensión de vacío y se observa como varia linealmente con tendencia creciente a medida que aumenta la velocidad de rotación.

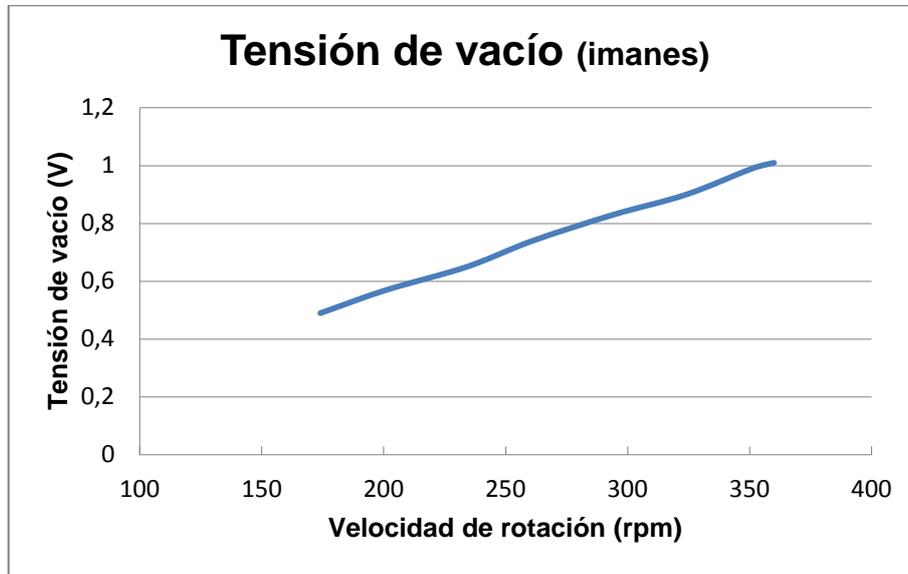


Figura 32: tensión de vacío (imanes permanentes)

Aplicando el procedimiento de comprobación, de tensión y de frecuencia, realizado con el osciloscopio, se obtiene la onda de generación de la Figura 33. La tensión de generación medida por ambos métodos coinciden y la frecuencia de generación es 29,41 Hz.

$$\frac{2,34 \text{ V}}{2} \cong \sqrt{2} \cdot 0,84 \text{ V}$$

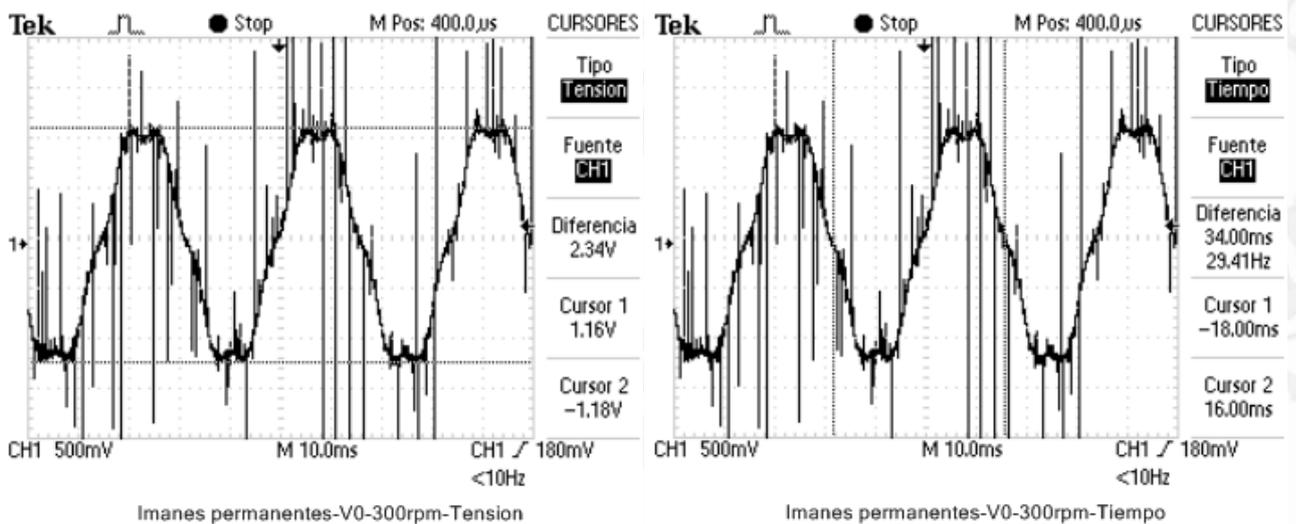


Figura 33: onda generada a 300 rpm



3.3 ENSAYO DE INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO

En el ensayo de cortocircuito también se ha medido la intensidad generada en función de la velocidad de rotación (la intensidad de excitación es fija condicionada por los imanes permanentes).

En este caso el esquema de conexiones es similar al de la Figura 18, eliminando la fuente de corriente que generaba el flujo de excitación.

En la Tabla 10 se adjuntan los datos obtenidos en el ensayo. Se indica la intensidad de cortocircuito (I_{cc}), la potencia activa (P_0) y reactiva (Q_0) y el factor de potencia $\cos(\varphi)$, todo ello en función de la velocidad de rotación (ω).

Ensayo de cortocircuito (imanes permanentes)						
ω (rpm)	I_{cc} (A)	W_1 (W)	W_2 (W)	P_0 (W)	Q_0 (W)	$\cos \varphi$
180	9,72	80	30	110	86,60	0,79
210	11,18	90	25	115	112,58	0,71
240	12,64	95	25	120	121,24	0,70
270	14,10	100	25	125	129,90	0,69
300	15,56	110	30	140	138,56	0,71
330	17,03	120	30	150	155,88	0,69
360	18,49	135	30	165	181,87	0,67

Tabla 10: mediciones de intensidad de cortocircuito (imanes permanentes)

La representación de los valores de intensidad de cortocircuito obtenidos se observan en la Figura 34. Presenta una tendencia lineal ascendente, proporcional a la velocidad de rotación.

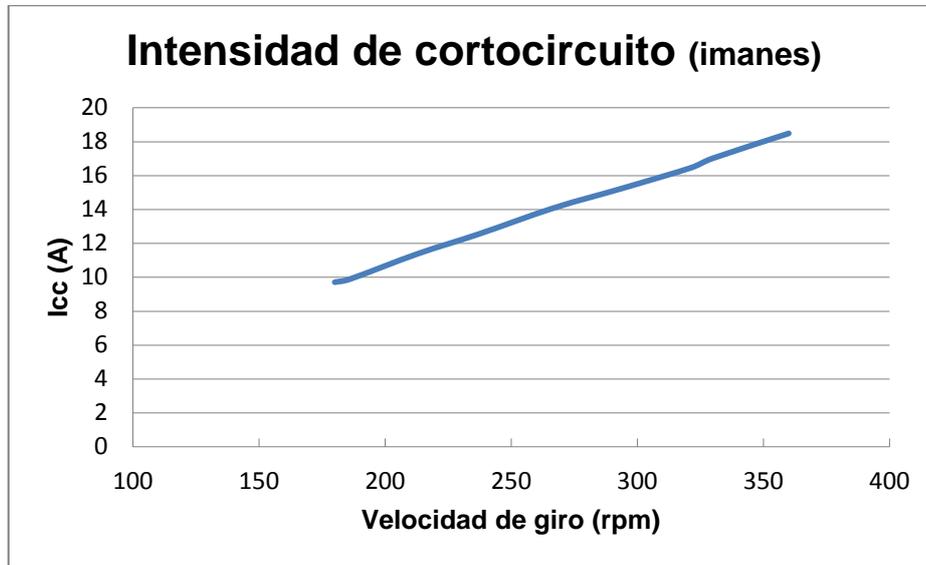


Figura 34: intensidad de cortocircuito (imanes permanentes)

3.4 RESOLUCIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Una vez obtenidos los valores de la tensión de vacío y la intensidad de cortocircuito, en la Tabla 11 se resuelve el circuito equivalente de Thévenin de igual manera que en Parte I - 2.6.

$$Z_s = \frac{E_0}{I_{cc}/\sqrt{3}} ; \quad X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2} ; \quad \varphi = \frac{X_s}{R}$$

Resolución del circuito equivalente de Thévenin						
ω (rpm)	E_0 (V)	I_{cc} (A)	Z_s (Ω)	R_s (Ω)	X_s (Ω)	$\cos(\varphi)$
180	0,51	9,72	0,0906	0,0435	0,0795	0,4800
210	0,59	11,18	0,0918	0,0435	0,0808	0,4739
240	0,68	12,64	0,0927	0,0435	0,0819	0,4693
270	0,76	14,10	0,0934	0,0435	0,0827	0,4657
300	0,84	15,56	0,0940	0,0435	0,0833	0,4628
330	0,93	17,03	0,0945	0,0435	0,0839	0,4605
360	1,01	18,49	0,0949	0,0435	0,0843	0,4585

Tabla 11: resolución circuito equivalente (imanes permanentes)



Capítulo 4 COMPARACIÓN DE AMBOS MODELOS

Para comparar ambos modelos de maquina ensayados, con bobinado inductor (Parte I - Capítulo 2) y con imanes permanentes (Parte I - Capítulo 3), se va a estudiar el par máximo de cada uno de ellos, sus pérdidas y por último el rendimiento de cada generador.

4.1 PAR MÁXIMO DE FRENADO

El valor del par máximo de frenado que opone el generador se obtiene a partir de la potencia consumida por el motor medida en los ensayos.

Se asume que la potencia consumida por el motor durante el ensayo de vacío incluye las pérdidas del motor y las perdidas del generador. Por otro lado, la potencia consumida durante el ensayo de cortocircuito se considera que incluye las perdidas del motor, las del generador y la potencia necesaria para aportar el par de frenado que opone el generador.

Por tanto la potencia de frenado se puede calcular como la diferencia entre la potencia activa consumida por el motor en el ensayo de cortocircuito y la potencia activa consumida en el ensayo de vacío.

El punto donde estudia la potencia pico de frenado corresponde con el valor de intensidad de excitación que provoca la saturación del la maquina en el modelo de rotor bobinado ($I_{exc} = 2,5 \text{ A}$ y 300rpm) y en el caso de imanes permanentes únicamente a la velocidad de giro de 300rpm (no existe intensidad de excitación).

Para la obtención del valor de la potencia activa de cortocircuito en el modelo de rotor bobinado se ha empleado la ecuación de tendencia de la Figura 20. Dicho valor es



necesario efectuarlo debido a la dificultad para regular la velocidad de rotación del conjunto como se ha explicado en Parte I - 2.4. El cálculo se expone a continuación:

$$P_{cc} = 48,657 \cdot I_{exc}^2 - 51,352 \cdot I_{exc} + 142,33$$

Para una $I_{exc} = 2,5A$: $P_{cc} = 318 W$

En la Tabla 12 se expresan los valores calculados de la potencia pico de frenado.

	P_0 (W)	P_{cc} (W)	Potencia de frenado (W)	Par de frenado (Nm)
Rotor bobinado	137	318	181	5,76
Imanes permanentes	95	140	45	1,43

Tabla 12: cálculo de potencia pico de frenado

A partir de la potencia pico de frenado y conociendo la velocidad de giro (300 rpm) se calcula el par pico de frenado.

$$M (Nm) = \frac{P(W)}{\omega(rad/s)}$$

Se observa como el rotor bobinado ofrece un mayor par de frenado debido a que el campo magnético que puede crear mediante la intensidad de excitación es mayor que el campo creado por los imanes. Este hecho es debido a que el modelo fabricado de imanes se ha construido con recursos y materiales limitados y fácilmente disponibles en el mercado, por lo que no se ha podido construir un modelo optimizado.

4.2 ESTABLECIMIENTO DEL VALOR NOMINAL

Se considera el valor nominal como el punto en el que se obtiene el mayor rendimiento de la máquina.



A partir del punto de máximo par de frenado calculado en Parte I - 4.1, y derivando la expresión del rendimiento dada en Parte I - 4.4, se obtiene el valor de la potencia de frenado para la cual se obtiene el rendimiento máximo.

En el caso de rotor de imanes permanentes:

$$\frac{d}{dP_{\text{útil}}} \left(\frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + P_{\text{Cu}}} \right) = 0$$

En el caso de rotor bobinado:

$$\frac{d}{dP_{\text{útil}}} \left(\frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + P_{\text{Cu}} + P_{\text{inductor}}} \right) = 0$$

En la ecuación del rendimiento la potencia de pérdidas en el cobre puede ser sustituida por una expresión en función de la potencia de frenado ya que la intensidad que circula por el bobinado inducido varía linealmente con el par de frenado ofrecido.

En el caso de rotor de imanes permanentes:

$$I_{\text{generador}} = \gamma \cdot P_{\text{útil}}$$

Donde:

$$\gamma = 8,98/45 = 0,19963$$

$$\frac{d}{dP_{\text{útil}}} \left(\frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + 3 \cdot R_{\text{fase}} \cdot (0,19963 \cdot P_{\text{útil}})^2} \right) = 0$$

En el caso de rotor bobinado:

$$I_{\text{generador}} = \gamma \cdot P_{\text{útil}}$$

Donde:

$$\gamma = 13,2/181 = 0,07298$$

$$\frac{d}{dP_{\text{útil}}} \left(\frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + 3 \cdot R_{f\text{ase}} \cdot (0,07298 \cdot P_{\text{útil}})^2 + P_{\text{inductor}}} \right) = 0$$

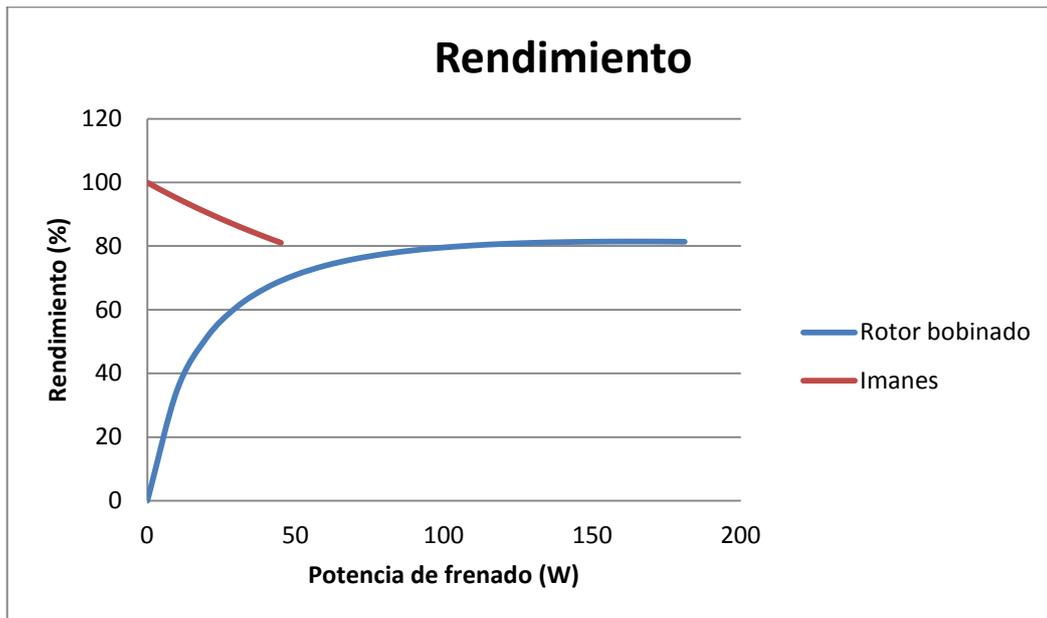


Figura 35: curvas de rendimiento

En el caso de rotor bobinado, el máximo rendimiento se obtiene con un valor de potencia de frenado de 165 W mientras que en el modelo de imanes permanentes, el rendimiento presenta una tendencia decreciente a medida que aumenta la potencia de frenado.

Debido a que el rendimiento no presenta una máximo en el modelo de imanes permanentes, el valor nominal de este modelo se ha fijado siguiendo una relación frente a la potencia máxima de frenado similar a la del modelo de rotor bobinado.

$$\frac{P_{\text{nominal-bobinado}}}{P_{\text{pico-bobinado}}} = \frac{P_{\text{nominal-iman}}}{P_{\text{pico-iman}}}$$

La Tabla 13 recoge el cálculo de dicho punto de valor nominal.



	Punto de máximo par		
	Potencia pico frenado (W)	Par pico frenado (Nm)	I generador (A)
Rotor bobinado	181	5,76	22,88
Imanes permanentes	45	1,43	15,56

	Punto nominal		
	Potencia nominal frenado (W)	Par nominal frenado (Nm)	I generador (A)
Rotor bobinado	160	5,09	20,33
Imanes permanentes	41,25	1,31	14,26

Tabla 13: cálculo del valor nominal

4.3 PÉRDIDAS EN EL COBRE

Como simplificación se tendrán en cuenta únicamente las pérdidas en el cobre ya que son las más importantes y las que más influyen a la hora de calcular el rendimiento.

Para obtener el valor de las pérdidas en el cobre es necesario el valor de la resistencia del inducido y la intensidad que circula por ella.

$$P_{Cu} = 3 \cdot R_{fase} \cdot I^2$$

En la Tabla 14 se incluye el cálculo de las pérdidas en el cobre en el punto de funcionamiento nominal y en el que se obtiene el par máximo de frenado.

	Pérdidas Cu (W)	
	Punto nominal	Punto de par pico
Rotor bobinado	17,98	22,77
Imanes permanentes	8,85	10,53

Tabla 14: cálculo de pérdidas en el cobre



En el caso del modelo de rotor bobinado, existe una potencia consumida en el bobinado inductor necesaria para generar el campo magnético. Como ya se ha mencionado, el punto de funcionamiento del alternador bobinado coincide con una intensidad de excitación de 2,5A (punto de saturación del generador).

La resistencia del bobinado inductor medida es de 3Ω .

$$P_{inductor} = I_{exc}^2 \cdot R_{inductor} = 2,5^2 \cdot 3 = 18,75 W$$

4.4 RENDIMIENTO

Para el cálculo del rendimiento se enfoca la máquina como un motor donde la potencia útil es la potencia de frenado aplicada.

Por tanto, la expresión que determina el rendimiento está compuesta en el numerador por dicha potencia útil y en el denominador por la suma de la potencia útil más las pérdidas en el cobre.

A modo de simplificación se han despreciado las pérdidas en el hierro por influir en menor medida en el valor de rendimiento.

$$\eta = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{total}} = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{\acute{u}til} + P_{Cu}}$$

En el caso del modelo con rotor bobinado el término de las pérdidas debe incluir la potencia inyectada en el bobinado inductor ya que es una potencia necesaria para hacer funcionar el generador y se consideran pérdidas.

$$\eta = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{total}} = \frac{P_{\acute{u}til}}{P_{\acute{u}til} + P_{Cu} + P_{inductor}}$$



	Rendimiento (%)	
	Punto nominal	Punto de par pico
Rotor bobinado	81,41	81,34
Imanes permanentes	82,34	81,04

Tabla 15: cálculo de rendimiento

La Tabla 15 muestra los resultados del cálculo de rendimiento para los modelos de rotor bobinado y de imanes permanentes en los puntos de funcionamiento nominal y de par máximo.

En la Figura 35 se observan las curvas de rendimiento tanto para el modelo de rotor bobinado como el de imanes permanentes. La diferencia sustancial en cuanto a tendencia de ambas curvas es debida al término de la potencia consumida en el devanado inductor.



Capítulo 5 CÁLCULO ANALÍTICO DEL MODELO DE IMANES PERMANENTES

En este capítulo se va a estudiar la generación de corriente eléctrica en el modelo modificado desde un punto de vista analítico. Permitirá comparar los resultados teóricos obtenidos con los datos de los ensayos de Parte I - Capítulo 3.

5.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL MODELO

Una vez construido el modelo se han tomado medidas de los parámetros geométricos involucrados en el proceso de generación de energía eléctrica, en la Tabla 16 se indican los valores.

Parámetro geométrico	Símbolo	Valor
Longitud	L	33 mm
Diámetro	D_g	105 mm
Nº pares de polos	p	6
Paso polar	τ_p	26,52 mm
Altura entrehierro	g	1,25 mm
Anchura imanes	b_m	8 mm
Altura imanes	h_m	7 mm
Altura yugo del rotor	h_{ry}	3,2 mm
Altura yugo del estator	h_{sy}	4 mm
Paso de ranura	τ_s	9,2 mm
Anchura de ranura	b_s	2,9 mm
Altura de ranura	h_s	10 mm
Anchura de diente	b_t	6,3 mm
Long. líneas campo yugo rotor	τ_{p-ry}	20,52 mm
Long. líneas campo yugo estator	τ_{p-sy}	28,97 mm

Tabla 16: parámetros geométricos del modelo

La Figura 36 muestra una representación gráfica de los parámetros geométricos anteriores.

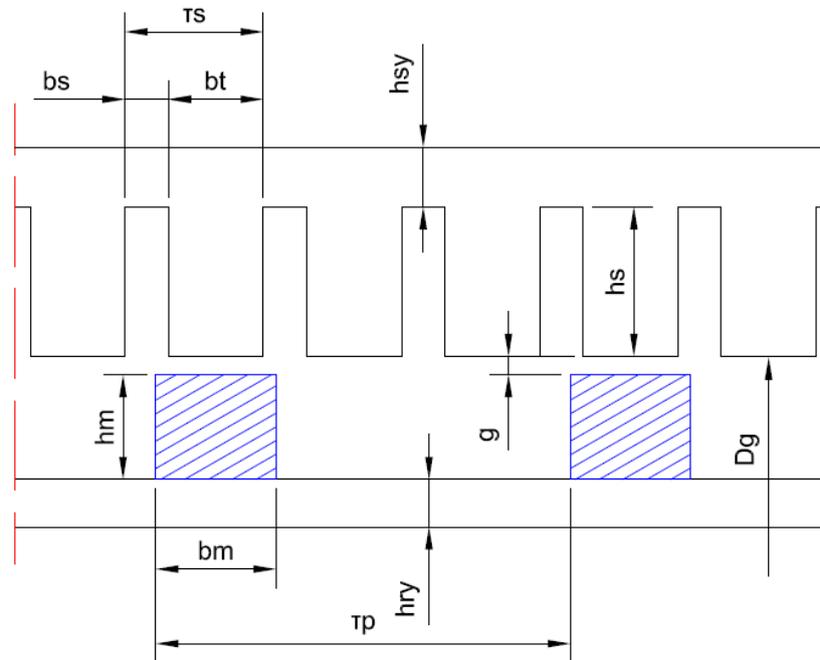


Figura 36: parámetros geométricos

5.2 RESOLUCIÓN DEL CIRCUITO MAGNÉTICO

Analizando el circuito magnético creado en el generador se obtiene el campo magnético en el entrehierro (B_g) que será necesario para el posterior cálculo de la fuerza electromotriz inducida en Parte I - 5.3.

A consecuencia de ser un estator ranurado y no liso (uniforme), el campo creado en la parte inferior de este no es constante sino que se incrementa justo debajo de los dientes y disminuye en la parte inferior de las ranuras.



Para simplificar el modelo y poder considerarlo como un estator liso, se define la longitud de entrehierro efectiva (g_{ef}).

$$g_{ef} = Kc \cdot \left(g + \frac{h_m}{\mu_{rm}} \right)$$

Siendo:

- μ_{rm} : permeabilidad magnética relativa de los imanes. Se supondrá un valor similar a la del vacío.

$$\begin{aligned} \mu_m &= 1,09\mu_0 \rightarrow \mu_{rm} = 1,09 \\ \mu_0 \text{ (permeabilidad en el vacío)} &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)} \end{aligned}$$

- Kc : factor de Carter que relaciona las magnitudes $B_{m\acute{a}x}$ y B_{med} del campo magnético creado en el entrehierro.

$$Kc = \frac{B_{m\acute{a}x}}{B_{med}}$$

$$Kc = \frac{\tau_s}{\tau_s - k \cdot b_s}$$

$$k = \frac{\pi}{2} \cdot \left\{ \operatorname{atan} \left(\frac{b_s}{2 \cdot \left(g + \frac{h_m}{\mu_{rm}} \right)} \right) - \frac{\left(g + \frac{h_m}{\mu_{rm}} \right)}{b_s} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{b_s}{2 \cdot \left(g + \frac{h_m}{\mu_{rm}} \right)} \right)^2 \right] \right\}$$

Realizando los cálculos, se obtienen los valores de la Tabla 17.

Parámetro	Valor
k	0,14757
Kc	1,04879
g_{ef} (mm)	8,04630

Tabla 17: cálculo de entrehierro efectivo

Para el cálculo del circuito magnético se han calculado las reluctancias de forma similar al procedimiento presentado en [DUBO04]. La Figura 37 muestra el modelado del circuito magnético y su equivalente asimilándolo a un esquema eléctrico convencional.

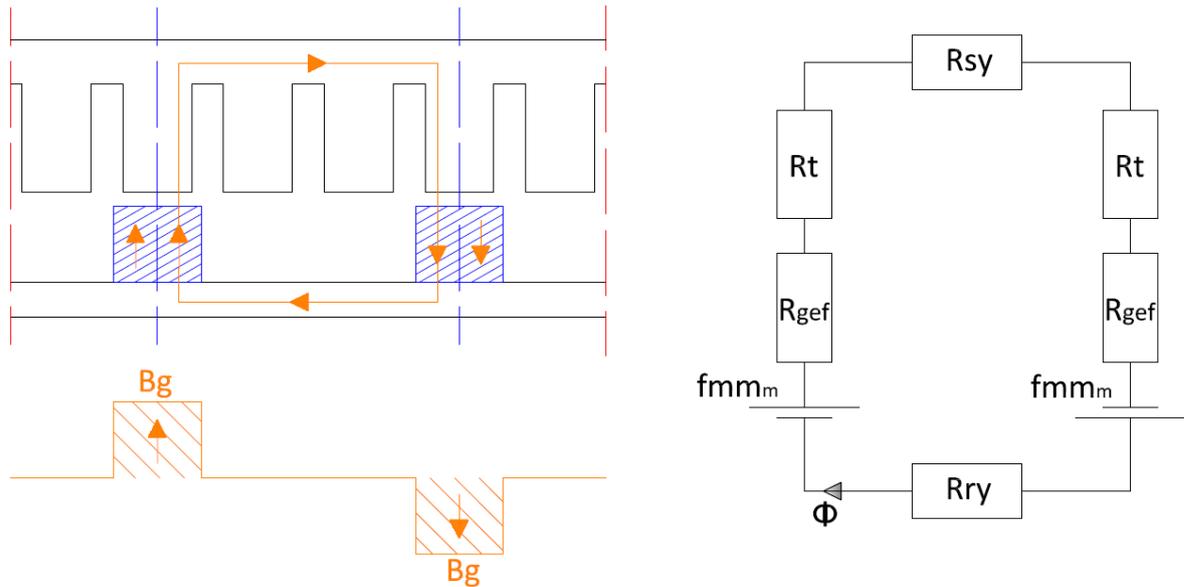


Figura 37: circuito magnético

Las consideraciones tenidas en cuenta para realizar el cálculo son las siguientes:

- Los imanes se modelan como una fuerza magnetomotriz en serie con una reluctancia. Esta reluctancia sumada a la del entrehierro da lugar a la reluctancia del entrehierro efectiva.
- Se asume una permeabilidad relativa del hierro del estator y de los dientes del estator (material que incorporaba el generador antes de la modificación) de $\mu_{r-sy} = 18.859,8$. Este valor se obtiene de la Figura 38, en la curva de hierro al silicio y con un valor inicial de $B = 1,185$ T (corresponde con el valor de densidad magnética remanente del imán).

$$\mu = \frac{B}{H} \left(\frac{Wb}{A \cdot m} \right); \quad \mu_r = \mu / \mu_0$$



El valor final de la permeabilidad relativa del yugo del estator y de los dientes se obtendrá de un proceso iterativo calculando nuevos valores de la densidad magnética en esta zona.

- La permeabilidad relativa del yugo del rotor (tubo de acero estándar) se asume inicialmente como $\mu_{r-ry} = 992,6$. Este valor se obtiene de la Figura 38, en la curva de acero fundido y con un valor inicial de $B = 1,185$ T (corresponde con el valor de densidad magnética remanente del imán).

$$\mu = \frac{B}{H} \left(\frac{Wb}{A \cdot m} \right); \quad \mu_r = \mu / \mu_0$$

El valor final de la permeabilidad relativa del yugo del rotor se obtendrá de un proceso iterativo calculando nuevos valores de la densidad magnética en esta zona.

- La longitud de las líneas de campo que atraviesan el yugo del rotor y del estator se consideran iguales a la longitud media del recorrido que efectúan dichas líneas.

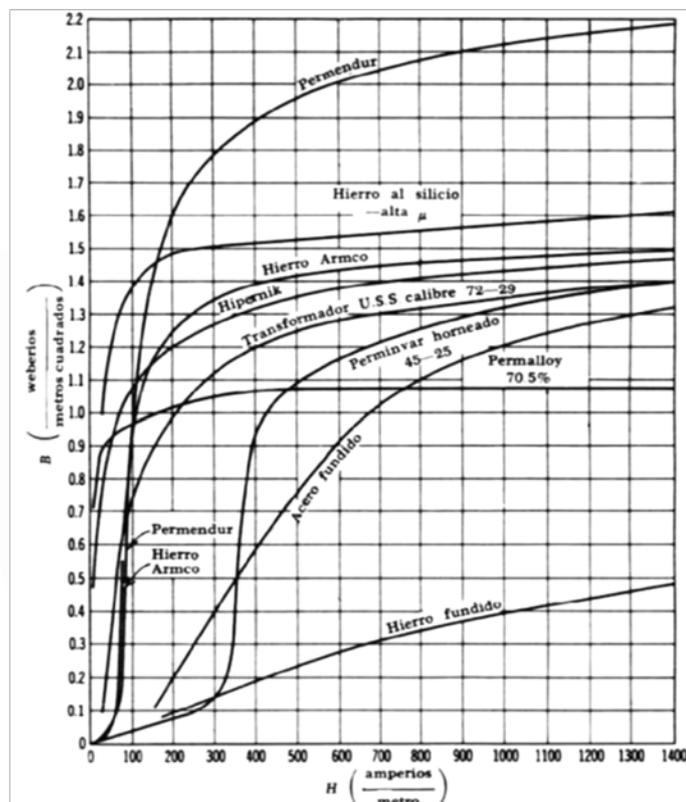


Figura 38: curva B-H de diversos materiales [KOSO91]



La Tabla 18 recoge las expresiones para obtener los valores de las reluctancias del circuito y la fuerza magnetomotriz generada por los imanes.

	Expresión
Fuerza magnetomotriz	$fmm_m = \frac{B_r}{\mu_m} \cdot h_m$
Reluctancia entrehierro efectiva	$R_{gef} = \frac{g_{ef}}{\mu_0 \cdot \left(b_m \cdot L/2\right)}$
Reluctancia dientes estator	$R_t = \frac{h_s}{\mu_{sy} \cdot \left(b_t \cdot L/2\right)}$
Reluctancia yugo estator	$R_{sy} = \frac{\tau_{p-sy}}{\mu_{sy} \cdot h_{sy} \cdot L}$
Reluctancia yugo rotor	$R_{ry} = \frac{\tau_{p-ry}}{\mu_{ry} \cdot h_{ry} \cdot L}$

Tabla 18: expresiones para el cálculo del circuito magnético

La ecuación que relaciona los parámetros descritos en el circuito es la siguiente:

$$2 \cdot fmm_m = (2 \cdot R_{gef} + 2 \cdot R_t + R_{sy} + R_{ry}) \cdot \phi$$

El flujo que circula por el circuito magnético se calcula a partir de la onda cuadrada equivalente de amplitud B_g que se observa en la Figura 37.

$$\phi = \frac{\phi_m}{2} = \frac{1}{2} \cdot b_m \cdot L \cdot B_g$$



	Parámetro	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3
Yugo del rotor	B _{ry} (T)	1,185	1,180	1,180
	H _{ry} (A/m)	950	950	950
	μ (H/m)	0,001247	0,001242	0,001242
	μ _r	992,62	988,54	988,51
Yugo del estator	B _{sy} (T)	1,185	0,944	0,944
	H _{sy} (A/m)	50	25	25
	μ (H/m)	0,02370	0,03776	0,03776
	μ _r	18859,86	30051,72	30050,78
Dientes del estator	B _t (T)	1,185	1,379	1,379
	H _t (A/m)	50	100	100
	μ (H/m)	0,02370	0,01379	0,01379
	μ _r	18859,86	10971,26	10970,92
Fuerza magnetomotriz	f _{mm} (A)	6055,92	6055,92	6055,92
Reluctancias	R _{gef} (A/Wb)	48507894,6	48507894,6	48507894,6
	R _t (A/Wb)	4059,1	6977,6	6977,9
	R _{sy} (A/Wb)	9260,3	5811,6	5811,8
	R _{ry} (A/Wb)	155782,5	156425,6	156430,5
Flujo magnético	φ (mWb)	0,1246	0,1246	0,1246
Campo entrehierro	B _g (T)	0,94410	0,94407	0,94407

Tabla 19: cálculo de parámetros del circuito magnético

Comprobación de saturación magnética en los componentes del modelo.

El punto de saturación del material coincide con punto donde se produce el cambio de pendiente en la curva B-H (Figura 38), se produce una disminución de la pendiente.

Las expresiones para calcular el valor del campo magnético en los diversos componentes se calcula mediante las siguientes expresiones:

- **Dientes del estator:** se calcula suponiendo que todo el flujo existente en el entrehierro, en un paso de ranura, circula por el diente.

$$B_t \cdot b_t \cdot L = B_g \cdot \tau_s \cdot L$$

- **Yugo de estator:** se supone que pasa por él todo el flujo correspondiente a un paso polar.



$$B_{sy} \cdot h_{sy} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot B_g \cdot b_m \cdot L$$

- **Yugo del rotor:** al igual que en el yugo del estator, se supone que pasa por él todo el flujo de un paso polar.

$$B_{ry} \cdot h_{ry} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot B_g \cdot b_m \cdot L$$

Estas expresiones han sido empleadas para realizar el cálculo iterativo de la Tabla 19.

Finalmente, con los valores de campo obtenidos y observando las curvas B-H, se determina si los materiales trabajan en zona de saturación (efecto no deseado) o no.

	Símbolo	Valor del campo (T)	Valor de saturación (T)
Dientes del estator	Bt	1,379	1,4
Yugo del estator	Bsy	0,944	1,4
Yugo del rotor	Bry	1,180	1

Tabla 20: comprobación de saturación

La Tabla 20 muestra como el yugo y los dientes del estator trabajan en zona lineal y no de saturación (el valor del campo en los componentes es menor que el valor de saturación), aunque los dientes están en zona próxima a la saturación. Por el contrario el yugo del rotor entra en zona de saturación magnética del material ($1,180T > 1T$) provocando la disminución de la permeabilidad magnética, efecto que no es deseado en esta aplicación.

Claramente el material de los componentes de la máquina influye de forma crítica en su funcionamiento.

5.3 FEM INDUCIDA

El siguiente paso en el proceso de análisis teórico del modelo es la obtención de la fuerza electromotriz inducida en cada espira del bobinado del estator.

A modo de simplificación, se calcula mediante la siguiente expresión el valor eficaz del primer armónico de la fuerza electromotriz inducida en cada espira a la velocidad nominal de la máquina (en el caso estudiado 300 rpm).

$$E_1^{esp} = \frac{4}{\sqrt{2}} \cdot \tau_p \cdot L \cdot f_n \cdot \hat{B}_1 \cdot k_w \cdot k_{ob}$$

Siendo:

- \hat{B}_1 : valor de la amplitud del primer armónico del campo magnético en el entrehierro calculada a partir de la onda cuadrada equivalente.

$$\hat{B}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{b_m}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

- k_w : factor de devanado. Tiene en cuenta la reducción de la fuerza electromotriz a causa de la distribución del devanado y del acortamiento del paso de bobina. Al ser un modelo de devanado concentrado y de paso completo no se considera este factor.
- k_{ob} : factor de oblicuidad. Tiene en cuenta la reducción de la fuerza electromotriz a causa de la disposición sesgada de los polos. En el modelo construido no se han dispuesto los polos con esta geometría por lo que tampoco se considera este factor.

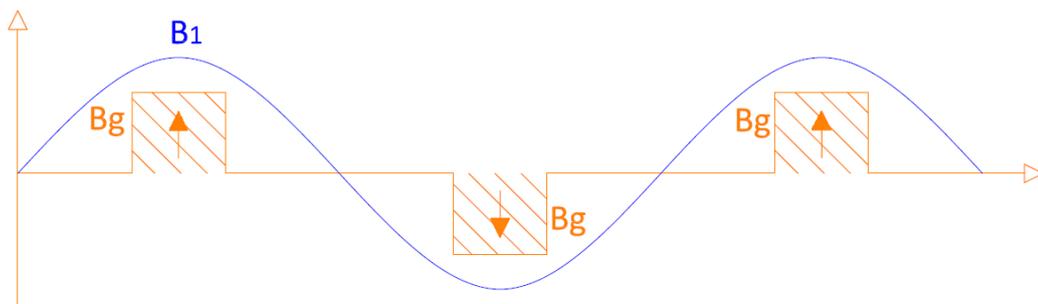


Figura 39: primer armónico de la onda cuadrada de campo de entrehierro



Realizando los cálculos mediante las expresiones anteriores se obtienen los siguientes resultados:

$$\hat{B}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot 0,944 \cdot \sin\left(\frac{0,008}{0,02625} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,55366 \text{ T}$$
$$E_1^{esp} = \frac{4}{\sqrt{2}} \cdot 0,02625 \cdot 0,033 \cdot 30 \cdot 0,55366 = 0,0407 \text{ V}$$

Para obtener el valor de la tensión de vacío total hay que considerar el número de espiras eficaces (valor de N_{ef} de Tabla 1) que corresponde con el número total de espiras de cada fase dividido por el número de ramas en paralelo.

$$E_0 = E_1^{esp} \cdot N_{ef} = 0,0407 \cdot 48 = 1,95 \text{ V}$$

Esta tensión de vacío calculada corresponde con la tensión de una fase del generador, es decir la tensión compuesta. A continuación se calcula la tensión simple para compararla con la obtenida en los ensayos.

$$E_{0-fn} = \frac{1,95}{\sqrt{3}} = 1,13 \text{ V}$$

Comparando el valor de tensión de vacío obtenido de forma analítica (1,13V) y el valor obtenido en los ensayos (Tabla 9; 0,84V), se observa que ambos resultados difieren ligeramente. Esta discrepancia puede ser debida a diversas razones:

- Podría ocurrir que los imanes de neodimio empleados en el modelo tuviesen unas características diferentes a las indicadas por el fabricante y el valor del flujo fuese inferior al considerado en los cálculos teóricos.
- Existe una cierta incertidumbre en el material de los componentes de la máquina como son el yugo y los dientes del estator y el yugo del rotor. Es posible que estos elementos, considerados de hierro al silicio y de acero fundido respectivamente,



fuesen de otro material con menor permeabilidad magnética lo que supondría una saturación más restrictiva que la considerada.

- Como consecuencia de la complejidad para determinar el tipo de devanado del inducido, existe incertidumbre en este aspecto. Por tanto, el modelo de devanado y sus conexiones influye en el número de espiras efectivas consideradas para la realización del cálculo analítico de la tensión de vacío.

5.4 RESISTENCIA Y REACTANCIA SÍNCRONA

Para el cálculo de la resistencia se supone un valor de resistividad del cobre a 20°C $\rho_{Cu} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega m$ y un coeficiente de aumento de la resistencia por temperatura $\alpha = 3,81 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

La Figura 40 muestra las características del hilo de cobre esmaltado del bobinado del inducido.

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Diámetro nominal (mm) | 5. Incremento mínimo de esmalte (mm) |
| 2. Tolerancia del conductor ($\pm mm$) | 6. Diámetro esmaltado máximo (mm) |
| 3. Sección nominal del conductor (mm^2) | 7. Tensión de perforación (V) |
| 4. Resistencia eléctrica nominal a 20°C (Ω/m) | 8. Peso del hilo (kg/km)(g/m) |

1	2	3	4	5	6	7	8
1,250	0,013	1,227	0,01393	0,035	1,316	1350	11,06

Figura 40: características del hilo de cobre esmaltado [www.tecnium.es]

La siguiente expresión muestra el cálculo de la resistencia de una de las ramas en paralelo de una fase:

$$\begin{aligned}
 R_{rama-20^{\circ}C} &= \rho_{Cu} \cdot \frac{L_{esp}}{S_{hilo}} \cdot N_{esp} = 1,72 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right) \cdot \frac{0,176 (m)}{1,227 (mm^2)} \cdot 48 = \\
 &= 0,1184 \Omega
 \end{aligned}$$



Como cada fase está compuesta por tres de estas ramas en paralelo:

$$\frac{1}{R_{fase-20^{\circ}\text{C}}} = 3 \cdot \left(\frac{1}{R_{rama-20^{\circ}\text{C}}} \right); \quad R_{fase-20^{\circ}\text{C}} = 0,0395 \Omega$$

Ajustando el valor de resistencia por efecto de la temperatura:

$$R_{80^{\circ}\text{C}} = R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$R_{fase-80^{\circ}\text{C}} = 0,0395 \cdot (1 + 3,81 \cdot 10^{-3} \cdot 60) = 0,0485 \Omega$$

Se comprueba que el valor de resistencia obtenido mediante medida directa (Parte I - 2.6) es muy similar al obtenido de forma analítica empleando las expresiones anteriores.

Para conocer la reactancia síncrona de la maquina, es necesario conocer la inductancia reactiva y la inductancia de dispersión.

Para el cálculo de cada una de estas inductancias se ha seguido el desarrollo de [DUBO04].

La inductancia reactiva considera los efectos de autoinducción y de inducción mutua sobre cada fase del devanado. Se calcula con el siguiente procedimiento:

$$L_m = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D/2 \cdot L}{2 \cdot g_{ef}} \cdot N_{ran}^2 = 2,46 \cdot 10^{-4} H$$

La inductancia de dispersión modela a modo de inductancia el flujo disperso que no sigue el camino del circuito magnético principal. Se puede descomponer a su vez en:

- Inductancia de dispersión en las ranuras ($L\sigma_s$).
- Inductancia de dispersión entre dientes ($L\sigma_g$).
- Inductancia de dispersión en los extremos ($L\sigma_{ew}$).



La inductancia de dispersión en las ranuras ($L_{\sigma s}$) considera el flujo que se cierra por las ranuras del estator y no llega a cruzar el entrehierro. Se obtiene del siguiente modo:

$$L_{\sigma s} = 2 \cdot p \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_{ran}^2 \cdot \lambda_{\sigma s} = 4,28 \cdot 10^{-4} H$$

Donde:

$$\lambda_{\sigma s} = \frac{h_s + 2h_{a1}}{3b_s} = \frac{0,01 + 2 \cdot 0,0015}{3 \cdot 0,0029} = 1,4943$$

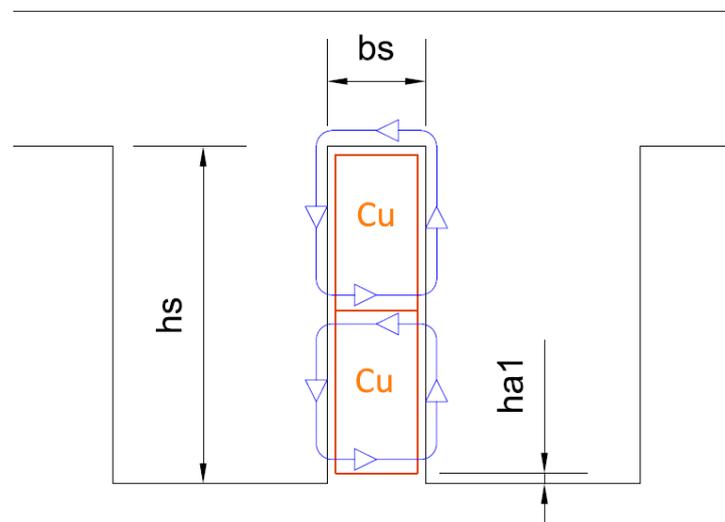


Figura 41: flujo de dispersión en las ranuras

La inductancia de dispersión entre dientes ($L_{\sigma g}$) considera el flujo que se cierra entre los extremos finales de los dientes del estator. Se obtiene de manera análoga que el caso anterior.

$$L_{\sigma g} = 2 \cdot p \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_{ran}^2 \cdot \lambda_{\sigma g} = 2,47 \cdot 10^{-4} H$$

Donde:

$$\lambda_{\sigma g} = \frac{5 \cdot \left(\frac{g_{ef}}{b_s}\right)}{5 + 4 \cdot \left(\frac{g_{ef}}{b_s}\right)} = 0,8618$$



El flujo de dispersión producido en los extremos de las bobinas ($L_{\sigma ew}$) es difícil de estudiar analíticamente aunque en este caso se estimará mediante el siguiente procedimiento:

$$L_{\sigma ew} = p \cdot \mu_0 \cdot \tau_p = 2 \cdot 10^{-7} H$$

La inductancia síncrona de cada fase se obtiene realizando la suma de la inductancia reactiva con todos los terminos de la inductancia de dispersión.

$$L_s = \frac{4}{3} \cdot L_m + L_{\sigma s} + L_{\sigma g} + L_{\sigma ew} = 1,0012 \cdot 10^{-3} H$$

Una vez calculado el valor de la inductancia síncrona, se calcula la reactancia síncrona del siguiente modo:

$$X_s = 2\pi f \cdot L_s = 0,0945 \Omega$$

Hallado el valor de la resistencia y de la reactancia del inducido se calcula la impedancia síncrona:

$$|Z_s| = \sqrt{R^2 + X_s^2} = \sqrt{0,0485^2 + 0,0945^2} = 0,106 \Omega$$

$$\cos \varphi = \cos \left[\text{atan} \left(\frac{X_s}{R} \right) \right] = 0,457$$

5.5 PÉRDIDAS EN EL HIERRO

Las pérdidas en el hierro se producen en forma de calor y son debidas principalmente al efecto de histéresis en el material ferromagnético (son proporcionales a la frecuencia) y a



las corrientes de Foucault, a causa de las corrientes parasitas inducidas en el núcleo, (son proporcionales al cuadrado de la frecuencia).

La expresión siguiente permite obtener el valor de dichas pérdidas [DUBO04]:

$$P_{Fe} = k_{ad} \left[k_{his} \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}} \right) + k_{Fou} \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}} \right)^2 \right] \cdot \left[m_{st} \cdot \left(\frac{\hat{B}_{st1}}{1,5 \text{ T}} \right)^2 + m_{sy} \cdot \left(\frac{\hat{B}_{sy1}}{1,5 \text{ T}} \right)^2 \right]$$

- La constante k_{his} representa las pérdidas por histéresis en el material de hierro al silicio a 50 Hz y 1,5 T. Se toma como valor $k_{his} = 2 \text{ W/Kg}$.
- La constante k_{Fou} representa las pérdidas por corrientes de Foucault en el hierro al silicio a 50 Hz y 1,5 T. Se toma como valor $k_{Fou} = 2 \text{ W/Kg}$.
- El coeficiente k_{ad} tiene en cuenta las pérdidas adicionales en el circuito magnético que vienen ocasionadas por el contenido armónico de la corriente y la tensión de vacío. También tiene en cuenta las pérdidas debidas a corrientes parasitas de la máquina. Se toma como valor $k_{ad} = 2$.
- Como ya se ha comentado, la frecuencia de generación es de 30 Hz.
- Con una densidad del acero al silicio de $\rho_{Fe} = 7.650 \text{ Kg/m}^3$, se obtiene la masa del yugo del estator y de los dientes del estator.

$$m_{sy} = \rho_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{sy-ext}^2 - D_{sy-int}^2) \cdot L = 0,5304 \text{ Kg}$$

$$m_{st} = \rho_{Fe} \cdot h_s \cdot b_t \cdot L \cdot Q = 0,5725 \text{ Kg}$$

- La magnitud B_{st1} representa la amplitud del primer armónico de campo magnético en los dientes del estator.

$$B_{st1} = \hat{B}_1 \cdot \frac{\tau_s}{b_t} = 0,809 \text{ T}$$

- La magnitud B_{sy1} representa la amplitud del primer armónico de campo magnético en el yugo del estator.

$$B_{sy1} = \hat{B}_1 \cdot \frac{\tau_p}{\pi \cdot h_{sy}} = 1,168 \text{ T}$$



De tal manera se obtiene un valor de pérdidas en el hierro de $P_{Fe} = 1,9 W$.

Al comprobar que el valor de las pérdidas en el hierro es un valor bajo comparado con las pérdidas en el cobre, en cálculos posteriores se despreciaran dichas pérdidas en el generador.

5.6 POTENCIA Y PAR DE GENERACIÓN

En este apartado se estudia, de forma teórica, el par máximo de frenado producido por el generador. Este valor de par máximo se produce en el punto de funcionamiento de cortocircuito.

Al estudiarse el caso de cortocircuito, la potencia eléctrica generada es nula, sin embargo las pérdidas generadas en el cobre son las que provocan el par de frenado en el eje.

Para obtener el valor de las pérdidas en el cobre, como ya se hizo en Parte I - 4.3, es necesario conocer el valor de la resistencia del inducido y la intensidad que circula por ella.

La intensidad que circula por cada una de las ramas del circuito en triángulo de la máquina se obtiene de la resolución del circuito del campo magnético, y de la impedancia síncrona.

$$I = \frac{E_0}{|Z_s|} = \frac{1,95}{0,106} = 18,39 A$$

Las pérdidas totales en el cobre serán tres veces las pérdidas de una de las ramas del circuito. Coincide por tanto con la potencia de frenado máxima existente en el generador.

$$P_{Cu} = 3 \cdot R_{fase} \cdot I^2 = 3 \cdot 0,0485 \cdot 18,39^2 = 49,2 W$$



Calculando el par máximo a partir de la potencia de frenado:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{49,2}{10\pi} = 1,57 \text{ Nm}$$

Una vez calculada la potencia y el par resistente opuesto por el generador de forma práctica y analítica, se comprueba que mediante ambos métodos se obtienen valores similares.



Capítulo 6 OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

En este capítulo se va a optimizar la potencia activa, y por tanto el par, del prototipo construido y de un diseño precedente de aerogenerador marino de unos 5 MW.

6.1 OPTIMIZACIÓN A PEQUEÑA ESCALA

En la optimización del prototipo construido se va a evaluar la influencia que tendría si en lugar de emplear los imanes del prototipo se empleasen unos de mayor anchura para cumplir la recomendación de cubrir el 70 % del paso polar. La anchura del imán a emplear sería de 17,8 mm. Además se considera que el yugo del rotor está fabricado de hierro al silicio en lugar de acero fundido convencional.

Los nuevos parámetros geométricos se adjuntan en la Tabla 21.

Parámetro geométrico	Símbolo	Valor
Longitud	L	33 mm
Diámetro	D_g	105 mm
Nº pares de polos	p	6
Paso polar	τ_p	26,52 mm
Altura entrehierro	g	1,25 mm
Anchura imanes	b_m	17,8 mm
Altura imanes	h_m	7 mm
Altura yugo del rotor	h_{ry}	3,2 mm
Altura yugo del estator	h_{sy}	4 mm
Paso de ranura	τ_s	9,2 mm
Anchura de ranura	b_s	2,9 mm
Altura de ranura	h_s	10 mm
Anchura de diente	b_t	6,3 mm
Long. líneas campo yugo rotor	τ_{p-ry}	14,27 mm
Long. líneas campo yugo estator	τ_{p-sy}	23,82 mm

Tabla 21: parámetros geométricos del modelo optimizado



Para calcular el nuevo diseño se ha de resolver nuevamente el circuito magnético de la máquina y obtener el valor de la tensión de vacío generada de igual manera a la desarrollada en Parte I - 5.2 y Parte I - 5.3.

El valor de la longitud de entrehierro efectiva (g_{ef}) no se ve afectado por no depender de la anchura del imán.

Las expresiones para el cálculo del circuito magnético son las expresadas en la Tabla 18 salvo la reluctancia de los dientes del estator que se ve modificada por considerar que ahora el flujo circula por la anchura equivalente a un diente y medio.

$$R_t = \frac{h_s}{\mu_{sy} \cdot 3 \cdot \left(b_t \cdot L / 2 \right)}$$

Resolviendo de nuevo el cálculo iterativo se obtienen los parámetros del circuito magnético expuestos en la Tabla 22.

	Parámetro	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3
Yugo del rotor	B _{ry} (T)	0,95	0,842	0,841
	H _{ry} (A/m)	50	25	25
	μ (H/m)	0,019000	0,033661	0,033654
	μ _r	15119,72	26786,41	26781,29
Yugo del estator	B _{sy} (T)	0,95	1,403	1,402
	H _{sy} (A/m)	50	100	100
	μ (H/m)	0,01900	0,01403	0,01402
	μ _r	15119,72	11161,00	11158,87
Dientes del estator	B _t (T)	0,95	1,381	1,381
	H _t (A/m)	50	75	75
	μ (H/m)	0,01900	0,01841	0,01841
	μ _r	15119,72	14650,43	14647,64
Fuerza magnetomotriz	f _{mm} (A)	6055,92	6055,92	6055,92
Reluctancias	R _{gef} (A/Wb)	21801301,0	21801301,0	21801301,0
	R _t (A/Wb)	1687,7	5225,3	5226,3
	R _{sy} (A/Wb)	6331,7	8577,6	8579,2
	R _{ry} (A/Wb)	2275,9	1284,7	1284,9
Flujo magnético	φ (mWb)	0,0002777	0,0002776	0,0002776
Campo entrehierro	B _g (T)	0,94553	0,94535	0,94535

Tabla 22: parámetros del circuito magnético modelo optimizado



Resuelto el circuito magnético se puede calcular el valor de la amplitud del primer armónico del campo magnético y por tanto la tensión de vacío generada en cada espira.

Multiplicando la tensión generada en cada espira por el número de espiras efectivas en serie de cada fase se obtiene la tensión de vacío generada a velocidad nominal.

$$\hat{B}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{b_m}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 1,0466 \text{ T}$$

$$E_1^{esp} = \frac{4}{\sqrt{2}} \cdot \tau_p \cdot L \cdot f_n \cdot \hat{B}_1 = 0,0777 \text{ V}$$

$$E_0 = E_1^{esp} \cdot N_{ef} = 0,0777 \cdot 48 = 3,73 \text{ V}$$

El aumento de la anchura del imán de 8 mm a 17,8 mm y la incorporación de hierro al silicio en el yugo del rotor, provoca un aumento de un 91,3 % en el valor de la tensión de vacío generada.

Siguiendo el proceso seguido en Parte I - 5.6, se calcula la potencia que podría llegar a generar el modelo optimizado y el par máximo resistente del nuevo modelo.

La resistencia y la reactancia del nuevo diseño optimizado son de igual valor que en el modelo construido, ya que los parámetros que afectan a estas magnitudes no han sido modificados.

$$I = \frac{E_0}{|Z_s|} = \frac{3,73}{0,106} = 35,19 \text{ A}$$

$$P_{Cu} = 3 \cdot R_{fase} \cdot I^2 = 3 \cdot 0,0485 \cdot 35,19^2 = 180,2 \text{ W}$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{180,2}{10\pi} = 5,74 \text{ Nm}$$

Estos valores obtenidos del modelo optimizado son ligeramente inferiores al generador original de excitación eléctrica, lo que indica que si se siguiese el proceso de optimización se podrían llegar a alcanzar valores de potencia y par superiores al modelo original.



Este proceso de optimización en generadores de imanes permanentes no es sencillo y requiere de experiencia y habilidad, pero se demuestra que mediante la excitación de imanes de neodimio se pueden conseguir prestaciones superiores a las de generadores de excitación eléctrica.

En cuanto al incremento de par del modelo construido, se ha conseguido aumentar en 3,66 veces la potencia, y por tanto el par, del modelo construido únicamente variando la anchura del imán para cumplir la recomendación de cubrir el 70 % del paso polar.

6.2 OPTIMIZACIÓN A GRAN ESCALA

En base a un diseño precedente de generador eólico marino de unos 5 MW, [CRES13], se calcula la tensión de vacío generada de la misma manera que en Parte I - 6.1.

El proceso de optimización a gran escala se va a enfocar desde un punto de vista de diseño, donde a partir de unas condiciones deseadas de generación se calcula la potencia entregada por el generador en régimen nominal.

Para facilitar los cálculos, se van a referenciar los parámetros eléctricos en valores unitarios. Los valores tomados como base son los expuestos en Tabla 23.

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión base	U_b	690 V
Potencia base	S_b	5,6 MVA
Intensidad base	I_b	4686 A
Reactancia base	X_b	0,085 Ω

Tabla 23: magnitudes eléctricas



Los valores de dicho diseño del generador eólico marino se exponen en la Tabla 24.

Parámetro	Símbolo	Valor
Longitud	L	1,3 m
Diámetro	D_g	7 m
Nº pares de polos	p	180
Paso polar	τ_p	61,11 mm
Altura entrehierro	g	6 mm
Anchura imanes	b_m	42,8 mm
Altura imanes	h_m	17,2 mm
Altura yugo del rotor	h_{ry}	15 mm
Altura yugo del estator	h_{sy}	15 mm
Paso de ranura	τ_s	20,4 mm
Anchura de ranura	b_s	9,2 mm
Altura de ranura	h_s	86 mm
Anchura de diente	b_t	11,2 mm
Long. líneas campo yugo rotor	τ_{p-ry}	30,55 mm
Long. líneas campo yugo estator	τ_{p-sy}	10,2 mm
Campo remanente del imán	B_r	1,1 T
Longitud de entrehierro efectiva	g_{ef}	22,2 mm
Número de espiras efectivas	N_{ef}	120
Ramas en paralelo de una fase	a	15
Sección de la espira	S_{esp}	60 mm ²
Velocidad nominal	ω_n	10 rpm
Densidad de corriente admisible	J	3,2 A/mm ²
Reactancia síncrona	X_s	0,08304 Ω

Tabla 24: parámetros del diseño precedente de aerogenerador

Resolviendo el circuito magnético del generador se obtiene el valor de campo en el entrehierro (Tabla 25).



	Parámetro	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3
Yugo del rotor	B _{ry} (T)	1,1	1,115	1,114
	H _{ry} (A/m)	40	40	40
	μ (H/m)	0,027500	0,027879	0,027849
	μ _r	21883,80	22185,56	22161,63
Yugo del estator	B _{sy} (T)	1,1	1,115	1,114
	H _{sy} (A/m)	40	40	40
	μ (H/m)	0,02750	0,02788	0,02785
	μ _r	21883,80	22185,56	22161,63
Dientes del estator	B _t (T)	1,1	1,424	1,422
	H _t (A/m)	40	100	100
	μ (H/m)	0,02750	0,01424	0,01422
	μ _r	21883,80	11329,74	11317,52
Fuerza magnetomotriz	f _{mm} (A)	13812,90	13812,90	13812,90
Reluctancias	R _{gef} (A/Wb)	635017,9	635017,9	635017,9
	R _t (A/Wb)	143,2	829,7	830,6
	R _{sy} (A/Wb)	19,0	18,8	18,8
	R _{ry} (A/Wb)	57,0	56,2	56,3
Flujo magnético	φ (mWb)	0,0217458	0,0217223	0,0217223
Campo entrehierro	B _g (T)	0,78166	0,78082	0,78082

Tabla 25: parámetros del circuito magnético del diseño precedente

Calculando la tensión de vacío generada:

$$\hat{B}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{b_m}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,886 \text{ T}$$

$$E_1^{esp} = \frac{4}{\sqrt{2}} \cdot \tau_p \cdot L \cdot f_n \cdot \hat{B}_1 = 5,97 \text{ V}$$

$$E_0 = E_1^{esp} \cdot N_{ef} = 0,0777 \cdot 48 = 716,7 \text{ V}$$

Se desea que la tensión de generación de la turbina eólica (V) corresponda con la tensión nominal de 690 V. Por tanto con la tensión de vacío hallada (E) y con la tensión objetivo de generación se procede al cálculo de la potencia nominal de la máquina, en magnitudes unitarias, resolviendo el diagrama de fasores de la Figura 42.

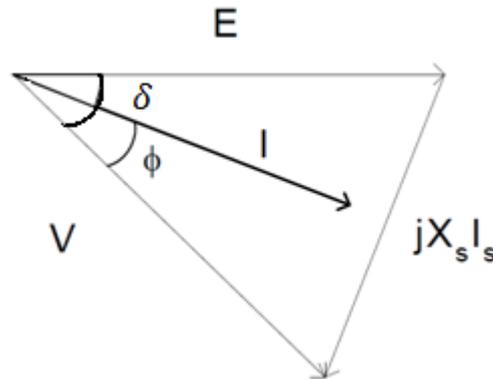


Figura 42: diagrama fasorial a 10 rpm

La intensidad admisible de generación del bobinado inducido viene impuesta la densidad de corriente que corresponde con el límite térmico.

$$i_g = \frac{\sqrt{3} \cdot J \cdot S_{esp} \cdot a}{I_b} = \frac{\sqrt{3} \cdot 3,2 \cdot 60 \cdot 15}{4686} = 1,0645 \text{ pu}$$

Aplicando el teorema del coseno:

$$(i_g \cdot x_s)^2 = u_g^2 + e_0^2 - 2 \cdot u_g \cdot e_0 \cdot \cos \delta$$

Siendo:

$$x_s = 0,977 \text{ pu} ; \quad u_g = 1 \text{ pu} ; \quad e_0 = 1,039 \text{ pu}$$

$$\cos \delta = 0,48 ; \quad \delta = 61,3^\circ$$

Calculando la potencia activa nominal:

$$p_g = \frac{e_0 \cdot u_g}{x_s} \cdot \text{sen } \delta = 0,9328 \text{ pu} ; \quad P_g = 5,22 \text{ MW}$$

$$\cos \varphi = \frac{p_g}{u_g \cdot i_g} = 0,876 ; \quad S_g = 5,96 \text{ MW}$$

El par de la máquina a su velocidad nominal de 10 rpm es:

$$M = \frac{P_g}{\omega} = 4,98 \text{ MNm}$$



Diseño optimizado del aerogenerador.

En la optimización del diseño precedente del aerogenerador se quiere conseguir un aumento de la potencia activa de un 5%. Para conseguir este aumento se opta por incorporar en la máquina unos imanes de mayor calidad incrementando su campo remanente.

Se calcula por tanto la tensión de vacío y posteriormente se obtiene el valor del campo remanente de los imanes necesario para cumplir este incremento de potencia.

$$p_g = 0,933 \cdot 1,05 = 0,97965 \text{ pu} ; \quad P_g = 5,49 \text{ MW} ; \quad M = 5,24 \text{ MNm}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} (i_g \cdot x_s)^2 = u_g^2 + e_0^2 - 2 \cdot u_g \cdot e_0 \cdot \cos \delta \\ p_g = \frac{e_0 \cdot u_g}{x_s} \cdot \text{sen } \delta \end{cases}$$

Siendo:

$$x_s = 0,977 \text{ pu} ; \quad u_g = 1 \text{ pu} ; \quad i_g = 1,0645 \text{ pu}$$

Se obtiene:

$$\delta = 58,19^\circ ; \quad e_0 = 1,126 \text{ pu}$$

La tensión de vacío requerida es de 776,94 V. A continuación se calcula el valor del campo en el entrehierro necesario para conseguir esta tensión.

$$E_1^{esp} = E_0 / N_{ef} = 776,94 / 120 = 6,475 \text{ V}$$

$$\hat{B}_1 = \frac{E_1^{esp} \cdot \frac{\sqrt{2}}{4}}{\tau_p \cdot L \cdot f_n} = 0,96 \text{ T}$$

$$B_g = \frac{\hat{B}_1 \cdot \frac{\pi}{4}}{\sin\left(\frac{b_m}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} = 0,846 \text{ T}$$

Realizando la resolución del circuito magnético a partir del campo en el entrehierro necesario, se obtiene un valor de campo remanente de los imanes de $Br = 1,205 \text{ T}$.



Capítulo 7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

El proceso de estudio, diseño y optimización de un generador eléctrico requiere una amplia experiencia ya que es un proceso largo, minucioso y en el que hay que controlar cada variable para conseguir un diseño realmente eficiente.

Este proyecto recoge el análisis experimental de dos modelos de generador eléctrico, así como la comparación entre ambos. Se observa cómo el modelo original (empleado en la automoción), que genera la excitación mediante bobinado en el rotor, es capaz de ofrecer un par resistente mayor que el modelo de imanes permanentes, aunque su rendimiento se ve afectado por el consumo de potencia necesaria para generar el campo de excitación.

La principal causa del menor valor de par resistente obtenido en el modelo modificado de imanes permanentes, es el hecho de no haber podido construir un modelo optimizado por la disposición de recursos limitados para su ejecución.

Cabe destacar que el análisis analítico realizado sobre el modelo de imanes permanentes se ajusta de manera razonablemente exacta a los valores obtenidos experimentalmente, a pesar de existir importantes incertidumbres en algunos aspectos por el hecho de emplear recursos sencillos, baratos y fácilmente disponibles.

Por otro lado, en el proceso de estudio analítico y de optimización se comprueba como modificando únicamente una de las variables que intervienen en el funcionamiento del generador, ya sea un parámetro geométrico o una propiedad de los materiales instalados, pueden obtenerse importantes cambios en el resultado de potencia generada.



Un proceso costoso, es por tanto, el análisis de todas las variables involucradas con la finalidad de optimizar la potencia generada, el rendimiento y por supuesto el coste económico.

7.2 DESARROLLOS FUTUROS

Como desarrollos futuros que completen el estudio realizado en este proyecto se pueden incluir los siguientes puntos:

- Sería interesante realizar un estudio de componentes que no han sido estudiados en este trabajo y que tienen una función vital como por ejemplo los materiales aislantes, diferentes tipos de bobinados inducidos, la refrigeración y las protecciones para evitar el sobrecalentamiento y por tanto la pérdida de propiedades de los imanes.
- Los resultados aquí obtenidos de manera experimental y analítica, podrían comprobarse mediante simulaciones por ordenador.
- Debido a la importancia del coste tanto en máquinas destinadas al sector de la automoción (gran competencia de precios), como para turbinas eólicas (muy altas inversiones), enfocar la optimización de los generadores combinando tanto el aumento de potencia generada como la reducción de costes es un aspecto importante.



BIBLIOGRAFÍA

- [BURT11] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi. “Wind Energy Handbook”. Jonh Wiley & Sons, Ltd. 2011.
- [CRES13] F. Crespo Pérez. “Diseño del generador eléctrico de un aerogenerador marino de 5 MW”. Pfc, ICAI, 2013.
- [DAWE81] CH.L.Dawes. “Electricidad industrial I”. Ed. Reverté, S.A. 1981.
- [DUBO04] M. R. J. Dubois. “Optimized Permanent Magnet Generator. Topologies for Direct-Drive Wind Turbines”. 2004.
- [FRAI08] J. Fraile Mora. “Máquinas Eléctricas”. 2008.
- [GERM12] Germanischer Lloyd Industrial Services. “Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines”. 2012.
- [KOSO91] Kosow, Irving L. “Máquinas eléctricas y transformadores”. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.S. 1991
- [KOST73] M. Kostenko, L. Piotrovski. “Máquinas Eléctricas, Tomo II”. Ed. Mir Moscú, 1973.
- [PYRH08] J. Pyrhönen; T. Jokinen; V. Hrabovcová. “Design of Rotating Electrical Machines”. 2008.





Parte II PLANOS



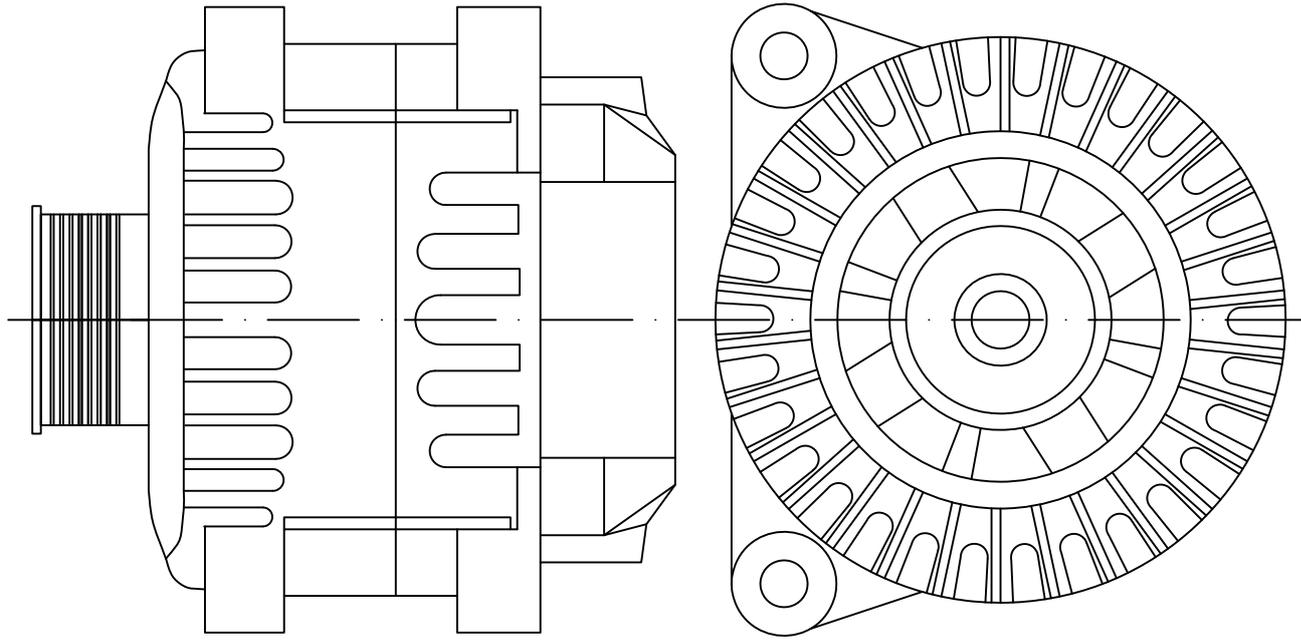
UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Planos

1 2 3 4

A

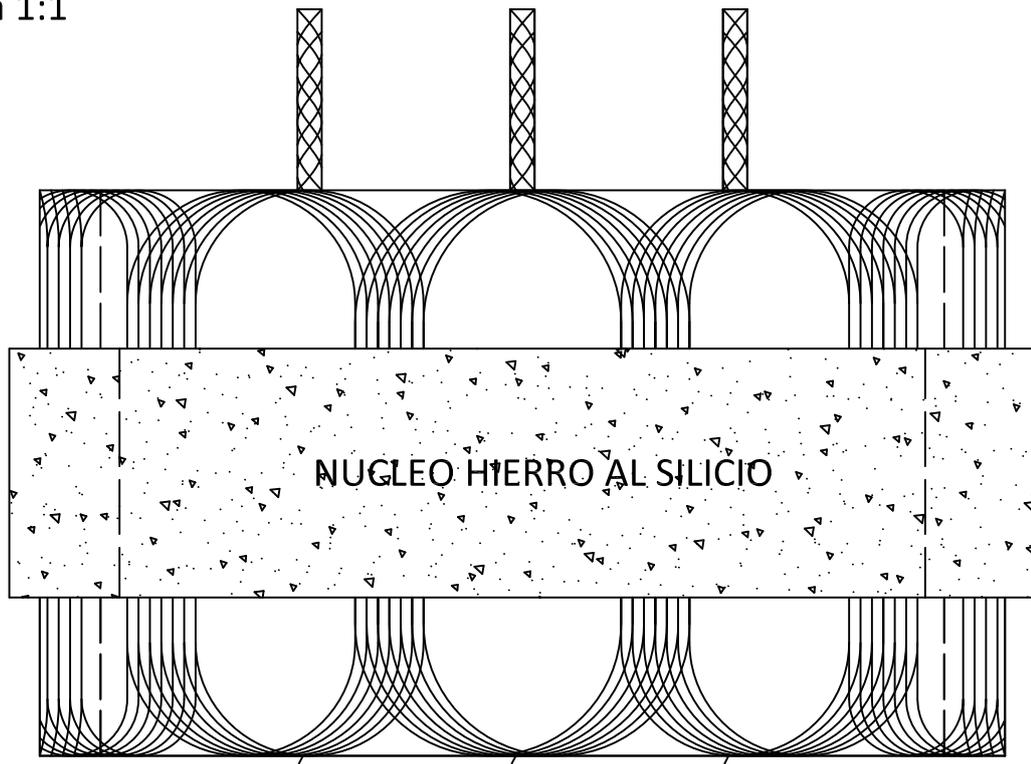
CARCASA GENERADOR ORIGINAL
 escala: 1/2



B

C

BOBINADO INDUCIDO (ESTATOR)
 escala 1:1



MATERIAL	-		Título:	CARCASA Y BOBINADO INDUCIDO (ESTATOR)
TOLERANCIA	-		Conjunto:	GENERADOR ORIGINAL
	NOMBRE	FECHA	I.C.A.I.	
DIBUJADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014		
COMPROBADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014	Nº DE PLANO: 1	
ESCALA:	FIRMA			
1:1				

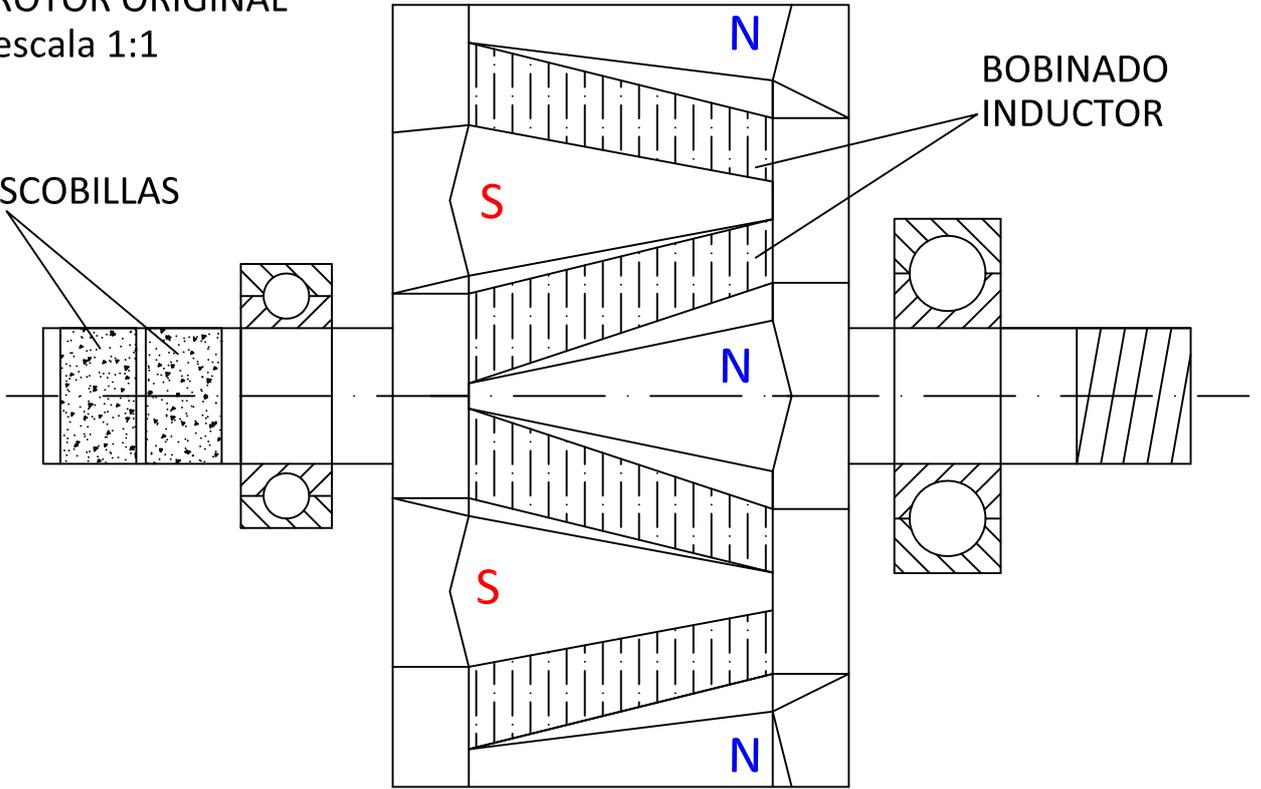
1 2 3 4

A

ROTOR ORIGINAL
escala 1:1

ESCOBILLAS

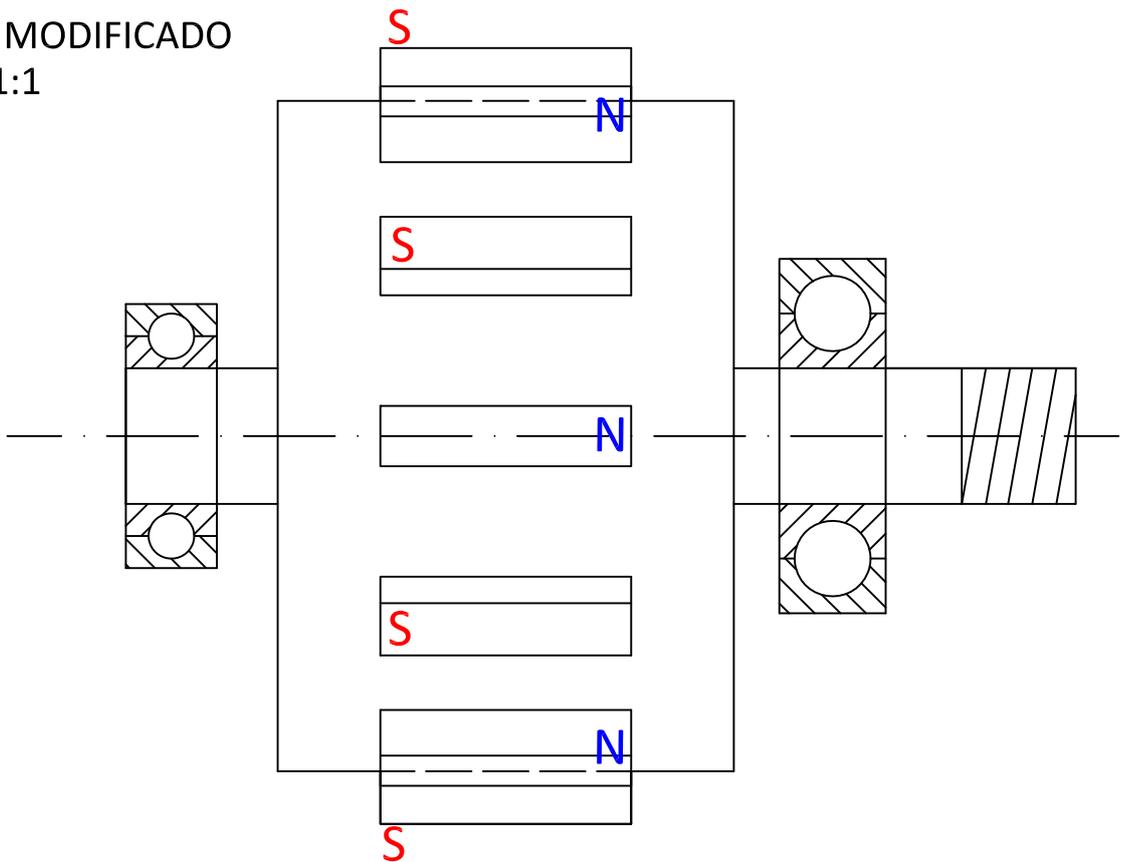
BOBINADO
INDUCTOR



B

C

ROTOR MODIFICADO
escala 1:1



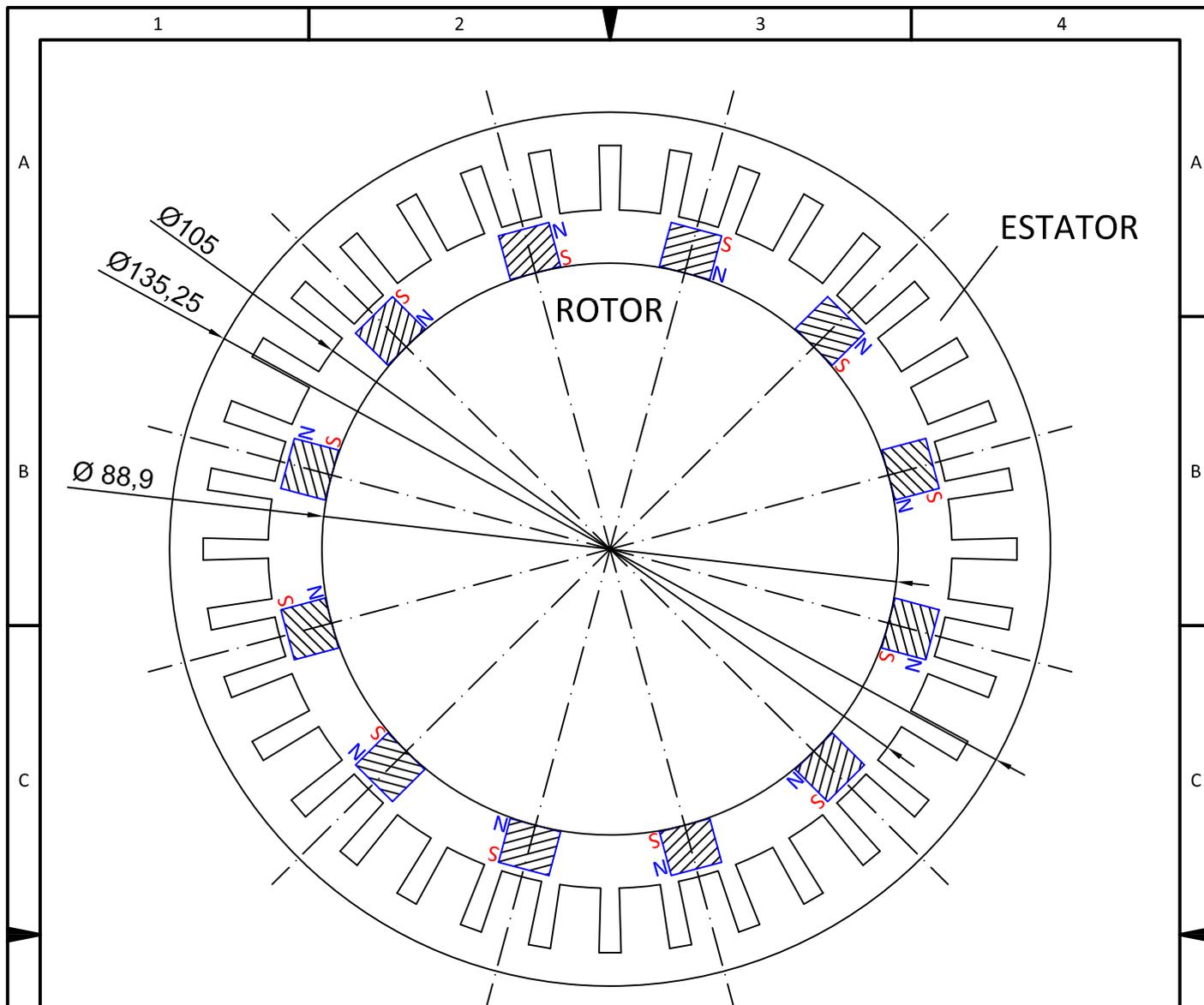
MATERIAL	-	
TOLERANCIA	-	
	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014
COMPROBADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014
ESCALA:	FIRMA	
1:1		

Título:
ROTOR ANTES Y DESPUES DE LA MODIFICACIÓN

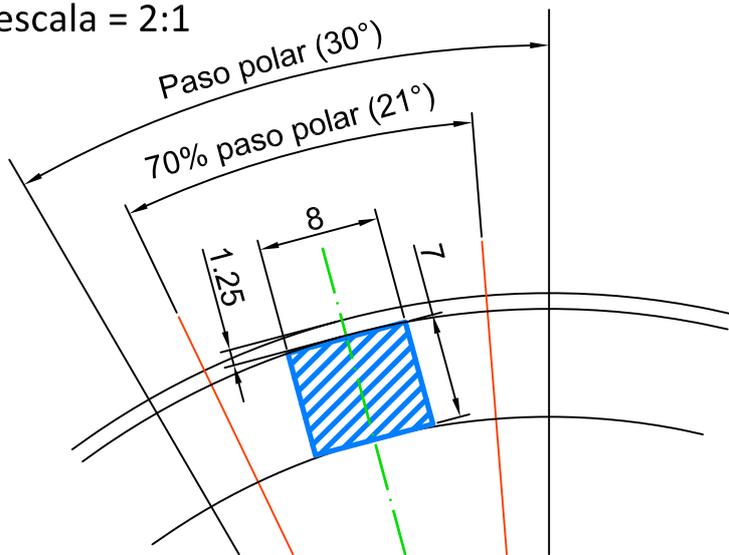
Conjunto:
ROTOR

I.C.A.I.

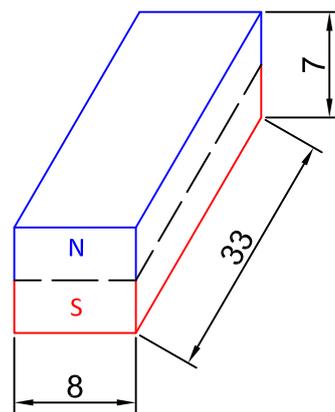
Nº DE PLANO:
2



DETALLE PASO POLAR
escala = 2:1



DETALLE IMÁN PERMANENTE
escala = 2:1



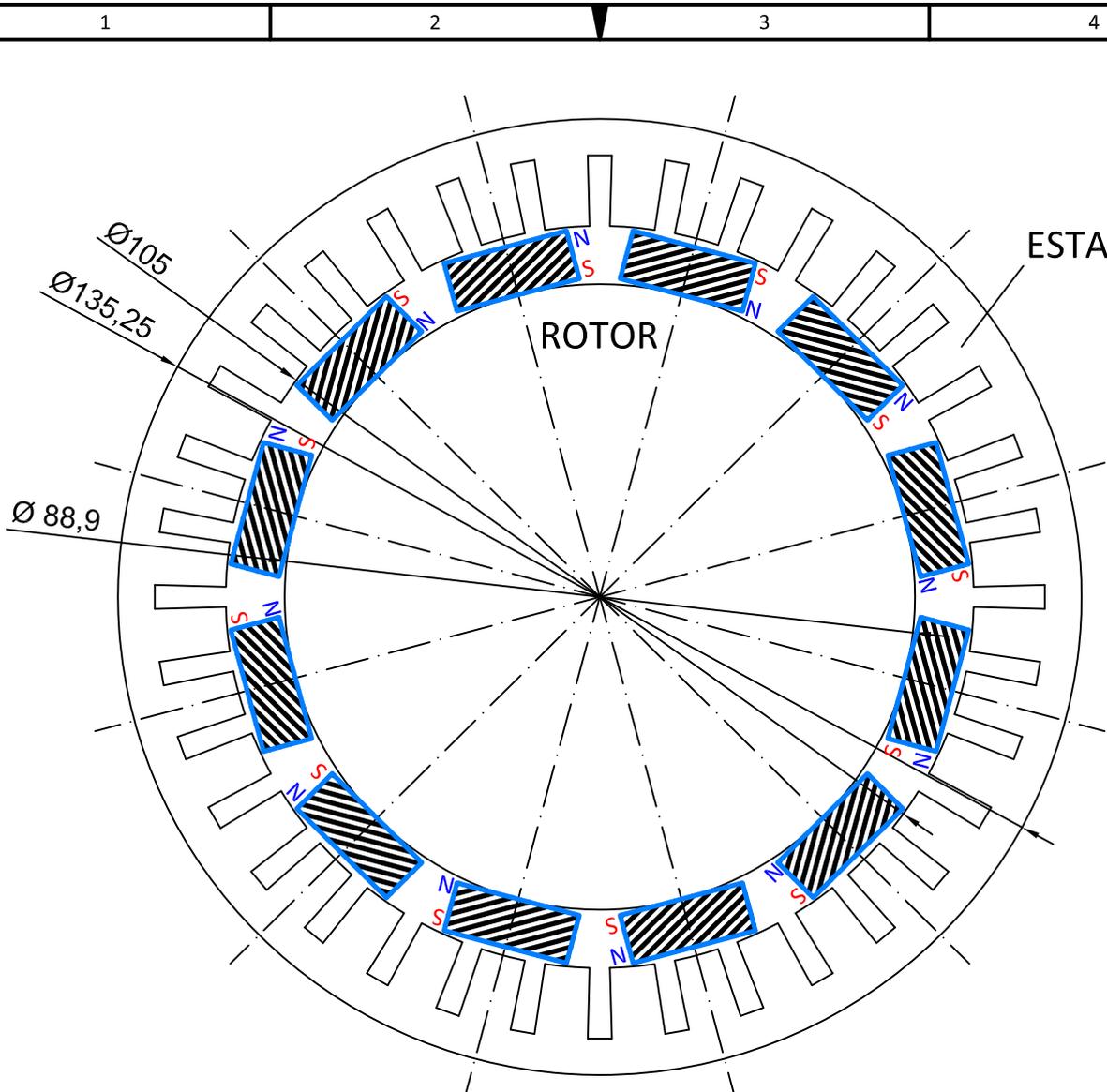
MATERIAL	-	
TOLERANCIA	-	
	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014
COMPROBADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014
ESCALA:	FIRMA	
1:1		

Título:
SECCIÓN TRANSVERSAL DEL GENERADOR

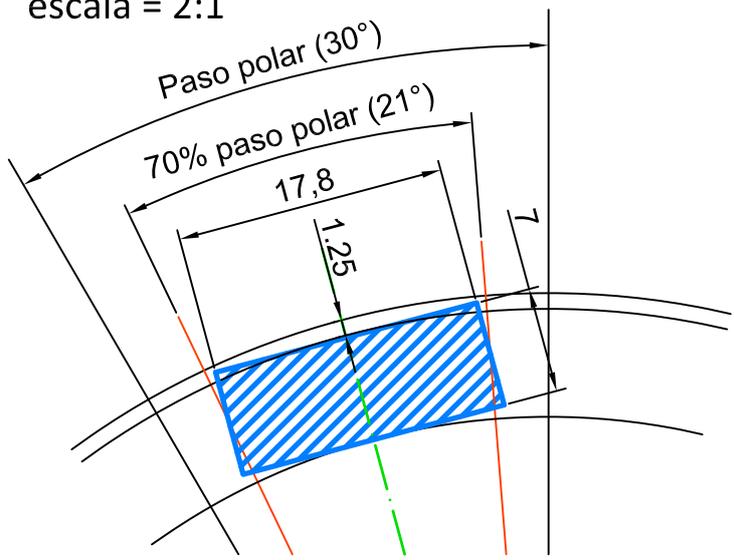
Conjunto:
PROTOTIPO CONSTRUIDO DE GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

I.C.A.I.

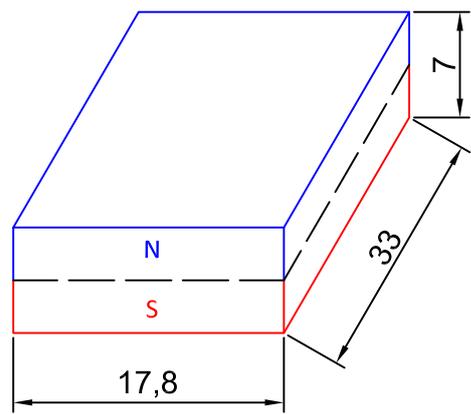
Nº DE PLANO:
3



DETALLE PASO POLAR
escala = 2:1



DETALLE IMÁN PERMANENTE
escala = 2:1



MATERIAL	-	
TOLERANCIA	-	
	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014
COMPROBADO	Marcos Pérez Díaz	Mayo 2014
ESCALA:	FIRMA	
1:1		

Título:	SECCIÓN TRANSVERSAL DEL GENERADOR
Conjunto:	DISEÑO OPTIMIZADO DE GENERADOR DE IMANES PERMANENTES
I.C.A.I.	Nº DE PLANO: 4



Parte III PRESUPUESTO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Presupuesto



Capítulo 1 MEDICIONES

En primer lugar se estima la masa de las partes activas de las máquinas. Se consideran los núcleos ferromagnéticos del rotor y del estator, conductores e imanes permanentes.

A partir de la densidad de los materiales que forman dichas partes se estima la masa de las partes activas. Las expresiones y el cálculo de la masa se recogen en la Tabla 26 y en la Tabla 27, respectivamente.

Parte activa	Expresión
Yugo del estator	$m_{sy} = \rho_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{sy-ext}^2 - D_{sy-int}^2) \cdot L$
Dientes del estator	$m_{st} = \rho_{Fe} \cdot h_s \cdot b_t \cdot L \cdot Q$
Yugo del rotor	$m_{ry} = \rho_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ry-ext}^2 - D_{ry-int}^2) \cdot L$
Imanes permanentes	$m_m = \rho_m \cdot h_m \cdot b_m \cdot L \cdot 2p$
Conductores	$m_{cu} = \rho_{cu} \cdot l_{esp} \cdot S_{esp} \cdot m \cdot N_f$

Tabla 26: estimación de masa de las partes activas

		Masa de los componentes (Kg)			
Material	ρ (Kg/m ³)	Prototipo	Prototipo optim.	Aerogenerador	Aerogenerador optim.
Acero Si	7650	1,1	1,3	16958	16958
Ne-Fe-B	7400	0,17	0,365	2549	2549
Cobre	8500	0,8	0,8	8048	8048

Tabla 27: masa de los materiales de las partes activas en cada diseño



Capítulo 2 COSTES

2.1 COSTE DE LAS PARTES ACTIVAS

La Tabla 28 muestra el coste del material activo para los cuatro diseños considerados estimando unos costes aproximados en base a [DUBO04].

Material	Coste específico	Coste de los componentes (€)			
		Prototipo	Prototipo optim.	Aerogenerador	Aerogenerador optim.
Acero Si	4 (€/Kg)	4,4	5,2	67.830	67.830
Ne-Fe-B	90/40/60 (€/Kg)	15,3	32,85	101.995	152.940
Cobre	6 (€/Kg)	4,8	4,8	48.286	48.286
	Coste total	24,5	42,85	218.111	269.056

Tabla 28: coste de los materiales activos en cada diseño

El precio del material magnético presenta esa variabilidad por motivos de descuentos por cantidad y en función del magnetismo residual que posean los mismos. El precio de 90 €/Kg corresponde con los modelos a pequeña escala, el de 40 €/Kg con el modelo del aerogenerador de bajo magnetismo y el coste de 60 €/Kg corresponde con el modelo del aerogenerador optimizado de mayor magnetismo.

2.2 COSTE DE LOS MATERIALES AISLANTES

El coste de los materiales aislantes se ha estimado, ya que no ha sido tratado este material en el proyecto, en un 30 % del coste del cobre en los diseños a pequeña escala y en un 5 %



del coste del cobre en los aerogeneradores. La Tabla 29 muestra el valor del material aislante necesario.

Coste de los materiales aislantes (€)			
Prototipo	Prototipo optimizado	Aerogenerador	Aerogenerador optimizado
2	2	2.400	2.400

Tabla 29: coste de los materiales aislantes

2.3 COSTE DE LA ESTRUCTURA Y ELEMENTOS MECÁNICOS

Este apartado incluye los costes asociados a la estructura del generador y la carcasa, así como otros elementos necesarios como ventiladores, ejes y rodamientos. Como estos elementos no se han tratado en el proyecto, se estima su coste en torno a 40 % de las partes activas para los modelos a pequeña escala y un 50 % para los modelos de los aerogeneradores.

La Tabla 30 detalla el coste de elementos mecánicos de los modelos.

Coste de la estructura y componentes mecánicos (€)			
Prototipo	Prototipo optimizado	Aerogenerador	Aerogenerador optimizado
10	10	109.056	109.056

Tabla 30: coste de los elementos mecánicos

2.4 COSTE DE FABRICACIÓN Y MANO DE OBRA

Para realizar la fabricación de estas máquinas se requiere de mano de obra especializada lo que incurre en un coste considerable. Además los aerogeneradores deben ser transportados



por partes y montados en el lugar de su instalación lo que provoca un mayor coste en la mano de obra.

Se ha estimado un coste de fabricación y mano de obra en torno a un 40 % del coste total del material en los diseños de los generadores.

Coste de fabricación y mano de obra (€)			
Prototipo	Prototipo optimizado	Aerogenerador	Aerogenerador optimizado
18	18	144.000	144.000

Tabla 31: coste de fabricación y mano de obra

2.5 COSTES INDIRECTOS

En los costes indirectos se incluyen todos los costes que son necesarios para la construcción de los generadores pero que no están relacionados directamente con la máquina fabricada. Se incluyen por tanto el coste de suministro eléctrico, de agua, de gas, el coste de personal indirecto, el mantenimiento de las instalaciones...

Estos costes se han estimado en un 35 % de los costes directos. En la Tabla 32 se muestran los valores establecidos.

Costes indirectos (€)			
Prototipo	Prototipo optimizado	Aerogenerador	Aerogenerador optimizado
20	20	170.000	170.000

Tabla 32: costes indirectos



2.6 GASTOS GENERALES

En los gastos generales se incluyen los gastos de la empresa con relación a la construcción del generador pero que no intervienen de forma directa, como por ejemplo los departamentos comercial y financiero.

Se ha supuesto para estos gastos un 20 % de la suma de costes directos e indirectos.

Gastos generales (€)			
Prototipo	Prototipo optimizado	Aerogenerador	Aerogenerador optimizado
15	19	128.713	138.902

Tabla 33: gastos generales



Capítulo 3 PRESUPUESTO GENERAL

A continuación se realiza el presupuesto que tiene en cuenta todos los costes calculados en Parte III - Capítulo 2.

Se expone en la Tabla 34 el coste total de cada uno de los 4 modelos estudiados. No se contabiliza ni el beneficio industrial ni por tanto el impuesto sobre el valor añadido.

		Presupuesto general (€)			
		Prototipo	Prototipo optim.	Aerogenerador	Aerogenerador optim.
Componentes activos	Acero Si	4,4	5,2	67.830	67.830
	Ne-Fe-B	15,3	32,85	101.995	152.940
	Cobre	4,8	4,8	48.286	48.286
Total componentes activos		25	43	218.111	269.056
Material aislante		2	2	2.400	2.400
Estructura y comp. Mecánicos		10	10	109.056	109.056
Coste de fabricación y MOD		18	18	144.000	144.000
Total costes directos		55	73	473.567	524.512
Costes indirectos		20	20	170.000	170.000
Gastos generales		15	15	135.000	135.000
Coste total		89	108	778.567	829.512

Tabla 34: presupuesto general