

# Acoplamiento de alto deslizamiento con imanes anulares para prueba de motores eléctricos

Gallo, Omar D.

## Resumen

Este trabajo relata las pruebas experimentales realizadas a una máquina regenerativa de ensayo de motores eléctricos, en la cual cumple un rol fundamental el acoplamiento magnético directo entre los ejes –de distintas velocidades– de un motor y de un generador asincrónico. El objetivo final fue adquirir experiencias y valores de funcionamiento útiles para el diseño de aparatos de ensayo similares y de mayor potencia, que tengan la aptitud de reducir al máximo el consumo de energía. El mencionado acoplamiento magnético directo entre los ejes de un motor y de un generador es un dispositivo sencillo que funciona según principios conocidos, siendo en este caso el componente crítico encargado de regular la potencia desarrollada por el equipo.

**Palabras clave:** máquinas eléctricas, acoplamiento magnético, prueba de motores

---

Este artículo expone resultados parciales del proyecto de I+D denominado *Freno Regenerativo de Motores Eléctricos*, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco (UTN-FRSF); recibido en agosto 2012, admitido en setiembre 2013.

Autor: Investigador, profesor titular ordinario de Máquinas Eléctricas, Centro de Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas, UTN-FRSF (San Francisco, Córdoba, Argentina).  
Contacto: odgallo@gmail.com

## High slip ring magnet coupling to test electric motors

### Abstract

This paper describes the experimental tests carried out on a regenerative machine, for the testing of electric motors, in which direct magnetic coupling between the shaft of a motor –at different speeds– and the shaft of an asynchronous generator plays a fundamental role. The final goal was to acquire experiences and operating values needed for the design of similar and greater power test devices, which have the capability for reducing the power consumption to the greatest degree. The above mentioned direct magnetic coupling between a motor shaft and a generator shaft is a simple device that operates according to known principles, and in this case is a critical component responsible for regulating the power generated by the machine.

**Keywords:** electric machines, magnetic coupling, motor testing

## Acoplamento de alto deslizamento com ímãs anelares para teste de motores elétricos

### Resumo

Este artigo descreve os testes experimentais realizadas em uma máquina regenerativa de ensaio de motores elétricos, na qual desempenha um papel fundamental o acoplamento magnético direto entre os eixos –de velocidades diferentes– de um motor e de um gerador assíncrono. O objetivo final foi adquirir experiências e valores operacionais úteis para o desenho de aparelhos de ensaio semelhantes e mais potentes, com capacidade de minimizar o consumo de energia. O mencionado acoplamento magnético direto entre os eixos de um motor e de um gerador é um dispositivo simples que funciona de acordo com princípios conhecidos, sendo neste caso o componente crítico responsável pela regulação da potência desenvolvida pelo equipamento.

**Palavras chave:** máquinas elétricas, acoplamento magnético, teste de motores

## I. Introducción

Para averiguar, en un laboratorio de máquinas, los parámetros de salida y entrada de un motor eléctrico, es decir, la potencia entregada en el eje, la velocidad, la corriente consumida, el factor de potencia y el rendimiento, se acopla aquel motor a un *freno* y se reproducen a voluntad las condiciones reales de marcha.

Existe una gran variedad de frenos para prueba de motores, tales como hidráulicos, magnéticos o mecánicos; en general, todos ellos permiten obtener la potencia entregada mediante la medición de la velocidad del eje y de una fuerza aplicada en el extremo de un brazo de palanca [1].

Cuando en estos frenos se ensayan motores de elevada potencia, el consumo de energía de la red es muy importante y el laboratorio involucrado se enfrenta a diversos inconvenientes dignos de considerar, entre ellos:

- La necesidad de disponer de una infraestructura eléctrica pesada y costosa –como transformador, conductores, protecciones, accionamientos y demás–, acorde a esos requerimientos.

- Un desperdicio considerable de energía, porque la potencia entregada y las pérdidas del sistema suelen transformarse en calor y se liberan al medio ambiente.

- Un incremento del valor del pedido de demanda a la empresa proveedora de energía, con el mayor costo fijo que ello significa.

El presente estudio experimental apunta hacia los dos primeros ítemes y, por consiguiente, al logro de los siguientes objetivos:

- Disponer de la capacidad para probar máquinas mayores sin necesidad de gran infraestructura eléctrica.

- Reducir los desperdicios de calor al mínimo posible mediante la reposición a la red de una buena parte de la energía invertida en el sistema de prueba de motores.

- Lograr que dicho sistema de prueba sea práctico, versátil y aplicable a la mayor gama posible de potencias y velocidades de las máquinas que se ensayan.

Para que estos propósitos sean posibles, se pensó en acoplar al eje del motor el de un generador que, a la vez de trabajar como freno

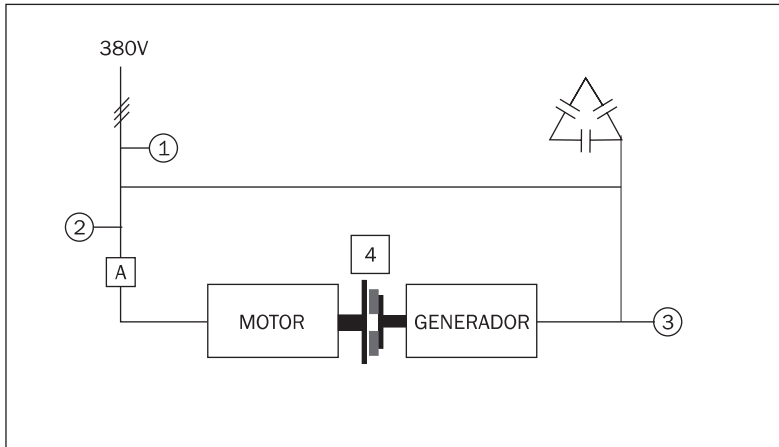
cuando se carga, produzca energía eléctrica capaz de ser reinyectada a la línea de alimentación (**Figura 1**). El *generador asincrónico* reúne características de funcionamiento que lo hacen especialmente apto para cumplir con ese cometido [2].

El generador asincrónico es, en realidad, un motor trifásico que funciona a una velocidad superior a la velocidad de sincronismo ( $n_s$ ) dada por la frecuencia ( $f$ ) y los polos ( $P$ ) de su arrollamiento; a impedancia de carga constante, desarrolla una potencia cuyo valor puede regularse sencillamente –dentro de los márgenes limitados por su corriente nominal– mediante la modificación de aquella velocidad.

Para poder usar tal generador como carga de motores de distintas velocidades, es necesario agregar un dispositivo intermedio entre los ejes, que funcione con velocidades muy variables a la entrada (digamos 1000, 1500 o 3000 rpm sincrónicas) y con una velocidad bastante inferior a éstas y no tan variable a la salida (en este caso particular digamos de 760 a 790 rpm). Dicho dispositivo intermedio se ha dado en llamar *acoplamiento de alto deslizamiento (AAD)*, cuya función es transmitir potencia entre dos ejes de distinta velocidad.

El AAD no es más que un acoplamiento magnético por corrientes parásitas [3] (*Eddy-Current coupling*), que funciona según principios físicos conocidos y se usa –con imanes permanentes o electroimanes– para la transmisión de potencia en ejes [4] [5] sin contacto mecánico (por ejemplo bombas), para embragues [6], frenos [7] y equipos de velocidad variable [8].

El sistema de AAD esquematizado en la Fig. 1 funciona de una forma sumamente sencilla: al incrementar la capacidad de acople entre ambas máquinas, el motor se frena entregando potencia en su eje y el generador se acelera reponiendo energía a la línea. La energía repuesta es senoidal y no requiere de filtros u otros accesorios para reducir su contenido de armónicos, como suele necesitarse en otros sistemas.



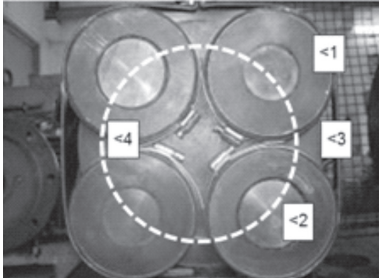
**FIGURA 1.** Sistema de experimentación Motor –Acoplamiento (CCD)– Generador

**Referencias:** 1, 2 y 3 son los instrumentos de medición (analizadores de potencia), A es un autotransformador para el arranque suave del motor o un convertidor de frecuencia para variar su velocidad. El acoplamiento de alto deslizamiento 4 solidariza los ejes del motor y del generador.

## II. Prototipo de acoplamiento de alto deslizamiento

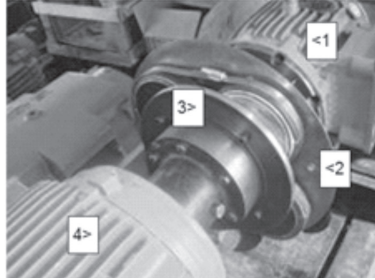
El primer prototipo de AAD –desarrollado luego de varias pruebas preliminares– estuvo constituido por dos discos de hierro de unos 300 mm de diámetro y 5 mm de espesor. En uno de ellos –acoplado al eje del generador, de menor velocidad– se montaron cuatro imanes permanentes (**Figuras 2 y 3**) anulares tipo parlante de 68 mm y 51 mm de núcleo central, lo suficientemente sujetos para evitar desprendimientos por fuerzas centrífugas. Al segundo disco –acoplado al eje del motor, de mayor velocidad– se atornilló otro de cobre de 2 mm de espesor, en el cual se generarán las corrientes parásitas que producirán la cupla de transmisión de potencia.

Entre los imanes y el disco de cobre se dejó normalmente una distancia de 2 mm (originando un entrehierro  $\delta = 4mm$ ), que podría eventualmente variarse para cambiar la densidad de flujo y con ella la capacidad de enganche magnético.



**FIGURA 2.** Vista frontal del disco de hierro con los imanes.

**Referencias:** 1: imán anular; 2: núcleo central de hierro del imán; 3: disco posterior de sujeción. La línea cortada 4 indica la zona recorrida por el sensor de efecto Hall



**FIGURA 3.** Vista del disco de cobre acoplado al eje del motor y los imanes

**Referencias:** 1: motor de impulso; 2: disco de cobre sujeto al eje del motor; 3: disco de imanes sujeto al eje del generador; 4: generador asincrónico

### III. Ensayos realizados

Los primeros ensayos realizados al sistema de la Fig. 1 apuntaron a la obtención de los parámetros funcionales básicos que se consideraron útiles para el posterior cálculo de un AAD de mayor potencia.

Los valores requeridos preliminarmente fueron los siguientes:

- Densidades de flujo magnético en el entrehierro.
- Momento de transmisión y pérdidas.
- Valores del sistema reponiendo energía a la línea.
- Estimación de potencias y rendimientos.

El instrumental y equipo utilizados en las pruebas fueron:

- Motor de impulso: 380 V, 50 Hz, 8,08 A, 4,0 kW, 2890 rpm
- Motor como generador asincrónico: 380 V, 50 Hz, 7,59 A, 3,0 kW, 710 rpm
- Tacómetro por reflexión
- Analizador de redes
- Osciloscopio
- Pinza voltamperométrica
- Termómetro por reflexión
- Multímetro Digital

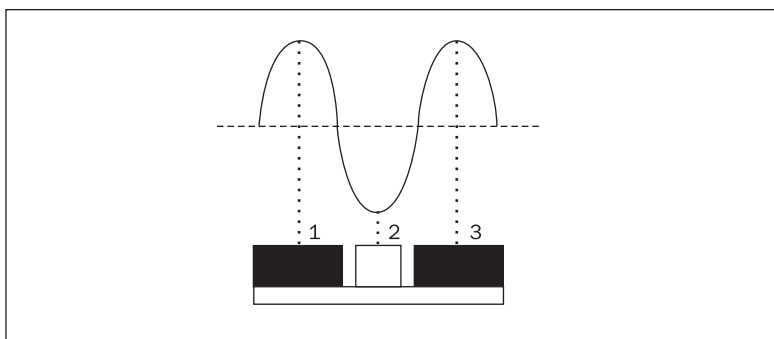
- Autotransformador trifásico 0-400 V, 35 A o convertidor de frecuencia 380 V, 25 A
- Sensor de efecto Hall de 2,5V, 1,3 mV/G
- Placa de bobinas tipo circuito impreso

### III.1. Obtención de las densidades de flujo magnético en el entrehierro

#### III.1.1. Usando sensor de efecto Hall

El sensor de efecto Hall se ubicó entre los imanes y el disco del motor, en la línea circular formada por los centros de aquellos (indicada en la Fig. 2). El entrehierro fue de 10 mm. No se colocó en este caso el disco de cobre, a los fines de no introducir campos de reacción por la circulación de corrientes en él. El disco de hierro del motor se mantuvo quieto y los imanes giraron a 1500 rpm (velocidad angular).

Las curvas de densidad de flujo (B) en función del tiempo (t) o del espacio (e) obtenidas mediante esta prueba fueron aproximadamente senoidales, como era de esperar. En la **Figura 4** se esquematiza la generación de dicha curva.



**FIGURA 4.** Distribución de B (T) en el espacio frente cada imán

**Referencias:** 1 y 3 son dos puntos diametrales del anillo exterior del imán anular y 2 es su núcleo central. La curva indica la distribución del campo magnético en el espacio frontal

Los valores máximos (puntos 1 y 3, correspondientes al anillo exterior del imán) y el mínimo (punto 2, correspondiente al núcleo central) –en promedio– fueron:

$$\begin{aligned} B_{1,3} &= 0,13 \text{ T (máximos)} \\ B_2 &= 0,047 \text{ T (mínimos)} \end{aligned} \quad (1)$$

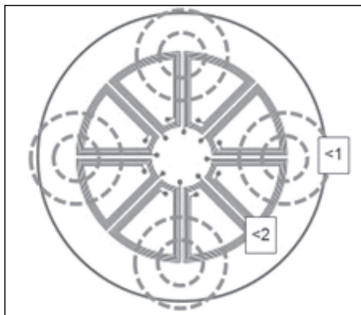
que arroja como valor máximo del semiciclo 0,042 T.

Si se reduce el entrehierro a unos 4 mm –espacio común usado en estas experiencias–, este valor de densidad se elevará proporcionalmente a la reducción de reluctancia.

Las corrientes parásitas generadas en el disco de hierro enfrentado a estos imanes son de 150 Hz (1,5 ciclos por imán, 4 imanes, 6 ciclos por revolución, 25 revoluciones por segundo).

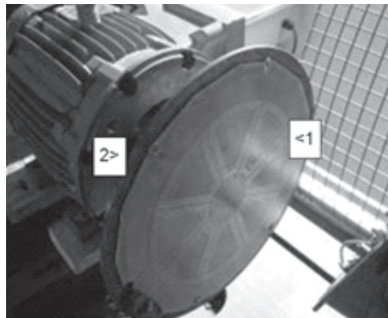
### III.1.2. Usando una placa de bobinas tipo circuito impreso

La placa de circuito impreso tiene unas trazas formando 8 bobinas planas trapezoidales conectadas en serie con 4 espiras cada una (**Figura 5**). En esta figura se observa la ubicación de los imanes enfrentados a aquella (en línea cortada). La placa se mantuvo fija y los imanes se hicieron girar a 1500 rpm, lo cual produce fuerzas electromotrices [9]  $e=(B \times v)l$  en las trazas de aquella, que pueden medirse a los extremos de la serie con un osciloscopio.



**FIGURA 5.** Placa de circuito impreso e imanes

**Referencias:** 1: imán anular (línea cortada); 2: trazas del circuito impreso enfrentado



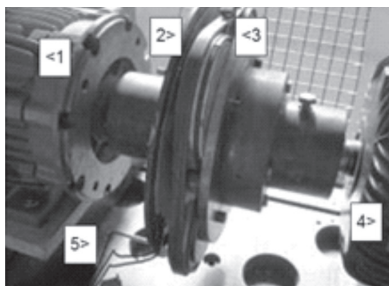
**FIGURA 6.** Sujeción de la placa impresa al disco fijo

**Referencias:** 1: placa de circuito impreso; 2: disco de hierro sujeto al eje del motor



La **Figura 6** muestra la placa de circuito impreso sujeta al disco fijo de hierro. En la **Figura 7** se observan, a la izquierda, el motor que sostiene el disco fijo de hierro con la placa y a la derecha los imanes giratorios. Abajo se ven los conductores de conexión al osciloscopio. El entrehierro fue de 10 mm (igual que en el caso anterior).

Tomando las apropiadas longitudes de las trazas y la velocidad tangencial, los valores de la densidad de flujo (B) obtenidos con estas comprobaciones fueron cercanos a los logrados con el sensor de efecto Hall. En la **Figura 8** se ven las curvas de las fuerzas electromotrices producidas.



**FIGURA 7.** Disposición de placa e imanes

**Referencias:** 1: motor con eje bloqueado; 2: disco con placa impresa; 3: imanes rotantes; 4: motor de impulso; 5: conexiones de la placa al osciloscopio



**FIGURA 8.** Curvas de fems en la placa impresa. Las líneas superior e inferior indican los valores máximos de la fem inducida en la placa impresa por los imanes rotantes

Los valores máximos se ven algo diferentes debido a las diferencias constructivas de los imanes. Tomando el máximo valor de 1,4 V, y la sumatoria de las longitudes de las trazas útiles de 3,00 m, con una velocidad tangencial de 14 m/s (radio de 0,089 m), la densidad B de flujo fue:

$$B = \frac{1,4 \text{ V}}{(3,00 \text{ m}) \left(14 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 0,033 \text{ T} \quad (2)$$

Es un valor cercano a los 0,042 T verificados con el sensor de efecto Hall.

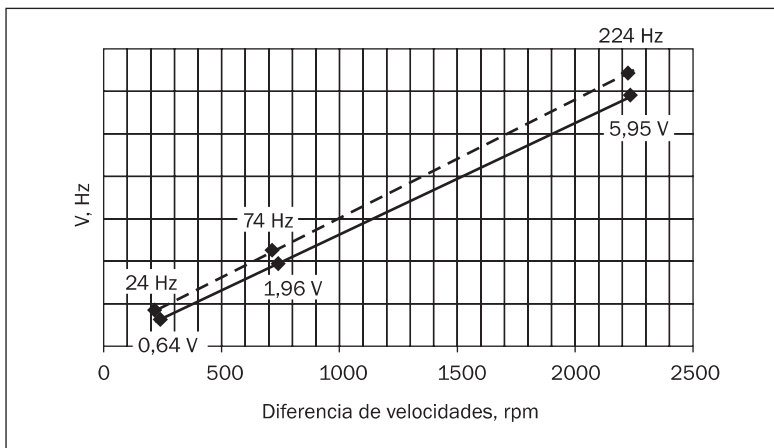
Tomando un valor promedio entre 0,033 T y 0,042 T, que es aproximadamente 0,038 T, para un entrehierro de 4 mm la densidad será:

$$B = (0,038 \text{ T}) \left( \frac{10 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} \right) = 0,095 \text{ T} \quad (3)$$

Este nuevo valor, a distintas relaciones de velocidades y con la misma longitud útil de trazas del circuito impreso, teóricamente produciría las tensiones ( $B \times v$ ) / eficaces de la **Tabla 1** y las frecuencias de la **Figura 9** (no se consideran el aumento de resistencia por temperatura ni la variación de velocidad del motor y el generador). En esta tabla, para redondear y simplificar, se tomaron las velocidades sincrónicas exactas de los motores y una velocidad promedio del generador de 760 rpm. Obviamente, las tensiones y frecuencias medidas a los extremos del circuito impreso son directamente proporcionales a las diferencias de velocidades entre los imanes y el disco de cobre. En los cálculos tampoco se consideran los efectos de bordes del campo magnético.

**TABLA 1.** Tensiones a bornes de las trazas según la velocidad

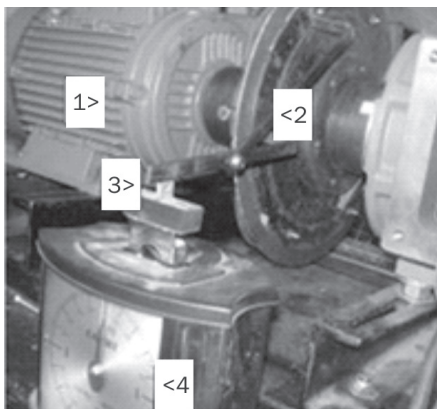
Densidad de flujo T	Longitud trazas M	Velocidad motor rpm	Velocidad generador rpm	Radio de giro m	Velocidad relativa m/s	Tensión máxima V, (Hz)	Tensión eficaz V
0,095	3,00	3000	760	0,089	20,9	5,95 (224)	4,19
0,095	3,00	1500	760	0,089	6,89	1,96 (74)	1,38
0,095	3,00	1000	760	0,089	2,24	0,64 (24)	0,45



**FIGURA 9.** Frecuencias y tensiones inducidas en función de la diferencia de velocidades motor-generador

### III.2. Obtención del momento de transmisión y las pérdidas

En el mismo disco de la Fig. 6 se instaló –previa extracción de la placa impresa y agregado de la placa de cobre de la Fig. 3– un brazo de palanca cuyo extremo apoyó sobre una balanza convencional, y se hicieron rotar los imanes a 1500 rpm, lo cual permitió determinar la cupla que se produce en la transmisión (**Figura 10**).



**FIGURA 10.** Determinación del momento de transmisión

**REFERENCIAS:** 1: motor de impulsión con imanes; 2: disco de cobre-hierro oscilante; 3: brazo de palanca; 4: balanza

El brazo de palanca fue  $m=0,319 m$ , el entrehierro se fijó en  $\delta =4 mm$  (normal). La fuerza resultó fluctuante, de igual manera que la densidad de flujo. En promedio, su valor fue de  $F=4,20 kg$ , arrojando un momento  $T=13,1 Nm$ .

La potencia [10]  $P (W)$  transmitida por el eje de los imanes en estas condiciones fue, entonces, de:

$$P = \frac{(13,1 Nm) (2 \pi) (1500 rpm)}{60 s} = 2056,7 W \quad (4)$$

valor que resultó bastante importante teniendo en cuenta que las dimensiones de los discos y de los imanes son reducidas.

Considerando –según las mediciones anteriores– una densidad de flujo de  $B = 0,095 T$  una longitud promedio (diámetro) de la pieza central de los imanes  $l = ((68+51))/2=59,5 mm$  y un radio de aplicación de las fuerzas de  $r = 0,089 m$  la intensidad de corriente [11] –que circulará por el disco de cobre y por el de hierro siguiendo las trayectorias indicadas en la **Figura 11**– producida por cada imán será aproximadamente:

$$i = \frac{F}{4.B.l} = \frac{(9,81 \frac{N}{kg}) (4,2 kg) (\frac{0,319 m}{0,089 m})}{8 (0,095 T) (0,0595 m)} = 3267,8 A \quad (5)$$

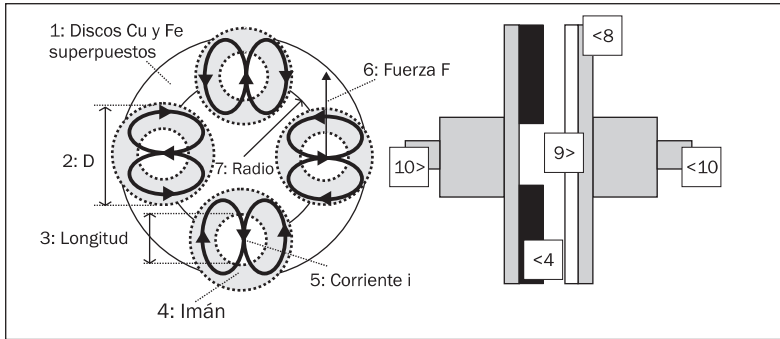
Para calcular la resistencia, el área de pasaje de dicha corriente se podría aproximar en:

$$A_{cu} = (59,5 mm)(2 mm) = 119 mm^2 \text{ para el disco de cobre} \quad (6)$$

$$A_{fe} = (59,5 mm)(5 mm) = 297,5 mm^2 \text{ para el disco de hierro superpuesto} \quad (7)$$

Por otro lado, se creyó razonable considerar, de manera aproximada y sabiendo que los imanes tienen un diámetro externo de  $D=120 mm$ , que aquella corriente circula por un camino cuya longitud ( $l_{cu}$ ) es igual a dicho diámetro, ya que las resistencias de los caminos laterales se podrían despreciar, por el gran valor de la superficie (Fig. 11):

$$D = l_{cu} = l_{fe} = 0,120 m \quad (8)$$



**FIGURA 11.** Trayectorias de las corrientes inducidas por los imanes en los discos de cobre y hierro (vistas frontal y lateral del AAD)

**Referencias:** 1: discos donde se producen las corrientes (8 y 9); 2: diámetro externo del imán anular considerado para el cálculo de resistencia; 3: diámetro interno del imán considerado para el cálculo de fem; 4: imán anular; 5: corrientes inducidas por el imán; 6: fuerza originada por las corrientes inducidas; 7: radio medio donde se considera generada la fuerza; 8: disco de hierro; 9: disco de cobre; 10: ejes de transmisión

La resistencia del camino de corriente al frente de cada imán (para una resistividad del cobre de  $0,017 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ ) fue de:

$$R_{cu} = \frac{\left(\frac{0,017 \Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}\right) (0,120 \text{ m})}{119 \text{ mm}^2} = 1,7 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (9)$$

en tanto que la resistencia del camino en el disco de hierro superpuesto (para una resistividad de  $0,0971 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$ ) fue de:

$$R_{fe} = \frac{\left(\frac{0,0971 \Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}\right) (0,120 \text{ m})}{297,5 \text{ mm}^2} = 3,92 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (10)$$

Las resistencias de cobre y hierro en paralelo fueron (Fig. 11):

$$R_{(cu+fe)} = \frac{(1,71 \cdot 10^{-5} \Omega) (3,92 \cdot 10^{-5} \Omega)}{(1,71 \cdot 10^{-5} \Omega) + (3,92 \cdot 10^{-5} \Omega)} = 1,19 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (11)$$

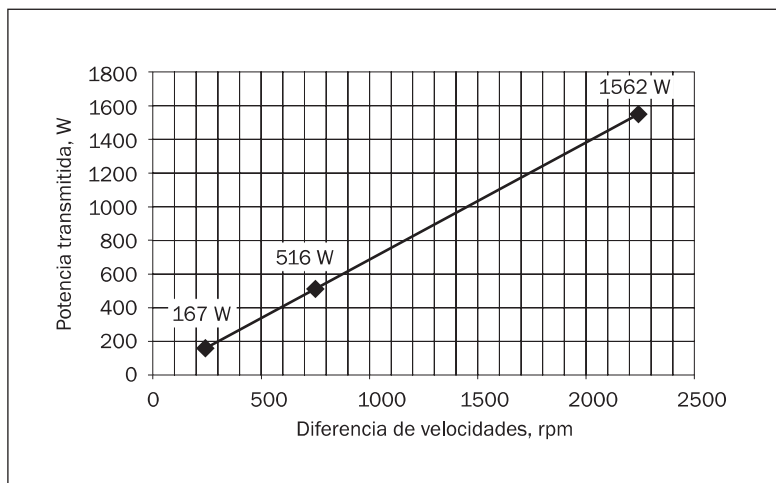
Y las pérdidas producidas por los 4 imanes fueron:

$$P_{(cu+fe)} = 4 (3267,8 \text{ A})^2 (1,19 \cdot 10^{-5} \Omega) = 508,3 \text{ W} \quad (12)$$

La corriente de la expresión (5) resulta directamente proporcional a la tensión inducida y, por lo tanto, a la velocidad relativa entre los imanes y el disco de cobre (en este caso 1500 rpm). En la **Tabla 2** y la **Figura 12** se indican los valores calculados para distintas velocidades relativas.

**TABLA 2.** Corrientes, tensiones, pérdidas y potencias según la velocidad

Velocidad motor rpm	Velocidad generador rpm	Velocidad relativa rpm	Corriente en discos A	Resistencia del circuito $\Omega$	Tensión Inducida V	Pérdidas W	Potencia transmitida W
3000	760	2240	4880	1,19E-05	0,058	1134	1562
1500	0	1500	3268	1,19E-05	0,039	508	0
1500	760	740	1612	1,19E-05	0,019	124	516
1000	760	240	523	1,19E-05	0,006	13	167



**FIGURA 12.** Potencia transmitida en función de la diferencia de velocidades motor-generador

Para reducir las pérdidas se deberían adoptar mayores volúmenes de cobre y minimizar o anular las corrientes producidas en el hierro, usando chapa laminada o rediseñando el circuito magnético.

### III.3. Valores del sistema reponiendo energía a la línea

El ensayo del sistema conectado a la línea se realizó usando las máquinas ya mencionadas:

- Motor de impulso: 380 V, 50 Hz, 8,08 A, 4,0 kW, 2890 rpm
- Motor como generador: 380 V, 50 Hz, 7,59 A, 3,0 kW, 710 rpm

*Primera prueba:* se usó el circuito indicado en la Fig. 1 respetándose, en esta primera experiencia, las siguientes condiciones: sin capacitores conectados; imanes del acople = 4; disco de cobre de 2 mm de espesor; entrehierro= 4 mm. Se despreciaron las pérdidas en el autotransformador. Los valores obtenidos se indican en la **Tabla 3**.

**TABLA 3.** Valores de mediciones sin capacitores

Punto medición ↓	V	A	kW	Cos φ	rpm Motor	rpm Generador
Entrada línea (1)	385	11.9	4.35	0.55	2908	756
Consumido motor (2)	383	9.47	5.17	0.82		
Entregado generador (3)	384	4.9	0.61	-0.19		

*Segunda prueba:* a los fines de corregir el factor de potencia en el punto 1 (Fig. 1) y lograr una reducción de la corriente consumida, se calculó e insertó una capacidad y manteniendo iguales condiciones a las del ensayo anterior. Los valores obtenidos se indican en la **Tabla 4**.

**TABLA 4.** Valores de mediciones con capacitores

Punto medición ↓	V	A	kW	Cos φ	rpm Motor	rpm Generador
Entrada línea (1)	383	6.5	4.19	0.97	2909	756
Consumido motor (2)	380	9.22	5.02	0.82		
Entregado generador (3)	379	4.9	0.59	-0.19		

Como se puede observar, comparando con la Tabla 3, a valores similares de la potencia consumida por el motor, se redujo notablemente la corriente tomada de la línea (punto 1 de la Fig. 1) y se mejoró el factor de potencia.

#### III.4. Estimación de las potencias y rendimientos

De los datos de la Tabla 4 y utilizando las curvas características (par y corriente en función de la velocidad según catálogo del fabricante [12]) de los motores utilizados, se estimaron las potencias parciales presentes en el equipo y los rendimientos. Los valores obtenidos se muestran en la **Tabla 5**. Las pérdidas del acoplamiento (1395 W) estimadas en esta tabla son razonablemente cercanas a las obtenidas por el cálculo  $i^2 \cdot R$  de la Tabla 2 (1134 W).

**TABLA 5.** Potencias parciales, pérdidas y rendimientos

	Potencia consumida W	Potencia entregada W	Pérdida W	Rendimiento %
Motor	5020	3303	1717	65,8
Generador	1908	590	1318	30,9
Acoplamiento	3303	1908	1395	57,8
Equipo	5020	590	4430	11,8

#### IV. Conclusiones

Luego de estas valiosas experiencias, resulta de sumo interés realizar una serie de conclusiones trasladables a futuros cálculos o investigaciones. Entre ellas, se pueden enumerar las siguientes:

- El sensor de efecto Hall y la placa de circuito impreso resultaron accesorios adecuados para averiguar las densidades de flujo en el entrehierro y las frecuencias de las corrientes inducidas.
- Los valores de dichas densidades de flujo fueron reducidos y se podrían aumentar con imanes de otros materiales (p.ej. Neodimio).
- Las tensiones y corrientes generadas en el disco de cobre son proporcionales a las velocidades relativas entre motor y generador.



- Las corrientes inducidas en dicho disco y en el hierro son elevadas y, por lo tanto, producen pérdidas calóricas importantes y altas temperaturas.

- El sistema funcionó según las expectativas iniciales y pudo devolver energía a la red, pero con bajo rendimiento (11,8%). Para obtener un mayor rendimiento –dado que es deseable un 70%– es necesario realizar un importante redimensionamiento de la arquitectura y de los componentes activos (hierro y cobre) del AAD; por otro lado, se requiere agregar capacitores a la línea para corregir el factor de potencia y reducir las corrientes consumidas.

- La variación de la potencia transmitida del motor al generador simplemente se lograría acercando o alejando el disco de cobre a los imanes, lo cual es una manera eficaz y que no requiere energía adicional ni mecanismos demasiado complejos.

- No se verificaron, en la red, perturbaciones originadas por posibles armónicos provenientes del sistema.

- El estudio y el cálculo analítico del funcionamiento del AAD arrojaron valores cercanos a los obtenidos en los ensayos (Tablas 2, 4 y 5), además de claridad y datos útiles para calcular transmisiones de mayores potencias y distintas velocidades.

- Los recursos limitados con los que se desarrolló este prototipo de AAD no permitieron realizarle los cambios constructivos (p.ej. con discos de otras dimensiones y materiales, usando otros motores o mejorando el diseño), a través de los cuales se hubieran logrado los resultados estadísticos necesarios para comprobar efectivamente o corregir los principios de obtención de los parámetros expresados en este trabajo. Esta es una tarea que queda pendiente para próximas investigaciones.

## Referencias bibliográficas

1. BRITO CORONEL, E. N. (2007). *Banco Dinamométrico Borghi & Saveri*. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/185/1/Indice.pdf>. [31 de abril de 2012].
2. CHAPMAN, SJ. *Máquinas eléctricas*. 4ªed. México: Mc Graw-Hill; 2005. pp. 460-464.
3. SEARS, F.W.; ZEMANSKY, M.W.; YOUNG, H.D.; FREEDMAN, R.A. *Física Universitaria*. México: Pearson Universitaria; 2005.
4. DROTEC BOMBAS INDUSTRIALES (2012). *Breve introducción a las bombas de acople magnético*. Disponible en: [http://www.drotec.com.ar/files/acoplemagnetico\\_gral\\_rev02.pdf](http://www.drotec.com.ar/files/acoplemagnetico_gral_rev02.pdf). [31 de abril de 2012].
5. BRIGANTI, F. (2004) *Eddy Currents Drives*. Disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/15923820/Eddy-Current-Drives> > [31 de abril de 2012].
6. KENDRION POWER TRANSMISSION (2012). *Embrague electromagnético monodisco*. Disponible en: [http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2495/pm\\_line.pdf](http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2495/pm_line.pdf) . [31 de abril de 2012].
7. GAY,S.E. *Contactless magnetic brake for automotive applications*. (2005). Disponible en: <http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-1005/GAY-DISERTATION.pdf>> . [31 de abril de 2012].
8. HANSEN, A; TIMMLER W.R. *Theory for Eddy-Current Coupling*. En: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1963; 82 (67): 436-442.
9. MITOPENCOURSEWARE. (2010). *Module 21: Faraday's Law of Induction*. EE.UU: Massachusetts Institute of Technology. Disponible en [http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-02sc-physics-ii-electricity-and-magnetism-fall-2010/faradays-law-1/faradays-law/MIT8\\_02SC\\_notes21.pdf](http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-02sc-physics-ii-electricity-and-magnetism-fall-2010/faradays-law-1/faradays-law/MIT8_02SC_notes21.pdf). [31 de abril de 2012].
10. CHAPMAN, SJ. *Máquinas eléctricas*. 4ªed. México: Mc Graw-Hill; 2005. pp.6-8.
11. CHAPMAN, SJ. *Máquinas eléctricas*. 4ªed. México: Mc Graw-Hill; 2005. pp. 32-33.
12. WEG MOTORES ELÉCTRICOS. (2012). *W22 Motor Eléctrico Trifásico*. Argentina. Disponible en: [http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-lati\\_noamericano-50024297-catalogo-espanol.pdf](http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-lati_noamericano-50024297-catalogo-espanol.pdf)> [31 de abril de 2012].