

INFORME DE PRUEBA COMO MOTOR DE UNA MÁQUINA DE DOBLE ROTOR

Ramon Bargalló Perpiñà

Catedrático de Escuela Universitaria, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTECH.

Antecedentes.

En noviembre de 2023 se presenta, para su evaluación en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela d'Enginyeria Barcelona Est (EEBE-UPC BarcelonaTECH), una máquina eléctrica rotativa de nuevo diseño basada en la patente presentada en la European Patent Office con el número de índice Global (Global Patent Index) - EP 3512082 A4 (<https://data.epo.org/gpi/EP3512082A4-MAGNETIC-DEVICE-SUITABLE-FOR-USE-AS-APOWER-GENERATOR-OR-DRIVE-MOTOR>), cuya documentación puede consultarse on-line.

Introducción

Se solicita realizar el ensayo de la máquina como motor de un prototipo bifásico realizado en base a la patente referida, con algunas mejoras introducidas en su ejecución. La máquina se alimenta con dos inversores monofásicos sincronizados entre ellos y con realimentación mediante sensores por efecto Hall.

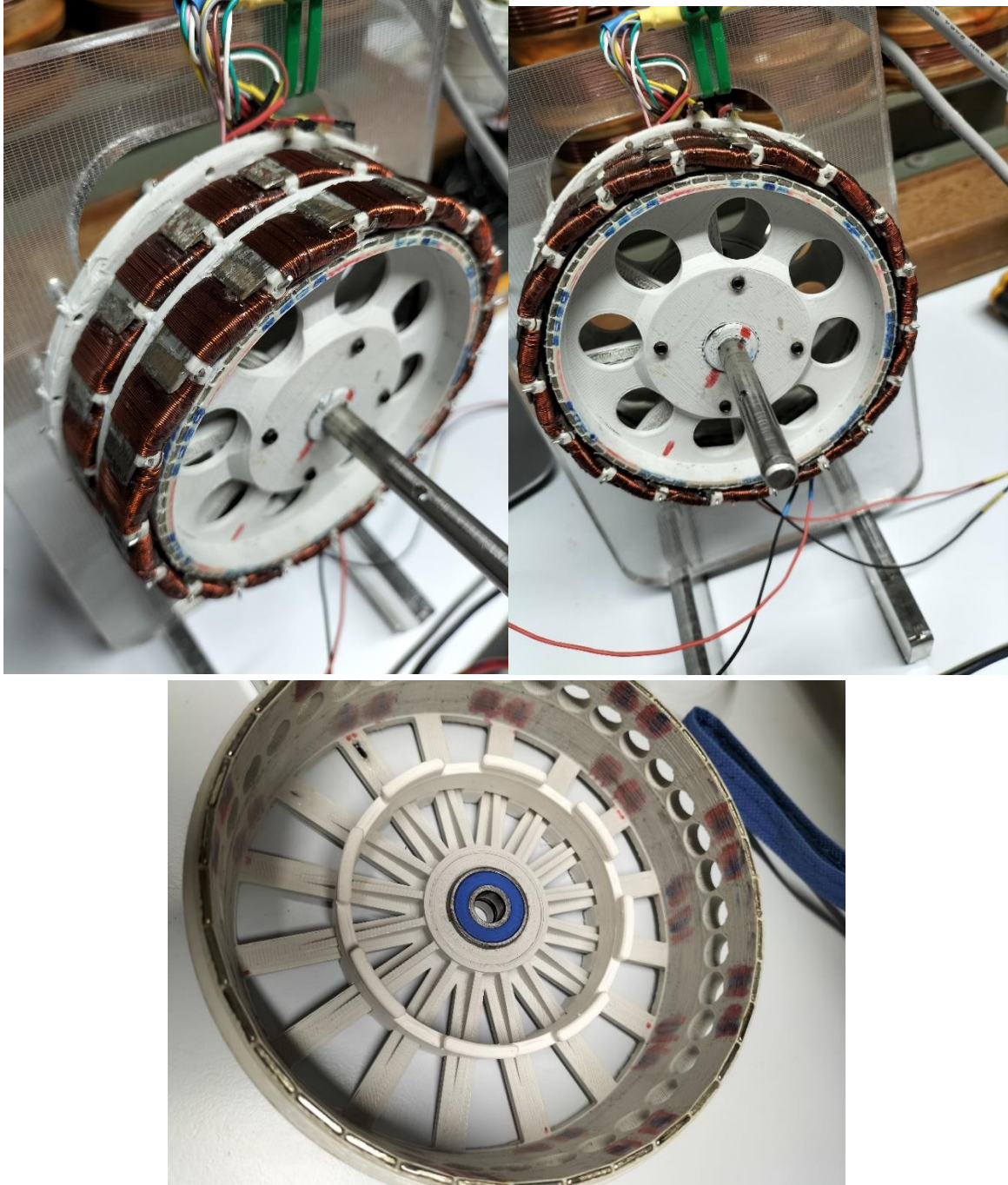
Los ensayos se han realizado en el banco de ensayo de motores que cuenta con un medidor de par hasta 10 Nm con resolución 0.1%, medida de velocidad y capacidad de modificar la carga sobre el eje del motor a ensayar.



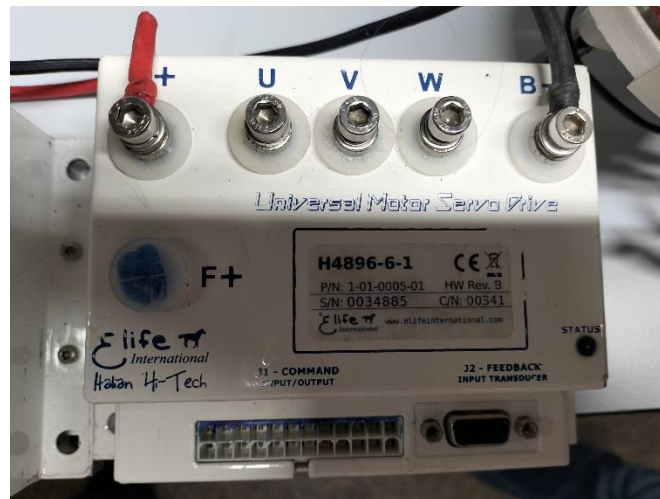
Como medidor de potencia se usa un vatímetro Zimmer con capacidad de medir hasta 4 canales independientes, con lo que se ha podido medir el consumo de cada bobinado y el global de la máquina.

Motor ensayado.

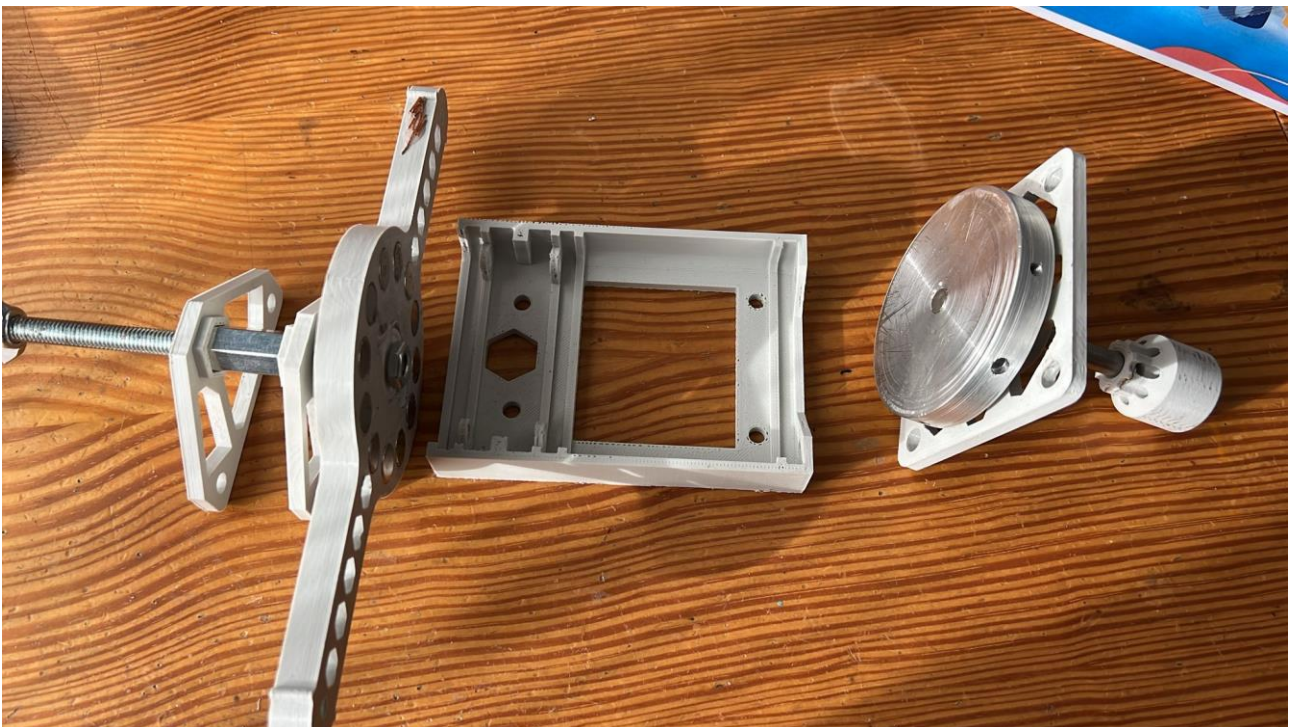
El motor ensayado tiene dos rotores con imanes permanentes, uno a cada lado del estator. Cada una de las bobinas se encuentra enrollada a piezas ferromagnéticas.



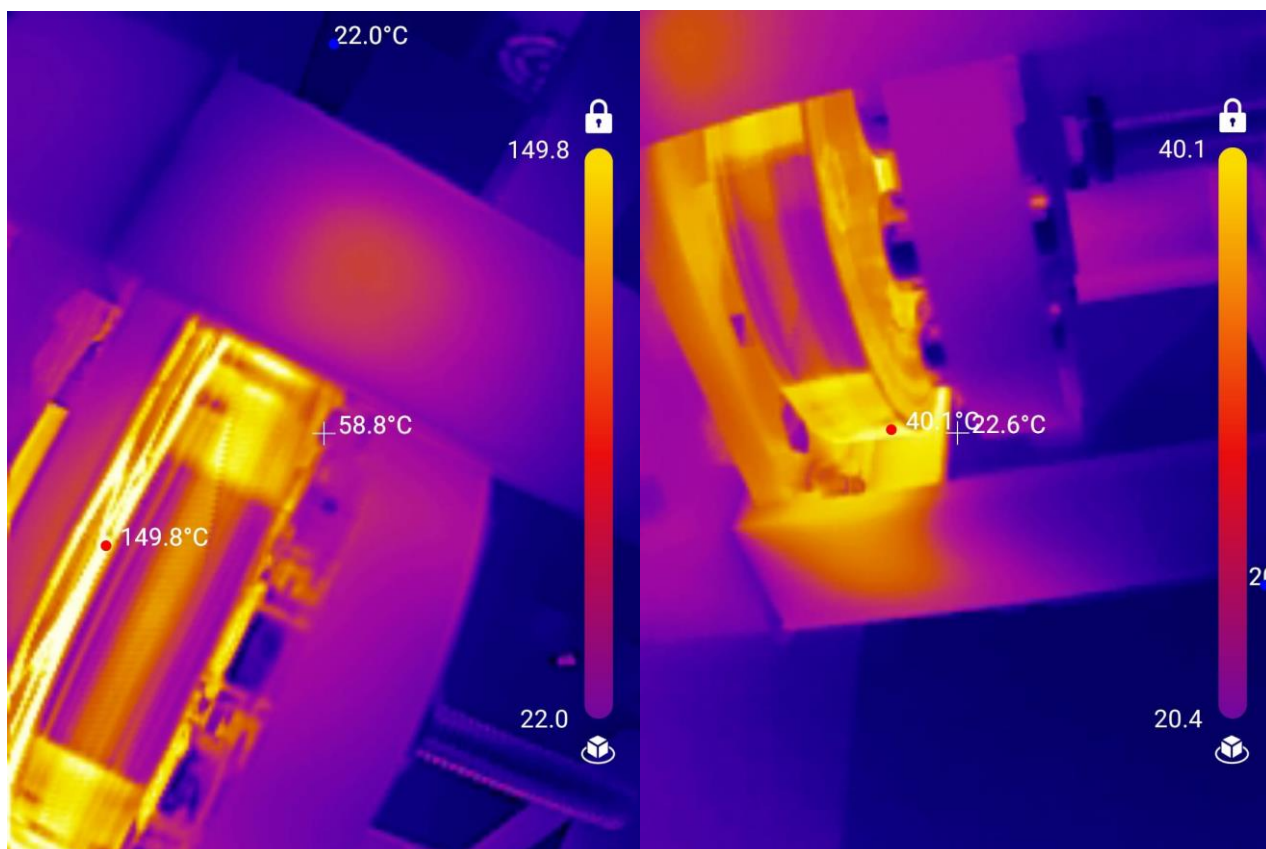
La figura que sigue muestra uno de los drives que alimenta el motor. Cada una de las bobinas se conecta a un inversor diferente entre los terminales U y V, posteriormente desde un PC se ajusta el ángulo de control de los mismos para que funcionen de forma sincronizada.



El rango de par solicitado para el ensayo fue entre 0 y 0.4 Nm y dado que el freno original del banco tiene como valor mínimo un par de 0.3 Nm se decidió desmontar el mismo y construir (por parte de la empresa que encargo el ensayo) un freno por corrientes de Foucault basado en un disco de aluminio y un conjunto de imanes permanentes que podían posicionarse para modificar el par de frenado.



El sistema funciona perfectamente. El disco de aluminio al final del ensayo estaba a unos 150 °C de temperatura, empezando a degradar el plástico de la envolvente de este.



En un informe realizado anteriormente, se indican como valores de referencia los siguientes:

TABLA I

Longitud axial externa total	4,5 cm
Diámetro externo total	13 cm
Longitud axial por fase [L_ϕ]	1 cm
Diámetro del circuito estatórico [D_{est}]	9,5 cm
Espesor radial del circuito estatórico	0,5 cm
Espesor radial del acoplamiento* [ΔR] (rotor interior – estator – rotor exterior)	1,5 cm
Velocidad límite estimada	2.000 rpm
Nº de polos	18 (9 ciclos)
Nº de fases	2
Diámetro hilo esmaltado	0,3 mm
Corriente nominal del hilo	0,25 A

Si consideramos que el diámetro y longitud del estator (9.5 cm, 1 cm por fase) son las magnitudes que definen el volumen del rotor a fines de cálculo de prestaciones, obtenemos un volumen de

$$V_r = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot 9.5^2 \cdot 2 = 141.76 \text{ cm}^3$$

Y dado que el par que se considera como nominal es de $M_n = 0.17 \text{ Nm}$ da una densidad de par de:

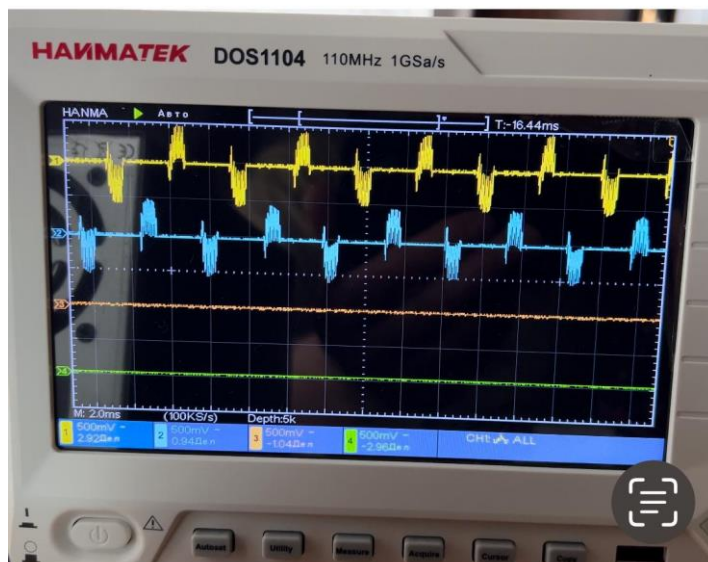
$$TRV = \frac{M_n}{V_r} = \frac{0.17}{141.76 \cdot 10^{-6}} = 1200 \text{ Nm/m}^3$$

Como referencia las máquinas de pequeña potencia presentan valores de este parámetro que oscilan entre 7000 a 14000 Nm/m³ lo que indica un aprovechamiento magnético bajo pero coherente con el hecho que es un motor sin circuito magnético ferromagnético, pero con una peso muy inferior al de un motor convencional con las mismas dimensiones.

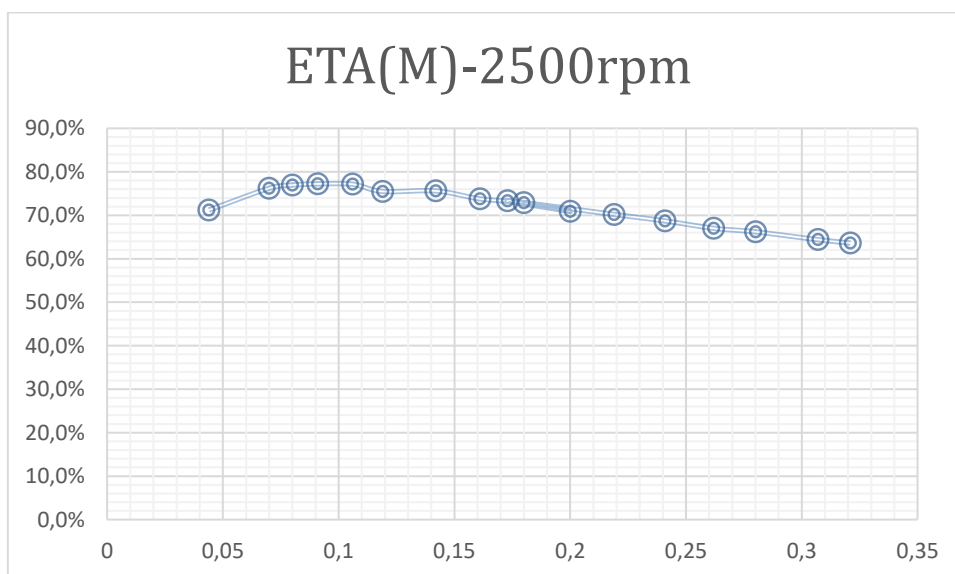
Class of machine	TRV kNm/m ³
Small totally-enclosed motors (Ferrite magnets)	7 - 14
Totally-enclosed motors (sintered Rare Earth or NdFeB magnets)	14 - 42
Totally-enclosed motors (Bonded NdFeB magnets)	20
Integral-hp industrial motors	7 - 30
High-performance servomotors	15 - 50
Aerospace machines	30 - 75
Large liquid-cooled machines (e.g. turbine-generators)	100 - 250

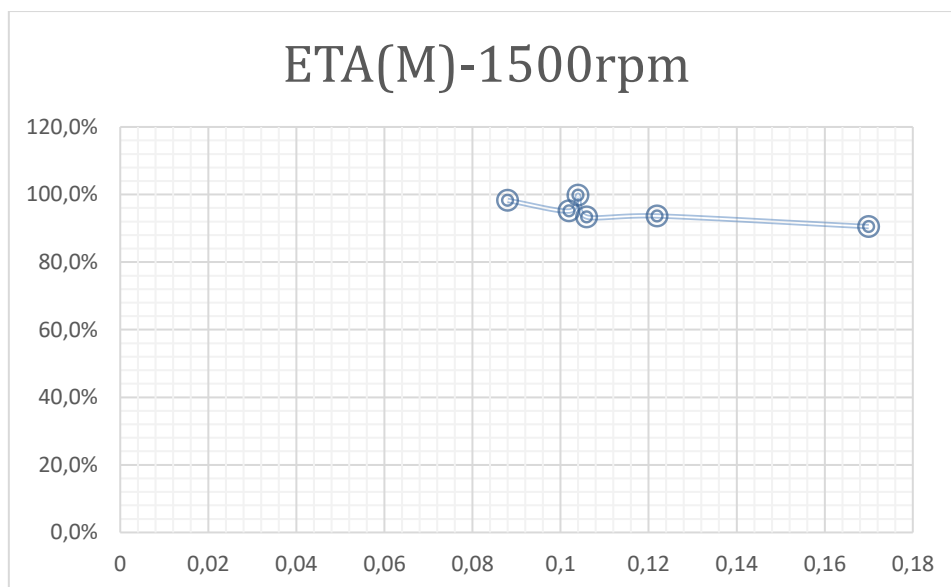
Resultados del ensayo.

Se alimenta el motor a partir de los inversores con una forma de onda de pulsos desfasados según la figura.

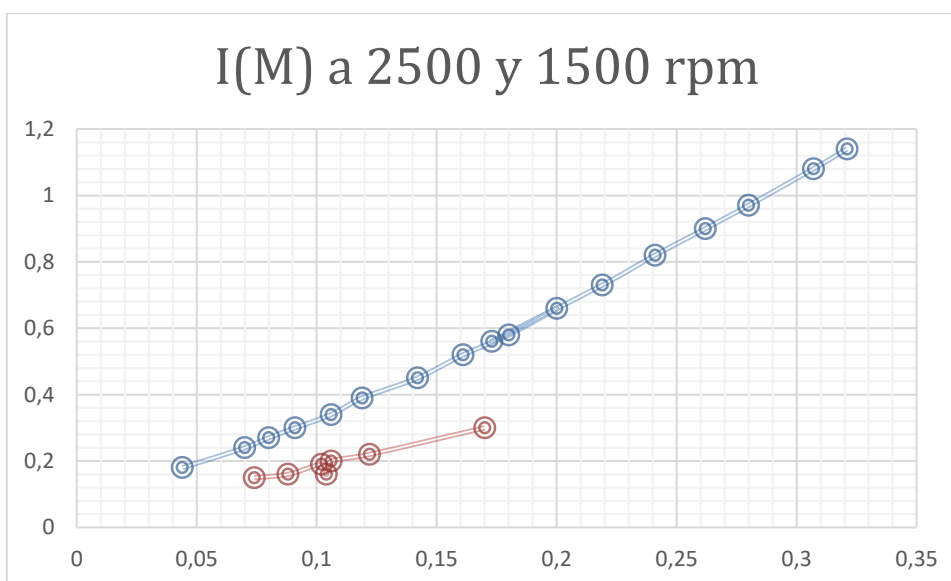


Se ha realizado el ensayo a diferentes velocidades, obteniendo los resultados de los gráficos mostrados posteriormente (para ver resultados completos consultar el Excel adjunto) Cabe destacar que se ha realizado el ensayo dos veces (El 28/11/2023 y el 12/12/2023) ya que el primer día quedaron dudas sobre la resolución de las medidas por lo que se decidió revisar los instrumentos y repetir el ensayo. El segundo día los resultados fueron aceptados. Cabe indicar que el límite obtenido fue debido a las limitaciones de la electrónica de alimentación, al alcanzar un determinado límite recortaban la salida y la velocidad empezaba a caer.



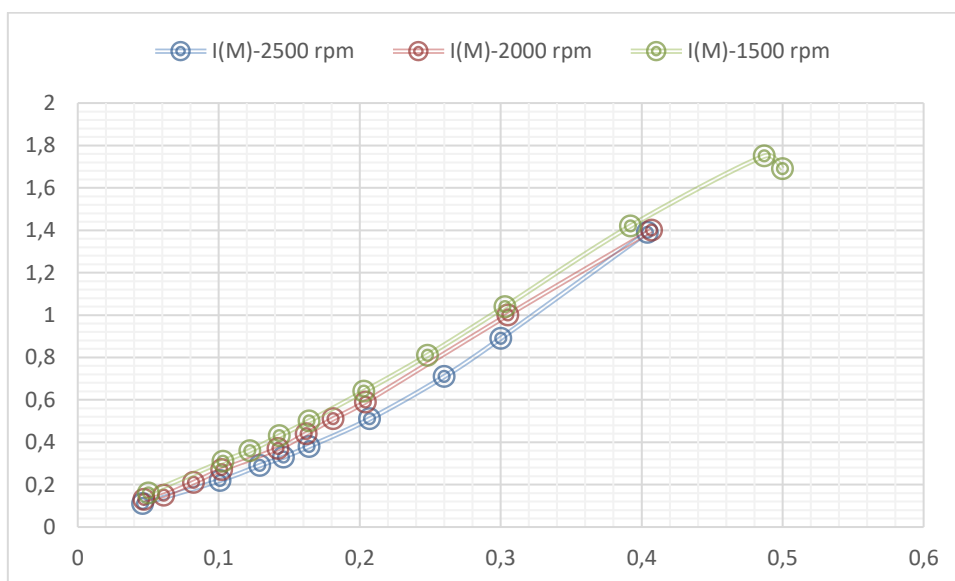
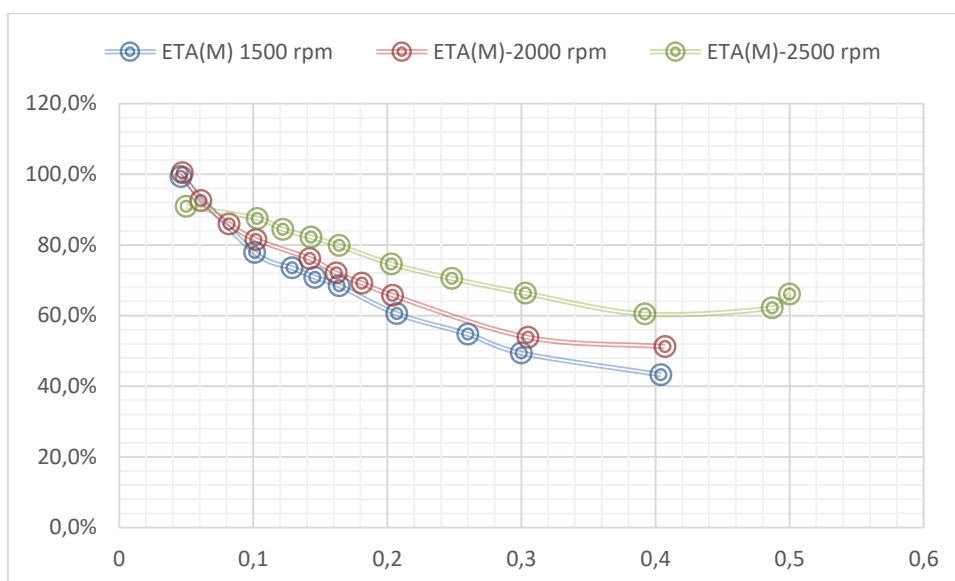


Las gráficas muestran la eficiencia para los ensayos a 1500 rpm y 2500 rpm. En la tabla se pueden observar resultados a otras velocidades, pero dado que no se mantenían estables no se han podido obtener una serie de puntos suficientes como para graficarlos, pero se incluyen como resultados de interés.

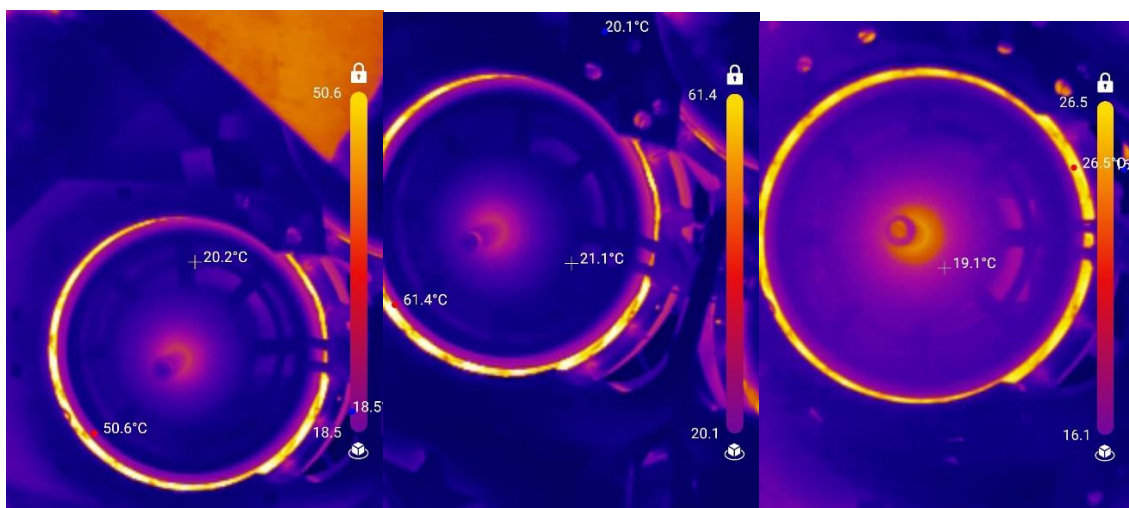


La relación par-corriente es lineal pero no se mantiene con la velocidad. El medidor calcula el valor RMS de la corriente que puede ser diferente dada la alimentación PWM a pulsos que recibe el motor.

Asimismo, se incluyen los resultados obtenidos en el ensayo del día 28/11/2023 ya que finalmente resultaron ser correctos.

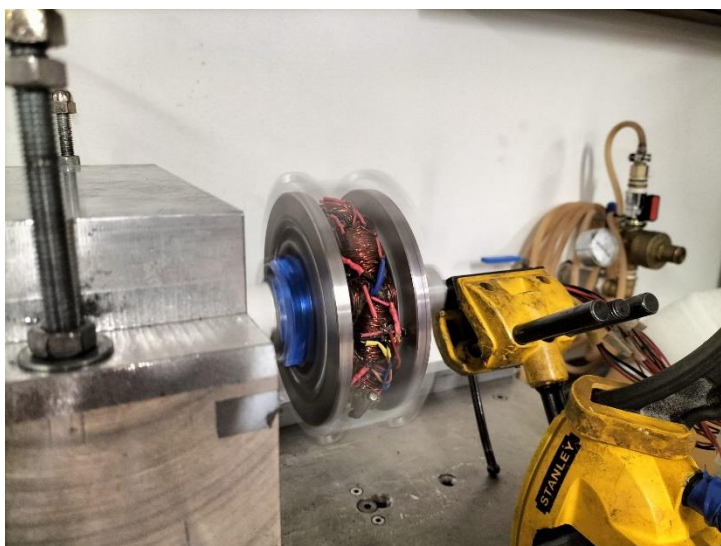


En el ensayo en carga se observa un calentamiento apreciable del estator, debe verificarse el método de ventilación de este ya que por su situación es de difícil ventilación y el foco de calor se encuentra circunscrito al bobinado que tiene una superficie de evacuación de calor relativamente pequeña.



Ensayo de un segundo prototipo.

Finalmente se realiza el ensayo de otro prototipo conectando únicamente un convertidor y conectando las fases en serie o paralelo y con los rotores girando en el mismo sentido o en sentidos contrarios. Se adjunta tabla final de resultados. **Cabe indicar que la baja eficiencia obtenida en algunos puntos (en rojo en la tabla) es debida al hecho que el medidor de par SOLO media el correspondiente a un rotor, no a los dos rotores.**



		rpm	Nm	W	W	A	A	W	W	%
		N	M	Pt	P2	It	I2	Pmec	Pabs	ETA
paralelo	rotores sentido contrario	2554	0,449	262	246	2,85	12,75	120,08	246	48,8%
paralelo	rotores mismo sentido	1375	0,3	94,5	82,3	0,89	7,53	43,19	82,3	52,5%
serie	rotores mismo sentido	1293	0,299	50,6	51,5	0,49	0,66	40,48	51,5	78,6%
serie	rotores mismo sentido	1463	0,118	31	24,1	0,27	0,36	18,08	24,1	75,0%
serie	rotores mismo sentido	1557	0,123	35	28	0,3	0,45	20,05	28	71,6%

Conclusiones.

A la vista de los resultados cabe indicar la potencialidad de esta máquina ya que el hecho de disponer de un doble rotor hace aumentar la densidad de potencia dado el volumen de esta.

Asimismo, cabe indicar la dependencia de la potencia obtenida con el método de control del sistema. En los ensayos se ha podido ajustar el ángulo de control de ambos convertidores obteniéndose diferencias apreciables en función de este.

Cabe recomendar el desarrollo de una electrónica a medida para el mismo ya que mejoraría sensiblemente los resultados obtenidos en este ensayo (en concreto la eficiencia y la potencia de salida)

Firmado el 19 de diciembre de 2023 por Ramon Bargalló Perpiñà.

