

## **2.- SISTEMA MOTOR-GENERADOR FORMADO POR DOS SERVOMOTORES DE FLUJO AXIAL REFRIGERADOS POR CALODUCTO (FREÓN R-12).**

---

---

### **2.1.- CONSIDERACIONES SOBRE LA REFRIGERACIÓN FORZADA**

La geometría estudiada, de rotor de disco conductor isótropo y sin hierro tiene su razón de ser electromagnética, para evitar la atracción rotor-estator por reluctancia y así poder autoelevar [8], pero esto exige unas fuerzas magnetomotrices superiores a las normales en las máquinas eléctricas tradicionales, ya que el entrehierro es unas diez veces más grande de lo normal.

Para conseguir las densidades de corriente necesarias hay que forzar la refrigeración. Y no es suficiente refrigerar con aire, como es habitual en las máquinas eléctricas pequeñas. Sólo en máquinas de potencia superior a 100 kW empieza a utilizarse el agua u otros refrigerantes en unidades mayores. Las leyes de semejanza tienen aquí una aplicación clarísima ya que las pérdidas son proporcionales al volumen de hierro (función cúbica del radio medio) y la disipación es función de la superficie de intercambio (función cuadrática al radio medio).

Los estatores para rotores de disco tienen las cabezas de bobina asimétricas, siendo la cabeza de bobina interior un punto caliente por definición, dada su dificultad geométrica para refrigerarse. Precisamente esto ha frenado la proliferación de diseños de motores con rotor de disco. Como curiosidad histórica cabe decir que las máquinas de la Alianza (con flujo axial) generaban electricidad, casi veinte años antes de que la dinamo GRAMME en 1873 impusiera el flujo radial y se erigiera como estructura magnética más eficaz para máquinas eléctricas rotativas durante más de un siglo.

La refrigeración forzada mediante líquidos canalizados, conocidos ampliamente en la refrigeración de

máquinas grandes no se aplica en las máquinas pequeñas por razones económicas. Cabe puntualizar que los actuales diseños de automóviles eléctricos están introduciendo, ya, la refrigeración por agua, en los motores eléctricos tractores de potencias del orden de 10 kW.

El presente estudio se justifica por lo siguiente:

- Persigue estudiar efectos magnéticos de levitación poco conocidos, al levantar el rotor con el flujo magnético de las cabezas de bobina externa de forma espontánea.
- Estas geometrías pueden dar lugar a máquinas que se utilicen como acumuladores cinéticos de energía con el rotor autolevitado. También son factibles los ventiladores de larga vida útil.
- En algunas aplicaciones de levitación se requiere el vacío interior para evitar la fricción aerodinámica.
- Generalmente, la refrigeración por líquidos es más eficaz que por gases.
- Aunque las pérdidas Joule sean muy elevadas, los efectos dinámicos son muy similares a los que se producen con superconductores, y el estudio sirve como preludeo a sus aplicaciones, ya que el fluido refrigerante puede sustituirse por nitrógeno líquido.
- La geometría de flujo axial es especialmente adecuada para la formación de cavidades refrigeradas, ya que el núcleo magnético tiene una cara plana en su parte trasera.
- También se pueden conseguir otros efectos novedosos de diseño que pueden observarse más adelante.

Las normas CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) definen la refrigeración forzada con líquidos como directa e indirecta.

Se considera directa cuando el líquido refrigerante está en contacto con los conductores eléctricos. Es la más eficaz, pero puede presentar problemas de aislamiento galvánico con el líquido refrigerante si éste no es buen dieléctrico. Se utiliza mucho en aplicaciones de soldadura o bobinas de calentamiento por inducción, haciendo circular agua por el interior de los conductores tubulares que conforman las bobinas inductoras.

Se considera indirecta cuando el líquido refrigerante está en contacto con los aislantes de los conductores eléctricos. El aislamiento eléctrico suele ser una importante barrera para la dispersión del calor, su eficacia es más reducida, pero no presenta los problemas de aislamiento galvánico con el fluido refrigerante.

El aceite es muy usado en refrigeración directa de transformadores. Es caro, inflamable a partir de 120 °C, soporta mal las sobrecargas y puede presentar problemas de contaminación ambiental. No se utilizará en este estudio.

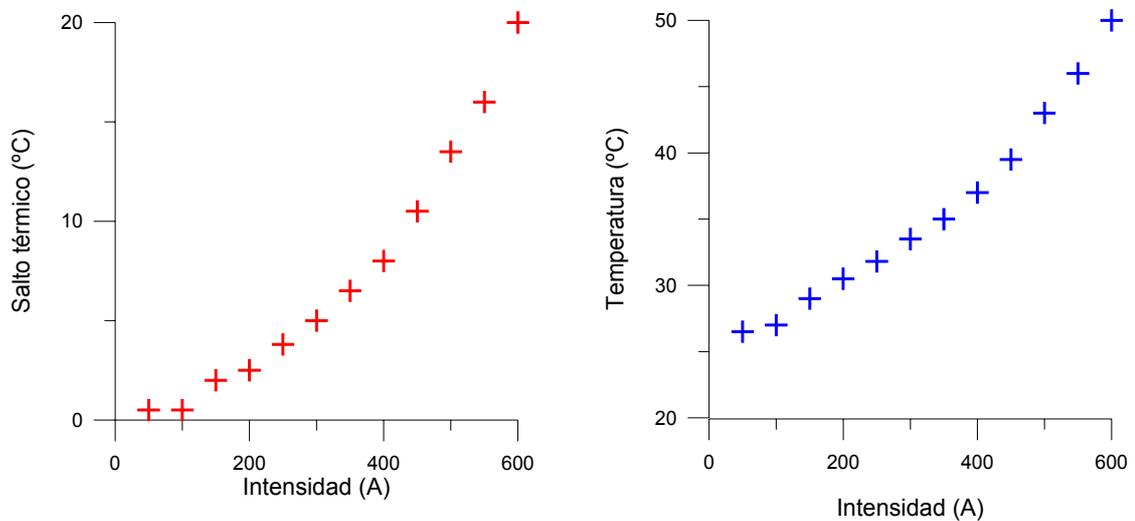
El agua es otro refrigerante muy utilizado. Es barata y abundante. Presenta una gran inercia térmica. Si se aprovecha el calor de vaporización durante el cambio de fase permite una enorme capacidad de sobrecarga, aunque es conductora de electricidad lo que condiciona mucho el diseño. Es habitual situar las entradas y salidas hidráulicas en los centros de estrella o conexiones a tierra de los devanados hidráulicos

Se ha probado en el laboratorio que con tubos de cobre de  $\phi_i = 4$  mm y  $\phi_e = 6$  mm y no más de un metro de largo pueden alcanzarse densidades de corriente de 200 A/mm<sup>2</sup> en régimen permanente. Por el interior del tubo de cobre circula un caudal suficiente para evacuar el calor debido a pérdidas por efecto Joule. Sirva de ejemplo el ensayo realizado con la finalidad de utilizarse como información de partida para el último prototipo desarrollado en una tesis doctoral anterior[10]:

<b>I (A)</b>	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
<b>T(°C)</b>	26.5	27	29	30.5	31.8	33.5	35	37	39.5	43	46	50
<b>T<sub>entrada</sub> (°C)</b>	26	26.5	27	28	28	28.5	28.5	29	29	29.5	30	30

Datos paralelos:

- Temperatura ambiente: 25 °C
- Caudal: 375 cm<sup>3</sup>/min
- Tiempo de espera en cada medida: 15 s



Gráfica 2.0: Evolución del salto térmico y de la temperatura del fluido de refrigeración de un conductor en función de la intensidad de corriente que pasa por él. El conductor, de cobre, tiene la forma de tubo hueco.

Estos datos servirán para el diseño de varios prototipos. Nótese que la densidad de corriente de trabajo de los superconductores de alta temperatura es de unos 300 A/mm<sup>2</sup> por lo que los resultados son extrapolables a lo que ocurriría con superconductores.

Para comprobar el aumento de potencia que suministra un motor de flujo axial con refrigeración indirecta, se hace, en el Departament d'Enginyeria Elèctrica de la UPC, el estudio térmico de un motor comercial MAVILOR MA-55 [13], al que se dota de serpentines de cobre con circulación interior de agua para la refrigeración indirecta de las cabezas de bobina, tanto las exteriores como las interiores. Además se disponen unas cavidades inundadas de agua en las carcasas que refrigeran el paquete magnético de ambos semiestatores. Ello permite doblar la potencia nominal de la máquina eléctrica y mejorar su respuesta térmica transitoria.

Otra alternativa de refrigeración es el empleo de caloductos. En ellos un foco caliente provoca la evaporación de un fluido refrigerante confinado en un circuito cerrado. El foco frío provoca la condensación del gas. Un adecuado diseño con el foco frío más elevado que el caliente, provoca la circulación del fluido refrigerante simplemente por termosifón.

Las temperaturas del foco caliente y frío prácticamente no varían ya que están determinados por el punto de ebullición del fluido refrigerante. Si el flujo de calor aumenta, crece el desnivel entre los niveles de ebullición y condensación con lo que aumenta el caudal de fluido refrigerante, pero no la temperatura de ebullición y condensación. Este método poco extendido en máquinas eléctricas puede ser de gran utilidad y por ello se estudia en el apartado siguiente. Cabe puntualizar que estos fluidos refrigerantes suelen ser buenos dieléctricos.

Como el montaje ensayado no deja de ser una refrigeración indirecta, se podrá observar un resultado parecido al de refrigerar indirectamente con serpentines de agua [13].

## 2.2.- CALODUCTO SOBRE UN GRUPO MOTOR-GENERADOR DE 5 kW (GMG-5)

No es fácil el diseño de caloductos sobre máquinas eléctricas y existen pocos ejemplos del tamaño y forma que se tratan. Por ello se ha dispuesto de un grupo motor generador formado por dos servomotores MAVILOR MA-55 procedente de un estudio anterior inacabado.

El MA-55 es un servomotor Brushless con rotor de imán permanente de Samario Cobalto (SmCo). Es el motor comercial más parecido a la geometría estudiada por R. Bosch. Se ha tomado como base para varios estudios los prototipos inéditos posteriores a la lectura de la tesis del citado autor.

Entre el paquete magnético y la carcasa de aluminio se ha colocado una “galleta” refrigeradora, consistente en un intercambiador (o disipador) de calor parecido al de un congelador de una nevera doméstica adaptando la forma al motor MA-55.

El grupo motor-generador puede intercambiar sus funciones ya que ambas máquinas son idénticas. Totalizan 4 semiestátores. El diseño de los intercambiadores tienen diferencias, por lo que se han montado los semiestátores con intercambiadores diferentes (1 y 2).

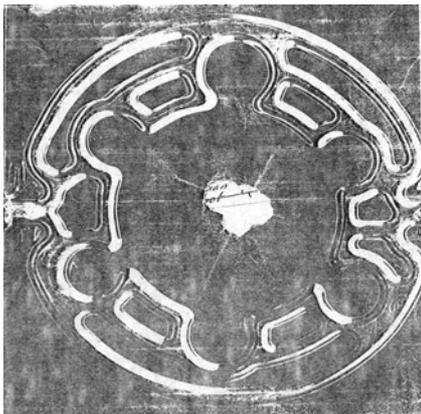


Foto 1: forma del intercambiador tipo 1. Se coloca en los semiestátores de la máquina A tal y como se indica en las páginas siguientes.



Foto 2: Forma del intercambiador tipo 2. Se coloca en los semiestátores de la máquina B tal y como se indica en las páginas siguientes.

En cada uno de los estátores del grupo, se les había implementado unos sistemas de refrigeración por convección. El fluido refrigerante utilizado es freón R-12. Las placas de aluminio que forman el

intercambiador son soldados a tramos y deformadas con aceite a presión inyectado entre las zonas no soldadas para que se nivelen y se forme la cavidad.

Se pretenden probar las dos placas diferentes. Para ello se alternan las pruebas como motor y como generador. Se verá que no se aprecian grandes diferencias entre los tres modelos ensayados.

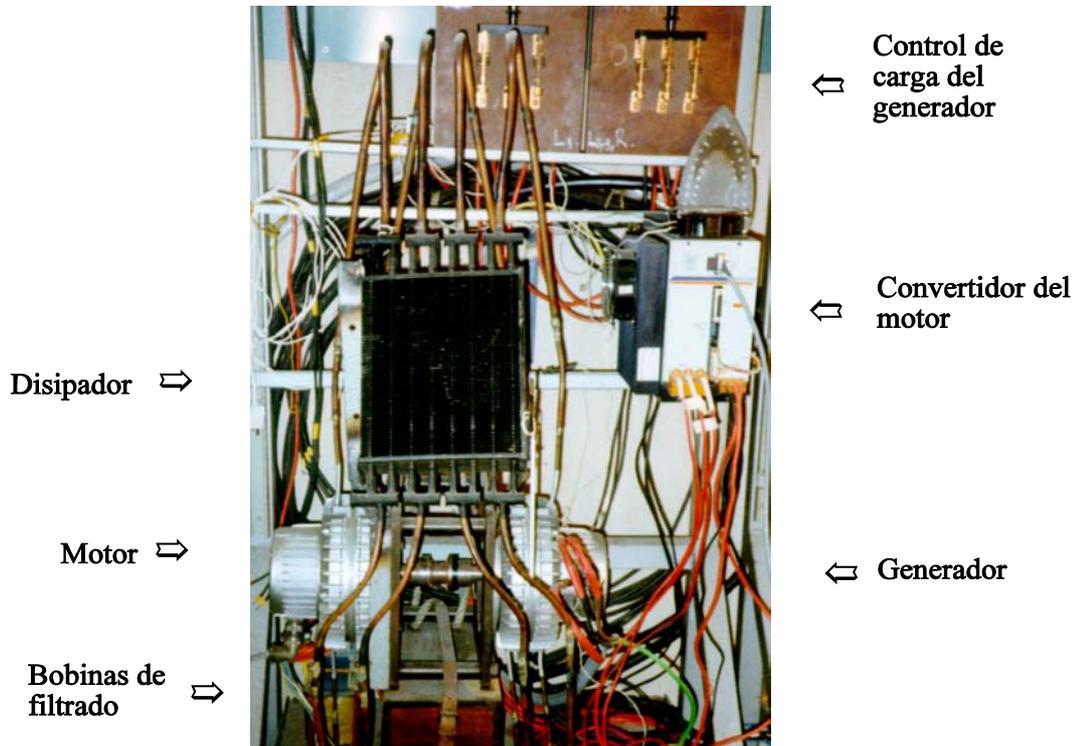
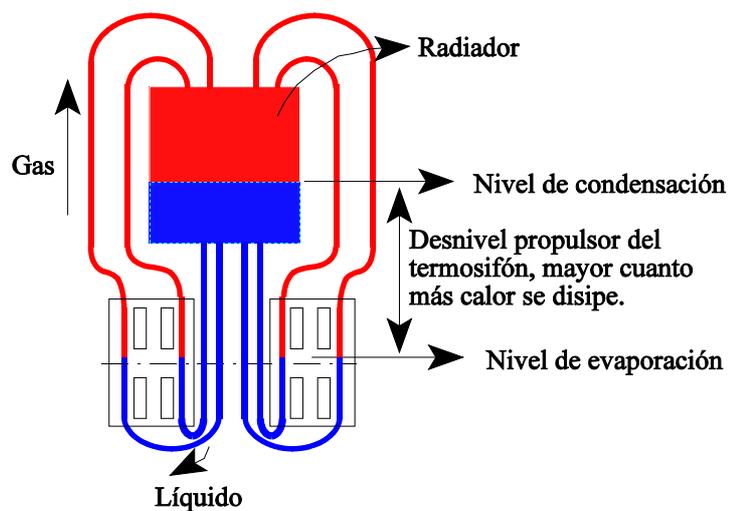


Foto 3: Conjunto motor generador junto al circuito de refrigeración.



Dibujo 1: Esquema de refrigeración del sistema GMG-5

Recordemos que este estudio tiene como finalidad el comprobar si es posible mejorar el comportamiento de una máquina, si se le obliga a trabajar por encima de los valores nominales a cambio de extraerle el calor en exceso que provocaría.

Se pretende estudiar el comportamiento térmico de este grupo, ver posibilidades de aumento de la potencia nominal si se facilitaba la evacuación de calor, aún a costa de perder rendimiento, que no es crítico en un servomotor, en el que importa más la potencia máxima suministrable.

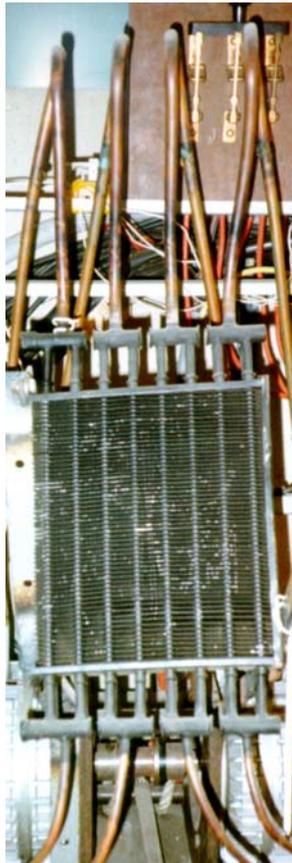


Foto 4: Disipador y circuito de refrigeración.

El sistema de refrigeración está formado por cuatro circuitos independientes, uno por cada intercambiador, o “galleta” evaporador de cada semiestátor.

El grupo está formado por dos servomotores que pueden actuar indiferentemente como generador o como motor. Para diferenciarlos entre sí a la hora de tomar datos, tendremos en cuenta que los intercambiadores no son iguales; les llamaremos A al de la derecha y B al de la izquierda.

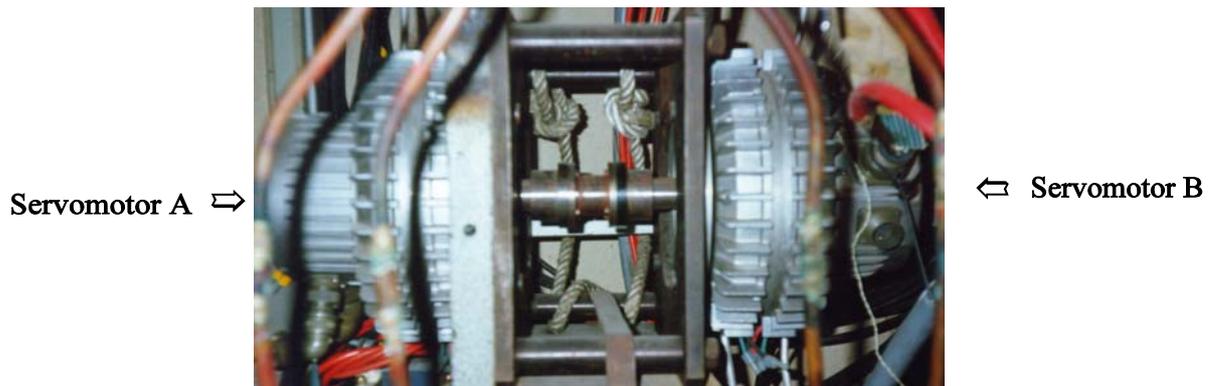


Foto 5: Grupo motor-generator

Cuando se supera la inercia térmica de los motores ( $I^2 t$ ), sea por exceso de intensidad o de tiempo, lo primero que suelen deteriorarse son los aislantes.

Para diferenciar la temperatura de cada estátor de las dos máquinas A o B, se utilizará la siguiente notación:

$T_{EJ}^A$  : Temperatura en el servomotor A, en el devanado del semiestátor próximo al eje.

$T_{EJ}^B$  : Temperatura en el servomotor B, en el devanado del semiestátor próximo al eje.

$T_{EN}^A$  : Temperatura en el servomotor A, en el devanado del semiestátor próximo al encoder.

$T_{EN}^B$  : Temperatura en el servomotor B, en el devanado del semiestátor próximo al encoder.

### 2.3.- GRUPO MOTOR-GENERADOR (GMG-5). COMPORTAMIENTO TÉRMICO TRANSITORIO

Las geometrías y tamaños de máquinas estudiadas, están poco tratadas en la literatura técnica ni su comportamiento transitorio que depende de muchas variables. El estudio de esta aplicación de los caloductos en máquinas eléctricas, es una de las aportaciones inéditas del presente trabajo.

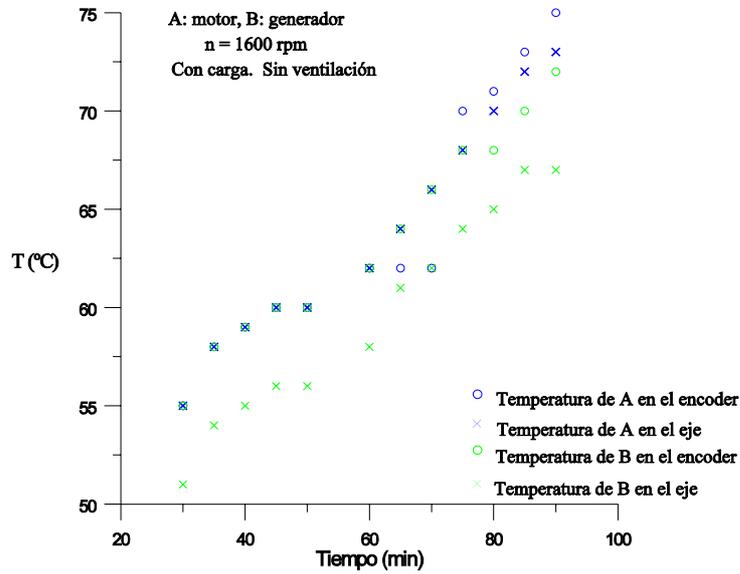
Los datos que se van a tomar son las temperaturas  $T_{EJ}^A$ ,  $T_{EJ}^B$ ,  $T_{EN}^A$ ,  $T_{EN}^B$ , las intensidades y tensiones de cada máquina, la velocidad de giro, el tiempo que dura el ensayo y observaciones sobre el comportamiento del sistema.

Las pruebas que se van a realizar son de calentamiento, y se deberá tener la precaución de no superar las temperaturas que permiten los elementos de protección. En el caso de los cables, son aislantes de la clase F (temperatura máxima 155°C). La temperatura máxima de los devanados debe estar entre 5° y 15°C por debajo de la temperatura límite que asigna la norma a la clase de aislamiento utilizado. Ello es así porque el valor de la temperatura que proporciona la medida se refiere, en general, a un valor medio. De esta forma se salvan elevaciones de temperatura en zonas puntuales del aislante con condiciones térmicas adversas [5]. Por ello, en los ensayos, se tomará como temperatura límite que no podrán superar los devanados los 140 °C.

En todos los ensayos que a continuación se presentan, las unidades de las temperaturas son en °C, las intensidades en amperios, las tensiones en voltios, la velocidad de giro en revoluciones por minuto y el tiempo en minutos.

ENSAYO 1:

- A actúa como generador y B como motor ( $T_{\text{ambiente}}: 25^\circ$ ).



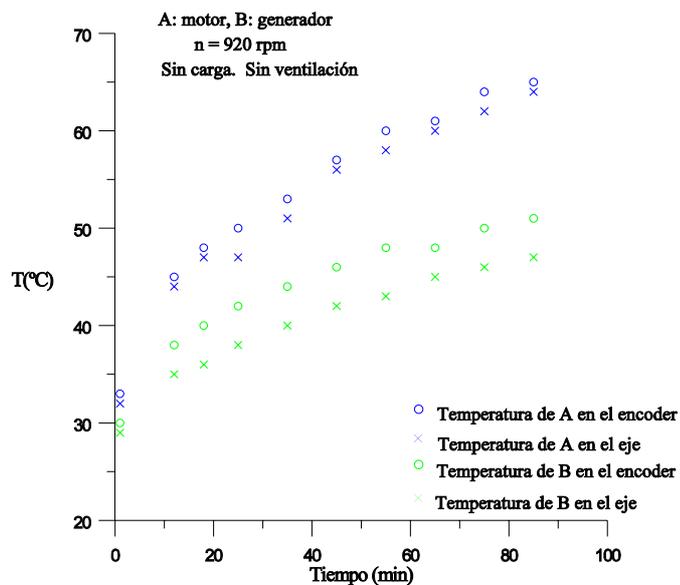
Gráfica 2.1. Corresponde al ensayo 1 (tabla 1 del anexo II).

En esta ocasión,

el ensayo finaliza al alcanzar el límite de calentamiento, por inercia térmica ( $I^2 t$ )

ENSAYO 2:

- B generador, A motor ( $T_{\text{ambiente}}: 24^\circ$ ).



Gráfica 2.2. Corresponde al ensayo 2 (tabla 2 del anexo II).

ENSAYO 3:

- B generador, A motor ( $T_{\text{ambiente}}: 22.5^\circ$ ).

En carga con el sistema colocamos un sistema de resistencias e inductancias:

Características de las resistencias:

Tipo: RVP

Ohm: 1.35-3

I: 30 A

CV: 7.5

Conexión paralelo

Características de las inductancias:

Tipo: RT 7

L: 0.959 mH

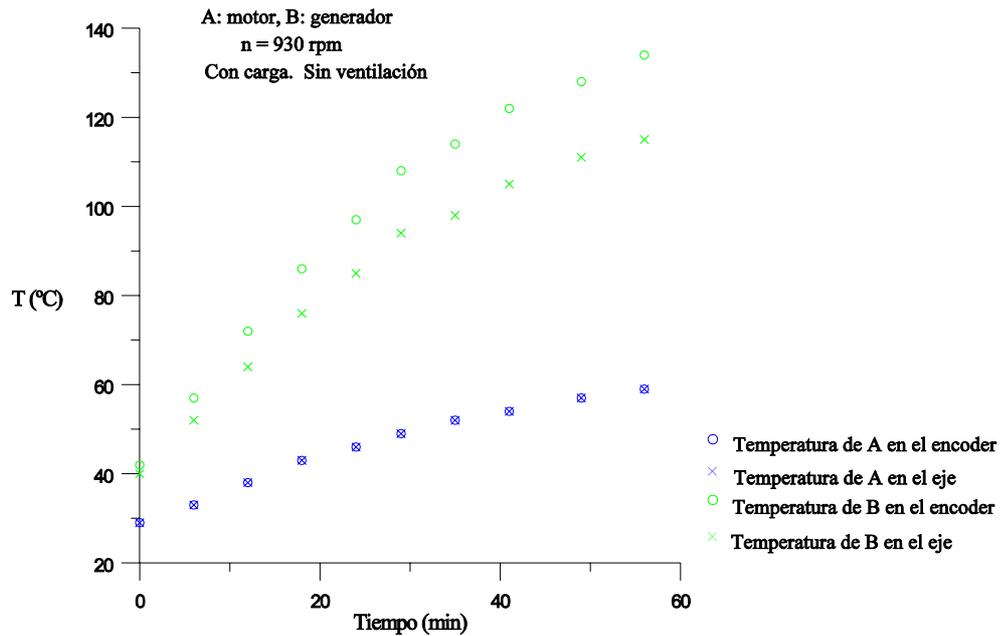
Tensión de prueba: 25 kV

f: 50 Hz

I: 61.2 A

Las inductancias se encuentran conectadas en triángulo.

Las inductancias y resistencias están en paralelo.



Gráfica 2.3. Corresponde al ensayo 3 (tabla 3 del anexo II).

Una vez realizada la última medida, se concluye la prueba para evitar que los devanados del encoder del elemento B alcanzase los 140 °C

Hasta aquí nos hemos movido alrededor de las intensidades nominales facilitadas por el fabricante. A partir de ahora intentaremos suministrar mayor corriente, con lo cual la máquina se calentará y veremos el comportamiento de los sistemas de refrigeración.

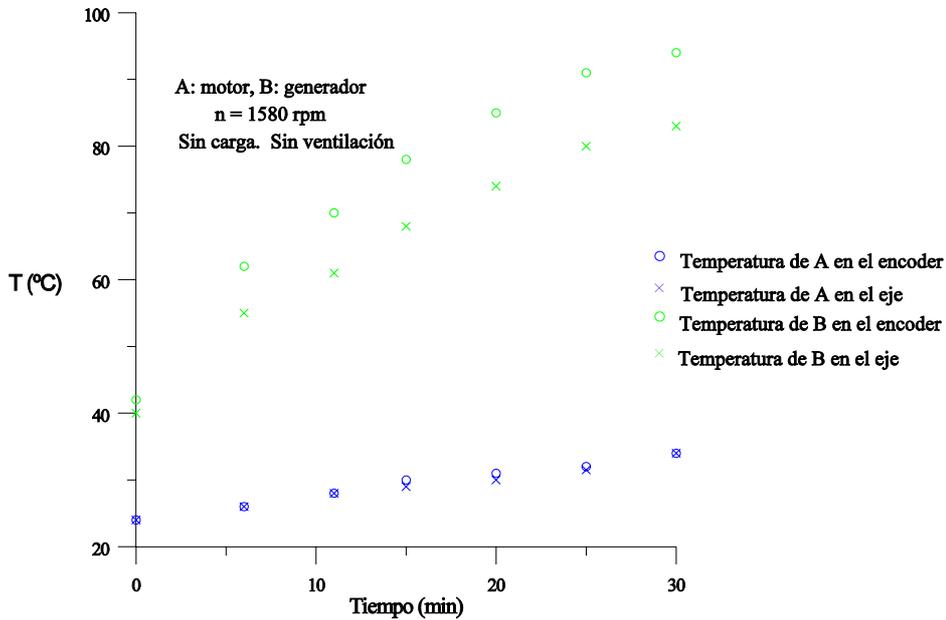
El convertidor electrónico disponible modificado por el fabricante (Mavilor Motors SA) da 45 A que, respecto a los 25 A nominales del motor, es un 80% de incremento de corriente. El sistema de refrigeración es muy eficaz y no se llega a los límites admisibles de calentamiento.

Para poder cambiar la corriente sin cambiar el convertidor electrónico, se hace trabajar a la máquina que actúa como generador con un factor de potencia inferior a 1 y así se carga con reactiva, manteniendo la activa suministrada por el motor y su convertidor.

Se detecta una fuga en uno de los circuitos de refrigeración. El tiempo empleado para la reposición del fluido refrigerante permite unos cambios en los conductores de suministro de corriente para poder trabajar con mayores intensidades. Se colocan conductores de 16 mm<sup>2</sup>, de esta forma se puede llegar a suministrar 75 A de corriente.

ENSAYO 4.a:

- B generador, A motor, ( $T_{\text{ambiente}}: 18.5^\circ$ ).

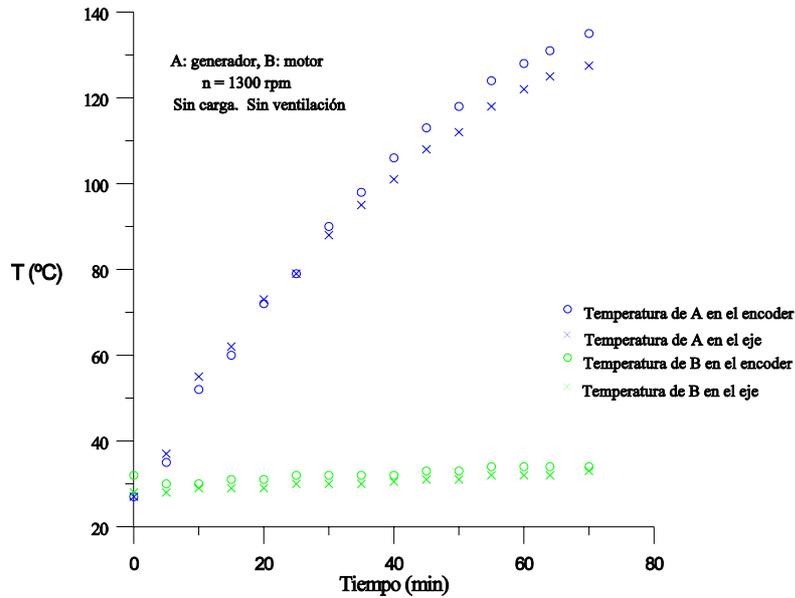


Gráfica 2.4. Corresponde al ensayo 4.a (tabla 4 del anexo II).

El ensayo se ha parado al alcanzar el límite de inercia térmica ( $I^2 t$ ).

ENSAYO 4.b:

- B motor, A generador. ( $T_{\text{ambiente}}: 18.5^\circ$ ).



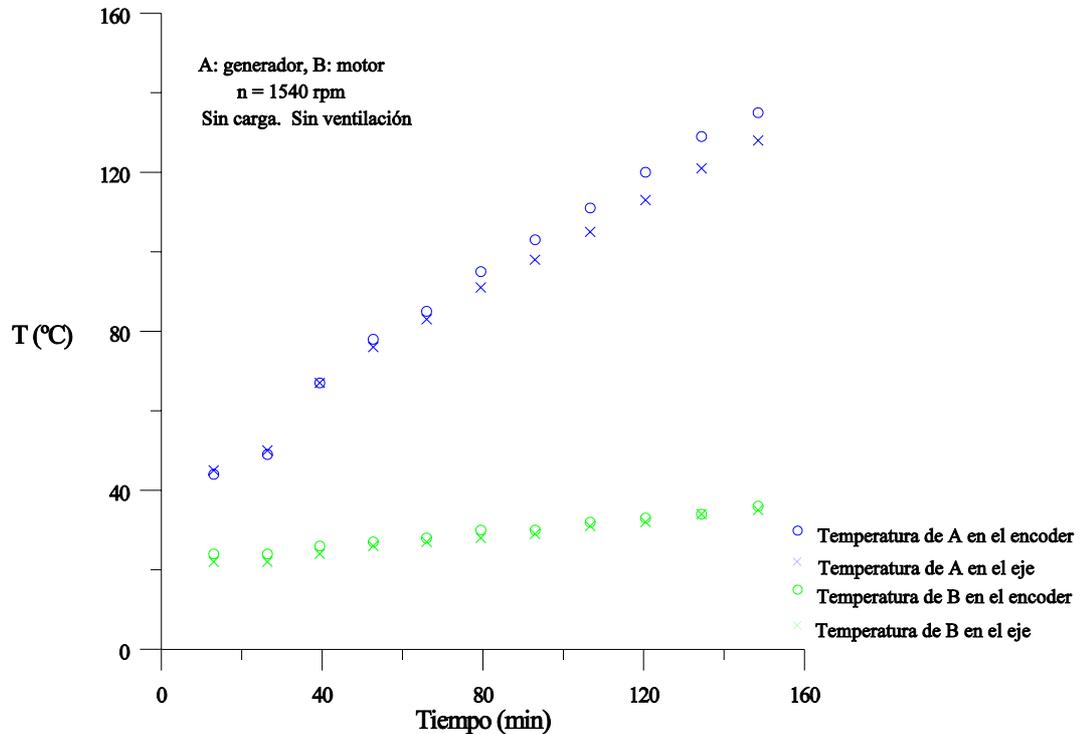
Gráfica 2.5. Corresponde al ensayo 4.b (tabla 5 del anexo II).

El ensayo se concluye para no sobrepasar la temperatura de los  $140^\circ\text{C}$  en los devanados.

ENSAYO 5:

- B motor, A generador, ( $T_{\text{ambiente}}: 18.5^\circ$ ).

Cuando la velocidad de giro aumenta, se presentan inestabilidad en el comportamiento del grupo motor-generador:



Gráfica 2.6. Corresponde al ensayo 5 (tabla 6 del anexo II).

El ensayo se concluye para no producir calentamientos excesivos.

Observaciones:

Durante el ensayo la tensión del motor oscila rápidamente unos 7 voltios, es bastante inestable. La velocidad de giro varía entre los valores 1540 rpm y 1380 rpm.

ENSAYO 6:

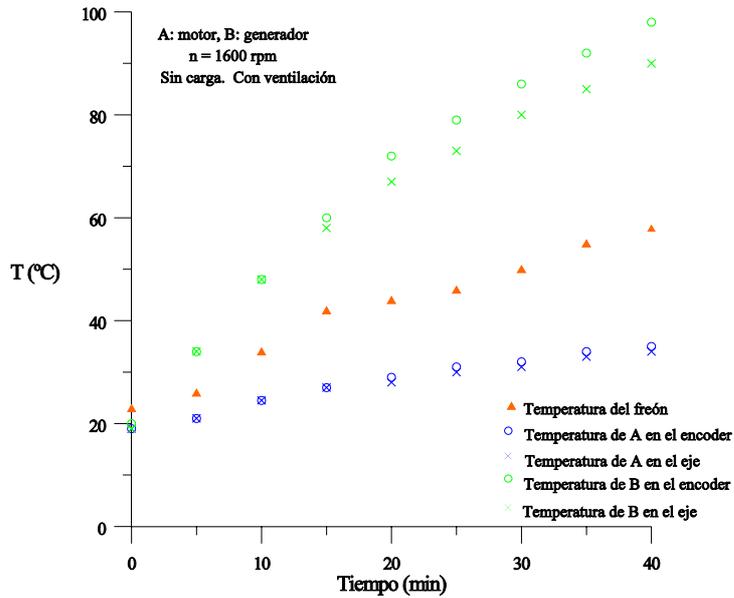
- A motor, B generador. ( $T_{\text{ambiente}}: 18.5^\circ$ )

A continuación se realiza un ensayo de calentamiento. En la tabla se indicarán las temperaturas de los devanados, el tiempo transcurrido y la temperatura del freón contenido en uno de los tubos que refrigera la máquina B, en particular el que refrigera el estátor próximo al eje. El ensayo consta de tres partes:

ENSAYO 6.a: dura unos cuarenta y cinco minutos y que se interrumpe por un exceso de carga. Los devanados que se encontraban a mayor temperatura rondaban los 100 °C. Las condiciones del ensayo eran:

$$n = 1600 \text{ rpm}, \quad I_B = 47 \text{ A}, \quad I_A = 17 \text{ A}$$

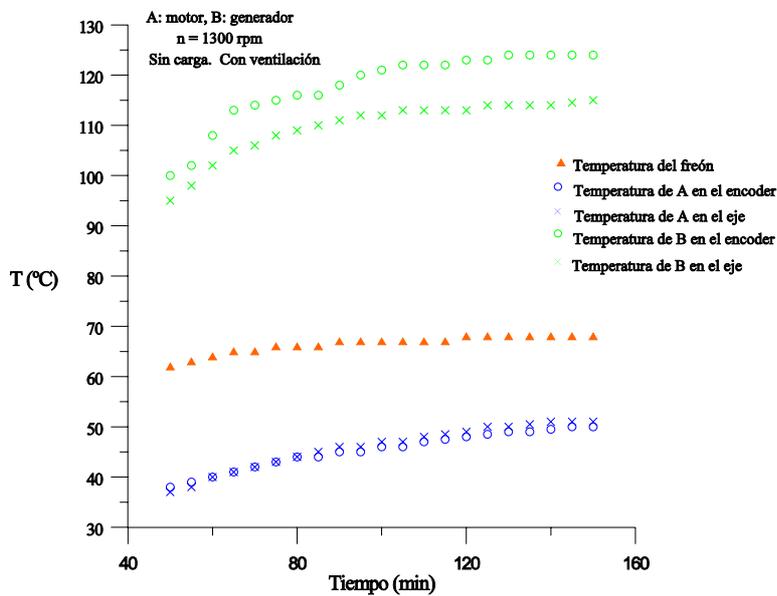
$$V_B = 15 \text{ V}, \quad V_A = 125 \text{ V}, \quad W = 180 \text{ W}, \quad \text{Var} = 140 \text{ VA}$$



Gráfica 2.7. Corresponde al ensayo 6.a (tabla 7.1 del anexo II).

ENSAYO 6.b: dura una hora y 40 minutos aproximadamente, y se inicia inmediatamente, sin dejar enfriar los devanados. Condiciones de este ensayo:

$$\begin{aligned}
 n &= 1300 \text{ rpm}, & I_B &= 45 \text{ A}, & I_A &= 15 \text{ A} \\
 V_B &= 12 \text{ V}, & V_A &= 105 \text{ V}, & W &= 160 \text{ W}, & \text{Var} &= 110 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

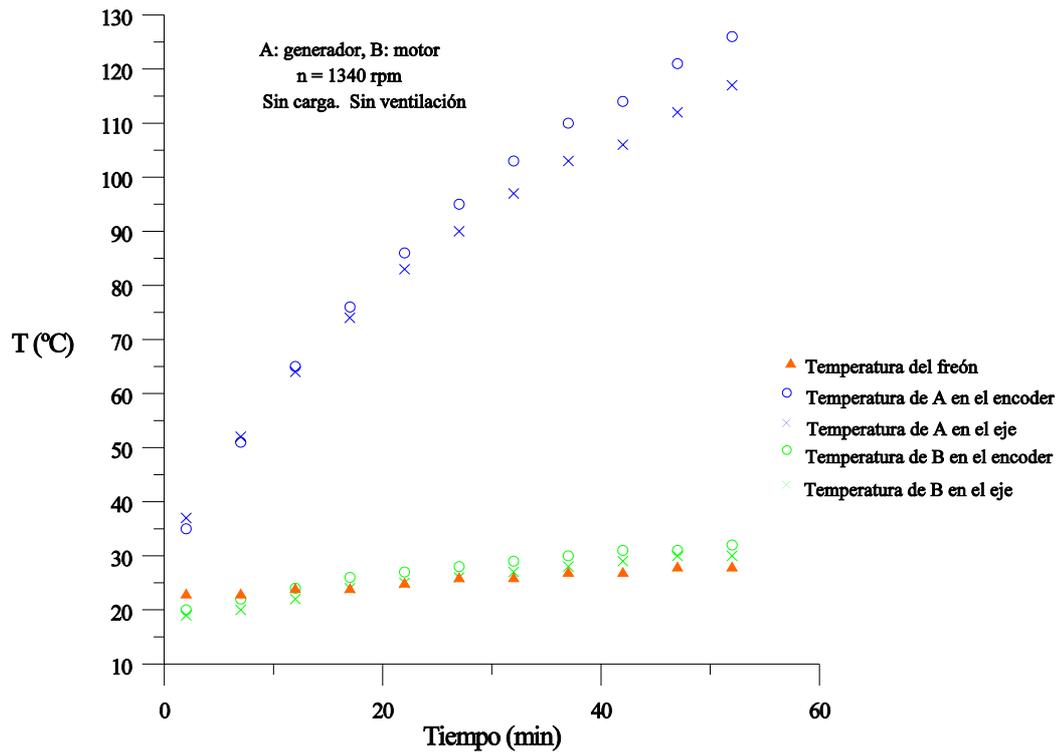


Gráfica 2.8. Corresponde al ensayo 6.b (tabla 7.2 del anexo II).

ENSAYO 6.c: es sustancialmente parecida a la segunda, pero cambiando el motor por el generador y dejando enfriar los devanados hasta la temperatura ambiente. Los valores de tensión y corriente son un tanto diferentes. Tiene una duración de unos 55 minutos. Condiciones de este ensayo:

$$n = 1340 \text{ rpm}, \quad I_B = 10 \text{ A}, \quad I_A = 46 \text{ A}$$

$$V_B = 81 \text{ V}, \quad V_A = 15 \text{ V}, \quad W = 140 \text{ W}, \quad \text{Var} = 120 \text{ VA}$$



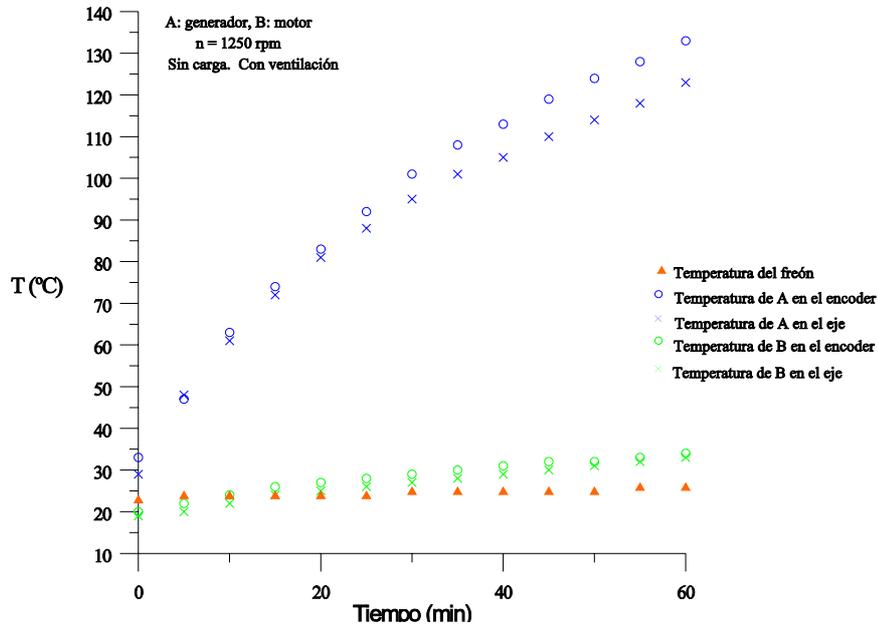
Gráfica 2.9. Corresponde al ensayo 6.c (tabla 7.3 del anexo II).

Pruebas con ventilación:

Se utiliza un ventilador para forzar el intercambio en el radiador. Se realizan dos pruebas:

ENSAYO 7.a: características: A generador, B motor,  $T_{\text{ambiente}}: 19^\circ$

$n = 1250 \text{ rpm}$ ,  $I_B = 10 \text{ A}$ ,  $I_A = 45.5 \text{ A}$   
 $V_B = 80 \text{ V}$ ,  $V_A = 13 \text{ V}$ ,  $W = 140 \text{ W}$ ,  $\text{Var} = 120 \text{ VA}$

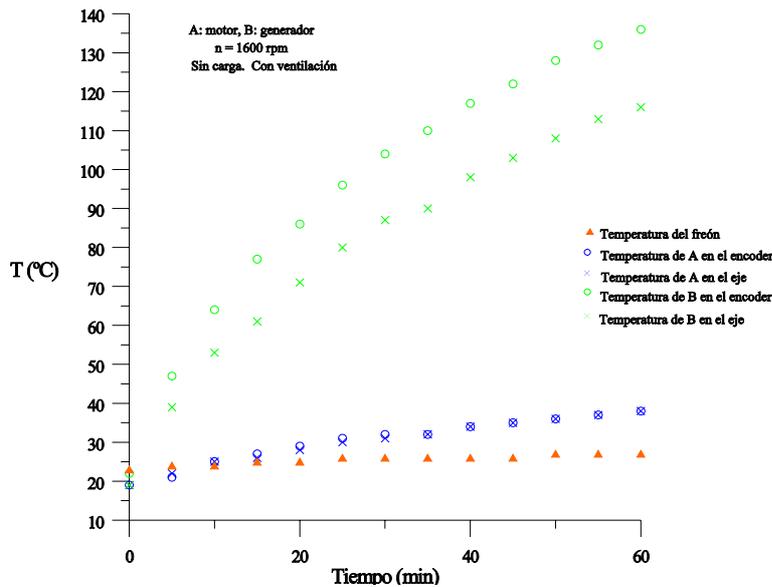


Gráfica 2.10. Corresponde al ensayo 7.a (tabla 8.1 del anexo II).

Se termina el ensayo al alcanzar el límite de calentamiento.

ENSAYO 7.b: características: A motor, B generador,  $T_{\text{ambiente}}: 19^\circ$

$n = 1600 \text{ rpm}$ ,  $I_B = 48 \text{ A}$ ,  $I_A = 13 \text{ A}$   
 $V_B = 15 \text{ V}$ ,  $V_A = 98 \text{ V}$ ,  $W = 160 \text{ W}$ ,  $\text{Var} = 130 \text{ VA}$



Gráfica 2.11. Corresponde al ensayo 7.b (tabla 8.2 del anexo II).

Se termina el ensayo al alcanzar el límite de calentamiento.

## 2.4.- CONCLUSIONES

Se aprecian diferencias de comportamiento térmico entre los intercambiadores de tipo 1 o 2. La respuesta térmica es mejor cuando el servomotor B actúa como generador (y el servomotor A como motor). Exceptuando el ensayo nº 7, en el resto de ensayos en los que B actúa como generador, el comportamiento térmico es correcto.

Aunque constructivamente los intercambiadores son diferentes, al nivel de precisión de este trabajo se aprecian variaciones no demasiado significativas. Sólo se puede aventurar que de entre los dos tipos de intercambiadores, el que mejor trabaja es el tipo 2.

El caloducto representa un comportamiento térmico parecido a la refrigeración forzada por agua circulante presentados en [13]. Sus ventajas pueden ser tecnológicas, al ser un circuito de refrigeración cerrado. El cuello de botella para la evacuación de calor está en los aislantes eléctricos, que se comportan también como aislantes térmicos y limitan considerablemente la evacuación de calor.

De estos estudios se desprende que para evacuar con mayor eficacia el calor, la refrigeración ha de ser directa sobre el conductor, y no indirecta, a través de sus aislantes eléctricos.

En este estudio no se busca rendimiento, sino potencia máxima a base de disipar las pérdidas. Las pérdidas de cobre a la temperatura del nitrógeno líquido disminuye considerablemente al bajar su resistividad, teóricamente, a la quinta parte de su valor a temperatura ambiente.

Cabe recordar también que este trabajo se plantea como preludeo a la aplicación de los superconductores.

Para ver las posibilidades de refrigeración directa de los devanados construidos con tubo de cobre, consultar [10]. El autor del presente trabajo colaboró con R. Grau en la caracterización térmica del tubo de cobre con agua circulante por su interior como conductor eléctrico.

Los circuitos de refrigeración pueden estar integrados en la carcasa de aluminio.