

Motores Eléctricos com o Rotor em Supercondutor Cerâmico

A. Leão Rodrigues

Departamento de Engenharia Electrotécnica
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2829-516 Caparica - PORTUGAL
e-mail: leao@uninova.pt fax: +351 21294 8532

Abstract

The recent development of ceramic superconductors allows the construction of new electromagnetic power devices. These include the superconducting electric motors that exhibit better specific torque, power factor and efficiency than the conventional ones.

The paper describes the various types of electric motors using high temperature superconducting materials on the rotor. The electromagnetic torque developed of each motor are determined and compared.

To validate the theoretical results, tests of reluctance and hysteresis superconducting rotors incorporated in the same conventional three phase 2 kW stator were performed. When the rotors are cooled in liquid nitrogen at 77 K the power developed is about 4 to 5 times greater than the observed in the equivalent conventional machine.

Resumo

O desenvolvimento recente dos materiais supercondutores cerâmicos de alta temperatura veio permitir o seu emprego na construção de uma variedade de dispositivos electromagnéticos de potência. Entre estes dispositivos encontram-se naturalmente os motores eléctricos supercondutores que exibem um maior binário específico, factor de potência e rendimento do que os motores eléctricos clássicos correspondentes.

O artigo apresenta uma descrição de vários tipos de motores eléctricos usando materiais supercondutores cerâmicos do tipo-II colocados no rotor. Para descrever o estado da arte, são analisados quatro tipos diferentes de motores eléctricos supercondutores e é indicado o valor correspondente do binário electromagnético produzido.

Para validar a análise, apresentam-se os resultados experimentais efectuados num motor de relutância e num motor de histerese com rotores de configuração diferente e

usando o mesmo estator de 2 kW. Os resultados mostram que, quando os supercondutores colocados no rotor são arrefecidos com azoto líquido a 77 K, a potência mecânica no veio é cerca de 4 a 5 vezes maior do que a observada no motor clássico equivalente.

1. Introdução

Quando um material supercondutor é arrefecido a uma temperatura abaixo da sua temperatura crítica T_c , o material fica capaz de conduzir correntes eléctricas de alta intensidade sem qualquer dissipação de calor. O fenómeno da supercondutividade foi descoberto em 1911 no mercúrio por Kammerling Onnes. Vários elementos e ligas metálicas (índio, platina, nióbio-titânio, etc.) exibem supercondutividade (supercondutores de 1ª geração) mas a sua temperatura crítica nunca ultrapassou os 23 K, pelo que terão de ser normalmente arrefecidos por meio de hélio líquido, que é bastante oneroso. Esta situação modificou-se em 1986 quando Bednorz e Müller [1], descobriram que a estrutura cerâmica de perovskite apresentava supercondutividade a uma temperatura crítica mais alta do que a de qualquer supercondutor metálico da 1ª geração. Uma das melhores destas estruturas é uma combinação de ítrio (Y), bário (Ba) e óxido de cobre (CuO), conhecido por YBaCu, descoberta em 1987 por Paul Chou na Universidade de Huston, a qual exhibe uma temperatura crítica de 93 K, superior à temperatura de liquefacção do azoto.

Os materiais supercondutores cerâmicos de alta temperatura (SAT) de 2ª geração do tipo-II, quando arrefecidos a azoto líquido (muito mais barato do que o hélio líquido), podem transportar densidades de corrente muito maior do que as suportadas pelo cobre (aproximadamente 10^7 A/m²) e, por isso, o seu emprego na

construção de máquinas eléctricas dá origem a uma miniaturização e melhoria do seu rendimento.

Os SAT são, no entanto, materiais muito quebradiços e difíceis de maquinar. Por isso, as máquinas eléctricas que incorporam supercondutores na sua construção deverão ter uma configuração especial a fim de eliminarem os esforços mecânicos que se manifestam nestes materiais. Essa é a razão porque normalmente são utilizados na construção dos rotores de motores eléctricos onde, apesar das vibrações mecânicas a que estão submetidos, podem formar uma estrutura sólida e mecanicamente resistente.

Recentemente, vários grupos de investigação [2] têm explorado a possibilidade de utilizar materiais

supercondutores na construção de motores eléctricos, e em particular de motores de relutância e motores de histerese, com vista a obter uma melhor potência específica. Durante a última década surgiram várias configurações de rotores de motores supercondutores [3] no sentido de incrementar tanto o seu rendimento como o binário electromagnético.

2. Motor de Meissner

O motor de Meissner é um bom exemplo ilustrativo das propriedades diamagnéticas dos materiais supercondutores. Um material diamagnético, quando colocado no seio de um campo magnético, actua como uma blindagem à sua penetração, expelindo-o do seu interior. No caso de supercondutores do tipo-I essa blindagem é total, enquanto nos supercondutores do tipo-II existe alguma penetração do campo conforme a impureza do material. Esta blindagem ao campo aplicado é devida às correntes persistentes superficiais que se induzem no supercondutor, criando um campo oposto ao campo aplicado que lhe deu origem.

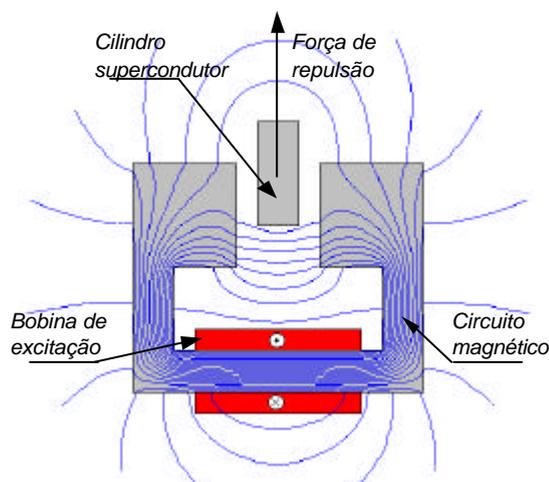


Fig. 1 – Efeito de Meissner

Nestas circunstâncias, um material supercondutor colocado no seio de um campo magnético fica sujeito a uma força que tende a retirá-lo para fora do campo, como indica a figura 1. Este fenómeno foi descoberto em 1932 por Meissner e Ochsenfeld.

Logo após a descoberta dos supercondutores de alta temperatura foi construído no Japão um protótipo de um motor baseado no efeito de Meissner, cujo aspecto está ilustrado na figura 2. O rotor deste motor é constituído por

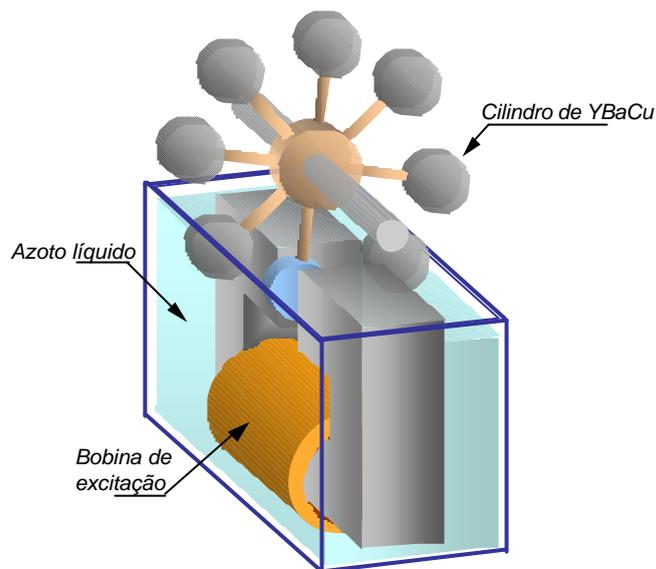


Fig. 2 – Motor de Meissner

por uma série de cilindros de YBaCu, ligados por meio de uma alavanca ao seu veio. O rotor é montado de tal forma que cada cilindro passa através de um entreferro onde se estabelece um campo magnético criado por uma bobina inserida no circuito magnético, que está imerso em azoto líquido. O cilindro de YBaCu que passa no entreferro é arrefecido pelo azoto líquido e passa ao estado supercondutor, ficando sujeito a uma força de repulsão que o retira do campo. O cilindro seguinte, que ainda está no estado normal, entra sem dificuldade dentro do entreferro onde sofre a transição para o estado supercondutor devido ao arrefecimento pelo azoto líquido. Desta forma o rotor adquire um movimento de rotação contínuo desde que os cilindros fora do azoto líquido aqueçam a fim de ultrapassarem a temperatura de transição e passarem ao estado normal. A velocidade angular ω deste motor é baixa mas o binário T é relativamente elevado dando uma potência no veio de $P = T\omega$ moderada. Esta potência mecânica resulta da conversão directa da diferença de temperatura da fonte fria do ar líquido e da fonte quente do ar exterior. O motor de Meissner pode então ser considerado um motor electrotérmico.

3. Motor de Relutância

A teoria do motor eléctrico de relutância convencional é hoje sobejamente conhecida [4]. Estes motores encontram actualmente inúmeras aplicações industriais devido à sua simplicidade construtiva, robustez e facilidade de comutação dos enrolamentos do estator por meio de circuitos electrónicos de potência (inversores). Mostrar-se-á seguidamente que o binário desenvolvido no motor de relutância depende da sua saliência, ou seja da diferença do valor das permeâncias entre o eixo directo e o eixo em quadratura.

3.1 - Produção do binário de relutância no motor convencional

A figura 3 mostra a distribuição da densidade de fluxo produzida pelo enrolamento do estator, obtida por meio de um pacote comercial de Elemento Finitos, de um motor de relutância convencional quando o eixo longitudinal do rotor faz com o eixo magnético do estator um ângulo de carga θ . Devido à saliência do rotor, o coeficiente de auto indução $P(\theta)$ do enrolamento estatórico de n espiras sofre uma variação do seu valor uma vez que a permeância do circuito magnético $P(\theta)$ é função da posição angular do rotor.

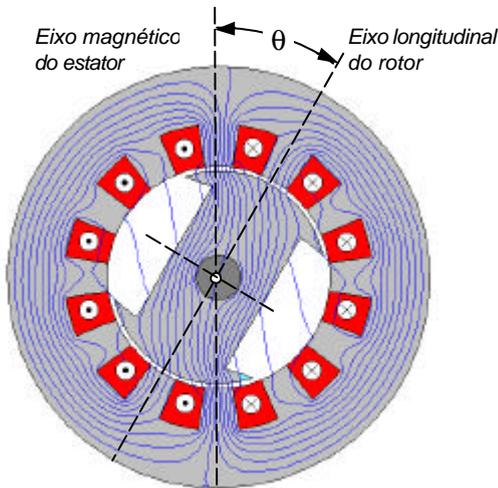


Fig. 3 – Distribuição da densidade de fluxo magnético num motor de relutância clássico

Quando o eixo longitudinal do rotor se encontra coincidente com o eixo magnético do enrolamento do estator ($\theta = 0$), o coeficiente de auto indução do enrolamento atinge o valor máximo por ser máxima a permeância P encontrada pelo fluxo magnético. Em contrapartida, quando o eixo principal do rotor se encontra

em quadratura com o eixo magnético do enrolamento ($\theta = 90^\circ$ *Elect*), o coeficiente de auto indução atinge o valor mínimo. Para uma posição genérica θ do rotor e admitindo uma variação sinusoidal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, a variação do coeficiente de auto indução $L(\theta)$ do enrolamento com a posição angular θ do eixo principal do rotor ao longo de uma rotação completa escreve-se

$$L(\theta) = \frac{1}{2}(L_{\max} + L_{\min}) + \frac{1}{2}(L_{\max} - L_{\min})\cos 2\theta \quad (1)$$

cujo andamento está representado na figura 4a, onde L_{\max} é o coeficiente de auto indução do eixo longitudinal e L_{\min} é o coeficiente de auto indução do eixo transversal do rotor.

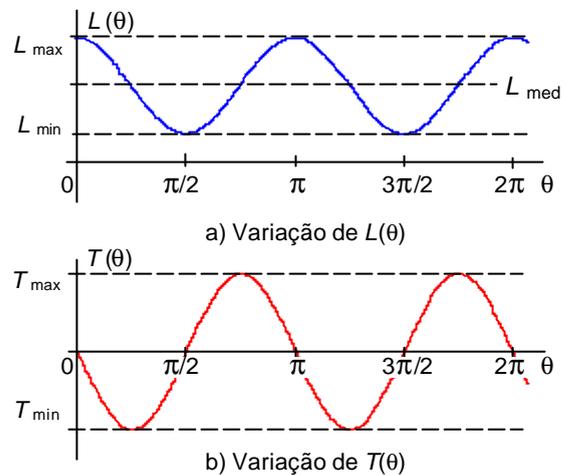


Fig.4 - Variação de $L(q)$ e $T(q)$ do motor de relutância com o ângulo de carga

A referência [4] indica que o binário de relutância desenvolvido no rotor quando o enrolamento trifásico do estator é alimentado por uma corrente eficaz constante I é dado pela expressão

$$T(\theta) = (3/2)I^2 dL(\theta)/d\theta \quad (2)$$

Atendendo a (1) e a (2), resulta para o caso do motor de relutância trifásico

$$T(\theta) = -\frac{3}{2}I^2(L_{\max} - L_{\min})\sin 2\theta \quad (3)$$

No caso do motor trifásico de relutância alimentado a tensão eficaz U constante e frequência $\omega = 2\pi f$, (3) toma

a forma

$$T(\theta) = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U^2}{\omega^2 L_{\max} L_{\min}} (L_{\max} - L_{\min}) \text{sen } 2\theta \quad (4)$$

No funcionamento do motor a corrente ou a tensão eficaz constante, (3) e (4) mostram que o valor máximo do binário de relutância é tanto maior quanto maior for a diferença $(L_{\max} - L_{\min})$ entre os coeficientes de auto indução do eixo longitudinal e do eixo transversal do rotor. O binário de relutância está representado na figura 4b em função do ângulo de carga θ e mostra que o binário de relutância descreve dois ciclos durante uma rotação completa do rotor, atingindo o valor máximo para valores de $\theta = (k + 1)(\pi/4)^\circ$ Elect onde $k = 0, 1, 2, \dots$

3.2 - Modelo do motor de relutância com material supercondutor no rotor

Nos últimos anos têm surgido vários artifícios no sentido de construir o rotor do motor de relutância de modo a otimizar a diferença $(L_{\max} - L_{\min})$. Uma nova possibilidade promissora é incorporar no rotor um material supercondutor. Sendo o supercondutor um material diamagnético ele pode ser utilizado como uma blindagem ao fluxo magnético numa determinada direcção. Então, colocando criteriosamente o material supercondutor no rotor de tal forma que o fluxo segundo o eixo transversal fique bloqueado, a permeância transversal vem diminuída e conseqüentemente diminui o valor de L_{\min} . Uma configuração possível, e de construção robusta, consiste em colocar dois blocos de YBaCu perpendicularmente ao eixo transversal do rotor. Os blocos são colados às faces laterais do rotor, ou fixos por meio de um encaixe, como ilustra a figura 5.

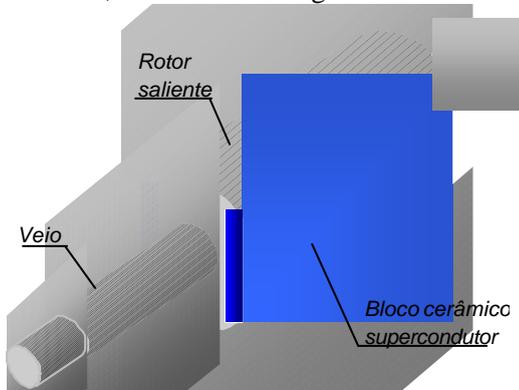


Fig. 5 - Rotor supercondutor do tipo saliente

O fluxo segundo o eixo longitudinal do rotor encontra uma alta permeância de forma a que o valor de L_{\max} é o maior possível, aumentando assim a diferença $(L_{\max} - L_{\min})$ e conseqüentemente o binário motor.

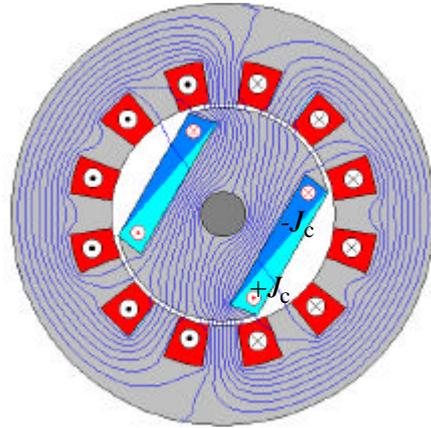


Fig. 6 – Distribuição do fluxo magnético no rotor supercondutor do tipo saliente

A figura 6 mostra a distribuição do fluxo magnético no rotor supercondutor do tipo saliente. Comparando com a figura 3 observa-se que o fluxo de dispersão vem mais reduzido graças à blindagem feita pelo supercondutor que é conseguida à custa de correntes superficiais $+J_c$ e $-J_c$ que se fecham axialmente.

3.3 - Modelo do motor de relutância com rotor composto

Outra geometria possível, é construir o rotor com uma configuração cilíndrica, mas colocando alternadamente blocos de ferro macio e blocos de material supercondutor cerâmico, como ilustra a figura 7. Neste rotor composto, os blocos de ferro macio são um caminho fácil ao fluxo magnético segundo o eixo longitudinal e os blocos de

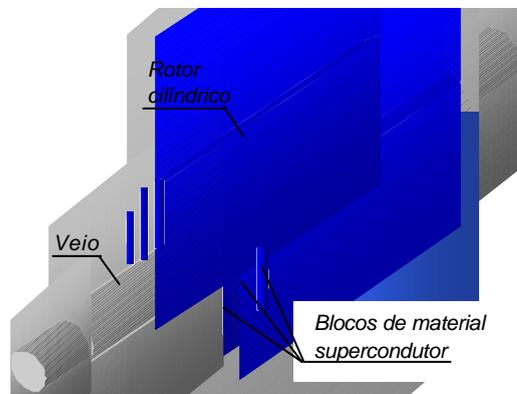


Fig. 7 - Rotor supercondutor do tipo composto

matéria supercondutor formam uma blindagem à sua trajectória segundo o eixo transversal contribuindo assim para uma maior diferença ($L_{\max}-L_{\min}$), entre os coeficientes de auto indução e consequentemente para um maior binário motor.

O rotor do tipo composto é mecanicamente mais equilibrado do que o rotor saliente mas é, obviamente, de construção mais onerosa. A optimização do seu binário é atingida quando a espessura dos blocos de material supercondutor é igual à espessura dos blocos de ferro. No entanto, a existência do veio obriga a que o bloco central tenha uma espessura maior do que a dos restantes blocos. A figura 8 ilustra a distribuição do fluxo magnético produzido pelo campo girante do estator através do motor

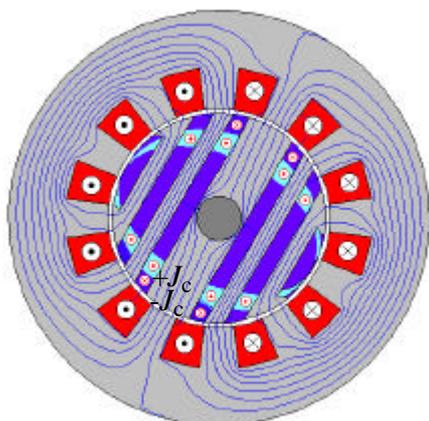


Fig. 8 - Distribuição do fluxo magnético no motor do tipo composto

de rotor do tipo composto. Pode notar-se que os blocos supercondutores do tipo II criam uma blindagem ao fluxo transversal ao rotor. Para isso, tal como no rotor supercondutor do tipo saliente, são sede de correntes superficiais $+J_c$ e $-J_c$ que penetram nos blocos supercondutores até cerca de metade do raio do rotor e se fecham também axialmente em cada bloco [5].

4. Novo motor síncrono excitado com material supercondutor pré magnetizado

No motor de relutância supercondutor, a penetração do fluxo no material cerâmico é relativamente pequena, deixando uma boa parte do volume do material inactivo. Ligando os extremos dos blocos supercondutores de forma a constituir um solenóide de uma única espira à volta do rotor, como mostra a figura 9, é possível injectar na espira de material supercondutor uma corrente persistente. Neste

caso, o rotor fica magnetizado, criando um fluxo magnético, tal como acontece num magneto permanente e a máquina pode então funcionar como um motor síncrono.

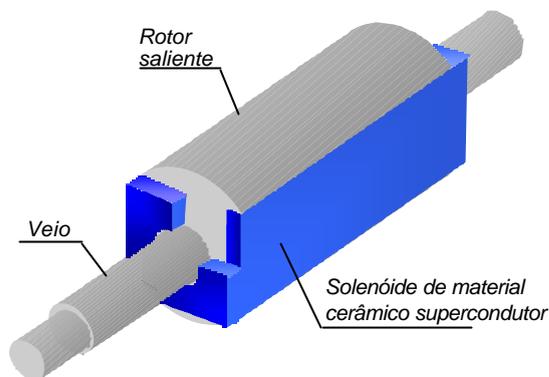


Fig. 9 – Rotor com solenóide supercondutor

Pelo facto do rotor ser saliente e criar um fluxo Ψ_{RS} ligado com o estator o motor apresenta agora, além da componente de binário de relutância $T_R(\theta) = Bsen2\theta$, uma componente substancial de binário devida à excitação do rotor $T_E(\theta) = A sen\theta$, de modo que o binário desenvolvido tem a forma geral

$$T(\theta) = T_E(\theta) + T_R(\theta) = \frac{3U\Psi_{RSmax}}{2X_{max}X_{min}} sen\theta + \frac{3U^2}{2X_{max}X_{min}} (X_{max} - X_{min}) sen2\theta \quad (5)$$

onde $X_{\max} = \omega L_{\max}$ e $X_{\min} = \omega L_{\min}$ são respectivamente as reactâncias do eixo directo e do eixo em quadratura e tem o andamento representado na figura 10 para o caso do motor.

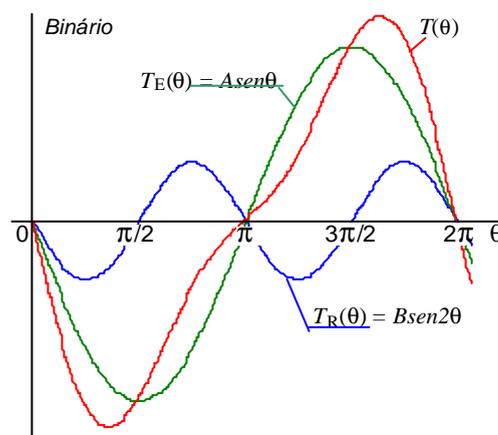


Fig. 10 – Binário do motor síncrono pré magnetizado

O fluxo magnético criado pelo solenóide é algumas vezes superior ao fluxo criado pelo melhor magneto permanente com o mesmo volume do supercondutor. Para isso é necessário pré-magnetizar o rotor que fica magnetizado na direcção longitudinal devido às supercorrentes $+J_c$ e $-J_c$ que circulam mais profundamente no material supercondutor. O circuito de refrigeração do azoto líquido através do comprimento axial do rotor está representado na figura 11.

Com o material cerâmico no estado normal, isto é, a uma temperatura $T > T_c$, injecta-se uma corrente estacionária no enrolamento do estator de forma a produzir um campo com um valor de cerca de duas vezes o campo normal produzido pelo campo girante. Isto garante a penetração total do campo no material.

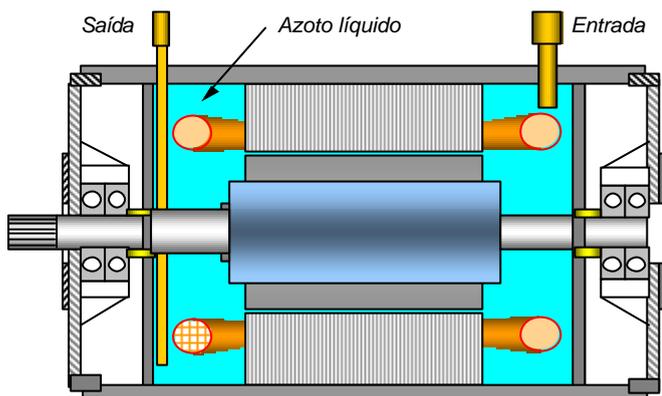


Fig. 11 – Circuito criostático do motor síncrono

A figura 12 mostra a distribuição do fluxo magnético de um motor síncrono bipolar do tipo saliente e a figura 13 a de um motor tetrapolar devido ao fluxo produzido pelos solenóides supercondutores e ao fluxo produzido pelo estator. Em qualquer dos rotores pode observar-se a distribuição das correntes que circulam nos solenóides supercondutores que dão origem ao fluxo de excitação.

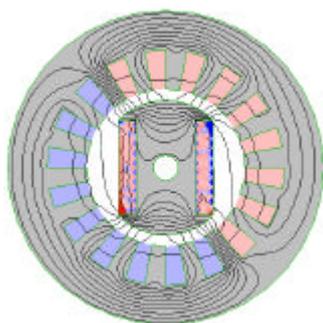


Fig. 12 - Motor síncrono SAT bipolar

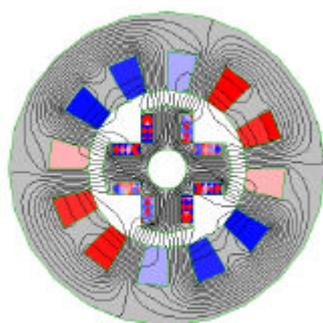


Fig. 13 - Motor síncrono SAT tetrapolar

A sequência da operação que conduz à pré-magnetização do solenóide supercondutor inserido no rotor está representada na figura 14.

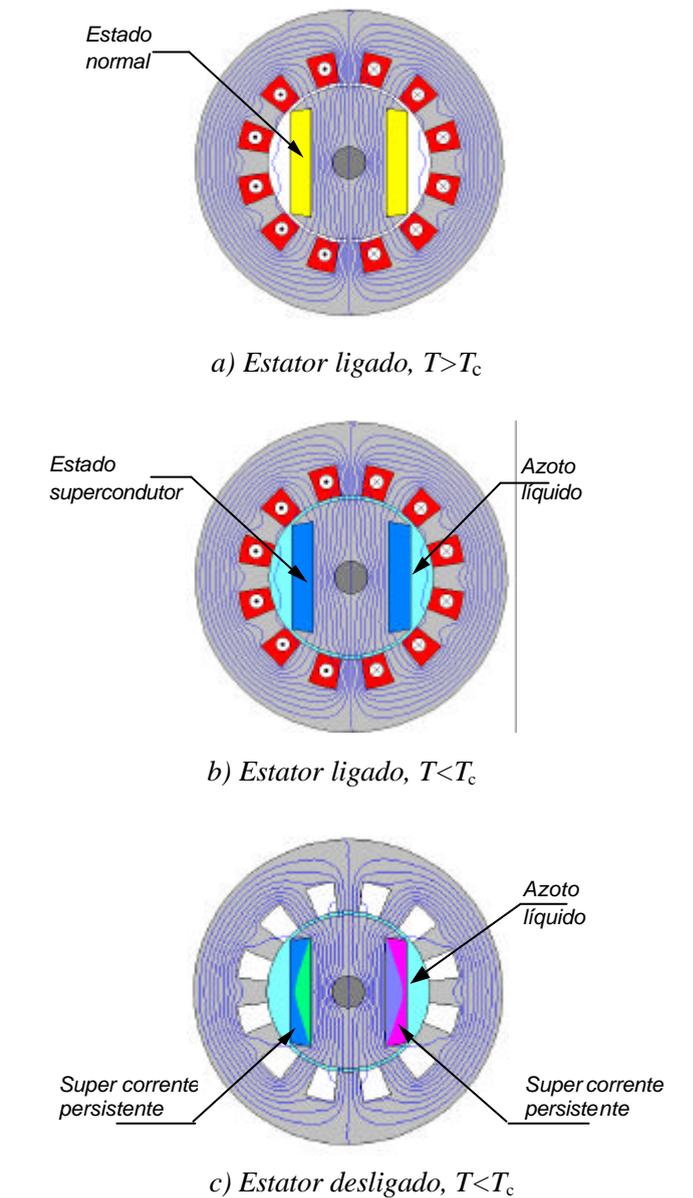


Fig. 14 – Pré-magnetização por arrefecimento do rotor em presença do campo estacionário.

Em seguida arrefece-se o material cerâmico, em presença do campo, abaixo da sua temperatura crítica T_c de forma a passar ao estado supercondutor. Finalmente, desliga-se o

campo magnético criado pelo estator, de modo que a variação de fluxo dá origem a uma corrente induzida no supercondutor. O rotor fica então magnetizado como se fosse um super magneto. A magnetização mantém-se à custa da supercorrente $+J_c$ e $-J_c$ que fica a circular no solenóide enquanto se mantiver a temperatura $T < T_c$.

5. Comparação do binário relativo desenvolvido por cada um dos rotores

A comparação do valor dos binários desenvolvidos nos três tipos de motores descritos anteriormente em relação ao binário produzido pelo motor clássico indicado na figura 3, está representada na figura 15.

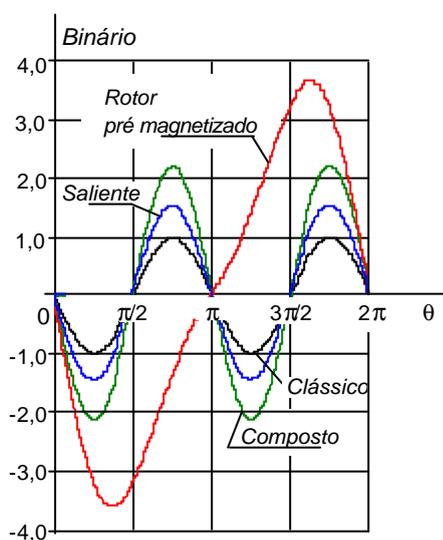


Fig. 15 – Comparação dos binários relativos desenvolvidos

Os resultados mostram que o binário produzido pelo motor de relutância supercondutor do tipo saliente é cerca de 1,5 vezes maior do que o binário produzido pelo motor de relutância convencional e o binário produzido pelo motor de relutância supercondutor do tipo composto, com cinco blocos de ferro e seis blocos de material supercondutor no rotor, é cerca de 2,2 vezes maior.

O binário total $T(\theta) = T_R(\theta) + T_E(\theta)$ do rotor pré magnetizado desenvolvido no veio é cerca de 3,7 vezes maior do que o correspondente binário do motor de relutância convencional.

6. Resultados experimentais

Os quatro tipos de rotores do tipo saliente anteriormente estudados foram ensaiados usando um mesmo estator de um motor trifásico de indução de 2 kW convencional. Cada

motor foi inserido num recipiente contendo azoto líquido, como mostra a figura 16, de forma a cada um dos rotores

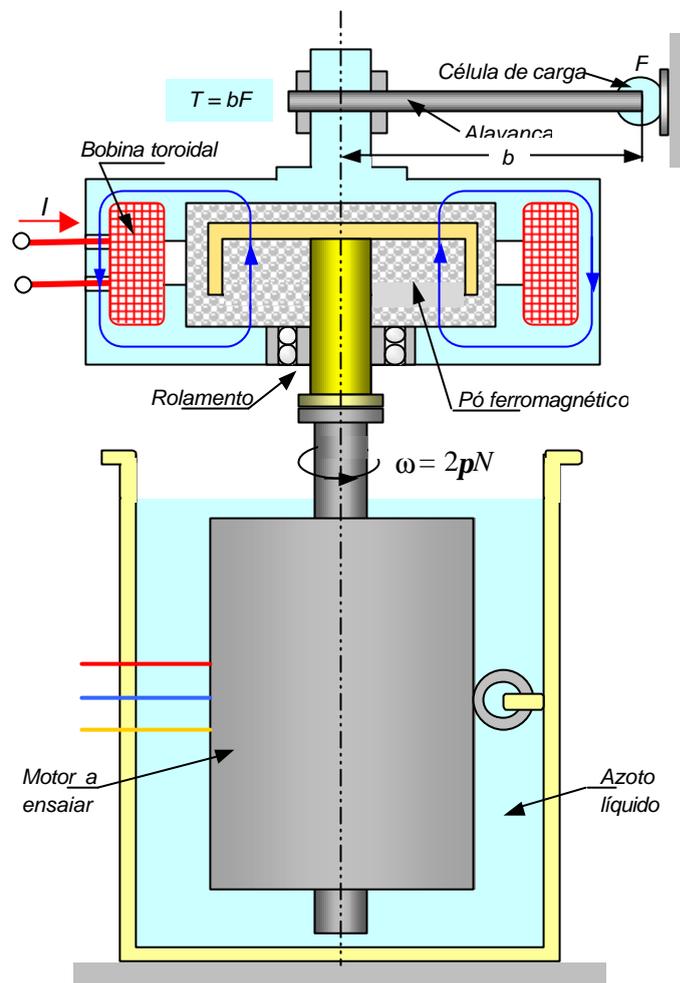


Fig. 16 – Freio de pó para medição do binário motor

supercondutores atingir a temperatura crítica. O motor de relutância a ensaiar foi lançado por meio de um motor de corrente contínua acoplado ao seu veio. Quando o motor de corrente contínua atingiu a velocidade perto do sincronismo do motor síncrono, ligou-se o motor de relutância supercondutor à rede de 230/400 V, 50 Hz e desligou-se o motor de corrente contínua da fonte ficando o motor de relutância a rodar à velocidade síncrona.

Para medição do binário utilizou-se um freio de pó ferromagnético. Por variação da corrente de excitação I da bobina do freio a parte móvel ligada ao veio do motor sofre um atrito com o pó solicitando um binário ao motor. A força F exercida no extremo da alavanca de comprimento b é medida numa célula de carga, de modo que o binário $T = Fb$ fica determinado. Conhecida a

velocidade angular ω do motor foi possível medir a potência mecânica no veio $P = T\omega$. A figura 17 mostra a representação gráfica da potência mecânica e do factor

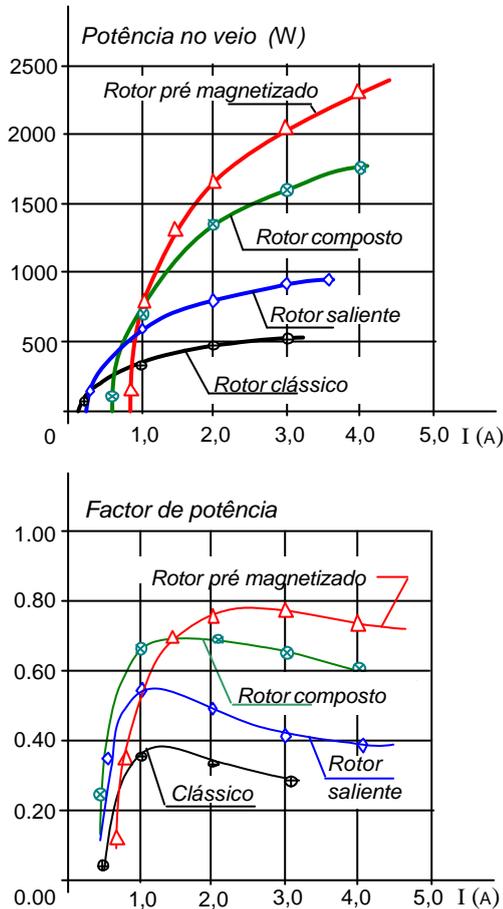


Fig. 17 – Resultados da potência e do factor de potência

de potência em função da corrente I absorvida por cada tipo de motor. Estes resultados estão de acordo com os valores experimentais obtidos por Kovalev [7].

7. Motor de Histerese com Rotor Supercondutor

7.1 – Princípio de funcionamento

Considere-se um estator de um motor de indução trifásico alimentado com um sistema de correntes simétricas, produzindo um campo girante de velocidade angular ω_g . Se um cilindro de material supercondutor for colocado no seio deste estator ficará sujeito a uma magnetização provocada pelo campo girante que dará origem a perdas por histerese no material. As correntes persistentes induzidas no material supercondutor criarão um fluxo magnético que, reagindo

com o fluxo do estator, dão origem a um binário electromagnético que surge no veio do motor. Mostra-se [7] que este binário é proporcional às perdas por histerese no material supercondutor e por isso este motor é conhecido por *motor de histerese*. Contrariamente ao que acontece nos motores clássicos de indução, motores síncronos e motores de histerese com um anel ferromagnético de largo ciclo de histerese, o binário do motor supercondutor de histerese resulta da repulsão entre os pólos induzidos no material supercondutor e o campo girante do estator.

A figura 18 mostra a distribuição do campo magnético através de um cilindro supercondutor do tipo-II de baixa densidade de corrente crítica J_c , enquanto a figura 19 mostra a mesma distribuição através de um cilindro supercondutor de maior densidade de corrente crítica J_c .

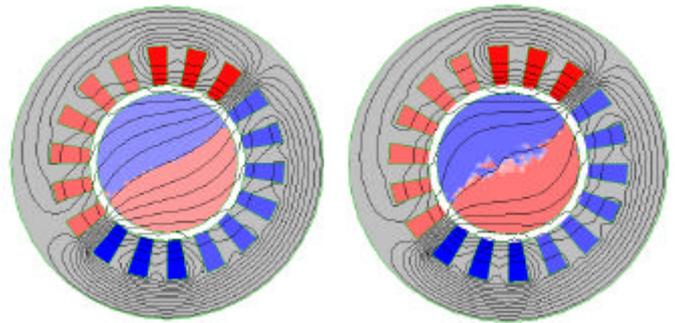


Fig. 18 – SAT de baixo J_c

Fig. 19 – SAT de alto J_c

Comparando as duas figuras, verifica-se que à medida que a densidade de corrente crítica do material aumenta, ou a sua pureza se torna maior, mais o fluxo magnético se afasta do interior do cilindro, passando cada vez mais pela sua periferia, deixando uma boa parte do interior do cilindro inactivo.

7.2 – Expressão do binário do motor de histerese

Considere-se um rotor cilíndrico maciço de diâmetro D_0 e comprimento ℓ construído com material supercondutor. Inserindo este rotor num estator que produza um campo girante de amplitude B surgirá um binário de histerese devido à interacção do campo e a distribuição espacial da corrente crítica induzida no supercondutor. O valor do binário pode ser calculado determinando a força de Lorentz desenvolvida ao nível do raio genérico r do rotor entre a distribuição da corrente crítica aí induzida $+J_c$ e o campo radial $B(r, \theta)$ criado pelo estator, tal que

$$T = \ell \int_{Vol} r J_c B(r, \theta) \cdot r dr d\theta. \quad (6)$$

Estendendo o cálculo a todo o volume do rotor $V_{ol} = (\pi/4)D_o^2\ell$ a referência [5] dá o seguinte resultado para um rotor colocado num campo de indução magnética uniforme B_o

$$T = \frac{1}{6} \ell D_o^3 J_c B_o \beta(\delta)$$

onde

$$\beta(\delta) = 1 - \frac{1}{\alpha \delta^{2.2} + 1}$$

é um factor adimensional que caracteriza a penetração do fluxo da periferia para o interior do rotor. Os factores $\delta = 2B_o / \mu_o J_c D_o$ e α dependem das propriedades do material superconductor e do valor do diâmetro D_o do rotor. Para um motor de histerese de $2p$ pólos e com uma distribuição sinusoidal de densidade de fluxo ao longo do entreferro de amplitude $\hat{B} = (\pi/2)B_o$ o binário específico T_u por unidade de volume prismático do rotor $D_o^2\ell$, resulta

$$T_u = \frac{T}{D_o^2\ell} = \frac{p}{3\pi} D_o J_c \hat{B} \beta(\delta) \quad (7)$$

e aumenta com o diâmetro D_o do rotor. Para materiais superconductores em que a penetração do fluxo é pequena, o binário de histerese pode ser aumentado deixando apenas um anel com um diâmetro exterior D_o e um diâmetro interior D_i . Para rotores superconductores com esta geometria (6) reduz-se a

$$T_u = \frac{p}{3\pi} D_o J_c \hat{B} \left[1 - \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^3 \right] \beta(\delta) \quad (8)$$

Quando D_i atinge a região de penetração do fluxo, a distribuição da densidade corrente J_c é afectada e penetra mais para o interior do cilindro superconductor. Fazendo simulações por variação de D_i desde zero (rotor maciço) até D_o , verifica-se que o binário aumenta até atingir o seu valor máximo quando $D_i = 0,78D_o$, isto é, quando a espessura do anel é cerca de 11% do valor do diâmetro exterior do rotor. Um aumento de D_i provoca uma diminuição do valor do binário, o qual se reduz obviamente a zero para $D_i = D_o$.

Conforme indica (7) o binário de um motor de histerese superconductor, tal como acontece num motor convencional, não depende da velocidade angular do rotor.

O binário depende da distribuição granular das correntes induzidas e é linearmente proporcional às perdas por histerese do material superconductor.

7.3 – Topologia do motor de histerese

A fim de se obter o binário máximo é costume, na prática, construir o rotor do motor de histerese apenas por um simples anel superconductor de espessura aproximada de 11% do seu diâmetro, como ilustra a figura 20.

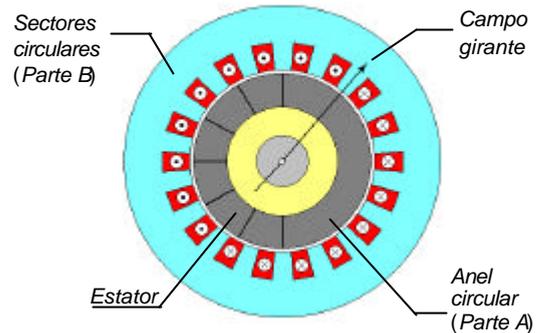


Fig. 20 – Topologia do motor de histerese

A dificuldade em construir um único anel de material superconductor de largo diâmetro (parte A) tem levado à construção de rotores com vários sectores circulares, mais fáceis de construir e que são colados entre si por meio de uma resina epoxy (parte B) e a um cilindro central não superconductor ligado ao veio. O rotor fica então com uma forma cilíndrica compacta, apesar da natureza quebradiça do material superconductor cerâmico. A figura 21 mostra o aspecto de um rotor de um motor de histerese construído com vários sectores circulares de material superconductor do tipo-II.



Fig. 21 – Rotor superconductor de vários sectores

Devido à resina epoxy entre os sectores circulares, o binário desenvolvido relativamente ao rotor de anel superconductor decresce com o número de sectores

empregues. O número de sectores é portanto uma solução de compromisso. A figura 22 representa a distribuição de fluxo num rotor construído com quatro sectores e a figura 23 com seis sectores circulares de material supercondutor.

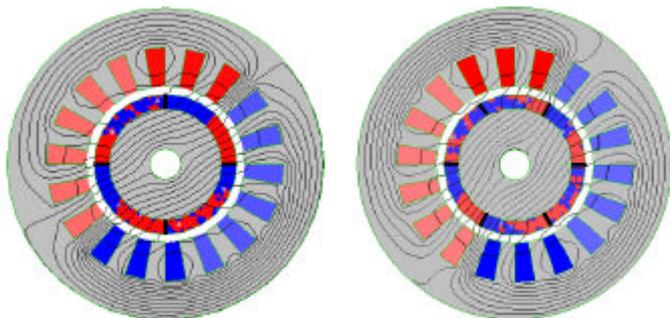


Fig. 22 – Quatro sectores

Fig. 23 – Seis sectores

Os resultados mostram que o fluxo do rotor penetra tanto mais no interior do rotor quanto maior for o número de sectores circulares, resultando numa perda de binário motor.

7.4 – Ensaio do motor de histerese

Usando um estator trifásico de 2 kW, 50 Hz, de 2 pólos, foi separadamente introduzido nele um rotor de um motor de histerese convencional e um rotor de um motor de histerese supercondutor de YBaCu, com $J_c = 3,5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, ambos com o mesmo diâmetro exterior de $D_o = 40 \text{ mm}$ e comprimento axial $\ell = 70 \text{ mm}$.

Foi feito o ensaio do motor de histerese convencional e o motor de histerese supercondutor com um único anel, cujo andamento do fluxo magnéticos está representado respectivamente na figura 24 e na figura 25.

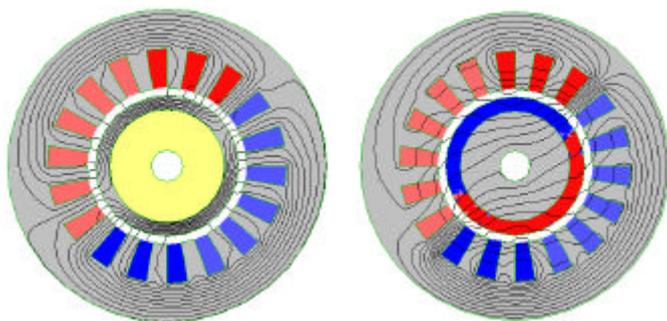


Fig. 24 - Motor de histerese Convencional

Fig. 24 - Motor de histerese supercondutor

Usando azoto líquido como refrigerante, mediu-se o binário dos dois motores por unidade de volume prismático

do rotor em função da densidade de corrente rotórica e para a mesma densidade máxima de fluxo $\hat{B} = 0,8T$ do estator. Os valores obtidos e a respectiva distribuição do fluxo magnético estão representados na figura 26 para comparação. Os resultados mostram que o motor de histerese supercondutor apresenta um binário cerca de 3 a 6 vezes maior do que o binário do motor de histerese convencional.

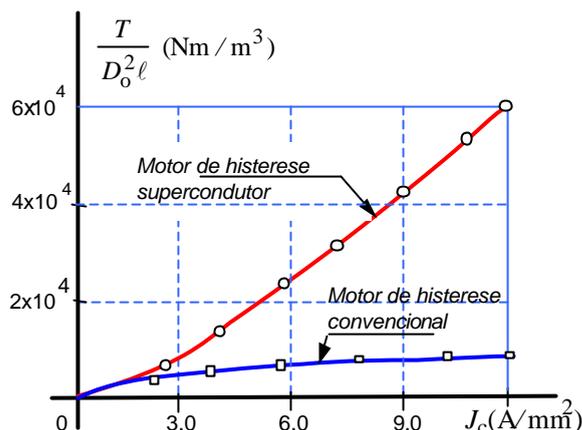


Fig. 26 – Comparação do binário específico de histerese supercondutor e convencional

Enquanto o binário do motor de histerese supercondutor cresce quase quadraticamente com a corrente do estator o binário do motor de histerese convencional cresce muito pouco. O binário do motor de histerese pode ainda ser melhorado usando hidrogénio líquido como meio de arrefecimento.

8. Conclusões

Devido à sua simplicidade construtiva, os motores de relutância com material supercondutor de alta temperatura colocados no rotor poderão vir a ter, num futuro próximo, grande utilização prática. Também os motores de histerese supercondutores apresentam binários específicos elevados, muitas vezes maiores do que os dos motores de histerese convencionais equivalentes. É evidente que estes dois tipos de motores supercondutores para gerarem binários mais elevados do que os dos motores convencionais equivalentes, o rotor necessita de ser arrefecido a uma temperatura abaixo da temperatura crítica do supercondutor. No entanto, em locais onde existam instalações de azoto líquido ou hidrogénio líquido, como no caso dos aviões a hidrogénio, estes motores poderão vir a ser sérios competidores dos motores clássicos.

Referências :

- [1] - Bednorz J.G., Müller K. A. *Z. Phys. B* 64 189.
- [2] - Depart. Engineering Science University of Oxford, U.K.; Moscow State Aviation Institute, Moscow, Russia; Institut fuer Physikalische Hochtechnologie, Jena, Germany, Institute de Ciencia de Materials de Barcelona, Bellaterra, Spain; DEE-FCT/UNL, Caparica, Portugal.
- [3] - Kovalev L. K. et al.: "HTS motors design. Recent results and future development, Superconductivity": *Research and Development*, N° 9-10. pp. 69-78, 1998.
- [4] - Match L. W. et al, *Electromagnetic and Electromechanical Machines*, Wiley & Sons, 1986.
- [5] - Barnes G J, *Computational modelling for type-II superconductivity and the investigation of high temperature superconducting electrical machines*, Ph.D. Thesis, Oxford Univ., 2000.
- [6] - Kovalev L. K. et al, *Theoretical and experimental study of magnetisation and hysteresis process in single grain YBCO sphere and bulk melt textured YBCO ceramics*, Seminar on High Temperature Superconductivity, Jena, German, September 22-25, 1999.
- [7] - Kovalev L. K. et al: "Hysteresis electrical machines with bulk melt-textured YBCO", *Materials Science and Engineering*, B53, pp. 145-170, 1994.

☆☆☆