

MOTORES ELÉTRICOS COM ENROLAMENTOS EM SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA

Sebastião Lauro Nau

Depto de P&D do Produto WMO – slnau@weg.com.br

Marcelo Verardi

Depto de P&D do Produto WMO – wmopd02@weg.com.br

Solon Brum Silveira

Depto de P&D do Produto WMO

Márcio Antônio Sens

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás

RESUMO

Com a descoberta dos materiais cerâmicos com características supercondutoras em temperaturas superiores a do nitrogênio líquido, ocorreu também a retomada do desenvolvimento dos supercondutores, a partir de 1987, abrindo-se também novas perspectivas para projetos idealizados no passado, que foram abandonados por dificuldades econômicas.

Este trabalho descreve os detalhes e os problemas encontrados para o projeto e a construção de um motor elétrico supercondutor, para operação na temperatura de 77K(-196°C). O motor elétrico foi projetado pelas equipes do CEPEL e da WEG Motores Ltda e foi construído integralmente pela WEG, com exceção das bobinas supercondutoras, adquiridas da American Superconductors.

1. INTRODUÇÃO

A idéia da utilização de supercondutores em linhas de transmissão e em máquinas rotativas é bastante antiga, entretanto, tais projetos estão novamente emergindo com o aparecimento das possibilidades de condutores operarem em temperaturas da ordem de 77 K, obtidas de forma economicamente viável pela utilização do nitrogênio líquido, retirado do ar e, portanto, disponível em todo este planeta.

O desenvolvimento dos materiais cerâmicos supercondutores de alta temperatura está a uma velocidade tal, e da mesma forma suas aplicações, que já estima-se que pelo ano 2020 o mercado para os produtos que se utilizam da supercondutividade chegue à casa dos US\$120 bilhões.

Desta forma, as pesquisas no assunto estão numa evolução extraordinária, talvez comparável, na área de potência, ao aparecimento do transistor da área eletrônica. Atualmente o sonho da transmissão de energia elétrica em

supercondutores já se acha em utilização experimental, sendo disputado pelos fabricantes Pirelli, de Milão, Itália; pela BICC Cables, de Chester, U.K.; da Sumitomo Electric e Furukawa Electric, do Japão; e Siemens, da Alemanha. Com isto, uma linha de transmissão subterrânea em cabo trifásico supercondutor já funciona em Armark-NY-USA, num projeto conjunto do EPRI (Electric Power Research Institute), e cabos com capacidade de corrente superiores a 10kA já foram construídos.

A citada linha de transmissão visa pelo menos duplicar a capacidade de uma linha tradicional, sem alterações dos eletrodutos, e possivelmente quadruplicar. Ou seja, foi retirada uma linha antiga, convencional, sobrecarregada, e no mesmo duto foram instalados os novos cabos, com capacidade dobrada, com refrigeração por nitrogênio líquido.

Também antigas idéias de máquinas rotativas e dispositivos que necessitam de elevados campos magnéticos estão emergindo, contando com grandes investimentos por parte da Reliance, da General Electric, da Westinghouse Electric e da American Superconductor, dos Estados Unidos; da Siemens da Alemanha; da ABB da Suíça; da GEC-Alsthom da França e da Tokyo Electric Power e Toshiba, do Japão. Com isto, projetos fantásticos acham-se em desenvolvimento, desde protótipos de poucos quilowatts, até máquinas girantes da ordem de 1000MVA.

As aplicações mais difundidas até o momento para os supercondutores são os transformadores de força, linhas de transmissão, dispositivos limitadores de correntes e motores elétricos.

2. RAZÕES PARA A APLICAÇÃO DOS SUPERCONDUTORES

A aplicação dos supercondutores em máquinas elétricas rotativas tem sido investigada por razões técnicas, econômicas, e para reduzir o desperdício de energia, por causa da resistividade elétrica nula dos materiais.

A maior parte das investigações científicas destinadas ao aproveitamento destes novos e fantásticos materiais, procuram reduzir os custos, ou o peso, ou as dimensões das máquinas pela aplicação de campos magnéticos maiores que os convencionais, já que os fios supercondutores comerciais permitem uma densidade de corrente bem superior à utilizada pelo cobre, da ordem de 15 a 20A/mm², até a presente data.

Esta densidade parece, à primeira vista, baixa, se comparada com a densidade de corrente do material supercondutor em si, que atualmente atinge a casa dos 500A/mm², na temperatura do nitrogênio líquido. Mas, infelizmente esta colossal densidade ainda não pode ser explorada na totalidade para uma bobina ou para um cabo condutor elétrico, pois o material supercondutor ainda precisa de um precursor de sustentação mecânica, e inibidor da oxidação, como uma cobertura de prata, que ocupa razoável espaço, elevando a seção transversal do fio ou do cabo supercondutor. Além disso, por questões conservativas, utiliza-se a corrente de trabalho em 50% da corrente crítica e, ainda, condutores mais longos têm maiores probabilidades de conter pontos defeituosos.

3. CRITÉRIOS DE PROJETO

3.1 Número de Pólos em Motores com Supercondutores

A força magnetomotriz - *fmm* por pólo, para promover uma dada indução magnética na armadura, não é grandemente influenciada pelo número de pólos. Conseqüentemente, maior número de pólos implica mais material supercondutor, e o custo do material, atualmente, é bastante relevante. Assim, quanto menor o número de pólos, melhor, pois o volume de supercondutor é menor, além de ser menor o número de conexões.

Outra razão importante para que fosse construído um protótipo de 2 pólos é o menor número de componentes para este motor, principalmente aqueles necessários para manter as bobinas supercondutores termicamente isoladas.

3.2 Enrolamentos de Campo

Para as máquinas síncronas e de corrente contínua, um enrolamento de campo em supercondutor promove muito elevada *fmm*, e assim será possível usar um circuito magnético completamente em núcleo de ar. Entretanto, carcaças em aço têm sido utilizadas, incluindo blindagens externas de cobre, para reduzir o campo magnético externo à máquina. Máquinas síncronas de pólos magnéticos girantes tem sido construídas com envolvimento completo do rotor em recipientes criogênicos.

3.3 Enrolamentos da Armadura

As armaduras geralmente têm um enrolamento complexo, sejam para as máquinas síncronas, de indução ou de corrente contínua. Por isto, os enrolamentos têm sido mantidos em cobre, em ambiente não criogênico. Os condutores de cobre onde circulem correntes elétricas não devem ser imersos no nitrogênio líquido, pois provocariam uma evaporação excessiva e muito rápida do líquido refrigerante, implicando dispêndios desnecessários.

Para máquinas de armaduras girantes, tem sido recomendado manter a armadura em aço, pelas seguintes razões:

- Reduz o fluxo magnético tangencial dentro dos enrolamentos e as componentes de correntes parasitas associadas;
- Reduz a *fmm* requerida para promover o fluxo através do entreferro, e em conseqüência menos supercondutor será necessário;
- Promove uma base rígida para ajudar na instalação dos enrolamentos.

3.4 Ambiente Criogênico

Os enrolamentos supercondutores, sejam na armadura, sejam nos enrolamentos de campo, devem ser contidos em um criostato, e qualquer perfuração do mesmo deve ser evitada.

Tem sido sugerido criostatos constituídos por camisas cilíndricas sob vácuo, ou contendo

isolamento sólido, como os polímeros “closed cell”. No centro destas camisas encontram-se alojadas as bobinas supercondutoras, com sua estrutura mecânica, resfriadas pelo nitrogênio líquido na pressão atmosférica.

3.5 Condutores Elétricos Supercondutores

Como possíveis condutores, no estágio atual de desenvolvimento, podem ser utilizados dois tipos básicos de supercondutores cerâmicos, policristalinos, constituídos por fios multifilamentares ou por fitas, ambos contidos em estrutura mecânica de prata.

Atualmente, estes condutores apresentam limitações bem definidas, para a operação como supercondutores, quanto à temperatura, quanto à densidade de corrente e quanto ao campo magnético em que estão imersos.

Por razões econômicas e de segurança, os materiais supercondutores devem ser mantidos na temperatura de **77 K** (-196°C), que corresponde à temperatura de ebulição do nitrogênio na pressão atmosférica, embora a temperatura crítica atual dos materiais possa atingir pouco mais que **100K**, ou seja, -173°C.

As fitas podem ser obtidas nas dimensões finais de **2 mm** de largura por **80 a 250 . m**, com capacidade de **3,2 a 7,5 A**, sendo usualmente agrupadas várias fitas em paralelo para a obtenção de maiores capacidades de corrente, numa densidade de **15 a 20 A/mm²**. Outra limitação atual para os supercondutores cerâmicos é o raio de curvatura, que não pode ser inferior aos **25 mm**. A Fig. 1 mostra a fita supercondutora com a qual foram confeccionadas as bobinas utilizadas no protótipo do motor cc.

As bobinas supercondutoras podem ser encomendadas prontas, nas dimensões finais, já impregnadas. Desta forma, as bobinas poderão ser instaladas nos alojamentos dos motores, mas sem qualquer deformação da forma original.

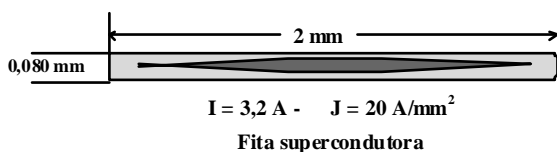


Fig.1 - Seção de uma fita supercondutora em estrutura de prata

Soldas entre fitas condutoras poderão ser efetuadas com solda prata. Neste caso, para um

condutor como o mostrado na figura acima, deverá ser prevista uma resistência de aproximadamente **2μΩ/conexão**.

4. POSSIBILIDADES CONSTRUTIVAS

As possibilidades construtivas para as máquinas elétricas rotativas em supercondutores podem ser:

- Motor para corrente contínua com pólos estáticos em HTS e armadura girante convencional;
- Motor síncrono com armadura convencional estática e pólos girantes em HTS;
- Motor de indução com bobinas em HTS estáticas, em curto-circuito e rotor bobinado em cobre, semelhante aos ventiladores de teto, porém com a parte externa, em gaiola, estática e a interna, bobinada, girante.

5. AS BOBINAS SUPERCONDUTORAS

O motor elétrico foi projetado pelas equipes do CEPEL e da **WEG Motores Ltda** e foi construído integralmente pela **WEG**, com exceção das bobinas supercondutoras, que foram importadas da empresa American Superconductors.

As bobinas importadas são do tipo toroidal, com enrolamento helicoidal duplo, constituído por fitas de prata com núcleo supercondutor na temperatura de 77K.

5.1 Característica Supercondutora das Bobinas

Como os materiais supercondutores não atendem à lei de **Ohm**, ou seja, a queda de tensão não responde linearmente ao estímulo da corrente elétrica, a caracterização da supercondutividade não costuma ser efetuada pela resistência elétrica, e sim pela queda de tensão sobre a amostra. No caso da bobina, a queda de tensão refere-se ao comprimento de 28 metros e a corrente crítica, por definição adotada internacionalmente, é aquela que provoca uma queda de 1μV/cm, ou 100μV/m. Desta forma, a corrente crítica para ambas as bobinas é aquela que resulta numa queda de tensão de 2,8mV.

Como primeira avaliação das características elétricas das bobinas supercondutoras importadas, foi efetuado um ensaio na temperatura ambiente de 24 °C, obtendo-se o comportamento resistivo com a corrente contínua, que é típico dos condutores, como no caso, a prata. A Fig. 2 mostra a queda de tensão com a corrente elétrica aplicada sobre a bobina M97-0988, indicando claramente a linearidade e o valor de 863mΩ para a resistência elétrica, para correntes de até 1 Ampère.

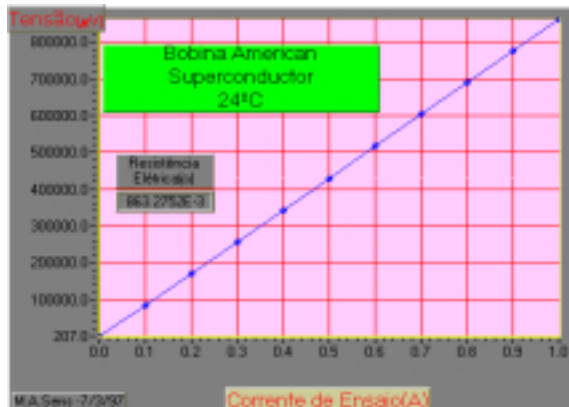


Fig. 2 - Característica resistiva da bobina M97-988 a 24 °C

5.1.1 Curva característica da bobina M97-0988

Para este ensaio, foi utilizado o sistema automático de levantamento de características elétricas, desenvolvido no CEPEL especialmente para as atividades do Laboratório de Supercondutividade.

Após a primeira avaliação elétrica da bobina M97-0988, ocorreu a quebra de um dos terminais de corrente durante a retirada da bobina do banho de nitrogênio líquido. Esta quebra ocorreu por dois motivos. Primeiro pelo posicionamento contrário ao de uso, obrigando o dobramento da cordoalha de cobre estanhado. Segundo, pela própria temperatura de ensaio, que torna o metal frágil e reduz sua flexibilidade.

Desta forma, foi efetuado o reparo do terminal, que consistiu na raspagem das camadas isolantes de fibra de vidro, utilizando-se de micro disco de corte de carborundum, até atingir-se o ponto de contato metálico. Após a eliminação das camadas de óxido de cobre presentes no contato, promoveu-se a soldagem com solda a base de liga de estanho, da mesma cordoalha anteriormente utilizada para aplicação da corrente, no terminal

rompido. O novo terminal foi soldado na posição axial inversa, possibilitando um posicionamento adequado da bobina no interior do criostato do motor supercondutor.

Após o reparo dos terminais da bobina M97-0988, houve certa dúvida sobre um possível dano causado à mesma pela operação de soldagem, efetuada com ferro de solda de 100W e liga de estanho comum, com ponto de fusão superior a 200°C, pois frequentemente observam-se recomendações para evitar o superaquecimento e para utilizar soldas a base de índio, de baixo ponto de fusão.

Desta forma, foi efetuado um novo ensaio de caracterização elétrica, que ratificou o sucesso da operação de reparo na bobina M97-0988. Os resultados estão mostrados na Fig. 3.

5.1.2 Curva característica da bobina M97-0989

A primeira bobina M97-0989 tinha vindo fora das especificações. Foi devolvida e retornou depois de 6 meses. A bobina M97-0989 nova foi avaliada em seu comportamento da queda de tensão com a corrente elétrica aplicada sobre a mesma, em corrente contínua, em ambiente de nitrogênio líquido, como mostra a Fig.4.

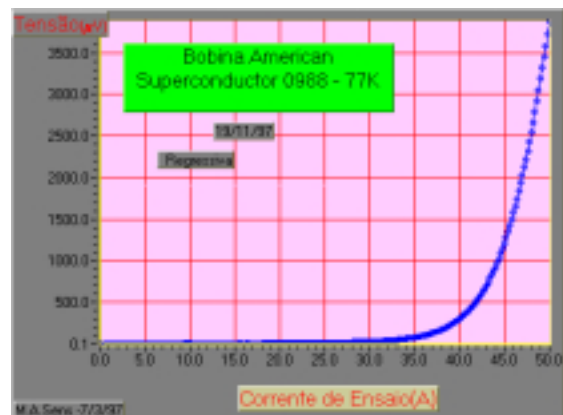


Fig. 3 - Característica da bobina M97-988 reparada

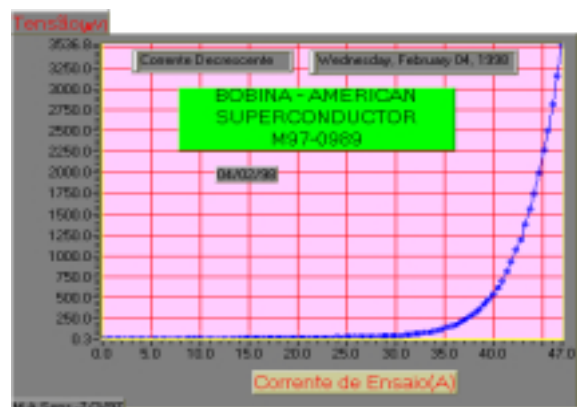


Fig. 4 - Característica resistiva da bobina M97-0989 - nova

5.1.3 Características finais das bobinas

Após a verificação dimensional das bobinas e do levantamento das características condutivas na temperatura do nitrogênio líquido, resume-se as características principais das bobinas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características finais das bobinas

NÚMERO DE SÉRIE	M97-0988	M97-0989
Diâmetro externo (mm)	83,0	79,7
Diâmetro interno (mm)	60,8	60,8
Altura (mm)	28,5	28,6
Corrente crítica I_c (A)	49,4	46,0
Força magneto-motriz (Ae)	6317	5888
Comprimento da fita (m)	28	28
Número de espiras	128	128
Massa, incluindo os terminais (g)	~300	~280

6. MOTOR ELÉTRICO COMPLETO

O motor selecionado para a construção foi de corrente contínua, com potência em torno de

1000W, para ser pequeno e reduzir os investimentos, sobretudo das bobinas supercondutoras.

O desenho foi escolhido para facilitar a construção da bobina, pois atualmente ainda encontra-se dificuldade para a conformação de pequenas curvaturas, que podem fraturar o composto cerâmico e interromper a continuidade supercondutora. Outro aspecto foi a possibilidade de reutilização das bobinas para outras aplicações. Desta forma, o projeto ficou conforme mostrado na Fig. 5, numa vista em corte transversal, e na Fig. 6, em corte longitudinal.

O projeto do motor está em fase de conclusão, após algumas tentativas de aperfeiçoamento do criostato que mantém as bobinas resfriadas a -196°C . Inicialmente, houve problemas com um anel de vedação – o único que não pôde ser confeccionado em nylon; foi fabricado com borracha nitrílica. Novo sistema de isolamento das bobinas supercondutoras foi projetado e construído, aumentando-se o volume de nitrogênio em contato com as bobinas e utilizando-se apenas anéis de vedação feitos de nylon, que resistem até -200°C . No entanto, mesmo com o novo sistema, o vácuo formado entre o cilindro externo e o cilindro interno era perdido gradativamente quando o nitrogênio líquido era derramado dentro do cilindro interno onde a bobina supercondutora estava alojada.

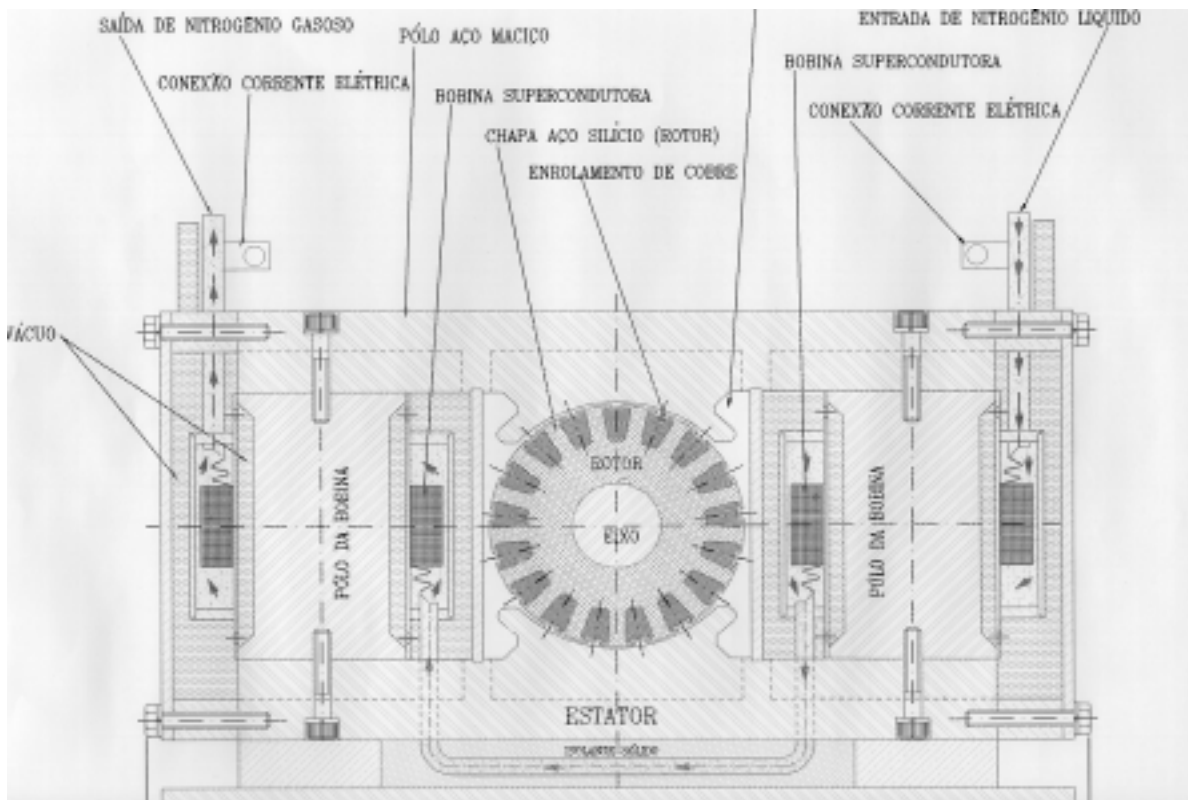




Fig. 5 – Desenho do motor em corte transversal

Tendo em vista as reduzidas dimensões, encontrou-se dificuldades construtivas, pois as câmaras de isolamento térmico não comportam parafusos para o fechamento. Além disso, a parte central do criostato é transpassada pelo núcleo magnético, conectado ao meio externo, e portanto, constitui fonte de calor, conforme mostra o croqui da Fig.7. Numa fotografia, a Fig. 8 mostra o motor aberto, para expor a

bobina supercondutora, na forma como ficou a construção final.

Numa fase posterior, quando forem solucionados os problemas construtivos das câmaras criogênicas que acomodam as bobinas supercondutoras, será iniciada a avaliação do desempenho do motor e, para tanto, foi construído um sistema dinamométrico.

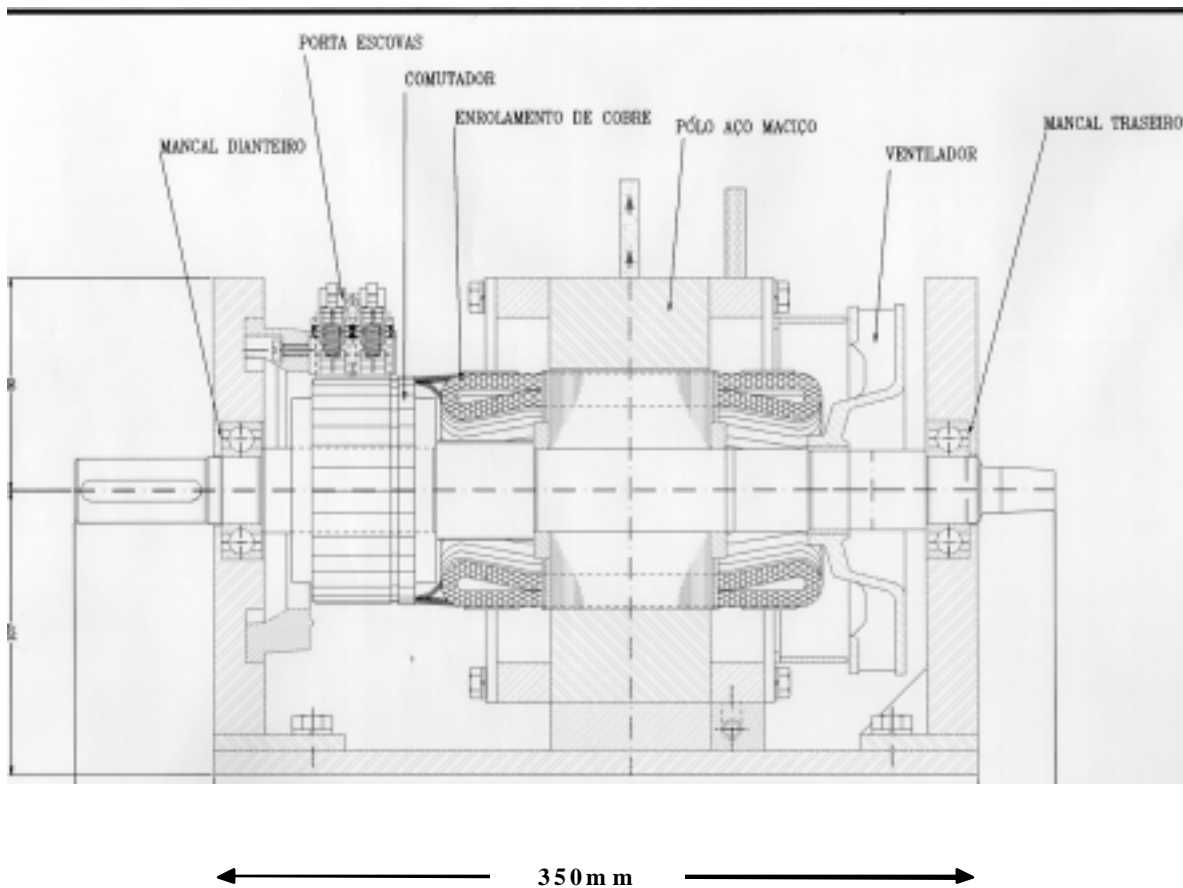


Fig. 6 - Desenho do motor em corte longitudinal

7. CONCLUSÃO

Como era de se esperar, muitas dificuldades técnicas e de fabricação ocorreram durante o desenvolvimento do motor com bobinas supercondutoras. A mais relevante delas estava relacionada à parte criogênica, ou seja, como isolar termicamente uma estrutura refrigerada a -196°C , conciliando-a com os materiais magnéticos que são condutores de calor. Porém, a conclusão principal diz respeito às vantagens (ou desvantagens) do uso de materiais supercondutores em máquinas elétricas. Sua utilização só é economicamente viável em motores de grande potência (acima de 1MVA), onde a redução no volume, e conseqüentemente no peso e no custo, compensa o alto custo das bobinas supercondutoras. A utilização de materiais supercondutores no circuito de excitação, tanto de máquinas cc quanto de máquinas síncronas, não é vantajosa, visto que estes circuitos representam uma parcela pequena da potência total da máquina (entre 5 e 30%, dependendo do

tamanho). Para motores de indução, deveria ser investigado ainda o uso de supercondutores no estator sem material ferromagnético, evitando-se o aquecimento gerado pelas perdas no ferro.

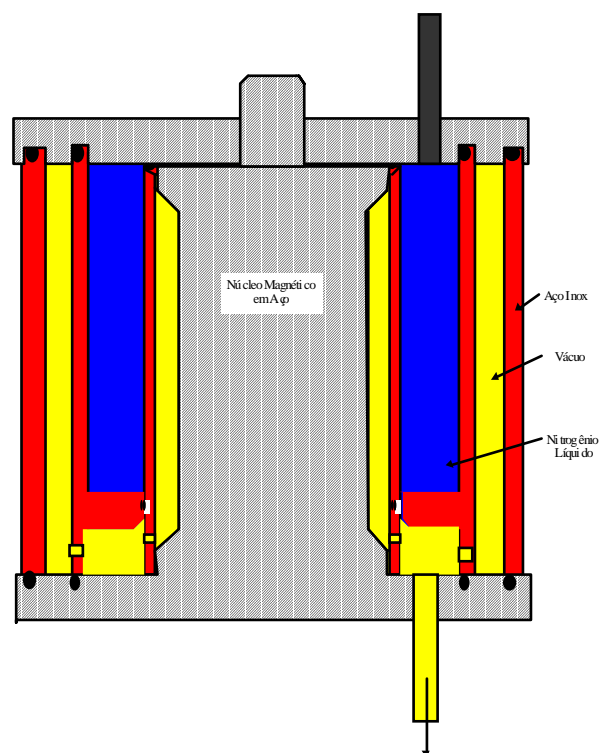


Fig. 7 - Criostato com núcleo magnético.



Fig. 8 - Foto do motor completo

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] A.D. Appleton , "Motors, Generators, and Flux Pumps"; Cryogenics, June, 1969.
- [2] J.T.Eriksson, R. Mikkonen; J. Paasi; R. Perälä and L. Söderlund - "A HTS Synchronous Motor at Different Operating Temperatures"; Applied Superconductivity Conference, Pittsburgh, USA, August 25-30, 1996.
- [3] C. Gillespie, "One Small Step: An SC Motor is Tested Successfully"; SC Motors, 1993.
- [4] D. U. Gubser, "Superconducting Coil Development and Motor Demonstration: Overview"; Journal of Electronic Materials, Vol. 24, N° 12, 1995.
- [5] D. U. Gubser, "Superconducting Homopolar Motor and Conductor Development"; JOM, October, 1996.
- [6] T. Hoshino, I. Muta, T. Itoh, K. Hayashi and E. Mukai, "Preliminary Study on a Rotating Armature Type Superconducting Motor"; IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, N° 4, July, 1994.
- [7] C.H. Joshi, C.B. Prum; R.F. Schiferl and D.I. Driscoll, "Demonstration of Two Synchronous Motors Using High Temperature Superconducting Field Coils"; Applied Superconductivity Conference, October 16-21, 1994.
- [8] C. H. Joshi and R. F. Schiferl, "Design and Fabrication of High Temperature Superconducting Field Coils for a Demonstration DC Motor"; Applied Superconductivity Conference, August 23-28, Paper N° LKA-4, 1992.
- [9] C. H. Joshi, R. F. Schiferl and D. I. Driscoll, "Progress in the Application of High Temperature Superconductors to Electric Motors"; Presented at the Technical Innovation Symposium, September 7-9, 1994.
- [10] E. Spooner and B.J. Chalmers, "DC Motor With High-Critical-Temperature Superconducting Field Winding and Slotless Armature"; IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 141, n° 3, May, 1994.
- [11] D. J. Waltman and M. J. Superczynski Jr., "High Temperature Superconducting Magnet Motor Demonstration"; IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 5, N° 4, December, 1995.