

Análise do desempenho de uma máquina supercondutora e comparação com um motor de indução

Fernando Jorge Monteiro Dias * Guilherme Gonçalves Sotelo *
Rubens de Andrade Júnior **

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, (e-mail: fernandojmd@id.uff.br e gsetelo@id.uff.br)

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, (e-mail: rubens.andrade.jr@poli.ufrj.br)

Abstract: This paper presents the performance of a trapped flux superconducting machine in 2G tapes stacked on the rotor when submitted to liquid nitrogen (LN₂) temperature at 77 K. Its most relevant characteristics were obtained for comparison by a squirrel-cage induction motor of the same dimensions. In this context, the methodology of the experimental analysis and all the results obtained with the developed machine and with the induction motor at room temperature and at the temperature of liquid nitrogen will be presented. Torque results with load variation, mechanical power, electrical power, efficiency, losses, and the harmonics of the superconducting machine and the induction motor were investigated and discussed. The concept of the superconducting machine presented in this project can be applied in the future in wind energy, ship propulsion, and electric aircraft because, as will be shown, the superconducting machines achieve higher power densities than the conventional ones.

Resumo: Este artigo apresenta o desempenho de uma máquina supercondutora de fluxo aprisionado em fitas 2G empilhadas no rotor quando submetida a temperatura do nitrogênio líquido (LN₂) a 77 K. As suas características mais relevantes foram obtidas e comparadas com as de um motor de indução com rotor gaiola de mesmas dimensões. Neste contexto, serão apresentadas a metodologia da análise experimental e todos os resultados obtidos com a máquina desenvolvida e com o motor de indução em temperatura ambiente e na temperatura do nitrogênio líquido. Resultados do conjugado com variações de carga, potência mecânica, potência elétrica, eficiência, perdas e os harmônicos da máquina supercondutora e do motor de indução foram investigados e discutidos. O conceito de máquina supercondutora apresentado nesse projeto futuramente pode ser aplicado em geração eólica, propulsão naval e aeronaves elétricas, pois, como será mostrado, as máquinas supercondutoras alcançam maiores densidades de potência do que as máquinas convencionais.

Keywords: Superconducting machine, induction motor, modified motor, 2G HTS, squirrel-cage rotor.

Palavras-chaves: Máquina supercondutora, motor de indução, motor modificado, 2G HTS, rotor gaiola de esquila.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por máquinas elétricas de alta densidade de potência está crescendo em aerogeradores, propulsão de navios e aeronaves elétricas. Máquinas supercondutoras podem ser uma alternativa atraente para essas aplicações. Visto que, podem fornecer maior potência de eixo em menor volume e menor peso do que as convencionais. Algumas empresas e institutos de pesquisa já projetaram,

* Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro do Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

construíram e testaram vários tipos de máquinas supercondutoras de diferentes tipos Stautner (2017). Um exemplo é o primeiro projeto de turbina eólica supercondutora em escala real chamado Ecoswing Wiezoreck (2015), com 40 polos e 3,6 MW. Outro exemplo é um projeto da NASA que se concentrou no desenvolvimento de máquinas elétricas para aeronaves com o intuito de reduzir os impactos ambientais. Em que esse projeto demonstrou o potencial de eletrificar sistemas de energia de aeronaves usando motores e geradores elétricos Armstrong (2015), Bowman (2018). Como o desempenho aerodinâmico da aeronave depende do peso de seus componentes e, portanto, o uso de materiais supercondutores nessas máquinas é uma alternativa, pois esses materiais possuem alta ampacidade, o que melhora a relação peso/potência da aeronave Masson

(2007), Martins (2019). Os enrolamentos dessas máquinas supercondutoras são tipicamente feitos de bobinas enroladas com fitas comerciais 2G HTS. No entanto, além das bobinas, existem propostas alternativas para rotores HTS que são HTS *bulk* ou fitas 2G HTS empilhadas Patel (2015), Baghdadi (2014). Aqui, o interesse está em máquinas que usam empilhamento de fitas REBCO. Esta tecnologia surgiu na sequência do trabalho experimental realizado por A. Patel em 2013 Patel (2013). Aquele trabalho mostrou que empilhamentos magnetizados de fitas 2G HTS podem reter uma quantidade significativa de fluxo magnético propício para aplicações em máquinas elétricas. Em particular, foi demonstrado que tais empilhamentos podem capturar mais fluxo magnético do que um *bulk* de dimensões semelhantes. Após tal conquista, um motor de campo aprisionado foi desenvolvido com sucesso Patel (2015). O motor apresentou uma distribuição altamente uniforme de fluxo magnético. Curiosamente, os mesmos empilhamentos podem ser usados como polos de campo em rotores. Com base no referido trabalho, fitas HTS empilhadas seguindo uma espiral em torno de um núcleo não magnético foram propostas para um rotor HTS mostrando a flexibilidade do uso dessas fitas Patel (2015). Para tal aplicação, além das configurações radiais, os empilhamentos de fitas também podem ser utilizados em motores lineares com particular interesse na tecnologia Maglev Sotelo (2018). No geral, o interesse em empilhamentos feitos de fitas disponíveis comercialmente vem crescendo. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um novo protótipo de máquina supercondutora com campo aprisionado em fitas 2G empilhadas no rotor que foi projetado e desenvolvido para analisar as suas principais características. Inicialmente essas características foram comparadas com a performance de um motor de indução com rotor gaiola (em temperatura ambiente e na temperatura do LN₂ a 77 K) e, em seguida, foi analisada a performance da máquina supercondutora quando acionada por um inversor de frequência (partida suave) e por uma fonte de alimentação de corrente alternada (partida direta). Através dessas análises foi observado que até 80% da carga nominal a máquina supercondutora funciona em regime síncrono, e para níveis de conjugados mais altos é assíncrono. Além disso, aumentou o conjugado 1,24 vezes e 2,43 vezes para o motor de indução operando em temperatura ambiente e a 77 K, respectivamente. Os resultados mostraram que esta máquina supercondutora tem potencial para aplicações de alta densidade de potência.

2. MOTOR DE INDUÇÃO COMERCIAL, MOTOR DE INDUÇÃO MODIFICADO E MÁQUINA SUPERCONDUTORA DESENVOLVIDA.

O motor de indução com rotor gaiola de esquilo comercial usado neste trabalho é trifásico, com enrolamentos de cobre no estator, barras de alumínio no rotor, quatro polos, entreferro de 0,1 mm e potência nominal de 368 W em temperatura ambiente. Esse motor precisou de algumas modificações para configurar a bancada de ensaios e realizar medições na temperatura ambiente e a 77 K. As adaptações no motor são apresentadas a seguir. Como foi necessário operar todo o sistema submerso no líquido criogênico, para evitar problemas com os lubrificantes utilizados nos mancais, os rolamentos de esferas foram

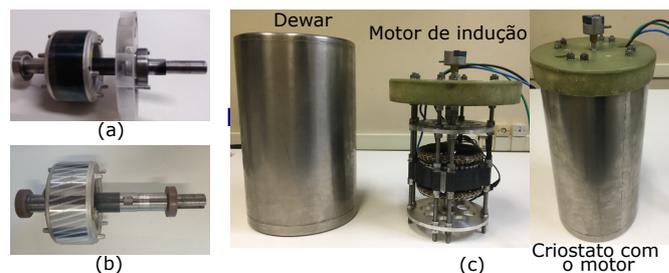


Figura 1. Rotores e motor de indução: a) rotor como de fábrica, b) rotor após a usinagem, c) Motor de indução modificado e criostato com o motor.

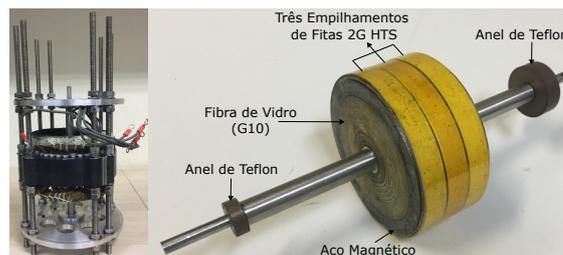


Figura 2. Máquina supercondutora com fitas 2G HTS empilhadas no rotor

removidos e substituídos por rolamentos deslizantes de Teflon/latão. O motor de indução e seu suporte utilizam diversos tipos de materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica. Isso significa que o rotor e o estator podem parar quando o motor estiver em banho de LN₂. A solução encontrada para permitir testar o mesmo sistema operando nas duas condições de temperatura foi aumentar o entreferro do motor. O motor de indução original foi fabricado com um entreferro de 0,1 mm. Foi decidido usinar o rotor e o novo entreferro adotado foi de 1,0 mm. O rotor antes e depois da usinagem é apresentado nas figuras 1a e 1b, respectivamente. Além disso, foi necessário remover as tampas de ferro para imergir o motor de indução em nitrogênio líquido. Uma nova estrutura foi projetada com barras e parafusos de alumínio, conforme mostrado na figura 1c, o que melhora a circulação do nitrogênio líquido. A estrutura também suporta o motor de indução, fixando-o em um recipiente criogênico (Dewar) que é externo ao sistema apresentado na figura 1c. Esse criostato foi preenchido com LN₂ para testes a 77 K. Fora desse criostato, um gerador de corrente contínua usado como carga pôde ser conectada ao motor de indução. A bancada de ensaios foi a mesma para medições em temperatura ambiente e em banho de LN₂.

A partir dessa configuração, a máquina supercondutora foi desenvolvida, o rotor foi substituído por um novo com fitas 2G empilhadas em espiral em torno de um núcleo, com parte em ferro macio e parte em fibra de vidro (G10). Essa máquina possui três fitas 2G empilhadas no rotor, cada uma com dezoito camadas. O processo de empilhamento de fita 2G foi o mesmo apresentado em Dias (2019). O rotor é composto por um núcleo majoritário em G10, conforme mostra a figura 2.

Em cada espiral do empilhamento, a primeira camada de uma única fita 2G foi colada diretamente na superfície do núcleo com resina epóxi. O rotor de fitas 2G empilhadas

permaneceu a 60 °C por 12 horas para completar o processo de cura. Para proteger as fitas empilhadas, foi usada fita adesiva Kapton. Do motor de indução original foram mantidos apenas os enrolamentos do estator e o núcleo ferromagnético, a carcaça também foi removida. No rotor, um núcleo com parte em fibra de vidro e parte em aço magnético foi usado em vez de um núcleo totalmente ferromagnético. Essas mudanças reduziram o peso da máquina, de 8,12 kg para 6,47 kg.

As dimensões são as mesmas para os dois protótipos, comprimento do eixo de 251 mm, do núcleo do rotor de 43 mm, do estator de 98 mm e diâmetro do rotor e do estator de 91,5 mm e 165 mm, respectivamente. Isso é para maior efetividade da comparação entre as máquinas.

3. METODOLOGIA E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Aqui, será descrito a metodologia e todos os procedimentos experimentais para a realização dos ensaios com o motor de indução original em temperatura ambiente, com o motor de indução modificado em temperatura ambiente e em banho de LN₂ e com a máquina supercondutora.

3.1 Ensaios com o motor original em temperatura ambiente

Os ensaios com o motor de indução original foram realizados no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Esses ensaios tiveram como propósito determinar o escorregamento, o fator de potência e o rendimento do motor. Para motores com fracionamento de potência, o método com medição de potência direta de entrada e de saída foi utilizado (método 1 - item 4.3 da norma ABNT17094-3). Um freio dinamométrico foi usado como carga até que o motor atingisse seu equilíbrio térmico. Na sequência, o motor foi preparado para o ensaio sob carga. Nesse ensaio, o mesmo freio dinamométrico foi usado para impor cargas de 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da potência nominal.

3.2 Ensaios dinâmicos com o motor de indução modificado e com a máquina supercondutora

Os ensaios com o motor de indução modificado e com a máquina supercondutora foram realizados no Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE) da Universidade Federal Fluminense (UFF). Deste modo, um novo sistema de medição foi desenvolvido, mostrado na figura 3, para os ensaios em nitrogênio líquido.

Nessas máquinas foram realizados ensaios com variações de carga, e com o auxílio de um analisador de potência modelo WT 1800 da Yokogawa foram medidas as seguintes grandezas físicas: conjugado, velocidade, corrente trifásica e tensão trifásica. Em que permitiu calcular potência ativa, potência reativa, fator de potência, escorregamento e eficiência, entre outras grandezas.

3.3 Ensaios com o motor de indução modificado em temperatura ambiente e em LN₂

Nos ensaios em temperatura ambiente, esquemático do sistema mostrado na figura 4 (como o dewar sem LN₂), uma fonte de alimentação CA (modelo 3120AFX da Pacific

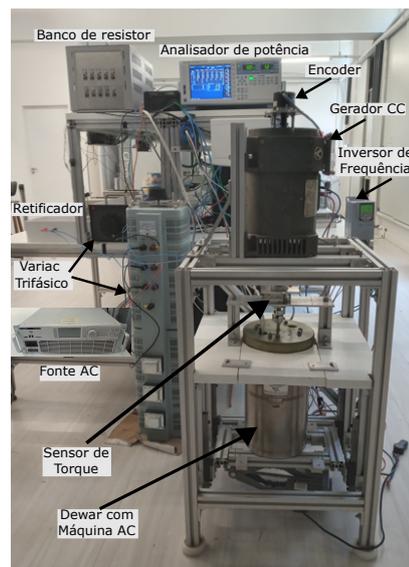


Figura 3. Foto da montagem experimental do novo sistema de medição.

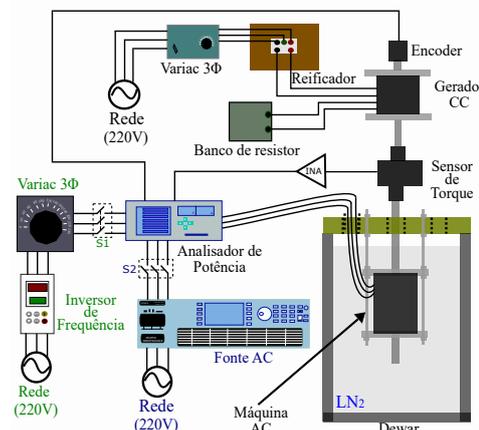


Figura 4. Esquemático do sistema de medição para os ensaios com as máquinas.

Power) foi usada para alimentar o motor de indução modificado.

A carga foi ajustada usando uma máquina CC operando como um gerador de campo independente. Os enrolamentos da armadura do gerador CC foram conectados a um banco de resistor e os enrolamentos de campo foram alimentados por uma fonte CC composta por um Variac trifásico e um retificador de diodo em ponte para controlar a potência do gerador. As medições foram feitas em regime permanente a uma velocidade constante após igualar o conjugado de carga com o do motor. Um sensor de torque foi instalado acoplado o eixo do gerador CC com o eixo do motor de indução. Como a saída do sensor de torque é em mV e a entrada do WT 1800 é em volts, este sinal foi amplificado utilizando um amplificador de instrumentação INA128. A velocidade do motor foi medida usando um Encoder incremental instalado no eixo do gerador CC. O motor foi ajustado na frequência nominal (60 Hz), e a carga foi alterada ajustando a corrente de campo do gerador CC. As medidas elétricas do motor CA e do Gerador CC foram obtidas pelo analisador de potência.

Os ensaios com o motor de indução modificado em temperatura criogênica foram os mesmos citados anteriormente. A única diferença é que o motor foi refrigerado antes das medições com o Dewar cheio de nitrogênio líquido, como mostra a figura 4.

3.4 Ensaios com a máquina supercondutora de fluxo aprisionado

Os ensaios com a máquina supercondutora foram idênticos aos realizados com o motor de indução modificado. A configuração experimental é quase a mesma apresentada na figura 4. O rotor com empilhamento 2G substituiu o de gaiola de esquilo e o estator foi o mesmo. A máquina supercondutora foi resfriada em LN₂ e, em seguida, o estator foi energizado (esse processo é denominado resfriamento em campo zero). No caso da máquina supercondutora, além da análise das características com ela alimentada com a fonte de alimentação CA, foram também realizados ensaios com ela alimentada por um inversor de frequência (fonte chaveada) para estudar o impacto dos harmônicos gerados por essa fonte, como mostra a figura 4.

Nos primeiros ensaios, a fonte de alimentação CA foi utilizada (S1 aberta e S2 fechada na figura 4) para alimentar a máquina supercondutora. Em seguida, a fonte foi substituída pelo inversor de frequência trifásico (S1 fechado e S2 aberto na figura 4) para alimentar a máquina, sendo que o restante da configuração permaneceu inalterado. Na fonte e no inversor de frequência foram ajustadas a frequência e a tensão, de modo a atingir a velocidade e o conjugado exigido pela carga. A frequência elétrica da máquina supercondutora também foi ajustada, em ambos os casos, em 40, 50 e 60 Hz. Todos os ensaios realizados seguiram o mesmo padrão descrito anteriormente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta as curvas de desempenho do motor de indução original em temperatura ambiente, as curvas de desempenho e curvas de conjugado por velocidade do motor de indução modificado (em temperatura ambiente e à 77K) e da máquina supercondutora alimentada com a fonte de alimentação CA. Desse último apresenta também os resultados referentes aos harmônicos gerados quando da alimentação com o inversor de frequência. Inicialmente o objetivo foi analisar o comportamento do motor de indução a 77 K e comparar com seu desempenho em temperatura ambiente, observando os prós e contras de resfriar o motor. Em seguida, o propósito foi comparar as características desse motor a 77 K com às da máquina supercondutora. E por fim, o intuito foi analisar o comportamento da máquina supercondutora considerando dois métodos de acionamento: partida direta (utilizando a fonte de alimentação CA) e partida suave (utilizando o inversor de frequência). Esses dois métodos apresentam características diferentes que afetam o comportamento da máquina supercondutora.

4.1 Motor de indução original à temperatura ambiente

O motor utilizado para os ensaios foi um 0,5 CV fabricado pela empresa WEG Weg (2022). Antes de qualquer modificação do motor de indução, foram realizados testes experimentais em temperatura ambiente para observar o

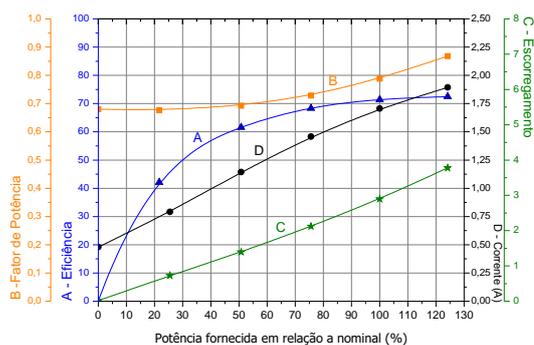


Figura 5. Curva de desempenho do motor de indução original em temperatura ambiente.

seu comportamento. Durante a apresentação das curvas de desempenho, os gráficos mostrarão curvas com os seguintes dados medidos: eficiência, fator de potência, corrente e escorregamento em função da potência de saída do motor de indução em condições sem carga e em situações de sobrecarga. A figura 5 mostra a curva de desempenho do motor de indução original. O motor apresentou resultados semelhantes aos testes realizados pelo fabricante.

Inicialmente, o motor é acelerado sem carga até quase a velocidade síncrona. Praticamente não há escorregamento e a potência de saída mecânica é zero. O fator de potência tem um valor pequeno e a corrente do estator apenas flui para compensar o atrito mecânico e a resistência dos enrolamentos. À medida que a carga mecânica foi aplicada no eixo, a potência de saída aumentou e, conseqüentemente, a eficiência também. Se a potência de saída cresce mais rápido que a de entrada, a eficiência aumenta até que as perdas aumentem mais rapidamente, e a eficiência atinge um patamar quase constante. Nesse caso, o fator de potência também aumenta porque a potência ativa aumenta mais que a reativa e, conseqüentemente, a corrente cresce, pois o ângulo do fator de potência diminui. Da mesma forma, à medida que a carga é incrementada, o escorregamento aumenta, pois é necessário mais esforço do rotor. Em carga nominal, o motor atinge seu rendimento máximo em torno de 72%, a corrente foi quase 2 A, o fator de potência foi 0,68 e o escorregamento 2,7%. O mesmo motor deve ser usado em ambos os testes para comparar de forma justa o desempenho da máquina em diferentes temperaturas. Para permitir o funcionamento da mesma máquina para uma variação de temperatura de quase 200 K, o motor de indução original precisou de alguns ajustes, como foi explicado anteriormente. Dentre as mudanças realizadas, a que teve maior impacto no desempenho do motor de indução foi o aumento do entreferro. O rotor gaiola de esquilo foi usinado e o entreferro passou de 0,1 mm para 1,0 mm, o que obviamente piorou as características do motor. Os resultados com o novo entreferro (motor de indução modificado) são apresentados nas seções a seguir.

4.2 Motor de indução modificado à temperatura ambiente (MI-TA)

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o motor modificado à temperatura ambiente. As novas curvas de desempenho do motor de indução após as modificações são apresentadas na figura 6.

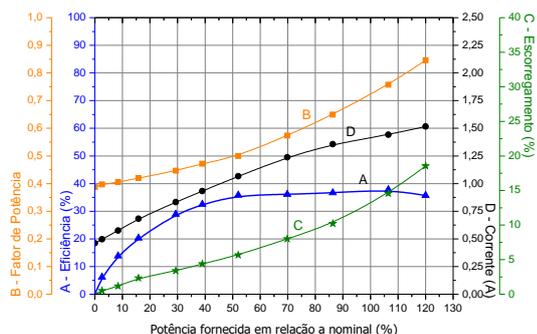


Figura 6. Curva de desempenho do motor de indução modificado em temperatura ambiente.

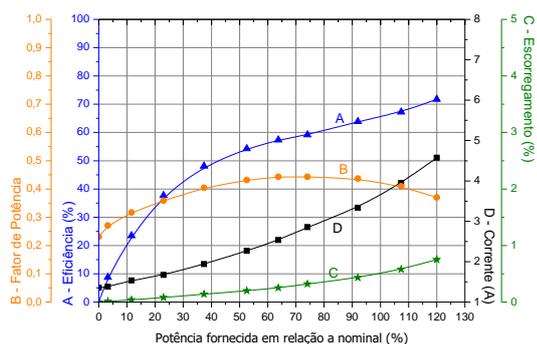


Figura 7. Curva de desempenho do motor de indução modificado em temperatura criogênica.

Como pode ser visto, o comportamento apresentado na figura 6 é quase o mesmo que o mostrado na figura 5, mas os valores são diferentes em todos os parâmetros. Em primeiro lugar, a potência nominal do motor de indução foi reduzida de 368 W para 150 W. O fator de potência e a corrente foram reduzidos em quase 15% e 10% em plena carga, respectivamente. O escorregamento foi bastante afetado, chegando a quase 20% em plena carga, o que é impensável para a maioria das aplicações, mas aceitável para os propósitos deste estudo. Em plena carga, a eficiência foi reduzida para quase 38%. Todas essas mudanças estão relacionadas ao maior entreferro, que causa maior dispersão de fluxo e conseqüentemente diminuição da tensão induzida no rotor. Apesar da baixa eficiência e alto escorregamento após as modificações, foi possível analisar o desempenho do motor de indução modificado e comparar esses resultados com os obtidos à temperatura criogênica, apresentados a seguir.

4.3 Motor de indução modificado à temperatura do nitrogênio líquido (MI-LN₂)

Esta seção apresenta os testes no motor de indução modificado imerso em nitrogênio líquido. O comportamento do motor de indução trifásico em função da potência de saída é mostrado na figura 7.

A nova potência nominal do motor de indução modificado em 77 K é de 286 W, quase o dobro do valor do mesmo motor em temperatura ambiente. Quando o motor está submerso em nitrogênio líquido, as resistências elétricas do estator e rotor diminuem, o que leva a uma maior corrente, conforme mostrado na figura 7. A magnitude da corrente atingida a plena carga é de 4,6 A, mais de duas vezes maior

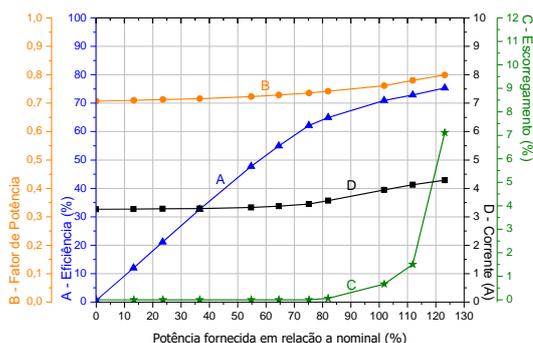


Figura 8. Curva de desempenho do motor supercondutor, cuja potência nominal é de 465 W.

que na temperatura ambiente. A tensão induzida no rotor aumenta, assim como o conjugado e, conseqüentemente, a potência de saída também aumenta, levando a uma maior eficiência do motor. O aumento da tensão induzida no rotor também explica a redução do escorregamento, pois o rotor possui mais potência eletromagnética. A seguir será apresentada todos os resultados da máquina supercondutora e eles são comparados com os do motor de indução modificado.

4.4 Máquina supercondutora de fluxo aprisionado (MS-HTS)

Esta seção apresenta os resultados dos testes com a máquina supercondutora. O objetivo é analisar o seu desempenho e comparar com o do motor de indução. Inicialmente o barramento que alimenta o motor CA foi configurado para operar como fonte de tensão, apresentando magnitude de tensão constante de 220 V (fase-fase) e frequência nominal de 60 Hz. A corrente pôde variar livremente, dependendo da carga no eixo do motor. As curvas de desempenho da máquina supercondutora são apresentadas na figura 8 e mostram informações relevantes sobre o funcionamento deste tipo de configuração. Este motor possui algumas características diferentes das do motor de indução, conforme será discutido a seguir.

Como pode ser observado, quando a carga está abaixo de 80% da potência nominal na máquina supercondutora, ela se comporta como síncrona, pois o escorregamento é nulo. Isso acontece porque o fluxo magnético fica preso nos centros de aprisionamento supercondutores. Quando a carga aumenta, a força de Lorentz nos fluxóides torna-se maior do que a força de fluxo aprisionado. O motor ainda fornece conjugado, mas altera o modo de operação apresentando algum escorregamento, que chegou a 6,4% a plena carga. Nessa situação, há alguma variação de fluxo no empilhamento supercondutor de acordo com seu laço de histerese. Na máquina supercondutora, à medida que a magnitude do campo girante aumenta, mais e mais camadas internas são penetradas pelo fluxo magnético até que todas estejam induzindo uma corrente elétrica. Portanto, requer um aumento considerável na corrente da armadura. Outro ponto está relacionado à compensação de fluxo devido ao pequeno espaço entre os três empilhamentos de fitas supercondutoras. Porém, a plena carga, a corrente no motor de indução atinge um valor maior, o que acontece para compensar a redução do fator de potência, ao contrário do que ocorre na máquina supercondutora. A eficiência da máquina supercondutora a plena carga foi

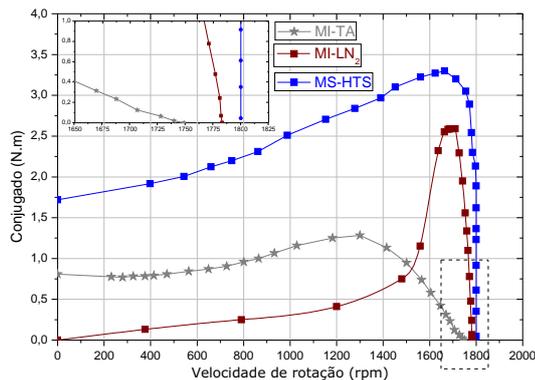


Figura 9. Curva de desempenho de conjugado por velocidade de ambas as máquinas: motor de indução à temperatura ambiente (preto), motor de indução à temperatura criogênica (verde) e máquina supercondutora à temperatura criogênica (laranja).

quase a mesma daquela medida com o motor de indução em nitrogênio líquido. Apesar de quase a mesma eficiência, a máquina supercondutora apresenta maior densidade de potência e conjugado.

4.5 Comparação dos resultados de conjugado por velocidade da máquina supercondutora e do motor de indução modificado em temperatura ambiente e a 77 K

As características de comportamento de conjugado de qualquer máquina são essenciais para entender como ela funciona. As curvas de desempenho do conjugado por velocidade de ambas as máquinas, alimentadas com a fonte de alimentação CA, são comparadas na figura 9.

Quando o motor modificado foi submerso em nitrogênio líquido, a resistividade das barras de alumínio da gaiola caiu, impactando diretamente no conjugado. A potência e o conjugado no MI-LN₂ a 77 K são quase o dobro do MI-TA. Isso significa que o resfriamento do motor de indução pode dobrar a densidade de potência. No entanto, a redução da resistência na gaiola de esquilo teve uma desvantagem, que foi a redução drástica no conjugado de partida. Isso significa que provavelmente esse tipo de motor precisaria ser acelerado sem carga. Se o motor for projetado para operar em temperatura criogênica, o projeto não precisaria aumentar o entreferro como feito com o protótipo aqui utilizado. Para grandes motores de indução, tendo alguns cuidados nos aspectos construtivos é possível obter resultados ainda melhores do que os apresentados no presente trabalho. O que permitiria aumentar a densidade de potência e fabricar motores com maior eficiência que as máquinas premium (IE4).

O conjugado máximo na frequência nominal do motor de indução (60 Hz) nas temperaturas ambiente e criogênica foi de aproximadamente 1,3 N.m e 2,6 N.m, respectivamente. O maior valor de conjugado na temperatura criogênica se deve à menor resistência elétrica do rotor, que se reflete em um menor escorregamento. Por outro lado, há uma maior região instável para o motor de indução operando em temperatura criogênica. Conforme observado na figura 9, a máquina supercondutora se comporta como uma máquina síncrona sob um conjugado limite e como assíncrona quando este nível é ultrapassado. O conjugado

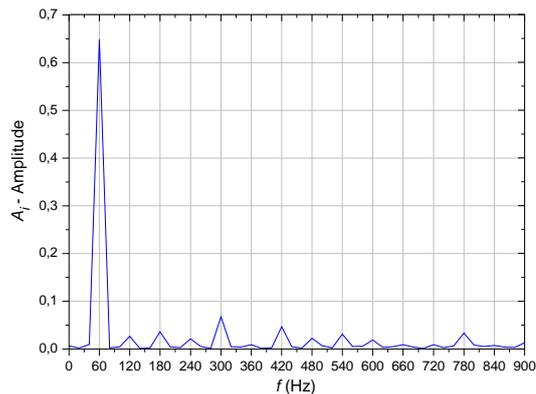


Figura 10. Espectro de frequência da tensão de alimentação.

máximo da máquina supercondutora ($f = 60$ Hz) é em torno de 3,3 N.m, valor superior ao do motor de indução refrigerado. Como o motor supercondutor apresenta uma região síncrona, o escorregamento é zero neste modo de operação. Para o caso da máquina estudada, o limite de conjugado para alterar o modo de operação ficou em torno de 80% do conjugado nominal. Sob este limite, o fluxo aprisionado gera força suficiente para evitar perdas nas fitas supercondutoras empilhadas resultando em operação síncrona. Acima desse limite, há perdas no material supercondutor. No entanto, a máquina ainda pode operar e fornecer o conjugado de carga, mas agora com algum escorregamento. A máquina supercondutora de fluxo aprisionado tem um conjugado máximo como a máquina de indução. A máquina supercondutora tem um conjugado de partida maior em comparação com o motor de indução refrigerado. Na região instável, o conjugado não diminui repentinamente como no motor de indução modificado em que a resistência na temperatura criogênica diminui devido à redução da temperatura. No caso da máquina supercondutora, também foi feito a análise do impacto dos harmônicos no seu comportamento quando alimentada com um inversor de frequência. Como o inversor de frequência é uma fonte chaveada, harmônicos são gerados deformando a forma de onda da tensão.

Esses harmônicos são responsáveis por perdas adicionais no rotor (ferro e supercondutor), que reduzem o conjugado da máquina. O espectro de frequência da tensão medida está representado na figura 10.

O espectro da tensão mostra a frequência fundamental em 60 Hz e as contribuições mais relevantes em 180, 300 e 420 Hz. A fundamental em 60 Hz tem a maior amplitude seguida pela 5ª e 7ª harmônicas. A distorção harmônica total (THD), dada pela equação (1), é de 53,85% indicando uma forte distorção da forma de onda da tensão.

$$THD = \sqrt{\sum_{i=2}^{+\infty} \left(\frac{A_i}{A_1}\right)^2}, \quad (1)$$

Em que A_1 é o valor RMS da componente fundamental e A_i são os valores RMS das componentes harmônicas. Com um THD tão grande, o impacto dos harmônicos não pode ser negligenciado, pois eles levam a perdas adicionais. Assim, além dos vórtices de corrente nas partes

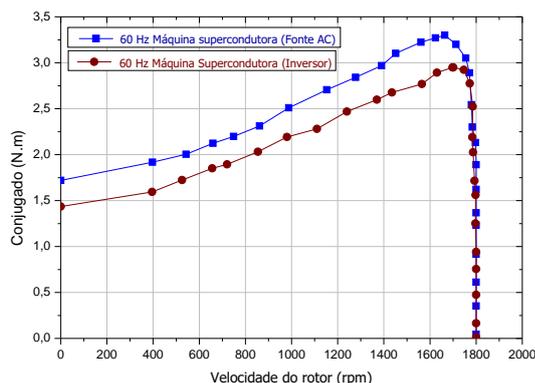


Figura 11. Comparação de torque com a máquina supercondutora acionada pelos dois métodos de partida.

metálicas e no núcleo magnético, também são esperadas perdas adicionais no supercondutor. Elas se originam da variação do campo magnético criado pela corrente CA nos enrolamentos do estator trifásico e são chamadas de perdas de magnetização. Essas perdas de magnetização (P_{mag}) podem ser expressas pela equação (2) Mawatari (1996), Grilli (2021).

$$P_{mag} = \left(\frac{\mu_0 f I_{c0}^2}{\pi \omega} \right) \times \left(\frac{L_y}{\pi \omega} \right)^2 \times \left(\frac{\pi H_0}{J_{c0} h} \right)^2 \times Q_H \quad (2)$$

com,

$$Q_H = \int_0^{H_m} (H_m - 2H_a) \times \ln \left(\frac{\sinh^2 \left(\frac{\pi \omega}{L_y} \right)}{1 + \cosh^2 (\mu_0 H_a)} \right) dH_a \quad (3)$$

Em que f é a frequência, I_{c0} é a corrente crítica em auto campo a 77 K (242 A), J_{c0} é a densidade de corrente crítica correspondente, dividindo I_{c0} pela seção transversal do supercondutor ($2,5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$), L_y é a periodicidade do empilhamento ($155 \mu\text{m}$), $2w$ é a largura da fita 2G HTS (12 mm) e h é a espessura da fita 2G HTS (0,105 mm). H_0 , H_m , H_a são: o campo característico, o campo magnético máximo (1 T) e o campo magnético aplicado, respectivamente. Aplicando a equação (2), as perdas de magnetização P_{mag} são 1,2 W/m para o harmônico de corrente fundamental e 18,3 W/m para a soma dos harmônicos das correntes restantes, mostrando um claro impacto dos harmônicos nas perdas (15 vezes maior devido aos harmônicos). Assim, houve uma diminuição do conjugado e da potência mecânica como será apresentado a seguir.

A curva de conjugado versus velocidade da máquina alimentada pelos dois métodos de partida, em 60 Hz, é apresentada na figura 11.

O motor supercondutor é assíncrono na partida e durante a sobrecarga, pois o conjugado eletromagnético (τ) gerado pelo fluxo aprisionado é menor que o contra conjugado proveniente da carga. O sistema não está em equilíbrio e as perdas aumentam à medida que mais potência é consumida pela máquina. No entanto, quando a máquina supercondutora é operada com carga nominal, o equilíbrio é alcançado e a máquina atinge o regime síncrono com perdas reduzidas. A figura 11 mostra como o conjugado evolui. Inicialmente, ele se comporta de maneira semelhante ao

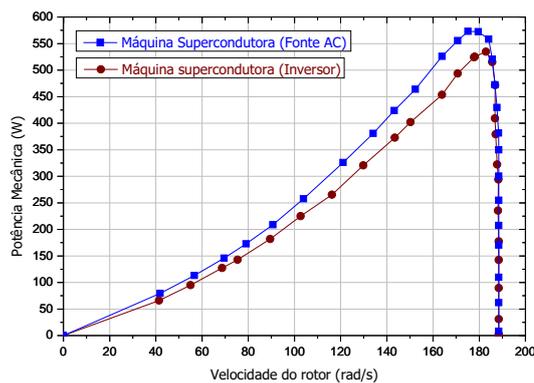


Figura 12. Potência mecânica na frequência nominal, em ambas as condições de acionamento, da máquina supercondutora.

esperado para um motor de indução convencional. No entanto, quando a máquina atinge o conjugado nominal, seu comportamento é bastante diferente, pois a máquina supercondutora atinge o sincronismo. O comportamento da máquina supercondutora é determinado principalmente pela reação magnética dos empilhamentos supercondutores à corrente do estator. O supercondutor tenta expelir o campo magnético externo criando laços de corrente induzida com magnitude em torno da corrente crítica que é dependente do campo, o que resulta em aprisionamento do fluxo magnético. À medida que mais ou menos carga é aplicada, a penetração da corrente no supercondutor muda afetando as perdas e, posteriormente, as características do próprio supercondutor até que um equilíbrio seja alcançado. É um fenômeno próprio do supercondutor que não está presente em um motor de indução convencional, o que explica a resposta peculiar da máquina supercondutora às mudanças de carga. A figura 12 mostra a potência mecânica em ambas as condições de acionamento. A potência mecânica (P_m) foi calculada a partir das características de conjugado por velocidade como $P_m = \tau \omega$, onde τ é o conjugado em Newton-metro e ω é a velocidade angular em radianos por segundo.

Como esperado, a potência fornecida ao eixo é ligeiramente menor em 7% para o caso de partida suave do que para o caso de partida direta. Se o conteúdo harmônico aumenta como na partida suave, as perdas aumentam e a potência não apenas fornece a carga, mas também perdas adicionais explicando assim essa discrepância, como mostra a figura 13.

Deve-se ressaltar que para a partida direta existe um pico inicial de corrente nos enrolamentos do estator convencional. Tal corrente de pico pode levar ao superaquecimento e danos nos enrolamentos. Mesmo que seja um problema para as máquinas na prática, isso não é abordado neste trabalho, pois toda a máquina supercondutora é submersa em nitrogênio líquido, resfriando o supercondutor e os enrolamentos convencionais.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo comparando a máquina supercondutora de fluxo aprisionado em empilhamentos de fita 2G HTS e um motor de indução convencional tipo gaiola de esquilo operando em temperatura

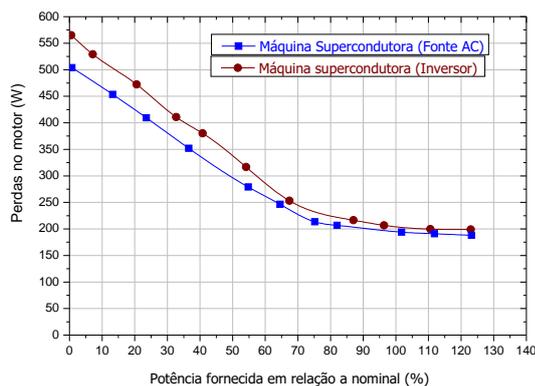


Figura 13. Perdas da máquina supercondutora acionada pela fonte de alimentação CA e pelo inversor de frequência.

ambiente e resfriado em nitrogênio líquido. Ambas as máquinas usaram o mesmo estator, e apenas o rotor foi substituído. Além disso, o entreferro foi o mesmo para ambos os rotores. Assim, permitindo uma comparação justa entre as máquinas testadas. A eficiência de ambas as máquinas foi quase a mesma em nitrogênio líquido. No entanto, o motor supercondutor pode melhorar a eficiência se uma fita com largura maior fosse usada. Corrente, escorregamento e conjugado são diferentes devido à forma como o rotor é magnetizado. Dependendo do conjugado de carga, a máquina supercondutora pode operar nos modos síncrono ou assíncrono. A máquina supercondutora se comporta em modo síncrono até 80% da carga nominal e, acima desse percentual, opera como uma máquina assíncrona. Este conceito de máquina supercondutora pode ser usado em aplicações que exigem baixo peso e conjugado mais alto. Os resultados indicaram que o resfriamento da máquina de indução poderia dobrar a potência nominal. A máquina supercondutora apresentou uma potência nominal elevada, quase três vezes maior que a máquina de indução à temperatura ambiente. Este resultado mostra o potencial deste tipo de máquina para aplicações onde são necessárias maiores densidades de potência. Também, foi analisado a relevância do método de acionamento no desempenho de máquinas supercondutoras para aplicações em sistemas embarcados como os encontrados em aeronaves elétricas, em propulsão naval e em energia eólica. Foi demonstrado que o acionamento suave da máquina supercondutora reduz o conjugado e, conseqüentemente, a potência mecânica do motor. Essa redução é impulsionada pela presença da grande quantidade de conteúdo harmônico na tensão de entrada. Para a partida direta, o conjugado e a potência mecânica são maiores. No entanto, o pico de corrente no estator pode ser um problema em aplicações reais, especialmente se a máquina supercondutora for completamente supercondutora (enrolamentos do estator e do rotor supercondutor). O próximo passo do estudo é a pré-magnetização dos empilhamentos supercondutores para operar a máquina supercondutora como gerador.

REFERÊNCIAS

K. Stautner, S. Kalsi, T. Arndt, et al. (2017) High power density superconducting rotating machines - development status and technology roadmap. *Superconductor*

- Science and Technology*, volume 30, número 12. Doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa833e>.
- G. Snitchler, B. Gamble, C. King e P. Winn (2011) 10 MW Class Superconductor Wind Turbine Generators. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, volume 21, número 3. Doi: 10.1109/TASC.2010.2100341
- X. Wiezoreck, C. Bühner, A. Mølgaard e et al. (2015) Commissioning of the World's First Full scale MW-class Superconducting Generator on a Direct Drive Wind Turbine. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, volume 35, número 3. Doi: 10.1109/TASC.2010.2100341
- M. Armstrong (2015) Superconducting Turboelectric Distributed Aircraft Propulsion. *Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic*.
- L. Bowman, et al. (2018) Turbo- and Hybrid-Electrified Aircraft Propulsion for Commercial Transport. *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*.
- J. Masson, et al. (2018) HTS machines as enabling technology for all-electric airborne vehicles," *Superconductor Science and Technology*. *Superconductor Science and Technology*, volume 20, número 8. Doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/8/005>.
- J. C. Martins, et al. (2019) Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, volume 104.
- A. Patel, B. Glowacki, et al. (2015) Pulsed-Field magnetization of superconducting tape stacks for motor applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, volume 25, número 3. Doi: 10.1109/TASC.2015.2389142.
- A. Patel, B. Glowacki, et al. (2013) Trapped fields up to 2 T in a 12 mm square stack of commercial superconducting tape using pulsed field magnetization. *Superconductor Science and Technology*, volume 26, número 3. Doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/3/032001>.
- M. Baghdadi, H. Ruiz, et al. (2014) Design Study of 2-MW Fully Superconducting Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, volume 28, número 3. Doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2372873>.
- G. Sotelo, F. Sass, M. Lopez e X. Granados (2018) Proposal of a Novel Design for Linear Superconducting Motor Using 2G Tape Stacks. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, volume 65, número 9. Doi: 10.1109/TIE.2018.2793252.
- F. J. M. Dias, B. M. Santos, G. Sotelo e R. de Andrade Jr. (2019) Development of a superconducting machine with stacks of second generation HTS tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, volume 29, número 5. Doi: 10.1109/TASC.2019.2898252
- Weg [online] (2022) <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/en/Electromotors/c/BRMT>. Acesso em 10 de fevereiro de 2022,.
- F. Grilli (2021) Alternating current loss of superconductors applied to superconducting electrical machines. *Energies*, volume 14, número 1. Doi: <https://doi.org/10.3390/en14082234>
- Y. Mawatari (1996) Critical state of periodically arranged superconducting strip lines in perpendicular fields. *Phys. Rev. B*, volume 54, número 1. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.13215>