

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
CRISTHIAN NASCIMENTO

UTILIZAÇÃO DE SUPERCONDUTORES EM MÁQUINAS E MOTORES:
aplicação e viabilidade

Varginha
2016

CRISTHIAN NASCIMENTO

**UTILIZAÇÃO DE SUPERCONDUTORES EM MÁQUINAS E MOTORES:
aplicação e viabilidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Thiago Cornélio da Fonseca.

**Varginha
2016**

CRISTHIAN NASCIMENTO

**UTILIZAÇÃO DE SUPERCONDUTORES EM MÁQUINAS E MOTORES:
aplicação e viabilidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Obs.:

Dedico este trabalho a meus pais, que sempre deram total apoio à minha formação.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar a utilização dos supercondutores em máquinas e motores elétricos. A utilização desta tecnologia diminui significativamente as perdas elétricas na condução de energia e o sistema tem ganhos em eficiência, são mais estáveis, compactos e leves. Por outro lado, este material está associado a sistemas de criogenia (sistemas de refrigeração), o que eleva o custo total e consome uma parte da potência para possibilitar a circulação do fluido de refrigeração. Será analisada a viabilidade econômica da utilização desta tecnologia, levando em consideração as condições de infraestrutura do local de instalação e o aumento da eficiência energética comparado aos custos deste sistema. Para isto, será realizado um estudo de como colocar um condutor no estado de supercondutor, quais os materiais utilizados e a temperatura necessária para cada situação, bem como um histórico da descoberta destes materiais. Serão vistas as melhores situações de utilização dos motores e máquinas supercondutores e também a apresentação de suas características. A partir destas informações, será mostrado que essa tecnologia aumenta a qualidade e preço desses equipamentos, e em aplicações específicas pode se tornar uma ótima alternativa. No momento a tecnologia está se desenvolvendo principalmente no segmento de energia eólica.

Palavras-chave: Supercondutores. Eficiência energética. Perdas elétricas. Sistemas criogênicos. Motores. Máquinas.

ABSTRACT

This term paper intends to introduce the use of the superconductor on electric machines and motors. The use of this technology significantly reduces the electrical losses on the energy conduction and the system has efficiency gains and are more stable, compact and light. On the other side, this material is associated to cryogenic systems (refrigeration systems), which raises the total cost and consumes a part of the power to allow the flow of the refrigeration fluid. It is going to be analyzed the economic viability of this technology use, taking into consideration the local infrastructure conditions of installation and the increase of the energy efficiency compared to the costs of the system. For this, it is going to be studied how to put the conductor in the superconductor state, what are the utilized materials, as well as a historic of these material discovery. It's going to be seen the best situations of the use of superconductor motors and machines and the presentation of its characteristics. From these information, it's going to be shown that this technology raises these equipment quality and price, and in specific applications it may turn into a great alternative. In the moment the technology is being developed mostly on the wind power segment.

Keywords: *Superconductor. Energy efficiency. Electrical losses. Cryogenic systems. Viability. Motors. Machines.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	07
2 OS SUPERCONDUTORES	09
3 APLICAÇÕES DOS SUPERCONDUTORES	11
3.1 Linhas de transmissão	11
3.2 Armazenamento de energia	12
4 MÁQUINAS SUPERCONDUTORAS	14
4.1 Máquinas supercondutoras	14
4.1.1 Máquinas supercondutoras de baixa temperatura crítica.....	14
4.1.2 Máquinas supercondutoras de alta temperatura crítica.....	15
4.2 Características e aplicações	17
5 ESTUDO DE VIABILIDADE	26
6 CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A forma de produção de motores e geradores elétricos com condutores convencionais está solidamente enraizada na indústria, o que torna a busca por alternativas de máquinas melhores um grande desafio. A tecnologia supercondutora permite a utilização da energia elétrica de forma mais eficiente, e já foram realizados estudos em diversas aplicações, tais como linhas de transmissão, sistemas de armazenamento de energia, transformadores e máquinas. Porém, como há diversos obstáculos na implementação desta tecnologia, foram feitas aplicações reais limitadas a sistemas de grande porte. Alguns exemplos são a linha de transmissão em *Long Island*, nos EUA, o sistema de armazenamento de energia que foi construído para melhorar a qualidade de distribuição no estado de *Wisconsin*, além de motores e geradores que foram entregues à Marinha norte americana.

O maior desafio desta tecnologia está no resfriamento dos condutores. Já existem indícios de pesquisa desde o início do século XX, porém a temperatura necessária para transformar o material em supercondutor era extremamente baixa. No entanto, este assunto nunca deixou de ser pesquisado e, em 1986, houve a descoberta de uma nova possibilidade: os supercondutores de alta temperatura crítica. Essa descoberta ocasionou um forte impacto nos estudos da tecnologia, uma vez que a partir daí seria possível obter o estado supercondutor com temperaturas de 30 K, sendo que antigamente era necessária a temperatura de aproximadamente 4 K. A partir desta descoberta, diversos materiais foram estudados e já foi possível atingir temperaturas críticas de até 134 K. Estes avanços possuem grande relevância, uma vez que possibilitaram novas formas de refrigeração, tornando possível a utilização de nitrogênio líquido ao invés de hélio, por exemplo.

Os motores e geradores elétricos supercondutores ainda não foram difundidos para aplicação em larga escala, os que já foram construídos foram fornecidos para utilização em áreas específicas, principalmente na utilização naval. A construção de máquinas com supercondutores resulta em uma máquina mais eficiente e de menor tamanho e peso, além de maior estabilidade, maior capacidade de sobrecarga e menor reatância síncrona. Como essas máquinas são mais leves, ao se utilizar essa tecnologia em geradores, é necessário menor torque para gerar energia, o que diminui também as máquinas de acionamento. Somando-se a diminuição do tamanho e peso do gerador à diminuição do tamanho e peso do motor que o aciona, tem-se uma redução significativa no volume ocupado por essas máquinas, além da diminuição na emissão de poluentes, diminuição de ruídos e ganhos em eficiência.

A utilização dos supercondutores na produção de energia eólica é uma grande

promessa, que está prestes a se tornar o pivô do desenvolvimento desta tecnologia, já que este tipo de aerogerador está para ser lançado. A diminuição do peso e volume nessas máquinas pode reduzir consideravelmente o esforço mecânico causado na base de sustentação, o que permite o desenvolvimento de máquinas mais potentes para a produção de uma energia limpa e renovável.

A competição global com máquinas convencionais ainda está fora das expectativas, uma vez que o custo de instalação e manutenção dos sistemas criogênicos é alto, porém em aplicações específicas esta tecnologia já pode se tornar uma realidade, o que pode abrir caminho para maiores estudos e alavancar o seu desenvolvimento.

2 OS SUPERCONDUTORES

Desde o século XIX, já existiam teorias relacionando a resistividade dos condutores com a temperatura. Em 1908, Heike Kamerlingh Onnes começou a realizar experiências com os condutores utilizando hélio líquido para a refrigeração, obtendo temperaturas próximas a 4 K. Ele conseguiu observar o efeito da supercondutividade alguns anos após o início das experiências.

O fenômeno da supercondutividade foi observado pela primeira vez em 1911, em Leiden, na Holanda, por Heike Kamerling Onnes. Três anos antes, a equipe por ele liderada havia obtido a liquefação do gás hélio, que ocorre a 4,2 K (268,8 °C). Baseado nesta proeza tecnológica, Onnes dedicou-se ao estudo das propriedades elétricas dos metais em temperaturas muito baixas, empregando o hélio líquido como refrigerante. (OSTERMANN, 2005, p. 3).

Quando a experiência foi realizada utilizando condutores de mercúrio, foi verificado que a resistência elétrica tendia a zero quando sua temperatura era inferior a 4,2 K. A partir deste ponto o material passou a ser denominado de supercondutor e essa temperatura foi denominada de temperatura crítica. Foi observado também que quando os supercondutores estavam sob influência de um campo magnético, eles voltavam a seu estado normal, determinando-se assim um valor de campo magnético crítico. É importante ressaltar que somente as perdas por efeito Joule são minimizadas, sendo assim, as perdas reativas não deixam de existir nos supercondutores.

No ano de 1957 os cientistas Bardeen, Cooper e Schrieffer propuseram a teoria BCS, que explica o fenômeno da supercondutividade, em que os elétrons se agrupam em pares denominados pares de Cooper. Neste fenômeno, os elétrons mantêm-se unidos e oferecem maior resistência ao sofrerem colisões com os átomos do condutor, ignorando parte da resistência e diminuindo as perdas por efeito Joule. Esta teoria completou a teoria de Heike e, em 1986 foi descoberta uma nova classe deste material por Bednorz e Müller: os supercondutores de alta temperatura. Estes apresentaram supercondutividade a 30 K em um condutor composto de óxido de cobre com bário e lantânio, e em 1987 Paul Chu apresentou o supercondutor de fórmula $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, que possui a temperatura crítica de 90 K.

Atualmente, a maior temperatura crítica alcançada é de um composto de óxido de mercúrio, bário, cálcio e cobre, que se torna supercondutor a partir de 134 K.

A questão econômica e a necessidade de refrigeração baseada em hélio tornaram-se fatores que dificultavam o uso deste desta tecnologia, entretanto, com o surgimento da

supercondutividade de alta temperatura, os custos de refrigeração foram reduzidos, viabilizando o uso do nitrogênio em detrimento da anterior necessidade de uso do hélio. O nitrogênio líquido é mais fácil de obter e possui menor custo por ser abundante na atmosfera. Isto alavancou a construção de diversos protótipos desta tecnologia em equipamentos de potência, tais como geradores, motores, linhas de transmissão e transformadores, além de aceleradores de partícula e equipamentos de ressonância magnética.

Cabos supercondutores já foram projetados para linhas de transmissão e distribuição, estes são constituídos por fios supercondutores, material de isolamento térmica, capa protetora, blindagem elétrica, um espaço destinado ao fluido de refrigeração e um núcleo, responsável pela rigidez mecânica.

Os supercondutores de alta temperatura mais utilizados são o $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Y-123 ou YBCO – Óxido de Ítrio-Bário-Cobre), o $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ e o $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2212 e Bi-2213, respectivamente, ou BSCCO – Óxido de Bismuto-Estrôncio-Cálcio-Cobre). Esses materiais possuem temperatura crítica acima de 77 K e podem ser resfriados com nitrogênio líquido.

3 APLICAÇÕES DOS SUPERCONDUTORES

É possível utilizar a tecnologia dos supercondutores em diversas situações, tais como aceleradores de partícula, linhas de transmissão, trens bala, além de máquinas e motores elétricos. Neste capítulo abordaremos duas situações em que ele pode ser utilizado: linhas de transmissão e sistemas de armazenamento de energia.

3.1 Linhas de transmissão

O Brasil é um país que apresenta perdas muito superiores no transporte de energia elétrica, quando comparado a outros países da América do Sul. “Enquanto o Brasil teve uma perda de 20,28% na distribuição no sistema elétrico (perdas técnicas + comerciais), outros países apresentam perdas muito menores: Chile 5,6%, Colômbia 11,5%, Peru 9,3% e Argentina 9,9%.” (REY, 2012, p. 43).

Sendo assim, muitas vezes é necessária a construção de novas usinas geradoras para suprir a demanda de energia, o que pode acarretar em significativos impactos socioambientais e altos investimentos de recursos públicos. Uma modificação desta estratégia de construir novas usinas de geração ao invés de investir na eficiência energética no Brasil é uma situação que deve ser colocada em pauta.

Inicialmente, nas linhas de transmissão eram utilizados condutores de cobre, porém atualmente elas são construídas com condutores de alumínio por apresentarem menor custo. Como os condutores de alumínio apresentam baixa resistência mecânica, é necessária a utilização de um fio de aço de alta resistência colocado no centro dos condutores.

Projetos de sistemas elétricos com supercondutores estão sendo demonstrados pelo mundo, os principais estão no EUA, Japão e Dinamarca. Em abril de 2008 foi colocado em operação o primeiro sistema de linha de transmissão utilizando supercondutores de alta temperatura com tensão nominal de 138 kV em *Long Island*, através de uma parceria entre a concessionária de energia local (LIPA) e a *American Superconductor* (AMSC). O sistema de criogenia é baseado em nitrogênio líquido, fornecido pelo *Air Liquide*, os cabos foram montados pela Nexans, com fios fornecidos pela AMSC. O sistema transporta uma potência de 574 MW com corrente de 2400 A por fase. A Figura 1 mostra essa linha de transmissão:

Figura 1 - Linha de transmissão utilizando supercondutores em *Long Island*, EUA.



Fonte: (GIROUARD, 2015).

Os supercondutores de alta temperatura podem ser uma ótima opção à utilização dos cabos convencionais, uma vez que oferecem resistência elétrica próxima a zero e podem transportar até 5 vezes mais energia elétrica do que os condutores atuais, então é possível reduzir consideravelmente o volume e o peso dos condutores para se transportar o mesmo volume de energia ou até mesmo diminuir o nível de tensão no seu transporte, já que a elevação da tensão é feita para diminuir perdas. O maior desafio para a construção de mais linhas de transmissão com supercondutores é o custo elevado, pode-se observar isto através do exemplo citado, em que o custo total foi de 60 milhões de dólares para uma rede com apenas 610 metros de extensão.

3.2 Armazenamento de energia

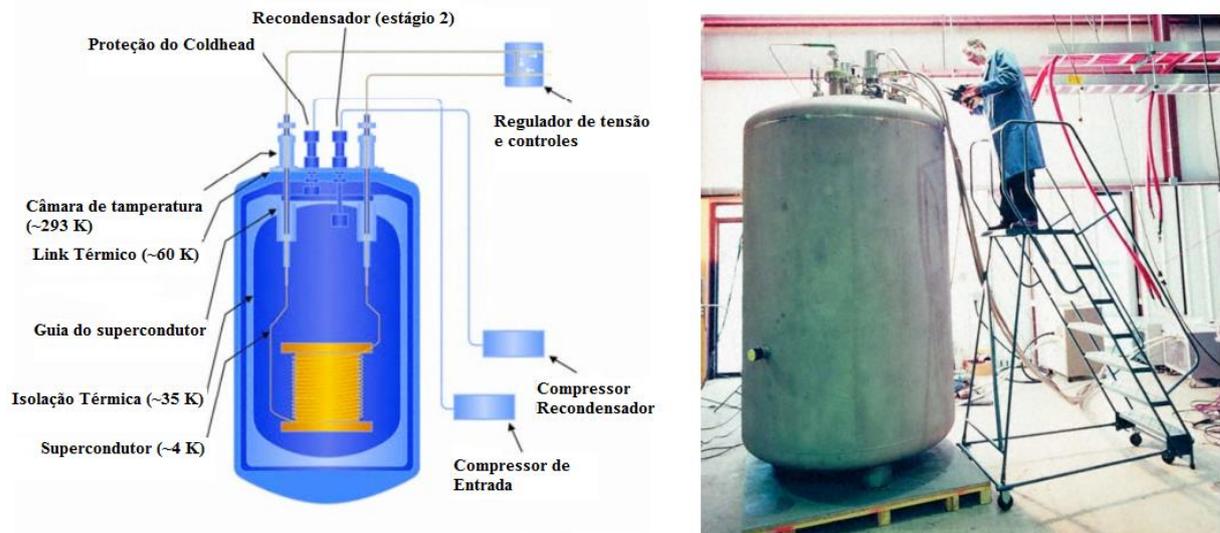
Os supercondutores podem ter a sua utilização expandida para armazenamento de energia através de um campo magnético com corrente contínua.

Este sistema já foi construído no estado norte-americano de *Wisconsin* para melhorar a estabilidade do sistema de transmissão local, devido à atuação de uma fábrica de papel que sujeitava o sistema a grandes variações de tensão.

O sistema é chamado de SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*), e é composto por uma bobina supercondutora, um sistema de condicionamento de energia

(retificador-inversor) e o sistema de criogenia. Como as perdas resistivas são mínimas quando o sistema está refrigerado, ao se aplicar energia nas bobinas ocorre o seu armazenamento. Esta forma de armazenamento é muito mais dinâmica e rápida do que sistemas baseados em bombeamento de água, uma vez que a energia é disponibilizada quase instantaneamente. A Figura 2 mostra os principais componentes de um SMES de pequeno porte.

Figura 2: Desenho esquemático de um SMES seguido de uma imagem real.



Fonte: adaptado de TIXADOR (2011, p. 48).

Os Sistemas SMES atraíram a atenção em utilizações elétricas e militares, devido à sua rápida resposta e alta eficiência (carga e descarga com rendimento em cerca de 95%). Aplicações possíveis incluem equilíbrio de carga, estabilidade dinâmica, estabilidade transitória, estabilização de tensão, regulação de frequência, melhora na capacidade de transmissão e aumento da qualidade de energia. (RIBEIRO, 2001, p. 1745, tradução nossa).

Esse sistema pode melhorar muito a qualidade de energia, seja na instalação de SMES próximo a grandes consumidores que podem causar distúrbios elétricos, como na instalação em locais estratégicos que permitam realimentar o sistema elétrico em casos de interrupção, porém ainda são caros quando comparados a outros sistemas de armazenamento.

4 MÁQUINAS E MOTORES SUPERCONDUTORES

A tecnologia supercondutora já vem sendo utilizada há algum tempo para realização de testes e em algumas aplicações reais em motores e máquinas. Será apresentado um histórico geral destes experimentos e depois as características e possíveis aplicações.

4.1 Histórico

Para realizar o histórico, será mostrada a utilização dos supercondutores de baixa e de alta temperatura crítica nas máquinas e motores.

4.1.1 Máquinas supercondutoras de baixa temperatura crítica

Os primeiros indícios de pesquisa da utilização de supercondutores em máquinas elétricas são de Robert J. Smith, em 1962, nos quais ele estudava a transferência de calor em um rotor de enrolamentos supercondutores. Os primeiros projetos estão no livro *IEEE Transactions on Aerospace*, de 1964 e os primeiros protótipos datam de 1966, na Inglaterra. Os primeiros protótipos foram máquinas homopolares, para que essas máquinas fiquem submetidas a um campo axial e quase nenhum campo transversal, que podiam causar interferências e tirar o foco do desenvolvimento dos sistemas criogênicos. Também em 1966, geradores com supercondutores de 8 kVA foram desenvolvidos nos EUA, e em 1967 houve uma tentativa de desenvolvimento de uma máquina de 50 kW totalmente supercondutora, porém essas apresentaram altas perdas em CA nos enrolamentos de armadura. Outros indícios dessas pesquisas são da Rússia, com máquinas de 100 kVA, e da Alemanha Oriental, com máquinas de 21 kVA, em 1972; além de máquinas de 30 kVA no Japão em 1973.

Até o ano de 1986, os supercondutores de alta temperatura ainda não haviam sido descobertos, então os supercondutores utilizados eram o NbTi (Nióbio-Titânio) e o Nb₃Sn (Nióbio-Estanho). Em 1973 foi concluído o primeiro protótipo de um gerador de alta rotação com bobinas de campo supercondutoras de cerca de 5 MVA pela *Westinghouse*. Este utilizava o supercondutor NbTi, operava em uma tensão de 5 kV e a uma rotação de 12000 rpm, com o refrigerador LHe (Hélio líquido), de aproximadamente 4K. Em 1979, foi construído um protótipo de gerador de 20 MW e 3600 rpm pela *General Electric*.

A construção dessa máquina foi um sucesso, e permitiu vários testes em diferentes condições de carga, além de uma ampla aprendizagem das técnicas envolvidas e desempenhos elétrico, mecânico e térmico, além de ser a mais potente dessa época. (MARTINS, 2014, p. 24).

Após estas aplicações, os projetos nessa área só voltaram a ser realizados em 1988, devido a uma forte crise econômica na década de 1980. Em 1999 foi concluído o Super-GM japonês fabricado pela NEDO, iniciado em 1988 e bateu todos os recordes mundiais para este tipo de máquina, gerando 79 MW de potência e conseguindo o maior tempo de operação contínua – 1500 h. Essa máquina possuía três tipos de rotores diferentes, uma rotação de 3600 rpm e foi o primeiro a ser conectado a uma rede de alta tensão.

4.1.2 Máquinas supercondutoras de alta temperatura crítica

Os supercondutores de alta temperatura crítica foram descobertos em 1986, estes entravam no estado de supercondutores com temperaturas de 30 K e 77 K. Essa nova possibilidade de refrigeração trouxe novamente atenção aos estudos de máquinas supercondutoras. Os materiais utilizados eram YBCO e BSCCO.

A possibilidade de se conseguir supercondutividade sem usar o dispendioso hélio líquido somado aos avanços em sistemas de refrigeração, trouxe uma nova perspectiva para as máquinas supercondutoras ganharem espaço após a recessão. (MARTINS, 2014, p. 25).

No ano de 1996 foi construído um motor de 150 kW e no ano de 2000 foi construído um de 750 kW, ambos criados pela *Reliance Electric* e *Rockwell Automation*. Estes funcionavam com 4 pólos a 60 Hz, com enrolamentos de campo de fitas BSCCO fabricadas pela AMSC. A partir daí, grandes projetos foram realizados pela AMSC, tais como um motor de 3,7 MW a 1800 rpm em 2001, um motor de 5 MW a 230 rpm para aplicações navais em conjunto com a Alstom, que foi entregue para a Marinha dos EUA em 2003 e um motor de 36,5 MW também utilizado para propulsão naval entregue à Marinha norte americana em 2009. Além destes motores, foi criado também um compensador síncrono em 2004 com capacidade de 10 MVAR, o SuperVar, demonstrado na Figura 3:

Figura 3: Compensador Síncrono SuperVar.



Fonte: adaptado de KALSI (2010, p. 45).

No mercado de geradores, os supercondutores de alta temperatura crítica foram estudados na década de 90 pela *General Electric*, sendo que em 2002 foi iniciado um projeto de um gerador comercial de 100 MVA. Neste projeto, eram utilizados rotores de núcleo ferromagnético não refrigerado em conjunto com as fitas supercondutoras. Desta forma, as forças impostas aplicadas diretamente sobre os condutores foram diminuídas e a quantidade de condutor necessário foi minimizada, melhorando aspectos de custo e de projeto. Como este projeto estava sendo realizado para a utilização em grandes usinas, ao invés de utilizarem núcleos não magnéticos, eles voltaram a utilizar o estator ferromagnético convencional, uma vez que para esta aplicação é mais vantajoso se obter uma máquina com maior vida útil a uma máquina que ocupa menor espaço e tem menor peso. Após vários estudos, o projeto do gerador de 100 MVA foi abandonado, devido à incerteza na viabilidade econômica da tecnologia. O principal motivo foi que o preço das fitas supercondutoras, do sistema de refrigeração e da estrutura mecânica das bobinas foram maiores do que o esperado.

Paralelamente a este projeto, um protótipo de 1,5 MW foi construído para análises no tipo de rotor, desempenho das bobinas e dos sistemas de refrigeração. Neste gerador, o estator foi aproveitado de um motor de indução de 2000 HP, sendo substituído o rotor tipo gaiola pelo rotor supercondutor.

Em 1999, a Siemens iniciou suas pesquisas no ramo, lançando uma máquina que utiliza núcleo ferromagnético frio embutido no criostato rotatório junto com as bobinas supercondutoras. O estator é de bobinas de cobre com núcleo não metálico e tinha resfriamento a 25 K por gás Neon. A partir deste protótipo de 400 kW, foi iniciado um projeto

de 4 MVA em 2002 para aplicações navais. Este projeto utilizou de bobinas de fitas BSCCO com o mesmo sistema de resfriamento, com algumas otimizações.

Dentre os resultados dos testes convencionais, ressalta-se que a eficiência desse gerador foi de 98,4%, cerca de 2% superior a de um convencional dessa faixa de potência e já embutido o custo energético da refrigeração, além de redução significativa de ruídos e vibrações. (MARTINS, 2014, p. 27).

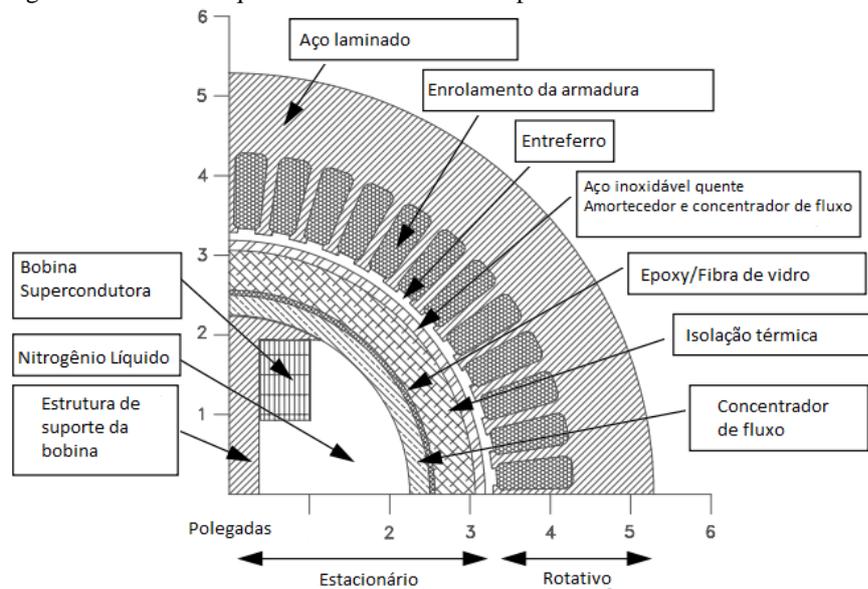
Em 2005, foi desenvolvido um motor axial de 12,5 kW por um grupo envolvendo a multinacional IHI e a Sumitomo, com fitas de BSCCO no enrolamento de campo estático. Este motor foi um dos primeiros arrefecido a nitrogênio líquido no mundo. Outro motor foi desenvolvido na Universidade de Kyoto em 2006, com gaiola feita de fitas BSCCO arrefecido a nitrogênio com rotor convencional. Este motor apresentou altíssimo torque de partida e de velocidade sub-síncrona, graças às correntes presentes na gaiola supercondutora. No mesmo ano, um terceiro grupo desenvolveu um motor com enrolamento de campo de Fitas supercondutoras arrefecido com Hélio a 20 K. Este usava a geometria radial, com o criostato em formato cilíndrico vazado com as bobinas de YBCO e núcleo de ferro a frio, e rotor com alimentação trifásica, escovas e núcleo de ferro. Comparado aos convencionais, este protótipo não apresentou maior eficiência, o que corroborou para a hipótese de que bobinas supercondutoras em núcleos de ferro para máquinas com densidade de energia equivalente às convencionais não valem a pena.

4.2 Características e aplicações

Com a utilização de supercondutores em motores ao invés dos enrolamentos convencionais, é possível fabricar máquinas com mais eficiência e de menor tamanho e peso. Além dessas vantagens, esses motores são mais estáveis, possuem mais capacidade de sobrecarga e menor reatância síncrona.

Em 1997, a *Reliance Electric Company* em conjunto com a *Rockwell Automation* fabricou um motor de 2 HP síncrono para o *Electric Power Research Institute*. Neste estudo, foi disponibilizado o esquema de montagem, conforme Figura 4:

Figura 4: Desenho esquemático de um motor supercondutor.



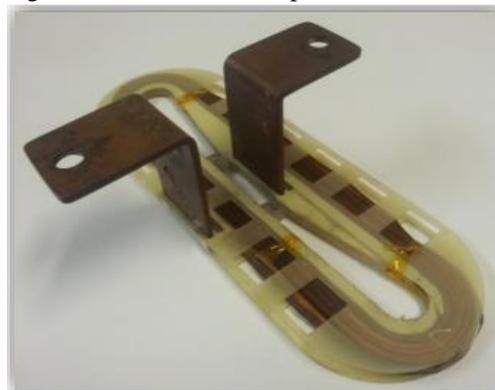
Fonte: Adaptado de SCHIFERL (1997, p. 3-3).

Neste motor a parte estacionária localiza-se no núcleo do motor enquanto a rotativa está na parte mais externa para facilitar a montagem do sistema de criogenia.

Atualmente é mais comum a utilização de máquinas com enrolamento de campo feito de bobinas de fitas supercondutoras. A opção de se utilizar fitas supercondutoras foi estimulada devido à grande homogeneidade que se pode conseguir com esta forma de produção quando comparados à utilização de fios supercondutores ou blocos maciços. Como o material é feito em filamentos ou camadas micrométricas, além da maior homogeneidade, as capacidades do material são aprimoradas e há maior flexibilidade mecânica, podendo o material ser manuseado de forma similar aos convencionais.

A Figura 5 mostra um exemplo de bobina supercondutora construída com fitas para a realização de testes:

Figura 5: Bobina de fita supercondutora



Fonte: (MARTINS, 2014, p. 48).

As perdas elétricas nos motores podem ser classificadas em fixas e variáveis, sendo que a primeira não depende do carregamento do motor e a segunda depende. Entre as perdas fixas, temos as perdas no ferro e as perdas mecânicas. As perdas no ferro são aquelas por histerese e correntes parasitas que ocorrem no núcleo, e representam de 15 a 25% das perdas totais de um motor. Este valor depende da frequência da rede, da densidade do campo (que é mais denso quando a quantidade de ferro é menor), da qualidade do aço, da espessura e isolamento das chapas. As perdas mecânicas são provocadas por atrito nos mancais e ventilação e podem corresponder de 5 a 15%.

As perdas variáveis são as perdas no estator e no rotor por efeito joule, e as perdas suplementares. As perdas no estator representam de 25 a 40% das perdas e dependem da bitola dos condutores e do comprimento das bobinas. As perdas no rotor dependem do material, seção e comprimento das barras e equivalem de 15 a 25% das perdas totais no motor. As perdas suplementares ocorrem devido a imperfeições na distribuição dos fluxos magnéticos e de corrente e podem ser reduzidas com um bom projeto do motor, e equivalem de 10 a 20% das perdas totais.

A principal parcela de perdas eliminada pelo uso de motores supercondutores é aquela advinda do efeito Joule. Porém, pode-se observar que também há redução em outras categorias, inclusive devido a seu menor volume, menor uso de ferro e redução de atrito. (AGUIAR JUNIOR, 2012, p. 84).

Como as reatâncias síncronas são menores e a resistência elétrica é mínima em supercondutores, é possível observar o aumento da eficiência através da Equação 1, que calcula a corrente na armadura:

$$I_a = \frac{\dot{V}_f - \dot{E}_{gf}}{R_a + jX_{sa}} = \frac{E_r}{Z_f} \quad (1)$$

Onde:

I_a é a corrente de armadura por fase drenada pelo motor (Ampéres)

V_f é a tensão de fase aplicada à armadura do estator (Volts)

E_{gf} é a tensão gerada por fase (Volts)

E_r é a diferença fasorial entre a tensão aplicada na armadura e a tensão gerada por fase (Volts)

Z_f é a impedância do motor síncrono por fase (Ω)

R_a é a resistência efetiva da armadura por fase (Ω)

X_{sa} é a reatância síncrona da armadura por fase (Ω)

A semelhança entre a equação acima e a equação genérica do motor deve ser levada em conta. Entretanto deve-se dizer que a corrente de armadura solicitada por um motor síncrono CA é limitada por sua impedância e sua (contra) fem gerada, quase que da mesma forma como a corrente solicitada por um motor CC é limitada por sua resistência e sua fem. (KOSOW, 1982, p. 239).

Os campos magnéticos fornecidos pelos supercondutores são capazes de conduzir correntes muito mais altas sem dissipar calor, o que resulta em campos magnéticos muito mais intensos quando comparados aos condutores de cobre, em que as capacidades de condução são limitadas pelo efeito Joule. Isso aumenta a capacidade de potência e sobrecarga nesta máquina sem necessidade de aumentar o número de espiras ou aumentar a energia fornecida para que se tenha uma força magnetomotriz superior, conforme Equação 2.

$$F_{mm} = N \cdot I \quad (2)$$

Onde:

F_{mm} é a força magnetomotriz (Ae – Ampére-espira)

N é o número de enrolamentos da bobina

I é a corrente que circula pela bobina (Ampéres)

A partir da força magnetomotriz, obtém-se a intensidade do campo polar necessário para produzir torque através da Equação 3:

$$\phi = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot F_{mm}}{R} \quad (3)$$

Onde:

ϕ é a intensidade do campo polar requerido para produzir torque (Wb - Weber)

R é a relutância do circuito (Ae/Wb – Ampére-espira por Weber)

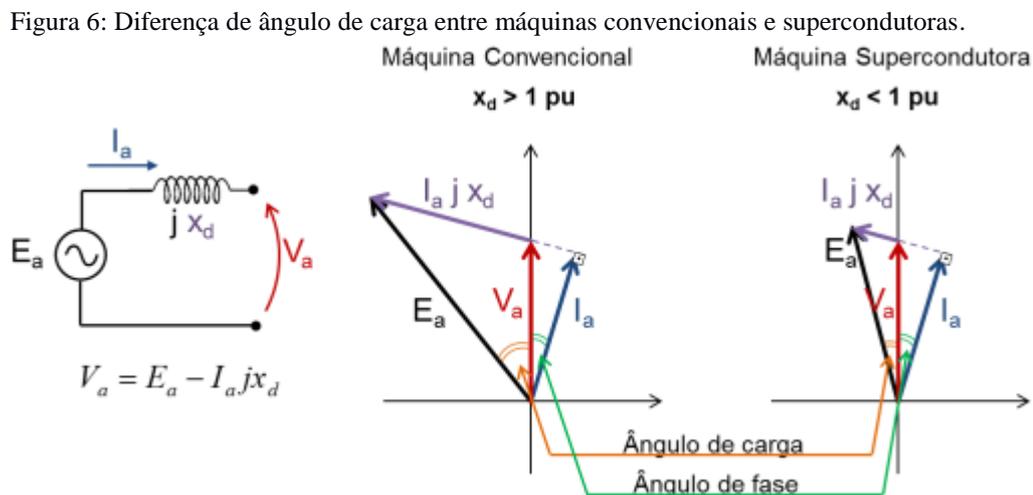
F_{mm} é a força magnetomotriz (Ae – Ampére-espira)

Relutância magnética é uma medida da oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético.

Levando-se em consideração essas equações, observa-se que é possível aumentar a intensidade do campo polar e conseqüentemente obter mais potência no eixo do motor ao se utilizar supercondutores ao invés dos condutores de cobre convencionais.

Na utilização em geradores, devido ao fato dessas máquinas serem menores e mais leves, o torque necessário para se dar partida é menor devido ao seu reduzido momento de inércia. Com a utilização de supercondutores, é possível retirar a ferragem utilizada para concentrar o fluxo magnético, uma vez que a intensidade do campo produzido é bem mais alta e facilmente satura nos dentes de ferro das ranhuras dos condutores. Com isso, é possível substituir o ferro por outro material mais leve e resistente, diminuindo ainda mais o peso total da máquina e também as perdas por correntes parasitas. Ao se diminuir essas perdas, a eficiência aumenta de tal forma que compensa a necessidade do sistema de resfriamento.

A partir do momento em que o estator não é mais um material magnético, a reatância síncrona passa a ter um valor muito baixo, o que faz com que a máquina opere com um menor ângulo de carga (MARTINS, 2014). Na Figura 6 pode-se observar esta diferença com uma menor reatância síncrona x_d em máquinas supercondutoras:



Fonte: (MARTINS, 2014, p. 20).

O fator de potência representado pelo ângulo de fase permanece o mesmo para ambas as situações, porém o ângulo entre a força eletromotriz E_a gerada e a tensão, representado pelo ângulo de carga, é bem menor. Isto aumenta a eficiência do sistema, permitindo que a máquina tenha uma maior capacidade de carga para a mesma alimentação mecânica.

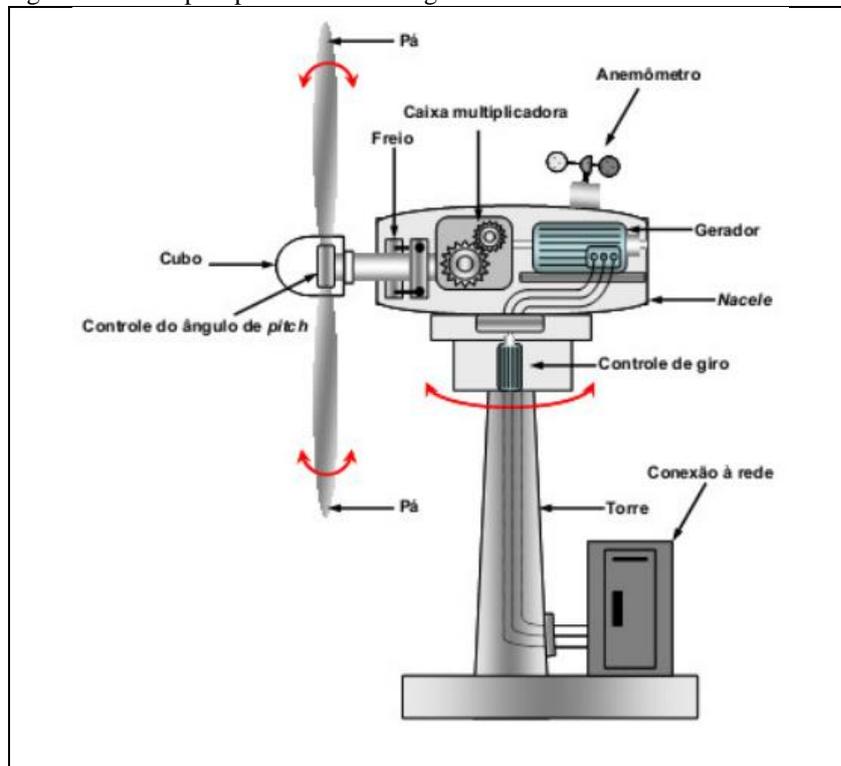
Além do menor torque necessário, o sistema também passa a ser mais seguro, já que a máquina permite uma maior corrente de curto-circuito, que pode ser mais facilmente

detectada em sistemas de proteção, além de ter menores flutuações na tensão terminal frente a variações de carga, uma vez que o sistema se torna mais robusto. Pode trabalhar também como um compensador síncrono em fator de potência nulo quando sobrecarregado, ou trabalhar consumindo energia reativa quando subcarregado.

A maior vantagem deste sistema em geradores é a diminuição significativa no volume e a maior robustez do sistema. O sistema de acionamento também sofre impacto na redução do volume, uma vez que o torque necessário para movimentar o gerador é menor, o que torna possível reduzir a potência das máquinas de acionamento, diminuindo o volume total ocupado. Em aplicações em que o espaço é limitado, como em embarcações, a utilização desta tecnologia é um grande diferencial, pois além da questão do volume, o sistema é mais estável e ideal para redes menores e mais eletricamente suscetíveis.

Quanto aos aerogeradores, tem-se um grande desafio para se fabricar máquinas mais potentes, pois a utilização de equipamentos maiores e mais pesados traz grandes transtornos à construção da infraestrutura de sustentação. A Figura 7 mostra os principais componentes de um aerogerador.

Figura 7 – Principais partes de um aerogerador.



Fonte: (AGUIAR JUNIOR, 2012, p. 15).

O grande benefício da utilização da tecnologia supercondutora é que ela pode

dispensar a utilização da caixa de engrenagens, que corresponde à grande parte do volume e peso dos aerogeradores.

A viabilidade desta solução está associada à disponibilidade de geradores elétricos capazes de trabalhar em velocidades baixas e com alto torque, ou seja, geradores multipólo. Entretanto, geradores desta natureza são caracterizados por grande aumento no seu volume e peso. (AGUIAR JUNIOR, 2012, p. 16).

Esta situação será explicada através da Equação 4, que relaciona o torque com a potência:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (4)$$

Onde:

T é o torque (Nm – Newton-metro)

P é a potência gerada (W – Watts ou Nm/s – Newton-metro por segundo)

ω é a velocidade angular (rad/s – Ciclo por segundo)

Como resultado da retirada da caixa de engrenagens, o valor da velocidade angular sofre uma redução, o que diminui a potência gerada. Com a utilização de geradores convencionais, isso resultaria na necessidade de utilização de geradores maiores e mais pesados para a geração da mesma quantidade de energia, porém este problema pode ser resolvido através da utilização dos supercondutores.

Para explicar essa compensação na potência gerada, será utilizado como base de estudo o *Suprapower*, um projeto de aerogerador que está sendo construído sob a coordenação da empresa Tecnalia. Esse equipamento tem previsão de lançamento para 2017 e utiliza do supercondutor diboreto de magnésio (MgB_2). A Equação 5 mostra a potência específica (kW/m^3) que pode ser gerada neste tipo de máquina:

$$\frac{P}{V} \propto B \cdot A \cdot \omega \quad (5)$$

Onde:

P é a potência (kW - Kilowatts)

V é o volume (m^3 - metro cúbico)

B é o campo magnético no entreferro (T – Tesla)

A é a densidade linear da corrente (A/m – Ampere por metro)

ω é a velocidade angular (rad/s)

De acordo com Ainhoa (2015), os supercondutores têm capacidade de produzir um campo magnético maior do que os convencionais, o que aumenta o valor do campo magnético do entreferro. Com um maior campo magnético, é necessária a retirada dos dentes do estator, o que aumenta o espaço no entreferro e possibilita a instalação de mais bobinas, o que ocasiona o aumento da densidade de corrente. Isso possibilita o ganho em eficiência dos aerogeradores supercondutores.

Como resultado, tem-se uma grande diminuição no peso e tamanho da nacelle, além de um aumento na confiabilidade e eficiência do aerogerador.

(Nacelle) É a carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada), todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao vento. (CRESESB, 2008, p. 32).

O Quadro 1 compara os parâmetros entre um aerogerador convencional e um supercondutor da mesma potência:

Quadro 1 – parâmetros dos aerogeradores

	Aerogerador Convencional	Aerogerador Supercondutor
Potência Nominal (MW)	10	
Velocidade Nominal (rpm)	8,1 (condução direta)	
Tipo de Gerador	Síncrono	Síncrono, pólos salientes
Excitação	Ímã permanente	Bobinas de campo supercondutoras
Tensão na velocidade nominal (V)	1725	2280
Número de polos	360	48
Frequência (HZ)	24.30	3.24
Diâmetro do entreferro (mm)	11900	10100
Comprimento axial magnético bruto (mm)	1795	744
Pressão de cisalhamento no entreferro (kPa)	34	112
Número de ranhuras no estator	1080	1440
Densidade de corrente no estator (A/mm^2)	3	3
Indução magnética média no entreferro (T)	0,5	1

Fonte: adaptado de AINHOA (2015, p. 18).

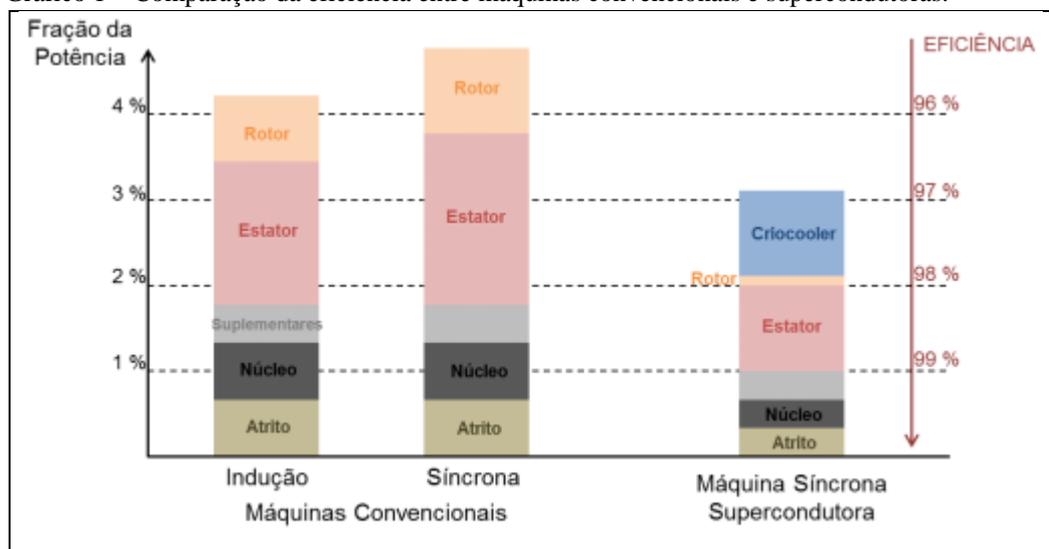
A utilização dessa tecnologia para a produção de energia eólica através do *Suprapower* promete consolidar o início da produção de máquinas supercondutoras em uma escala maior através da validação e industrialização da tecnologia.

5 ESTUDO DE VIABILIDADE

Neste capítulo será realizado um estudo de viabilidade, comparando situações de melhor emprego da tecnologia, considerando fatores como eficiência, volume, peso e infraestrutura dos sistemas em geral.

Podemos observar no Gráfico 1 o ganho em eficiência de um gerador que utiliza a tecnologia da supercondução:

Gráfico 1 – Comparação da eficiência entre máquinas convencionais e supercondutoras.



Fonte: (MARTINS, 2014, p. 19).

Pode-se observar que mesmo com a inclusão do sistema de criogenia, o gerador ainda continua mais eficiente para operação na mesma quantidade de energia. O maior diferencial deste sistema é a redução do sistema de acionamento, além da própria redução nas dimensões e no peso dos geradores.

Para aplicações como em plataformas de petróleo, que operam com grandes grupos geradores a diesel ou a gás, há necessidade de motores de cerca de três vezes o tamanho do gerador. Isso pode equivaler a um volume da ordem de centenas de metros cúbicos, sendo que geralmente as embarcações possuem de quatro a seis unidades. De acordo com Martins (2014), as máquinas supercondutoras causariam uma redução significativa de volume e consumo de combustível nestes sistemas, já que possuem melhor relação entre potência, consumo e peso e maior capacidade de sobrecarga. Com isso, a manutenção também seria facilitada devido ao fato dessas máquinas serem mais compactas e modulares, mesmo com os sistemas de resfriamento. Além disso, a rede seria mais estável e robusta, uma vez que a baixa

reatância síncrona garante mais estabilidade e menos susceptibilidade a defeitos.

O desenvolvimento de aerogeradores convencionais mais potentes é um grande desafio devido ao maior volume e peso demandado, o que afeta diretamente a estrutura de sustentação. O grande volume e peso dessas máquinas aumentam consideravelmente o esforço mecânico nas fundações, tanto de aerogeradores fixos, quanto daqueles que ficam sobre a água, por isso a tecnologia supercondutora traz grandes benefícios neste setor. No Quadro 2 podemos observar a diferença no tamanho da nacela ao se utilizar esta tecnologia para uma máquina de 10 MW. Para a comparação das dimensões, será utilizado o aerogerador *Sea Titan*, criado pela AMSC em relação a um convencional para a mesma potência.

Quadro 2 – Dimensão da nacela dos aerogeradores.

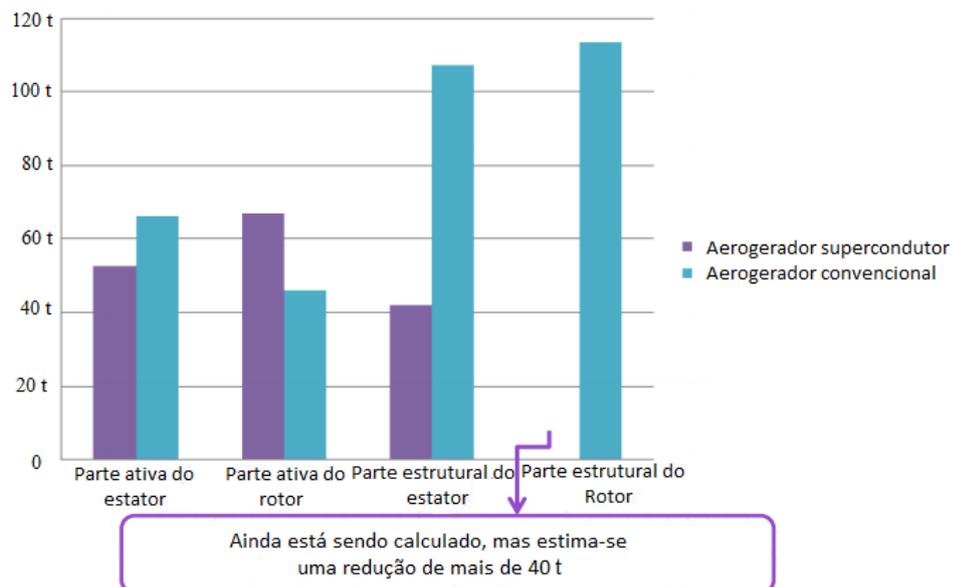
	<i>Convencional</i>	<i>Supercondutor</i>
Comprimento (m)	15	10
Altura (m)	5	6

Fonte: o autor.

Pode-se observar que o comprimento do aerogerador sofreu uma grande redução, o que é uma vantagem considerável, pois o esforço provocado pelo vento também será menor devido à redução da área de impacto da corrente de ar com a nacela.

Para a comparação em peso, será utilizado o aerogerador *Suprapower* em relação a um convencional no Gráfico 2:

Gráfico 2 – Comparação de peso entre aerogeradores.

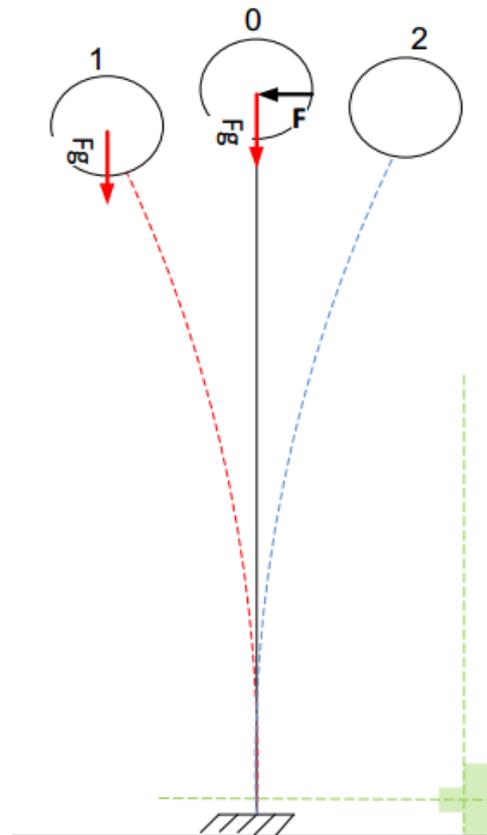


Fonte: adaptado de AINHOA (2015, p. 20)

O peso do aerogerador é a parte que sofre o maior impacto na implantação da tecnologia. Tem-se uma redução de aproximadamente 60 toneladas somente na parte estrutural do estator, além das reduções nas partes ativas do estator e do rotor, e na parte estrutural do rotor. Isto somado à retirada da caixa de engrenagens pode diminuir consideravelmente o esforço provocado nas fundações do aerogerador.

A maior dificuldade quando se diz respeito à estrutura de sustentação do aerogerador é que quando o topo da torre está submetido ao esforço do vento, temos uma espécie de pêndulo que ficará recuado sob a carga F , conforme Figura 8.

Figura 8 – Esforços aplicados à estrutura do aerogerador.



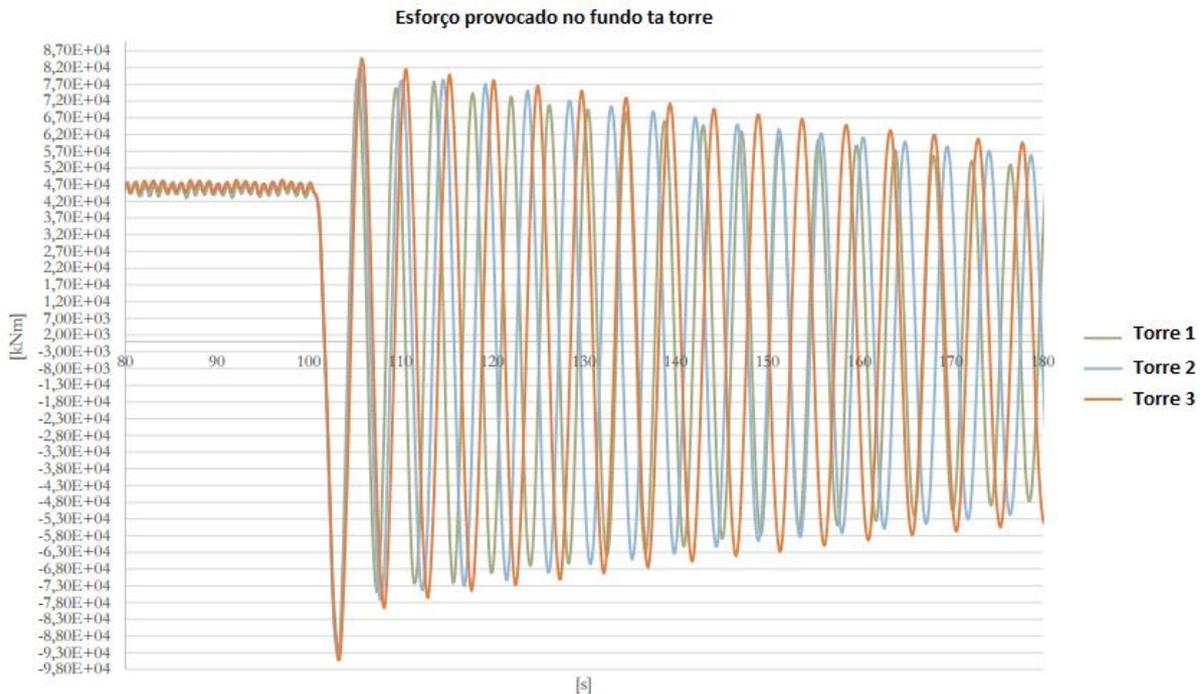
Fonte: (DIAZ, 2015, p. 6).

Quando a carga F é retirada, o topo irá acelerar no sentido oposto, cruzando o ponto 0 e seguindo para o ponto 2, tendo mais força se o peso da nacela for maior. Além disso, uma vez que a torre está fora do centro de gravidade, o movimento vai se repetir no sentido do ponto 1, depois para o 2 e assim sucessivamente, até sua estabilização. Para atenuar este efeito é necessária a construção de torres mais pesadas, a fim de aumentar a inércia.

Para mostrar o esforço no qual o fundo da torre é submetido, foi realizada uma

simulação com uma torre mais pesada (1), uma média (2) e uma mais leve (3), demonstrando o efeito provocado na base quando a torre está submetida a um vento de 14 m/s, com o topo da torre pesando 500 t. O gráfico 3 mostra o esforço causado pelo vento, até o mesmo ser interrompido.

Gráfico 3 – Esforços atuantes no fundo da torre

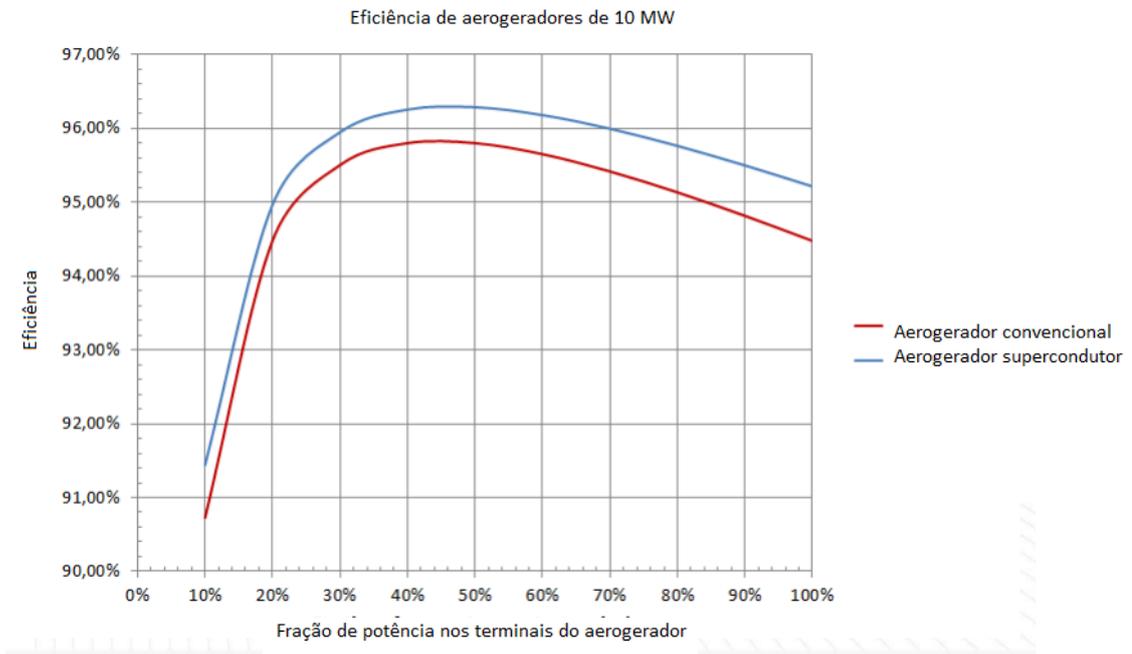


Fonte: Adaptado de DIAZ (2015, p. 8).

Pode-se observar que não é possível a redução do peso da torre sem reduzir o peso da nacela, pois a estrutura do solo sofreria maiores esforços. No trecho final pode se verificar a diferença de quase 1.10^4 kNm de esforço entre a torre mais leve e a mais pesada, o que é um valor considerável para a estrutura de sustentação. Quando o aerogerador está localizado na água, o problema se torna ainda pior, pois além dos efeitos do vento, o mar também provoca flexão na torre com o movimento das ondas. A necessidade de construção de torres mais pesadas é um fator de importância ao se considerar o custo total da construção do aerogerador.

O Gráfico 4 compara os aerogeradores em termos de eficiência:

Gráfico 4 – Comparação de eficiência de aerogeradores

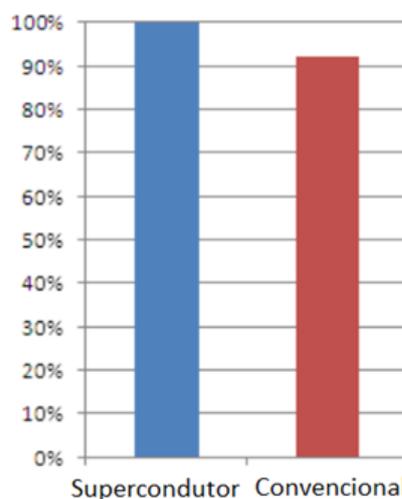


Fonte: adaptado de AINHOA (2015, p. 19)

A eficiência energética desta máquina não é o seu maior diferencial, conforme observado neste gráfico, pois o próprio sistema de criogenia drena um pouco da potência para poder realizar a circulação do fluido de refrigeração.

Os desenvolvedores do *Suprapower* ainda não disponibilizaram o valor final do aerogerador, porém disponibilizaram o Gráfico 5 com uma estimativa em termos de custos:

Gráfico 5 – Comparação de custo
Comparação em termos de custo



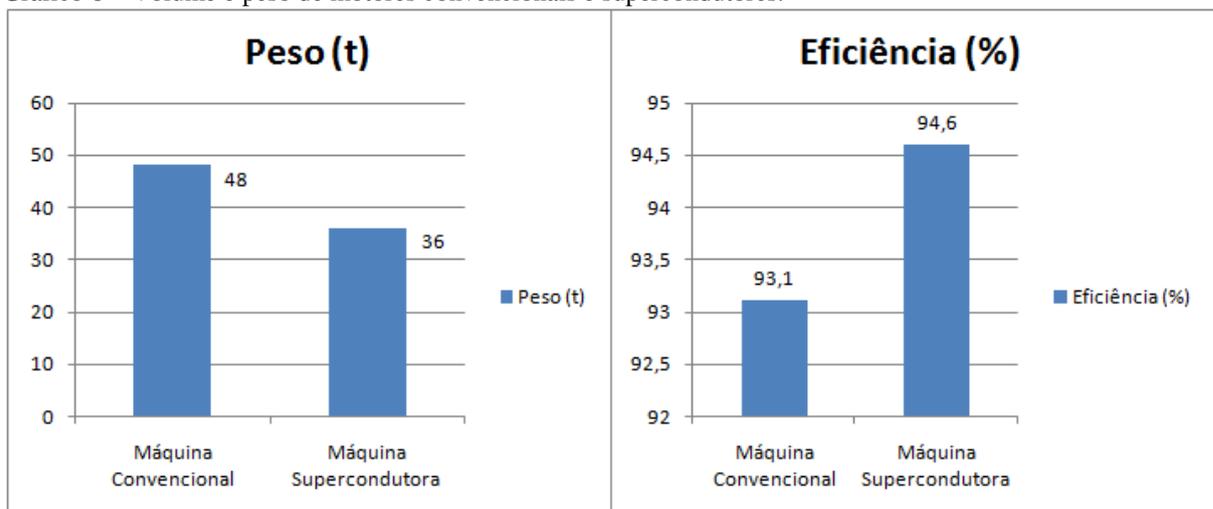
Fonte: adaptado de AINHOA (2015, p. 21)

Apesar de o custo ser aproximadamente 8% superior, existe um potencial para redução do custo desse sistema, através da melhoria das propriedades do fio de diboreto de magnésio, redução do tamanho do módulo de criogenia e o processo de industrialização após a validação da tecnologia (AINHOA, 2015).

Mesmo que o aumento de eficiência não seja tão superior, pode-se observar através destes gráficos que essa tecnologia pode revolucionar o mercado de aerogeradores, principalmente por melhorar as condições de infraestrutura, já que as fundações necessárias sofrem um grande impacto para comportar máquinas mais potentes, devido ao aumento do volume e peso.

Em motores, ao se comparar um protótipo utilizando supercondutores com potência de 4 MW produzido pela Siemens a um convencional do mesmo tipo, pôde-se observar uma diminuição de peso e aumento na eficiência, conforme Gráfico 6:

Gráfico 6 – Volume e peso de motores convencionais e supercondutores.



Fonte: o autor.

Pode-se observar uma redução de 12 t no peso do motor e o aumento de 1,5 % de eficiência. A redução no peso é bastante significativa, e além do aumento da eficiência, estes motores possuem uma dinâmica mais rápida, respondendo com mais eficiência às variações do controle.

Existem embarcações que precisam de um sistema de posicionamento dinâmico (PD) para a compensação de ventos quando estão sobre águas com grandes profundidades. O PD é um sistema de propulsores direcionais que compensam a movimentação da embarcação, tornando-a quase estática, e pode corresponder a 80% da potência consumida a bordo, dependendo das condições meteorológicas. É composto por motores que precisam variar

rápida e constantemente suas condições de operação. Os sistemas supercondutores garantiriam uma melhora significativa no desempenho do PD através das características citadas, aumentando a segurança deste tipo de operação (MARTINS, 2014).

Para as aplicações citadas, os supercondutores podem trazer grandes benefícios e a utilização em aerogeradores é a opção mais viável no momento, que está prestes a se desenvolver a partir da fabricação do *Suprapower*.

6 CONCLUSÃO

O sistema de refrigeração dos supercondutores representa um forte impacto no orçamento da fabricação de qualquer tecnologia associada a ele, porém existem pontos positivos que podem compensar o investimento. O aumento da quantidade de energia que pode ser transportada em uma linha de transmissão, e já na tensão final de utilização dos consumidores pode ser um grande diferencial em sistemas saturados e com limitações no espaço de transporte de energia. Sistemas práticos, como os SMES, que disponibilizam energia quase instantaneamente e podem corrigir diversas alterações no sinal elétrico, também são uma grande promessa para o futuro, atraindo inclusive a atenção militar, por ser possível armazenar energia em tanques refrigerados que podem ser facilmente deslocados.

Através das equações apresentadas na aplicação dessa tecnologia em máquinas e motores, foi visto que a maior parte das perdas eliminadas na utilização de supercondutores é aquela advinda do efeito Joule. Mas, além disso, quando há redução de volume e peso, diminui-se também o atrito e têm-se perdas menores por corrente parasita devido à menor utilização de ferro. Esses fatores somados à maior robustez e melhor resposta a controles e variações de velocidade, mostram que se trata de um sistema com qualidade superior. Porém, como toda tecnologia de ponta, o custo pode se tornar um fator impeditivo para o seu desenvolvimento, e isso pode mudar com o tempo, já que está prevista a utilização de supercondutores em uma escala maior na fabricação de aerogeradores, o que pode reduzir o seu custo.

Através deste trabalho, foi visto que esta aplicação já vem sendo estudada há algum tempo, e mesmo assim a maioria dos protótipos foi fabricada para a realização de testes, e somente agora se tem a expectativa de produção em uma maior proporção para a aplicação em usinas de energia eólica. Como a geração de energia de forma sustentável é um assunto de grande relevância, a possibilidade de se desenvolver equipamentos que podem produzir uma maior quantidade de energia com impactos mínimos ao meio ambiente instiga a fabricação dos aerogeradores supercondutores. A característica de gerar energia com menor necessidade de torque também traz grandes benefícios para embarcações que trabalham com vários grupos geradores, já que estes diminuem o volume e peso de todo o sistema de acionamento e suprem a necessidade de redes mais robustas demandadas para essa situação.

Em geral, quando comparado ao custo, o aumento da eficiência pode ser considerado baixo, porém este é apenas um fator de qualidade. Este fator somado à geração de uma

energia mais estável, à possibilidade de se obter motores com resposta mais dinâmica a variações das condições de carga e velocidade, além dos inúmeros benefícios em se obter máquinas menores e mais leves, faz com que a produção e implementação desta tecnologia em determinados setores seja fomentado e a expectativa é que ela se torne mais barata, o que pode impulsionar o seu desenvolvimento de forma a torná-la mais abrangente.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR JUNIOR, Edisio Alves de. **Impacto econômico das aplicações de supercondutividade de alta temperatura no sistema elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.
- AINHOA, Pujana. **Suprapower: Lightweight 10 MW MgB₂ superconducting generator**. Bilbao, 2015.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. **Energia eólica: princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro, 2008.
- DIAZ, Túpac Canosa. **Impact of Tower Top Weight on the cost of the support structure**. Bilbao, 2015.
- FLITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles Junior; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- GIROUARD, Coley. **Advanced Energy Tech of the Week: High Transmission Superconducting Transmission**. The Energy Collective. 2015. Disponível em: <<http://www.theenergycollective.com/coley-girouard/2217856/advanced-energy-technology-week-high-temperature-superconducting-hts-transmis>>. Acesso em: 06/06/2016.
- KALSI, Swarn S. **Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment**. Hoboken: John Wiley & Sons Incorporation, 2010.
- KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1982.
- LEE, Peter J. **Engineering Superconductivity**. New York: John Wiley & Sons Incorporation, 2001.
- MARTINS, Flávio Goulart dos Reis. **Projeto de um motor linear supercondutor com fitas de segunda geração**. Rio de Janeiro, 2014.
- OSTERMANN, Fernanda; PUREUR, Paulo. **Supercondutividade**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- REY, Oriana et al. **O setor elétrico brasileiro e a sustentabilidade no século 21: Oportunidades e Desafios**. Brasília: Paula Franco Moreira e Roberto Kishinami, 2012.
- RIBEIRO, Paulo F. et al. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications. **Proceedings of the IEEE**, [s.l.], v. 89, n. 12, p. 1744-1756, dez. 2001.
- SCHIFERL, R. F.; DRISCOLL, D. I. **Electric Motors Using High Temperature Superconducting Materials Applied to Power Generating Station Equipment**. Cleveland: Reliance Electric Company and Rockwell Automation, 1997.

TINKHAM, Michael. **Introduction to Superconductivity**. New York: Dover, 1996.

TIXADOR, Pascal. **Superconducting Magnetic Energy Storage**. Pori: European Summer School on Superconductivity, 2011.