

**Universidade Federal do Pampa**

**Ivan Matheus Rachor**

**Supercondutores aplicados a engenharia**

**Alegrete**

**2022**

**Ivan Matheus Rachor**

**Supercondutores aplicados a engenharia**

Projeto submetido à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de **Bacharel em Engenharia de Elétrica** pela Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Dr<sup>a</sup>. Prof<sup>a</sup>. Natalia Braun Chagas

**Alegrete**

**2022**

**IVAN MATHEUS RACHOR**

**SUPERCONDUTORES APLICADOS A ENGENHARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natalia Braun Chagas

Orientadora

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon

UNIPAMPA

---

Prof. Me. Marcelo Hahn Durgante

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **NATALIA BRAUN CHAGAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/08/2022, às 09:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO HAHN DURGANTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/08/2022, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GIOVANI GUARIENTI POZZEBON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/08/2022, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0877888** e o código CRC **5912F499**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete  
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550  
Telefone: (55) 3422-8400

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R119 Rachor, Ivan Matheus  
Supercondutores aplicados a engenharia / Ivan Matheus Rachor.  
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,  
2022.

"Orientação: Natalia Braun Chagas".

1. Aplicação de supercondutores a engenharia. I.  
Título.

Dedico este trabalho ao esforço realizado durante todos esses anos por mim e por todos a minha volta que me ajudaram de forma grandiosa ou mínima durante essa jornada

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, que me colocaram no mundo, me ensinaram os valores da vida, me amaram e proveram as condições necessárias para que esta graduação pudesse ser realizada, que sempre estiveram do meu lado independentemente de tudo.

Aos meus colegas, que fizeram parte dessa jornada comigo, em especial ao Jean que é meu irmão de outra mãe.

A minha companheira, Dany, que sempre esteve comigo, mesmo que as vezes longe, minha confidente e parceira da vida

A Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natalia Braun Chagas, que durante toda a graduação foi um centro de inspiração e admiração, pelo profissionalismo e pela dedicação no ensino.

## RESUMO

A supercondutividade é uma área de pesquisa centenária na física. Porém para entender de supercondutividade devemos primeiro dar uma passa atrás e entender como funcionam condutores, isolantes e semicondutores. A supercondutividade tem como definição um material que passa a ter resistência tendendo a zero quando se encontra abaixo de uma temperatura crítica (TC), outra característica é notável é a expulsão de campos magnéticos, conhecido como Efeito Meissner. Desta forma, é notável ver que poderíamos ter diversas aplicações a engenharia com tal material, algumas delas são citadas neste trabalho como os limitadores de falta de corrente (do inglês Fault Current Limiter – FCL), os transformadores com enrolamentos de supercondutores, as maquinas elétricas como geradores eólicos de grande porte e os trens de alta velocidade conhecidos como MagLev, que funcionam a partir do Efeito Meissner. Neste trabalho é apresentada uma revisão sobre tais assuntos.

**Palavras-chaves:** Supercondutor, Gerador Eólico e Limitador de Corrente de Falta.



## **ABSTRACT**

Superconductivity is a centuries-old area of research in physics. But to understand superconductivity one must first take a step back and understand how conductors, insulators and semiconductors work. Superconductivity is defined as a material whose resistance tends to zero when it is below a critical temperature (TC), another notable characteristic is the expulsion of magnetic fields, known as the Meissner Effect. In this way, it is remarkable to see that we could have several engineering applications with such material, some of them are mentioned in this work such as Fault Current Limiters (FCL), transformers with superconducting windings, electrical machines such as large wind generators and high-speed trains known as MagLev, which work from the Meissner Effect. In this work, a review of such subjects is presented.

**Keywords:** Superconductor, Wind Generator and Fault Current Limiter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo do átomo por Rutherford-Bohr.....	12
Figura 2 - A primeira linha corresponde a uma linha de elétrons. A segunda linha representa a energia potencial em um elétron nos átomos onde vemos as camadas de energia e as camadas proibidas. A terceira linha representa a segunda linha simplificada .....	16
Figura 3 - Diagrama de Linus Pauling .....	17
Figura 4 - Modelo de um Transformador hipotético .....	19
Figura 5 - Uma fita supercondutora HTS 2G com camadas explicitadas .....	20
Figura 6 - Tipo retificador FCL imã.....	25
Figura 7 – Transformador com FCL. ....	27
Figura 8 – Corrente de linha da carga com ativação do FCL em $t=0$ .....	28
Figura 9 – Esquemático de testes para o AC-SFCL (NAECKEL e NOE, 2014).....	30
Figura 10 – modelo do transformador usado em (LIU e colab., 2016). ....	33
Figura 11 – Gerador HTS 10MW da AMSC.....	44
Figura 12 – Aparato de teste de qualificação para o gerador HTS 10MW .....	45
Figura 13- Estrutura refrigeradora para teste de qualificação do gerador HTS 10MW .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teste com alvos e resultados para testes do imã 66kV/750A	26
Tabela 2 – Especificação dos enrolamentos .....	36
Tabela 3 – Principais parâmetros de projeto do transformador.....	37
Tabela 4 - Parâmetros do transformador supercondutor .....	39
Tabela 5- Parâmetros de datasheet dos materiais .....	40
Tabela 6 – Características do núcleo .....	41
Tabela 7 – Comparação de dados de projeto.....	49

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	11
1.1.	FÍSICA DOS SÓLIDOS E LIGAÇÕES MOLECULARES .....	11
1.2.	CONDUTIVIDADE EM SÓLIDOS .....	14
1.3.	TEORIA DE BANDAS.....	15
1.4.	CONDUTORES, ISOLANTES E SEMICONDUTORES .....	17
1.5.	TRANSFORMADORES CONVENCIONAIS .....	18
1.6.	SUPERCONDUTORES.....	19
1.7.	TRANSFORMADORES COM SUPERCONDUTORES .....	20
2.	EQUIPAMENTOS QUE UTILIZAM SUPERCONDUTORES .....	23
2.1.	LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA.....	23
2.1.1.	RESEARCH & DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER IN JAPAN (YASUDA ET AL., 2005).....	24
2.1.1.1.	DISCUSSÃO SOBRE O ARTIGO RESEARCH & DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER IN JAPAN(YASUDA ET AL., 2005) .....	26
2.1.2.	CURRENT LIMITING CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER TYPE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER (YAMAGUCHI ET AL., 2005).....	27
2.1.2.1.	DISCUSSÃO SOBRE O ARTIGO CURRENT LIMITING CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER TYPE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER (YAMAGUCHI ET AL., 2005) .....	28
2.1.3.	DESIGN AND TEST OF AN AIR COIL SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER DEMONSTRATOR(NAECKEL; NOE, 2014) .....	29
2.1.4.	DISCUSSÃO SOBRE O ARTIGO DESIGN AND TEST OF AN AIR COIL SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER DEMONSTRATOR(NAECKEL; NOE, 2014).....	31
2.1.5.	DISCUSSÃO GERAL SOBRE OS ARTIGOS DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA.....	31
2.2.	TRANSFORMADORES COM ENROLAMENTOS SUPERCONDUTORES.....	32
2.2.1.	DYNAMIC ANALYSIS OF TRANSFORMERS WITH SECOND-GENERATION HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS (LIU ET AL., 2016).....	32
2.2.1.1.	DISCUSSÃO SOBRE O ARTIGO DYNAMIC ANALYSIS OF TRANSFORMERS WITH SECOND-GENERATION HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS (LIU ET AL., 2016).....	34
2.2.2.	DEVELOPMENT OF A 630 kVA THREE-PHASE HTS TRANSFORMER WITH AMORPHOUS ALLOY CORES (WANG ET AL., 2007A) .....	35
2.2.3.	DEVELOPMENT OF A 1250-kVA SUPERCONDUCTING TRANSFORMER AND ITS DEMONSTRATION AT THE SUPERCONDUCTING SUBSTATION.....	39
2.2.3.1.	DISCUSSÃO SOBRE OS ARTIGOS DEVELOPMENT OF A 630 kVA THREE-PHASE HTS TRANSFORMER WITH AMORPHOUS ALLOY CORES E DEVELOPMENT OF A 1250-kVA SUPERCONDUCTING TRANSFORMER AND ITS DEMONSTRATION AT THE SUPERCONDUCTING SUBSTATION (DAI ET AL., 2016; WANG ET AL., 2007B) .....	42
2.3.	MAQUINAS ELÉTRICAS - GERADORES EÓLICOS .....	43
2.3.1.	10 MW CLASS SUPERCONDUCTOR WIND TURBINE GENERATORS (SNITCHLER ET AL., 2011).....	43
2.3.2.	DESIGN AND PRELIMINARY EXPERIMENTS OF A ROTATING ARMATURE PARTIAL SUPERCONDUCTING AIR-CORE GENERATOR (CHO ET AL., 2022).....	46
2.3.2.1.	DISCUSSÃO SOBRE O ARTIGO DESIGN AND PRELIMINARY EXPERIMENTS OF A ROTATING ARMATURE PARTIAL SUPERCONDUCTING AIR-CORE GENERATOR (CHO ET AL., 2022) .....	48
2.3.3.	ULTRAHIGH-FIELD, HIGH-EFFICIENCY SUPERCONDUCTING MACHINES FOR OFFSHORE WIND TURBINES(BALACHANDRAN ET AL., 2022).....	48
2.3.3.1.	DISCUSSÃO SOBRE O ARTIGO ULTRAHIGH-FIELD, HIGH-EFFICIENCY SUPERCONDUCTING MACHINES FOR OFFSHORE WIND TURBINES (BALACHANDRAN ET AL., 2022).....	50
2.4.	2.4. TREM DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA (MAGLEV) .....	51
2.4.1.	O PROJETO BRASILEIRO, O MAGLEV-COBRA.....	51
2.4.2.	MAGLEVS NA CHINA .....	52
2.4.3.	MAGLEVS PELO MUNDO .....	53
2.4.3.1.	DISCUSSÃO GERAL SOBRE MAGLEVS.....	54
3.	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56

## 1. INTRODUÇÃO

A supercondutividade é um fenômeno físico conhecido a mais de século, descoberto pelo cientista Heike Kamerlingh Onnes em 1911. A supercondutividade tem como definição um material que passa a ter resistência tendendo a zero quando se encontra abaixo de uma temperatura crítica (TC), outra característica é notável é a expulsão de campos magnéticos, conhecido como Efeito Meissner. Porém, para realizar a melhor compreensão de como um supercondutor funciona, temos que ter a noção física de como materiais condutores, isolantes e semicondutores atuam, para assim, termos a melhor compreensão. Logo, estudaremos os materiais ordinários do nosso meio primeiramente para faz um tipo de “ponte” entre os assuntos.

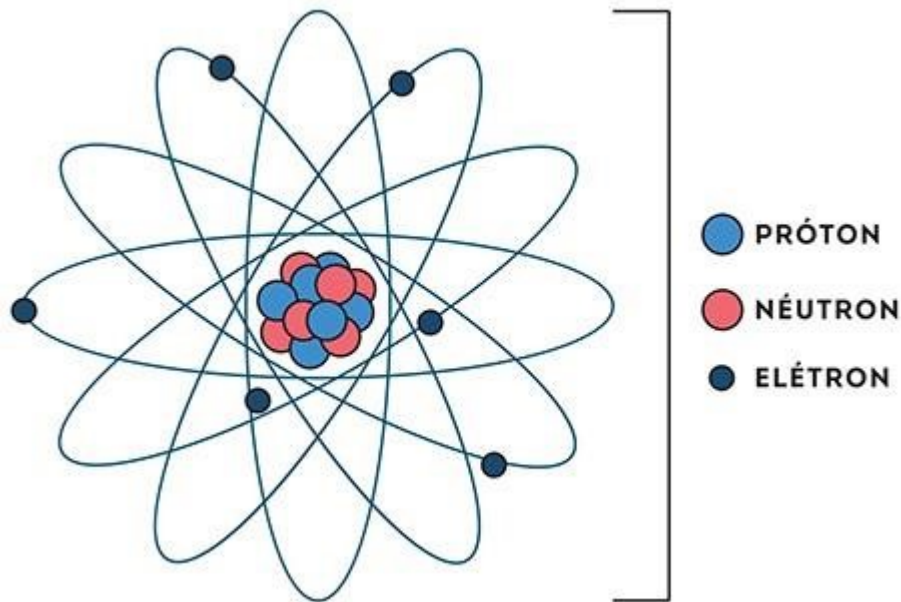
Desta forma, podemos compreender com maior clareza os equipamentos onde existem estudos sobre o uso de supercondutores. O objetivo de tal trabalho é demonstrar algumas das aplicações utilizadas até a atual data, com a intenção de realizar um apanhado de informações e também discutir sobre os resultados achados pelos autores dos artigos, pois desta forma podemos realizar o uso deste documento como uma referência para outros estudiosos que tenham interesse em como se encontram as pesquisas até a publicação deste trabalho.

### 1.1. Física dos sólidos e Ligações Moleculares

Todas as coisas que vemos e tocamos no nosso cotidiano são formadas de matéria, essa matéria pode ser vista de diversas formas, como sólidos, líquidos, gases e plasma. Todas essas formas de matérias possuem algumas coisas em comum, como por exemplo: todas são formadas de moléculas e essas moléculas em si são formadas de átomos. Essas moléculas podem ser organizadas de diversas formas, nos gases elas estão separadas por grandes distancias, em líquidos e sólidos essa distância é menor e, portanto, as moléculas exerçam forças umas nas outras, comparável como os átomos exercem forças uns nos outros. Já o plasma é um caso especial, pois ele é um estado da matéria que apenas existe em grande temperatura ou em grande presença de eletricidade, como no centro de estrelas, nos raios das tempestades e experimentalmente em laboratório.

O átomo é o elemento fundamental de toda matéria no universo, nele possuímos prótons, nêutrons e elétrons. Os prótons e neutros estão juntos em um núcleo e estão unidos devido a Força Nuclear Forte. Já os elétrons estão orbitando o núcleo devido a Força Nuclear Fraca. Um modelo bem básico para compreensão está exposto abaixo:

Figura 1 - Modelo do átomo por Rutherford-Bohr



Fonte: (TIPLER e LLEWELLYN, 2007)

Nos átomos temos um número igual dos 3 elementos fundamentais, prótons, nêutrons e elétrons, portanto eles possuem um equilíbrio natural. Entretanto, em casos onde um elétron é adicionado ou retirado desse modelo fundamental, temos a formação de um íon. Este pode ser um ânion ou um cátion, o ânion é um átomo que possuem um elétron a mais na sua orbita de elétrons e o cátion é quando um elétron está ausente de sua orbita de elétrons.

Com isso em mente podemos agora compreender as ligações entre moléculas. Estas se formam e se quebram constantemente dentro dos líquidos e por isso cada tipo de molécula possui uma força característica dessas ligações, elas podem ser classificadas como: ligação iônica, ligação covalente, ligação dipolo-dipolo e um caso especial que apenas acontece em metais que possui o nome de ligação metálica.

De forma breve faremos um estudo de como essas ligações funcionam, pois graças a essas ligações que obtemos condução ou isolação elétrica característica dos materiais.

- **Ligação Iônica:** Consideramos um sal, NaCl, conhecido como sal de cozinha, analisando separadamente a molécula de sódio possui desbalanceamento natural na sua orbita de elétrons onde a energia em seu sistema faz com que ele tenha tendência em perder um elétron, então quando aproximado a uma molécula de cloro, que pelo outro lado tem uma tendência em receber um elétron para equilibrar seu sistema e então eles formam

uma ligação iônica, quando a distância entre eles é suficientemente pequena para que suas orbitas se sobreponham.

- **Ligação Covalente:** Consideramos H<sub>2</sub>O onde acontece um mecanismo completamente diferente do sal. Esse fenômeno é explicado pela mecânica- quântica, que não é nosso enfoque nesse momento, portanto consideramos que o compartilhamento de elétrons é feito devido aos “poços quânticos” da orbita eletrônica desses tipos de moléculas, isso faz com que estas orbitas possuam elétrons para equilibrar seu sistema energético.
- **Ligação Dipolo-Dipolo:** Foi proposta por J. D. Van der Waals em 1873, no qual ele fala que quaisquer duas moléculas são atraídas umas às outras mesmo não possuindo ligação covalente ou iônica. Ele sugere que duas moléculas são atraídas pelas mesmas forças eletrostáticas, porém de forma diferente que a observada no caso da ligação iônica e covalente por exemplo, isso é, no caso em que a vibração devido a temperatura for suficientemente pequena as moléculas serão atraídas umas as outras. Isso é provado pelo caso do hidrogênio que quando sua temperatura for suficientemente reduzida, ele se liquefaz, ou seja, as moléculas se atraem o suficiente para formar um líquido.
- **Ligação metálica:** como o nome sugere, acontece somente em metais, que condizem a mais da metade da tabela periódica. Essa forma de ligação é análoga a ligação covalente, porém a diferença é que nessa, os elétrons da camada de valência são compartilhados por todo o sólido e são livres para percorrer este. Desta forma podemos ver os metais como uma estrutura de íons imersa numa nuvem de elétrons.

Devido a essas ligações, podemos observar que com o resfriamento de um líquido, as moléculas vão ficando mais próximas umas das outras, até elas chegar a um ponto onde estão tão próximas que já podem ser consideradas um sólido, e isso pode ser feito de duas formas. Quando o resfriamento é rápido podemos ter a formação de sólidos amorfos, que são basicamente uma “foto” do líquido ou seja, as moléculas não possuem uma organização bem definida dentro do sólido amorfo como acontece nos sólidos convencionais, esse fenômeno é visto por exemplo, no vidro e no asfalto. Entretanto, o caso que desejamos estudar é o segundo, que acontece quando um líquido é resfriado lentamente, portanto, as moléculas têm tempo de se rearranjar e dessa forma formam um sólido que possui uma característica que se chama “rede cristalina”. A grande diferença da rede cristalina é que ela é uma repetição de finitas formas da mesma partícula fundamental da rede que é chamada de “cristal” e ela está através de todo o sólido. Isso faz com que nosso estudo possa utilizar apenas um cristal para estudo,

caso contrário, teríamos que considerar todo um sólido, o que aumentaria a complexidade exponencialmente.

## 1.2. Condutividade em sólidos

Como é bem estabelecido, sabemos que os metais são grandes condutores de eletricidade, e agora, com a compreensão de ligações metálicas entendemos bem por que isso acontece, é a grande quantidade de elétrons livres em suas camadas de valência que fazem com que os metais sejam os melhores condutores atuais. Isso foi proposto por H.A. Lorentz perto de 1909 em sua Teoria Clássica da Condutividade. Nela, Lorentz também relaciona a condução de eletricidade com a capacidade térmica, satisfazendo a lei de Ohm. Esta lei é dada pela equação (TIPLER e LLEWELLYN, 2007) (1):

$$P = R * I^2 \quad (1)$$

Onde P seria a potência dissipada por uma resistência elétrica R quando por ele é passada uma corrente elétrica I. Onde essa resistência elétrica é dada pela segunda lei de Ohm. Dada pela equação (TIPLER e LLEWELLYN, 2007) (2):

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (2)$$

Sendo  $\rho$  a resistividade aparente daquele material em certa condição de temperatura e pressão, L o comprimento do material e A área do material.

Porém a essa teoria de Lorentz falha ao tentar descrever a resistividade característica de um material matematicamente pois as considerações do caminho de percurso livre de um elétron como matéria não satisfazem o conceito aqui necessário, o que nos leva a teoria quântica da condutividade que tem o tratamento do elétron como onda.

De forma análoga, temos que pela Teoria Clássica de Condutividade os íons do material são esferas perfeitas e estáticas isso é, pois quando a temperatura atingir 0K acreditava-se que a energia térmica de um material a essa temperatura também era zero, e dessa forma o caminho de percurso livre de um elétron é calculado considerando a velocidade média de um elétron em um sólido e o tempo entre colisões desse elétron com as redes cristalinas. Devido a essas



premissas o caminho de percurso livre para este caso não explica o que é medido experimentalmente para a resistividade aparente de um material.

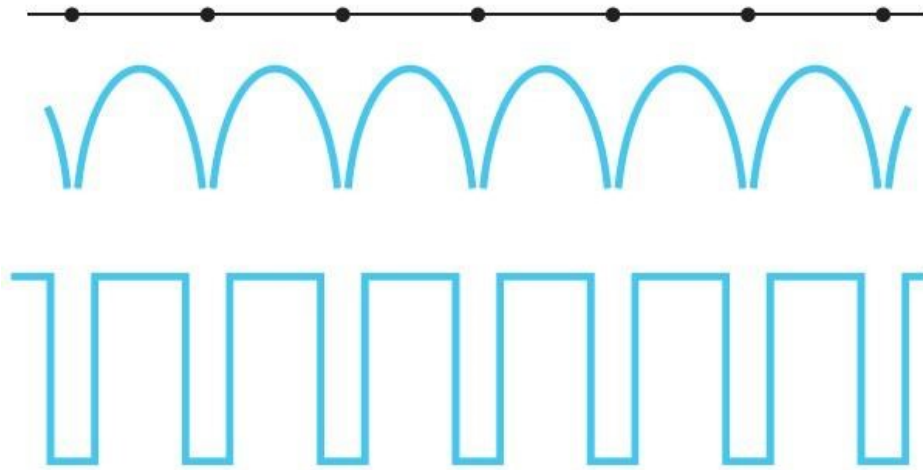
No caso da Teoria Quântica da Condutividade, levamos em consideração descobertas feitas por Enrico Fermi, e não consideramos mais a energia térmica como zero a 0K, consideramos ela a o mínimo possível para aquele definido material, e assim temos que os íons são considerados pontos vibrantes em três direções devido a essa Energia de Fermi e portanto nosso Caminho de Percurso Livre é calculado em função dessas imperfeições na rede cristalina, que podem ser tanto como pela vibração pela energia térmica ou por impurezas nos materiais, e isso nos leva a um Caminho de Percurso Livre é consideravelmente menor que a calculada pela Teoria Clássica. Desta forma, podemos calcular a resistividade do material e conseguimos achar um resultado teórico próximo ao resultado experimental.

Tendo isso em vista isso já explicado podemos partir para o nosso próximo passo que é entender como funcionam os elétrons nos átomos e íons, e isso nos leva a Teoria de Bandas

### **1.3. Teoria de Bandas**

A Teoria de Bandas é interessante pelo fato que é necessário o seu conhecimento para entender como os elétrons se comportam de forma natural para assim podermos compreender futuramente como funciona a condutividade convencional e a supercondutividade. Ela fala que dentro de um átomo temos níveis de energia que os elétrons são regrados, dessa forma possuímos camadas possíveis onde podem existir elétrons e camadas proibidas. Isso pode ser melhor visualizado no esquemático unidimensional análogo abaixo:

Figura 2 - A primeira linha corresponde a uma linha de elétrons. A segunda linha representa a energia potencial em um elétron nos átomos onde vemos as camadas de energia e as camadas proibidas. A terceira linha representa a segunda linha simplificada

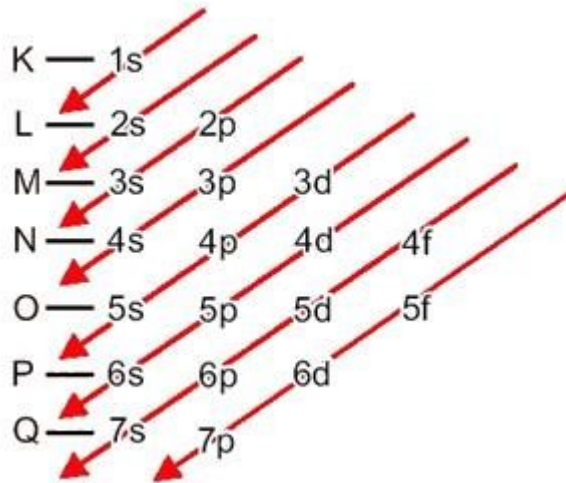


Fonte:(TIPLER e LLEWELLYN, 2007)

Essa rede de camadas de energia é apresentada até quando se é colocado em escala maior, ou seja, sólidos cristalinos macroscópicos apresentam essa mesma distribuição de seus átomos. Os cálculos em três dimensões são mais complexos porém os resultados apresentam resolução semelhante.

Temos, portanto, a distribuição de Linus Pauling que explicita essas camadas de forma algébrica, conforme a figura 3:

Figura 3 - Diagrama de Linus Pauling



Fonte: (DESCONHECIDO, 2018)

Com isso em mente podemos agora compreender por que alguns sólidos são condutores, isolantes e semicondutores como veremos na próxima secção.

#### 1.4. Condutores, Isolantes e Semicondutores

- **Condutores:** Empiricamente, todos metais são bons condutores, porém nem todos condutores são metais, entretanto, mais de metade da tabela periódica é feita de metais, portanto a grande maioria de materiais são condutores. Como vimos anteriormente, os metais possuem ligações metálicas, onde um ou mais elétrons da sua camada energética são livres e isso é também o motivo para que eles sejam bons condutores. Quando possuímos elétrons livres na última camada energética ou camada de valência, esses elétrons podem se transportar facilmente através de um sólido, requerendo baixa energia potencial aplicada a ele. Portanto, quando um campo elétrico é aplicado em um sólido desses, essa energia recebida, faz com que os elétrons se movimentem de forma ordenada dentro deste sólido, possuindo um sentido e direção bem definidos, isso faz com que a sua resistividade elétrica seja baixíssima, pois a resistência que os sólidos condutores impõem para a passagem de uma corrente elétrica dentro dele é muito pequena. Também vale notar que as distâncias entre bandas também são pequenas ou inexistentes no caso de sobreposição de bandas, dessa forma, quando uma banda está incompleta ou uma banda incompleta se sobrepõem com uma banda inferior de menor energia, também se caracteriza aquele material como um bom condutor.

- Isoladores: Contrariamente aos condutores, os isolantes não possuem uma boa condutividade elétrica. Isso é, devido a que as suas camadas de valência não possuem elétrons livres, ou seja, eles sempre estão bem pareados com os próprios elétrons de suas camadas. Nesses casos, os isoladores também se caracterizam por possuir uma banda proibida grande, impossibilitando assim as camadas de se sobreporem. Isso faz com que, para que haja corrente elétrica atravessando o sólido, deve-se aplicar um campo elétrico de uma escala muito maior que o aplicado aos condutores, o que faz com que em alguns casos eles não conduzam de forma alguma.
- Semicondutores: Este caso é um pouco mais complicado que os casos acima, alguns materiais como o carbono, possuem diversas formas de cristais, e uma dela é o diamante. Neste caso, a distância entre a camada de valência e a camada de condução é muito grande, e as camadas apesar de não serem preenchidas, não conduza eletricidade facilmente, pois nesse caso, o carbono forma ligações covalentes, o que faz com que o diamante seja um isolador, entretanto, outras formas de carbono são condutoras, isso faz com que o carbono seja considerado um semicondutor. Porém no caso do silício e do germânio, temos uma diferença energia entre camadas pequena, porém os elétrons na camada de valência e condução estão em menor quantidade se comparado a um condutor tradicional. Portanto, silício e germânio são considerados semicondutores pois eles sim conduzem eletricidade na presença de um campo elétrico aplicado mais facilmente que os isoladores, porém não tão eficaz quando os condutores, fazendo assim com que eles possuam dois estados, condutor e isolador.

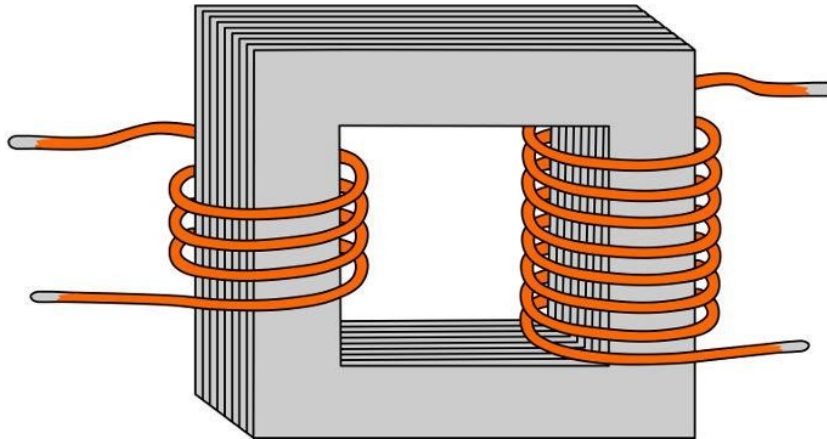
### **1.5. Transformadores Convencionais**

Agora voltaremos nosso estudo para o caso de transformadores convencionais. Estes dispositivos são fundamentais para o exercício da Engenharia Elétrica, eles são amplamente utilizados desde casos de Sistemas de Potência até casos de Microeletrônica.

O princípio de funcionamento de transformadores convencionais é eletromagnético, baseado nas leis de indução de Faraday. Nela, uma bobina que é chamada de enrolamento é conectada a um núcleo que possui um material magnético normalmente sendo ferro magnético, sendo induzida uma corrente alternada dentro desse enrolamento, produz uma variação de campo magnético passando através do núcleo e induzindo o que Faraday chamou de Linhas de Força, assim, induzindo um fluxo magnético dentro de núcleo. Empiricamente, o mesmo

processo acontece do lado do segundo enrolamento, esse pelo processo contrário, quando passa o fluxo magnético por ele, induz um campo magnético gerando uma corrente alternada em seu interior.

Figura 4 - Modelo de um Transformador hipotético



Fonte: (DESCONHECIDO)

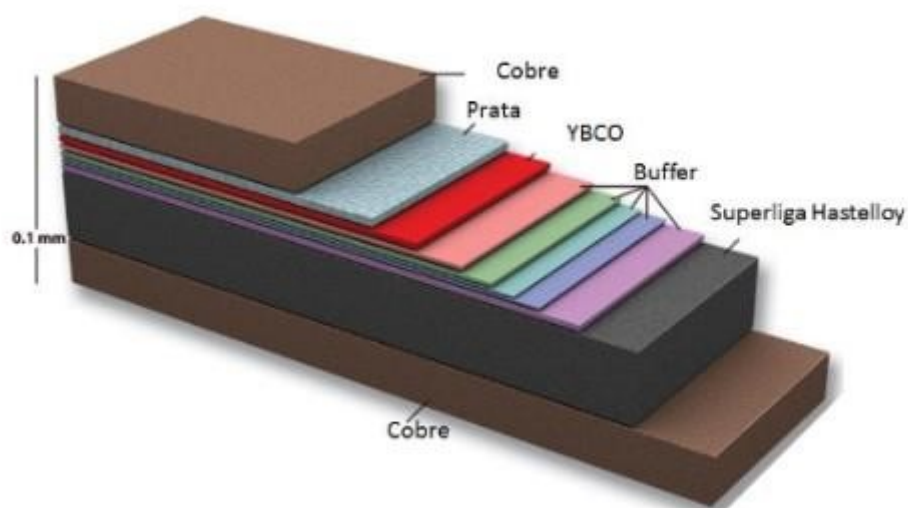
Quando falamos de uso de transformadores na área de Engenharia Elétrica, buscamos por 4 otimizações: Custo, Peso, Perdas e Volume. Dependendo da aplicação, cada uma delas podem ser mais importantes que a outra. No exemplo de utilização de transformadores de potência, buscamos a menor perda e custo possível e peso e volume ficam como otimizações secundárias. Entretanto, no caso de eletrônica, levamos em consideração de primeira mão, custo, peso e volume já que para baixas potências as perdas podem se tornarem secundárias, portanto, neste trabalho fazemos um estudo para todos esses casos, para que tenhamos uma melhor compreensão do impacto de usarmos transformadores supercondutivo.

## 1.6. Supercondutores

Sabemos que hoje em dia temos dois tipos de supercondutores comerciais, são eles os supercondutores de baixa temperatura ou do inglês LTS (Low Temperature Superconductor) e os supercondutores de alta temperatura ou do inglês HTS (High Temperature Superconductor). Os mais usualmente utilizados são os HTS, pois eles possuem menor requerimento de aplicações de resfriamento para que funcionem. Os supercondutores de alta temperatura são divididos em duas gerações, a diferença está em suas técnicas de fabricação e o valor deles, porém ambos são apresentados em fitas supercondutoras que são colocadas em cima de uma matriz, e aí vem a principal diferença. Os supercondutores de alta temperatura de

primeira geração ou BSCCO são supercondutores colocados em cima de uma matriz de prata, desta forma aumentando o valor econômico do material por volta de 183 Euros/kA metros conforme Innova Superconductor Technology Co. Ltda., outra limitação para a primeira geração de supercondutores HTS é que eles funcionam apenas em baixos campos magnéticos, aproximadamente 0.3 Teslas (SNITCHLER e colab., 2011). Já os supercondutores HTS de segunda geração ou YBCO são utilizados em blocos e fitas supercondutoras, o material supercondutor é colocado em uma matriz de materiais mais baratos, como uma liga de tungstênio-níquel ou a utilização de substratos metálicos conhecidos como Hastelloy, que serve para isolamento elétrico, como orientação dos átomos do supercondutor, resistência física e a corrosão.

Figura 5 - Uma fita supercondutora HTS 2G com camadas explicitadas



Fonte: (DESCONHECIDO).

### 1.7. Transformadores com Supercondutores

Os transformadores supercondutores como os transformadores podem variar em sua forma construtiva dependendo da sua aplicação. Há também casos que de existência de transformadores híbridos, sendo um dos enrolamentos feito de cobre e outro de fitas supercondutoras. Também pode se considerar o Efeito Meissner para o projeto de transformadores supercondutores, tendo em vista que a levitação devida a esse efeito pode ajudar na formação de entreferros para os transformadores. Tendo em vista tudo isso, devemos citar que além da temperatura crítica para o material entrar em estado supercondutivo, devemos

estar cientes que o supercondutor também possui uma corrente crítica de funcionamento, ou seja, a corrente máxima que um condutor admite sendo isso importantíssimo para considerações feitas no projeto do transformador supercondutor.

Hoje, já presenciamos a aparição de tecnologias de transformadores supercondutores em grande escala, não só acadêmica como industrial. Transformadores são as peças essenciais em subestações de energia elétrica, pesquisas já foram feitas em transformadores usando supercondutores de baixa temperatura em pequena escala com núcleo toroidal alcançaram dados superiores de eficiência comparado a transformadores convencionais (PI e colab., 2010). Porém pesquisas mais recentes costumam utilizar supercondutores de alta temperatura devido a corrente crítica intrínseca ser maior que as dos supercondutores de baixa temperatura e produzir menores perdas de corrente alternada (FUNAKI e colab., 2001). Várias outras topologias de transformadores HTS já foram produzidas, onde vale destacar (WANG e colab., 2007a) (GLASSON e colab., 2011). Estes estudos podem ser tanto quanto experimentais quanto teóricos e também há variações em meios que o transformador está inserido, como por exemplo (XIAO e LIN, 2007) Porém todos transformadores supercondutores da atualidade são com núcleo de ar, ou nitrogênio, e totalmente ou parte de núcleo de ferro, isto é, devido a que transformadores somente com supercondutores é uma ideia inviável tanto quanto eletricamente devido as perdas de corrente alternada como economicamente devido ao alto custo de materiais supercondutivos de alta temperatura, como visto em (KORSHUNOV e EREMIN, 2008).

Esta pesquisa é de grande prioridade para nossa área a quase duas décadas, tendo em vista da quantidade e qualidade de trabalhos já realizados e ainda sendo realizados. O intuito deste trabalho é acomodar uma forma de pensar que demonstra os prós e contras da tecnologia de transformadores supercondutores para um uso específico. O objetivo desses estudos é desenvolver tecnologias para todos tipos de áreas e a otimização do uso de transformadores, reduzindo custos e aumentando a eficiência desses casos. Transformadores supercondutores tem um futuro brilhante pela frente, podendo mudar a forma de uma gama de aplicações.

Países como a China já possuem desde a década de 1990 um esquemático de transformadores em estado experimental ou permanente, tendo até um programa governamental de suporte a pesquisa em supercondutores chamado de State 863 program (High Technology Research & Development Program) e a Chinese Academy of Science (CAS), onde já se mostram grandes ganhos com a sua utilização desta tecnologia (MALOZEMOFF e colab., 2002). Além de transformadores, supercondutores possuem várias outras áreas de pesquisas

como citado em (XIAO e LIN, 2007), cabos de transmissão, limitadores de corrente de falta e máquinas rotativas.



## 2. EQUIPAMENTOS QUE UTILIZAM SUPERCONDUTORES

### 2.1. Limitadores de corrente de falta

FCL – no inglês, Fault Current Limiter, são dispositivos usado em sistemas elétricos de potência para que funcionam com a capacidade de limitar a corrente durante uma falha no sistema. Desta forma, protege o sistema de potência sem ter que fazer o desligamento total dele, tornando assim o sistema com mais autonomia e menos tempo de manutenção. Uma das aplicações interessantes conforme (YASUDA e colab., 2005) é a prevenção de correntes de grande escala serem transmitidas ao sistema de potência e ao mesmo tempo não ter a necessidade de uma circuit breaker, ou seja, corte no abastecimento da linha de distribuição. Esses equipamentos tem uma grande capacidade de aumentar a eficiência, estabilidade e é uma grande nova área de estudo para os equipamentos de sistemas elétricos de potência.

Com o princípio de funcionamento de supercondutores sendo de que ele deve estar abaixo de uma temperatura para ser um supercondutor em si, o FCL usa esse princípio como vantagem, dessa forma, quando uma corrente de falta passa pelo FCL, esta normalmente está em escala muito maior que a corrente nominal de carga do dispositivo, desta forma, pela lei de Ohm, sabemos que uma corrente de grande escala passando por um condutor terá perdas térmicas de maior escala. Quando o FCL é colocado sobre uma corrente de falta ele aquece, então, por conseguinte, ultrapassa a temperatura crítica do seu supercondutor, desta forma reduzindo ou até interrompendo completamente (dependendo do material utilizado) a passagem de corrente por ele, desta forma, protegendo o sistema de possíveis problemas causados pela corrente de falta.

Cada vez mais, vemos a grande expansão das Smart-grids e das micro e minigerações distribuídas, estes dispositivos, tem a capacidade de se tornarem totalmente autônomos. Como seu funcionamento não necessita de intervenção externa direta em cada funcionamento, como por exemplo uma chave fusível, eles podem ser telecomandados e desta forma exigir apenas manutenções programadas ou pontuais em caso de falhas, como já é comum com todos dispositivos de Smart-grids. Outra vantagem do uso dos FCL é com o aumento do uso de micro e minigerações na ponta de carga do sistema de distribuição, temos um aumento do perfil de corrente de falta maior perto da carga, devido a esses sistemas de geração, desta forma, existe um problema onde os sistemas de distribuição atuais teriam que ser adequados para lidar com este problema, o FCL seria uma boa opção para limitar as correntes de falta e diminuir e até eliminar o dano causado a rede por corrente de falta.

### 2.1.1. Research & Development of Superconducting Fault Current Limiter in Japan (YASUDA et al., 2005)

Pesquisas na área, já estão sendo desenvolvidas a um bom tempo, por exemplo, em 2005 no Japão (YASUDA e colab., 2005), um grupo de pesquisadores do projeto Super-ACE, realizou vários estudos com diversos dispositivos como FCL, cabos de potência e transformadores com *high temperature superconductors* (HTS), supercondutores de alta temperatura.

Esse programa nacional japonês começou em 2000 e, comissionada pela NEDO (*New Energy and industrial technology development organization*) para a *Super-conductive Generation Equipment and Materials* (Super-GM), como parte do Ministério da Economia, Negócios e Indústria (METI).

Dois tipos de FCL foram desenvolvidos tipo SN FCL com uma transição super-normal de fitas de HTS, e um FCL tipo retificador que é combinado com um circuito ponte de retificação de uma bobina de HTS que consiste de lâmina de fita de Bi2223.

Para o uso do SN FCL foi usada uma técnica de manufatura chamada PDL (*Pulse laser deposition* – Deposição à pulsos de laser) que consiste de uso de distribuir o substrato em duas direções que passam em ângulos retos na pluma de plasma. Esta técnica foi utilizada por que para usar o escalamento do material basta aumentar o equipamento. Os resultados do uso dessa técnica em filmes de fina camada de HoBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (de 1cmx6cm) (HoBCO)/(CeO<sub>2</sub>) /safira com uma boa reprodutibilidade.

Para o aumento da capacidade de carregamento de corrente, foi proposto o uso de um arranjo poligonal do elemento, para suprimir a distribuição de correntes não uniformes ao longo dos elementos e dentro dos elementos.

O primeiro teste de operação normal do FCL foi feito com seis módulos de FCL conectados em paralelo, onde o espaço utilizado era de 1/5 do arranjo em plano. Sobre operação normal os 380Arms foi possível com essa configuração e filmes de 1cm de largura de YBCO. Após isso, foram realizados testes com filmes de YBCO de 3cm e 5cm de largura onde a transição em condução normalmente não foi uniforme na direção longitudinal. Ainda mais, foram feitos de operação AC e *inrush* nesses filmes maiores e foi percebido que a alimentação AC era estável, porém a distribuição de corrente ao longo do filme foi observada como não uniforme. Além do mais, as perdas aumentaram conforme a largura do filme aumenta.

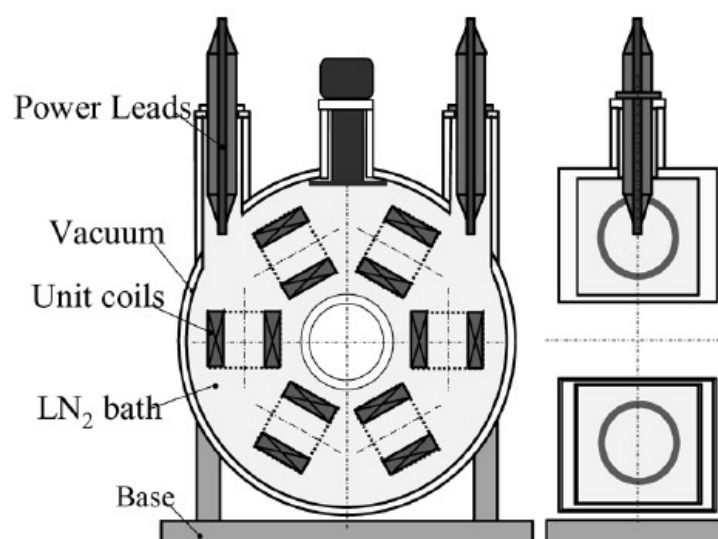
Foi manufaturado um modulo de FCL com quarenta elementos conectados em série, entrando na classe de 6,6kV. Este modulo aguentou tensões de pico de até 11.9kV e diminuiu a

corrente de curto circuito de 3,5kA para menos de 600A. Além disso, foram feitos testes em sistemas de potência onde demonstram que as capacidades de limitação de corrente deste dispositivo tipo SN FCL em simulação de falta de geradores de 6.6kV teve um tempo de recuperação de 1 minuto, de circuito aberto até o fechamento de circuito, o que está dentro dos normais de operação nominal. Desta forma podemos ver que a utilização do FCL supernormal está dentro dos padrões e é de certa forma interessante para a indústria de sistemas elétricos de potência.

Outro tipo de FCL testado pelo mesmo grupo japonês (YASUDA e colab., 2005) (YASUDA e colab., 2005) (YASUDA e colab., 2005) foi um tipo retificador FCL imã, com o alvo para classe 66kV, operando a partir de HTS Bi2223 na temperatura de 65K.

Conforme a figura 6 abaixo:

Figura 6 - Tipo retificador FCL imã



Fonte:(YASUDA e colab., 2005)

Nela podemos verificar o uso de seis unidades de enrolamentos conectados em paralelo e arranjadas em um set toroidal que é usado para reduzir o componente perpendicular do campo magnético na superfície larga do supercondutor, inseridos dentro de um banho de nitrogênio líquido a 65K. O equipamento foi feito para trabalhar em 66kV e 750A, cada unidade de enrolamento funciona a 66kV e 125A e em projeto são quatro fitas PFV isoladas paralelamente de Bi2223 em bobinas de oito camadas FRP que são transpostas apenas nas partes internas de conexão. O imã foi fabricado por FY2003 e foram feitos testes de qualidade, como: Teste de resfriamento, teste de operação DC, teste de operação AC, teste dielétrico, simulação simultânea

de operação de corrente e tensão e teste de curto circuito. Os resultados são mostrados abaixo na tabela 1.

Tabela 1 – Teste com alvos e resultados para testes do imã 66kV/750A

ITEM	VALOR PROJETADO	RESULTADO
Resfriamento	70K a 100kPa	65K a 100kPa
Performance dielétrica	AC 140kV	AC 140kV (terminal-terra)
	Impulso relâmpago 350kV	Impulso relâmpago 350kV (terminal-terra, entre terminais)
Operação corrente contínua	750A a 70K	750A a 70K (terminal-terra, entre terminais)
Operação corrente alternada	750A/5ms	750 a 50Hz
Aplicação simultânea de alta tensão e corrente	38kVrms/500A	38kVrms/500A
Teste de curto circuito	38kVrms (alvo não obrigatório)	Há ser realizado

Fonte:(YASUDA e colab., 2005)

Podemos ver que os testes realizados para este dispositivo mais que o SN FCL são bem promissores também, demonstrando que nesta área diversas formas de aplicação podem ser utilizadas, como poderemos ver logo mais.

#### **2.1.1.1. Discussão sobre o artigo Research & Development of Superconducting Fault Current Limiter in Japan(YASUDA et al., 2005)**

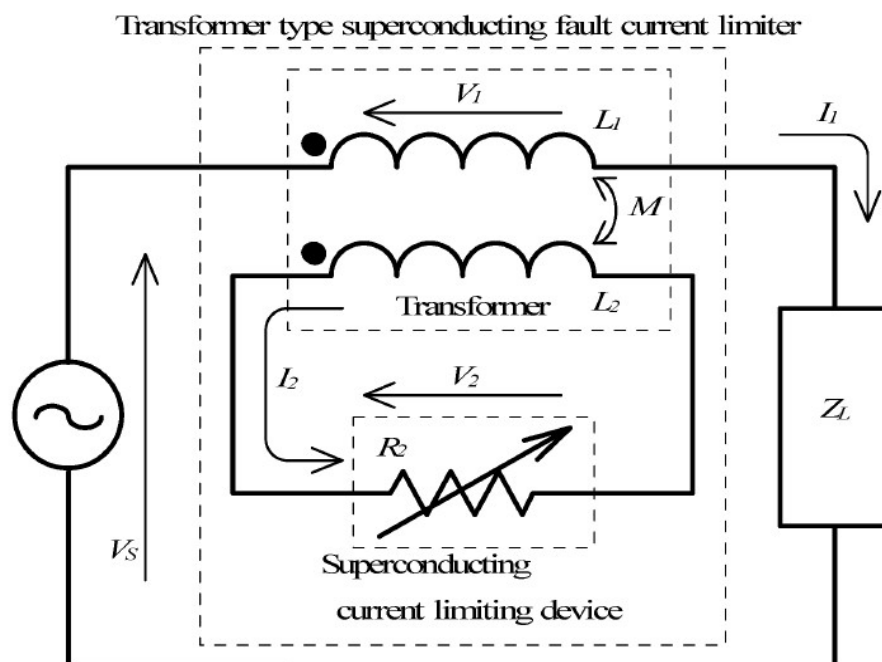
Podemos assertar que com estas bibliografias, poderíamos sugerir melhoras no projeto. Desta forma em (YASUDA e colab., 2005) os testes realizados são bem conclusivos e encontram entre os valores projetados, porém seria interessante a realização dos testes de curto circuito para analisarmos se a tecnologia aplicada seria útil. Vale destacar também, que seria interessante o uso deste sistema não só em laboratório, mas como em uso real, durante um período de tempo razoável para avaliarmos a confiabilidade do sistema em aplicação real.

Também é necessário para o uso real, uma análise financeira de tal projeto, citando valores, para este projeto. Uma mudança de projeto interessante seria o uso de supercondutores tanto no primário quanto no secundário, pois dessa forma o sistema seria mais fácil de construir, tendo em vista que todo ele ficaria imerso dentro da mesma cápsula e não haveria tantas restrições de projeto devido as conexões. Também pode ser observado que tendo em vista o uso laboratorial e experimental, o sistema é bem simplista, porém aplicações no uso real teríamos dificuldades, devido ao porte da estrutura e sua relativa baixa capacidade de limitação de corrente, observado que há topografias que melhor fazem esta limitação.

### 2.1.2. Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter (YAMAGUCHI et al., 2005)

O uso de limitadores de corrente de falta pode ser aplicado de variadas formas, como podemos ver em (YAMAGUCHI e colab., 2005) onde os autores usaram o FCL junto ao enrolamento do transformador. Desta forma o primário de diversos transformadores foi conectado numa rede de distribuição e o secundário do transformador é curto circuitado no limitador de corrente de falta supercondutivo, como podemos ver pela figura 7.

Figura 7 – Transformador com FCL.

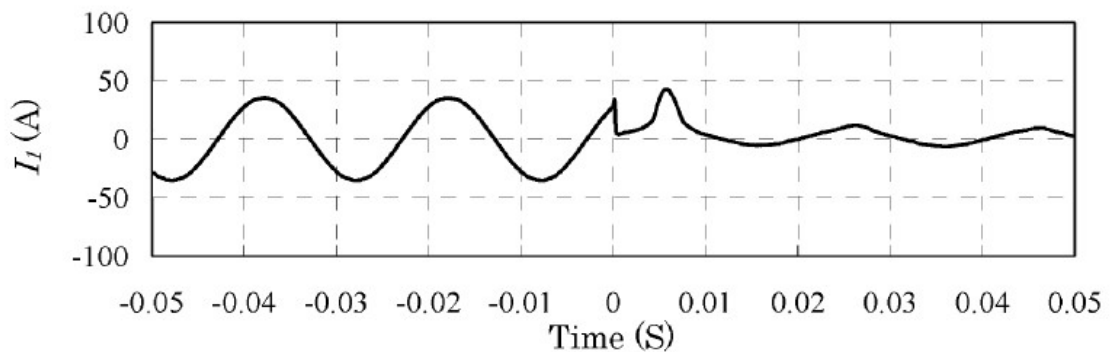


Fonte: (YAMAGUCHI e colab., 2005)

Com essa configuração, podemos observar que o R2 representa a resistência variável do FCL, desta forma, podemos concluir que quando o supercondutor está no seu estado normal sua resistência é zero, e quando ele sofre os efeitos de uma corrente de falta, sua temperatura aumenta e sua resistência aumenta proporcionalmente. As vantagens desse aparato citadas pelo autor são a grande flexibilidade de projeto desse equipamento, a isolamento entre o FCL e a linha de transmissão e a redução de perda de calor pelo FCL.

Através do uso de um TRIAC ativado em  $t=0$ , os autores usaram um sinal de corrente de falta no Vs e analisar os resultados que o limitador de corrente teria na corrente de linha da carga Il, desta forma, notamos que há distorção na corrente quando o TRIAC é ativado, devido ao tempera do supercondutor durante os primeiros instantes de carregamento, um fenômeno conhecido em maquinas elétricas e transformadores.

Figura 8 – Corrente de linha da carga com ativação do FCL em  $t=0$ .



Fonte: (YAMAGUCHI e colab., 2005)

Após a ativação do FCL no sistema, temos um tempo onde a corrente realiza um pico, isso é um fenômeno conhecido chamando *quench* (no português – tempera), que é o tempo que o supercondutor leva para aquecer o suficiente e quebrar as ligações supercondutivas internas. Desta forma podemos ver que após o quench, o dispositivo funciona como o esperado e realiza a limitação da corrente corretamente.

#### 2.1.2.1. Discussão sobre o artigo **Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter** (YAMAGUCHI et al., 2005)

Em (YAMAGUCHI et al., 2005) mais uma vez nos deparamos com uma topologia simples que pode ser usada em conjunto com transformadores convencionais, o que em si é uma ideia muito atrativa. Como podemos ver pelos resultados, o FCL faz seu papel muito bem,

porém com um uso de um dispositivo similar conectado no primário do transformador, encontraríamos resultados razoavelmente melhores, tendo em vista que a redução da corrente aconteceria tanto no primário quanto no secundário. Também podemos destacar a distorção na corrente devido a tempera do supercondutor, esse é um problema no projeto pois ele não leva em consideração uma solução para isso, com um *cryocooler* com maior capacidade poderíamos reduzir a temperatura interna no supercondutor, fazendo com que a quantidade de energia necessária para quebrar o calor latente neste seja maior, causando num menor aquecimento do supercondutor durante a tempera e o funcionamento mais suave de tal. Outra solução razoável seria a introdução de um método de controle para realizarmos o controle da corrente de *inrush* para que o supercondutor não seja estressado durante a tempera, desta forma poderíamos obter uma curva de corrente menos abrupta. Podemos também assertar que: em futuros trabalhos seria interessante o uso desta topologia de FCL em diversos tipos de transformadores para podermos analisar como este se comporta em situação diferentes de carregamento de carga, de correntes de falta e de testes de isolamento à impulso relâmpago. Podemos também considerar que estes testes poderiam ter sido realizados em situação mais adversas, para analisar possíveis quebras e falhas no sistema, para avaliar sua confiabilidade em aplicação de mundo real.

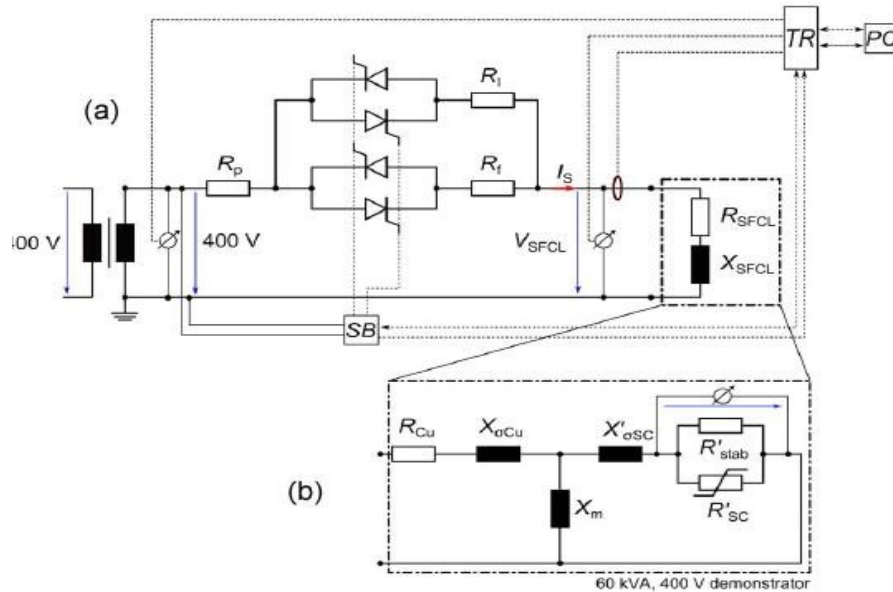
### **2.1.3. Design and Test of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter Demonstrator(NAECKEL; NOE, 2014)**

Outra metodologia usada em (NAECKEL e NOE, 2014), é o projeto de um FCL com bobina de ar ou ACSFCL, a grande vantagem dessa tecnologia é que não usa um núcleo de ferro usado em FCL indutivos, o que reduz peso e custo e também omite os condutores de corrente que é usado em FCL resistivos. Como mostrado em (YAMAGUCHI e colab., 2005) foi feito um projeto de um AC-SFCL de 60kVA, 400V e  $z=6\%$ . Este projeto consiste de um enrolamento primário de cobre e um enrolamento secundário de supercondutores, com esse projeto temos que a impedância de referência é menor que 1% durante operação normal, sendo possível o uso de diversos tamanhos. Neste artigo (KOZAK e colab., 2012) foram feitos um demonstrador para trabalhar com ambos enrolamentos inseridos em nitrogênio líquido a 77K com dimensões de altura total de 34cm, altura do enrolamento de 27,5cm, diâmetro exterior de 49,4cm, diâmetro interior de 48cm, número de voltas do enrolamento primário de 34, e a distância entre voltas de 6mm. Com propriedades elétricas calculadas resistência do primário de cobre de 18mOhm em temperatura ambiente e 2.6mOhm a 77K, reatância stray do primário de 11mOhm, reatância principal de 155mOhm, Reatância stray do secundário de

6.9mOhm, reatância secundária de 208mOhm, impedância durante a falta de  $(74+110i)$ mOhm ou 4.81%, impedância durante operação normal  $(2.6+18i)$ mOhm ou 0.68%.

Os testes utilizados foram feitos com um circuito de medição, ilustrado na Figura 9 (a), o demonstrador em si é representado na Figura 9 (b).

Figura 9 – Esquemático de testes para o AC-SFCL (NAECKEL e NOE, 2014)



Fonte: (NAECKEL e NOE, 2014)

Foram usados dois braços com tiristores antiparalelos para poder ser feita a liberação de corrente nominal e corrente de falta a específicos ângulos de fase e por uma especificada duração de meio ciclo, podendo assim analisar-se os ciclos negativos e positivos das correntes nominais e de falta. A medição em cima foi feita por um PC conectado ao sistema por um gravador transiente. Foram feitas duas medições (A) com  $I_f=3 \cdot I_n$  e (B) com  $I_f=17 \cdot I_n$  e foram observadas que durante operação sob falta a corrente de pico foi limitada em 6,1% no primeiro meio ciclo e 7,5% no segundo meio ciclo para (A). Durante a operação sob falta a corrente de pico foi limitada em 31,8% no primeiro meio ciclo e em 42,2% no segundo meio ciclo para (B). Isso demonstra que as capacidades de limitação de corrente no primeiro meio ciclo são basicamente a mesma que a um reator *shunt* em temperatura ambiente, e no segundo meio ciclo e adiante a capacidade de limitação de corrente deste dispositivo aumenta, através do aquecimento das fitas de supercondutores.

Com tais medições foi possível acertar que a impedância equivalente durante o primeiro meio ciclo foi de 3% e a impedância equivalente durante o segundo meio ciclo foi de 4,2%.



Isso demonstrou um erro de projeto que possivelmente é devido a variação de temperaturas das fitas supercondutoras durante a tempera.

#### **2.1.4. Discussão sobre o artigo Design and Test of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter Demonstrator(NAECKEL; NOE, 2014)**

Como visto em casos anteriores (YAMAGUCHI et al., 2005) e em (YASUDA et al., 2005), em (NAECKEL e NOE, 2014) o maior problema da tecnologia é a tempera do supercondutor durante os estágios iniciais de funcionamento. Como mencionado acima, as soluções são variadas, mas é proposto o uso de *cryocoolers* mais eficazes para reduzir o aquecimento do supercondutor durante a tempera, desta forma reduzindo as distorções de corrente e as perdas por efeito ôhmico. Bem como o uso de métodos de partida, suavizando a corrente de *inrush* no supercondutor, fazendo com que o mesmo não tenha este problema de aquecimento durante a tempera. Podemos analisar também que as perdas foram altas comparadas a outras topologias, indicando que o projeto em si pode não ser tão interessante quanto outras topologias.

#### **2.1.5. Discussão geral sobre os artigos de Limitadores de Corrente de Falta**

Podemos ver que foram apresentadas diversas topologias de tecnologias para realizar este dispositivo de limitação de corrente de falta, entre eles, todos apresentaram problemas na tempera do material supercondutivo logo após a falta, isso evidencia uma necessidade maior de estudo para solucionar esse problema, como métodos suavizadores para a tempera menos abrupta do supercondutor e o uso de *cryocoolers* de maior eficiência. Desta forma, entre todas topologias, a que melhor apresentou resultados, dos seus problemas foi a de (YAMAGUCHI et al., 2005), isso devido ao fato de ser uma tecnologia relativamente simples, ou seja, com facilidade de escalonamento da produção com resultados razoáveis quando estressada, tendo em vista que ela possui o problema de pico na corrente durante os primeiros instantes de operação, porém o tempo deste pico é pequeno. Desta forma, se torna relevante o estudo futuro de viabilidade econômica do projeto, para uso em subestações.

## 2.2. Transformadores com enrolamentos supercondutores

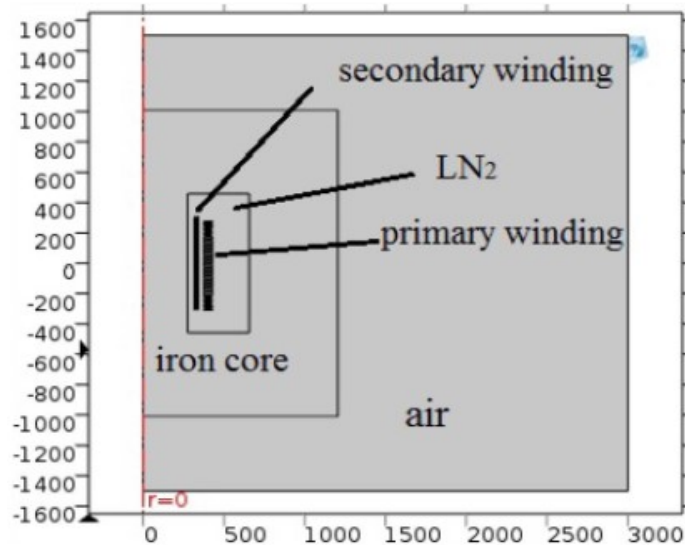
### 2.2.1. Dynamic Analysis of Transformers with Second-Generation High-Temperature Superconductors (LIU et al., 2016)

Uma das aplicações possíveis de HTS são os transformadores, quando um transformador supercondutor é colocado num sistema de potência e é colocado sobre casos comuns como falta e sobrecarga, a temperatura dos componentes internos mudam e com isso as características de funcionamento do transformador.

Em (LIU e colab., 2016) foram usados um *software* de simulação chamado COMSOL multiphysics para fazer uma análise dinâmica de circuito elétrico, campo magnético e transferência de calor. Um projeto conceitual de um transformador com 110kV com YBCO foi proposto pelo *China Electric Power Research Institute* e o artigo (LIU e colab., 2016) fez a análise térmica e magnética desse HTS durante a condição transiente de sobrecorrente, baseado numa análise de método de elementos finitos em 2D. O transformador em questão possui 25MVA, tensões de 110kV/10.5kV, correntes do primário e secundário de 131A/794A, frequência de 50Hz, 3 fases, conexões Yd11, impedância de curto circuito de 10,4% com núcleo de material 30QG105 e densidade de fluxo magnético de 1,6T. O enrolamento de alta tensão foi fabricado com 756 de fita YBCO com uma corrente crítica de 280A, o enrolamento de baixa tensão foi fabricado com 3 camadas de 42 voltas por camada de cabo de YBCO Roebel, totalizando 126 voltas e com corrente crítica de 1043A. Na figura 10, podemos ver o projeto realizado no *software* Maxwell ANSYS pelo autor.

Para a investigação dinâmica do processo elétrico, foi utilizado um modelo padrão de transformador com V1 e I1 como tensão e corrente do primário, V2 e I2 como tensão e corrente do secundário e uma carga Rl, tendo em vista isso, foi solucionado a partir de Método de Elementos Finitos, pela combinação das leis de Kirchhoff e Maxwell. Inserindo distintos tempos de curto circuito e de impedâncias, diferentes magnitudes de corrente de falta foram atingidas.

Figura 10 – modelo do transformador usado em (LIU e colab., 2016).



Fonte: (LIU e colab., 2016)

Para a solução de distribuição de temperatura um domínio foi definido primeiro. Como o núcleo de ferro foi desconsiderado devido ao projeto da figura 10, pois o comportamento do núcleo já possui resultados esperados tendo em vista que é um núcleo relativamente convencional em transformadores, também tendo em vista que apenas os enrolamentos são supercondutivo, e este é o objetivo deste artigo, porém para uma análise mais completa seria necessário inserir estes dados do núcleo para podermos calcular perdas e eficiência do transformador durante o uso algo que o autor não o faz. Desta forma somente os enrolamentos foram considerados. Cada linha dentro da janela do núcleo foi tratada com um limite de condição adiabática, ou seja, só foram consideradas trocas de calor dos enrolamentos com o nitrogênio líquido, sem consideração perdas por radiação ou transferência do recipiente para a temperatura do ambiente. Como o estudo foi realizado com faltas de 1s assume-se que a corrente flui através das camadas de prata e cobre estabilizador, utilizando padrões da norma IEC-60076-520 Power Transformers- Part 5: Ability to withstand short circuit, que se lê que um transformador convencionalmente durante uso só experencia correntes de falta por 1s ou menos, foi escolhido pelo autor este tipo de análise que foi feita com um relé que desliga a falta após 1s.

Resultados mostram, que quando faltas ocorrem no enrolamento secundário ou na carga, a magnitude da corrente é determinada pela impedância e o tempo de falta, está alcançou 8 vezes a corrente nominal, ou seja, 6,8kA. A análise térmica mostra que durante a falta a maior temperatura ocorreu durante no instante 1s, superior a 140K, isso devido a capacidade calorífica

de o nitrogênio líquido ser de  $1.992 \times 10^3 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$  a 77K, sendo assim, mostrando que o nitrogênio não possui neste caso, capacidade calorífica suficiente para manter a temperatura a 77K quando exposto a correntes de falta, logo pode se extrapolar e se dizer que a temperatura dentro do recipiente seria maior caso a falta fosse de maior tempo ou maior amplitude. Porém, vê-se que a distância entre os enrolamentos ajudou na melhor refrigeração. Também se percebe que a corrente em 1s chega a apenas 1kA, provando o porquê HTS são usados em limitadores de corrente. Provando que não só a impedância, mas também o tempo de falta podem gerar resultados variantes na corrente de falta.

Tendo em vista que os testes foram realizados para faltas de apenas 1s, seria interessante realizar este teste com correntes de falta com maiores tempos e amplitudes, já que ocasiões fora da norma podem acontecer. Também seria interessante realizar testes de confiabilidade do projeto em situações de estresse, como funcionamento com sobrecarga, resistência a impulsos de relâmpagos e mudanças repentinas de carga. Como já mencionado acima, vale a pena realizar o estudo de perdas totais do sistema e de eficiência energética, tendo em vista que essas são as maiores vantagens do uso da tecnologia supercondutora em transformadores, isto poderia ser realizado usando o cálculo das perdas do núcleo conhecido somado com as perdas do enrolamento e outras perdas, para assim realizar o cálculo da potência disponibilizada final. Uma vantagem dessa tecnologia é a proximidade do primário e do secundário fazendo com que o acoplamento magnético seja de um valor mais próximo a 1 e assim aumentando a eficiência do transformador. Outra vantagem é ambos os enrolamentos estarem submersos em nitrogênio líquido assim projetado para ambos serem supercondutores e obterem menos perdas, com a contrapartida de possuir um valor mais elevado nos enrolamentos e necessitar um resfriamento de maior capacidade por ser mais complexo de em natureza a topologias mais simples.

#### **2.2.1.1. Discussão sobre o artigo Dynamic Analysis of Transformers with Second-Generation High-Temperature Superconductors (LIU et al., 2016)**

Tendo em vista que os testes foram realizados para faltas de apenas 1s, seria interessante realizar este teste com correntes de falta com maiores tempos e amplitudes, já que ocasiões fora da norma podem acontecer. Este fato também seria interessante realizar testes de confiabilidade do projeto em situações de estresse, como funcionamento com sobrecarga, resistência a impulsos de relâmpagos e mudanças repentinas de carga. Como já mencionado acima, vale a pena realizar o estudo de perdas totais do sistema e de eficiência energética, tendo em vista que

essas são as maiores vantagens do uso da tecnologia supercondutora em transformadores, isto poderia ser realizado usando o cálculo das perdas do núcleo conhecido somado com as perdas do enrolamento e outras perdas, para assim realizar o cálculo da potência disponibilizada final. Uma vantagem dessa tecnologia é a proximidade do primário e do secundário fazendo com que o acoplamento magnético seja de um valor mais próximo a 1 e assim aumentando a eficiência do transformador. Outra vantagem é ambos os enrolamentos estarem submersos em nitrogênio líquido assim projetado para ambos serem supercondutores e obterem menos perdas, com a contrapartida de possuir um valor mais elevado nos enrolamentos e necessitar um resfriamento de maior capacidade por ser mais complexo de em natureza a topologias mais simples.

### **2.2.2. Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores (WANG et al., 2007a)**

Em Wang 2007 (WANG e colab., 2007b) tem-se o projeto e operação de um transformador trifásico com 630kVA 50Hz. Este é mergulhado em um tanque de nitrogênio líquido a 77K, com tensões de 10,5kV e 34,64A no primário e 0,4kV e 909,33A no secundário. Nele foram usados enrolamentos aço inox hermético com fitas de Bi2223/Ag multifilamentar tendo o primário o formato de um solenoide e o secundário de panqueca dupla “double-pancake”, o núcleo foi feito de material comercial de ligas amorfas, o criostato usado também foi um já usado comercialmente pela Tebian Electric Apparatus Stock Co. LTDA, que já estava operando em campo antes dos testes.

O projeto foi desenvolvido pela *Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences*, junto com a *TBEA industrial transformer group*. Para os filamentos a média de secção transversal é de  $5,27 \times 0,78 \text{ mm}^2$  incluindo isolação, sem isolação ficaria em  $4,8 \times 0,31 \text{ mm}^2$ , com corrente crítica de  $115^a$  à 77K. O primário possui 8 camadas com canais de resfriamentos na longitudinal, e o secundário são 23 panquecas duplas conectadas em paralelo, cada uma com 5 camadas. As tabelas 2 e 3 mostram mais especificações do projeto.

Tabela 2 – Especificação dos enrolamentos

PARAMETROS	VALOR PROJETADO	UNIDADE
Enrolamento primário Tipo de enrolamento	solenóide	-
Número de camadas	8	-
Número de voltas	262	-
Diâmetro (interno/externo)	488/504	mm
Altura	342.5	mm
Secção transversal dos três canais de resfriamento	10x0.2	mm <sup>2</sup>
Enrolamento secundário Tipo de enrolamento	Panqueca dupla	-
Número de panquecas	23	-
Voltas em cada panqueca	10	-
Diâmetro(interno/externo)	581/608	mm
Altura	355	mm

Fonte: (WANG e colab., 2007b)

Tabela 3 – Principais parâmetros de projeto do transformador

PARAMETROS	VALOR PROJETADO	UNIDADE
Tensão (primário/secundário)	10.5/0/4	kV
Corrente (primário/secundário)	34.64/909.33	A
Núcleo de ferro Diâmetro Altura (Hw) Largura (M0)	396 870 780	Mm Mm Mm
Densidade de fluxo magnético	1.275	T
Criostato Diâmetro interno/externo Altura	410/760 680	Mm Mm
Temperatura de operação	77	K
Frequência de operação	50	Hz
Impedância Xcc	2.45%	-
Grupo vetor	Yyn0	-
Impulso de tensão	75	kV
Corrente de curto-circuito repentina	25 vezes a corrente nominal	-

Fonte:(WANG e colab., 2007b)

Nele foram realizados testes, entre eles testes em circuito aberto, em curto circuito e foi também operado em uma rede de potência num centro de testes.

Para os testes em aberto, o secundário foi excitado a 400V e a correntes de excitação foi de 1,16% em operação nominal para a perda em aberto 0,01% maior do que o esperado, entretanto dentro do esperado, essa perda foi atribuída ao núcleo, portanto, 1090W, com o esperado sendo 1034W. A densidade de fluxo magnético do núcleo de ferro foi de 1,275T em operação nominal. Com um coeficiente de transformação de 26,25 igual ao esperado e a isolação entre primário e secundário foi de 10GOhm, ou seja, dez vezes maior que o padrão nacional

chines. Os testes foram feitos num total de 16 horas sem falhas, provando a confiabilidade e segurança do projeto conforme os autores, foi observado um ruído de apenas 65dB, abaixo do padrão nacional chinês. Tendo em vista a operação de só 16hrs deste projeto, podemos analisar que seria necessário com maior número de horas para termos certeza que o projeto é confiável, tendo em vista que transformadores são projetados para trabalhar durante anos em sua respectiva aplicação.

Para os testes de curto circuito, foi inserida uma corrente de 34,64A por 45 horas, com a impedância esperada sendo de 2,5% para operação nominal. As perdas CA foram calculadas usando o método padrão e o resultado foi de 174,8W. As perdas CA no enrolamento de HTS, que são basicamente acoplamento e correntes parasitas e foram estimadas em 110,7W, junto com outras o valor calculado foi de 121,8W no nitrogênio líquido.

Também foram realizados testes de sobre carga de 120% durante duas horas e de 150% durante 30s, em nenhum dos testes foi observado dano, tanto elétrico quanto mecânico as estruturas. Outro teste foi o de falta por raios, onde o secundário foi curto circuitado e aterrado junto com o núcleo, foram feitos quatro impulsos de 75kV, 105kV, 125kV e 155kV, os resultados mostraram que não houve nenhuma destruição das estruturas, provando assim a robustez do projeto.

Foram observadas as temperaturas durante um teste em aberto durante 14horas, as temperaturas do núcleo se manterem constante em 52°C, o lado do secundário trabalhou com temperaturas tão baixas quanto -23°C, devido a pequena corrente de excitação e pequena condução de calor na secção transversal. As temperaturas se tornam constantes após 6 horas.

Também foram feitos testes de operação em um sistema de potência real autorizado pela *China National Transformer Quality Supervision Testing Center* na cidade de Changji. A operação foi realizada em 2005, para realiza-la, foram feitas diversas medidas de segurança adicionais para o uso deste transformador, como o uso de relés que atuam em 100ms, tanque de nitrogênio com 6m<sup>3</sup> disponíveis, capacidade acima da necessária para compensar possíveis vazamentos e evaporação causadas pelas perdas de corrente alternada. Este teste teve operação por 60 dias, durante esses dias houveram vários níveis de perfil de carga que o transformador estava diretamente conectado ao sistema de potência, e durante toda operação não foi observado falha, também não houve necessidade de manutenção especial, sendo mantido da mesma forma que um transformador convencional.

Com essa operação foram possíveis estimar os valores de perda no núcleo e perdas de corrente alternada no enrolamento supercondutivo, desta forma sendo possível estimar a



eficiência energética do transformador em 98,5%. Vale destacar, que é aconselhável manter a refrigeração do criogênico abaixo de 77K para uso, para evitar possíveis problemas.

### 2.2.3. Development of a 1250-kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation

Em outro estudo interessante (DAI e colab., 2016), foi realizado o projeto e a fabricação de um transformador trifásico 1250kVA/10,5kV/0,4kV com uma fita multifilamentar de Bi2223/Ag com alma de liga de cobre. Os dados deste projeto são apresentados na Tabela 4, bem como na Tabela 5, onde se encontra os parâmetros de datasheet dos materiais utilizados.

Tabela 4 - Parâmetros do transformador supercondutor

ITEM	VALOR PROJETADO
Número de fases	3
Capacidade nominal	1250kVA
Frequência nominal	50Hz
Tensão nominal (primário/secundário)	10.5kV/0.4kV
Corrente nominal (primário/secundário)	69A/1804A
Conexão	Y-Y
Impedância	6%
Temperatura de operação	77K em nitrogênio líquido

Fonte: (DAI e colab., 2016)

Tabela 5- Parâmetros de datasheet dos materiais

ITEM	VALOR
Coeficiente adicional	1.2 (junta mitrada)
Perda no núcleo (W/kg)	0.62 a 1.49T
Peso total do núcleo (kg)	3244
Peso da perna do núcleo (kg)	1281
Peso da junção do núcleo (kg)	1624
Peso do canto do núcleo (kg)	339
Coeficiente crescente	4 (junta mitrada)
Número total de junções	8 (3 pernas trifásico)
Unidade de magnetização (VA/kg)	0.878 (B27R085 a 1.49T)
Junção de magnetização (VA/cm <sup>2</sup> )	1.93 (B27R085 a 1.49T)
Capacidade nominal (kVA)	1250

Fonte:(DAI e colab., 2016)

O transformador atua dentro de um banho de nitrogênio líquido a 77K. este transformador foi desenvolvido com um núcleo do transformador de uma camada de silicone e ferro conhecida comercialmente como B27R085 da Baosteel. A perda garantida do núcleo é de 0,85W/kg a uma indução magnética de no máximo 1,7T na frequência de 50Hz, possuindo as características na Tabela 6.

Considerando as capacidades de potência por perna do transformador de 417kVA, e o diâmetro do transformador, podemos aferir os enrolamentos como 10/262 sendo respectivamente baixa e alta tensão. Pelo método convencional podemos calcular, portanto, a corrente porcentual do ensaio em aberto.

$$I_0\% = \frac{\left( (G_{zh} + G_e + G_{\Delta} + K_{\Delta}) * q_{tx} + \sqrt{2} * S_{zh} * n_j * q_j \right)}{10 * P_r}$$

Que foi de  $I_0\% = 0,28\%$  e, portanto, uma potência de circuito aberto de  $P_0 = K_{p0} * p_{tx} * G_{tx}$ , desta forma obtendo um valor de 2210W.

Com isso temos os dados gerais do projeto informados na tabela 6:

Tabela 6 – Características do núcleo

ITEM	VALOR PROJETADO
Tipo	Três pernas trifásico
Material	Aço silício orientado a grão
Diâmetro	310mm
Secção de área efetiva	698.3mm <sup>2</sup>
Tamanho da janela	810mm
Distancia central entre pernas	770mm
Densidade de fluxo	1.49T
Tensão por volta	23.09V
Peso	3244kg
Perdas a vazio	2210W

Fonte: (DAI e colab., 2016)

Os enrolamentos foram construídos em solenoide para o primário e panqueca dupla para o secundário, e foram submetidos sob simulações no *software* ANSYS, onde demonstrou que entre os fluxos magnéticos radiais e axiais apresentam aproximadamente 65,8mT e 42,4mT, respectivamente. Portanto a corrente de uma única fita de supercondutor é no máximo de 90A.

Foram feitos testes de circuito aberto, de curto circuito, de resistência a tensão de corrente alternada e testes de surto elétrico.

Nos testes de circuito aberto, o transformador ficou com os enrolamentos completamente imersos em nitrogênio líquido por mais de 24h. O transformador foi excitado para uma corrente de 0,254% do nominal, com o secundário a 400V/50Hz. Produzindo uma perda a vazio de 2319,2W.

Para os testes de curto-circuito foram usados os métodos convencionais onde o primário foi excitado a 69A/50Hz por 24h. De acordo com o teste a impedância de curto circuito sob

condições nominal foi de 5% totalizando uma perda média de 249,6W, incluindo todas perdas. Portanto, para calcular a resistência real do enrolamento é necessário realizar o cálculo de perdas nos “leads”, para isso calculamos a resistência de corrente contínua sob a temperatura de 77K chegando ao resultado de 2,032mOhm e 15,9μOhm para primário e secundário por fase, portanto as perdas são de 16,8W e 89,6W, respectivamente. Logo diminuindo as perdas dos *leads* pelas perdas totais em circuito, chegamos à perda de 143,2W para o enrolamento, o que comparado a transformadores convencionais é um valor baixo.

Para o teste de isolamento, foram usados os seguintes parâmetros para a análise da isolação: 35kV/50Hz por 1 minuto e de um impulso de 75kV. Desta forma foi observado que não houve quebra das ondas de nível inteiro na isolação do transformador.

Após atestados os resultados em laboratório, os pesquisadores levaram o transformador para trabalhar numa subestação onde este ficou conectado a um limitador de corrente supercondutivo em ponte, onde são conectados por cabos serial supercondutivo de 10,5kV, e a saída é conectada a um sistema de potência a 0,4kV. O equipamento foi responsável por suprir a energia para 3 clientes. Como o número é reduzido de clientes e a carga de cada cliente varia com os horários, os carregamentos do transformador oscilam entre 10% a 60% do nominal. De acordo com as operações o transformador consome uma média de 300 litros de nitrogênio líquido por dia para o funcionamento nesses casos, tendo em vista que a vaporização de calor latente do nitrogênio líquido é 5.56kJ/mol e as perdas térmicas do transformador é de 556W. O teste durou 113 dias e demonstra o uso real de transformadores com supercondutores no uso real.

#### **2.2.3.1. Discussão sobre os artigos Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores e Development of a 1250-kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation (DAI et al., 2016; WANG et al., 2007b)**

Portanto podemos concluir que há diversas formas de implementar supercondutores em transformadores, com diversos tipos de topologia e métodos, sendo o primeiro (LIU e colab., 2016) um caso teórico, onde um transformador foi criado via *software* para realizar o estudo elétrico do seu comportamento, desta forma ele serve como um embasamento sobre os outros dois artigos (DAI e colab., 2016; WANG e colab., 2007b), onde basicamente ambos tem a mesma tensão 10.4kV/0.4kV, porém com potências diferentes 630kVA e 1250kVA. Neles

podemos observar que o resfriamento usado é nitrogênio líquido, isto é, tendo em vista a maior disponibilidade e preço do nitrogênio líquido, comparado com alternativas como o hidrogênio líquido, que chegaria a temperaturas ainda menores. O processo de fabricação do nitrogênio líquido é muito mais simples e por isso é usado nas pesquisas.

Podemos ver, que com os resultados encontrados, o supercondutor realiza um trabalho excelente em diminuir as perdas dos transformadores, reduzir o peso e o tamanho. Observamos isso fazendo uma comparação entre o transformador de (DAI e colab., 2016) sendo basicamente o dobro da potência (1250kVA) do transformador de (WANG e colab., 2007b) de 630kVA ambos em 50Hz, podemos observar que apesar de possuírem as mesmas tensões no primário e no secundário, as dimensões de projeto não compreendem a mesma razão da potência, ou seja, não atingem o dobro de tamanho, isto é uma das vantagens de supercondutores, os transformadores são reduzidos em tamanho devido a menor necessidade de tamanho de enrolamentos com a mesma capacidade de corrente. Ambos os transformadores, ficaram na faixa de 2% a 6% de perdas, o que é um valor ótimo de resultado para aplicações no mundo real. Desta forma, vale destacar que os projetos podem ser melhorados com um resfriamento maior do supercondutor para 70K por exemplo, isto faria com que a corrente transitória no enrolamento poderia ser maior, devido a condutividade do supercondutor diminuir conforme a temperatura, também evitando possíveis problemas de tempera de supercondutor quando em estado transitório de *inrush*.

## **2.3. Maquinas Elétricas - geradores eólicos**

### **2.3.1. 10 MW class superconductor wind turbine generators (SNITCHLER et al., 2011)**

Há também possíveis aplicações diversas, uma aplicação interessante é a proposta em (SNITCHLER e colab., 2011) onde foram utilizados supercondutores de alta temperatura para fabricar-se um gerador para uso de direct-drive.

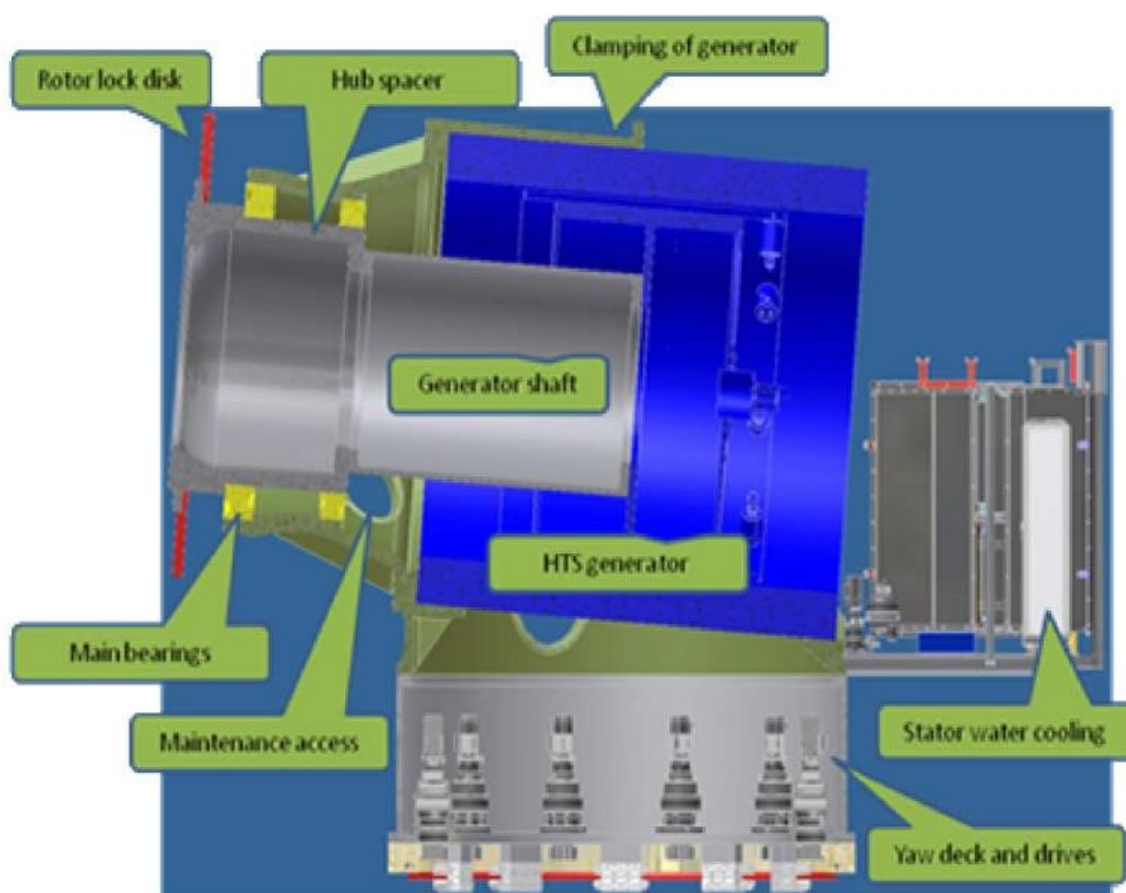
Com o crescimento da geração eólica off-Shore, podemos assertar que as turbinas geradoras terão potências maiores de 5MW. Desta forma, o (SNITCHLER e colab., 2011), em conjunto com a AMSC (*American Superconductor Corporation*), tem como objetivo demonstrar um gerador eólico de turbina de 10MW para o uso em grandes fazendas de energia eólica, com a tecnologia de supercondutores de segunda geração YBCO. Convencionalmente, sabemos que geradores dessa capacidade teriam dimensões e conseqüentemente pesos enormes,

vale destacar que direct drive PM geradores de 10MW de potência chegam a escalas de 300 toneladas e maiores, com um espaço de ar de 10m de diâmetro, logo o uso de HTS é uma solução razoável para diminuir o tamanho de tais máquinas elétricas e o peso das mesmas.

Portanto, o gerador 10MW HTS projeto da AMSC possui um diâmetro de 4,5 a 5 metros de diâmetro com um peso estimado de 150 a 180 toneladas. A eficiência da máquina sob carga plena é de 96%.

O projeto desta máquina foi realizado pela AMSC, como podemos ver na figura 11:

Figura 11 – Gerador HTS 10MW da AMSC.



Fonte: (SNITCHLER e colab., 2011)

O rotor do gerador será colocado em balanço com o rotor principal, desta forma mantendo o custo baixo, confiável, com baixa necessidade de operação e baixa manutenção. Devido à baixa velocidade da turbina eólica, essa aplicação oferece possibilidade de se usar cabeças de resfriamento no rotor, o que em si é um projeto próprio.

Foram realizados estudos pela ATP, para qualificar o uso dessa aplicação, desta forma foram desenvolvidas pequenas bobinas para gerar dados para a qualificação termal e mecânica do ciclo da máquina. Baseado nesses dados, foram realizados testes com o HTS a 77K e a 30K.

Vemos que a torre utilizada para a qualificação tem 1270mm/525mm e usou 1500 metros de HTS de segunda geração YBCO, a figura 12 mostra o aparato utilizado para os testes realizados a 30K por um sistema refrigerador usado a mais de 20 anos na indústria, com o nome de CTI1020. Uma turbina necessitará de 6 a 10 *cryocoolers* no funcionamento final, com necessidade de manutenção a cada 2 anos. O projeto da torre possui uma vida útil de 30 anos, sem manutenção, mantendo o estado supercondutivo durante todo esse tempo.

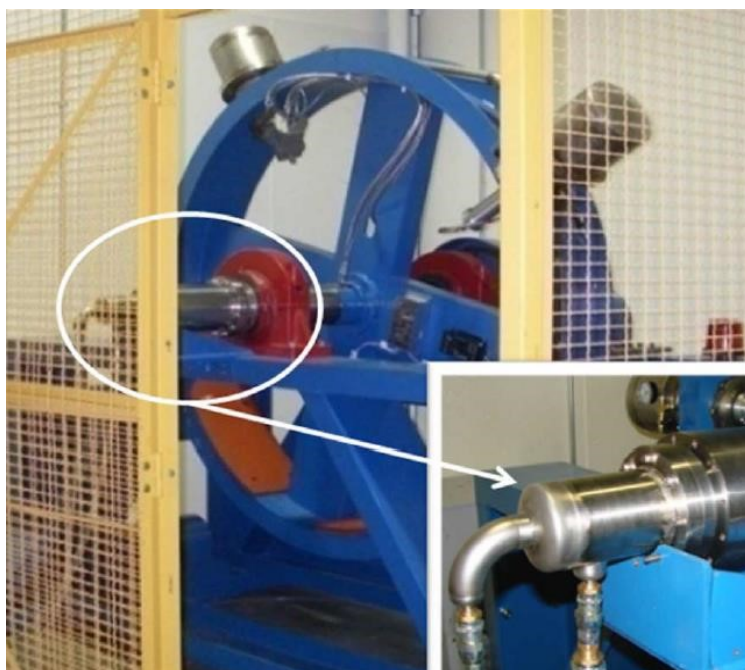
Figura 12 – Aparato de teste de qualificação para o gerador HTS 10MW



Fonte: (SNITCHLER e colab., 2011)

Foram também realizados estudos de localização dos *cryocoolers* e dos ventiladores centrífugos na estrutura rotatória, para aumentar a eficácia e confiabilidade da estrutura refrigeradora. Podemos ver tal estrutura de teste na figura 13 abaixo:

Figura 13- Estrutura refrigeradora para teste de qualificação do gerador HTS 10MW



Fonte:(SNITCHLER e colab., 2011)

Em destaque, vemos as conexões seladas do rotor sob temperaturas supercondutoras. Estes testes não demonstraram qualquer forma de perda de performance durante o uso e nem degradação com o tempo, o que valida o projeto de refrigeração.

Vale destacar, que como este projeto ainda pode ser revisado e otimizado para futuras aplicações reais, tendo em vista o rápido avanço nas pesquisas de fitas de supercondutores e *cryocoolers*.

### **2.3.2. Design and Preliminary Experiments of a Rotating Armature Partial Superconducting Air-Core Generator (CHO et al., 2022)**

Neste estudo, foi proposto o uso de um gerador supercondutor da classe de 10MW para propulsão elétrica de aviões e para uso em turbinas de geração eólica. Sendo o gerador elétrico de propulsão projetado para 10MW 3000rpm produzir uma potência específica de 13.7kW/kg para uso em aviões e a 10MW e 500rpm produzir uma potência específica de 4.3kW/kg para uso em grandes turbinas eólicas.

O recipiente utilizado para a refrigeração e ambos os projetos foram uma câmara de vácuo envolve o eletroímã e mantém o vácuo presente em todo o recipiente para prevenir a intrusão de calor por convecção, todo esse aparato é mantido a 40K por gás hélio.



O projeto do gerador para propulsão de aviões usa um gerador de núcleo de ar com o uso parcial de supercondutores RE(Gd)BCO com um comprimento total de eixo de 2145mm e diâmetro de 1456mm, o peso total ficou em 2191kg com o peso da parte eletromagnética de 730kg, com 8 polos, resistência de 0.071Ohm, indutância síncrona de 1.334mH, torque no eixo de 36.59kNm. O enrolamento supercondutivo tem dimensões de 1270mm de diâmetro externo, 12mm de largura do enrolamento com o enrolamento principal de 1200 voltas totalizando um comprimento total de 37.17km e o enrolamento de armadura com 534 voltas totalizando um comprimento total de 26.13km, sendo essa armadura disposta em 8 voltas por enrolamento e com o diâmetro externo de armadura de 828mm, resultando numa densidade de corrente de 11.82A/mm<sup>2</sup>. Após simulação, foi observado que o melhor modelo para a performance desse projeto é de 10.72MW com tensão de 6.78kV com uma corrente aproximada de 928<sup>a</sup> produzindo uma potência específica de 13.7kW/kg.

No caso do gerador para turbinas eólicas, o projeto foi de um número de 20 polos, com resistência de 0.0072Ohm, indutância síncrona de 603μH, torque no eixo de 213.96kNm, com o peso total de 15001kg sendo 2334kg a parte elétrica, os enrolamentos supercondutivos possuem um diâmetro externo de 3414mm com uma largura de 12mm, sendo o enrolamento principal composto de 1700 voltas totalizando um comprimento total de 130.63km e o enrolamento de armadura composto de 1000 voltas totalizando um comprimento total de 88.31km. Sendo essa armadura possui 16 voltas por enrolamento com um diâmetro externo de 2698mm e uma densidade de corrente de 2.17A/mm<sup>2</sup>. Após simulação, foi observado que o melhor modelo para a performance desse projeto indica uma tensão terminal de aproximadamente 6.6kV com uma carga de 10MW, e a corrente atinge aproximadamente 980A gerando uma potência específica a 500rpm de 4.3kW/kg.

Foram realizados testes de característica de força estática devido a força repulsiva entre os enrolamentos da armadura rotativa no gerador de núcleo de ar com supercondutor. Foi aplicada uma corrente de 20A para realizar o experimento, mesmo tendo a corrente nominal crítica de 110A a 77K no supercondutor. Desta forma a distância de separação ficou em 20mm, o que é de acordo com a simulação, validando assim o experimento e funcionamento.

Também foram realizados testes com um motor externo girando o eixo da máquina e as medidas de tensão de armadura foram colhidas para análise e comparação com a simulação, foi encontrado que a houve um erro de variação de 6.2% no valor máximo da tensão e de 15.1% no valor RMS da tensão. O que mostra que há ainda mais estudos a serem desenvolvidos nessa área.

### **2.3.2.1. Discussão sobre o artigo Design and Preliminary Experiments of a Rotating Armature Partial Superconducting Air-Core Generator (CHO et al., 2022)**

O autor demonstra uma aplicação interessante de supercondutores de forma parcial no projeto, com duas possíveis utilizações, como um gerador elétrico para aviões e como um gerador de turbina eólica. Ambos os casos são interessantes devido à utilização de simulação e de realização prática do experimento, assim validando os resultados e comparando o que podemos melhorar no projeto. Como podemos ver, ambos os projetos de geradores são peças de grande porte e, portanto, de grande custo para sua produção, mas ambos também são interessantes para se analisar. O autor menciona o uso de gás hélio para a realização do resfriamento, porém os testes são realizados a 77K que é a temperatura crítica do material supercondutor escolhido, dessa forma, de um ponto de vista econômico seria mais interessante a utilização de nitrogênio líquido, tendo em vista que este é mais acessível, o que também garantiria a melhor aplicação expansiva do projeto. Também foi observado erros significantes de simulação para teste prático, desta forma também podendo ter havido algum erro no projeto de simulação. De qualquer forma, o projeto apresenta resultados interessantes para geradores eólicos, sendo uma topologia interessante, tendo em vista que não utiliza apenas supercondutores.

### **2.3.3. Ultrahigh-Field, High-Efficiency Superconducting Machines for Offshore Wind Turbines (BALACHANDRAN et al., 2022)**

Neste artigo foi usado um projeto híbrido de supercondutores para um gerador elétrico para turbinas eólicas com uso Off-Shore de 12MW que pretende atingir geração de 5 a 10 vezes maiores que os geradores tradicionais, devido ao fluxo magnético 10 vezes maior, com uma eficiência maior que 98%. Também foi feita uma comparação com um gerador comercial de 6MW para comparação de dimensões.

O projeto deste gerador tem a capacidade de 12MW mantendo densidade de fluxos magnéticos de 10T com cabos de supercondutores de baixa temperatura como o Nb<sub>3</sub>Sn e cabos de supercondutores de alta temperatura, mantendo o peso menor que 45 toneladas e eficiência maior que 98%. As especificações de comparação de projetos são dadas pela tabela 7:

Tabela 7 – Comparação de dados de projeto

Especificação	Gerador de referência	Gerador projetado
Potência [MW]	12	12
Topologia	Ímã permanente	Supercondutor parcial
Acionamento	Marcha ou acionamento direto	Acionamento direto
Velocidade [rpm]	8	8
Diâmetro externo [m]	12	7.2
Comprimento do eixo [m]	3	Menor que 1
Peso [Ton]	300	Menor que 45
Eficiência [%]	95	Maior que 98
Diâmetro externo da turbina [m]	220	220
Altura da turbina [m]	260	260

Fonte:(BALACHANDRAN et al., 2022)

Tais estimativas foram realizadas com um estudo completo de simulações eletromagnéticas, termais e mecânicas para o projeto. O cryocooler escolhido é um que atinge temperaturas tão baixas quanto 4K e, portanto, é capaz de satisfazer o carregamento de calor desta máquina e do ambiente. O gerador também foi colocado dentro de uma torre usada comercialmente com as suas aerodinâmicas, sistemas mecânicos, elétricos e térmicos associados, visando assim a melhor resposta possível para utilizações práticas e comerciais.

Foram estudadas duas possibilidades para esse caso, uma contendo um enrolamento de escudo para a o supercondutor e outro contendo um rotor de ferro e um envelopamento em aço. Estes foram comparados com os padrões normais de geradores de ímã permanente. Desta forma, foram feitas simulações com os alvos colocados nos parâmetros da tabela 7, usando supercondutores operando a 4K sendo eles um cabo de Nb3Sn operando a 50% da densidade de corrente crítica e com um entreferro de 40mm e um condutor HTS genérico operando a 60% da densidade de corrente critica com um entreferro de 30mm, também foi utilizado um HTS reportado na literatura que é analisado a operar numa temperatura maior que 20K.

Nas análises termais, foi encontrado que os maiores emissores de calor foram o tubo de condução de torque, radiação ambiente e barra de transmissão. Para isso foi projetado um sistema ativo e passivo, sendo o sistema passivo a otimização geométrica de disposição dos materiais para melhor resfriamento e o tubo de torque é projetado de em forma de cantiléver

duplo de classe 5 de titânio de baixa condutividade térmica. Em questão da radiação ambiente, foi desenvolvido um escudo de radiação feito de alumínio multifilar. Sendo o escudo conectado ao garfo do tubo de torque. Os cryocoolers selecionados foram uma combinação das marcas Cryotel GT e Sumitomo Heavy Industries com secções de 30° do gerador para rejeitar a carga térmica ao ambiente.

O gerador foi montado numa turbina que já é utilizada comercialmente para geradores de 6MW. Desta forma, a mesma turbina geraria 200% de potência, utilizando o mesmo espaço. Mesmo assim, a turbina não foi completamente ocupada, mostrando que ainda maiores geradores podem ser colocados.

Os resultados mostram os melhores resultados quando a densidade de campo magnético atinge 9-11 T e 5-7 T, com o LTS e HTS, respectivamente. Como esperado, o projeto completamente passivo, possui o maior peso e a pior eficiência porém utiliza a menor quantidade de supercondutor. Por outro lado, o projeto completamente ativo, possui a melhor eficiência, porém usa a maior quantidade de supercondutor, portanto, o projeto otimizado, é um híbrido, tendo em vista o custo-benefício de tal projeto, baseado na eficiência, tamanho da máquina por performance e a quantidade total de supercondutor usado. Portanto, o melhor projeto é de um supercondutor de alta temperatura a 4K produz a melhor densidade de fluxo magnético, conforme a temperatura aumenta, o gerador tem que aumentar de tamanho e de peso devido ao aumento do entreferro no estator.

### **2.3.3.1. Discussão sobre o artigo Ultrahigh-Field, High-Efficiency Superconducting Machines for Offshore Wind Turbines (BALACHANDRAN et al., 2022)**

Temos muitos testes interessantes nesse artigo, demonstrando a eficiência de máquinas elétricas que utilizam de supercondutores, mas também levando em consideração o custo-benefício. O autor apresenta várias topologias diferentes, o que nos ajuda a encontrar um modelo otimizado para a aplicação em fazendas de geração eólica off-shore, tendo em vista os preços, o peso das máquinas, o tamanho, a eficiência e a refrigeração. Portanto, vemos que a topologia otimizada seria com o uso de HTS a 4K, porém, para atingirmos essa temperatura, teríamos que utilizar cryocoolers robustos, e tendo em vista a necessidade de manutenção e o problema logístico de transporte de equipes até as áreas onde ficam essas fazendas off-shore, podemos dizer que seria interessante considerar isso em aplicações comerciais de tal projeto. Todas as

topologias abordadas nesse artigo podem ser usadas comercialmente, possuindo uma fundamentação de projeto muito boa.

#### **2.4. 2.4. Trem de Levitação Magnética (MagLev)**

Os supercondutores possuem, quando operando em sua temperatura nominal, apresentam um efeito de expulsão de campo magnético, ou seja, o valor do campo magnético no interior de um supercondutor é igual a zero, esse efeito é conhecido como efeito Meissner. Como podemos ver, esse fenômeno pode ser usado dentro da engenharia de diversas maneiras, a mais explorada delas é os trens de levitação magnética (MagLev), onde usam-se ímãs e supercondutores para criar um veículo que anda em trilhos sem nenhum atrito, como o nome já diz, levitando.

##### **2.4.1. O projeto brasileiro, o Maglev-Cobra**

O Maglev-cobra é um projeto Brasileiro da Universidade Federal do Rio de Janeiro desenvolvido pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores (Lasup) da Coppe, sob a coordenação do professor Richard Stephan, onde foi feito um protótipo de trem que comporta até 30 passageiros, por um trajeto de 223 metros, dentro da Cidade Universitária, ele foi projetado para andar a 70 km/h e já está funcionando desde 2014.

Nele possuímos um supercondutor que trabalha a  $-196^{\circ}\text{C}$  (aproximadamente 77,15K), sendo assim um supercondutor de alta temperatura HTS (temperatura crítica  $> 30\text{K}$ ) e como tantas outras utilizações, ele é resfriado a nitrogênio líquido. Os pesquisadores, estimam que o cálculo de quantidade de energia gasta para transportar um passageiro por um quilometro é de 25kJ/pKm, onde a quantidade necessária de energia para fazer o mesmo transporte por ônibus é certa de 400kJ/pKm e por avião é de 1200kJ/pKm, tendo em vista isso, podemos ver que energeticamente falando o MagLev é uma solução muito mais eficiente para o problema do transporte, ressaltando que ele é movido a energia elétrica, ou seja, ainda possibilitando a utilização de fontes renováveis de energia para fazer o seu uso, o único problema encontra-se na reposição de nitrogênio líquido dentro dos reservatórios.

Podemos ressaltar que, é citado pelos autores que o uso de obras de infraestrutura e manutenção também são mais baratos que o trem de metro subterrâneo convencional, sendo até 70% mais barato no caso da cidade do Rio de Janeiro, com estimativas de R\$ 33 milhões de reais por quilometro (em 2013). Os custos com manutenção também são menores, devido à

ausência de atrito entre o trilho e a roda, o trem não sofre com vários problemas de manutenção que os trens convencionais sofrem, apenas necessitando de manutenções especiais para manter o material supercondutivo.

Após a implantação da etapa 1 de 223 metros, o objetivo da pesquisa era criar uma linha de 4,5km dentro do campus da Cidade Universitária e a curto prazo criar linhas saindo dos limites da Cidade Universitária e levando até os aeroportos de Tom Jobim e Santos Dumont, com extensão prevista para conexão com o metro de Cinelândia. A estrutura total é estimada de ter 25km de comprimento. Porém, em 2019 o projeto foi desativado, mesmo sendo um pioneiro na sua área e o primeiro protótipo de uso real no mundo, o pesquisador Richard Stephan procura fundação industrial para continuar seu projeto, em 15 de março 2022 foi realizado um passo para essa conquista onde a Aerom, empresa de mobilidade sustentável, firmou um contrato com o Coppe/UFRJ para o fornecimento de um novo veículo para o MagLev-Cobra.

#### **2.4.2. MagLevs na China**

Os trens de levitação magnética já estão em desenvolvimento na China desde o início da década de 2010, principalmente pelo desejo da China em criações de trens de alta velocidade para ligar as grandes áreas urbanas chinesas, com agilidade de transporte. Sendo o primeiro país a ter uma rota comercial de 30km de pista para MagLev, ligando o aeroporto de Pudong em Shanghai para a estação Longyang, onde o trajeto é feito em 7 minutos e meio com velocidades de até 430 km/h, o governo chinês declara que há diversas outras rotas em construção, com a rota ligando Shanghai a Hangzhou e outra rota ligando Chengdu a Chongqing.

Em 2019, a china demonstrou um protótipo de MagLev que foi feito para andar a uma velocidade de até 600km/h, desenvolvido pela CRRC Qingdao Sifang uma estatal chinesa especializada em manufatura de trens e trilhos, o trem usa supercondutores para realizar a levitação magnética. O trem esteve em fase de construção desde 2016, e foi anunciado a mídia como aberto comercialmente em 2021. Conforme os pesquisadores, o trem é uma solução inteligente para trajetos de até 1500km, preenchendo a área onde não é transportes de agilidade, entre os trens-bala convencionais existentes que vão até 350km/h e os aviões que andam a 800km/h.

O novo trem possui sistemas inovações de frenagem a vórtice, de acoplamento magnético, de sistemas antivibração e de sistemas elétricos.

O novo sistema de frenagem possui um avanço 30% de capacidade de frenagem comparado ao MagLev existente em Shanghai, reduzindo a distância de frenagem de 16km para 10km. A CRRC SRI reivindica que os freios podem funcionar em temperaturas de -25°C até 170°C.

O sistema de alimentação elétrica usa uma nova tecnologia de alimentação sem contato quando o trem ultrapassa a velocidade de 100km/h, e pode operar de -25°C a 45°C. O acoplador é feito de uma liga de alumínio que assegura a movimentação entre os carros do trem serem menos de 1mm, diz chefe da pesquisa Jiang Yulong. O acoplador possui apenas 280mm e 30 quilos, que atende os requerimentos espaciais de peso e tamanho que são restritos no MagLev. Esse trem já funciona com a tecnologia de telecomunicação 5G, garantindo a velocidade de comunicação entre os instrumentos para seu funcionamento e também possui wi-fi gratuita para os mais de 100 passageiros.

O estado chinês está investindo muito em tecnologias de MagLevs, eles são a solução para a sua população enorme se locomover entre as grandes cidades, eles fazem parte do programa “National 123 transportation circle”, que é um programa que tem como o objetivo criar ciclos de transporte urbanos de 1 hora, ciclos entre as aglomerações das cidades de até 2 horas e ciclos de transporte entre grandes centros urbanos de até 3 horas.

### **2.4.3. MagLevs pelo mundo**

Os MagLevs já são usados pelo mundo, porém com tecnologias não supercondutivas, em duas grandes categorias suspensão eletrodinâmica e suspensão eletromagnética, onde se usa atração e repulsão para realizar a levitação. Mas a introdução de supercondutores faz com que os MagLevs consigam a chegar a novos horizontes.

O professor de engenharia da Universidade Politécnica de Hong Kong Tsung-Chung Kao comenta que a tecnologia para MagLevs existem a mais de 50 anos, quando ainda se utilizava supercondutores de baixa temperatura resfriados por hélio líquido, porém hoje em dia a maiores dificuldades são política, econômica e tecnológica, em ordem. Os governos são resistentes a mudança e introdução de novas tecnologias no mercado sem comprovação anterior, entre outros fatores políticos e sociais. Em questão de financiamento, os trens MagLev com HTS são 20% mais caros que os trens-bala convencionais e a tecnologia apesar de ser robusta, ela possibilita pouca inovação, requerendo grande pesquisa para consegui-la como a China e Japão têm feito.

O Japão tem feito investimentos pesados em pistas de MagLev, uma delas sendo a construção de uma pista ligando Tokio e Nagoia, com uma distância total de 286km, o projeto começou em 2009 e a expectativa de entrega é de 2027 para o funcionamento que pretende levar pessoas em apenas 40 minutos a uma velocidade máxima de 500km/h, o custo estimado do projeto é cerca de 11 bilhões de dólares, em grande parte devido a área montanhosa e a criação de túneis subterrâneos para a construção das pistas. Também já há planos para expandir essa pista até Osaka até 2045, tornando a distância total para 550km. Estas tecnologias e suas aplicações do ponto de vista japonês e chinês, têm como intuito a melhoria do transporte de pessoas, porém também o exporte da tecnologia e a realização de obras lucrativas no exterior.

#### **2.4.3.1. Discussão geral sobre MagLevs**

Como podemos ver, as aplicações de MagLevs pelo mundo estão em constante crescimento e a pesquisa de novas tecnologias é bem aquecida principalmente em solos asiáticos. Temos também a pesquisa e aplicação reduzida de MagLevs no Brasil, apesar da sua descontinuação do projeto pelo governo brasileiro, temos a expectativa de um novo ancoramento econômico na iniciativa privada junto a Aerom.

Os MagLevs, terão papel importantíssimo no transporte eficiente e ágil entre centros urbanos em crescimento através de todo o mundo, trazendo o uso de supercondutores para o dia-a-dia de todas as pessoas que o utilizarem, acreditasse que será o contato mais direto com a pessoa normal com os supercondutores. Assim como o avião, ele revoluciona o mercado de transporte, e ainda com o lado mais positivo de ser amigável ao ambiente e podendo usar energia elétrica de fontes renováveis já bem estabelecidas como solar e eólica.



### 3. CONCLUSÕES

Como podemos ver nos trabalhos apresentados, os supercondutores são aplicáveis em diversas maneiras em diversos tipos de equipamentos. Tendo em vista isso, os usos nos limitadores de corrente de falta aparenta ser a tecnologia mais comum de sua aplicação, tendo em vista que são dispositivos de relativo pequeno porte, e tem um funcionamento altamente desejado para uso em sistemas de potência. No caso de transformadores, vemos que sua aplicação ainda é limitada a pequenos níveis de tensão e corrente, isto é, devido a diversos fatores como, preço dos supercondutores e de ainda não termos um modelo convencional de transformadores supercondutores, por conseguinte diversas aplicações possuem diversos tipos diferentes possíveis de projeto.

Nestes trabalhos, foram explorados diversos projetos realizados em limitadores de corrente de falta, em transformadores com enrolamentos supercondutores, em geradores eólicos e em trens com a tecnologia MagLev. Foi feita uma discussão para os projetos, possíveis estudos futuros na mesma área.

Concluimos que, podemos dizer que o uso de supercondutores é uma área ainda não explorada o suficiente dentro da engenharia, comparado com os benefícios que poderíamos obter através deles. Acredita-se que, a maior quantidade de pesquisa relacionada a área seria extremamente benéfica para a comunidade científica e a sociedade geral em si, dando ênfase em projetos onde se faz o estudo científico em si e também o estudo econômico, pois dessa forma se normalizará o uso de supercondutores dentro da indústria, o que é o objetivo final destes projetos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DAI, Shaotao e colab. **Development of a 1250-kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 1, 1 Jan 2016.
- DESCONHECIDO. **DIAGRAMA DE LINUS PAULING.** Disponível em: <<https://quimicadivertida.home.blog/2018/11/22/diagrama-de-linus-pauling/>>.
- DESCONHECIDO. **o que é um transformador?** Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>>.
- FUNAKI, Kazuo e colab. **Development of a 22kV 6.9kV Single-phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer.** v. 1, n. I, p. 1578–1581, 2001.
- GLASSON, Neil e colab. **Development of a 1 MVA 3-phase superconducting transformer using YBCO Roebel cable.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 21, n. 3 PART 2, p. 1393–1396, 2011.
- KORSHUNOV, M M e EREMIN, I. **Theory of magnetic excitations in iron-based layered superconductors.** Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, v. 78, n. 14, p. 1–5, 2008.
- KOZAK, J. e colab. **Design and tests of coreless inductive superconducting fault current limiter.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 22, n. 3, 2012.
- LIU, Hongwei e colab. **Dynamic Analysis of Transformers with Second-Generation High Temperature Superconductors.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 4, 1 Jun 2016.
- MALOZEMOFF, A. P. e colab. **Power applications of high-temperature superconductors: Status and perspectives.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 12, n. 1, p. 778–781, 2002.
- NAECKEL, O. e NOE, M. **Design and Test of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter Demonstrator.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 24, n. 3, 1 Jun 2014.
- PI, Wei e colab. **Numerical study of current distribution and stability of LTS/HTS hybrid superconductor.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 20, n. 3, p. 2180–2183, 2010.
- SNITCHLER, Gregory e colab. **10 MW class superconductor wind turbine generators.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 21, n. 3 PART 2, p. 1089–1092, 2011.
- TIPLER, Paul Allen e LLEWELLYN, Ralph A. **Modern Physics.** sexta ed. New York: H. W. Freeman and Company, 2007. v. 5.
- WANG, Yinshun e colab. **Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores.** 2007a, [S.l: s.n.], 2007. p. 2051–2054.
- WANG, Yinshun e colab. **Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores.** Jun 2007b, [S.l: s.n.], Jun 2007. p. 2051–2054.
- XIAO, Liye e LIN, Liangzhen. **Recent progress of power application of superconductor in China.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 17, n. 2, p. 2355–2360, 2007.
- YAMAGUCHI, Hiroshi e colab. **Current limiting characteristics of transformer type superconducting fault current limiter.** Jun 2005, [S.l: s.n.], Jun 2005. p. 2106–2109. YASUDA, Kenji e colab. **Research & development of superconducting fault current limiter in Japan.** Jun 2005, [S.l: s.n.], Jun 2005. p. 1978–1981.
- YONEZAWA, S e colab. **Superconductivity in a pyrochlore-related oxide KOs<sub>2</sub>O<sub>6</sub>.** Journal of Physics Condensed Matter, v. 16, n. 3, p. 9–12, 2004.

BALACHANDRAN, T. et al. Ultrahigh-Field, High-Efficiency Superconducting Machines for Offshore Wind Turbines. IEEE Transactions on Magnetics, v. 58, n. 2, 1 fev. 2022.

CHO, H. W. et al. Design and Preliminary Experiments of a Rotating Armature Partial Superconducting Air-Core Generator. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1 set. 2022.

CHO, H. W. et al. Design and Preliminary Experiments of a Rotating Armature Partial Superconducting Air-Core Generator. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1 set. 2022.