

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO COELHO ALVES

**ESTUDO SOBRE APLICAÇÃO E VANTAGENS DE ELEMENTOS
SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

VIÇOSA
2014

BRUNO COELHO ALVES

**ESTUDO SOBRE APLICAÇÃO E VANTAGENS DE ELEMENTOS
SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos.

VIÇOSA
2014

BRUNO COELHO ALVES

**ESTUDO SOBRE APLICAÇÃO E VANTAGENS DE ELEMENTOS
SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 01 de julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Ds. José Carlos da Costa Campos - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Ds. Denilson Eduardo Rodrigues - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Bsc. Erick Schultz Soares Araujo Caetano - Membro
Universidade Federal Viçosa

*“Nada te pertube. Nada te espante. Tudo passa. A paciência tudo alcança. Quem a Deus tem
nada lhe falta. Só Deus basta!”*
(Santa Tereza de Jesus)

Dedico meus esforços a minha família

Agradecimentos

Agradeço aos professores, colegas e amigos do Departamento de Engenharia Elétrica e do Departamento de Física pelo apoio na realização desse trabalho.

Resumo

Este trabalho consiste em um estudo sobre a utilização dos supercondutores em linhas de transmissão. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica de livros, artigos e publicações que abordam sobre o assunto. Durante o desenvolvimento desse trabalho analisou a sequência histórica dos supercondutores, desde ao descobrimento da supercondutividade até os supercondutores de alta temperatura, a estrutura dos cabos com material supercondutor que os pesquisadores utilizam, as perdas de energia que esses cabos apresentam com base em projetos em fase de desenvolvimento.

Abstract

This paper presents a study on the use of superconducting transmission lines. Therefore, a literature review of books, articles and publications that address on the subject was conducted. During the development of this work examined the historical sequence of superconductors since the discovery of superconductivity to the high-temperature superconductors, the structure of cables with superconducting material that researchers use, energy losses that these cables feature-based projects under development.

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1.	Demanda de energia como fator econômico	12
1.2.	Supercondutividade	13
1.2.1.	Sequência histórica.....	14
1.2.2.	Supercondutores de Alta Temperatura (SAT).....	19
2.	Objetivo Geral	21
3.	Sistema de transmissão com Supercondutores.....	22
4.	Perdas energéticas em cabos supercondutores	28
5.	Linha supercondutora x Linha convencional	31
5.1.	Comparativo entre linhas supercondutoras e linhas convencionais	31
5.2.	Projetos em Andamento	32
5.2.1.	Sistema de Cabos utilizado em Detroit Edison	33
5.2.2.	Projeto em São Petersburgo, Rússia.	34
6.	Conclusão	38
	Referências Bibliográficas	39

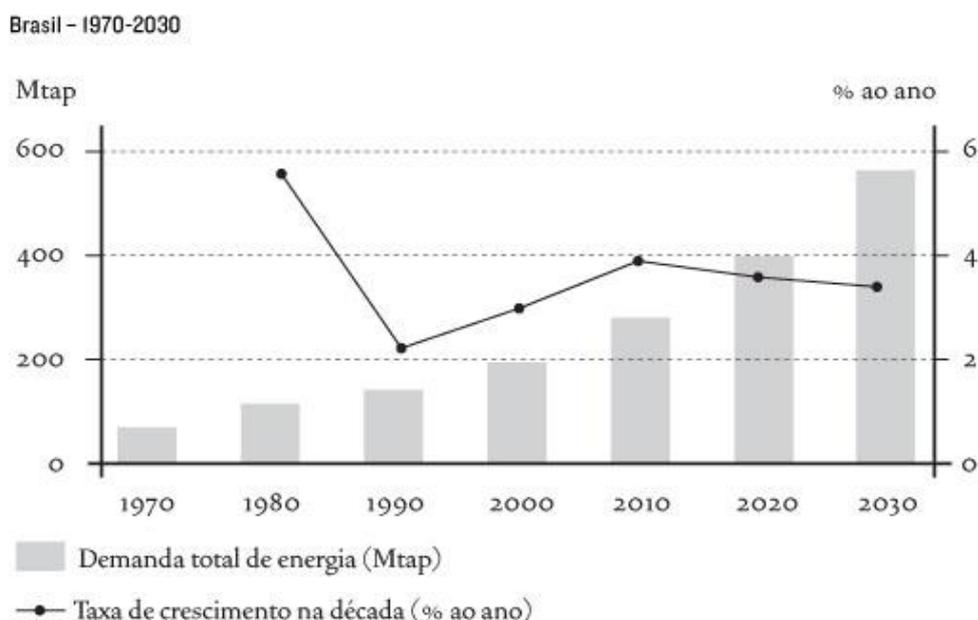
Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução da demanda de energia e da taxa de crescimento econômico.....	12
Figura 2 - Paul Ehrenfest, Hendrik Lorentz, Niels Bohr e Heike Kamerlingh Onnes no Laboratório Criogênico de Leiden, em 1919	15
Figura 3- Demonstração do efeito Meissner. Na primeira ilustração, o material supercondutor não está em temperatura crítica (rosa) e assim o fluxo magnético adentra no interior do material. Quando ele está em temperatura crítica (azul), o fluxo magnético externo é repelido pelo material. Logo após a ilustração, tem a imagem de uma amostra supercondutora em levitação magnética.	17
Figura 4 - Curvas de Magnetização x Campo magnético aplicado em supercondutores do tipo 1 e tipo 2.....	18
Figura 5 - Ilustração da teoria BCS, postulada pelos cientista Leon Cooper, John Bardeen e John Robert Schrieffer. Através do pares de Cooper, o eletron transita pelo material através de uma vibração	19
Figura 6 - Estrutura molecular $YBa_2Cu_3O_7$, com formato perovskita. Suas propriedades supercondutoras foram descobertas no início dos anos 90 e abriram um novo ramo para o estudo dos Supercondutores.....	20
Figura 7 - Ilustração esquemática de cabos supercondutores de alta temperatura (SAT). A estrutura com blindagem supercondutora é denominado como dielétrico frio ou criogênico. A outra estrutura é denotada como dielétrico quente ou temperatura ambiente	25
Figura 8 - Subestação de Holbrook. É considera a primeira instalação de cabos SAT subterrânea do mundo.	27
Figura 9 - Distribuição de perdas em um sistema de cabo SAT sem blindagem supercondutora para o fornecimento de 450 MVA com uma tensão de 132 kV. A eficiência térmica do sistema de resfriamento estão incluídos e distribuídos uniformemente	31
Figura 10 - Perdas em sistemas com cabos SAT e com cabos convencionais para o fornecimento de 450 MVA com tensão 132 kV	32
Figura 11 - Perfil estrutural do cabo utilizado no projeto Edison Detroit	34
Figura 12 - Localização do cabo SAT CC dentro da rede de fornecimento em São Petersburgo e diagrama de blocos do cabo	35
Figura 13 - Variação de temperatura (esquerda)e queda de pressão (direita) em uma tubulação criogênica com 2,5 km de comprimento	36

1 Introdução

1.1. Demanda de energia como fator econômico

A qualidade de vida humana e o desenvolvimento econômico dos países são fatores influenciados pela energia. Essa relação mostrou-se evidente desde a época da 1ª revolução industrial, onde o processo de industrialização e o aumento populacional nos grandes centros urbanos demandava uma grande quantidade de energia [22]. O Brasil é um exemplo desse fenômeno, que obteve forte impulso na segunda metade do século XX, com investimentos na parte de energia e transportes. Em 1970, a demanda energética brasileira não alcançava valores de 70 milhões de tep (toneladas de petróleo) ou 2940 milhões de Giga-Joules para uma população de 93 milhões. Depois de 30 anos, a demanda energética chegou a valores de 190 milhões de tep ou 7980 milhões de Giga-Joules, e a população excedeu a barreira de 170 milhões de habitantes [22].



Fonte: EPE.

Figura 1 - Evolução da demanda de energia e da taxa de crescimento econômico

Com o crescimento econômico, existe uma maior necessidade de crescimento na oferta de energia para atender a demanda energética proveniente desse crescimento. Sem essa oferta, uma escassez energética ocorre.

A escassez energética é um problema enfrentado por diversos países, onde a demanda de energia elétrica é maior que a energia distribuída disponível. É causado por falta de planejamento com relação à geração e a distribuição de energia, efeitos climáticos e o crescimento econômico mundial.

As consequências dessa deficiência são: a estagnação econômica e racionamento de energia.

Para evitar tal situação, a ciência busca meios para aumentar a oferta energética através de duas frentes de pesquisa: A geração de energia através de fontes de energia, com ênfase a fontes renováveis e a melhora no sistema de distribuição de energia.

A aplicação de componentes com propriedades supercondutoras em linhas de transmissão é uma das técnicas que vêm sendo estudadas pela comunidade científica desde o final do século XX e possui uma enorme capacidade de transmissão de energia. O principal obstáculo para sua plena utilização no sistema de transmissão ainda é o alto custo para a manutenção do seu estado supercondutor enquanto permanece em operação.

Atualmente, uma nova geração de supercondutores impulsionou a aplicação da supercondutividade na construção de máquinas, sensores, detectores e linhas de transmissão, uma vez que o seu estado supercondutor é alcançado através de meios economicamente viáveis, como por exemplo, o uso de nitrogênio líquido para obter temperaturas de operação.

1.2. Supercondutividade

Esse fenômeno de propriedades físicas ocorre em determinados elementos, compostos, ligas metálicas e cerâmicas. Em temperaturas extremamente baixas, esses compostos conduzem corrente elétrica com resistência elétrica nula [1].

1.2.1. Sequência histórica

As características da supercondutividade foram primeiramente observadas pelo físico holandês Heike Karmelinh Onnes, em 1911, graças a suas conquistas na liquefação do hélio, obtendo temperatura em torno de 4 K (-269 °C). Naquela época, já era de conhecimento da comunidade científica que a resistência elétrica dos materiais é influenciada pela variação de temperatura, dada pela fórmula [1]:

$$R_t = R_o (1 + \alpha * (T - T_o)) \quad (1)$$

Contudo, ainda era desconhecido um valor limite de resistência elétrica para temperaturas próximas a 0 K. Em suas primeiras tentativas na determinação desses valores de resistência, observou-se que amostras de ouro e de platina obtinham valores de resistência bem baixos, sendo que esses mesmo valores dependiam do nível de pureza das amostras. Quando os testes avançaram para as amostras puras, analisou-se o mercúrio, elemento que até então tinha maior disponibilidade de ser encontrado com alto nível de pureza. Para a surpresa de Onnes, a resistência elétrica do mercúrio cai drasticamente para valor nulo quando a temperatura alcançava valor de 4 K [1]. Em seguida, a mesma característica foi observada em amostras impuras de mercúrio. Com esses resultados, Onnes descreveu que a partir de 4 K, o mercúrio entra em um estado físico onde as propriedades elétricas ainda eram desconhecidas [1]. Com o avanço das pesquisas, a supercondutividade foi constatada em outros elementos como Alumínio, Estanho e Tântalo, sendo que cada elemento possui uma determinada temperatura onde esse passa para o estado supercondutor. Essa temperatura de transição é designada como temperatura crítica (T_c). Outra característica descoberta pela mesma equipe foi o fenômeno de correntes persistentes, onde se um dado fluxo elétrico for aplicado em um circuito com fios supercondutores, o mesmo fluxo permaneceria por anos no circuito. Vale ressaltar que o efeito das correntes persistentes só ocorrer na situação de corrente contínua e desconsiderando as flutuações termodinâmicas que ocorrem nas amostras. Em 1913, Onnes foi laureado com o prêmio Nobel de Física por sua pesquisa [1].

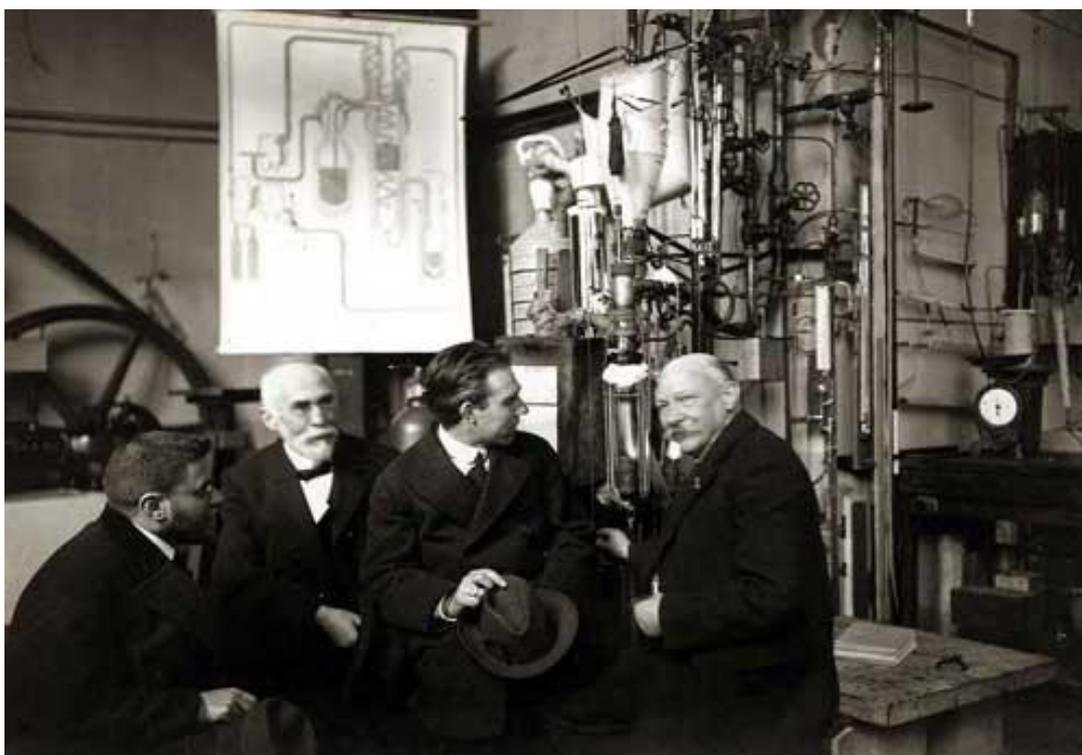


Figura 2 - Paul Ehrenfest, Hendrik Lorentz, Niels Bohr e Heike Kamerlingh Onnes no Laboratório Criogênico de Leiden, em 1919

Após aquele ano, durante suas pesquisas, Onnes descobriu que não bastava apenas os materiais atingirem a temperatura crítica para manter o estado supercondutor. O mercúrio restaurava sua resistência elétrica quando um valor crítico de corrente passava pela amostra. Logo, concluiu-se que o excesso de campo magnético que a corrente produzia, restaurava o estado resistivo normal do elemento [1]. Após outros experimentos, a equipe determinou as propriedades necessárias para o estado supercondutor que são:

- Campo magnético
- Temperatura
- Densidade de corrente

Todos os supercondutores possuem combinações de temperatura e campo magnético, onde pode delimitar, quando um material está em seu estado supercondutor ou estado normal. O cálculo do gráfico segue a equação 2 [1].

$$H_c \cong H_o \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Sendo que H_o é o campo magnético quando a temperatura atinge valor de 0 K.

Durante os anos que se seguiram, novos elementos e compostos supercondutores foram descobertos, entretanto a única característica de interesse que a comunidade científica observava era “resistência zero” que esses compostos apresentavam no estado supercondutor. Em 1933, os cientistas Walther Meissner e Robert Ochsenfeld observaram, durante um experimento com campos magnéticos que um cilindro sólido de material supercondutor repelia o fluxo magnético externo quando o mesmo cilindro encontrava-se em sua temperatura crítica, tornando-se um diamagnético perfeito. Com essa nova descoberta, os cientistas confirmaram uma das propriedades mais característica dos supercondutores: o diamagnetismo perfeito [1]. Em homenagem aos seus descobridores, essa propriedade é conhecida como Efeito Meissner. Pode-se exemplificar essa relação através da equação 3.

$$B = H + 4\pi M \quad (3)$$

Sendo B o fluxo magnético que percorre a amostra, M a magnetização e H o campo magnético aplicado. Para que ocorra o cancelamento do fluxo magnético interno de um material supercondutor, tem-se que a magnetização é equação 4.

$$M = -\frac{1}{4\pi} H \quad (4)$$

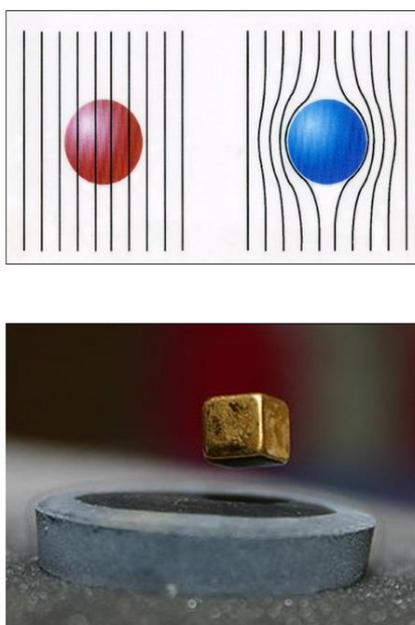


Figura 3- Demonstração do efeito Meissner. Na primeira ilustração, o material supercondutor não está em temperatura crítica (rosa) e assim o fluxo magnético adentra no interior do material. Quando ele está em temperatura crítica (azul), o fluxo magnético externo é repellido pelo material. Logo após a ilustração, tem a imagem de uma amostra supercondutora em levitação magnética.

Essa magnetização é originada pelas correntes superficiais encontradas no supercondutor.

Logo, a relação entre magnetização e o campo magnético aplicado é linear em um supercondutor até o valor H_c . Acima desse valor, as correntes superficiais desaparecem e o estado supercondutor é perdido. Entretanto, durante anos de descoberta de novos compostos supercondutores, algumas amostras não apresentavam comportamento linear na relação de magnetização e campo magnético. Apenas em 1957, o teórico russo Abrikosov concluiu que essas amostras de fato se tratavam de uma nova classe de supercondutores, conhecidos como Tipo 2. Nesses compostos, o regime de supercondutividade não desaparece quando o campo magnético H_{c1} é atingido [1]. O supercondutor permite que uma taxa gradual de campo magnético adentre até que esse chegue um novo valor de campo crítico H_{c2} , onde o material perde completamente seu estado supercondutor. Quando o material está entre os valores de H_{c1} e H_{c2} , o material está em regime misto.

Com os supercondutores do Tipo 2, Abrikosov observou que, durante o regime misto, o campo magnético adentrava no supercondutor em regiões ou em vortex onde o material se encontrava em estado normal, cercado por regiões em estado supercondutor [1]. Tão logo se

concluiu que os supercondutores do Tipo 2 não são diamagnéticos perfeitos se comparados aos supercondutores do Tipo 1.

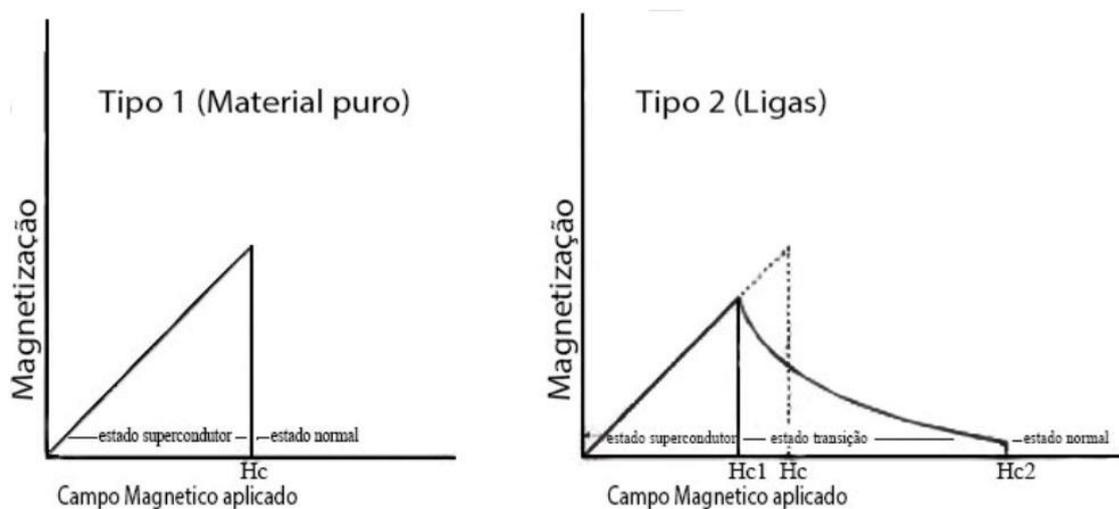


Figura 4 - Curvas de Magnetização x Campo magnético aplicado em supercondutores do tipo 1 e tipo 2

O efeito Meissner ocorre quando o campo magnético há qual o material supercondutor está mergulhado é relativamente pequeno, com relação ao valor de campo magnético crítico. Vale ressaltar que campo magnético é um parâmetro que determina o estado supercondutor.

Enquanto ocorria essa descoberta, outros cientistas e físicos criavam teorias a fim de explicar a supercondutividade. Os físicos alemães Heinz London e Fritz postularam considerações importantes nas equações de Maxwell que obtiveram êxito na descrição fenomenológica da supercondutividade e os teóricos russos Vitali Ginzburg e Lev Landau acrescentaram os conceitos de mecânica quântica nos modelos já existentes com o objetivo de explicar o comportamento dos elétrons durante o estado supercondutor.

Entretanto, nenhuma dessas teorias obteve tanto sucesso quanto a teoria proposta pelos cientistas americanos Leon Cooper, Robert Schrieffer e John Bardeen. Essa teoria, que mais tarde ficou conhecida com Teoria BCS, postula que durante o estado supercondutor, os elétrons com momento e spin diferentes se agrupam em pares onde existe uma mínima energia que mantém eles condensados (pares de Cooper). Quando um elétron percorre o condutor através da repulsão de outros elétrons, ele atrairá íons positivos que, conseqüentemente, atrairá outros elétrons. Devido a essa atração, um emparelhamento é

formado quando a energia de atração de íons supera a energia de repulsão dos elétrons por possuírem mesma carga. O emparelhamento cria uma janela espectral contínua de estados de energia permitida de elétrons, resultando na condução sem resistência.

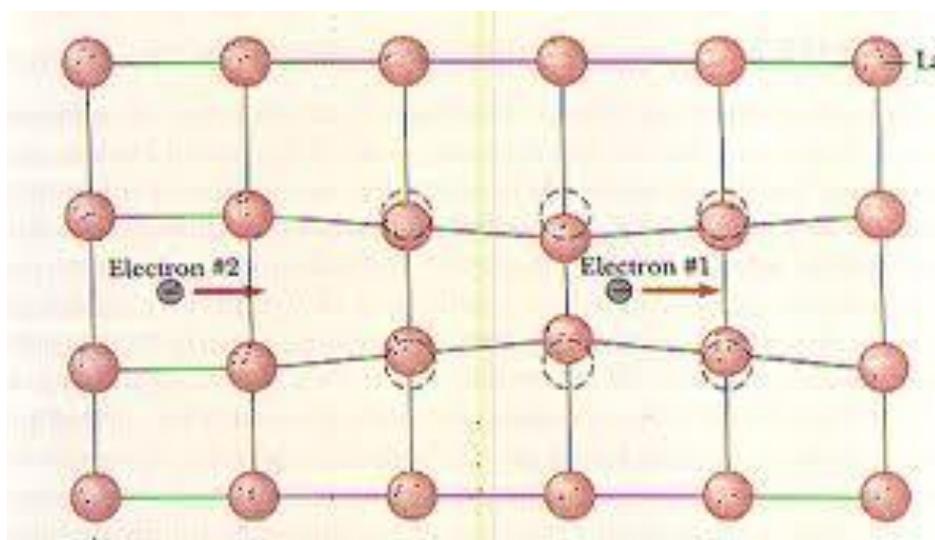


Figura 5 - Ilustração da teoria BCS, postulada pelos cientista Leon Cooper, John Bardeen e John Robert Schrieffer. Através do pares de Cooper, o eletron transita pelo material através de uma vibração

1.2.2. Supercondutores de Alta Temperatura (SAT)

Tanto os tipo 1 quanto os tipo 2 são conhecidos como supercondutores de baixa temperatura por só atingirem esse estado com auxílio de temperaturas inferiores de 30 K e seu estado é explicado através da teoria BCS [1]. Em 1986, os cientistas Georg Bednorz e Alex Mueller encontraram compostos com estruturas moleculares onde a supercondutividade foi observada com temperaturas bem mais elevadas em comparação às temperaturas já encontradas. Esses compostos, denominado de cupratos com estrutura perovskita (Figura 6), são caracterizados por camadas de cobre e oxigênio, com um formato quadrangular [1]. Os átomos de cobre localizam-se nas arestas da estrutura e os átomos de oxigênio nos pontos médios. Essas camadas são responsáveis pelo fluxo elétrico pelo composto.

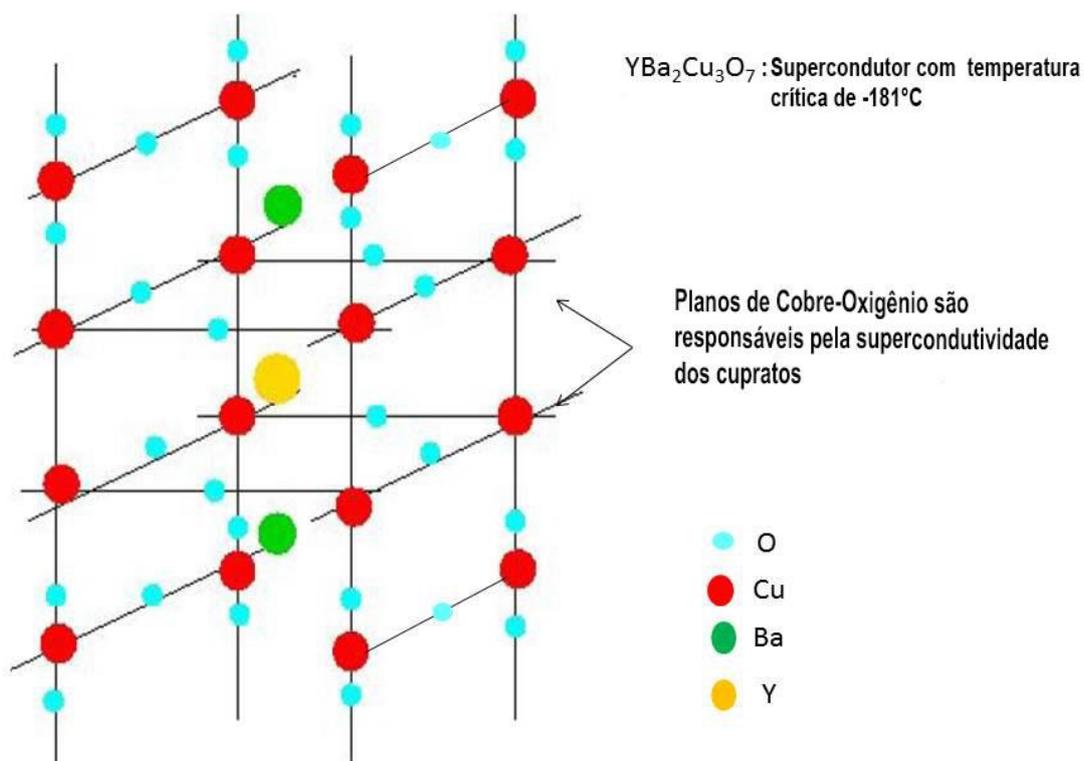


Figura 6 - Estrutura molecular $YBa_2Cu_3O_7$, com formato perovskita. Suas propriedades supercondutoras foram descobertas no início dos anos 90 e abriram um novo ramo para o estudo dos Supercondutores

A temperatura crítica dos cupratos alcançavam valores até superiores a 77 K, que é a temperatura de liquefação do nitrogênio. Esses supercondutores são denominados como supercondutores de alta temperatura (SAT). Com a nova possibilidade de uso de nitrogênio ao invés do hélio para o resfriamento dos supercondutores, que era o maior custo para a aplicação dos supercondutores, a viabilidade econômica atraiu a atenção da comunidade científica e a maioria das pesquisas atuais está concentrada no uso de supercondutores de alta temperatura.

2. *Objetivo Geral*

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica de livros, artigos e publicações apresentados na comunidade científica sobre a utilização de compostos supercondutores em linhas de transmissão.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Análise dos primeiros estudos que aplicavam o uso de supercondutores em sistemas de transmissão e as estruturas usadas nos cabos SAT em projetos em diversos laboratórios.
- Identificação das principais vantagens e desvantagens dos cabos SAT,
- Comparação entre as formas de transmissão possíveis com o sistema de cabos SAT

3. *Sistema de transmissão com Supercondutores*

O emprego de supercondutores no sistema de transmissão teve seu início na década de 1980. Os supercondutores são divididos em duas classes, os tipos 1 e tipos 2. Os tipo 1, representados por chumbo, estanho e índio, foram os primeiros a serem descobertos. O emprego deles no sistema de transmissão já foi defendido durante anos. Contudo, o baixo valor de campo magnético crítico obrigava que os condutores tivessem um grande diâmetro e portanto, sua utilização foi descartada. Os Tipos 2, com por exemplo ligas de nióbio $NbZr$, $NbTi$ e Nb_3Sn , descobertos em 1950, possuem como principal característica as temperaturas críticas, relativamente altas, e por possuírem a capacidade de transportar correntes elevadas, entretanto, são altamente irreversíveis e ocorrem perdas quando existe campos magnéticos alternados. Considerando as características, tem-se que os supercondutores do tipo 2 são considerados apenas para transmissão quando o sistema utiliza tensão contínua. Em 1916, um dos primeiros a considerar, de maneira concisa, a transmissão de energia através de supercondutores foi McFee [2]-[1], embora seus estudos não considerem fatores econômicos sobre o sistema como um todo. Ele sugeriu a utilização de condutores Nb_3Sn com 3 cm de diâmetro em uma linha de transmissão com tensão contínua de 200 KV, com classificação superior de 100.000 mVA assim como um cabo de corrente alternada de 600 mVA monofásica, com condutores de chumbo, de forma coaxial, com diâmetro de 3 a 6 cm com operação de 3 kA. O cabo coaxial de chumbo já havia sido proposto por Atherton em 1963. Já em 1965, Klaudy propôs a utilização do $NbZr$ para a utilização em linhas de transmissão de tensão alternada mas, de mesma forma que os estudos anteriores, não foram feitas estimativas do custo da linha [3].

A primeira análise econômica realizada foi feita por Gauster, Freeman e Long [1]- [4]. Estes propuseram uma linha de 10 GW com operação de 150 KV com transmissão CC, sendo os condutores formados por nióbio em forma de tubos rígidos. A estimativa feita dos custos dessa linha com extensão de 1.600 km seria de \$1.240 milhões de dólares. O custo somado ao custo operacional foi estabelecido de forma a se comparar com cálculos semelhantes a uma linha CA de 700 KV e uma convencional de 500 KV CC. No ano de 1967, Garwin e Matisoo [5] cogitaram uma linha de transmissão CC de 100.000 mVa análogo a linha sugerida

anteriormente por McFee [2]. Eles concluíram que uma linha de 1016 km, operando a 200 kV, feita de Nb_3Sn como elemento supercondutor custaria, incluindo os conversores, \$806 milhões de dólares.

Os valores relacionados as perdas por condução alternada nos supercondutores não eram bem definidos, e por causa desse fato, os estudos de Gauster, Freeman, e Long [4], junto com os estudos de Garwin e Matisoo [5] limitaram a análise econômica das linhas com transmissão CC. Apenas 25% dos custos eram para os equipamentos de conversão, sendo que a alta densidade de corrente e comprimento considerável dessas linhas tornaram bastante atrativas [1]. Uma vez que o custo das linhas aumenta rapidamente com o aumento do comprimento da mesma, com a utilização de supercondutores esses valores são reduzidos.

Os estudos avançaram com Voigt e Delile [6] – [7], onde mostraram linhas supercondutoras com transmissão contínua com custos inferiores em comparação as linhas propostas que Gauster [3], Garwin e Matisoo [6]. Voigt previu que os custos totais seriam iguais as receitas originadas dentro de uma faixa de 2 à 3 GW [7] e enquanto isso, Delile descobriu linhas de supercondutores que poderiam ser competitivas com níveis de potencia inferiores a 1GW [8]. Apesar dos valores satisfatórios para níveis de transmissão, o custo do equipamento de conversão não havia sido contabilizado resultando em um aumento no custo [1]. Esse custo desfavorecia a troca de transmissão CA para CC com auxílio de supercondutores, exceto em situações onde as linhas possuíam grandes extensões.

Em grandes regiões do mundo, há uma necessidade de transmissão de grandes blocos de energia por distancias cada vez maiores, sendo indicado o uso de linhas de transmissão com supercondutores [2].

Em todas as áreas de aplicação de supercondutores, atualmente, os cabos de transmissão são os mais avançados. A partir do ano de 2001, ocorreram demonstrações pré-comerciais por desses cabos para o fornecimento de energia, tanto de forma industrial quanto em forma residencial [9]-[11].

A tecnologia para a construção de cabos de transmissão supercondutores teve o seu inicio através de Gerhold com o lançamento do seu livro “*Handbook of Applied Superconductivity*” [9] -[10]. O principal foco no desenvolvimento dos cabos supercondutores

com alta temperatura tem sido a transmissão CA ao invés da transmissão CC. Para tanto, dois projetos principais foram propostos:

- Dielétrico quente ou a temperatura ambiente (DQ)
- Dielétrico frio ou a temperatura criogênica (DF).

Para atingir o estado supercondutor, as camadas de fitas supercondutoras de altas temperaturas, dispostas de forma helicoidal, dentro de tubos flexíveis são resfriadas com nitrogênio líquido [9]. O projeto com dielétricos quentes é simplificado e requer menos fitas, contudo a capacidade total de transmissão de corrente é limitada devido às perdas originadas pelos campos magnéticos alternados que induzem correntes parasitas. Essas perdas são dissipadas no ambiente em forma de calor. Já o projeto com dielétricos frios tem o dobro o número de fitas em comparação ao dielétrico quente devido a camada de blindagem concêntrica em torno de cada uma das fases dentro do tubo realiza uma corrente com valor igual, mas oposta. Dessa forma, os campos magnéticos são anulados, permitindo uma capacidade maior de transmissão de corrente e reduzindo as forças eletromagnéticas entre as fases[12]. Em áreas, como campo aberto, sem restrições de direito de passagem, transmissão aérea é geralmente a solução favorecida. Mas em áreas onde os direitos de passagem para cima são limitados, geralmente em regiões de crescente urbana ou zonas suburbanas, mas também em áreas ambientalmente sensíveis, cabo subterrâneo é cada vez mais necessário.

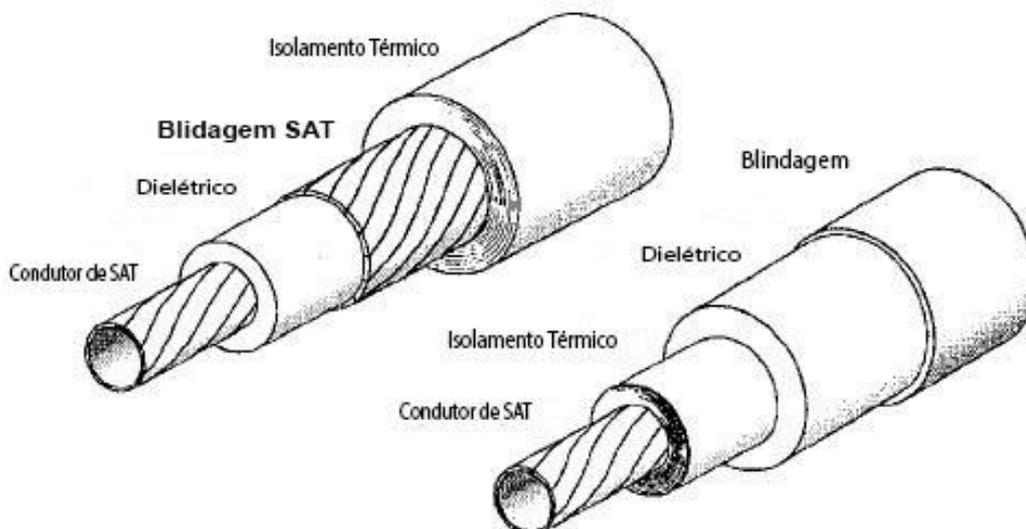


Figura 7 - Ilustração esquemática de cabos supercondutores de alta temperatura (SAT). A estrutura com blindagem supercondutora é denominada como dielétrico frio ou criogênico. A outra estrutura é denotada como dielétrico quente ou temperatura ambiente

Uma grande vantagem de cabos supercondutores de alta temperatura em relação a cabos subterrâneos de cobre convencionais para transmissão encontra-se na instalação simplificada. Tal instalação de cabos convencionais envolve diversos fatores como permissão para instalação, adversidades que podem gerar com relação ao trânsito ou qualquer outra atividade de superfície, abertura de valas, acomodação desses cabos, sistemas de proteção dos cabos e proteção do ambiente como a utilização de areias térmicas, a redução da possível contaminação gerada no ambiente (especialmente no caso de tubos e cabos cheio de óleo) e o seu impacto com relação a outros serviços que utilizam as vias subterrâneas como cabos de telecomunicações, linhas de gás e outros. Com base nesses fatores, a vantagem dos cabos supercondutores com alta temperatura possui duas características principais:

a) A densidade de potencia

Um único cabo tri axial com três fases tem a capacidade de transporte de 2.500 A. Para uma mesma corrente, seria necessário entre 6 a 9 fios de cobre por cabo ou 2 a 3 cabos por fase. Logo, há necessidade de espaços determinados em valas subterrâneas para cabos convencionais é reduzida com a aplicação de supercondutores, causando menor interrupção de tráfego e outros distúrbios já mencionados [9]-[11].

Com menos espaço necessário para instalação, pode-se aproveitar dutos subterrâneos já existentes ou até ajusta-los com os cabos supercondutores, evitando perturbações superficiais. Um exemplo desse fato é o projeto de instalação do cabo Edison em Detroit, que será detalhado posteriormente.

b) Impacto zero no meio ambiente

Com base nos cabos supercondutores de dielétricos frios, não há emissão de calor ou de campos magnéticos alternados em suas proximidades. Essa característica somada a alta densidade de corrente reduz ainda mais o tamanho necessário para a instalação dos cabos e consequentemente, diminuindo o grau de perturbação da superfície[9]. Esse benefício deriva da não utilização de sistemas de proteção contra sobreaquecimento que cabos convencionais necessitam como, por exemplo, espaços múltiplos entre cabos, espaçamento para o aterramento com areia térmica e tubos para refrigeração. Outra vantagem adquirida é a eliminação de possíveis contaminações do solo devido ao cabo já possui um sistema de refrigeração com nitrogênio líquido e logo não necessitar de outros elementos refrigerantes prejudiciais ao meio ambiente [9].



Figura 8 - Subestação de Holbrook. É considerada a primeira instalação de cabos SAT subterrânea do mundo.

Com a aplicação dos fios supercondutores de alta temperatura, tem-se um novo parâmetro para análise, que é o estado criogênico [9]. A temperatura de transição dos supercondutores de alta temperatura está em intervalos próximos a 77 K ou -196°C , onde se obtém o nitrogênio em estado líquido, sendo de fácil comercialização atualmente. Para manter os cabos supercondutores arrefecidos, estações criogênicas devem ser construídas em suas extremidades ou em intervalos regulares durante toda a extensão da linha de transmissão se o comprimento for excessivamente longo [9]. O nitrogênio líquido flui, internamente, pelo núcleo dos cabos. Contudo, esses sistemas ainda são propensos a fugas de calor e sua confiabilidade por longos períodos é incerta para aplicação [9].

4. *Perdas energéticas em cabos supercondutores*

As perdas energéticas em cabos de transmissão de energia convencionais (alumínio, cobre) para corrente alternada são determinadas por três fatores [14]-[17]:

- Perdas por condução
- Perdas dielétricas
- Perdas induzidas no revestimento

As perdas por condução surgem devido a própria resistividade do material que forma o cabo. Seu cálculo se faz através da equação:

$$W = R_c * I^2 \quad (5)$$

Sendo R_c a resistência elétrica e I o valor de corrente eficaz.

As perdas por correntes induzidas no revestimento dielétrico ocorrem, quando campos magnéticos alternados são aplicados no revestimento do cabo e são proporcionais ao quadrado da corrente que percorre o cabo [14].

As perdas dielétricas são causadas devido as características não ideais dos materiais de isolamento dos cabos. Essa perda pode ser calculada através da equação

$$W_d = \omega C V^2 * tg \delta \quad (6)$$

Sendo ω a frequência angular, calculada através de $\omega = 2\pi f$, C a capacitância por unidade de comprimento, V é a tensão de fase em valor rms e $tg \delta$ é o fator de perda de energia do tipo de isolamento. Observa-se que a energia perdida no dielétrico independe da corrente e, conseqüentemente, da carga para qual o sistema de transmissão esta alimentando [14] –[16]. Como por exemplo, se um cabo de núcleo simples, com tensão de 132kV, a sua perda dielétrica possui valores típicos de 1 W/m* fase.

Para a determinação das perdas em linhas de transmissão, deve-se determinar a temperatura máxima permitida nos cabos (que varia de acordo com o dielétrico utilizado no cabo) e a resistência térmica no ambiente que serão utilizados. Em outras palavras, o cálculo total das perdas por unidade de comprimento (W/m*fase) em cabos convencionais não dependem do nível de tensão e corrente nominal.

Para cabos trifásicos típicos na Europa, as perdas totais chegam na ordem de 30 a 40 W/m*fase.

Outra fonte de perdas são as fugas térmicas através do isolamento térmico. Essas fugas se devem ao fato do isolamento não ser ideal e a diferença térmica entre o sistema de refrigeração (nitrogênio líquido) e o ambiente externo.

O cálculo para essas perdas térmicas podem ser calculados por:

$$W_t = \frac{2\pi\lambda\Delta T}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (7)$$

Onde o índice λ é a condutividade térmica do isolamento, D_o e D_i são o diâmetro externo e interno, respectivamente e ΔT a variação de temperatura. É orientado o uso de vácuo para isolamento térmico para uma melhor eficiência e assim obter perdas na ordem de 0,5 – 1,5 W/m*fase, independentemente da especificação dos cabos utilizados.

Contudo, para cabos formados com materiais supercondutores de alta temperatura, as perdas nos cabos são fundamentalmente diferentes. Se comparadas aos cabos convencionais, a ordem de perdas dos cabos supercondutores é mínima, mas para o funcionamento dos cabos, essas perdas devem ser removidas através do nitrogênio líquido interno que participa no processo de arrefecimento dos cabos e a maioria dos processos de refrigeração de grandes máquinas possuem eficiência dentro do intervalo de 7% a 14%.

As perdas induzidas no revestimento e as perdas dielétricas ocorrem em cabos com dielétricos quentes, sem a blindagem SAT e podem ser calculadas através das mesmas técnicas usadas para o cálculo em cabos convencionais. Já com cabos com blindagem SAT, as perdas induzidas originam das perdas por transmissão CA. Para os cabos projetados com blindagem SAT, as perdas dielétricas são removidas pelo nitrogênio líquido, contudo o atrito

produzido pela circulação do líquido gera perdas hidráulicas que podem ser calculadas através da equação.

$$W_{\text{nitrogenio}} = \frac{m\Delta p}{\gamma_{\text{ln}}} \quad (8)$$

Sendo γ_{ln} a densidade do nitrogênio líquido (809 Kg/m)³, m razão de fluxo de massa e Δp a variação de pressão durante o comprimento do cabo. Em cabos de grandes comprimentos, são esperadas quedas de pressão em torno de 200.000 à 500.000 pascal. Para compensar essas quedas de pressão, é necessário um sistema bombeamento externo que também possui um consumo de energia [14]. Esse consumo é representado por perdas bombeamento.

Outra fonte de perdas de energia são as articulações e terminações. As terminações localizadas nas extremidades do cabo e as articulações são divisões de seção do cabo caso em tenha um comprimento longo [14]. A condução térmica nesses trechos de metais que estão em temperatura ambiente com metais na temperatura do nitrogênio líquido é a responsável pela perdas energéticas. Já nas articulações, as perdas são menores pois são conexões de cabo com baixa variação de temperatura [17].

De uma maneira em geral, um cabo projetado sem a blindagem SAT apresenta uma maior quantidade de fatores que produzem perdas energéticas. Entretanto, um projeto com cabos de blindagem SAT pode ter perdas maiores que projetos sem a blindagem devido a dimensão dos cabos que influencia diretamente no cálculo do isolamento térmico, deixando o cabo mais suscetível a vazamentos térmicos [14].

5. Linha supercondutora x Linha convencional

5.1. Comparativo entre linhas supercondutoras e linhas convencionais

O cientista Jacob Oestergaard realizou simulações exemplificando essas perdas. Os cálculos tiveram como base um sistema de cabos trifásico de núcleo simples, sem blindagem SAT, de 4 km de comprimento, com especificações de 450 MVA à 132 kV [14]. Os resultados são demonstrados na figura, sendo que duas situações foram consideradas: Em plena carga, e metade da carga aplicada no cabo [14].

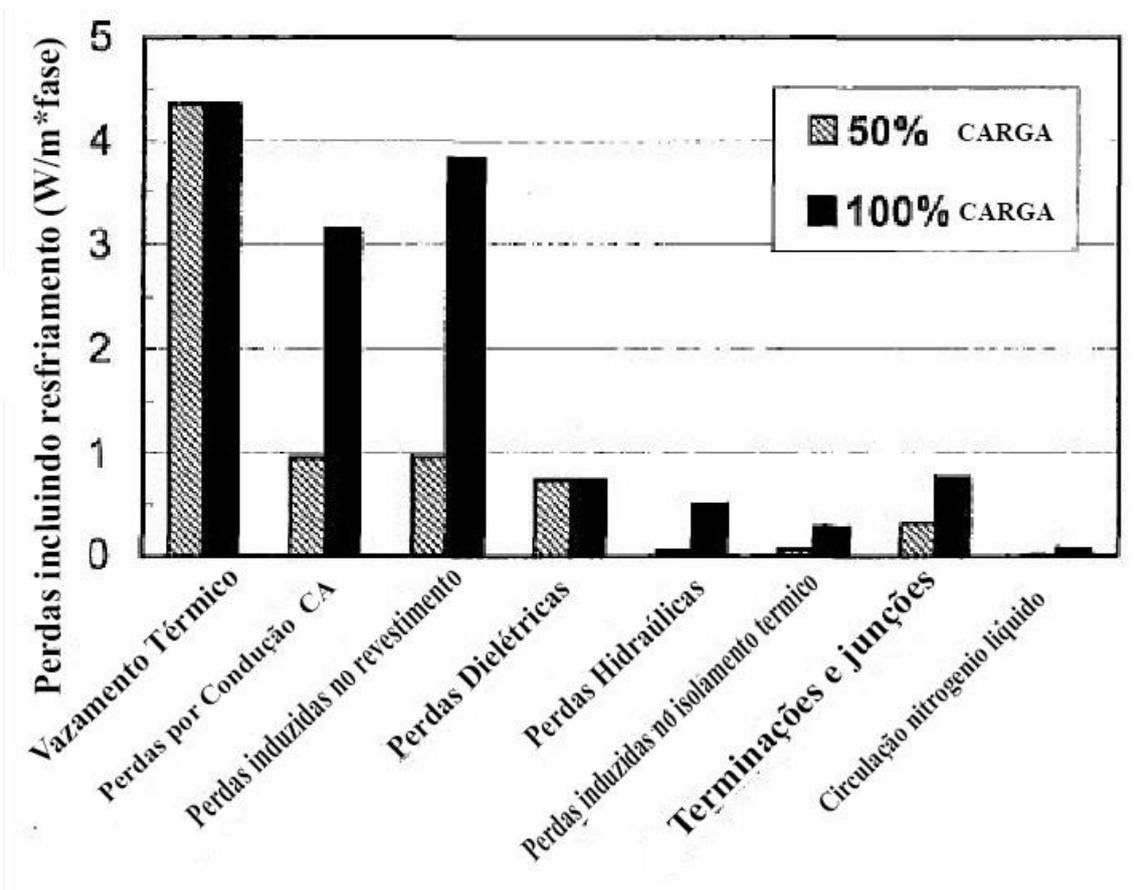


Figura 9 - Distribuição de perdas em um sistema de cabo SAT sem blindagem supercondutora para o fornecimento de 450 MVA com uma tensão de 132 kV. A eficiência térmica do sistema de resfriamento estão incluídos e distribuídos uniformemente

Através do gráfico, observa-se que as componentes que mais influenciam nas perdas quando a carga é total são: o vazamento térmico, condução CA, e as correntes induzidas no revestimento [14]. E quando o sistema está com a metade de sua carga, apenas as perdas por vazamento térmico são expressivas.

Na figura 10, observa-se uma comparação do mesmo sistema de cabos SAT com um sistema de cabo convencional, formado por 6 cabos de núcleo simples, para o fornecimento igual de 450 MVA. Para o intervalo de corrente de 0 até 600 amperes (30% da carga), as perdas energéticas de um sistema SAT são maiores que um sistema convencional [14]. Após esse intervalo, as perdas por cabo convencional aumentam consideravelmente em comparação as perdas por cabo SAT, sendo que em plena carga com corrente a 2kA, as perdas por cabo SAT são 25% menores que as perdas por cabo convencional [14].

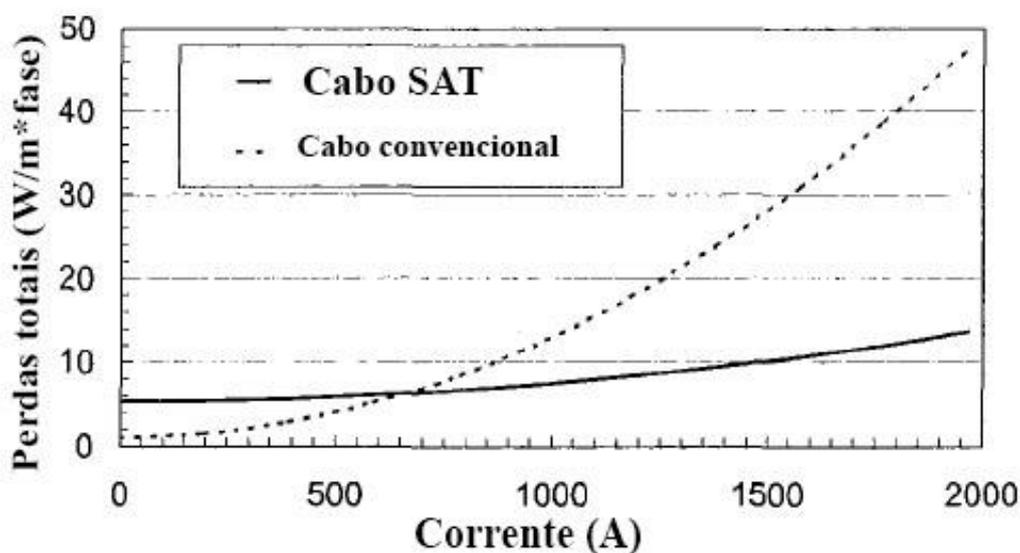


Figura 10 - Perdas em sistemas com cabos SAT e com cabos convencionais para o fornecimento de 450 MVA com tensão 132 kV

5.2. Projetos em Andamento

Vários laboratórios e organizações já construíram seus protótipos de cabos para a utilização em transmissão de energia. Alguns desses protótipos mais conhecidos são:

- Sistemas de Edison Detroit para transmissão CA
- Projeto de cabo em São Peterburgo, na Rússia para transmissão CC

5.2.1. Sistema de Cabos utilizado em Detroit Edison

Em Detroit Edison, o objetivo do projeto é a demonstração de um sistema de reutilização de uma estrutura elétrica convencional com o uso de Cabos SAT com temperatura ambiente (sem blindagem SAT) que inclui a construção dos cabos, a instalação e a operação de um sistema trifásico de 100 MVA com uma tensão de 24 KV [23]. Originalmente, a estrutura comportava 3 circuitos paralelos com cabos convencionais e agora há apenas um circuito com cabo SAT que transportaram a mesma potência anterior com uma corrente de 2400 Arms, três vezes maior que a capacidade dos cabos anteriores. Para a construção de cabo SAT, foi utilizado 29 Km fitas supercondutoras de BSCCO (cuprato semelhante ao YBCO) para construção de 120 m contínuos de cabo seriam armazenados dentro de ductos com 102 mm seção transversal. Para tanto, o cabo foi projetado com 4 camadas de fitas supercondutoras enroladas de forma que o ângulo das fitas garantisse a tensão necessária para a flexão do cabo durante a fabricação e sua operação em temperatura ambiente, uma distribuição homogênea de corrente entre as camadas para uma maior capacidade de transmissão e uma minimização dos campos magnéticos originados por cada fita e assim diminuir a perdas por condução alternada. Uma fita desse supercondutor possui o valor de corrente crítica de 118 A contínuos [23]. Para o dielétrico, a utilização de borracha etilenopropileno (EPR) por ser um material eficaz para a demonstração e as junções foram adaptadas para a passagem do nitrogênio líquido para o processo de arrefecimento do cabo.



Figura 11 - Perfil estrutural do cabo utilizado no projeto Edison Detroit

Os sistema apresentou uma excelente performance com o fornecimento de energia sem impacto negativo a rede. Na região, a estação de Edison fornece energia para 14 mil consumidores.

Devido a disputa de mercado entre as empresas que desenvolvem os cabos, dados quanto a eficiência e os custos totais de projeto ainda não são liberados para a comunidade científica.

5.2.2. Projeto em São Petersburgo, Rússia.

O projeto de São Petersburgo consiste em um desenvolvimento de uma linha de transmissão de 2,5 km, com uma tensão nominal de 20 kV e uma potencia de 50 MW. Os cientistas Sytnikov e Rimorov desenvolveram essa linha que conecta duas subestações na região entre os distritos de Tsentralnaya e Chesmenskaya [24]. Diferentemnete do projeto de Detroit, o projeto trabalha com tensão continua com o auxilio de conversores CA/CC [24].

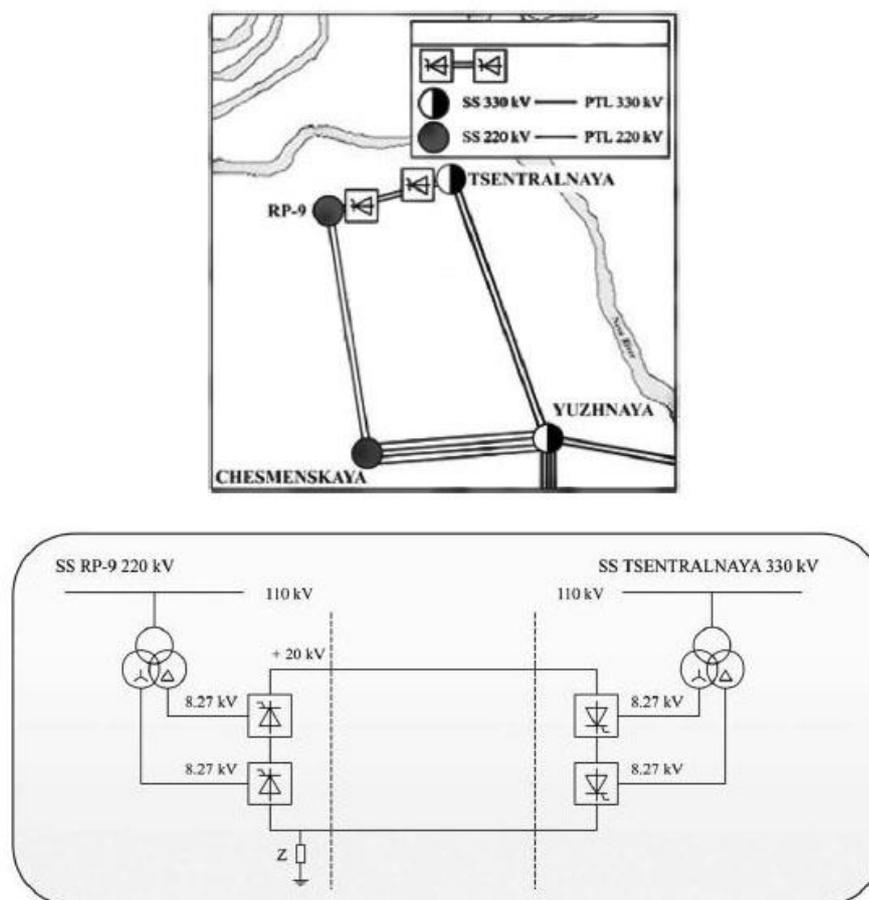


Figura 12 - Localização do cabo SAT CC dentro da rede de fornecimento em São Petersburgo e diagrama de blocos do cabo

O cabo SAT nesse projeto possui uma estrutura unipolar, em estrutura sem blindagem SAT, com uma camada para condução reversa. Possui duas camadas de fitas supercondutoras com 22 fitas, com corrente crítica 160 A, para a condução direta e uma camada com 19 fitas, com corrente crítica 180 A, para a condução reversa. O cabo possui camadas de estabilização, isolamento dielétrico, isolamento térmico a vácuo e proteção externa com uma estimativa de 39 mm de diâmetro externo.

Nesse projeto, um dos grandes desafios a serem lidados é o sistema de resfriamento para um grande comprimento de cabo. O cálculo do fluxo de nitrogênio líquido que será bombeado internamente no cabo e a transferência de calor durante o processo são parâmetros fundamentais para o funcionamento do sistema. A faixa de temperatura que o nitrogênio líquido permanece em estado líquido está entre 63,3 K (solidificação do líquido) à

77,4 K (ebulição do líquido) com uma pressão de 1 atm (9.87 μ PA), sendo uma faixa relativamente pequena de controle para um grande comprimento de cabo. Mesmo que se aumentasse a pressão interna do cabo que, conseqüentemente, aumentando essa faixa de liquefação do nitrogênio líquido (com 2 atm, tem-se 20,2 K de faixa de liquefação), a temperatura de saída do nitrogênio no tubo alcançaria elevadas temperatura indesejáveis, reduzindo o estado supercondutor do cabo [24].

Para determinação da taxa de fluxo de nitrogênio que circularia dentro do tubo, os projetistas simularam cabos com diâmetros internos de 60 mm, 64 mm e 66 mm, admitindo que a variação de temperatura aceita dentro do tubo seja menor de 6 K [24]. O resultado dessa simulação segue a figura 13.

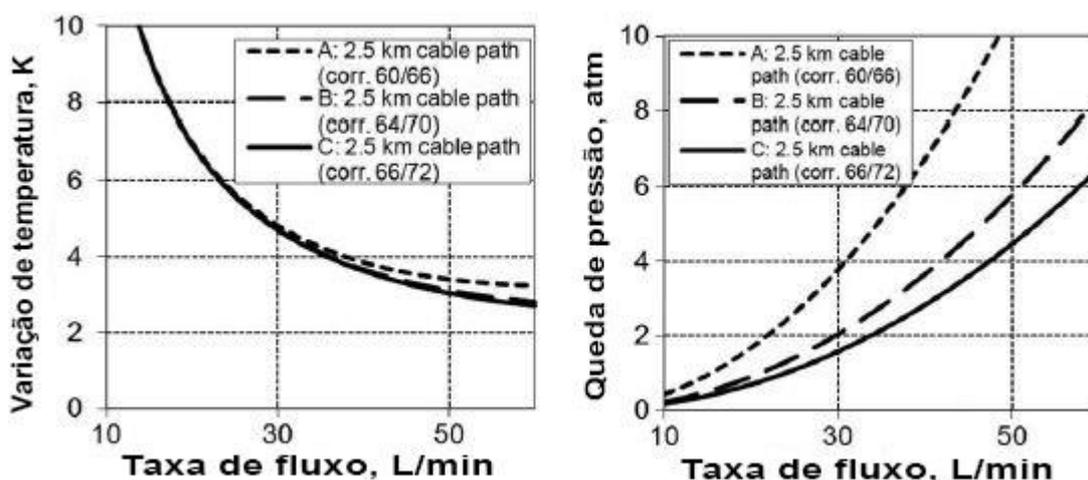


Figura 13 - Variação de temperatura (esquerda) e queda de pressão (direita) em uma tubulação criogênica com 2,5 km de comprimento

Em cada extremidade da linha supercondutora, existe uma unidade conversora retificador de transmissão contínua que conecta a rede com padrão CA. São conversores de 12 pulsos comutados com seus polos CC conectados ao cabo com transformadores trifásico de 110/8,7 kV e potência de 50 MW, com uma tensão de saída de 20 kV CC [24]. Para minimização dos efeitos da energia reativa e dos harmônicos no conversores, foram instalados unidades de compensação em forma de filtros capacitivos junto a rede que conecta os conversores. Para o lado CC, filtros são instalados para o ajuste do sexto e décimo segundo harmônico originado nos conversores [24].

O projeto está em fase de testes, com desenvolvimento dos componentes e da infraestrutura necessária para operação. A previsão dos projetistas é que no ano de 2016 ocorrerá os testes operacionais da linha de transmissão [24].

6. Conclusão

As substâncias com características supercondutoras possuem alta densidade de corrente elétrica com o mínimo de perdas de condução. Essa qualidade estimula o uso da supercondutividade em diversas áreas da engenharia elétrica, principalmente, no sistema elétrico de potência. Contudo, as condições de operação extrema eram a principal barreira para o seu uso.

Com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura, os pesquisadores conseguiram acrescentar vantagens econômicas quanto à utilização desses elementos em linhas de transmissão. Com isso, os supercondutores são uma solução eficiente para o melhoramento da distribuição energética em diversos países, sobretudo nos grandes centros urbanos, pois intensifica a capacidade de transmissão de energia sem aumento problemas comuns que ocorrem em linhas convencionais, como por exemplo, o risco de faltas elétricas.

Alem da vantagem de possuir uma alta capacidade de condução, baixa utilização de material, têm-se que os supercondutores apresentam um menor impacto ao meio ambiente em comparação a outros métodos de transmissão e podem utilizar estruturas e instalações de sistemas convencionais já existentes para o sua aplicação, reforçando o baixo impacto no ambiente.

Contudo, observou-se que o principal obstáculo para o sua aplicação é a utilização de sistemas de resfriamento com alto grau de controle. Essa característica é um parâmetro que encarece os projetos que utilizam os cabos SAT. Outra vantagem originada é a não definição de qual é a melhor forma de transmissão. A transmissão por corrente alternada possui perdas consideráveis durante o percurso do cabo e a transmissão por corrente continua utiliza conversores CA/CC, que encarecem os projetos.

Analisando essas características, conclue-se que a aplicação de cabos supercondutores é recomendada para o fornecimento de energia em grandes centros urbanos ou em usinas onde a demanda de corrente elétrica é maior.

Referências Bibliográficas

- [01] Gregory W.D., Mathews Jr. W. N. e Edelsack E. A. (1973). *The Science and Technology of Superconductivity*, Department of Physics Georgetown University Washington, D.C. Plenum Press. Vol 1.
- [02] McFee, R. , *Electrical Engineering* 81, 122 (1962)
- [03] Atherton, D. , artigo n°. 3121, IEEE Canadian Electronics Conference, Toronto, Canada, 1963
- [04] Klaudy, P. A., *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 11, 684. Plenum Press, 1966.
- [05] Gauster, W.F., Freeman, D.C., e Long, H.M., *World Power Conference*, Lausanne, Suíça, 1964.
- [06] Garwin, R.L., e Matisoo, J. *Proc IEEE* 55, 538, 1967
- [07] Voigt, H., *Conference on Low Temperatures and Electric Power*, International Institute of Refrigeration, Londres, 1969.
- [08] Delile, G., *Conference on Low Temperature and Electric Power*, International Institute of Refrigeration, Londres, 1969
- [09] Malozemoff A. P., Maguire J., Gamble B. e Kalsi S., “Power Applications of High-Temperature Superconductors: Status and Perspectives,” *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 12, n°. 1, março 2002
- [10] J. Gerhold, *Handbook of Applied Superconductivity*, B. Seeber, Ed. Bristol: Instit. Phys., 1998, pag. 1627–1689.
- [11] M. Nassi et al., *Proc. 2001 Int. Wkshp. Superconduct.*, Honolulu, HI, Junho 24–27, 2001, pag. 205–207.
- [12] T. Masuda et al., *Advances in Superconductivity XII*. Tóquio: Springer-Verlag, 2000, pp. 830–835.
- [13] D. Willen, *Proc. Eucas Conf.*, Compenhague, Dinamarca, Agosto. 27–30, 2001.
- [14] Toennesen O., Ostergaard J., Okholm J., Lomholt K. *Energy losses of superconducting power transmission cables in the grid*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 11, no. 1, pag. 1285-1288, 1999.
- [15] *Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor)*, IEC Standard, publication 287, 1982.
- [16] S. Kruger Olsen, C. Traeholt, K. H. Jensen, O. Tnnesen, M. Daumling, C. N. Rasmussen, D. W. A. WillCn, *Test of a 10-meter long, 2 kArms high-temperature superconducting cable conductor model based on Bi-2223/Ag-alloy tapes*, *Inst. Phys. Con\$ Ser.*, No 167, pp. 1151-1 154, 1999.
- [17] G. Vellego, P. Metra, *Supercond. Sci. Technol.*, 8, pp. 476, 1995.
- [18] S. Mukoyama et al., *50-m logn HTS conductor for power cable*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. I , no. 2, pp. 1069-1072, 1997.
- [19] M. Daumling, *A model for the current distribution and ac losses in superconducting power cables*, *CTyogenics*, vol. 39, pp. 759-766, 1999.
- [20] Y. L. Buyanov, A. B. Fradkov, I. Y. Shebalin, *A treview of current leads for cryogenic devices*, *Cryogenics*, vol. 15, no. 4, pp. 193-200, 1975.
- [21] J. Oestergaard, *Superconducting power cables in Denmark - a case study*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 7, no. 2, pp. 719-722, 1997.
- [22] Tolmasquim, M. T., Guerreiro, A., Gorini, R. FOULKES, H. Em: *Matriz energética brasileira: uma perspectiva*. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-33002007000300003&script=sci_arttext>. Acesso em 25 de julho de 2014.
- [23] Kelley, N., Wakerfield, C., Nassi, M., Jipping, J., *HTS Cable System Demonstration at Detroit Edison*
- [24] Sytnikov, V. E., Bemert, S. E., Ivanov, Yu. V., Kopylov, S. I., Krivetskiy, I. V., Rimorov, D.S., *HTS DC Cable Line Project: On-going Activities in Russia*, *IEEE Transactions on applied superconductivity*, volume 23, no. 3, junho 2013