

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Valcimar Silva de Andrade

**PROPOSTA DE CONFIGURAÇÃO PARA TESTES E CARACTERIZAÇÃO DE
DIELÉTRICOS EM CONDIÇÃO CRIOGÊNICA PARA USO EM
TECNOLOGIA DE SUPERCONDUTORES**

Belo Horizonte – MG

2024

Valcimar Silva de Andrade

**PROPOSTA DE CONFIGURAÇÃO PARA TESTES E CARACTERIZAÇÃO DE
DIELÉTRICOS EM CONDIÇÃO CRIOGÊNICA PARA USO EM
TECNOLOGIA DE SUPERCONDUTORES**

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte - MG

2024

A553p

Andrade, Valcimar Silva de.

Proposta de configuração para testes e caracterização de dielétricos em condição criogênica para uso em tecnologia de supercondutores [recurso eletrônico] / Valcimar Silva de Andrade. - 2024.

1 recurso online (144 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Wallace do Couto Boaventura.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 143-144.

Bibliografia: f.131-142.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Supercondutores - Teses. 3. Dispositivos dielétricos - Teses. 4. Método dos elementos finitos - Teses. I. Boaventura, Wallace do Couto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"PROPOSTA DE CONFIGURAÇÃO PARA TESTES E CARACTERIZAÇÃO DE DIELÉTRICOS EM CONDIÇÃO CRIOGENICA PARA USO EM TECNOLOGIA DE SUPERCONDUTORES"

VALCIMAR SILVA DE ANDRADE

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 31 de julho de 2024. Por:

Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Marcelo Azevedo Neves
Depto de Física (UFRRJ)

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto
ISEE - Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (UNIFEI)



Documento assinado eletronicamente por **Wallace do Couto Boaventura, Professor do Magistério Superior**, em 01/08/2024, às 09:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Osvaldo Saldanha Paulino, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 01/08/2024, às 15:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Jose da Silva Lopes, Professor do Magistério Superior**, em 08/08/2024, às 13:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Azevedo Neves, Usuário Externo**, em 09/08/2024, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Estacio Tavares Wanderley Neto, Usuário Externo**, em 12/08/2024, às 08:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3417715** e o código CRC **9769494D**.

Dedico integralmente este trabalho à minha mãe, Nair das Dores Silva de Andrade (*in memoriam*), que tanto me ensinou, amparou e incentivou a buscar conhecimento e crescimento humano, guardando sempre a fé. Enorme saudade!

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom precioso da vida e pelas oportunidades de aprendizagem, crescimento humano, intelectual e profissional.

À minha família, meus pais, Nair (*in memoriam*) e Vacir, e meus irmãos, Denilson e Alisson. Pelo apoio em todos os momentos, pela torcida e orações constantes.

Ao professor Wallace, pelo conhecimento compartilhado, paciência, orientação, suporte, amizade e ensinamentos sobre a vida acadêmica e seus percalços.

Aos professores Ivan, José Osvaldo e Estácio, pelas discussões técnicas, conselhos, colaborações, disposição e paciência em avaliar esta tese. Obrigado pelas críticas, sugestões e propostas de melhorias.

Ao professor Marcelo Neves, pelas oportunidades de formação e colaboração em supercondutividade aplicada, pelos auxílios nos trabalhos experimentais e pela disposição em avaliar a tese.

Ao PPGEE-UFMG e ao povo brasileiro, pelas oportunidades de formação e pesquisa. Vivemos tempos ainda desafiadores para ciência e educação. Lembremos sempre da importância destas na superação dos desafios tecnológicos e humanos do país!

Ao IFMG - *Campus* Governador Valadares, pela oportunidade de atuação como docente e pela possibilidade de dedicação aos trabalhos de pesquisa e formação acadêmica.

Aos colegas e amigos do LCE e LEAT-UFMG: Samira, Amanda, Rodrigo, Carlos, Mozart e João. Agradeço imensamente pelos momentos de mútua ajuda, compartilhamento de ideias, conselhos, acolhimento e momentos do café.

Aos amigos da UFRRJ e PVS-CEDERJ, Wemerson, Carlos Eduardo, Luciano, Juliana, Jefferson, Gilberto, Adilson, Wellington, Rayssa, Andreia, Anelize, Adriana Medeiros, Gilberto, Dilma, Kléber, Dona Aparecida (*in memoriam*), Sr. Paulo e Claudiane Canuto. O tempo passa, os rumos mudam, a distância separa, mas a amizade continua.

Aos amigos do IFMG - *Campus* Governador Valadares, em especial Fábio Cruz, João, Wanderson, Tonimar, Neuber, Djalma, Ana Catarina, Ronaldo, Karina, Jaider, Fernanda, Graciele, Silvana, Rejane e Elizabeth, pela amizade de sempre, a torcida e também o companheirismo na luta que é a educação pública, gratuita e de qualidade neste país.

Ao amigo e irmão Sandro da Costa Silva, extensivo a toda sua família, pela amizade, exemplo de fé e retidão, e grande ajuda nesta caminhada.

A Solange Riveli, Dona Emilce, Franciele e Selma, pelos aprendizados, por momentos bons, ajudas mútuas e orações.

Aos amigos de Governador Valadares: Mirian, Willian, Marina, Kélen, Fábio Perim, Thaís, Sebastiana (Tiana), José, Cássio, Jarlene, Daniela, Dayane e José Sebastião, pelos inúmeros momentos de descontração, conversas boas, ajudas, reflexões sobre a vida e encorajamento mútuo.

Aos amigos do MUR: Narjara, Marcela, Jaime, Tobias, Rafaela e Paulo. Muito obrigado pela torcida, caminhada na fé, partilhas e crescimento humano.

Ao pessoal do laboratório de caracterização elétrica do CEPTEL no Rio de Janeiro, Rodrigo Dias Ramires, Cesar Provenzano Jou e Italo Foradini da Nova. Vocês foram muito solícitos e ajudaram bastante no desafio que foi realizar algumas medições.

Ao professor Angelo Márcio de Souza Gomes, pelo auxílio no fornecimento de nitrogênio líquido através do laboratório de baixas temperaturas do IF-UFRJ.

Ao LAT-EFEI, nas pessoas do professor Estácio Tavares Wanderley Neto e dos técnicos Nivaldo Costa Alcântara e Cleython Silvestre Aguiar, pelo apoio nas medições com a Ponte Schering.

Ao pessoal do departamento de Física da UFMG, em especial o estudante Fabio Cardoso Ofredi Maia, a técnica de laboratório, Loudiana Mosqueira Antônio, e o técnico em criogenia, Leandro Lemos Simões, pela ajuda e discussões técnicas importantes.

Ao pessoal da secretaria do PPGEE-UFMG, pela presteza, competência e auxílios nos diversos processos burocráticos que existem, desde uma simples matrícula até uma viagem para participação de evento no exterior.

Aos colegas professores David Augusto Lopes e Estela Maria Perez Diaz, pela amizade e por grande auxílio no período de estada em Belo Horizonte.

Aos professores e cientistas brasileiros, que são agentes importantes no desenvolvimento do país, mas que muitas vezes não recebem a devida atenção, reconhecimento e condições adequadas para cumprirem sua missão.

"Senhor, fazei de mim um instrumento de vossa paz."

São Francisco de Assis

RESUMO

Uma das questões mais importantes no desenvolvimento de cabos supercondutores de energia (CSE) com dielétrico frio, bem como outros dispositivos da tecnologia supercondutora de alta temperatura crítica (HTSTec), é o sistema de isolamento elétrico em ambiente criogênico. É desejável medir tanto a rigidez dielétrica, quanto as perdas dielétricas e permissividade elétrica de materiais isolantes em temperaturas criogênicas. Apesar de existirem medições destas características em ambiente criogênico para alguns materiais, ainda existe carência de metodologias e aparatos próprios neste campo de pesquisa, que permitam mais estudos com novas propostas de materiais e a disponibilização de dados para projetos. Nesta tese apresentamos uma contribuição através do projeto de um sistema de medição que permite medir as três grandezas citadas em amostras de materiais dielétricos em temperatura de banho em nitrogênio líquido (77 K), frequência industrial e alta tensão, utilizando eletrodos desiguais (25/75 mm). Tal sistema utiliza os mesmos eletrodos e câmara criogênica para todas as medições, observando padrões nacionais e internacionais. Desta forma somente os circuitos externos de alimentação e medição devem ser alterados para realização da respectiva caracterização. Em um primeiro momento, o arranjo foi concebido com ajuda de simulação computacional, utilizando um software comercial de Método dos Elementos Finitos (MEF), e considerações de projeto. Em etapa posterior, foi realizada a montagem e um teste de conceito do equipamento proposto, onde foram feitas medições das propriedades dielétricas mencionadas em folhas de material dielétrico laminado NKN. Este material é composto por filme de poliimida envolto em duas camadas de poliamida aromática, e foi proposto como alternativa no primeiro projeto de CSE brasileiro. Também foram feitas medições da rigidez dielétrica com eletrodos iguais (6,4/6,4 mm), e de permissividade e tangente de perdas em baixa tensão, utilizando um medidor LCR, ou seja, que mede indutância (L), capacitância (C) e resistência (R). Neste caso, as medições foram em temperatura ambiente e criogênica, envolvendo o próprio NKN e seus constituintes. Resultados obtidos com o teste de conceito são comparados com essas medidas e outras disponíveis na literatura. O conceito de equipamento proposto é funcional, mesmo para um arranjo relativamente simples, e poderá ser empregado em diferentes contextos. Novas medições e aperfeiçoamentos são esperados em propostas futuras.

Palavras-chave: tecnologia supercondutora; dielétrico criogênico; rigidez dielétrica; tangente de perdas; permissividade elétrica.

ABSTRACT

One of the most important issues in the development of cold dielectric superconducting power cables (CSE), as well as other high critical temperature superconducting technology (HTSTec) devices, is the electrical insulation system in a cryogenic environment. It is desirable to measure both the dielectric strength, dielectric losses and electrical permittivity of insulating materials at cryogenic temperatures. Although there are measurements of these characteristics in a cryogenic environment for some materials, there is still a lack of methodologies and apparatus specific to this field of research, which would allow further studies with new material proposals and the availability of data for projects. In this thesis work we present a contribution through the design of a measurement system that allows measuring the three quantities mentioned in samples of dielectric materials at liquid nitrogen bath temperature (77 K), industrial frequency and high voltage, using unequal electrodes (25/ 75mm). This system uses the same electrodes and cryogenic chamber for all measurements, complying with national and international standards. Therefore, only the external power supply and measurement circuits must be changed to carry out the respective characterization. Initially, the arrangement was designed with the help of computer simulation, using commercial finite element method (FEM) software, and design considerations. In a subsequent stage, assembly and a concept test of the proposed equipment were carried out, where measurements of the dielectric properties mentioned were made on sheets of laminated NKN dielectric material. This material is composed of polyimide film wrapped in two layers of aromatic polyamide, which was proposed as an alternative in the first Brazilian CSE project. Dielectric strength measurements were also made with equal electrodes (6.4/6.4 mm), electrical permittivity and loss tangent at low voltage, using an LCR meter (inductance, capacitance and resistance). In this case, the measurements were at room and cryogenic temperatures, involving the NKN itself and its constituents. Results obtained with the concept test are compared with these measurements and others available in the literature. The proposed equipment concept is functional, even for a relatively simple arrangement, and could be used in different contexts. New measurements and improvements are expected in future proposals.

Key-words: superconducting technology; cryogenic dielectric; dielectric breakdown voltage; loss tangent; electrical permittivity.

Lista de Figuras

Figura 1 - Transição supercondutora do mercúrio. Adaptada de [1]	33
Figura 2 - Efeito Meissner-Ochsenfeld	34
Figura 3 - Parâmetros críticos (J_c , H_c , T_c) e estado supercondutor	35
Figura 4 - Comportamento magnético dos Supercondutores Tipo I (a) e Tipo II (b)	36
Figura 5 - Curva E-J de um material supercondutor - densidade de corrente crítica e campo elétrico crítico	38
Figura 6 - (a) Curva E-J linear com diferentes valores de n . (b) Curva E-J em escala logarítmica com diferentes valores de n e as etapas de transição [42]	39
Figura 7 - (a) Cabo supercondutor CC. (b) Cabo supercondutor CA. Extraído de [48]..	41
Figura 8 – Capacitor de placas planas e paralelas – tensão contínua [78]	57
Figura 9 – Capacitor de placas planas e paralelas – tensão alternada [78]	58
Figura 10 – Diagrama da permissividade elétrica [78]	59
Figura 11 – Configuração de eletrodos para o Dielectric Sheets Breakdown Test (a) campo uniforme (b) campo não uniforme [107]	74
Figura 12 – (a) Configuração de eletrodos para o Turn-to-Turn Electrode Breakdown Test (b) Kapton® (c) Kraft (d) Nomex® [107]	74
Figura 13 – Amostra de Nomex 410	81
Figura 14 – Amostra de Kapton HN	82
Figura 15 – Amostra de NKN já preparada para enrolamento	83
Figura 16 – Construção do modelo computacional	89
Figura 17 – Visualização axissimétrica dos eletrodos	90
Figura 18 – Esquema dos eletrodos cilíndricos escolhidos. As dimensões estão em milímetros (mm)	91
Figura 19 – Circuito para medição de perdas dielétricas e capacitância com a Ponte Schering	92
Figura 20 – Circuito para medição da rigidez dielétrica	96

Figura 21 – (a) Porta amostra construído com placas de TVE G10 e disco de PTFE perfurado (b) Eletrodos montados nas peças de TVE G10 e PTFE.	97
Figura 22 – Eletrodos de 25 e 75 mm usinados	98
Figura 23 – Câmara criogênica (Cooler de EPS)	99
Figura 24 – Estufa de secagem das amostras	100
Figura 25 – Ponte Schering – LAT-EFEI	100
Figura 26 – Osciloscópio utilizado no teste de rigidez dielétrica	101
Figura 27 – (a) Variac para produção da rampa de tensão e osciloscópio para medição. (b) Transformador de alta tensão, ponta de prova e câmara criogênica	102
Figura 28 – Porta amostras para medição com LCR	104
Figura 29 – Medidor LCR e recipiente de EPS com o porta amostra imerso em N2L	104
Figura 30 – Amostras utilizadas nas medições com LCR	105
Figura 31 – (a) Desenho do eletrodo de 6,4 mm em corte (2D) e (b) perspectiva 3D do eletrodo pronto para usinagem CNC	107
Figura 32 – Porta amostra para medidas de rigidez com eletrodos iguais (6,4 mm)	107
Figura 33 – Parâmetros geométricos da camada de isolamento	108
Figura 34 – Visualização da distribuição de campo elétrico	112
Figura 35 – Esquemático da câmara criogênica (TVE G10) e eletrodos com ajuste de pressão, inicialmente propostos (2D)	113
Figura 36 – Esquema do conjunto câmara criogênica e eletrodos inicialmente propostos (3D) - Câmara transparente para melhor visualização.	113
Figura 37 – Fotografia de equipamento para medição de rigidez dielétrica mostrando a câmara criogênica de EPS fechada (esquerda) com os eletrodos dentro, o transformador alta tensão (centro) e pontas de prova de alta tensão (direita e abaixo)	116
Figura 38 – Tangente de perdas em temperatura ambiente na faixa de 20 a 100 Hz	119
Figura 39 – Tangente de perdas em temperatura ambiente na faixa de 100 a 1000 Hz	119
Figura 40 – Permissividade relativa em temperatura ambiente na faixa de 20 a 100 Hz	120
Figura 41 – Permissividade relativa em temperatura ambiente na faixa de 100 a 1000 Hz	120

Figura 42 – Tangente de perdas em banho N2L na faixa de 100 a 1000 Hz	121
Figura 43 – Permissividade relativa em banho de N2L na faixa de 100 a 1000 Hz	121

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Áreas de conhecimento relativas ao trabalho (CAPES)	26
Tabela 2 – Alguns dos projetos de CSEs no mundo - CA e CC. Adaptado de [49,51]	43
Tabela 3 – Propriedades do TVE G10	88
Tabela 4 – Propriedades do N2L	89
Tabela 5 – Propriedades do cobre	89
Tabela 6 – Propriedades dos materiais dielétricos analisados no LCR e em teste de rigidez dielétrica com eletrodos iguais (6,4 mm)	105
Tabela 7 – Dados geométricos das amostras quadradas utilizadas no teste de conceito do arranjo proposto	114
Tabela 8 – Fator de dissipação e permissividade relativa do NKN – PS	114
Tabela 9 – Fator de dissipação e permissividade relativa do Nomex 410 – OS ..	115
Tabela 10 – Fator de dissipação e permissividade relativa do NKN – CP 100 ..	115
Tabela 11 – Fator de dissipação e permissividade relativa do Nomex 410 – CP 100	115
Tabela 12 – Rigidez dielétrica em N2L no arranjo proposto – Eletrodos 25/75 mm	117
Tabela 13 – Valores de rigidez dielétrica em temperatura ambiente e em banho de N2L para eletrodos iguais (6,4 mm)	122
Tabela 14 – Dados utilizados nos cálculos do comprimento total de fita de material isolante para um protótipo de CSE	124

Lista de Abreviaturas e Siglas

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
AC	<i>Alternating Current</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BCS	Teoria da supercondutividade proposta por John Bardeen, Leon Cooper, e John Robert Schrieffer
BSCCO ₂₂₁₂	Composto a base de bismuto-estrôncio-cálcio-óxido de cobre na estequiometria 2212
BSCCO ₂₂₂₃	Composto a base de bismuto-estrôncio-cálcio-óxido de cobre na estequiometria 2223
CAPES	Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEPEL	Centro de Pesquisa da Eletrobrás
CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
CIGRE	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
CNC	Comando Numérico Programável
COP	Coeficiente de performance (refrigerador)
CSE	Cabo Supercondutor de Energia
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
EP	<i>Ethylene-propylene</i> (Etileno-propileno)
EPP	<i>Expanded polypropylene</i> (Polipropileno expandido)
EPR	<i>Ethylene Propylene Rubber</i>

EPS	<i>Expanded Polystyrene</i> (Poliestireno expandido)
DOE	<i>Department of Energy -USA</i>
DP	Descarga Parcial
EMF	Electromagnetic Field (Campo Eletromagnético)
EOSBF	Encontro de Outono da Sociedade Brasileira de Física
EPRI	Electric Power Research Institute
EUCAS	European Conference on Applied Superconductivity
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FES	Flywheel Energy Storage
FRP	Fiber Glass Reinforced Plastic
HDPE	High density polyethylene (Polietileno de alta densidade)
HeL	Hélio Líquido
HTS	Hight Temperature Superconductors
HTSTec	Tecnologia Supercondutora de Alta Temperatura
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISH	International Symposium on High Voltage Engineering
LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá
LDPE	Low density polyethylene (Polietileno de baixa densidade)
LEAT-UFMG	Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal de Minas Gerais
LMDS-UFRRJ	Laboratório de Materiais e Dispositivos Supercondutores da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
LTS	Low Temperature Superconductors
MEF	Método dos Elementos Finitos (FEM – <i>Finite Element Method</i>)

MgB ₂	Diboreto de Magnésio
N ₂ L	Nitrogênio líquido
NbSn	Liga Nióbio Estrôncio
NbTi	Liga Nióbio Titânio
NbZr	Liga de Nióbio Zircônio
NKN	Dielétrico laminado: Nomex® - Kapton® - Nomex®
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PP	Polypropylene (Polipropileno)
PPLP	Polypropylene Laminated Paper
PTFE	Polytetrafluoroethylene (politetrafluoretileno)
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SFCL	Superconducting Fault Current Limiter
SFES	Superconducting Flywheel Energy Storage
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
TAESA	Aliança de Energia Elétrica S.A
TBE	Transmissora Brasileira de Energia
TRL	Technology Readiness Level (Nível de prontidão tecnológica)
TVE-G10	Laminado industrial feito de fibra de vidro com resina epóxi
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
YBCO	Composto supercondutor a base de ítrio-bário-cobre-oxigênio
XLPE	Cross-linked polyethylene (Polietileno reticulado)

Lista de Símbolos

$\vec{H}$	campo magnético
T_c	temperatura crítica
J_c	densidade de corrente crítica
H_c	campo magnético crítico
H_{c1}	campo magnético crítico inferior
H_{c2}	campo magnético crítico superior
M	magnetização
E_c	campo elétrico crítico
n	índice que caracteriza o supercondutor em termos de transporte de corrente
T	temperatura
J	densidade de corrente elétrica
E	campo elétrico
M	magnetização
I_c	corrente crítica
L	indutância própria
I	corrente elétrica
E_M	energia magnética
E_R	energia rotacional
I_m	momento de inércia
ω	frequência angular ou velocidade angular
C, C_0	capacitância com dielétrico, capacitância sem dielétrico
A	área
t	separação entre as placas do capacitor
$\varepsilon'_r, \varepsilon''_r$	permissividade elétrica parte real e parte imaginária
κ', κ''	constante dielétrica parte real e parte imaginária
I_C, I_R	corrente capacitiva, corrente de perdas (resistiva)

G	condutância
δ	ângulo de perdas
Q	fator de qualidade
V	tensão elétrica
V_d	tensão elétrica disruptiva
h	espessura
E_{RD}	rigidez dielétrica
f	frequência
ρ	resistividade elétrica (volumétrica)
R	resistência elétrica
l	comprimento
R_S, ρ_S	resistência e resistividade superficiais
d	espessura do isolamento
r_0	raio interno do isolamento
E_{RD}	rigidez dielétrica
V_{max}	tensão máxima
C_e	capacitância de borda
S	espessura média da amostra
P	perímetro do eletrodo de terra
ε_x	valor aproximado da permissividade da amostra
C_m	capacitância medida
C_r	capacitância real (corrigida)
ε_r	permissividade relativa
ε_0	permissividade do espaço livre ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)
L_p	passo de enrolamento
L_{HTS}	comprimento do cabo
λ	largura da fita de material isolante

λ_{ef}	largura efetiva da fita de material isolante
θ_p	ângulo de passo do enrolamento
r	raio do protótipo de CSE
λ_1, λ_2	opções de largura de fita de material isolante
$L_{fita\ 1}, L_{fita\ 2}$	comprimentos totais de fita de material isolante
D_{perdas}	potência das perdas dielétricas
$D_{perdas\ volumétricas}$	potência das perdas por volume
$P_{refrigeração}$	potência de refrigeração
VMD	volume de material dielétrico
COP	coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	23
1.1 – Histórico e contexto do trabalho	23
1.2 – Relevância da investigação	27
1.3 – Objetivos da tese	29
1.3.1 – Objetivo geral.....	29
1.3.2 – Objetivos específicos.....	29
1.4 – Organização do texto	30
Capítulo 2 – Revisão de Literatura.....	32
2.1 – A tecnologia supercondutora de alta temperatura (HTSTec)	32
2.1.1 - A supercondutividade – apresentação e conceitos fundamentais	34
2.1.2 - Materiais supercondutores técnicos	39
2.1.3 - Transição supercondutora (HTS).....	40
2.1.4 - Aplicações de dispositivos supercondutores em SEPs	41
2.1.4.1 – Cabos de energia	43
2.1.4.2 - Limitadores de corrente de falta	47
2.1.4.3 - Transformadores	49
2.1.4.4 - Motores e Geradores	51
2.1.4.5 - Armazenadores de energia - SMES e SFES	53
2.1.4.6 - Principais desafios ao emprego de dispositivos HTS em SEPs.....	55
2.2 – Propriedades dos materiais dielétricos.....	57
2.2.1 - Constante dielétrica e tangente de perdas	58
2.2.2 - Rigidez dielétrica	62
2.2.3 - Resistividade volumétrica e superficial	65
2.3 – Métodos de caracterização de dielétricos	66
2.4 – Materiais dielétricos para cabos supercondutores	69
2.5 – Dielétricos em condições criogênicas.....	72
2.6 – O projeto estratégico nacional da ANEEL em HTSTec	79
2.7 – Uma proposta de dielétrico a ser estudado para HTSTec: NKN	82

Capítulo 3 – Materiais e Métodos	87
3.1 - Características desejadas no equipamento.....	87
3.2 – Simulação e dimensionamento	89
3.3 – Medição de tangente de perdas e de constante dielétrica	93
3.4 – Medição de rigidez dielétrica.....	97
3.5 – Testes do conceito e estudo de proposta de dielétrico para HTSTec.....	100
3.6 – Testes com materiais dielétricos em baixa tensão	105
3.7 – Testes com materiais dielétricos em alta tensão – eletrodos iguais.....	108
3.8 – Cálculo de material dielétrico para um protótipo de CSE	110
 Capítulo 4 – Resultados	 113
4.1 – Dimensionamento do equipamento e simulação com MEF	113
4.2 – Medidas de tangente de perdas e constante dielétrica - alta tensão	115
4.3 – Medidas de rigidez dielétrica	117
4.4 – Medidas de tangente de perdas e constante dielétrica - baixa tensão	119
4.5 – Medidas de rigidez dielétrica – eletrodos iguais.....	123
4.6 – Cálculo de isolamento para um protótipo de CSE - Exemplo	124
 Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões de Continuidade	 126
5.1 – Conclusões	126
5.2 – Sugestões de continuidade	129
Referências Bibliográficas	131
Anexo 1 – Lista de trabalhos resultantes da tese	143

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Histórico e contexto do trabalho

Descoberto no começo do século XX, o fenômeno da supercondutividade, que ocorre em temperaturas criogênicas, ou seja, abaixo de -150°C , só possibilitou os primeiros protótipos de dispositivos supercondutores para uma aplicação em redes elétricas no início do século XXI, impulsionado pelos desenvolvimentos na chamada supercondutividade de alta temperatura crítica (HTS - *High Temperature Superconductors*), iniciada na década de 1980. Por outro lado, a utilização da supercondutividade de baixa temperatura crítica (LTS - *Low Temperature Superconductors*) na construção de bobinas supercondutoras em eletromagnetos, por sua vez, ocorre desde a década de 1950, configurando-se ainda hoje como uma das aplicações da supercondutividade mais madura e disseminada comercialmente [1].

Avanços recentes nas tecnologias relativas ao emprego de dispositivos HTS em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), como a descoberta e otimização de novos materiais supercondutores, o advento das fitas supercondutoras de primeira e segunda geração (respectivamente, Fitas 1G e Fitas 2G), menor custo de sistemas criogênicos, desenvolvimentos em isolamento elétrico específico, modelagem e testes em rede, têm apontado uma rota tecnológica bastante favorável para a inserção comercial destes dispositivos em redes elétricas específicas no futuro [2].

Em todos os constituintes dos SEP, se pode, a princípio, explorar as propriedades dos supercondutores para contornar ou aperfeiçoar pontos que apresentam dificuldades com a tecnologia convencional, de cabos a armazenadores de energia [3]. O ambiente de demanda energética crescente, maiores ampacidades, o movimento de descarbonização das redes, diversificação da matriz energética em prol de energias renováveis, demandas específicas das *Smart Grids*, sinergia com outras tecnologias emergentes, maior competitividade e maturidade da tecnologia supercondutora, têm apontado para alguns nichos do setor elétrico onde o emprego desta já apresenta certa viabilidade, se comparada com a tecnologia convencional [2,4]. Além disso, testes de longa duração, a construção de normas [5] e um volume crescente de produção de materiais, tem contribuído para melhorar os aspectos de confiabilidade e custos desta tecnologia.

Na atualidade, cabos e limitadores de corrente supercondutores são as tecnologias mais amadurecidas (testadas) e promissoras, com interesse especial para o setor elétrico, pois possibilitam uma maior capacidade de transmissão de corrente (ampacidade) com menores perdas e uma redução dos níveis de correntes de curto-circuito [6]. Em termos gerais, um cabo supercondutor de energia (CSE) é um cabo elétrico em que seus elementos condutores de corrente elétrica, e usualmente os elementos utilizados na sua blindagem de campo eletromagnético, são constituídos por materiais supercondutores [7]. Já um dispositivo limitador de corrente supercondutor explora a transição abrupta do material supercondutor para uma fase dissipativa (resistiva) como mecanismo limitante da corrente de curto-circuito [8]. Existem diversos arranjos para esses e outros dispositivos supercondutores, propostos e sendo testados [9,10,11,12], dado o importante interesse tecnológico e uma movimentação em direção a um novo paradigma para os sistemas elétricos, incluindo a questão ambiental [2,13,14].

Medições e testes envolvendo cabos, limitadores de corrente, terminações e demais dispositivos supercondutores, em qualquer de suas aplicações, não é tarefa trivial e demanda circuitos e condições de ensaio especialmente projetados. O LEAT-UFMG, Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal de Minas Gerais, tem um longo histórico na realização de testes especiais envolvendo alta tensão, e tem empreendido seus esforços para a realização destes em suporte para atividades relativas a projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I).

O LMDS-UFRRJ - Laboratório de Materiais e Dispositivos Supercondutores da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, por sua vez, tem expertise voltada para estudos de aplicação de materiais supercondutores em sistemas elétricos, seja na caracterização e simulação destes materiais, ou em projetos relativos ao emprego destes no desenvolvimento de dispositivos voltados aos SEP: projeto envolvendo testes experimentais com dispositivo limitador de corrente supercondutor [15] e o projeto do primeiro cabo supercondutor de energia (CSE) brasileiro, P&D 712 SUPERCABO - ANEEL - [16,17]. Na primeira fase deste último, buscou-se nacionalizar toda uma metodologia de dimensionamento e simulação computacional para validação de sua operação (comportamentos eletromagnéticos e térmicos). Também foi desenvolvida uma estrutura e máquina para enrolamento de um CSE em escala laboratorial.

Uma possível fase seguinte desta iniciativa, que considerará a montagem e testes efetivos do primeiro CSE nacional, demanda sistemas de caracterização do protótipo em condições operacionais, bem como de equipamentos e materiais ancilares utilizados no seu fabrico, como é o caso de seu dielétrico. Em ressonância ao apontado pelo Centro Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE) [18], a continuidade de estudos e contribuições neste campo é importante para o processo de nacionalização desta tecnologia. A disseminação deste conhecimento e da tecnologia de CSEs, tanto no meio acadêmico brasileiro quanto no processo de atualização de profissionais nas concessionárias de energia elétrica nacionais, é de importância estratégica, visto que permitirá ao país fazer frente aos desafios de implantação futura de sistemas supercondutores considerando seu planejamento energético [18, 19]. Vale lembrar que, até onde sabemos, os projetos e sistemas de testes de CSEs no exterior se deram nas empresas fabricantes de cabos, sendo parceiras de universidades e centros de pesquisas, fabricantes de materiais supercondutores e dos respectivos governos locais (financiamento). Desta forma, há um seleto grupo de países e empresas que detém o *know-how* deste tipo de tecnologia.

A motivação para este tema de tese nasceu da possibilidade de continuidade de trabalhos desenvolvidos em ambos os projetos citados e da possibilidade de parceria entre LMDS-UFRRJ e o LEAT-UFMG, bem como de outras instituições de ensino e pesquisa, na realização de testes e medições especiais, na esteira do indicado em [19,20]. Neste caso específico, com vistas a estruturação de pesquisas em arranjo de caracterização de materiais dielétricos para uso em CSEs e em outros dispositivos supercondutores, que também carecem de isolamento elétrico criogênico. Desenvolveu-se então uma proposta de arranjo experimental alternativo, de relativo baixo custo e versátil, para estudo de materiais dielétricos em condição criogênica, especificamente em banho de nitrogênio líquido (N₂L). O foco é possibilitar o estudo para uso em tecnologia supercondutora voltada a SEPs, tanto na geração, transmissão e distribuição, bem como em máquinas elétricas que utilizem fios ou fitas supercondutoras.

Desta forma, foi dado início ao desenvolvimento de pesquisa para se obter uma tecnologia de suporte experimental e *know-how* para continuidade de pesquisas futuras envolvendo CSEs e outros dispositivos supercondutores, que também possuam demanda de isolamento em condição criogênica, como os transformadores, por exemplo. Não se descarta, contudo, uma possível retomada futura do projeto SUPERCABO, ou outro projeto que dele derive, através de outras oportunidades de P&D. Lembrando que este

último foi desenvolvido pelo LMDS - UFRRJ em conjunto com a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e outras importantes empresas do setor elétrico: TAESA - Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A, TBE - Transmissora Brasileira de Energia e CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, através de edital da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (chamada 006/2008, reedição 2010). Na esteira deste projeto, demanda de suporte para estudo de dielétricos criogênicos e o apoio do LEAT-UFMG é que se deram discussões que resultaram nesta tese.

Como demonstrado em [19], a Tecnologia Supercondutora de Alta Temperatura (HTSTec) é estratégica para o país, e iniciativas para seu desenvolvimento e nacionalização constituem ações importantes para o emprego e relativo domínio desta tecnologia nos próximos anos (horizonte 2020-2030), ainda que de forma a acompanhar o desenvolvimento internacional nesta área. A sinergia da pesquisa apresentada no decorrer deste texto surge neste contexto e está inicialmente localizada em torno de três fatores principais:

- 1) A necessidade de se projetar, dimensionar e validar um arranjo experimental (*setup*) para caracterização de materiais dielétricos em condição criogênica quanto à sua rigidez dielétrica, suas perdas e sua constante dielétrica;
- 2) O sucesso nas empreitadas acima contribui para ampliar a formação nesta área, cada vez mais importante para o setor elétrico do futuro, agregando mais experiências ao LEAT-UFMG e ao LMDS-UFRRJ em testes especiais voltados a estudos envolvendo a tecnologia de dispositivos supercondutores. O que poderá diminuir a dependência de compra de equipamentos, e o uso de laboratórios de maior porte e custo para estes tipos de medições;
- 3) Com o desenvolvimento e validação do aparato proposto, será possível estudar e testar mais materiais dielétricos em condições de criogenia, além do material proposto no projeto citado, bem como contribuir para pesquisas futuras neste campo. Trata-se de iniciativa inédita em território nacional, que visa superar um desafio tecnológico e desenvolver arranjo experimental versátil e alternativo para este tipo de estudo.

1.2 – Relevância da investigação

No Brasil, análises setoriais dão conta de que nos próximos 30 anos uma forte tendência de crescimento do consumo de energia irá ampliar a demanda sobre geração, transmissão e distribuição de energia no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) [21]. Fatores como custos inerentes a expansão dos sistemas por vias tradicionais, ampliação de subestações, número de cabos de energia e faixas de servidão, bem como a necessidade de redução de perdas e descarbonização das redes elétricas precisam ser considerados para o atendimento da demanda. E diante do cenário de maior domínio, menor custo e melhorias na confiabilidade da tecnologia supercondutora, em início de disponibilização para o setor elétrico em âmbito internacional, aponta-se para uma necessidade de continuidade da pesquisa e desenvolvimento nesta área em território nacional, incluindo o estudo de materiais dielétricos criogênicos [19]. Isto é necessário tanto para permitir uma possível "tropicalização" ou nacionalização, dado o *gap* entre o estágio de desenvolvimento nacional e o internacional nesta área [20], quanto para pesquisa e desenvolvimento com vistas ao domínio tecnológico pleno no futuro [18].

Avanços nas pesquisas em supercondutividade aplicada aos SEP têm sido alcançados nos últimos anos [9] e, por ser uma tecnologia transversal, sua rota tecnológica de desenvolvimento tem sido uma aposta em vários países, inclusive no Brasil, mas neste caso de modo bem menos expressivo devido ao baixo investimento [19]. De certa maneira, isso foi sentido na realização deste trabalho, no que diz respeito a recursos estruturais e financeiros. Contudo, o desenvolvimento de arranjos para estudo experimental de insumos e/ou protótipos continua sendo etapa essencial para o avanço em direção às aplicações práticas dos dispositivos, ou seja, é preciso estudar não só o material supercondutor e sua aplicação, mas uma série de tecnologias e materiais necessários ao processo de confecção e testes dos protótipos de CSEs.

O principal objetivo deste trabalho de tese foi voltado à proposição de arranjo alternativo e versátil para caracterização de materiais dielétricos em ambiente criogênico. Cabe ressaltar que o estudo da supercondutividade aplicada continua em franca expansão pelo mundo, incluindo testes com materiais dielétricos criogênicos, que são importantes componentes ancilares para o projeto de um CSE e outras aplicações, sendo aspecto técnico crítico para tecnologias como limitadores de corrente e transformadores supercondutores, por exemplo.

Desta forma, o desenvolvimento de um setup experimental para estudos correlatos vislumbra colaborar, dentro de suas possibilidades, na questão levantada nos parágrafos anteriores, ou seja, para avanços futuros no domínio e nacionalização da HTSTec, no âmbito específico de arranjos experimentais para medições, desenvolvimento de tecnologia nacional e formação de *know-how*. Contudo, não se pode deixar de lembrar que se trata de uma tecnologia cara, complexa, multidisciplinar e que não recebe grande investimento nacional [19]. Daí a oportunidade e também o grande desafio de tornar factível o aparato experimental alternativo proposto e desenvolvido neste trabalho, passando das etapas de simulação, confecção e montagem, obtenção de amostras de materiais dielétricos e de equipamentos adequados para realização dos testes.

Este trabalho de tese se enquadra assim nas seguintes áreas de conhecimento da classificação dada pela CAPES (Tabela 1):

Tabela 1 – Áreas de conhecimento relativas ao trabalho (CAPES)

30400007	Engenharia elétrica
30401046	Materiais dielétricos, piezoelétricos e ferroelétricos
30402000	Medidas elétricas, magnéticas e eletrônicas; instrumentação
30404002	Sistemas elétricos de potência
30404010	Geração de energia elétrica
30404029	Transmissão e distribuição da energia elétrica
30404053	Máquinas elétricas e dispositivos de potência

Por fim, cabe ressaltar a sinergia entre os dois laboratórios de pesquisa citados, LEAT-UFMG e LMDS-UFRRJ, onde foi feita importante troca de conhecimentos sobre supercondutividade aplicada a sistemas de potência, criogenia e engenharia de alta tensão. Também houve grande colaboração e apoio de diferentes instituições como CEPEL – Centro de Pesquisas da Eletrobras, CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, LAT-EFEI – Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, Departamento de Física – UFMG (oficina de criogenia), e IF-UFRJ (Laboratório de Baixas Temperaturas). No que diz respeito a aquisição de materiais houve a doação de algumas amostras de material dielétrico pela Dupont Brasil. Estas colaborações foram fundamentais para a realização desta empreitada pioneira, e possibilitou também a integração, troca de experiências e principalmente a superação de algumas barreiras, que como será exposto no final, acabaram por alterar cronogramas e de certa forma limitar o alcance da pesquisa.

1.3 – Objetivos da tese

1.3.1 – Objetivo geral

Dentro do contexto e da relevância apresentados, o objetivo geral desta tese diz respeito ao estudo, desenvolvimento, construção e teste conceitual de uma configuração experimental alternativa (*setup*) para testes e caracterização de materiais dielétricos em situação criogênica, especificamente em banho de N₂L. Buscou-se dispor de um arranjo experimental versátil e único, que permita o estudo destes materiais através da medição de rigidez dielétrica, tangente de perdas e constante dielétrica (permissividade relativa). O estudo visa caracterizar os materiais dielétricos para emprego como meio isolante em projetos de CSEs com isolamento frio, bem como projetos de outros dispositivos ou máquinas que utilizem fios ou fitas supercondutoras que demandem isolamento elétrico em ambiente criogênico.

1.3.2 – Objetivos específicos

Em torno do objetivo central do trabalho orbitam etapas e objetivos específicos, que auxiliaram no desenvolvimento do protótipo, estudos com o dielétrico proposto e seus constituintes, e consequentemente na elaboração desta tese. Eles construíram um caminho metodológico e de apoio em direção aos resultados principais obtidos, contorno de algumas questões que surgiram e revisão de caminhos. Como etapas e objetivos específicos do presente trabalho, tem-se:

- Realização de revisão de literatura a respeito dos arranjos experimentais utilizados para ensaios, testes e caracterização de dielétricos para uso no projeto de dispositivos supercondutores, em especial CSEs;
- Proposição de arranjo experimental considerando as normas e circuitos relativos aos testes, bem como aspectos de criogenia. Verificação do perfil de campo elétrico através de simulações computacionais com MEF (Método dos Elementos Finitos);
- Projeto e dimensionamento de arranjo experimental para teste de dielétricos em situação criogênica (tangente de perdas, constante dielétrica e rigidez dielétrica);

- Construção do arranjo proposto em escala laboratorial para teste do conceito, utilizando materiais próprios para o ambiente criogênico, técnicas de usinagem, montagens elétricas e mecânicas;
- Caracterização em situação criogênica de materiais dielétricos, incluído o proposto no projeto SUPERCABO, bem como de seus componentes, através da medição dos seguintes parâmetros em baixa e alta tensão: tangente de perdas e permissividade elétrica, e por fim a rigidez dielétrica;
- Análise de resultados e comparação com dados de outras medições, dados disponíveis na literatura, bem como discussão de aspectos experimentais e dificuldades nas montagens e medições;
- Desenvolvimento de artigos científicos com os principais resultados obtidos para publicação em periódicos especializados, apresentação em congressos internacionais das áreas correlatas ao tema (Supercondutividade Aplicada e Engenharia Elétrica);
- Elaboração do texto e apresentação da tese.

1.4 – Organização do texto

Este texto de tese está organizado em 5 capítulos, incluído este primeiro, onde são apresentadas as questões introdutórias acerca da proposta do trabalho, como o histórico e contexto por detrás do tema adotado para a pesquisa, os aspectos da relevância e objetivos da pesquisa de tese.

O segundo capítulo apresenta uma breve revisão de alguns conceitos e fundamentos relativos à supercondutividade aplicada, desde um relato sobre a descoberta do fenômeno, passando pela caracterização do estado supercondutor, e citação das principais aplicações em SEPs, com especial enfoque naquelas onde o uso de dielétricos criogênicos é essencial. Visto que os objetivos desta tese se articulam com a tecnologia de dispositivos supercondutores, julgou-se necessária uma revisão dos aspectos relevantes da supercondutividade para seu uso no setor elétrico. É feito um panorama sobre materiais dielétricos para emprego em tecnologias supercondutoras, os desafios que se tem para estudar e caracterizar dielétricos em temperaturas criogênicas, bem como aspectos dos

métodos de caracterização destes materiais. Também são abordados princípios fundamentais da caracterização de materiais dielétricos e de engenharia de alta tensão.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia de desenvolvimento do arranjo proposto, considerando as etapas de dimensionamento, as simulações realizadas, as normas e modelagens utilizadas para obtenção dos parâmetros, bem como os circuitos de medição envolvidos nos testes em alta tensão com o protótipo desenvolvido. São descritos também os materiais testados, sendo o material dielétrico laminado proposto no primeiro projeto de CSE brasileiro e seus componentes. Uma metodologia de teste para caracterização destes mesmos materiais em baixa tensão (perdas e constante dielétrica) também é apresentada. Por fim, são apresentados detalhes de um teste de rigidez com eletrodos iguais, para comparação e exemplo de cálculo de isolamento para um protótipo de CSE utilizando dado de rigidez levantado com o arranjo.

No capítulo quatro, são apresentados os resultados obtidos desde o dimensionamento e simulação, aspectos gerais do arranjo de caracterização proposto e as justificativas das propostas iniciais, bem como discussões sobre mudanças necessárias ao longo do percurso. Um primeiro resultado foi a própria proposta de arranjo experimental para medidas com materiais isolantes em ambiente criogênico, validada computacionalmente, e aceita para apresentação em congresso internacional da área de supercondutividade. Os testes do arranjo com materiais de uso em projeto de CSE e a análise destes mesmos materiais em baixa tensão constituem o restante dos resultados apresentados, que também resultaram em participação em congressos e publicações em periódicos da área.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho, elencando basicamente os principais resultados dos três artigos apresentados e algumas das propostas de continuidade da pesquisa, entre elas a realização de mais medições com outros materiais e mais amostras, construção de mini-modelos de CSEs para teste em condições mais próximas da realidade de uso, como ensaios impulsivos, e uma análise mais minuciosa da sensibilidade e incerteza das medições com o equipamento. Por fim, alguns apontamentos sobre alguns contornos e dificuldades com o cronograma, entre elas o acesso a amostras, disponibilidade de equipamentos e os efeitos da pandemia de COVID-19 sobre a realização das atividades experimentais, dentro e fora do LEAT-UFGM, são mencionados.

Capítulo 2 – Revisão de Literatura

2.1 – A tecnologia supercondutora de alta temperatura (HTSTec)

A supercondutividade é um fenômeno centenário com implicações bastante profundas, tanto na Física quanto na área de engenharia e tecnologia, sobretudo no setor de energia elétrica, e possui perspectivas de impactos tecnológicos e comerciais futuros. Na ocasião do simpósio de 100 anos da supercondutividade, em Leiden, no ano de 2011, a descoberta do estado supercondutor se tornou um marco IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) em Engenharia Elétrica e Computação, dada a sua importância para as duas áreas [22]. Desde a primeira detecção do fenômeno em 1911 [23,24], até a atualidade, vários elementos e materiais supercondutores foram encontrados em diferentes temperaturas de transição. Para se ter uma ideia, mais de duas dezenas de elementos da tabela periódica e milhares de compostos supercondutores são conhecidos [25], embora a grande maioria não apresente condições para uso em aplicações práticas.

Sendo um fenômeno de ocorrência em temperaturas criogênicas, ou seja, abaixo de $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [26], tem-se um importante desafio: a refrigeração do material a ser utilizado na aplicação. Como será visto de forma mais detalhada, além da temperatura as condições de corrente elétrica e campo magnético aplicados também afetam o estado supercondutor do material. Portanto, o desafio de aplicações tecnológicas deste fenômeno parte com três fatores limitantes. Desde as décadas de 1950 e 1960 avanços na descoberta de novos supercondutores e o contorno de situações como instabilidade do material foram conseguidos, e as aplicações na geração de campos magnéticos intensos se tornou uma realidade com ligas de baixa temperatura crítica ou LTS (*Low Temperature Superconductors*) de NbZr e NbTi, refrigeradas com hélio líquido (HeL), cujo desenvolvimento da aplicação era voltado para aceleradores de partículas e aparelhos de ressonância magnética nuclear (RMN) [27]. Os primeiros protótipos de dispositivos supercondutores para uma aplicação em sistemas elétricos ocorreram de modo mais recente, a partir da década de 1990, com desenvolvimentos na chamada supercondutividade de alta temperatura crítica (HTS - *High Temperature Superconductors*), desenvolvida a partir da década de 1980 [1].

As temperaturas de operação mais altas deram ímpeto para as pesquisas em aplicações voltadas ao setor elétrico e demais áreas, principalmente pelas mudanças na

complexidade e custo do sistema de refrigeração, proporcionadas principalmente pelo emprego de nitrogênio líquido (N₂L) como fluido criogênico [2]. Apesar disso, e de não ser um fenômeno restrito em termos de materiais, apenas alguns supercondutores existentes possuem interesse prático ou técnico, devido às suas propriedades. Pesquisas têm sido feitas com intuito de caracterizar, e otimizar tais propriedades e o custo desses materiais, com vistas as diversas frentes de aplicações, sobretudo em sistemas de energia.

Verifica-se que em todos os constituintes dos sistemas elétricos de potência (SEPs) se pode, a princípio, explorar as propriedades dos supercondutores para contornar ou aperfeiçoar pontos que apresentam dificuldades com a tecnologia convencional, ou seja, não supercondutora e que utiliza elementos condutores metálicos tradicionais – cobre e alumínio. Cabos de energia, limitadores de corrente, transformadores, motores, geradores e mesmo armazenadores de energia, podem ser feitos com material supercondutor, mas constituem desafios tecnológicos e de custo, mesmo considerando os avanços da HTSTec. Notavelmente as pesquisas envolvendo o projeto de CSEs tiveram crescimento nas últimas duas décadas, passando do desenvolvimento dos primeiros protótipos em escala laboratorial no início dos anos 2000 para testes em campo já a partir de 2006 [28]. As pesquisas têm envolvido desenvolvimento de novos materiais supercondutores, métodos de simulação dos materiais e do cabo em rede, melhorias na tecnologia criogênica e testes de materiais de isolamento elétrico.

Em um panorama de demanda energética crescente, com maiores níveis de transferência de potência, ampliação das fontes renováveis devido ao apelo pela descarbonização das redes e questões climáticas, pesquisas voltadas para a fusão nuclear, desenvolvimento de tecnologias emergentes como aviões e navios elétricos, têm se observado cada vez mais estudos e investimentos em escala global sobre a aplicabilidade da HTSTec no enfrentamento destas questões. Uma maior maturidade da tecnologia supercondutora atual e redução de custos, bem como melhorias na confiabilidade e maior competitividade, têm permitido a análise demandas específicas, onde o emprego desta já aponta viabilidade competitiva, técnica e economicamente, na comparação com a tecnologia convencional existente [2]. Além disso, grupos para construção de normas [5], testes de longa duração [12, 29], e um volume maior de produção de materiais, tem contribuído para diminuir a desconfiança e principalmente para baixar os custos.

Os tópicos a seguir visam apresentar um recorte sucinto, porém geral, acerca da tecnologia supercondutora, alguns conceitos fundamentais no entendimento do fenômeno

e de suas aplicações no setor elétrico, materiais supercondutores de interesse técnico, finalizando com a discussão de alguns desafios que estão sendo enfrentados de modo a viabilizar a entrada efetiva dos dispositivos supercondutores em SEPs. De modo algum se objetivou esgotar o tema, mas é possível estabelecer uma linha do tempo para essa tecnologia, principais conceitos e os rumos que o estágio atual da tecnologia aponta, sobretudo no horizonte que compreende esta década, 2020-2030.

2.1.1 - A supercondutividade – apresentação e conceitos fundamentais

Coube ao físico holandês Heike Kamerlingh Onnes, professor de física experimental da universidade de Leiden a partir de 1882, a descoberta da supercondutividade em 1911. Ele foi contratado com objetivo inicial de realizar estudos que comprovassem a teoria molecular de gases de seu compatriota Johannes Diderik Van der Waals. Tarefa que passava por uma questão técnica fundamental: atingir temperaturas muito baixas para condensação dos gases. Onnes desenvolveu então um laboratório de criogenia bastante estruturado em termos físicos e humanos, e sem o qual a descoberta da supercondutividade não teria sido possível. De 1892 a 1908, ele conseguiu avanços cruciais com a liquefação dos gases oxigênio, hidrogênio e do hélio, sendo este último um grande feito por atingir a temperatura mais próxima do zero absoluto para a época (0,9 K). Dessa forma, Onnes pode dar início aos estudos acerca da resistividade de metais em baixíssimas temperaturas em 1910 e, já em 1913 recebeu o Prêmio Nobel de Física por esses estudos que levaram à obtenção do hélio líquido [22].

Havia, para a época, previsões muito distintas sobre o que poderia acontecer com a resistividade dos metais nessa faixa de temperaturas criogênicas. A ideia inicial era focar em metais como ouro e platina, o que de fato ocorreu inicialmente, mas dificuldades com impurezas forçaram uma mudança de rumo. Com o domínio do processo de purificação do mercúrio à época, este metal foi selecionado para continuidade dos estudos. No dia 8 de abril de 1911, ao medir juntamente com sua equipe a resistividade elétrica de uma amostra de mercúrio (resistor feito de mercúrio em capilares de vidro) em função da temperatura, Onnes observou que a resistividade elétrica do mercúrio caiu abruptamente para um valor incomensurável em torno de 4,2 K (Figura 1) [24].

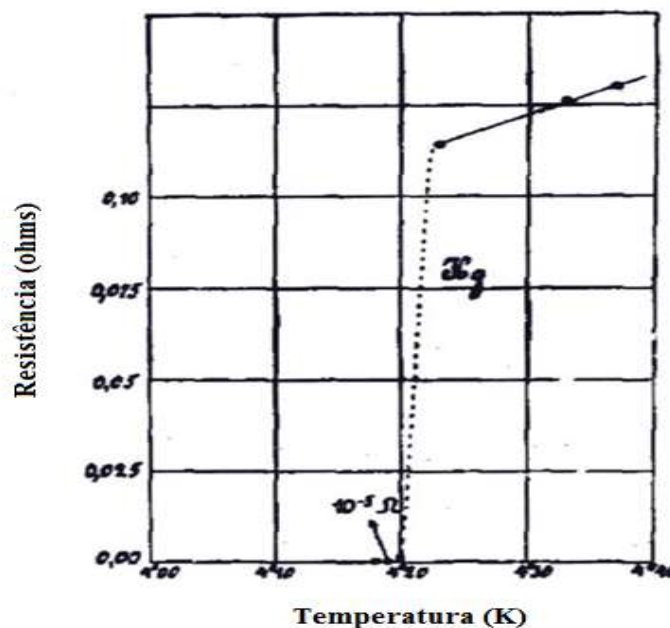


Figura 1 - Transição supercondutora do mercúrio. Adaptada de [1].

A continuidade dos estudos pela equipe de Onnes levou a descoberta do mesmo fenômeno em outros materiais, no caso chumbo e estanho (6,0 K e 3,8 K). Essas observações iniciais foram importantes para mostrar que esse fenômeno, batizado inicialmente como "supracondutividade" nas anotações de Onnes, não estava restrito a um material. E mais ainda, que havia uma temperatura específica para essa transição, ou seja, uma temperatura crítica abaixo da qual a supercondutividade se manifesta. Importante lembrar que, curiosamente, bons condutores em temperatura ambiente como o ouro, a prata e o cobre não são supercondutores.

A primeira aplicação prática vislumbrada foi a construção de uma bobina supercondutora, feita com fios de chumbo. A ideia era uma aplicação importante: produção de altos campos magnéticos com as altas correntes em um supercondutor. Porém, os experimentos revelaram um efeito destruidor de um campo magnético relativamente baixo sobre a supercondutividade na amostra. Portanto, existia também um campo magnético crítico para o estado supercondutor [31], ou seja, um valor de campo magnético acima do qual o fenômeno da supercondutividade é destruído. Com a posterior descoberta de novos materiais, essa realidade foi alterada, e atualmente é possível a obtenção de campos magnéticos críticos bem maiores, sendo a produção destes magnetos, na atualidade, a maior aplicação comercial para os materiais supercondutores em todo mundo (aceleradores de partículas e aparelhos de RMN).

Além da resistividade nula, o estado supercondutor é identificado por outra característica importante dos supercondutores, descoberta por Walther Meissner e Robert Ochsenfeld em 1933 [32]. Eles descobriram que há uma expulsão do campo magnético ($\vec{H}$) de dentro da amostra quando o material atinge o estado supercondutor. Dessa forma, o campo magnético no interior do supercondutor é cancelado pela presença de correntes de blindagem que aparecem em sua superfície. O estado de campo magnético nulo na parte interna da amostra é alcançado tanto se o campo for aplicado antes quanto depois que o material for resfriado abaixo de sua temperatura crítica [31]. A Figura 2 ilustra o efeito Meissner-Ochsenfeld para uma amostra supercondutora.

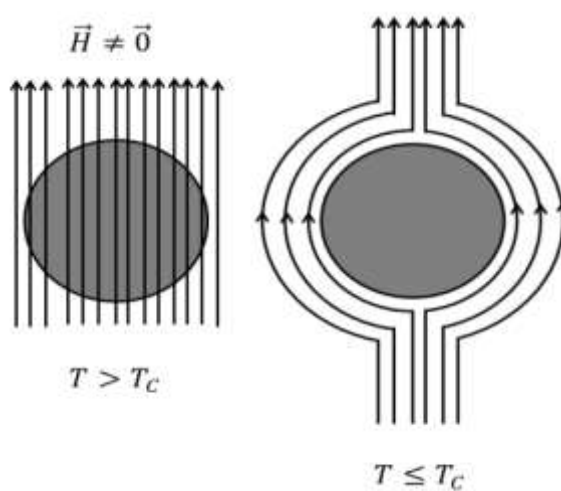


Figura 2 - Efeito Meissner-Ochsenfeld.

Dado que a circulação de uma corrente elétrica cria um campo magnético ao redor dessa corrente, a existência de um campo magnético crítico indica que também existe uma corrente elétrica máxima que o supercondutor pode carregar, tendo em vista o campo magnético gerado por esta no interior do material supercondutor, o chamado campo próprio ou auto-campo. Assim, é possível falar em uma corrente (amostra) e densidade de corrente (material) críticas, acima das quais o estado supercondutor também é destruído. Diante do exposto, é possível perceber que, na prática, o estado supercondutor é mantido quando os limites de três parâmetros são respeitados: temperatura crítica (T_c), campo magnético crítico (H_c) e densidade de corrente crítica (J_c) [33]. A Figura 3 ilustra uma região de estado supercondutor e estado normal (não supercondutor).

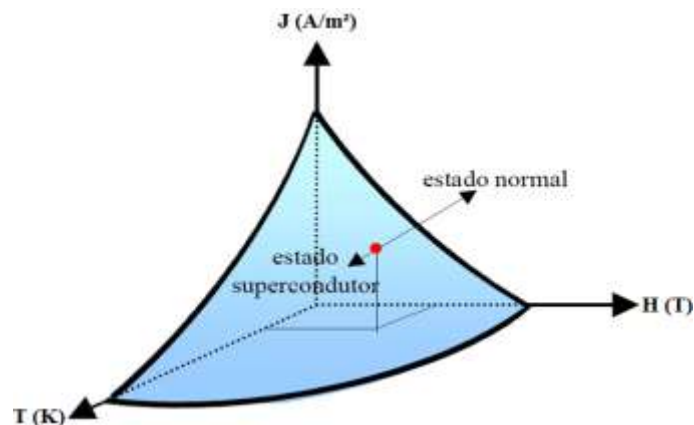


Figura 3 - Parâmetros críticos (J_c , H_c , T_c) e estado supercondutor.

Esses três parâmetros guardam entre si uma certa correlação que precisa ser levada em consideração nos estudos de aplicações. Em termos práticos, é desejável um supercondutor com os três parâmetros críticos relativamente altos, o que melhora o transporte de corrente, a suportabilidade a campos magnéticos intensos e facilita o processo de resfriamento do material. Para o caso de aplicações em SEPs que envolvam transporte de corrente, o parâmetro mais fundamental é a densidade de corrente crítica J_c , que sofre redução tanto com o aumento da temperatura quanto do campo magnético aplicado. Considerando as aplicações em corrente alternada (CA), é importante lembrar que neste caso um supercondutor apresenta perdas, mesmo ainda estando na fase supercondutora, o que não ocorre em corrente contínua (CC) [7]. Conhecidas na literatura como perdas AC, elas são fatores importantes no desenvolvimento da tecnologia, dado que essas perdas reduzem a eficiência do transporte de corrente e geram maior demanda para o sistema de refrigeração. No caso de CSEs com dielétrico em situação criogênica, estas perdas também se somam com as perdas no dielétrico, aumentando a carga térmica.

Uma classe importante de materiais supercondutores possui dois campos magnéticos críticos, o primeiro (H_{c1}) associado a transição de uma fase supercondutora convencional para um estado chamado misto, onde ocorre dissipação, mas ainda se mantém propriedades supercondutoras, e um segundo (H_{c2}) relativo à transição deste estado misto para a fase normal, ou seja, o material responde como um condutor convencional e não é mais capaz de apresentar o efeito Meissner-Ochsenfeld. Isto diferencia essa classe de materiais, denominada tipo II, dos primeiros supercondutores, denominada tipo I, com um campo magnético crítico único e dois estados: supercondutor e normal [34]. A Figura 4 ilustra o comportamento dos dois tipos de supercondutores com respeito ao campo magnético aplicado (H) e magnetização (M).

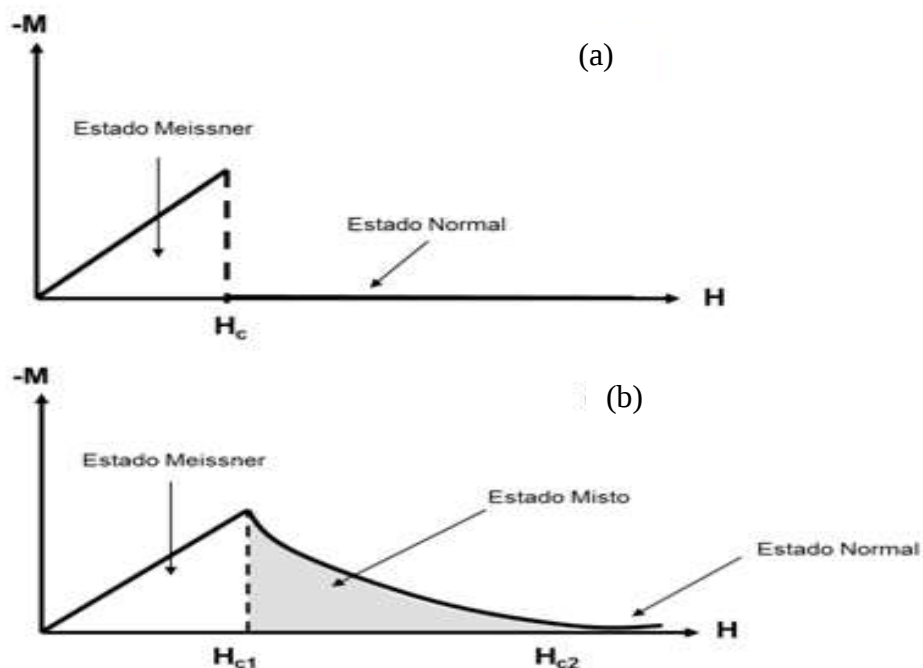


Figura 4 - Comportamento magnético dos Supercondutores Tipo I (a) e Tipo II (b).

A outra classificação dos materiais supercondutores é com respeito ao nível da temperatura crítica. Quando o supercondutor tem uma temperatura de operação abaixo de cerca de 30 K, ele é considerado um material de baixa temperatura crítica, ou seja, baixa T_c , no termo em inglês LTS - *Low Temperature Superconductors* [7]. Este limite não é muito preciso, e na prática está abaixo desse valor, mas está ligado ao fato de que durante muito tempo se pensou, com base na chamada teoria BCS [35], que esse valor marcava um limite superior para ocorrência da supercondutividade, o que se revelou falso [36]–[40].

Se o supercondutor tem temperatura de operação acima de 30 K, ele é classificado como de alta temperatura crítica, ou seja, alta T_c , no termo em inglês HTS - *High Temperature Superconductors* [7]. Do ponto de vista prático, os materiais LTS dependem de refrigeração a hélio líquido (HeL), temperatura de 4,2 K, e os materiais HTS são fundamentalmente refrigerados com nitrogênio líquido (N2L), temperatura de 77 K, que é o caso das aplicações em SEPs. Com temperatura de cerca de 20 K o hidrogênio líquido (H2L) tem surgido como uma possibilidade para sistemas supercondutores com temperatura crítica no intervalo entre 30 e 77 K, acompanhando também o desenvolvimento da tecnologia de hidrogênio verde, mas questões de segurança em possíveis falhas precisam ser investigadas diante dos riscos de explosão.

2.1.2 - Materiais supercondutores técnicos

Infelizmente, a maioria dos materiais supercondutores descobertos não é adequada para aplicações em grande escala, ou seja, não são supercondutores técnicos ou práticos [25], como é o caso desejável para aplicações em SEPs. Além da inadequação devida aos valores dos três parâmetros críticos, fatores como a toxicidade, propriedades mecânicas fracas e custo de produção elevados determinam a seleção desses materiais. No *hall* de materiais supercondutores técnicos disponíveis comercialmente, temos materiais tanto LTS quanto HTS, os principais são listados a seguir:

1. Liga de nióbio-titânio (NbTi), muito utilizado aplicações supercondutoras de baixa T_c .
2. Liga de nióbio-estrôncio (Nb₃Sn), material crítico que permite ímãs de alto campo em baixa T_c .
3. BSCCO 2223 (Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀), possuem alta T_c e são a base de fios supercondutores de primeira geração (1G).
4. BSCCO 2212 (Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈), possuem alta T_c e também são a base de fios supercondutores de primeira geração (1G).
5. YBCO (YBa₂Cu₃O₇), possuem alta T_c e são a base das fitas supercondutoras revestidas de segunda geração (2G).
6. MgB₂ (Diboreto de magnésio), descoberta mais recente (2001) que permite a construção de fios a um custo mais barato e temperatura crítica de cerca de 39 K. Pode ser refrigerado com hidrogênio líquido (H₂L).

A forma de disponibilidade dos supercondutores técnicos varia, seja em forma de fios, blocos maciços (*bulks*) e fitas revestidas. Os fios são possíveis em materiais que permitem o mínimo de ductibilidade, e têm sido utilizados em projetos de bobinas supercondutoras. As fitas ou condutores revestidos são mais versáteis, pois podem ser utilizadas tanto para construir bobinas, como cabos, limitadores de corrente e outros dispositivos. Os blocos, por sua vez, podem ser utilizados na composição de magnetos para aprisionamento de campo, como ocorre em aplicações de levitação magnética supercondutora e blindagem. Para aplicações em SEP que consideram o uso em larga escala e uma refrigeração com

base em N2L, a lista de materiais supercondutores técnicos permite basicamente duas opções HTS: BSSCO 2223 e YBCO [7].

2.1.3 - Transição supercondutora (HTS)

Como qualquer condutor elétrico os materiais HTS podem ser analisados e caracterizados em termos de sua curva de campo elétrico por densidade de corrente, a curva E-J, sendo o campo elétrico crítico E_c , mostrado na Figura 5, o parâmetro utilizado para determinar a densidade de corrente crítica J_c do material.

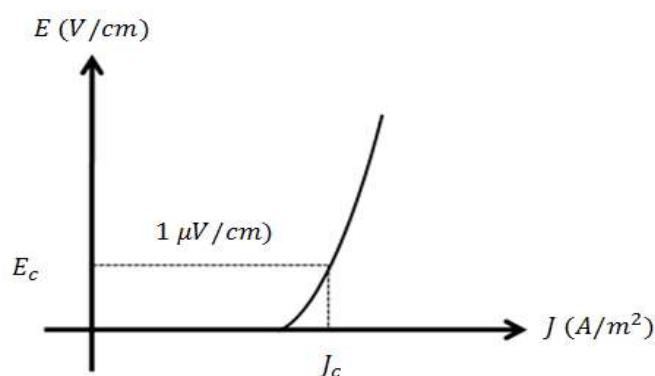


Figura 5 - Curva E-J de um material supercondutor - densidade de corrente crítica e campo elétrico crítico.

Normalmente, o campo elétrico crítico tem sido adotado com o critério de $1 \mu V/cm$ para supercondutores tipo II ou equivalentemente uma resistividade de $2 \cdot 10^{-13} \Omega \cdot m$ [7,41], sendo obtido experimentalmente pelo chamado método das quatro pontas: uma corrente elétrica é injetada por dois pontos da amostra, uma medida de tensão e a distância entre dois pontos permite determinar J_c quando é atingido o valor de campo elétrico crítico E_c . A partir do ponto (E_c, J_c) o material inicia o processo de transição para a fase normal.

A equação (2.1) descreve todos os estágios da curva E-J para um HTS. É a chamada lei de potência do supercondutor, sendo uma das possibilidades de se modelar a curva E-J e envolve o campo crítico (E_c), a densidade de corrente crítica (J_c), a densidade de corrente em função da temperatura J e um índice n , chamado de índice de transição [7]. Esse último parâmetro dá a medida do caráter não-linear da curva E-J do material supercondutor, variando com a fase da transição e com o tipo de material. Juntamente com J_c esse índice n caracteriza o material em termos de transporte de corrente.

A figura 5 ilustra a influência do índice n e as etapas de transição de um supercondutor tipo II, onde *flux creep* e *flux flow* correspondem a estágios distintos da Força de Lorentz atuante no estado misto, onde há a presença de uma rede de vórtices (penetração de linhas de campo magnético no material) que sofre ação dessa força, movendo-se e gerando força eletromotriz associada (dissipação) [42].

$$E(J) = E_c \left[\frac{J}{J_c(T)} \right]^n \quad (2.1)$$

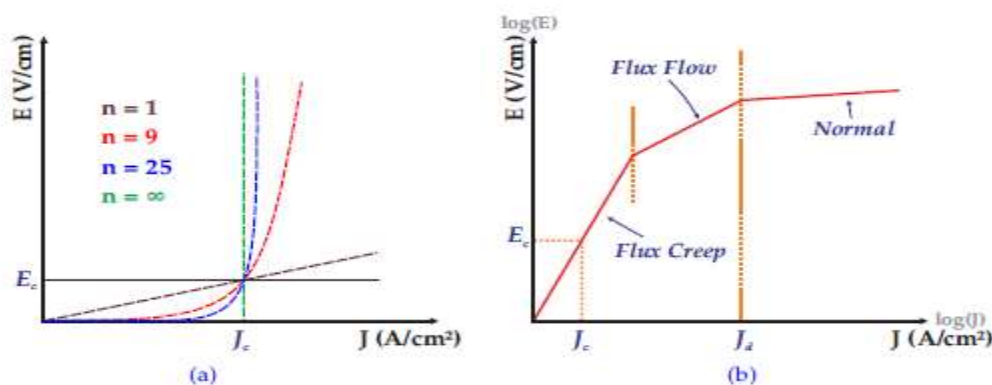


Figura 6 - (a) Curva E-J linear com diferentes valores de n . (b) Curva E-J em escala logarítmica com diferentes valores de n e as etapas de transição. Extraído de [42].

Importante chamar a atenção para a dependência da densidade de corrente crítica J_c na equação 2.1 em relação à temperatura, o que influencia nos pontos de transição e gera uma dependência eletrotérmica do estado supercondutor (desprezados os efeitos de campo magnético externo). Essa dependência pode ser modelada utilizando aproximações com funções lineares, obtendo-se resultados satisfatórios [43]. Essa relação foi utilizada em um modelo eletrotérmico desenvolvido no Brasil [44] e vem sendo adotada em algumas simulações de fitas supercondutoras de segunda geração (2G) voltadas ao desenvolvimento de CSEs e dispositivos limitadores de corrente supercondutores, por exemplo.

2.1.4 - Aplicações de dispositivos supercondutores em SEPs

A tecnologia supercondutora HTS (HTSTec) terá um papel significativo nos avanços de todo setor de energia nos próximos anos, em especial nos SEPs, com possíveis contribuições nos campos da geração, transmissão e armazenamento de energia elétrica. Em contraste com as aplicações envolvendo tecnologia LTS, para geração de altos

campos magnéticos, as aplicações com HTS em SEPs ainda tem presença limitada, embora com boas perspectivas futuras de comercialização [45, 46, 47]. Os recentes avanços dos últimos anos em tecnologias de produção, caracterização, modelagem e testes, assim como investimentos em grandes projetos de P&D, geraram grande expectativa para uma gradual mudança no atendimento futuro da demanda energética mundial por essa via tecnológica [2]. Aspectos como a diversidade da matriz energética, intermitência de geração, eficiência, menos emissões de carbono e sinergia com outras tecnologias emergentes (avião e navios elétricos), tem contribuído para maiores e melhores perspectivas de emprego dos dispositivos supercondutores em SEPs.

Assim como ocorreu com a tecnologia LTS, que no começo foi a única opção para as limitações dos cabos de cobre nos eletromagnetos convencionais da época, a tecnologia HTS, por suas características peculiares e pelas demandas atuais dos SEPs, são opções para superação de gargalos como alta ampacidade, transmissão de grande potência em interconexões, intermitência (armazenamento de energia) e alto nível de corrente de curto-circuito. É importante perceber que essa possível penetração nestes campos de aplicação tem potencial de trazer uma mudança de paradigma bastante profunda no setor de energia elétrica [45]. Como considerado na ocasião do centenário da supercondutividade, a tecnologia dela decorrente pode ser equiparável aos efeitos do transistor e da fibra ótica, ou seja, pode representar uma verdadeira tecnologia disruptiva, gerando desenvolvimento da tecnologia principal e também das ancilares [1].

As principais aplicações de HTS no setor de energia já tiveram seus princípios demonstrados em alguns projetos e pesquisas, são elas: limitadores de corrente, cabos de energia, motores, geradores, transformadores e armazenadores de energia [45]. As mais próximas de penetração no mercado são os limitadores e cabos de energia, devido ao atual estágio de maturidade tecnológica (*TRL-Technology Readiness Level*), testes em rede, normatização de testes, e solução de questões técnicas importantes para confiabilidade [2]. A seguir, é apresentada uma descrição resumida destas principais aplicações, de modo a apresentar em linhas gerais a tecnologia supercondutora voltada aos SEPs, contextualizar o campo no qual se insere este trabalho de tese e apontar a perspectiva de evolução de cada uma frente ao nível de desenvolvimento necessário para comercialização da tecnologia. Cabos de energia, limitadores, transformadores, motores e geradores supercondutores demandam em seus projetos a seleção e otimização de isolamento criogênico.

2.1.4.1 – Cabos de energia

Fios, fitas e condutores pré-formados feitos com materiais supercondutores apresentam ampacidades muito maiores quando comparados com condutores convencionais de mesma seção transversal, feitos de cobre ou alumínio. Uma aplicação importante desses elementos é a concepção de cabos supercondutores de energia (CSE), tanto em CA quanto em CC (Figura 7). Sendo este último de grande interesse para aplicações junto a fontes de energia renováveis (solar e eólica), aplicações industriais de alta corrente, alimentação de *data centers* e transmissão de grandes pacotes de potência em longas distâncias [46]. Dois impactos positivos importantes na utilização de CSE são a redução de perdas ôhmicas, que deve ser comparada com o gasto energético devido o processo de refrigeração, e uma faixa de passagem menor, se comparados aos sistemas com cabos de energia convencionais.

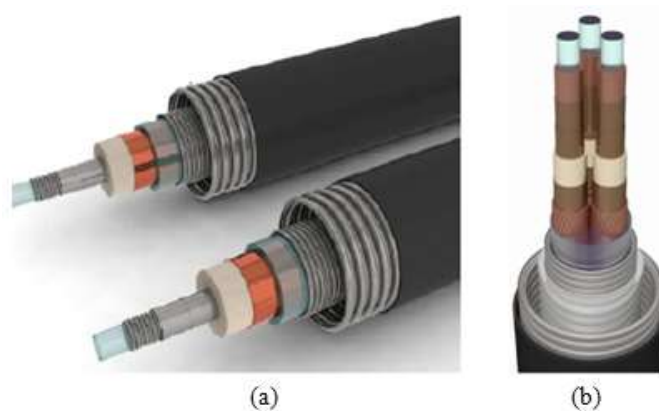


Figura 7 - (a) Cabo supercondutor CC. (b) Cabo supercondutor CA. Extraído de [48].

É possível imaginar um processo de *retrofitting* ou modernização de um sistema de transmissão de energia convencional lançando mão de um CSE. Como exemplo de aplicação desse processo podemos citar a conexão entre subestações, onde seriam utilizadas as faixas de servidão já existentes para instalação de um sistema supercondutor [47]. Devido à blindagem em sua concepção de projeto, o resfriamento e isolamento térmico, os cabos supercondutores podem ser colocados mais próximos uns dos outros, e não possuem tanta dependência da temperatura externa como os cabos convencionais e podem não ter emissão de campo eletromagnético externo (EMF) [49]. Além disso, cabos supercondutores permitem uma transmissão de potência e corrente significativas em tensões mais baixas do que as utilizadas em cabos de alta tensão convencionais [7].

Algumas questões técnicas têm retardado a aplicação comercial e a competitividade de cabos supercondutores. Como a primeira delas podemos citar as perdas AC, que ocorrem de modo mais significativo para sistemas com cabos em corrente alternada, uma vez que cabos CC também apresentam perdas deste tipo devido à existência do *ripple*, que é uma componente alternada [50]. Tais perdas geram calor que precisa ser retirado do cabo pelo sistema de resfriamento. Dessa forma, o sistema tem uma carga térmica adicional, além da relativa à manutenção da temperatura do material supercondutor abaixo do valor crítico (T_c) e das perdas no dielétrico. Além disso, as perdas AC no supercondutor são fatores limitantes ao maior carregamento do cabo [49], reduzindo sua vantagem de alta ampacidade. Por fim, detalhes como emendas, terminações, os custos das fitas supercondutoras, comportamento do isolamento elétrico em temperatura criogênica, proteção em caso de curto-circuito, custos de refrigeração e de manutenção, definição de normas e padrões de testes, e demonstrações de confiabilidade, precisam ser melhor esclarecidos para a tomada de decisão por parte da indústria de equipamentos e das concessionárias de energia [20].

Com a descoberta dos materiais HTS e desenvolvimento das fitas 2G, houve o desenvolvimento de uma série de projetos de cabos supercondutores, que envolveram concessionárias, governos, centros de pesquisa e fabricantes de materiais supercondutores. Foram desenvolvidos protótipos tanto em CC quanto em CA, com cabos mais curtos, de 1 a 30 m, e mais longos, até 1000 m. De modo geral, todos os projetos desenvolvidos no mundo contaram com investimentos governamentais, que através de parcerias com algumas empresas e centros de pesquisa viabilizaram o desenvolvimento desta tecnologia. Isso se justifica pela complexidade e inerente alto custo de uma tecnologia de ponta como essa. Projetos de CSEs, na faixa de 10 a 275 kV têm sido demonstrados ao redor do mundo, e vislumbra-se uma maturidade para comercialização entre 2025-2030 [20]. A tabela 2 lista alguns dos principais projetos no mundo [49,51].

Tabela 2 - Alguns dos projetos de CSEs no mundo - CC e CA. Adaptado de [49,51].

Projetos de Cabos Supercondutores CC				
Ano	Comprimento (m)	Tensão (kV)/Corrente (kA)	Supercondutor	País
2006	20	20/2,2	BSCCO	Japão
2010	200	10/2,0	BSCCO	Japão

2012	360	1,3/10,0	BSCCO	China
2014	20	20/-	MgB ₂	Suíça
2015	500	80/3,2	BSCCO	Japão
2016	1000	20/2,5	BSCCO	Japão
2017	25	1,0/20,0	YBCO	Alemanha
2018	2500	20/2,5	BSCCO	Rússia
2018	20	320/10,0	MgB ₂	Europa
Projetos de Cabos Supercondutores CA				
Ano	Comprimento (m)	Tensão (kV)/Corrente (kA)	Supercondutor	País
2004	33	35/2,0	BSCCO	China
2006	100	22,9/1,25	BSCCO	Coreia do Sul
2006	350	34,5/0,8	BSCCO	EUA
2007	30	138/1,8	YBCO	Alemanha
2008	30	10/1,0	YBCO	Espanha
2010	200	20/1,4	BSCCO	Rússia
2011	400	22,9/2,2	YBCO	Coreia do Sul
2012	15	66/5,0	YBCO	Japão
2013	1000 m	10/2,3	BSCCO	Alemanha

Em termos construtivos, um cabo supercondutor difere de um cabo convencional em alguns aspectos: seus elementos de condução e também a blindagem são fitas supercondutoras, apresentam sistema criogênico para resfriamento destas e com respeito ao isolamento elétrico possuem duas vertentes, uma referente ao uso de dielétrico quente e outra referente a dielétrico frio. Neste último caso, o mais presente na maioria dos projetos, o dielétrico é resfriado juntamente com as fitas supercondutoras que compõe o cabo, ou seja, em fluído criogênico, e no outro caso isso não é feito, permanecendo o dielétrico em temperatura ambiente [7,48].

Comparando um CSE com um cabo convencional em termos de indutância e capacitância, verificam-se mais algumas consequências do emprego do primeiro em redes elétricas. De modo geral, as indutâncias são mais baixas do que as de um cabo convencional e/ou de uma linha aérea [52]. Como um CSE tem resistência muito baixa,

sua impedância é aproximadamente a impedância indutiva. Por esse ângulo, essa impedância mais baixa o faz um atrator de corrente no caso de redes malhadas e aumenta o nível de curto-circuito [53]. Por outro lado, essa mesma baixa impedância pode ser utilizada em uma possível estratégia de controle do fluxo de potência, onde juntando um regulador de ângulo de fase (um tipo de transformador com comutação de taps que pode ajustar o ângulo de fase) com um CSE é possível efetuar mudanças relativamente pequenas neste parâmetro pela baixa impedância do cabo. Neste caso, o conceito torna-se economicamente atraente, uma vez que o custo do regulador é menor quando os ângulos de fase que ele ajusta são menores [54].

Em termos de capacitância, um CSE é semelhante a um cabo convencional, ou seja, sua capacitância depende fundamentalmente da área das superfícies opostas que suportam a tensão fase-terra, o distanciamento entre elas e o material dielétrico que preenche o espaço entre essas superfícies [55]. Duas diferenças importantes são a forma de deposição do dielétrico, sendo enrolado e não extrusado como em um cabo XLPE (*cross-linked polyethylene*), por exemplo, e a composição dupla da camada isolante: isolante sólido (PPLP na grande maioria dos projetos) e isolante líquido (N2L). Um ponto interessante é que um CSE permite comprimentos maiores do que um cabo convencional no aspecto da corrente de carregamento, o que o torna interessante para aplicação em conexões mais longas (links), desde que considerada e resolvida a questão relativa às estações de resfriamento [48]. Além disso, é preciso garantir emendas de qualidade e garantia de uniformidade nas fitas para distâncias maiores, uma vez que um pequeno ponto do material que se comporte de maneira irregular (transição da fase supercondutora) pode afetar todo CSE.

O uso de cabos supercondutores em sistemas de transmissão a longas distâncias é uma grande expectativa e um desafio de igual tamanho. Existem dois grandes projetos nessa linha, um europeu (Best Paths) e outro americano (Tres Amigas) [56,57]. O projeto europeu diz respeito ao desenvolvimento de tecnologia para uma linha de transmissão de energia baseada em CSE feito de MgB_2 . Seu objetivo visa desenvolver a tecnologia para uma conexão intercontinental em corrente contínua para transmitir grandes quantidades de energia renovável (solar e eólica) [58]. A grande quantidade de material supercondutor necessária para um link CC tão grande significa que qualquer projeto desse tipo permanece fora de um horizonte futuro próximo, mas estudos de aplicação de CSE em sistemas de corrente contínua ganham força com a demanda por energias renováveis e a

importante barreira das perdas AC [59,60]. Neste caso, há a demanda específica de análise de isolamento criogênico em condições de tensão contínua.

De modo mais imediato, a aplicação de CSEs em áreas urbanas e em conexões de curta distância é especialmente atraente, sobretudo no caso de cabos e subestações convencionais já com alto nível de carregamento. Neste último caso, pode ser econômico substituir os cabos de cobre convencionais existentes por cabos supercondutores, melhorando a ampacidade, evitando maiores perdas e novas construções subterrâneas caras para passagem de novos circuitos. Um exemplo pode ser visto em [61], que corresponde a um teste de longa duração de um CSE em rede. Além disso, transformadores de grande potência podem ser eventualmente substituídos ou reposicionados a distâncias maiores dos centros urbanos, contribuindo inclusive para melhorias na urbanização das cidades [4].

Os testes com CSEs integrados em rede já acumulam certa experiência, sobretudo as conexões feitas com cabos CA em áreas urbanas. Desta maneira, o grau de maturidade da tecnologia (*TRL - Technology readiness level*) está entre TRL-7 e 8. Apesar do crescimento recente dos esforços para aplicações com CSEs em CC, um TRL-5 pode ser assumido, uma vez que os testes em sistemas ainda são limitados. Contudo, em ambos os casos espera-se atingir nível de maturidade de mercado (TRL-9) até 2030 [2].

2.1.4.2 - Limitadores de corrente de falta

Uma aplicação que explora o material supercondutor como uma espécie de dispositivo de estado sólido e sua capacidade de rápida transição do estado supercondutor ao estado dissipativo é o limitador de corrente supercondutor (SFCL - *Superconducting Fault Current Limiter*) [7,15]. Na ocorrência de uma falha ou curto-circuito que ocasione sobrecorrente acima da corrente crítica (I_c) no ramo em que está inserido o SFCL, há uma rápida transição de fase que é explorada como gatilho do processo de limitação. No tipo de limitador resistivo, há uma dissipação de potência (resistência) no ramo supercondutor por ocasião da superação da corrente crítica que circula pelo material, reduzindo a corrente e com consequente incremento de temperatura [62]. A vantagem de um “chaveamento” tão rápido, proporcionado pela natureza da transição de fase do material supercondutor, compete com a dificuldade em proteger e recuperar o material diante do estresse térmico desse processo de transição [63].

Existem diferentes arranjos de SFCLs, variando do tipo resistivo até o tipo em ponte [8]. Sendo a proposta mais simples e mais antiga de um SFCL, feita pela primeira vez ainda em 1936, por Kalashnikov [48]. O tipo resistivo corresponde basicamente ao elemento supercondutor e muitas das vezes a um elemento *shunt* paralelo para desvio de corrente na ocasião da transição do material, visando proteção térmica do supercondutor. Os tipos híbridos surgiram das tentativas de mitigação das desvantagens intrínsecas dos resistivos, ou seja, diminuir o aquecimento do supercondutor decorrente da transição e diminuir o tempo de recuperação (disparo elétrico/magnético e retorno térmico) [64].

O tipo indutivo, também chamado de “núcleo blindado” ou “tipo transformador”, está baseado no acoplamento magnético entre um enrolamento supercondutor e um enrolamento convencional que fica conectado ao circuito a ser protegido. Sob condições normais de operação, a bobina secundária está no estado supercondutor. O fluxo magnético produzido pela bobina primária é então compensado pelo fluxo originado das correntes de blindagem induzidas na bobina supercondutora em curto-circuito. Sob condições de curto-circuito na rede, o aumento da corrente na bobina secundária excede o valor crítico e a bobina passa para o estado resistivo. Se a resistência devida à dissipação se tornar muito maior que a reatância indutiva da bobina, a corrente induzida na bobina secundária é reduzida e o fluxo magnético da bobina primária não é mais compensado. Assim, a impedância do limitador aumenta e limita a corrente de falta [65]. Um apelo importante deste projeto é o isolamento mecânico e térmico entre o ambiente criogênico do enrolamento supercondutor e o ambiente do circuito protegido.

As características mais importantes em todos os arranjos são o grau de limitação proporcionado, tempo de recuperação, perdas AC em regime normal, a nível de tensão suportável, necessidade de *current leads* no criostato, volume e peso [28]. Esta é uma tecnologia importante, com menor gasto de material, em avançado estágio de desenvolvimento tecnológico (TRL - 8) [2] e que poderá facilitar a expansão das redes atuais, pois auxilia no tratamento dos novos níveis de corrente de falta. Os SFCLs são considerados componentes essenciais para as redes elétricas na atualidade, com ambiente de cogeração e geração distribuída, e a necessidade de controle dos níveis de curto, visando a busca de maior segurança e estabilidade.

Esta tecnologia também é essencial para o próprio cabo supercondutor, que deve ter limitado sobre ele os níveis de corrente em uma eventual falta, seja por um SFCL em série ou pela construção de um CSE com função limitadora [42]. Também há ideia de

conjugação com outros dispositivos supercondutores. Em [66] é abordado o projeto de um transformador supercondutor com limitação de corrente, onde um dos desafios do projeto é também o isolamento criogênico, que sofre o desafio de manter o isolamento na possibilidade de geração de bolhas no N2L que surgem devido à falta.

Segundo [2], o horizonte de penetração comercial destes dispositivos é 2025, influenciado pelos avanços tecnológicos, testes de longa duração e alto interesse por parte de concessionárias de energia elétrica, devido às características e possíveis benefícios dos SFCLs. A maioria dos protótipos em grande escala desenvolvidos até agora foram demonstrados em níveis de média tensão, mas alguns projetos mostraram a viabilidade técnica para sistemas de transmissão [65].

2.1.4.3 - Transformadores

Em termos construtivos, os transformadores supercondutores são semelhantes aos transformadores convencionais, exceto pela presença de enrolamentos feitos de material supercondutor, o uso de um fluido refrigerante criogênico, e uma aumentada complexidade de projeto, decorrente das considerações sobre o isolamento elétrico, isolamento térmico, perdas AC no material supercondutor e em alguns casos a presença da função de limitação de corrente [48]. Embora os primeiros projetos tenham sido iniciados ainda na década de 1960, com materiais LTS, o primeiro protótipo efetivo surgiu em 1988 e precisava de proteção externa frente ao problema de *quenching* nas bobinas [66]. Os atuais projetos utilizam materiais de alta T_c , BSCCO e YBCO basicamente. Em [7], são apresentadas listas de projetos de transformadores LTS e HTS.

Um transformador convencional tem perdas totais bem conhecidas e distribuídas em parcelas de perdas por efeito Joule nos enrolamentos, por histerese no núcleo de ferro, por corrente parasita e no seu invólucro, resultante da dispersão do campo magnético [67]. Atualmente a eficiência chega a cerca de 99% [48], mas ainda pode ser considerado um desperdício de energia, dado o número e a potência dos transformadores presentes em um SEP de grande porte. Um dos projetos de transformadores desenvolvido com material HTS, feito com BSCCO, apontou eficiência de 99,1 a 99,3%, já incluído o sistema criogênico [68]. A atratividade depende desse volume de perdas que os transformadores convencionais representam e do custo técnico para colocar um transformador

supercondutor em operação com confiabilidade, pois na atualidade a tecnologia de transformadores convencionais está madura, bastante robusta e confiável.

Dessa forma, em função da otimização, confiabilidade, robustez, custo e eficiência dos transformadores convencionais a óleo, a tecnologia HTS lutará bastante para ser competitiva, mesmo possuindo vantagens como tamanho e peso reduzidos, não utilização de óleo e risco de incêndio [69]. O projeto de transformador supercondutor com a função limitadora de corrente e recuperação em plena carga, como descrito em [66], representa uma possibilidade importante de inserção de duas tecnologias em um mesmo dispositivo, e representa um diferencial importante. A impedância do transformador convencional é a maneira mais prática e econômica que um operador de rede pode limitar as correntes de falta [67].

Embora seja uma tecnologia importante para os SEPs, algumas questões atrapalham o desenvolvimento e a entrada dos transformadores supercondutores. Apesar de não ter perdas por efeito Joule nos enrolamentos, as fitas HTS apresentam as inerentes perdas AC, que sempre foram vistas como um obstáculo significativo para a comercialização de transformadores e demais dispositivos em CA. Embora situada na faixa de 1% para corrente nominal, quando convertida em potência de entrada do sistema de refrigeração, para ser feito um balanço energético válido com as perdas ôhmicas em um transformador convencional, o resultado é ruim [66].

Os projetos de transformadores HTS buscam então estratégias para superação desse gargalo técnico, com sérias implicações na viabilidade da tecnologia. Entre as estratégias está a melhoria do coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração, operação em temperaturas mais baixas do que 77 K (as perdas AC dependem fortemente da razão entre a corrente na fita e a corrente crítica), redução das perdas por histerese utilizando fitas com áreas de superfícies menores ou estriamento das fitas, e o uso de materiais não magnéticos na composição destas. Também existem pontos como a uniformidade da distribuição de corrente e redução das perdas nas terminações dos enrolamentos, que devem ser considerados [48].

Outro ponto de difícil solução também ligado a geometria da fita supercondutora, que detém uma razão de aspecto muito alta (grande largura e baixa espessura), é que além de afetar as perdas AC, esse contorno também pode gerar pontos de descargas elétricas entre as espiras, e juntamente com o desempenho do material dielétrico em N2L com presença

de bolhas, representam um desafio para o dimensionamento de transformadores em tensões elevadas [66]. Se for seguida uma estratégia de simples aumento da espessura do isolamento elétrico, que já pode ser inserido na fita durante sua produção, a cada camada de material dielétrico o isolamento térmico também crescerá e a capacidade de dissipação de calor ficará prejudicada. Portanto, a estabilidade térmica do enrolamento supercondutor fica comprometida e o calor decorrente das perdas pode gerar bolhas no N2L, causando como consequência uma maior suscetibilidade a disrupção entre as espiras.

Embora as propriedades isolantes do N2L sejam comparáveis as do óleo mineral [70], alguns estudos demonstraram tensões de ruptura reduzidas neste líquido na presença de bolhas. Uma estratégia possível é aumentar a tensão de ruptura do N2L através de maior pressurização do nitrogênio líquido e redução da densidade de bolhas [71]. No entanto, esta estratégia que gera sub-resfriamento pode não ser eficaz na prevenção de bolhas após uma sobrecorrente. Isso pode exigir que o isolamento projetado elimine o risco de disrupção mesmo na presença de bolhas. Estudos com materiais dielétricos em N2L e na presença de bolhas têm sido feitos neste sentido [72].

Por fim, o invólucro do criostato do enrolamento supercondutor deve ser feito de materiais não metálicos. Lembrando que o núcleo do transformador deve ser externo ao ambiente criogênico, pois as perdas no núcleo gerariam carga térmica adicional para o sistema criogênico. Materiais compósitos como o chamado FRP - *Fiber Glass Reinforced Plastic* e TVE-G10 são candidatos por atender esses requisitos e suportar as baixas temperaturas, embora apresente dificuldades relativas à manutenção do grau de vácuo e vedação, se comparado com um criostato comum feito de aço [7]. De um modo geral ainda há muito a ser feito para melhorar o projeto e o desempenho desses transformadores, a tecnologia está ainda em TRL - 4, com poucos testes e sem horizonte de disponibilidade comercial [2,69].

2.1.4.4 - Motores e Geradores

Basicamente motores e geradores são máquinas rotativas que operam na conversão que envolve energia elétrica e trabalho mecânico, operando em sentidos inversos [73]. As máquinas rotativas convencionais apresentam perdas relativamente altas pela resistência elétrica de seus enrolamentos, e possuem tamanho e peso diretamente ligados ao volume

de condutores utilizado e ao nível de potência envolvido. Apesar da robustez e grande domínio da tecnologia de produção de motores e geradores convencionais, síncronos e assíncronos, a busca por maior eficiência, redução de peso e compactação é de interesse geral ao setor elétrico.

Motores correspondem a uma grande parte do consumo de energia no mundo, sendo uma significativa parcela consumida por motores de grande porte. A maior parte da energia consumida no mundo provém de processos de conversão conduzidos por geradores rotativos, utilizados em hidroelétricas, termoeletricas e nas usinas eólicas [48]. A construção de motores e geradores supercondutores é interessante nesse sentido, pois gera a possibilidade de redução das perdas ôhmicas (maior eficiência), do tamanho e peso destas máquinas [74].

A resistência elétrica extremamente baixa da parte supercondutora permite simultaneamente a redução de perdas e a operação com campos magnéticos mais intensos, e consequentemente menor emprego de material e tamanho reduzido (mesmo considerando a necessidade do uso de criogenia). Isso pode ter pouco impacto para máquinas convencionais eficientes e que não são restritas em peso ou tamanho, mas podem ter alto valor em aplicações onde tamanho e peso são bastante limitados ou produzem altos custos (por exemplo, aviões, navios, submarinos).

Com respeito a eficiência, as perdas ôhmicas normais no enrolamento de campo supercondutor são de fato removidas ou drasticamente reduzidas. No entanto, elas compõem uma pequena parcela das perdas totais e são geralmente menores do que as que ocorrem na armadura. Essa situação, a eficiência do sistema de refrigeração e o fato da eficiência de motores e geradores convencionais muito grandes ser relativamente boa, geralmente de 98 a 99%, deixam enorme desafio para tornar os motores e geradores supercondutores competitivos [2].

O ambiente criogênico para o rotor traz duas vantagens importantes, primeiro evita a necessidade de ventilação para resfriamento do rotor, eliminando o ruído associado à ventilação do rotor e eliminando as perdas por arraste com o ar. E também evita desgaste no enrolamento de campo decorrentes de ciclos de aumento e redução de temperatura, uma vez que o supercondutor é mantido em temperaturas criogênicas estáveis durante a operação normal, indicando a possibilidade de que tenha vida útil mais longa do que um enrolamento de campo convencional [73].

Supercondutores, especialmente HTS, geralmente são maus condutores elétricos no estado normal, uma eventual transição de fase (*quenching*) do material combinada com o transporte de uma grande corrente, fará com que o material supercondutor empregado experimente grande aquecimento. Como no caso de cabos, transformadores e bobinas supercondutoras, este fenômeno deve ser acomodado adequadamente, sob pena de destruir o material, o isolamento elétrico e por consequência a máquina [75]. Nos projetos com LTS, esta questão é tratada transferindo a corrente para materiais condutores ao redor do supercondutor (material estabilizador) ou transferindo a energia elétrica para um resistor de descarga. Outro desafio importante é a degradação significativa da corrente crítica em alto campo magnético [48]. Em ambos os projetos é preciso analisar também o comportamento do dielétrico utilizado, tanto em situação de operação normal quanto na possibilidade de uma sobretensão e geração de bolhas no fluido criogênico.

Uma das principais áreas de aplicação para geradores e motores HTS é no campo naval, no desenvolvimento de aviões elétricos e na construção de turbinas eólicas. Nos dois primeiros casos busca-se compactação, redução de peso e adensamento de potência, sendo que não se imagina a concepção da tecnologia de grandes aviões elétricos sem motores supercondutores [20]. No caso de turbinas eólicas a redução de volume e peso é essencial para ampliação da capacidade de geração das turbinas sem grande aumento de custos com a estrutura mecânica de sustentação.

Há um interesse crescente em energia eólica na atualidade, particularmente turbinas eólicas *offshore*, por questões da necessária diversificação da matriz energética e disponibilidade dos recursos eólicos. Também há uma tendência atual para turbinas com rotores maiores, que podem fornecer fatores de capacidade anuais mais elevados e aumentar a geração. Como grandes turbinas eólicas *offshore*, 10 MW ou maiores, demandam uma grande estrutura de fixação, um gerador HTS pode diminuir peso e tamanho, o que é um grande atrativo econômico [76]. No caso específico de geradores há expectativa de que essa tecnologia possa ter maturidade de mercado já em 2030 [2], o que, se confirmado, constituirá um grande avanço neste campo de aplicação.

2.1.4.5 - Armazenadores de energia - SMES e SFES

Nos últimos anos, é perceptível o desenvolvimento e crescimento de duas fontes de energia consideradas limpas e renováveis: eólica e solar. Elas são inerentemente

intermitentes, e isso tem gerado uma busca por sistemas de armazenamento de energia. Várias estratégias diferentes têm sido analisadas, como baterias, supercapacitores, ar comprimido e usinas hidroelétricas reversíveis [77]. As principais funções deste tipo de sistema no movimento de inclusão e ampliação das fontes renováveis na matriz elétrica são: nivelamento da curva de carga diária, o controle de frequência, controle de afundamentos de tensão, melhoria da qualidade e confiabilidade dos sistemas de energia [78].

A tecnologia supercondutora propõe duas técnicas, que frente a outros dispositivos convencionais podem apresentar vantagens importantes como a velocidade de resposta mais rápida, maior densidade de potência e maior eficiência de carga-descarga. Estas técnicas, que podem ser essenciais para melhorar a qualidade da energia com armazenamento em pequena ou média escala, são: SMES - *Superconducting Magnetic Energy Storage* e SFES - *Superconducting Flywheel Energy Storage* [10].

O SMES é um dispositivo que visa armazenar energia, sob a forma magnética, através de uma corrente contínua que flui em um fio ou fita supercondutora que compõe uma bobina (solenóide ou toróide) [7]. A equação 2.2 representa a energia magnética armazenada em função da corrente (I) e da indutância (L). Esta energia pode ser utilizada na operação de SEPs com o intuito de fornecer potência ao sistema em caso de necessidade, evitando a ocorrência de interrupção e intermitência no fornecimento de energia. Em função da resistividade extremamente baixa do supercondutor, o SMES apresenta eficiência muito alta (98-99%) no armazenamento, fazendo frente a outras estratégias de armazenamento de energia [19].

$$E_M = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.2)$$

A possibilidade de injeção e extração de corrente de forma rápida é um grande atrativo, pois torna a compensação dinâmica mais eficaz e oportuna. Dois atrativos adicionais dizem respeito ao fato de as principais peças serem estáticas: desgaste mínimo e confiabilidade alta. Este dispositivo foi originalmente pensado para grande escala, nivelamento de carga, mas, por suas características de descarga rápida, tem sido pensado também para sistemas de energia elétrica com demanda de pulsos de energia e aplicações de estabilidade [10]. Pesquisas sobre a forma de controle do SMES e interação entre a sua dinâmica e a do SEP serão fundamentais para o desenvolvimento desta tecnologia, cujo horizonte de maturidade está entre 2025 a 2035 [2]

O SFES - *Superconducting Flywheel Energy Storage* difere do processo em um SMES, pois neste caso, a energia é armazenada mecanicamente através do aumento da energia cinética rotacional (E_R) de um objeto que gira em torno de um eixo (Equação 2.3) [7]. No caso prático, este objeto é um disco ou volante, com momento de inércia (I_m), que pode atingir velocidade angular (ω) muito alta devido ao ambiente de vácuo, criado especialmente para evitar a perda da energia. O supercondutor é utilizado nos mancais magnéticos do dispositivo [10].

$$E_R = \frac{1}{2} I_m \omega^2 \quad (2.3)$$

Composto pelo volante, sistema de levitação magnética supercondutora, o sistema de conversão eletromecânica, criostato e um ambiente de vácuo, um SFES recebe energia elétrica através de um conversor bidirecional para conversão mecânica (modo motor), sofrendo incremento de sua velocidade, e cede energia elétrica (modo gerador), com consequente redução de sua energia mecânica, para um sistema elétrico que demande a injeção de energia e esteja a ele conectado. Além dos desafios de desenvolvimento de mancais supercondutores, há uma demanda por materiais que suportem os esforços mecânicos decorrentes da alta velocidade rotacional.

2.1.4.6 - Principais desafios ao emprego de dispositivos HTS em SEPs

Tomando como base o apontado em [2], que corresponde a um compilado de informações feito pela IEA (*International Energy Agency*) sobre o estado da arte para as atividades em supercondutividade aplicada, que procurou dar um panorama sobre em que patamar de desenvolvimento as aplicações em SEP estarão no horizonte 2015-2035, é possível ter em mente os principais desafios para atingir a meta de implantação de dispositivos HTS em SEPs. Trata-se de uma iniciativa para demonstrar aos tomadores de decisão sobre os benefícios das aplicações HTS, encorajar o emprego da tecnologia para modernização do setor de energia, elencar o nível de desenvolvimento de cada tecnologia e apontar rumos de pesquisa e desenvolvimento.

Conforme o documento, no campo de materiais, é imperativo reduzir custos de produção de fios e fitas, principalmente pela redução do uso de prata, níquel e Hastelloy® (liga metálica utilizada no recobrimento de fitas 2G). Além disso, um controle mais preciso e otimizado da produção é necessário para controlar a homogeneidade da corrente

crítica ao longo do comprimento e da largura das fitas. Controlar impurezas durante o processo também é um ponto importante. A melhoria das perdas AC nos dispositivos é fator crucial para todas as tecnologias voltadas para redes elétricas, pois afeta a eficiência e a capacidade de transmissão de energia. No campo de padrões e estruturas de testes, são apontados o desenvolvimento de arranjos experimentais que permitam ensaios com os dispositivos supercondutores, suas tecnologias ancilares e o estabelecimento de padrões normativos para os mesmos. Também é citado o desenvolvimento de testes que possam acelerar a análise da vida útil deste tipo de equipamento, tal qual ocorre com os convencionais.

Um importante apontamento diz respeito a fabricação de estruturas como junções, emendas e terminações. Segundo o documento isso facilitará a comercialização, e representa um desafio pela necessidade de baixas resistências e robustez diante das baixas temperaturas. No caso das terminações (*current leads*), que ligam a parte criogênica com o sistema em temperatura ambiente, há um desafio especial em função das perdas nessa transição. Outro ponto que envolve o desenvolvimento das aplicações supercondutoras é a parte de isolamento elétrico em temperaturas criogênicas, que precisa ser estudado através da análise de desempenho de materiais dielétricos em baixas temperaturas, ou seja, medição de rigidez e perdas dielétricas em banho criogênico. Por fim, é colocada a questão da refrigeração: melhorar custo e confiabilidade dos sistemas criogênicos, melhorar o isolamento térmico e a realização de mais testes com instalações de dispositivos HTS em rede.

Em função da demanda global de energia e as preocupações com emissões de carbono, o setor de energia está passando por um processo de transformação necessário ao atendimento do cenário atual e futuro: aumento da capacidade de geração e redução de perdas, agregados com um forte crescimento das energias renováveis. Esse cenário terá grande influência no desenvolvimento e penetração dos dispositivos supercondutores no setor elétrico, pois a sinergia entre as soluções oferecidas por eles e as demandas deste cenário existe. É o caso, por exemplo, das tecnologias de transmissão CC utilizando cabos supercondutores e o desenvolvimento de dispositivos de armazenamento de energia supercondutores (SMES e SFES).

Como já exposto, as tecnologias HTS aplicadas a SEP não tem a possibilidade de simplesmente oferecer melhorias incrementais se comparadas as tecnologias convencionais, elas fornecem, em alguns casos, soluções únicas para desafios que não

podem ser alcançados de outra forma. Por isso, é de se esperar cada vez mais o desenvolvimento de pesquisas e investimento nesta área, de modo a superar os desafios já citados. Na esteira desse desenvolvimento e penetração das tecnologias HTS, haverá um processo inevitável de ruptura tecnológica e geração de novos empregos altamente especializados, além dos que já existem hoje em P&D e na indústria voltada para o segmento de magnetos supercondutores de uso na área médica e/ou em Física de altas energias. Daí uma necessidade mundial [20,76] e brasileira [18,19] com respeito a pesquisa neste campo para superação dos desafios colocados.

2.2 – Propriedades dos materiais dielétricos

Fundamentalmente, as principais propriedades elétricas para caracterização de materiais dielétricos com vistas ao emprego em projeto de um cabo de energia em CA são a constante dielétrica (permissividade), o fator de dissipação ou tangente de perdas, a rigidez dielétrica, as resistividades volumétrica e superficial. Somada a essas propriedades, é desejável verificar também o comportamento do material com respeito a tensões impulsivas e ocorrência de descarga parcial (DP) em tensões mais altas, sendo esta última uma ruptura elétrica localizada que pode ocorrer em lacunas ou interstícios do isolante, superficialmente em fronteiras e formação de canais de descarga (*treeing*).

Do ponto de vista físico, a constante dielétrica está ligada à capacidade do material em acumular cargas, o fator de dissipação tem relação direta com a energia não armazenada pelo material e perdida sob a forma de calor. A rigidez dielétrica está ligada à suportabilidade de isolamento elétrico do material, ou seja, o quanto de campo elétrico ele resiste sem permitir a ruptura. As resistividades por sua vez estão ligadas a resistência específica do material à passagem de corrente elétrica, tanto pela superfície quanto pelo seu volume (transversalmente).

Em termos práticos, um bom candidato a material dielétrico em um projeto de cabo de energia deve possuir boas propriedades dielétricas nas condições de operação, ou seja, ter uma constante dielétrica baixa e também baixa tangente de perdas. Em função do emprego de altas tensões, uma característica muito importante é a rigidez dielétrica, que representa a capacidade do material dielétrico em resistir ao esforço elétrico de ruptura pela ação do alto campo elétrico aplicado, que pode variar entre os pontos de aplicação

do campo de acordo com o design do dispositivo. Por fim, o material dielétrico também deve ser resistente às descargas parciais em tensões mais altas, e quando aplicado no cabo de energia em questão, deve tolerar as tensões impulsivas conforme normas específicas.

A seguir, são apresentados tópicos de revisão sobre algumas propriedades dos materiais dielétricos. Lembrando que tais propriedades devem ser analisadas em meio criogênico para o projeto de um CSE ou outro dispositivo supercondutor. Materiais dielétricos sólidos em condições de temperaturas criogênicas podem diferir significativamente das condições em temperatura ambiente, pela ocorrência de situações como tensões mecânicas adicionais, alterações microestruturais, interação com o fluido criogênico, entre outras.

2.2.1 - Constante dielétrica e tangente de perdas

Fisicamente, a definição de constante dielétrica diz respeito à razão entre a capacitância de um capacitor com um dielétrico entre as suas duas placas e a capacitância deste capacitor sem a presença do dielétrico (vácuo), ou de modo mais fundamental, a razão entre a energia elétrica relativa ao campo elétrico dentro do material em comparação com a energia elétrica em um volume semelhante de vácuo (em termos práticos o ar) sujeito ao mesmo campo elétrico [77]. Como o vácuo é a ausência total de matéria, este não contém nenhum elemento polar que reaja ao campo aplicado, portanto, é considerado o menor valor de constante dielétrica.

A Figura 8 ilustra um capacitor de placas planas e paralelas que possui um dielétrico entre essas placas sob atuação de fonte de tensão CC. As grandezas C e C_0 são capacitâncias com e sem dielétrico, respectivamente, A corresponde a área das placas do capacitor e t a distância entre elas. A grandeza $\kappa' = \epsilon_r'$ é a constante dielétrica real ou permissividade elétrica. O material dielétrico aumenta a capacidade de armazenamento de energia do capacitor neutralizando cargas nas placas condutoras, o que normalmente contribui para o campo externo. A capacitância do capacitor está relacionada à constante dielétrica do material entre as placas conforme indicado nas equações.

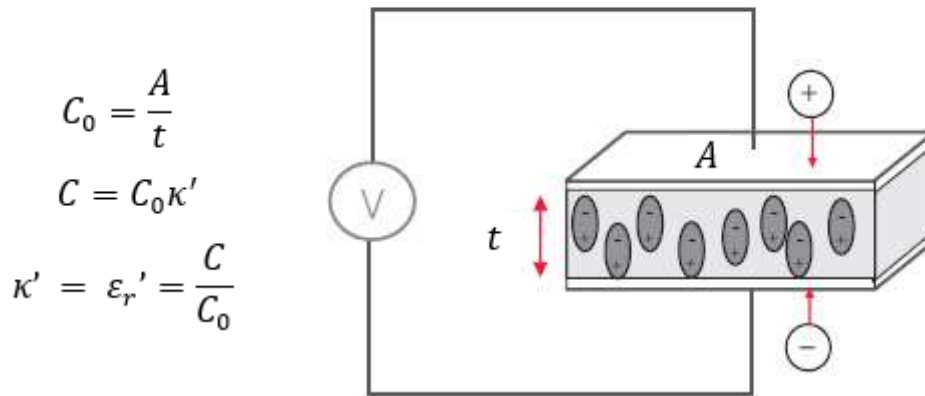


Figura 8 – Capacitor de placas planas e paralelas – tensão contínua [78]

Importante lembrar que os parâmetros temperatura e a frequência podem afetar bastante o comportamento do material, e consequentemente sua resposta enquanto isolante. Um material dielétrico tem como principais empregos o isolamento elétrico de elementos de redes energizados, fabricação de capacitores e suporte (substrato) de circuitos eletrônicos. Nesta situação pode ser preciso analisar seu comportamento em altas frequências. Como o foco é voltado para aplicações voltadas a redes de energia, utilizando-se materiais em temperatura criogênica, na faixa dos 77 K (N2L), e frequência industrial (50/60 Hz), não serão considerados detalhamentos do comportamento em alta frequência. Além da temperatura e frequência, orientação do material em relação ao campo elétrico, pressão e estrutura molecular do material influenciam o valor da constante dielétrica [77].

Considerando o mesmo capacitor sob uma tensão CA senoidal de frequência ω (Figura 9), haverá circulação de corrente, cuja resultante I será composta por duas parcelas, uma corrente capacitiva I_C e uma corrente resistiva I_R que está relacionada a perdas no dielétrico. As perdas no material podem ser representadas como uma condutância (G) em paralelo com o capacitor de capacitância (C). O fator de dissipação representa fisicamente a energia que está sendo perdida na forma de calor e afeta a eficiência do material dielétrico. Em termos de modelagem esse parâmetro pode ser obtido pela razão entre a componente de perdas da corrente e a componente capacitiva, sendo comumente referenciado como tangente de perdas, “ $\tan \delta$ ” ou ainda $\tan \delta$. Onde δ é o ângulo entre a corrente real no capacitor e a corrente ideal, puramente capacitiva (I_C) e defasada de 90° da corrente resistiva (I_R).

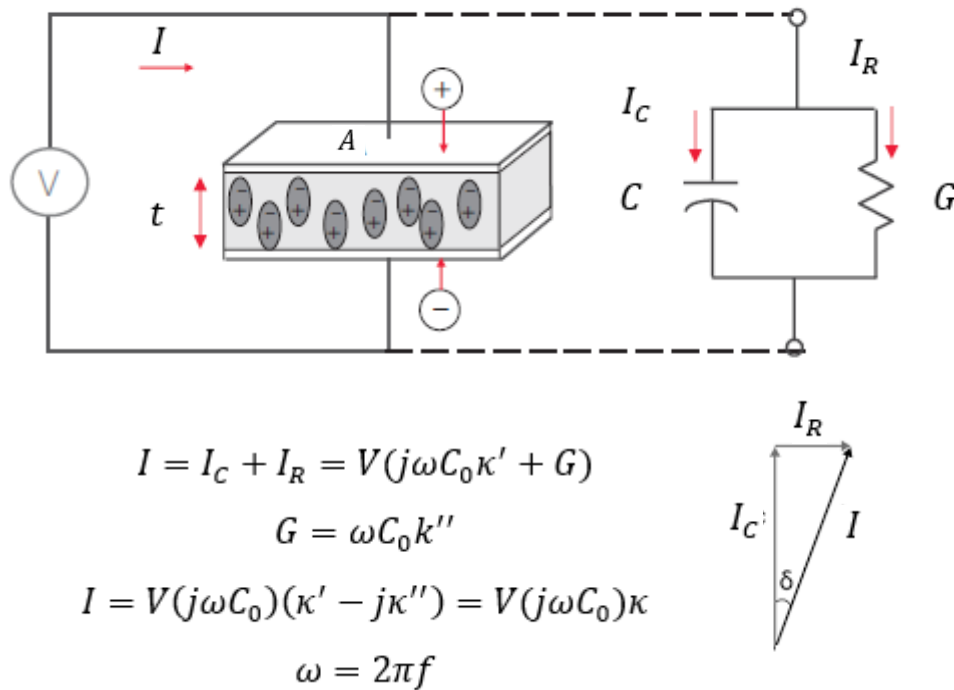


Figura 9 – Capacitor de placas planas e paralelas – tensão alternada [78].

A permissividade descreve a interação de um material com um campo elétrico e é essencialmente uma quantidade complexa (κ) em tensão alternada. A parte real da permissividade (ϵ_r') é uma medida de quanta energia de um campo elétrico externo é armazenada no material. Já a parte imaginária da permissividade (ϵ_r'') é o de fator de dissipação, sendo uma medida de quão dissipativo ou com perdas um material é para um campo elétrico aplicado. Tem sempre valor maior que zero e geralmente é muito menor que a parte real da permissividade.

Quando a permissividade complexa é desenhada em um diagrama simples no plano complexo (Figura 10), as componentes real e imaginária estão defasadas em 90° . A soma vetorial forma um ângulo δ com o eixo real (ϵ_r'). A tangente de perdas ou $\tan \delta$ pode então ser definida também como a razão entre a parte imaginária e parte real da constante dielétrica. Tal resultado fornece a razão entre a energia perdida e a energia armazenada por ciclo. Também conhecido como fator de dissipação, às vezes esse valor também é expresso em termos do seu inverso, denominado fator de qualidade Q . Para materiais com perdas muito baixas, é possível fazer a seguinte aproximação: $\tan \delta \approx \delta$, já que o ângulo

é muito baixo, o que inclusive implica nas típicas dificuldades de medições precisas e estáveis desse tipo de grandeza.

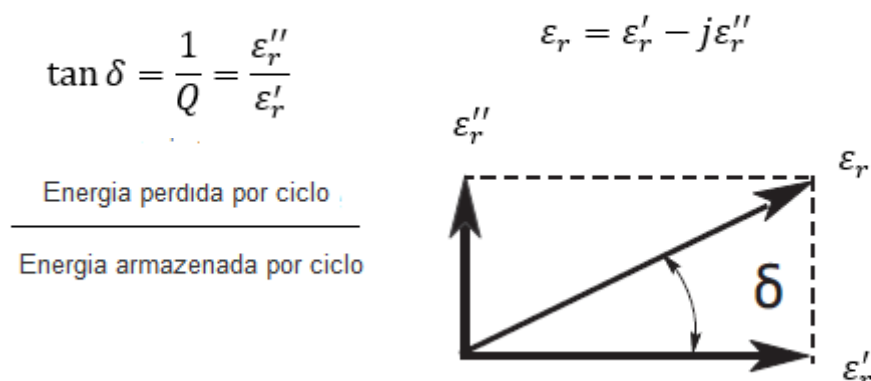


Figura 10 – Diagrama da permissividade elétrica [78]

O fator de perdas pode incluir em seu valor três principais processos: polarização, ionização e condutividade. O mecanismo de condução se deve ao fato de que mesmo o material sendo isolante pode existir uma certa quantidade de condutividade elétrica, seja volumétrica ou superficial. Embora seja extremamente baixa, ela é suficiente para afetar a tangente de perdas. As perdas por condução são mais significativas em materiais com maior condutividade, e são especialmente relevantes em aplicações de alta frequência. O processo de polarização está ligado ao alinhamento dos dipolos com o campo elétrico alternado aplicado. A mudança na orientação das moléculas resulta na transformação de parte da energia elétrica em calor. Esse fenômeno é uma das principais causas de perdas em materiais dielétricos. Por fim, a ionização ocorre quando o campo elétrico aplicado ao material é muito intenso, o que provoca a quebra de ligações entre os átomos, resultando na formação de íons positivos e consequente corrente elétrica que leva à dissipação de energia no material. A ionização é mais comum em aplicações de alta tensão, onde os campos elétricos são mais intensos [77].

Também é conhecido que a energia liberada pela DP aumenta o fator de dissipação, e uma medição sensível da $\tan \delta$ em função da tensão exibe um 'joelho de ionização' ou flexão desta dependência. No entanto, isto pode não ser pronunciado, mesmo com valor apreciável de PD, pois as perdas adicionais geradas podem ser muito pequenas em comparação com o volume de perdas resultantes de processos de polarização [79].

2.2.2 - Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica é uma das mais importantes características de um material isolante e pode ser definida como o campo elétrico limite acima do qual o material dielétrico não consegue mais manter sua integridade e o devido isolamento elétrico, ou seja, sem sofrer elétrica e permitir a condução elétrica entre as partes energizadas [77]. A tensão aplicada faz com que o isolamento falhe e ocorra uma descarga do campo elétrico através do material isolante que separa as partes energizadas. Em termos práticos, a rigidez dielétrica de uma amostra de material isolante corresponde à tensão aplicada dividida pela distância de separação dos eletrodos de teste, normalmente expressa em kV/mm, ou seja, esse valor de tensão por unidade de espessura.

Em isolantes sólidos, o mecanismo de ruptura elétrica não é tão bem compreendido como no caso de gases. Embora numerosas pesquisas tenham estudado o fenômeno e uma série de resultados importantes tenham sido conseguidos, permitindo inclusive o desenvolvimento de todo aparato de alta tensão conhecido, os mecanismos físicos fundamentais de ruptura nos sólidos são compreendidos com muito menos clareza do que nos gases; embora vários mecanismos distintos tenham sido identificados e tratados teoricamente [79].

Ainda que o processo da ruptura dielétrica dos sólidos seja bastante complexo, invocando inclusive aspectos da física quântica e um mecanismo eletrônico da ruptura, tem sido possível construir resultados de engenharia sem ter de recorrer a essa discussão. Mesmo sem se ter uma teoria completa sobre o assunto, há certa concordância entre evidências experimentais de que um dielétrico pode perder suas propriedades de isolamento devido a causas puramente elétricas (tensão aplicada) ou devido a causas térmicas (elevação de temperatura). Estabelece-se, assim, a análise da rigidez dielétrica em termos da ruptura elétrica e da ruptura térmica [77].

Na ruptura elétrica, o processo inicia-se quando o campo elétrico aplicado é suficientemente alto, ocasião em que os elétrons livres dos eletrodos de teste podem ser acelerados e liberar elétrons adicionais por colisões com átomos ou moléculas neutras do material, além de saltar da banda de valência para a banda de condução. A quebra ocorre de forma bastante abrupta (nanossegundos), resultando na formação de um caminho eletricamente condutor e uma descarga disruptiva através do material. Em um material

dielétrico sólido, um evento de ruptura degrada permanentemente a capacidade do isolamento, ou seja, não é possível recuperar a capacidade de isolamento.

A Equação 2.4 fornece o valor da rigidez dielétrica. Onde h é a espessura de material, V_d é a tensão disruptiva e E_{RD} é o valor da rigidez. Está sendo considerado o caso mais comum de campo aplicado não-homogêneo.

$$E_{RD} = \frac{V_d}{h} \quad (2.4)$$

Idealmente, o valor de rigidez dielétrica deveria ser uma propriedade intrínseca do material, independente da configuração do material ou dos eletrodos com os quais o campo é aplicado, ou seja, uma rigidez em seu estado puro. Acontece que a prática de engenharia demonstra que não é possível ter amostras de materiais totalmente uniformes e livres de defeitos, pois o próprio processo de produção traz consigo variáveis que geram regiões não uniformes, seja por porosidades ou flutuações na composição do material. Além disso, a configuração de campo, dirigida pelo perfil de eletrodos, tipo de tensão (CA ou CC) e forma de aplicação, contribuem para respostas diferentes do material [77].

Quando um isolante elétrico sólido é testado sob tensão elétrica, outros mecanismos de disrupção podem ocorrer: disrupção por formação de *streamer*, ocorrendo avalanche de elétrons como no caso dos gases; disrupção eletromecânica, quando o dielétrico se deforma apreciavelmente pela ação do campo elétrico, podendo colapsar quando as forças de compressão eletrostática na amostra de teste excedem seu limite mecânico; disrupção por efeito de borda e arborescência, no primeiro caso pode ocorrer disrupção através do meio circundante ao arranjo (eletrodos + material) em função do valor de tensão e menor rigidez desse meio, e no segundo caso ao aplicar uma tensão impulsiva sequencialmente, onde podem ir surgindo canais de descarga dentro do isolante, até que a disrupção ocorra; disrupção por erosão, que ocorre basicamente pela presença cavidades ou vazios dentro do material dielétrico ou nos limites entre o sólido e os eletrodos. Nestas regiões cavidades tem-se em geral rigidez menor do que a do material, favorecendo o surgimento de DPs que levam a disrupção; disrupção por *Tracking*, onde neste caso há formação de um caminho condutor permanente através da superfície do isolante, e isso resulta na sua degradação e leva a disrupção. Por fim, a disrupção térmica pode ocorrer devido a correntes de condução e perdas dielétricas devido à polarização, o calor gerado dentro do dielétrico em ambas as situações pode afetar as propriedades do material. Em geral, a condutividade aumenta com a temperatura, e condições de instabilidade podem ser

alcançadas quando a taxa de aquecimento excede a taxa de resfriamento, vindo a causar a ruptura térmica da amostra [79].

Durante a realização de testes de rigidez dielétrica, busca-se realizar as medições em condições mais ideais e reprodutíveis permitidas na prática, mas ainda assim tem-se também flutuações. Dessa forma, considera-se o nível de tensão disruptiva mais alta, detectada pela medição instantes antes da ocorrência da disrupção, e uma série mínima de dados de modo a se obter um valor representativo estatisticamente para o valor da rigidez [77]. Sob condições industriais normais, os materiais sólidos podem exibir uma ampla faixa de rigidez dielétrica, dependendo das condições do ambiente e o método de teste. A tensão disruptiva é influenciada por um grande número de fatores externos, como temperatura, umidade, duração do teste, se é aplicada tensão CA, CC ou impulso, pressão aplicada aos eletrodos, descargas no meio ambiente, natureza do material sob teste, entre outros fatores.

Pelo exposto, é possível perceber que a rigidez dielétrica de um material isolante elétrico não é uma medida absoluta, e depende de muitos fatores, incluindo o procedimento utilizado no processo de medição, que inclui os tipos de eletrodos e rampa de subida da tensão. Portanto, é importante entender o método e equipamento utilizados na caracterização da rigidez dielétrica de um material, ou seja, as condições em que se obteve aquele valor de tensão representativo da suportabilidade elétrica do mesmo. Ao comparar os valores de rigidez dielétrica para diferentes materiais isolantes, deve se lembrar que as medições devem ter sido realizadas em condições idênticas ou muito semelhantes. No caso de isolamento criogênico, por exemplo, podem ser feitas medições com ou sem a presença de bolhas no fluido refrigerante, e isso faz diferença no comportamento do isolamento como um todo.

Idealmente, quando se estuda a rigidez dielétrica de um material, os valores de rigidez são medidos em pequenas amostras, considerando um conjunto de medições suficiente para considerar efeitos de variabilidades inerentes nos resultados, que decorre de flutuações nas condições ambientais, da forma de aplicação de tensão e também do processo produtivo do material. As seguintes variáveis devem ser controladas para garantir que os dados obtidos nas medições de rigidez dielétrica seja uma representação coerente do comportamento do material isolante sob teste:

- Espessura da amostra;

- Temperatura;
- Umidade;
- Formato e tamanho dos eletrodos (geometria do campo aplicado).

Como mencionado anteriormente, a tensão de ruptura depende da magnitude do campo elétrico aplicado, e, portanto, é necessário saber se os eletrodos utilizados nas medições criam um campo elétrico uniforme, aproximadamente uniforme ou não uniforme. Conhecer a temperatura na qual o material dielétrico está sendo testado é importante, principalmente no caso de um ensaio com materiais em temperaturas criogênicas. A medição pode ser feita antes da aplicação da tensão de ruptura com termômetro adequado para a faixa de temperatura, ou pode ser estimada com base no equilíbrio térmico com o fluido refrigerante na pressão utilizada, para o N2L é cerca de 77 K em 1 atm de pressão.

2.2.3 - Resistividade volumétrica e superficial

Como os materiais isolantes são maus condutores elétricos, eles apresentam naturalmente alta resistência ao movimento de elétrons, o que é expresso em termos da resistividade elétrica volumétrica (ρ). Ela representa a resistência (R) a passagem de elétrons entre as faces opostas de um cubo hipotético feito com o material dielétrico em questão. A face do cubo tem área (A), e o comprimento entre as faces do cubo é (l). A unidade de medida típica para a resistividade volumétrica é ohm.m. A relação entre essas grandezas é dada pela equação 2.5.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.5)$$

Uma variante deste conceito é a resistividade superficial, que é representada como a passagem de elétrons entre locais opostos ao longo da superfície de um filme de dimensões definidas. A unidade típica é o Ohm, já que a largura e o comprimento do filme que está sendo medido são escolhidos para serem iguais. Portanto, a resistividade volumétrica representa uma medição transversal, enquanto a resistividade superficial representa uma medição bidimensional [77]. Este conceito é aplicado a uma superfície de um isolante sólido, e está ligado à película que esteja recobrindo esta superfície. Dessa forma, é bastante impactada pelas condições do meio ambiente em que o isolante é colocado. Entre essas condições, aparece, com destaque, a influência da água, que pode afetar a condutividade associada e mascarar as medições de perdas, por exemplo.

Conceitos de resistividade superficial e resistência superficial às vezes podem ser confundidos. Definições de ambos os termos podem ser verificadas em muitos livros e normas padrões [80,81]. A resistência superficial R_S é a razão entre uma tensão CC e a corrente que está fluindo entre dois eletrodos de configuração tal que estão ambos em contato com o mesmo lado do material em teste. A resistividade superficial ρ_S , por sua vez, é extraída da razão entre a queda de tensão por unidade de comprimento e a corrente por unidade de largura na superfície. Considerando essa largura e comprimento iguais, a unidade de resistividade superficial é Ohm. De modo a diferenciar resistência (configuração) e resistividade (material), esta última é frequentemente expressa também em Ohm/quadrado (área), que não é uma unidade válida se considerarmos o ponto de vista metrológico.

Por fim, é importante ressaltar que a resistividade é influenciada pelo teor de umidade, tensão, tempo de tensão aplicada e a temperatura. Em linhas gerais, a resistividade volumétrica do material dielétrico aumenta com a diminuição da temperatura. Portanto, as condições de medição devem ser conhecidas para permitir uma comparação precisa de diferentes materiais dielétricos, e isso é um fator que torna esse tipo de medição um processo metódico, difícil e muitas vezes caro. Estas medições não foram realizadas neste trabalho, mas sabe-se que as conduções elétricas que possam surgir, volumétrica e/ou superficialmente, acabam por contribuir na corrente de perdas. É um outro grande desafio pesquisar essa influência, ou seja, buscar separar essa parcela da corrente de perdas total.

2.3 – Métodos de caracterização de dielétricos

A caracterização de materiais dielétricos é fundamental na engenharia elétrica para garantir a confiabilidade e o desempenho de sistemas elétricos em uma variedade de aplicações. Esses materiais desempenham um papel crucial no projeto de suporte e isolamento elétrico, sendo necessário compreender as suas propriedades elétricas diante dos contornos e condições operativas previamente estabelecidas. Ao longo do tempo, uma variedade de métodos de caracterização elétrica foi disponibilizada, abrangendo medidas de diferentes grandezas em diferentes faixas de frequência e tensão. Neste tópico são listados alguns métodos de caracterização elétrica de materiais dielétricos sólidos comumente empregados no estudo destes materiais, destacando suas aplicações,

importância na análise e desenvolvimento de sistemas de isolamento convencionais. No caso de dielétricos para aplicações criogênicas, é verificada a medição de constante dielétrica, tangente de perdas e rigidez dielétrica.

Quando se trata de caracterização dielétrica de alta frequência, duas técnicas principais são comumente empregadas: métodos ressonantes e de banda larga. As técnicas ressonantes envolvem a análise da resposta do material em frequências ressonantes específicas, fornecendo informações valiosas sobre as propriedades dielétricas do material. Por outro lado, os métodos de banda larga oferecem uma análise de faixa de frequência ampla, permitindo um exame mais abrangente do comportamento dielétrico em diferentes frequências. Ambos os métodos são utilizados para avaliar as propriedades dielétricas dos materiais em frequências elevadas e baixa tensão, sendo mais aplicados em áreas como comunicações sem fio, tecnologias de radar, eletrônica de alta velocidade, entre outras.

A espectroscopia dielétrica, feita com analisador de impedância, e medidores LCR (Indutâncias-Capacitâncias-Resistências) são métodos de banda larga comumente utilizadas para investigações sobre a permissividade elétrica e perdas dielétricas em um material em função da frequência do sinal aplicado. Quando se insere um material dielétrico entre os eletrodos forma-se, basicamente, um capacitor de placas planas e paralelas, permitindo a extração dos valores das propriedades em estudo através da análise da resposta do material ao sinal aplicado, que neste caso é de baixa tensão. Embora não forneça o real comportamento do material sob alta tensão, ao empregar essas técnicas de caracterização é possível identificar, sem ensaio destrutivo, o comportamento das duas propriedades citadas com relação a frequência.

O teste de rigidez dielétrica é uma etapa crucial na análise de desempenho de um material dielétrico para fins de isolamento em alta tensão, e envolve o estresse do material por aplicação de uma rampa de tensão elétrica até que ocorra a disrupção, ou seja, uma falha do material em isolar os eletrodos energizados, impedir o fluxo de corrente. Como dito na seção anterior o valor da rigidez dielétrica refere-se ao campo elétrico máximo que o material consegue suportar sem sofrer disrupção. Podem ser avaliadas medidas de rigidez em CC e em CA, e ainda ensaios de impulso, onde uma onda padronizada é aplicada ao isolamento feito com o material. É uma característica fundamental que afeta diretamente o projeto de sistemas elétricos, uma vez que o objetivo é garantir o isolamento

elétrico adequado, ou seja, que evite a disrupção nas condições usuais e diante de transitórios, garantindo durabilidade e prevenindo falhas do isolamento.

A descarga parcial (DP) é outro fenômeno importante relacionado às falhas de isolamento em sistemas elétricos. Envolve a ruptura localizada numa pequena porção do material dielétrico, o que pode cumulativamente levar a uma maior degradação do material e ter como consequência final a ruptura do isolamento. Medir, monitorar e controlar descargas parciais é essencial para prevenir falhas catastróficas em equipamentos elétricos. Seu aumento também está correlacionado com o aumento das perdas dielétricas e a diminuição da rigidez. Para essa caracterização, é necessária uma fonte de alta tensão, que irá induzir as descargas parciais no dielétrico, e podem ser fontes CC, CA ou impulsivas, a depender dos requisitos do teste. Um sistema de detecção de descargas parciais deve ser capaz de captar os sinais emitidos durante a ocorrência das descargas parciais, em geral muito baixos e passíveis de serem confundidos com algum tipo de ruído. É preciso então discriminar esses sinais, contabilizar e qualificar as descargas ocorridas. Por isso esses sinais devem ser então processados e analisados para avaliar a presença e a magnitude das descargas parciais.

A constante dielétrica e a tangente de perdas são importantes propriedades associadas ao desempenho dos materiais dielétricos. A constante dielétrica ou permissividade relativa, está ligado a capacidade de armazenar energia elétrica, enquanto a tangente de perdas está relacionada com a energia dissipada pelo material. Compreender e mensurar essas propriedades é fundamental para selecionar materiais dielétricos adequados para diversas aplicações em engenharia elétrica. Essas medidas podem ser feitas tanto em baixa quanto em alta tensão, bem como em diferentes frequências, mas em termos de aplicação em SEP é desejável medidas na faixa de tensão operacional e em frequência industrial (50/60Hz). Em baixa tensão, podem ser feitas medições com ajuda de um medidor LCR, e em alta tensão com um circuito do tipo Ponte Schering.

Para o caso de caracterização em ambiente criogênico, necessária para a análise de materiais para emprego em sistemas supercondutores, utilizam-se basicamente as mesmas técnicas, mas é preciso considerar a montagem do sistema criogênico, tais como: construção de porta-amostras adequado, utilização de uma câmara criogênica para imersão da amostra no fluido criogênico, cuidado com os cabamentos, uso de materiais que suportem o ambiente criogênico, análise de efeitos da temperatura extremamente

baixa (dilatação térmica, temperatura de estado vítreo) e cuidados de segurança. O N2L é o fluido criogênico mais estudado e utilizado para aplicações de supercondutividade em sistemas elétricos devido ao emprego de materiais supercondutores técnicos e do tipo HTS que operam na sua faixa de temperatura.

Um ponto importante a destacar sobre o fluido criogênico com respeito ao teste de rigidez é que ele também faz parte do sistema de isolamento, ou seja, além de ser o meio criogênico que garante a baixa temperatura necessária para a manifestação do fenômeno da supercondutividade, ele também passa a compor o isolamento elétrico junto com material sólido empregado. A rigidez dielétrica do N2L é grandemente reduzida pela presença de bolhas, que surgem no líquido por algum ponto de aquecimento, e podem mover-se influenciadas tanto pela fluabilidade quanto pelo campo elétrico presente durante a operação do dispositivo. Em sistemas pressurizados, isso pode ser minimizado, pois a formação de bolhas diminui em pressões mais altas, mas em sistemas de banho de N2L abertos (pressão atmosférica) não é possível esse controle. Em todos os casos é importante garantir também a boa fixação da amostra, com aplicação de determinado valor de pressão sobre esta, de modo a evitar que após a contração térmica haja espaços entre os eletrodos e o material, que podem ser preenchidos por N2L e irão influenciar os resultados do teste.

2.4 – Materiais dielétricos para cabos supercondutores

Os CSEs estão gradualmente encontrando um caminho rumo a um nível de maturidade tecnológica, viabilidade econômica e futura comercialização. Isso é devido avanços em pesquisa e um interesse por sua inerente alta capacidade de transferir energia elétrica com perdas muito baixas. Há diferentes aspectos nesta tecnologia, desde o próprio material supercondutor até os sistemas de refrigeração, passando inevitavelmente pelo sistema de isolamento elétrico criogênico. Como se trata de tecnologia emergente e com muitos detalhes construtivos, os estudos sobre testes iniciais têm revelado alguns problemas operacionais, de reparo, manutenção e custos de investimento de capital em projetos [82]–[86], o que é importante para a experiência e aperfeiçoamentos rumo a um estágio de domínio tecnológico.

No caso específico do isolamento elétrico é preciso lembrar que diferentes materiais dielétricos têm sido utilizados em experimentos de laboratório e em projetos de protótipos de CSEs ao longo da trajetória de pesquisas nesta área. Conforme [28], o *Polypropylene Laminated Paper* (PPLP) é o mais utilizado no desenvolvimento deste tipo de cabo. Ele consiste basicamente em um filme de polipropileno imprensado entre duas camadas de papel kraft, é fruto de uma busca para substituição do chamado EPR (*Ethylene Propylene Rubber*), um polímero a base de etileno e propileno. Além disso, possui grande vida útil, verificada em ensaio de longa duração [87].

Na esteira de busca de soluções para avanços da HTSTec, dentro e fora do setor elétrico, os projetos e testes envolvendo dielétricos criogênicos vêm recebendo a atenção de pesquisadores a algum tempo [88], uma vez que os projetos de CSEs são predominantemente do tipo dielétrico frio, havendo poucas exceções com dielétrico quente [89], [90]. Além disso, as aplicações em supercondutividade são as maiores demandantes de dielétricos em situação criogênica. Os testes de laboratório incluíram principalmente rigidez dielétrica, perdas dielétricas, descargas parciais e mais recentemente análise sobre envelhecimento.

O isolamento com dielétrico frio de um CSE é normalmente de dois tipos, ou seja, isolamento composto e sólido. O isolamento composto consiste em lâminas de material dielétrico imersas em N₂L, em situação análoga aos cabos de alta tensão convencionais com isolante impregnado com óleo. Por outro lado, os casos com isolamento sólido se assemelham a cabos XLPE de alta tensão. O isolamento composto absorve a contração devido ao resfriamento, já que o isolamento é enrolado em torno do supercondutor [91]. Materiais de isolamento sólido são normalmente extrudados no elemento condutor do cabo em um processo que pode atingir temperaturas superiores a 300 °C [92]. A maioria das fitas supercondutoras não tolera a extrusão em alta temperatura, por causa de risco de delaminação. Além disso, o contato direto entre o condutor e o isolante implica em outra dificuldade técnica, pois criam tensão mecânica excessiva em função da diferença no coeficiente de expansão térmica entre os materiais, levando também a delaminação da fita ou a fissura da camada de isolamento [93].

O arranjo típico de um CSE com dielétrico frio consiste em isolamento cercado por um arranjo de resfriamento (criostato e fluido criogênico). Diferentes materiais como papel kraft, PPLP, polietileno de baixa densidade (LDPE – *Low Density Polyethylene*), polietileno de alta densidade (HDPE – *High Density Polyethylene*), XLPE, poliamida e

borracha de etileno propileno (EPR), Poliéster (PES), Politetrafluoroetileno (PTFE, Teflon®), Kapton®, Nomex® e Tyvek® , estes últimos marcas da DuPont, têm sido testados e relatados na literatura como possíveis opções de isolantes no desenvolvimento de CSEs, e demonstraram ser compatíveis com temperaturas criogênicas [28], [93].

No caso particular do EPR, sigla que diz respeito a um termo genérico para uma ampla gama de polímeros baseados em etileno e propileno, ele foi inicialmente considerado um candidato promissor para o isolamento de CSEs devido às suas excelentes propriedades elétricas, térmicas e mecânicas em temperatura ambiente. Em temperatura criogênica, a vulnerabilidade do XLPE e LDPE quanto a formação de fissuras superficiais e fragilidade demonstrou que estes materiais eram inferiores ao EPR nestas questões. De um modo geral, materiais à base de polietileno (PE), como LDPE, HDPE e XLPE, foram considerados inadequados como dielétricos criogênicos para CSEs. Mas apesar da aparente tolerância ao ambiente criogênico, o desempenho elétrico do EPR nestas condições foi considerado inferior ao do XLPE em temperatura ambiente no que diz respeito à rigidez dielétrica e perdas dielétricas [94].

Também foi observada a formação arborescência no EPR devido à ocorrência de DPs em temperaturas criogênicas, e de forma comparável ao LDPE [95]. Tentativas de melhorias foram feitas com proposição de aditivos com vistas a melhora de seu desempenho como isolante elétrico, mas, ainda assim, a versão de EPR aditivado foi considerada mais adequada para aplicações de mais baixa tensão e média distância, devido ao custo e baixa resistência a tração mecânica [96]. Neste contexto, houve naturalmente um esforço de pesquisa para explorar novos materiais com potencial de isolamento elétrico criogênico para CSEs, culminando na opção pelo PPLP [28].

Verificou-se que o PPLP apresenta maior rigidez e menor perda dielétrica entre os materiais pesquisados na época dos primeiros projetos e citados anteriormente, sendo composto por um filme de polipropileno prensado entre duas camadas de papel kraft. [97]. Em ambiente de N2L o PPLP tem baixas perdas, não apresenta arborescência e tem sua rigidez dielétrica incrementada com a redução da temperatura [98],[99]. Por estes motivos tal material tem sido utilizado na ampla maioria dos projetos de CSEs, demonstrando bom isolamento, desde que não haja formação de bolhas no N2L, onde pode ver diminuída sua rigidez [100], muito em função da fragilidade do nitrogênio gasoso em relação ao nitrogênio líquido. Importante destacar que o PPLP tem um custo

relativamente alto, embora tenha um bom apelo de possuir perdas dielétricas menores ($< 10^{-5}$) [101].

Mais recentemente, o Kapton®, uma políimida da DuPont, que possui alta rigidez dielétrica e comportamento estável em baixas e altas temperaturas, tem emergido como candidato potencial para o isolamento de futuros CSEs [102],[103]. Está sendo inclusive apontado como uma aposta no projeto SUPERCABO, que considerou sua utilização sob a forma de laminado resultante da combinação deste filme com duas camadas de Nomex®, uma poliamida também da DuPont. Tal laminado é denominado NKN e seu detalhamento será dado em seção posterior. Esta proposta é única em projetos de CSEs ao redor do mundo. No entanto, deve-se observar que a adoção de Kapton® ou materiais deriváveis dele como materiais de isolamento dos CSEs poderá ocorrer, uma vez que já é utilizado para isolamento individual de fitas supercondutoras em projetos de transformadores e limitadores [93]. Em função do seu alto custo, e a depender do seu desempenho nos testes e aplicações em projetos de cabos, comparativamente ao PPLP e mesmo a novos materiais em pesquisa, pode ser que se estabeleça como mais uma opção viável

A aposta do Kapton® com Nomex®, um derivado de uma poliamida, no projeto SUPERCABO foi considerada diante do desempenho deste último como isolante em temperatura ambiente e como forma de proteção do filme de Kapton®. Ele também foi relatado como candidato potencial para isolamento de fitas supercondutoras no setor elétrico, com análise de seu desempenho em N2L com e sem presença de bolhas [104]. No entanto, relatos de tais materiais aplicados em protótipos de dispositivos supercondutores são ainda limitados, sobretudo em CSEs, e a questão de a produção estar de certa forma centralizada afeta muito o custo. Desta forma temos um importante nicho de pesquisas para qual este trabalho contribui, ou seja, permitir o teste para caracterização do próprio laminado NKN, seus componentes e viabilização de estudos futuros com o isolamento montado em mini-modelos de CSE, bem como testes de outros materiais.

2.5 – Dielétricos em condições criogênicas

Para o desenvolvimento de um dispositivo HTS para aplicação em SEPs, como um CSE com dielétrico frio, é necessário, assim como no caso do projeto de um cabo elétrico

convencional, o estudo dos materiais isolantes a serem empregados na separação elétrica entre os condutores. A diferença é que neste caso específico os isolantes estarão operando em ambiente criogênico, que para os supercondutores de alta temperatura crítica corresponde a um banho térmico de N₂L, que poderá ser pressurizado ou não (65 a 77 K). Em um CSE do tipo dielétrico frio, a camada de isolamento elétrico permanece dentro do criostato, envolvendo o núcleo do cabo e imersa no fluido criogênico.

Conhecer o grau de isolamento oferecido pelos materiais isolantes, suas perdas dielétricas, ocorrência de descargas parciais e mesmo seu comportamento mecânico em banho criogênico é fundamental para garantir o correto funcionamento de um protótipo CSE ou outro dispositivo HTS. Além disso, algumas aplicações, como o transformador supercondutor, têm no seu isolamento elétrico criogênico um dos pontos mais sensíveis em seu projeto, como abordado na seção 2.1.4.3.

Já nas décadas de 1960 e 1970, muitas pesquisas sobre as características e comportamento de materiais isolantes elétricos em condição criogênica já haviam sido feitas. Diminuindo logo em seguida, por questões econômicas, e sendo novamente potencializadas com a descoberta dos materiais HTS na década de 1980 [105]. O isolamento elétrico em temperatura criogênica está sujeito às restrições típicas dos isolamentos em temperaturas de operação convencionais, acrescidas das que provêm da imersão em ambiente criogênico, principalmente devido às tensões mecânicas adicionais e mudanças microestruturais. Entre as principais questões a serem consideradas no isolamento neste tipo de ambiente, estão:

- O projeto dos componentes deve ser tal que preveja efeitos de contração térmica, que não é idêntica para todos os componentes, pois dependem de seus coeficientes de dilatação;
- O estresse térmico dos ciclos de resfriamento/aquecimento não deve alterar a qualidade do isolamento, nem causar sua deterioração;
- O isolamento deve ser previsto para a chamada condição de *quenching*, que é um caso extremo e gera considerável quantidade de calor;
- Perdas, de qualquer natureza, incluindo as do próprio dielétrico, devem ser eliminadas pelo sistema de resfriamento, ou seja, o sistema de resfriamento também faz parte do sistema de isolamento;

- Como no caso de sistemas convencionais, é preciso analisar a formação de descargas parciais (DP).

É importante notar que o dimensionamento do isolamento para um CSE deve levar em consideração um compromisso entre desempenho dielétrico e termomecânico do material no ambiente criogênico. Aspectos como condutividade térmica, expansão térmica, resistência mecânica e fadiga também influenciam na questão da estabilidade do cabo, ou seja, o comportamento integral do material dielétrico deve ser levado em consideração. Segundo o CIGRE (*International Council on Large Electric Systems*) [93] os sistemas de isolamento elétrico em temperaturas criogênicas foram reconhecidos como uma das tecnologias-chave para o desenvolvimento eficiente, confiável e prático de CSEs e de toda HTSTec. Além das aplicações voltadas para o emprego da supercondutividade em SEPs, o isolamento criogênico também é importante para importantes projetos como reatores de fusão nuclear, aceleradores de partículas e aplicações industriais.

No caso dos fluidos criogênicos, que compõem o isolamento junto com os dielétricos sólidos ou laminados, estudos de rigidez também precisam ser feitos, sobretudo em razão da possível formação de bolhas. O comportamento dielétrico do fluido criogênico sobre a presença de bolhas influi no desempenho do material dielétrico utilizado como isolante, e tem especial importância após um eventual *quenching* de um supercondutor, situação limite em que o fluido pode vaporizar com o aumento abrupto da temperatura. Desse modo, a dependência da tensão de ruptura do gás presente nas bolhas em relação à temperatura é importante no projeto [106]. Em SFCLs do tipo resistivo, por exemplo, há uma grande exigência do isolamento criogênico, pois quando uma corrente de falta flui pelo dispositivo o aquecimento do material HTS gera bolhas no N₂L, fragilizando a rigidez e possibilitando uma ruptura nesse transitório, que também faz surgir elevada tensão sobre o dispositivo durante a falta.

Não há ainda materiais especiais de isolamento criogênico voltado para dispositivos supercondutores, eles são basicamente escolhidos a partir de isolantes convencionais disponíveis comercialmente para aplicações em temperatura ambiente, que são testados em situações criogênicas [7]. O PPLP, originalmente desenvolvido para cabos isolados com óleo no Japão, é de longe o material mais utilizado nos projetos de CSEs do tipo dielétrico frio ao redor do mundo [93]. Contudo, existe uma gama de outros materiais que foram testados e tem tolerância ao ambiente criogênico, podendo ser utilizados em

projetos HTSTec, tanto como isolamento ou suporte estrutural. E novas pesquisas envolvendo testes e aperfeiçoamento de materiais continuam, e podem dar lugar a novos candidatos para esse tipo de aplicação.

Para estudo destes materiais, as medições das propriedades dielétricas dos materiais em situação criogênica parte do grande *know how* que existe na medição com dielétricos convencionais, ou seja, aqueles que já são largamente utilizados nos projetos de cabos de energia convencionais, com algumas alterações decorrentes principalmente do uso de ambiente criogênico. A mais fundamental delas diz respeito ao uso de câmara (criostato) e fluido criogênicos, necessários para criar o ambiente de teste do isolamento, e um porta-amostras que deve acondicionar eletrodos e amostra de dielétrico. A rigor, no processo de caracterização, estudo e seleção de um novo material de isolamento sólido para um dispositivo supercondutor operando em temperaturas criogênicas, é importante conhecer as condições operacionais nas quais o material de isolamento irá operar, ou seja, o valor de tensão operacional, o tipo de fluido criogênico a ser utilizado, se há ou não pressurização da câmara, aplicação de pressão sobre a amostra, a forma de onda da tensão e a uniformidade do campo elétrico.

Dessa forma, as técnicas de medição elétricas e equipamentos, seja em baixa ou em alta tensão, continuam as mesmas. Entre os cuidados comuns a serem tomados, devem estar a escolha do eletrodo conforme a norma vigente, preparação dos eletrodos com limpeza da superfície, seleção dos equipamentos de medição conforme o faixa de tensão das medidas a serem feitas, seguimento das normas de segurança pertinentes (especialmente nas medições em alta tensão) e preparação das amostras (corte, secagem, separação). Em função do processo criogênico, surgem também alguns detalhes como aplicação de pressão padrão sobre as amostras, definição de um tempo mínimo para equilíbrio térmico dos eletrodos e das amostras com o fluido criogênico, alinhamento dos eletrodos e vedação parcial da câmara criogênica para reduzir a perda do fluido criogênico. E, por fim, questões de segurança relativas à manipulação com o fluido criogênico: uso de óculos de proteção, não operação em ambiente sem circulação de ar, cuidados com o despejo do fluido (ao atingir a pele pode provocar queimaduras) e não permitir a pressurização da câmara (ao menos que seja projetada para essa finalidade).

A título de exemplo, a Seong *et al* [107] traz um estudo experimental sobre as características de rigidez dielétrica em CC e CA de três diferentes materiais isolantes dielétricos comerciais em N₂L sobre pressão ambiente. Os materiais analisados no estudo

são o Kapton®, Kraft e Nomex®. No referido estudo, os três tipos de materiais dielétricos foram imersos em banho de N2L e testados sob campo elétrico uniforme e não uniforme. Foram realizados dois tipos de testes: O primeiro denominado *Dielectric Sheets Breakdown Test*, que determina a rigidez dielétrica de folhas do material isolante (Figura 11), e o segundo, *Turn-to-Turn Electrode Breakdown Test*, que consiste em medir a tensão de ruptura do isolamento (*Breakdown Voltage*), neste caso corresponde a um esquema onde as folhas do material sob teste foram enroladas em dois condutores de cobre conectados em forma de arco aos eletrodos com 50 mm de diâmetro (Figura 12). Os resultados foram analisados utilizando a distribuição Weibull.



Figura 11 - Configuração de eletrodos para o Dielectric Sheets Breakdown Test (a) campo uniforme (b) campo não uniforme [107].

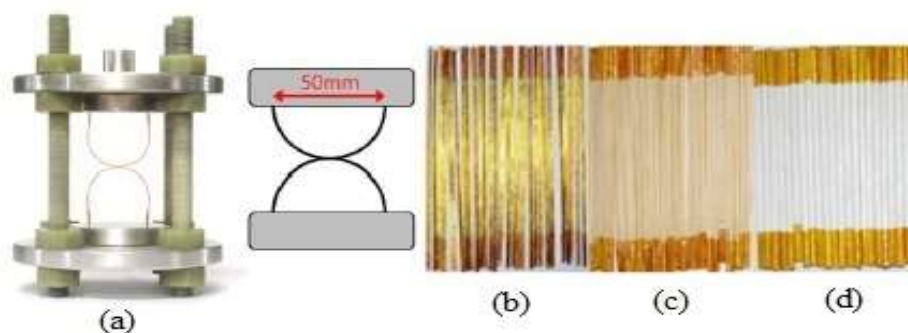


Figura 12 - (a) Configuração de eletrodos para o Turn-to-Turn Electrode Breakdown Test (b) Kapton® (c) Kraft (d) Nomex® [107].

No que diz respeito aos circuitos para aplicação de tensão, tanto CA quanto CC, não há modificação a ser feita com relação aos circuitos utilizados e já consagrados em ensaios com materiais dielétricos em temperatura ambiente. No caso citado, foi utilizada como fonte de tensão um transformador 10 kVA - 60 Hz para aplicação de tensão CA em rampa, e para obtenção da tensão CC foi utilizado um clássico retificador *Cockcroft-Walton* com *ripple* de 3%. A taxa de aumento contínuo da rampa de tensão (até a ruptura) foi a mesma para os ensaios em CA e CC, 1 kV/s. Os cabos que ligam os eletrodos foram

puxados da câmara criogênica construída, feita em forma cilíndrica com 600 mm de diâmetro e 800 mm de altura, tendo sido utilizado neste caso o TVE G10. Um circuito de medição com pontas de provas de alta tensão e osciloscópio fez o registro da tensão disruptiva para obtenção da rigidez.

De um modo geral, a rigidez intrínseca do dielétrico sólido é maior na temperatura criogênica em comparação com rigidez na temperatura ambiente considerando uma determinada espessura de material [108]. Se o material em questão tiver porosidade, a medida que as camadas de isolante vão sendo preenchidas pelo fluido criogênico a rigidez é afetada, de modo semelhante ao caso de papéis isolantes normalmente utilizados em equipamentos isolados a óleo [109]. Outras referências com testes de materiais dielétricos em ambiente criogênico podem ser verificadas na literatura [98,99,104,110], onde se nota adoção de eletrodos comuns aos ensaios convencionais, colocados em criostato que permite o banho no fluido criogênico, podendo este estar ou não pressurizado. Alguns materiais de uso comum em aplicações criogênicas (TVE G10, PTFE, resina epóxi) são geralmente utilizados para confecção de estruturas para acondicionamento das amostras juntamente com os eletrodos.

Ainda considerando a diversidade de trabalhos no campo de estudo de materiais dielétricos para HTSTec, verifica-se que embora sejam seguidas as diretrizes das normas para ensaios com materiais convencionais (tipo de tensão, preparo das amostras, eletrodos, uniformidade do campo, cálculo dos valores, etc.), as peculiaridades do emprego em sistemas supercondutores, em especial de CSE, tem levado a estudos que considerem o desempenho do isolante em condições mais próximas do uso, dando origem a estratégias diferentes: construção de mini-modelos de cabo, testes utilizando as fitas supercondutoras como eletrodos, testes em N₂L com indução de bolhas, etc. Essa diversidade e ausência de normas específicas para esse campo deu origem a grupos de trabalho e documentos com intenção de aglutinar os resultados e padronizar os testes [28, 93]. Isso foi fundamental para as pesquisas, principalmente por permitir grau de comparação, e também para a futura comercialização dos dispositivos, através de testes normativos ou padronizados e contribuições para produção em larga escala.

Importante lembrar que, como nos estudos com dielétricos convencionais, continua valendo o fato de que a tensão de ruptura do dielétrico criogênico é uma função do campo elétrico aplicado ao material e a maior tensão de ruptura é obtida quando o campo elétrico é uniforme. Mesmo assumindo a premissa de que o um material sólido é puro e não um

composto de materiais com diferentes valores de rigidez dielétrica, a tensão disruptiva do material também não é função direta e linear de sua espessura, sendo comum ver variação em função do número de camadas. Então, a rigidez em kV/mm deve indicar sob qual espessura o material foi ensaiado. Por isso, o valor expresso na maioria dos trabalhos publicados e em *data-sheets* não pode ser simplesmente expandida de forma linear para espessuras maiores afim de comparações com alguma medida. No caso de dimensionamento de um isolamento, pode se trabalhar com um fator de segurança maior, em uma primeira aproximação, mas é essencial a realização de testes.

No processo de obtenção da rigidez de materiais dielétricos em temperatura criogênica, pode haver a possibilidade de uma formação de vazio entre o condutor (eletrodo) e a amostra de dielétrico. Isso pode ser verificado com certo grau de controle medindo a capacitância antes da colocação do fluido criogênico, mas devido à contração térmica desigual entre os materiais, isso pode ocorrer. Também contribui para evitar essa situação, o peso do eletrodo superior. Embora o fluido criogênico tenha como papel principal o resfriamento, suas propriedades elétricas variam com relação ao dielétrico sólido e pode levar ao aumento do campo elétrico nas interfaces, o que pode aumentar a possibilidade de descarga através do fluido. A descarga superficial depende do campo elétrico na junção tripla: condutor, fluido criogênico e amostra de dielétrico [111]. Se a montagem não for apropriada, a descarga pode ocorrer em tensões significativamente inferiores, falseando a medida relativa ao dielétrico criogênico em estudo. Ocorrência ou não de efeito corona também deve ser observada durante as medições.

Cabe ressaltar que, em função das baixas temperaturas, podem existir possíveis trincas nos materiais poliméricos, pois eles se contraem e podem ficar quebradiços nestas temperaturas, de modo que problemas de envelhecimento do isolamento criogênico causados por descargas parciais (DP), arborescência e rachaduras, devem ser considerados. A pesquisa de DP em temperatura ambiente é comparativamente madura, mas não é o caso em baixas temperaturas [98]. No caso de medidas de constante dielétrica e tangente de perdas em baixa tensão, elas são obtidas utilizando-se analisador de impedância ou medidor LCR, sem alterações significativas ao caso em temperatura ambiente. Mas é também necessário um porta amostras adequado para o ambiente criogênico, que essencialmente é um capacitor de placas planas e paralelas, cujo dielétrico é o material em teste, montado sobre uma estrutura de material isolante e com

suportabilidade ao ambiente criogênico como o PTFE. Também é preciso aplicar certa pressão na amostra de modo a garantir que não haja espaços entre ela e os eletrodos.

As perdas dielétricas do isolamento criogênico de um CSE também precisam ser medidas em alta tensão, considerando o nível de operação do cabo, e porque, assim como as perdas AC, elas irão recair sobre o sistema de refrigeração, afetando o desempenho do CSE. Lembrando que as perdas dielétricas podem variar com o nível de tensão, então para cabos de alta tensão, elas são importantes de serem obtidas. Em alguns casos, como no uso do PPLP, elas podem superar o valor das perdas AC nas fitas [112]. Nesse sentido, tem sido feito um esforço de busca por isolantes com baixas perdas [113]. Entre os objetivos desta tese, está o de colaborar para este tipo de medida, bem como das demais citadas, com exceção da DP, tendo como diferencial a utilização de um mesmo conjunto de eletrodos e a substituição apenas do circuito externo para cada caso.

2.6 – O projeto estratégico nacional da ANEEL em HTSTec

Enquadrado dentro da temática de planejamento de sistemas de energia, conforme a ANEEL, o projeto SUPERCABO foi uma iniciativa da academia juntamente com parceiros do setor elétrico em desenvolver projeto inserido no tema "Aplicações de Novas Tecnologias em Sistemas de Transmissão", e de modo mais específico, com o uso de materiais supercondutores em sistemas de energia elétrica. Sendo fomentada pela própria ANEEL, através do edital 006/2008 (republicação 2010), a iniciativa do LMDS-UFRRJ foi pioneira no Brasil, sendo o primeiro projeto de P&D brasileiro envolvendo dimensionamento, criação de infraestrutura de testes e projeto de construção de CSE trifásico com material HTS (YBCO) e dielétrico frio. Como motivação estava a expectativa de execução de um projeto que permitisse ao país ter ações de desenvolvimento de tecnologia nacional na área de HTSTec, uma área de inerente inovação quanto tratamento futuro do problema de fluxo de altas potências e altas ampacidades, viável através dos CSEs, e importante para o setor elétrico [19, 114, 115].

O interesse em estudos e projetos de cabos de energia utilizando materiais supercondutores advém diretamente do fato deste tipo de material elétrico poder fornecer um desempenho inigualável nos quesitos de transporte de corrente (ampacidade) e perdas ôhmicas, conforme descrito na seção 2.1.4.1, o que é interessante para a questão do

transporte de altos fluxos de potência, onde a tecnologia convencional apresenta dificuldades como altas perdas e limites de carregamento dos cabos. Isso se deve a resistência elétrica extremamente baixa do supercondutor abaixo de seus parâmetros críticos (T_c , I_c , H_c), tecnicamente nula em CC e com uma inerente perda AC, que pode ser controlada a valores tecnicamente toleráveis.

Desta forma, a redução em perdas representa aumento na energia entregue, ou seja, aumento de eficiência, o que beneficia os consumidores finais e as concessionárias, mas que precisa ser competitiva diante de questões como gasto energético com a refrigeração, complexidade e custo de implantação, custo de manutenção e a confiabilidade. Visto que em um projeto de CSE o valor máximo de corrente (carregamento) é definido essencialmente pelo material supercondutor empregado para condução, através da densidade de corrente crítica, e a tensão elétrica de operação é definida pela espessura e tipo do dielétrico adotado. Sendo assim, os procedimentos de dimensionamento destes limites em projeto também precisam ser conhecidos pelo setor elétrico nacional, e demandam pesquisa em diferentes aspectos de engenharia, como é o caso dos dielétricos criogênicos abordados neste trabalho.

A aplicabilidade da tecnologia de CSE para as empresas de energia elétrica pode se dar em diferentes nichos: (i) em nível de gestão e projeto, dado o *know-how* adquirido sobre parâmetros característicos de um CSE, permitindo avaliação deste frente a demanda da concessionária; (ii) na redução do adensamento de linhas de distribuição, em virtude de transporte de maior potência frente a um cabo convencional em mesmo nível de tensão, com baixíssimas perdas e menor ocupação de área; (iii) aprimoramento do uso de transmissão de energia em CC, levando em consideração o incremento do emprego da tecnologia de geração fotovoltaica e eólica no contexto de descarbonização das redes; (iv) em nível de geração, na ligação do gerador ao transformador elevador, onde as tensões são da ordem de dezenas de kV e as correntes são da ordem de dezenas de kA.

Para além da aplicabilidade, projetos deste tipo encontram bastante relevância, uma vez que podem ajudar a reduzir o distanciamento tecnológico entre o setor elétrico nacional e os de economias de vanguarda, onde esforços conjuntos entre órgãos governamentais e empresas do setor elétrico desenvolveram projetos e já utilizam a tecnologia com CSE ao menos em projetos piloto de testes em rede [116, 117, 118], trabalhando mais recentemente na frente de disponibilidade comercial desta e de outras

tecnologias HTSTec que já caminham próximas de TRL-9. Disponibilizar ao setor elétrico nacional, ainda que em nível mais básico, estudos com CSEs e suas tecnologias ancilares, é importante para o país, inclusive para um preparo da tropicalização desta tecnologia, ou seja, compra no mercado externo, conforme alertado por [18].

O projeto SUPERCABO não culminou, embora estivesse previsto, na efetiva construção de um protótipo para teste em rede, mas foi um importante ponto de partida que, entre outras contribuições, garantiu certo grau de domínio no dimensionamento de um CSE trifásico (69 kV/300A), importantes estudos de simulação, obtenção de parte significativa da infraestrutura para testes, proposição de um dielétrico frio original e projetos originais de terminações para conectar cabos supercondutores em sistemas de potência convencionais, o que culminou inclusive em pedido de patente. Além disso, o contato com as concessionárias, o aprendizado com as dificuldades encontradas e a formação de recursos humanos são outros pontos importantes.

Desde a execução do projeto, houve um progresso em direção à comercialização de CSEs no mundo, acúmulo de experiência com um número cada vez maior de protótipos em rede, bem como criação de grupos de trabalho que culminaram em normativas para testes e esforço de comercialização [119, 120, 121]. Como se trata de uma tecnologia inerentemente cara, por estar na fronteira de diversos conhecimentos envolvidos no projeto, da fita supercondutora ao sistema criogênico, passando pelo dielétrico, nos EUA, Alemanha, Coreia do Sul, Japão e China projetos com teste em rede estão sendo patrocinados por empresas em parceria com o setor público. A tecnologia de CSEs e limitadores de corrente supercondutores encontra-se agora já em fase pré-comercial, conforme identificado pelo EPRI (Electric Power Research Institute), e em estudos do DOE (Department of Energy - EUA). Conforme [122] estas são tecnologias que já atingiram o TRL-8.

Trata-se de uma tecnologia inerentemente complexa e cara, envolvendo toda uma cadeia de conhecimentos que levam a custos que para os padrões brasileiros parecem fugir do horizonte da pesquisa. No caso do projeto SUPERCABO, restou demonstrado que isso advém primeiro do fato de inexistir no Brasil um laboratório com toda a infraestrutura integrada e dedicada a prospecção e aplicação de materiais supercondutores em sistemas elétricos. Nem mesmo o CEPEL (Centro de Pesquisas da Eletrobrás) possui um laboratório com essa finalidade na atualidade. Neste sentido o projeto demandou grande investimento nesta área: expansão do LMDS-UFRRJ, onde já existia infra-

estrutura básica. Foi necessário realizar investimento na obtenção de dados estruturais (nanoscópico e microscópico), eletromagnéticos (em baixa temperatura) e mecânicos dos supercondutores, de dielétricos previamente selecionados, simulação multifísica e aglutinação de estrutura humana. A razoabilidade de custos neste tipo de empreitada envolve várias considerações, não claramente modeladas economicamente, dadas as incertezas sobre a razão entre o valor empregado, o *know-how* desenvolvido e os possíveis ganhos com domínio tecnológico.

Ainda que, em contexto complexo, o setor elétrico nacional dispõe agora de infraestrutura integrada de caracterização de materiais constitutivos de cabos elétricos (supercondutores ou não), sistemas de medidas específicos não-comerciais desenvolvidos nacionalmente, sistemas de criogenia específica para aplicações em sistemas elétricos, utilizando N₂L como refrigerante, e estudos desenvolvidos sobre a aplicação de CSEs. Com o fim do projeto SUPERCABO o LMDS-UFRRJ buscou parcerias juntamente com outros laboratórios, como o LEAT-UFMG, de modo a continuar estudos correlatos a tecnologia HTSTec, como é o caso, por exemplo, deste trabalho de tese, voltado ao desenvolvimento de aparato para caracterização de materiais dielétricos criogênicos.

Espera-se que no futuro o setor elétrico brasileiro disponha cada vez mais de informações completas pertinentes aos CSEs e toda HTSTec, promovendo a nacionalização futura destas tecnologias mediante estabelecimento de estrutura laboratorial competitiva, novas chamadas e projetos, a tempo de garantir formação de recursos humanos e não só a tropicalização como citado em [19]. Como motivações adicionais tem-se: a penetração da tecnologia, seu impacto positivo nas redes elétricas, obtenção de estudos de viabilidade de uso em diferentes nichos, fundamental para a gestão e o planejamento estratégico das concessionárias, a necessidade de garantir competitividade através da formação de equipes especializadas, e oportunidades de P&D que podem resultar em tecnologia nacional e produtos no mercado de energia.

2.7 – Uma proposta de dielétrico a ser estudado para HTSTec: NKN

Dentro do projeto SUPERCABO foi feita a proposta de aplicação de um material dielétrico laminado denominado NKN (Nomex®/Kapton®/Nomex®). A proposta se baseou em explorar conjuntamente as propriedades do Nomex 410 e Kapton HN, já

largamente empregados em aplicações de isolamento elétrico em temperatura ambiente. Inicialmente, se esperava utilizar o PPLP como dielétrico no projeto, tal qual a ampla maioria de projetos de CSEs com dielétrico frio, contudo, apesar dos esforços, não foi encontrado fornecedor, o que inviabilizou aquisição para uso no referido projeto e consequentemente o estudo de opções alternativas. Tendo em mãos alguns dados obtidos para uma lista de dielétricos, candidatos iniciais a material de isolamento previamente selecionados no âmbito do desenvolvimento inicial do projeto, e verificada a disponibilidade de fornecedor nacional, optou-se por esta proposta de dielétrico.

O Nomex 410 é um polímero sintético de poliamida aromática que proporciona elevados níveis de integridade elétrica, química e mecânica [123]. Tem excepcional resistência mecânica, ruptura e à abrasão, e em baixas espessuras se mostra flexível, o que é importante para o enrolamento do isolante em um CSE. Possui estabilidade térmica, devido à sua estrutura polimérica única, e é utilizável em aplicações criogênicas com N2L. Dependendo do formato, alta e média densidade, pode apresentar cargas de ruptura mecânica superiores às observáveis à temperatura ambiente. Com respeito ao nível de isolamento elétrico, em temperatura ambiente apresenta rigidez dielétrica entre 18 e 34 kV/mm (ASTM D149), sem necessidade de tratamentos à base de verniz ou de resinas, apresentando perdas dielétricas da ordem de 10^{-3} para 60 Hz (ASTM D150). Possui resistência a chamas e não toxicidade. Apresenta resistência à radiação ionizante, mantendo propriedades mecânicas e elétricas a níveis utilizáveis após ser irradiado, o que é importante para aplicações como a fusão nuclear [124]. Por fim, possui também ampla compatibilidade química, não sendo afetado pela maioria dos solventes e revela uma resistência aos agentes ácidos e alcalinos. A figura 13 ilustra uma amostra de Nomex 410.



Figura 13 – Amostra de Nomex 410.

O Kapton HN por sua vez é uma poliimida, adequada para uso em ampla faixa de temperaturas, de -269 °C a 400 °C, alta rigidez dielétrica, sendo de 291 kV/mm (ASTM D149) em temperatura ambiente, e perdas dielétricas da ordem de 10^{-3} (ASTM D150 – 1 KHz). Tem possibilidade de ser laminado, puncionado, conformado ou revestido com adesivo [125]. Também possui excelente resistência química, não sendo afetado por solventes orgânicos conhecidos. É material também resistente a chamas, sendo autoextinguível, pois possui boa classificação de inflamabilidade. Adesivos estão disponíveis para colar o Kapton® a si mesmo, a metais, e a vários tipos de papel, o que inclusive permite a composição de laminado com outros materiais, bem como sua fixação como isolamento de condutores. A poliimida sozinha já é utilizada em uma ampla variedade de aplicações criogênicas e, em particular, para isolar fios HTS e fitas. A poliimida pode oferecer desempenho elétrico e mecânico superior em uma ampla faixa de temperaturas, com fácil aplicação e flexibilidade para diferentes necessidades de suportabilidade a tensão. Esta combinação de propriedades úteis em tal faixa tornam o Kapton um material único para diversas aplicações industriais. A figura 14 ilustra uma amostra de Kapton HN.



Figura 14 – Amostra de Kapton HN.

O NKN não foi proposto como um material novo, mas sim como uma nova aposta de dielétrico criogênico no que diz respeito ao uso em projetos de CSEs. O NKN considerado no projeto SUPERCABO foi com o nome comercial de Thernomid 2005 NKN/80, laminado e fornecido pela empresa RVD Materiais Dielétricos Ltda. Ele é constituído basicamente de uma lâmina de Kapton®, com cerca de 0,05 mm de espessura, entre duas lâminas de Nomex 410, com espessura de cerca de 0,08 mm, totalizando uma espessura aproximada de 0,21 mm e gramatura de 220 g/m². Mas existem outras combinações de

Kapton® e Nomex® com outras dimensões. Para esse laminado NKN (232) em temperatura ambiente o valor nominal da rigidez dielétrica é 42,8 kV/mm, sendo esperado um valor maior em baixas temperaturas. A figura 15 mostra uma amostra de NKN já cortada na dimensão de 20 mm para uso no protótipo de CSE do projeto SUPERCABO, contudo em função do tamanho das amostras não foi possível utilizar o NKN 232 no presente estudo, uma vez que tentou sua compra em folhas maiores e só estava disponível o NKN 323.



Figura 15 – Amostra de NKN já preparada para enrolamento.

O protótipo de CSE brasileiro com dielétrico frio previsto no projeto SUPERCABO foi inicialmente o de um cabo trifásico CA de 10 m de comprimento 69 kV/300 A, sendo um design com as três fases concêntricas, feitas com fitas 2G HTS, dentro de um criostato único. Entretanto, por opção das concessionárias envolvidas no projeto houve uma mudança de design, colocando cada fase em seu próprio criostato. Desta forma, e diante de incertezas com respeito ao comportamento do dielétrico em condições criogênicas, em um primeiro momento utilizou-se no projeto um cálculo conservativo da espessura do dielétrico, considerando a variação da rigidez com aumento das camadas e a situação de aquecimento do CSE em eventual falha ou por transição do material supercondutor, e a ausência de estudos (medições) mais aprofundadas com o isolante.

Para determinação da espessura do dielétrico em um CSE o cálculo pode levar em consideração três tensões, uma associada a rigidez dielétrica do material sob tensão CA, outra associada a rigidez diante de ensaio de tensão impulsiva e por fim uma relativa a descargas parciais [126, 127]. Com as três espessuras de isolamento calculadas, é razoável e conservador escolher como espessura final, a máxima entre as três. Maiores detalhes

sobre esse cálculo podem ser obtidos em [93]. Para o projeto SUPERCABO adotou-se o cálculo de espessura de isolamento utilizando somente o critério da rigidez dielétrica sob tensão CA através da equação 2.6 [115], considerando ainda os demais parâmetros: r_0 é o raio da camada sobre a qual ele repousa (raio externo do condutor e raio interno do isolamento); V_{max} é o maior valor de tensão elétrica suportável prevista, E_{RD} é o valor da rigidez dielétrica do material dielétrico na temperatura de 77 K e d a espessura de isolamento necessária.

$$d=r_0 \left[\exp \left(\frac{V_{max}}{\sqrt{3}} \frac{1}{r_0 E_{RD}} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

Vale informar que na ocasião do projeto SUPERCABO, a equipe de pesquisa teve acesso inicialmente a amostras de Kapton® e Nomex® com área adequada para medidas iniciais do valor da rigidez dielétrica de cada, mas as amostras de NKN já estavam cortadas em fitas de 20 mm. De toda forma, a rigidez dielétrica em temperatura criogênica de 77 K (banho de N2L) para o Kapton® e Nomex® foram medidas, obtendo-se os valores de 303 kV/mm e 22 kV/mm, respectivamente. Uma tentativa utilizando eletrodos esféricos foi feita com as fitas de NKN, mas o que realmente ocorreu é que em certa tensão a descarga fluiu lateralmente pela amostra decapando o Nomex® do NKN (tanto pela parte superior quanto inferior da amostra de NKN), deixando exposto o Kapton® e não ocorrendo perfuração, ou seja, ocorrência de *flashover*. Posteriormente, foi utilizado um arranjo adaptado, com um eletrodo superior de 25 mm e uma cuba metálica como eletrodo de terra, onde o N2L foi colocado e uma folha de NKN obtida como amostra foi testada. Neste caso a cuba tinha dupla função, reservatório para o nitrogênio e eletrodo. Obtendo-se para esse arranjo, que foi o mesmo para as folhas de Nomex® e Kapton®, um valor de rigidez de 57 kV/mm para o NKN.

Esse fato, bem como a necessidade de estudar com mais cuidado a rigidez dielétrica, o comportamento das perdas dielétricas e a constante dielétrica deste material em alta tensão, assim como a necessidade de dispor de arranjo para medições envolvendo outros dielétricos criogênicos em geral, foram os pontos de partida para a discussão da proposta inicial de tese. Que considerou os dispostos na norma brasileira ABNT NBR 5405 [128], que versa sobre eletrodos para ensaios em filmes com espessura inferior a 3 mm, em combinação com as normas ASTM D149 e ASTM D150 [129,130].

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

3.1 - Características desejadas no equipamento

Para caracterizar, em ambiente criogênico, os materiais dielétricos já conhecidos pelo uso em sistemas convencionais, bem como aqueles a serem desenvolvidos no futuro, são necessários equipamentos de medição e técnicas apropriadas. Em linhas gerais, o que tem sido feito há décadas em projetos e centros de pesquisa no mundo é a adaptação da larga experiência com ensaios de dielétricos em condições de temperatura ambiente para o caso criogênico e considerações sobre os contornos de cada projeto de CSE ou dispositivo supercondutor em questão. Somente em tempos recentes, foi publicado um primeiro relatório técnico [93] que visa compilar trabalhos nesta área e as diferentes metodologias para a caracterização dos isolamentos elétricos em temperaturas criogênicas.

No âmbito do projeto de CSE brasileiro, um dos esforços de pesquisa foi levantar e caracterizar materiais dielétricos alternativos para a confecção do primeiro protótipo, o que foi feito na época considerando propriedades em condições convencionais, ou seja, fora do ambiente criogênico, e ensaios iniciais em condições adaptadas (seção 2.7). Parte desse esforço se deu pela dificuldade de acesso ao PPLP, parte pela parceria com uma empresa nacional (RVD Materiais Dielétricos), que apresentou amostras de uma combinação de materiais largamente empregados em isolamento elétrico convencional, o Nomex® e o Kapton®, aspectos mecânicos (enrolamento) e também pela oportunidade de busca de alternativa diferente ao paradigma do PPLP.

As medições que precisam ser feitas com os materiais dielétricos candidatos a material de isolamento em um projeto de CSE envolvem um ensaio não-destrutivo e outro destrutivo, no primeiro caso a permissividade elétrica juntamente com as perdas dielétricas são levantadas, e no segundo caso o nível de rigidez dielétrica através da tensão disruptiva em CA. Neste caso, é importante obter as medições do primeiro ensaio em alta tensão, já que a medição das grandezas envolvidas em baixa tensão são obtidas de maneira mais simples, uma vez que os equipamentos para medição de capacitância e tangente de perdas nesta condição são mais disponíveis, carecendo apenas de um porta-amostras adequado e uma câmara criogênica. Como resultado dessa demanda de medições para estudos com materiais dielétricos criogênicos, neste projeto foram pensadas as

características desejáveis em um protótipo para essa finalidade, ou seja, caracterização de materiais dielétricos em condições criogênicas e alta tensão:

- permitir a medição das três grandezas utilizando uma mesma câmara criogênica e um mesmo conjunto de eletrodos;
- permitir medidas em alta tensão e na frequência industrial (60 Hz);
- câmara criogênica adequada para testes com nitrogênio líquido em pressão atmosférica (banho de N₂L – 77 K);
- compatibilidade com o preconizado em normas brasileiras [128] e também com normas internacionais para testes com dielétricos [129, 130].

A principal característica desejada nesta proposta, e que constitui o aspecto de contribuição e inovação no arranjo, é o uso dos mesmos eletrodos e câmara criogênica para todas as caracterizações desejadas. Como será visto adiante, as etapas posteriores nesta empreitada foram desenvolvidas mediante uma parceria entre LEAT-UFMG e o LMDS-UFRRJ. O intuito foi a soma de esforços entre equipes com expertises diferentes, ensaios de alta tensão e desenvolvimento de sistemas supercondutores, com intuito de utilizar os conhecimentos e alguns equipamentos já disponíveis para a concepção, montagem e teste conceitual do arranjo proposto.

A primeira concepção levou em consideração a construção de uma câmara criogênica cilíndrica utilizando o TVE G10 (designação oriunda de um padrão da National Electrical Manufacturers Association) ou simplesmente G10, material compósito laminado feito de uma combinação de camadas de fibra de vidro empilhadas e embebidas com resina epóxi, largamente utilizado em projetos de criogenia. Para aplicação de tensão foram pensados eletrodos de cobre desiguais (25/75 mm) e que com um detalhe inicial: estrutura que permitisse alterar a pressão que o eletrodo superior aplica na amostra sob teste. Neste caso isso seria obtido por contrapesos metálicos que pudessem ser colocados no eletrodo superior. Com os estudos de campo elétrico, os contornos de custo e verificação das normas, observou-se que seria impeditivo o uso do TVE G10 para um teste de conceito, pois não haveria recursos suficientes e a proposta estava em estágio embrionário. Optou-se por buscar uma validação computacional da proposta, buscar meios de obter os instrumentos de medição necessários e despender recursos financeiros com a obtenção de amostras de material dielétrico para testes.

3.2 – Simulação e dimensionamento

A modelagem ou descrição matemática de um problema de engenharia passa pela aplicação das leis físicas pertinentes, em geral dependentes do espaço e do tempo, e que podem ser expressas em termos de equações diferenciais parciais (EDPs). Não é raro que, em grande parte desses problemas e suas geometrias (contornos), as EDPs não possam ser resolvidas de modo analítico. Busca-se então uma aproximação das equações, que podem ser construídas em diferentes tipos de discretizações. A ideia por detrás desse processo é aproximar as EDPs através de modelos numéricos, que podem ser resolvidos utilizando os métodos numéricos computacionalmente disponíveis. Este método de obtenção de uma solução aproximada da solução real do conjunto de EDPs que governam um dado problema é conhecido como Método dos Elementos Finitos (MEF), ou no termo em inglês, *Finite Element Method* (FEM) [131].

No presente estudo, o MEF foi utilizado com vistas a analisar o comportamento do campo elétrico nas proximidades do par de eletrodos a ser utilizado no arranjo, bem como sobre a amostra de material dielétrico, e na região preenchida por N2L até as paredes da câmara criogênica. De modo a analisar a questão das dimensões da câmara criogênica, a abordagem foi avaliar a distribuição do campo elétrico no N2L ao redor dos eletrodos. Isso foi feito construindo um protótipo virtual dos eletrodos imersos em N2L e sujeito a aplicação de alta tensão. A modelagem foi realizada através da plataforma COMSOL Multiphysics, um software de simulação de fenômenos multifísicos por intermédio de MEF. Ela permite uma construção de estruturas (domínios) utilizando CAD (*Computer Aided Design*), descrição simultânea e correlacionada de propriedades eletromagnéticas dos materiais e circuitos elétricos, utilizando os chamados módulos, neste caso os de corrente elétrica e de circuitos elétricos.

O material para a câmara criogênica foi inicialmente escolhido como sendo TVE G10. É um material de engenharia com alta resistência mecânica, baixa absorção de umidade, alto nível de isolamento elétrico, resistência química e que suporta operação em temperaturas criogênicas. Nesse sentido foi escolhido por ser capaz de conter o N2L, possuir alta rigidez dielétrica (37,8 kV/mm à temperatura ambiente), estabilidade dimensional, importante diante do gradiente de temperatura e dilatações envolvidas, e por fim o bom histórico de ser empregado em aplicações criogênicas. Um fator complicador ao seu uso é o alto custo, que para uma câmara criogênica de volume relativamente baixo

como a pensada neste caso, chegou a passar de R\$ 10.000 reais (somente o material). A Tabela 3 apresenta as propriedades gerais do TVE G10 [132].

Tabela 3 - Propriedades do TVE G10

Propriedade	Valor	Unidade	Norma de Referência
Densidade	1,9	g/cm ³	ISSO 1103
Rigidez dielétrica	37,8	kV/mm	IEC 60243-1
Resistência à tração	> 345	N/mm ²	ISO 524-4
Resistência à compressão - Perpendicular	> 500	N/mm ²	ISO 604
Resistência à compressão - Paralela	> 150	N/mm ²	ISO 604

Após a construção em CAD de uma primeira versão da câmara criogênica em formato cilíndrico, foi elaborada dentro do ambiente de construção de modelo do COMSOL uma rotina para simulação de comportamento do campo elétrico, onde foram acrescentadas a geometria dos eletrodos, o material dielétrico e o fluido criogênico (N2L). Dada a simetria do modelo, foi utilizada uma visualização do tipo axissimétrica, que permite obter as informações relevantes do problema com menor esforço e tempo computacional. A modelagem dos materiais foi feita inserindo os dados de cada material (N2L, cobre, TVE-G10 e materiais dielétricos) em cada domínio específico do desenho. Para a modelagem física, utilizou-se o módulo de correntes elétricas para a proposta de eletrodos, e o módulo de circuito elétrico para aplicação da alta tensão aos eletrodos em função do tempo, considerando um limite de até 40 kV (acima da previsão do ensaio experimental). As Tabelas 4 e 5 reúnem as propriedades do N2L e cobre utilizados na simulação. Como material dielétrico de teste, foi utilizado a mica. As Figuras 16 e 17 ilustram a construção do modelo e sua visualização axissimétrica, respectivamente.

Tabela 4 - Propriedades do N2L

Propriedades	Valores
Permissividade relativa [12]	1,43
Density [12]	804,2 kg/m ³
Temperatura de Ebulição (1 atm) [12]	77 K
Tensão disruptiva (sem bolhas) - gap 1 mm – Dois eletrodos esféricos [13]	29,5 kV
Tensão disruptiva (sem bolhas) - gap 1 mm – Um eletrodo esférico e outro plano [13]	33,2 kV

Tabela 5 - Propriedades do cobre

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	8900	kg/m ³
Resistividade Elétrica	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
Condutividade Térmica	401	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

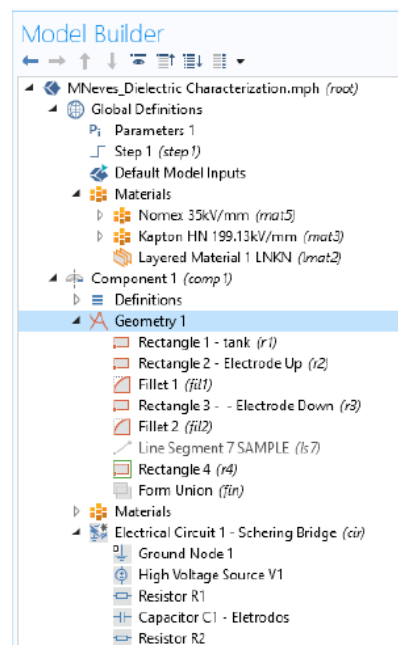


Figura 16 - Construção do modelo computacional.

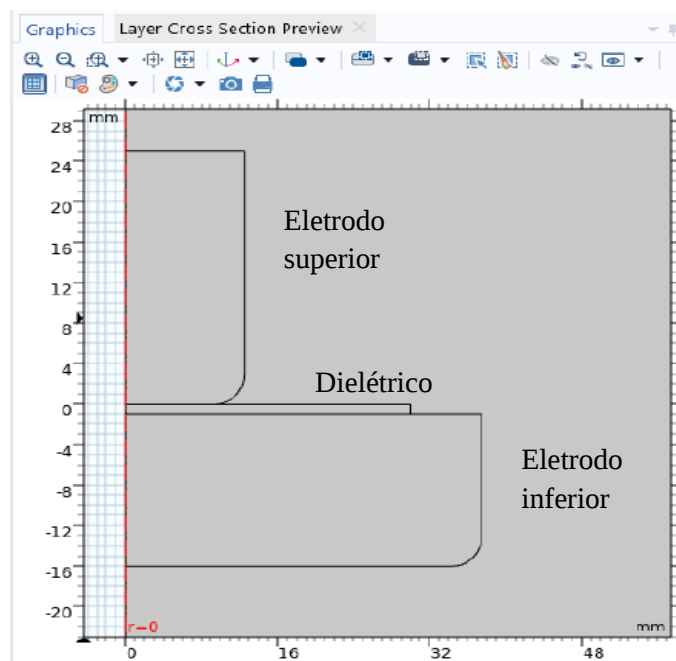


Figura 17 - Visualização axissimétrica dos eletrodos.

Para realização da simulação, o hardware utilizado foi uma estação de trabalho com Intel Core™ i9-9900K @ Processador de 3.600 GHz e 128 GB de RAM. Foi possível obter a distribuição do campo elétrico no ambiente de N2L, permitindo a proposição de um valor seguro e adequado para o diâmetro da câmara criogênica, bem como sua espessura de parede, ambos considerando a rigidez dielétrica, o volume da câmara (aspecto de manutenção da temperatura da amostra e eletrodos) e a segurança.

Apesar da proposição do uso de TVE G10, que como dito tem custo muito alto, e de seu bem sucedido emprego em aplicações criogênicas devido à capacidade do material de suportar baixíssimas temperaturas e os eventuais choques térmicos envolvidos, verificou-se posteriormente que os fatores custo e a distribuição de campo na região dos eletrodos eram fatores mais relevantes. Como era uma proposta inicial para teste de conceito e diante da inexistência de financiamento que viabilizasse um protótipo de câmara construído com TVE G-10, foi pensado no uso de uma câmara criogênica menor e feita de poliestireno expandido (EPS). O que resultou em menor custo, possibilidade de mais de uma câmara e um risco um pouco mais elevado no quesito ruptura mecânica da câmara, tanto na manipulação quanto na possibilidade de aumento de pressão (vaporização do N2L). Diante disso, tomou-se providências para evitar choques durante a manipulação e evitar pressurização, mesmo que a câmara utilizada fosse do tipo parcialmente fechada para evitar maior consumo de nitrogênio por evaporação.

3.3 – Medição de tangente de perdas e de constante dielétrica

Como havia pretensão de utilizar um mesmo par de eletrodos para essas medidas e da rigidez dielétrica, tomou-se como proposta as dimensões exigidas pela norma [128], que se refere a eletrodos desiguais a serem utilizados para medir a tensão de ruptura dielétrica à temperatura ambiente. A Figura 18 indica um desenho com o detalhamento das dimensões dos eletrodos cilíndricos escolhidos. Como pode ser visto, o eletrodo superior tem 25 mm de diâmetro e o eletrodo inferior tem 75 mm. Essa assimetria deve ser levada em conta para as medições das propriedades dielétricas.

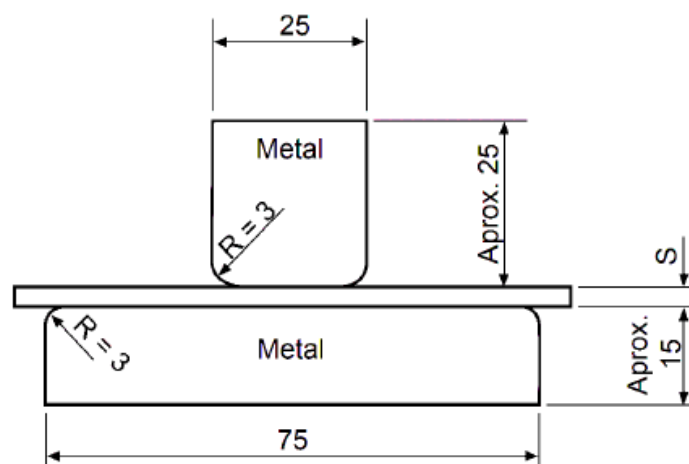


Figura 18 – Esquema dos eletrodos cilíndricos escolhidos. As dimensões estão em milímetros (mm).

A desigualdade dos eletrodos também é considerada em normas internacionais para este tipo de medição [130]. No entanto, para o caso de eletrodos não protegidos, existe uma capacitância de borda C_e que é modelada nas referidas normas como a presença de dois “capacitores de borda” em paralelo com o capacitor formado pelos dois eletrodos e a amostra de material dielétrico em teste. O valor da capacitância de borda a ser atribuído a cada um desses dois capacitores de borda pode ser obtido utilizando-se uma expressão empírica, dada na Equação 3.1. Nesta equação tem-se os seguintes parâmetros: C_e é o valor da capacitância de borda; ϵ_x é um valor aproximado da permissividade da amostra; S é a espessura média da amostra (em milímetros); P é o perímetro do eletrodo de terra (em milímetros).

$$C_e = (0,0041 \epsilon_x - 0,00334 \ln S + 0,0122) P \quad (3.1)$$

Na Figura 19, é apresentado um esquema do circuito de medição inicialmente proposto para obtenção dos valores de capacitância, permissividade elétrica e tangente de perdas de amostras de dielétricos sólidos em situação criogênica, frequência industrial e em alta tensão. Para isso, utiliza-se uma Ponte Schering [79] para medir capacitância e tangente de perdas diretamente, e de forma indireta, considerando capacitância e a geometria, os valores de permissividade. Neste caso, a metodologia se justifica pelo nível de tensão e pela busca de resultados mais sensibilidade na determinação de capacitância e das perdas, tal como acontece nos estudos com materiais convencionais, ou seja, fora do ambiente criogênico.

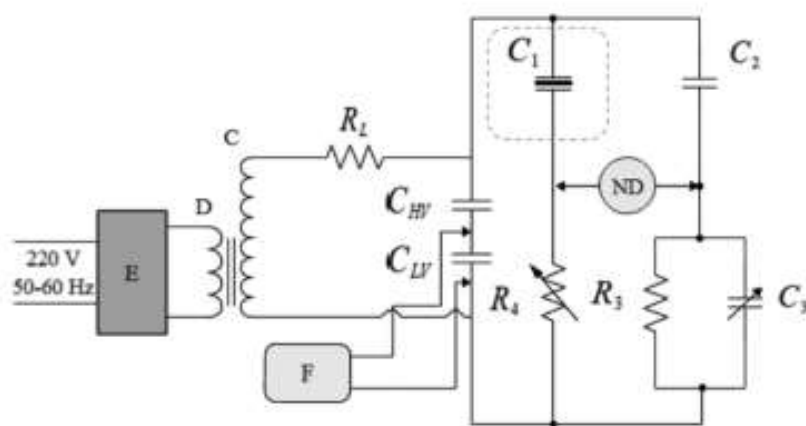


Figura 19 - Circuito para medição de perdas dielétricas e capacitância com a Ponte Schering.

Para este esquema de medição de tangente de perdas e capacitância, temos:

E representa um variac que permite variar a tensão aplicada no primário do transformador de alta tensão, sendo que no secundário há um divisor de tensão formado por uma resistência limitadora (R_L) e dois capacitores (C_{HV} e C_{LV});

C_1 é o capacitor em teste, ou seja, formado pelos eletrodos e a amostra de material dielétrico;

C_2 é um capacitor padrão, ou seja, um capacitor de perdas baixíssimas e capacitância conhecida;

C_3 é um capacitor variável, ou seja, é ajustado para o equilíbrio da Ponte Schering;

R_4 é um resistor variável, e assim como C_3 , permite o ajuste da Ponte Schering;

R_3 é um resistor

ND é um detector de nulo, utilizado para verificar o equilíbrio da Ponte Schering;

F é um osciloscópio que permite medir e monitorar a tensão aplicada.

A Ponte Schering permite medir a capacitância C_1 e a tangente de perdas de uma amostra, fazendo comparação com os valores de um capacitor padrão. Este capacitor tem dielétrico a gás, perdas dielétricas muito baixas para uma faixa de frequência e alta suportabilidade em tensão. Duas partes principais da ponte são a parte de alta tensão, onde fica o capacitor ou amostra de dielétricos sob teste, ou seja, cujas perdas dielétricas e capacitância devem ser medidas, e a parte de baixa tensão, onde uma queda de tensão geralmente inferior a 100 V fica sobre o resistor R_3 , e sobre R_4 e C_4 , que são variáveis e permitem o ajuste para equilibrar a ponte.

Modelando as impedâncias Z_1 (capacitor em teste), Z_2 (capacitor padrão), Z_3 e Z_4 (parte ajustável), e considerando j como a unidade imaginária e ω como a frequência angular da tensão senoidal, temos as equações de 3.2 a 3.5 [79].

$$Z_1 = R_1 + \left(\frac{1}{j\omega C_1} \right) \quad (3.2)$$

$$Z_2 = \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \quad (3.4)$$

$$Z_4 = R_4 \quad (3.5)$$

Utilizando a condição de equilíbrio da ponte, que pode ser aplicada quando o detector de nulo indica tal equilíbrio, obtém-se as equações de 3.6 a 3.8. No caso da Ponte Schering disponibilizada, tal detector é constituído por um galvanômetro. Discussões a respeito desse processo de verificação do equilíbrio da ponte, que pode ser eletrônico [79], bem como de um método de medida da tangente de perdas via processamento de sinais culminaram em uma nova possível proposta de método de medição de tangente de perdas.

Ela chegou a ser discutida através de algumas simulações e medições iniciais, mas dado o prazo e algumas dificuldades encontradas nessas medições, seno que ficou como proposta de investigação em trabalhos futuros, como será visto ao final deste texto.

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (3.6)$$

$$R_1 + \left(\frac{1}{j\omega C_1} \right) = R_4 \times \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right) \times \left(\frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right) \quad (3.7)$$

$$R_1 + \left(\frac{1}{j\omega C_1} \right) = \left(\frac{R_4}{j\omega C_2 R_3} \right) + \left(\frac{R_4 C_3}{C_2} \right) \quad (3.8)$$

Igualando-se as partes real e imaginária, tem-se a resistência R_1 e a capacitância C_1 do capacitor em teste, bem como a tangente de perdas dadas nas equações de (3.9) a (3.11).

$$R_1 = \frac{R_4 C_3}{C_2} \quad (3.9)$$

$$C_1 = \frac{R_3 C_2}{R_4} \quad (3.10)$$

$$\tan(\delta) = \omega C_1 R_1 = \omega C_3 R \quad (3.11)$$

Na determinação indireta da permissividade ε_r , são utilizadas as expressões típicas para a capacitância de de um capacitor de placas planas e paralelas (3.12) a (3.14).

$$C_1 = C_r \quad (3.12)$$

$$C_r = \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \right) \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_r = \left(\frac{C_r d}{\varepsilon_0 A} \right) \quad (3.14)$$

No caso de eletrodos sem guarda e desiguais, devido à capacitância de borda, deve-se tomar o cuidado para que a capacitância medida não seja C_r , a capacitância real (dielétrico mais eletrodos), mas sim outro valor C_m , modelado considerando dois “capacitores de borda” paralelos [130], cada um com capacitância calculada em (3.1). Assim, C_r é calculado a partir do C_m medido de acordo com (3.15) ou equivalentemente (3.16).

$$C_m = C_r + 2 C_e \quad (3.15)$$

$$C_r = C_m - 2 C_e \quad (3.16)$$

3.4 – Medição de rigidez dielétrica

Um teste de rigidez dielétrica é uma etapa fundamental na caracterização de um material isolante elétrico. Trata-se de um teste que envolve emprego de alta tensão, e como tal requer a integração de várias áreas e recursos técnicos para geração, controle e medição das tensões a serem aplicadas, bem como cuidados com os aspectos de segurança. Este tipo de medição pode ser obtido com o uso de alta tensão em frequência industrial (60 Hz), onde um transformador elevador é posto sob controle para variar a tensão em rampa até o ponto de ruptura. Porém, pode ser exigido ensaio do mesmo material com respeito a suportabilidade em alta tensão impulsiva, utilizando onda padronizada, obtida através de um gerador de impulsos (capacitores, resistências e gap) devidamente projetado [79].

Estes testes de alta tensão têm como objetivo caracterizar o desempenho do material dielétrico para o projeto e construção de equipamentos elétricos em geral, fundamentando o cálculo do isolamento. Como o objetivo não é analisar os efeitos da alta corrente e potência quando o material passa a permitir a condução elétrica, apenas o fenômeno de ruptura dielétrica devido ao nível de tensão aplicada é objeto deste tipo de medição. Normalmente, correntes muito baixas, da ordem de alguns miliamperes, são detectadas, de modo que não representam maiores esforços ao equipamento, mas ainda assim os cuidados são requeridos em função da segurança dos instrumentos, dos equipamentos e pessoas envolvidas.

Um dos componentes essenciais neste tipo medição é a ponta de prova de alta tensão, que deve estar adequada para o nível e tipo de tensão a ser medida, e no caso em que sua tensão suportável seja inferior aos níveis de tensão utilizados no ensaio há de se utilizar um circuito divisor de tensão, que pode ser capacitivo, resistivo ou uma combinação de ambos os tipos. Sua principal função é compatibilizar o nível de tensão para instrumentos de medição como um osciloscópio. Além disso, o divisor de tensão não deve interferir significativamente no teste. Ao dimensionar o divisor, é necessário definir o fator de escala associado, de modo a permitir a leitura correta da tensão real aplicada. Ele representa um fator pelo qual a tensão registrada na instrumentação deve ser multiplicada para obter o valor da alta tensão realmente aplicada ao material sob teste.

A determinação da tensão de ruptura em frequência industrial é feita elevando-se, em rampa constante ou aproximadamente constante, a tensão aplicada aos eletrodos entre os quais foi colocada uma amostra do dielétrico sob teste. Para isto, um regulador de tensão compatível com o primário do transformador deve ser utilizado para controlar o aumento da tensão no secundário até o momento de ruptura do dielétrico. Após cada disrupção, uma nova amostra deve ser inserida entre os eletrodos e a rampa de tensão é novamente aplicada. O valor de tensão a ser considerado na medição deve corresponder ao instante imediatamente antes da ocorrência da disrupção, daí a importância do osciloscópio neste tipo de ensaio. A Figura 20 ilustra o esquema do arranjo para a medição de rigidez dielétrica, onde se verifica um variac para controle da tensão (A), as pontas de prova de alta tensão e osciloscópio (B), o enrolamento primário (D) e secundário (C), um resistor limitador (R_L) e um divisor de tensão com as partes de alta (C_{HV}) e baixa tensão (C_{LV}).

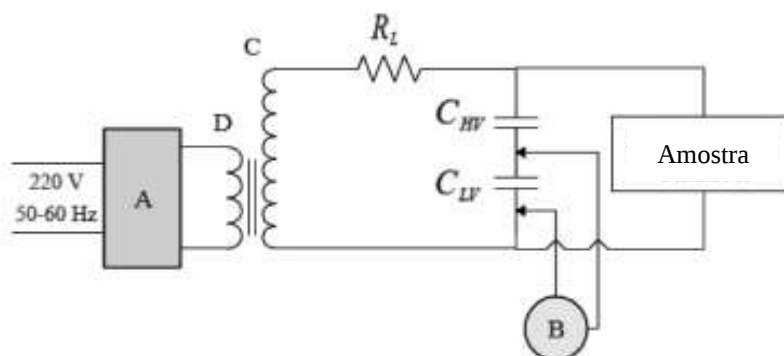


Figura 20 - Circuito para medição da rigidez dielétrica.

Para registrar a rampa de subida de tensão, bem como o instante e o valor da tensão de ruptura, foi utilizado o controle de trigger do osciloscópio. Para proteger o transformador contra sobrecorrente a instalação do curto e também evitar danos nos eletrodos, foi utilizado um disjuntor de proteção no circuito do variac. No caso do circuito efetivamente empregado neste tipo de teste, as pontas de prova tinham capacidade suficiente para medição das tensões envolvidas, de modo que não foi necessário o emprego de circuito divisor de tensão. A tensão disruptiva foi obtida por uma média aritmética da tensão registrada em 5 testes nas mesmas condições. A rigidez por sua vez diz respeito ao campo elétrico médio aplicado sobre a amostra, e neste caso corresponde à divisão da tensão pela espessura da amostra (Equação 2.4).

Considerando o caso de teste de isolante sólido em ambiente criogênico com nitrogênio líquido (N₂L), não houve mudanças na filosofia de preparação do circuito de aplicação de tensão proposto e no circuito de medição de tensão. Foram consideradas precauções relativas ao posicionamento da amostra, aguardo de tempo suficiente para equilíbrio térmico (25 minutos) e o dimensionamento da câmara criogênica (volume, material e controle de saída do nitrogênio gasoso). Duas questões importantes também foram consideradas, a primeira diz respeito à presença de umidade nas amostras, que podem se transformar em gelo durante o processo de imersão em banho de N₂L, gerando possibilidades de interferência nos resultados. A segunda considera os efeitos de contração térmica nos eletrodos, bem como o alinhamento e distanciamento destes e o correto posicionamento da amostra.

Para o problema da umidade, buscou-se deixar as amostras em tratamento térmico em uma estufa por cerca de 60°C por 12 horas, seguido de armazenamento em sacos plásticos próprios para amostras, guardando as mesmas em recipientes hermeticamente fechados. No segundo caso, um controle mais rigoroso não foi possível, mas o peso do eletrodo superior combinado com um porta-amostras desenvolvido utilizando duas placas de TVE G10 e um disco circular de Teflon® (PTFE - Polytetrafluoroethylene) buscou garantir o correto alinhamento da amostra e dos eletrodos, além disso colaborou para evitar descargas lateralmente, principalmente porque o eletrodo superior era menor. Contudo, espaçadores colocados entre as placas de TVE G10 permitem que a região de contato da amostra com os eletrodos receba o banho de N₂L, além de permitir visualizar o posicionamento da amostra para ajustes, se necessários, antes da imersão na câmara criogênica. A Figura 21 mostra o esquemático desse porta-amostra desenvolvido.

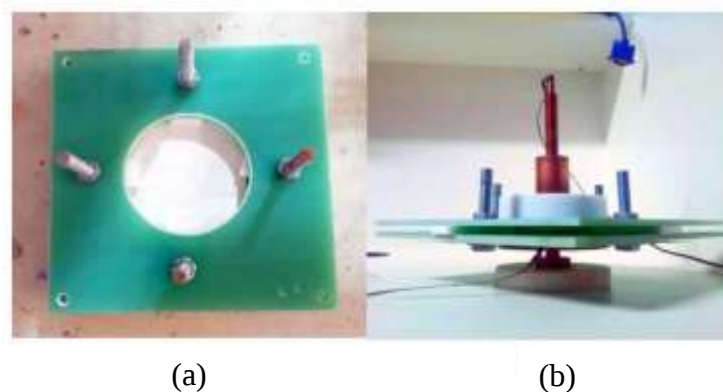


Figura 21 - (a) Porta-amostra construído com placas de G10 e disco de PTFE perfurado
(b) Eletrodos montados nas peças de G10 e PTFE.

3.5 – Testes do conceito e estudo de proposta de dielétrico para HTSTec

A etapa posterior à concepção e dimensionamento do arranjo experimental de caracterização de dielétricos, projetado para realizar tanto operações de medição não destrutivas quanto destrutivas com materiais dielétricos em condições criogênicas e eletrodos desiguais, foi a construção de um porta-amstras específico, como visto na seção anterior, e posteriormente a construção dos eletrodos, a obtenção da câmara criogênica, e a preparação das amostras de dielétricos para os ensaios. Nesta seção, são apresentados os detalhes a respeito do teste de conceito do equipamento proposto, feito com a realização de medições de permissividade elétrica e tangente de perdas (“ $\tan \delta$ ”) em um primeiro momento, e da rigidez dielétrica de material isolante laminado, proposto como alternativa para uso em projetos de CSEs e de toda HTSTec na ocasião do projeto SUPERCABO.

Os eletrodos foram construídos utilizando usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado), utilizando tarugos de cobre e de latão, ambos de perfil circular com diâmetros iniciais de 1 e 3 polegadas, respectivamente. Eles foram usinados para obter as formas desejadas, ou seja, diâmetros de 25 mm e 75 mm, bem como os ajustes de bordas, conforme indicado na seção 3.3 (Figura 22). A câmara criogênica, inicialmente pensada para ser construída com TVE G10 foi substituída por uma câmara feita de EPS, que estava disponível comercialmente e com baixo custo. Na realidade, conseguiu-se um modelo de “cooler” feito deste material e muito utilizado para transporte de bebidas resfriadas. Ele possui formato aproximado de um tronco de cone, com espessura média de paredes da ordem de 16 mm, possui uma tampa maior e nesta uma abertura com tampa menor, o que permitiu a passagem dos cabos de conexão elétrica para os eletrodos. Em termos de volume essa câmara possui capacidade de 15 litros. A Figura 23 mostra a câmara feita de EPS.



Figura 22 – Eletrodos de 75 e 25 mm usinados.



Figura 23 - Câmara criogênica (Cooler de EPS).

Como já mencionado, o material escolhido para o teste de conceito do arranjo proposto foi o laminado NKN, composto de um filme de poliimida (Kapton®) [125] revestido nas duas faces por camada de poliamida aromática (Nomex®) [123], ambos são materiais já utilizados para isolamento elétrico em temperatura ambiente, com aplicações dentro e fora do setor de energia elétrica. Foram tentadas a obtenção de uma quantidade maior de amostras dos dois componentes, mas infelizmente não se conseguiu uma quantidade suficiente de amostras de Kapton HN, o tipo utilizado. No caso do Nomex 410, que é o tipo utilizado na formação do laminado NKN, foi possível obter maior quantidade de amostras. Dessa forma, amostras de Nomex 410 também foram testadas no teste de funcionalidade do equipamento proposto, permitindo comparar medições com o próprio NKN e com a literatura, uma vez que se tem estudos do Nomex 410 em banho de N₂L.

A preparação das amostras incluiu o corte e a secagem em estufa. Foram feitas amostras quadradas com 78 mm de lado, que foram colocados em estufa sob tratamento térmico a 60 °C por 12 horas, seguido de embalagem em saco plástico e armazenamento em recipiente hermético. Essa temperatura foi sugerida pela técnica de laboratório do Departamento de Física da UFMG, como medida conservadora, por não se ter mais detalhes do comportamento térmico das amostras. Este cuidado visou reduzir a possível influência da umidade e de outros agentes de contaminação, principalmente sobre o Nomex®, um material poroso, e considerando que as amostras utilizadas têm menos de 0,3 mm de espessura. No caso do Kapton®, a preocupação também foi contaminação e possível perfuração, em função da espessura ainda menor desse material. De toda forma, ele só pode ser utilizado nos outros testes, com amostras menores. A Figura 24 mostra a estufa utilizada no processo, disponibilizada pelo Departamento de Física da UFMG.



Figura 24 - Estufa de secagem das amostras.

Como indicado na seção 3.3, essa primeira etapa demanda a utilização de uma Ponte Schering, não disponível no LEAT-UFMG. Desta forma foi solicitado o auxílio do LAT-EFEI (Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá), que disponibilizou agenda para realização de ensaios com a Ponte Schering, modelo 2801 - Tettex, que pode ser utilizada com tensões de até 100 kV, bem acima do limite de tensão presumido para as amostras testadas. As primeiras medições foram realizadas em junho de 2023 e a calibração da ponte foi realizada no final de 2022 pela CTM Metrologia, empresa credenciada pelo INMETRO. De toda forma, a ponte também foi testada utilizando capacitor de referência disponível no próprio laboratório, antes do início da realização das medições. A Ponte Schering utilizada é mostrada na figura 25. Também foi utilizado um capacitor padrão, também da Tettex com capacitância de 116 pF, tensão de operação máxima de 35 kV e tangente de perdas menor que 10^{-5} .



Figura 25 - Ponte Schering – LAT-EFEI.

De modo a permitir a comparação dos resultados experimentais obtidos para o fator de dissipação e os valores de permissividade, foi disponibilizado pelo LAT-EFEI, em uma das duas oportunidades de medição, um equipamento, geralmente utilizado em ensaios de cunho didático na universidade, que permitiu a obtenção dessas mesmas grandezas de modo automático, ou seja, aplicando-se a tensão e medindo os parâmetros. Trata-se do equipamento CPC 100 – Omicron [133], que permite medir a tangente de perdas e a capacitância em testes primários. Contudo, o equipamento não foi projetado especificamente para o tipo de eletrodos utilizado. Como será visto nas discussões de resultados, foi difícil encontrar dados na literatura para os materiais testados, em especial o NKN e nessas condições (criogenia e tipo de eletrodo), e para o caso de tangente de perdas e permissividade não foram encontrados.

Para a segunda etapa de medições do teste de conceito, utilizou-se basicamente o esquema descrito na seção anterior, ou seja, um transformador variável para controle da tensão até o ponto de ruptura da amostra. Foram utilizadas duas pontas de prova de alta tensão a serem conectadas a dois voltímetros, que também registraram a tensão elétrica através da função de retenção de pico ativada. Não foi necessário o uso de circuito divisor de tensão nas medições. Os dois voltímetros foram utilizados para obter redundância e também acompanhar o processo de medição, que envolve um ensaio destrutivo. A ruptura dielétrica foi medida através da sonda principal e uso de um osciloscópio modelo TDS 2000 (Tektronix) com 70 MHz e 1 Gs/s (Figura 26).

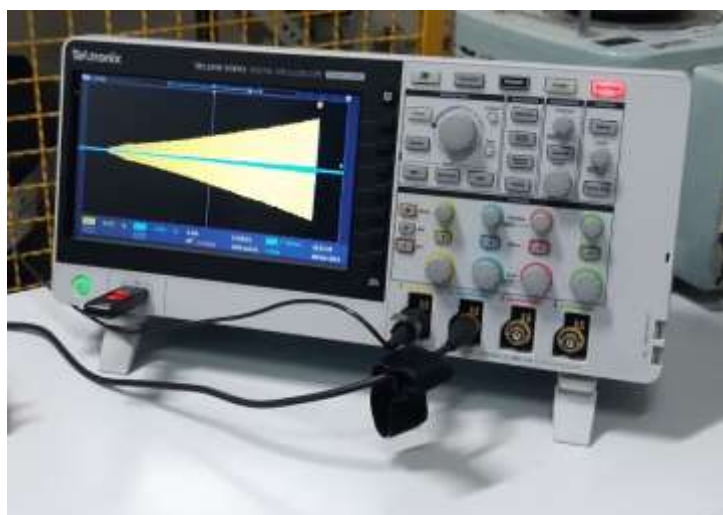


Figura 26 – Osciloscópio utilizado no teste de rigidez dielétrica.

O procedimento desse tipo de medição consistiu em produzir uma rampa de aumento de tensão (1 kV/s) nos eletrodos até a ruptura, e após cada evento uma nova amostra foi instalada entre os eletrodos e N2L foi despejado na câmara, aguardando-se um equilíbrio térmico aproximado, uma vez que se trata de banho de N2L e a troca de calor não cessa na superfície do fluído. Este tempo para equilíbrio foi padronizado em 25 minutos, onde já não se percebia a presença de bolhas dentro do fluído, ou seja, na região onde se localiza-va a amostra sob teste. Destaca-se o grande tempo despendido para essa manobra, ou seja, retirada de uma amostra e colocação de uma nova, variando de 45 min a 1 h por operação. Foram utilizadas apenas 5 amostras no teste de conceito, em função da quantidade de material disponível, que nesse caso demandou amostras maiores (78 x 78 mm). A ideia inicial era utilizar 10 amostras. A Figura 27 mostra o circuito de aplicação de alta tensão juntamente com a câmara criogênica utilizada.



**Figura 27 – (a) Variac para produção da rampa de tensão e osciloscópio para medição.
(b) Transformador de alta tensão, ponta de prova e câmara criogênica.**

Buscou-se muito o acesso a equipamentos, amostras e demais recursos necessários para explorar esses tipos de medição de modo estatisticamente mais significativo, mas foram encontradas diversas barreiras de acesso a equipamentos, ao próprio N2L, e principalmente a um volume maior de amostras, mesmo somando as que foram doadas quanto as que foram compradas a quantidade foi relativamente pequena. Além desse teste haveria outros a serem feitos. As que foram utilizadas foram fruto tanto de doação da Dupont Brasil quanto de compra junto a fornecedores nacionais (Nomex®) e internacionais (NKN), mas que não forneciam mais do que 3 folhas A4 de cada material, exceto se fossem feitas compras em grandes quantidades.

Foram feitas buscas de valores possivelmente comparáveis na literatura, tendo sido encontrados alguns resultados, embora apenas alguns estivessem em condições semelhantes às da medição realizada, como os resultados de rigidez com Nomex® e Kapton® em N2L com e sem a presença de bolhas [104, 110,111]. Demonstrando inclusive o interesse por esses materiais. No caso do NKN, não foram encontrados resultados, mas foi encontrado em [111] o teste com o laminado NMN, que troca o Kapton por poliéster. Cabe lembrar que os valores de rigidez dielétrica de um isolante dependem das condições de ensaio, visto que pode ser afetada por alguns fatores, tais como:

- a) frequência, forma de onda e o tempo e forma de aplicação da tensão;
- b) espessura e homogeneidade da amostra, a presença de esforços mecânicos;
- c) temperatura, condicionamento, pressão e a umidade da atmosfera ambiente;
- d) presença de influências gasosas, de umidade ou de outros agentes de contaminação;
- e) material, dimensões e o formato dos eletrodos;
- f) características elétricas e térmicas do meio ambiente.

3.6 – Testes com materiais dielétricos em baixa tensão

Além do estudo com o protótipo desenvolvido, voltado para alta tensão, o material NKN, bem como seus constituintes, também foram analisados em baixa tensão através de medidor LCR. Neste caso a tensão é muito baixa, longe da condição operativa futura, mas permite analisar o comportamento do material em termos de variação da frequência, neste caso até o limite de 1kHz. A tangente de perdas foi medida diretamente e a permissividade elétrica novamente pode ser obtida a partir da capacitância e dos valores geométricos. A configuração experimental desenvolvida utiliza porta-amostras confeccionados em PTFE (politetrafluoretileno), poliamida Nylon® e alumínio (placas do capacitor). As medições neste caso foram feitas tanto em temperatura ambiente quanto em banho de N2L para comparação, e medições para amostras de Kapton® e Nomex® foram realizadas para fins de comparação entre os constituintes e o laminado. O volume maior de medições e as medidas em temperatura ambiente foram possíveis neste caso por serem medidas que demandam amostras muito pequenas, o que não ocorreu com as medidas em alta tensão, o que foi um fator limitador deste tipo de teste.

Neste caso, o porta-amstras foi construído como um capacitor plano de placas paralelas, no qual a distância entre as placas pode ser ajustada por um parafuso M10 feito de PTFE e passo de rosca de 2 mm. Para garantir uniformidade e aplicação padrão de pressão nas amostras, um torque de 3 N.m (medido com torquímetro) foi aplicado ao parafuso antes da imersão em N2L. Os cabos elétricos de ligação das placas também foram revestidos com filme de PTFE. A configuração básica do capacitor consiste em dois eletrodos cilíndricos de alumínio com diâmetro de 37 mm e espessura de 3 mm. O diâmetro dos eletrodos é menor que o diâmetro das amostras, cortadas em formato quadrado (40 x 40 mm). Este arranjo foi conectado ao medidor LCR e imerso em N2L em outro recipiente de EPS, formato retangular e 3 litros de capacidade. A Figura 28 mostra o porta-amostra para medição em baixa tensão e a Figura 29 o medidor LCR ao lado do recipiente de EPS utilizado.



Figura 28 – Porta amostras para medição com LCR.



Figura 29 – Medidor LCR e recipiente de EPS com o porta-amostra imerso em N2L.

O medidor de precisão LCR (E4980A Agilent - 20 a 2 MHz) foi utilizado para medir capacitância e tangente de perda para duas faixas de frequência em temperatura ambiente (300 K – ambiente climatizado) e temperatura do banho em N2L (77 K). Neste último caso, também foi aguardado intervalo para equilíbrio térmico (25 minutos), e o N2L foi completado em caso de queda de nível no recipiente. Antes de realizar as medições o medidor LCR foi ligado 30 minutos antes e calibrado conforme manual do fabricante, ocasião em que foram realizadas algumas medições com capacitores comerciais com baixas perdas dielétricas para verificação do funcionamento. Como nas demais medições foi adotado o tratamento térmico para minimizar a interferência da umidade nas amostras. As amostras foram cortadas em formato quadrado com 40 mm de lado, resultando em área efetiva de 1075 mm². As amostras de Kapton®, Nomex® e NKN utilizadas para este experimento são mostradas na Figura 30 e suas respectivas medidas de espessura e densidade superficial são mostradas na Tabela 6.

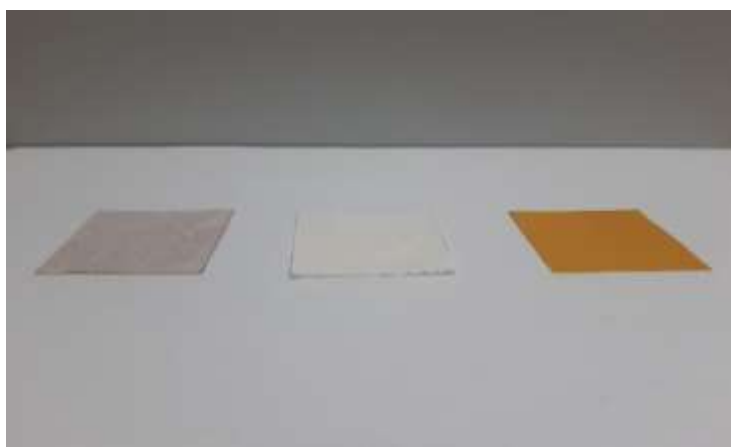


Figura 30 – Amostras utilizadas nas medições com LCR.

Tabela 6 – Propriedades dos materiais dielétricos analisados no LCR e em teste de rigidez dielétrica com eletrodos iguais (6,4 mm).

Material	Espessura (mm)	Espessura (mil)	Densidade Superficial (g/m ²)
NKN 323	0,215	9	231
Nomex 410	0,170	7	175
Kapton HN 100	0,025	1	35,5

No caso da medição de permissividade e tangente de perdas, a espessura efetiva das amostras comprimidas no arranjo pode ser menor que a espessura medida com auxílio de micrômetro, devido ao aperto aplicado ao parafuso e à própria resposta de cada amostra em termos de deformação e contração térmica. Neste caso, mesmo utilizando um torquímetro para padronizar o grau de pressão nas amostras, buscou-se estimar o ângulo de colocação da rosca para cada amostra de acordo com sua espessura e passo de rosca do parafuso M10.

A partir da expressão da capacitância de um capacitor plano de placas paralelas, a permissividade relativa pode ser obtida a partir da capacitância e da geometria do capacitor, pela seguinte expressão (3.17):

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \quad (3.17)$$

Onde: C é a capacitância medida pelo medidor LCR, d é a espessura da amostra, A é a área da seção transversal dos eletrodos circulares, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m é a permissividade do espaço livre e ε_r é a permissividade relativa a ser determinada. O valor de C pode corresponder à capacitância de um capacitor com uma ou mais camadas da amostra, sendo que para mais de uma camada existe uma associação em série (3.18).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} \quad (3.18)$$

3.7 – Testes com materiais dielétricos em alta tensão – eletrodos iguais

Ainda considerando a caracterização do NKN em banho de N2L sob pressão atmosférica, foi proposta outra medição da rigidez dielétrica, desta vez considerando eletrodos iguais. Este arranjo possui eletrodos baseados na norma ASTM D149 [129], dispostos verticalmente e alinhados, com diâmetros iguais a 6,4 mm e bordas arredondadas para 0,8 mm. O eletrodo superior tem massa total de 50 g (corpo com haste + eletrodo que se encaixa nesse corpo) e fornece uma pequena pressão constante sobre a amostra (lembrando que nesse caso há a presença do empuxo do N2L). Todos os eletrodos foram confeccionados em alumínio utilizando usinagem CNC (colaboração do CEFET-MG) e, para reduzir a rugosidade, as superfícies foram polidas com lixa 1200. A figura 31 mostra o desenho do eletrodo em ambiente CNC.

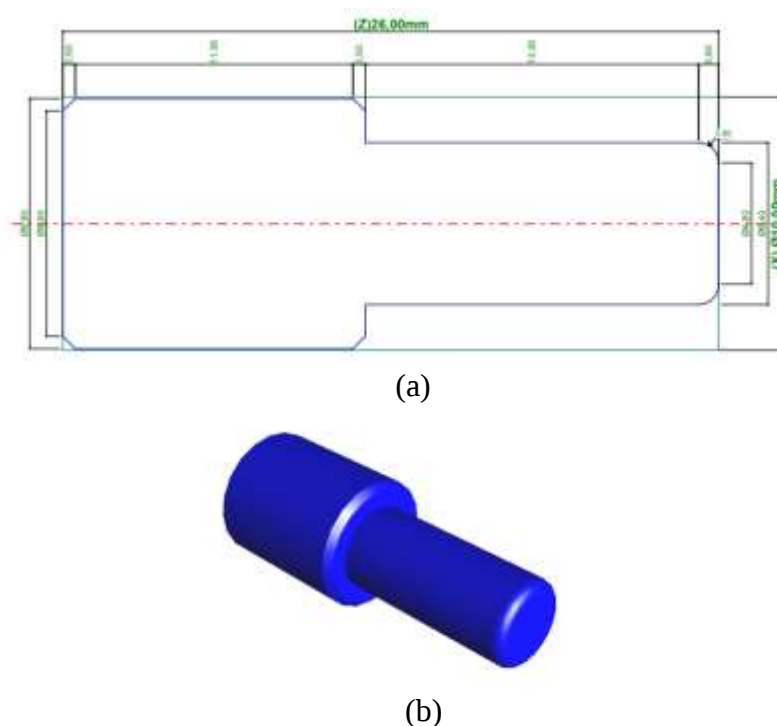


Figura 31 – (a) Desenho do eletrodo de 6,4 mm em corte (2D) e (b) perspectiva 3D do eletrodo pronto para usinagem CNC.

Para aplicação de tensão, foi utilizado o mesmo circuito já descrito na seção 3.5, ou seja, um variac operado manualmente conectado a um transformador elevador, e para medição, um osciloscópio e pontas de prova de alta tensão. As medições preliminares, ainda em temperatura ambiente, indicaram a necessidade de envolver a amostra com um material isolante com alta rigidez dielétrica para evitar a disrupção lateral através do meio circundante, seguiu-se a mesma estratégia do caso de eletrodos desiguais. Este porta-amostras para teste de rigidez com eletrodos iguais (6,4 mm) também foi confeccionado com placas de PTFE fixadas com 6 parafusos de nylon M8. A Figura 32 mostra os detalhes deste terceiro porta-amostras.



Figura 32 – Porta-amostra para medidas de rigidez com eletrodos iguais (6,4 mm).

3.8 – Cálculo de material dielétrico para um protótipo de CSE

Como o propósito principal da caracterização de dielétrico em situação criogênica discutida neste trabalho é o dimensionamento do isolamento de um CSE, optou-se por uma estimativa referente a um possível protótipo a ser construído. Para estimar a quantidade de material dielétrico foram utilizados dados da geometria do protótipo, cujo raio interno da camada isolante está postulado no projeto em 15,40 mm e comprimento de 10 m. Neste estudo foi considerado somente um nível de tensão de distribuição de 13,8 kV. A Equação 2.6, reescrita a seguir, permite determinar a espessura mínima do isolamento elétrico, neste caso considerando o critério da rigidez como visto na seção 2.7. Nesta expressão são utilizados o raio interno, a tensão de operação do cabo e a rigidez dielétrica do material de isolamento.

$$d=r_0 \left[\exp \left(\frac{V_{\max}}{\sqrt{3}} \frac{1}{r_0 E_{RD}} \right) - 1 \right]$$

Dado o processo de enrolamento do NKN em forma de fita, foi necessário analisar a relação entre o passo de enrolamento (L_p), o comprimento do cabo (L_{HTS}), a largura da fita deste material isolante (λ) e o ângulo de passo do enrolamento (θ_p) com base no esquema dado na Figura 33. No cálculo da quantidade de material também foi considerada uma sobreposição de 50% entre as camadas de isolamento (descontinuidade entre fitas e incerteza da rigidez em espessuras maiores) e uma margem de 10% de material devido aos processos de corte na produção.

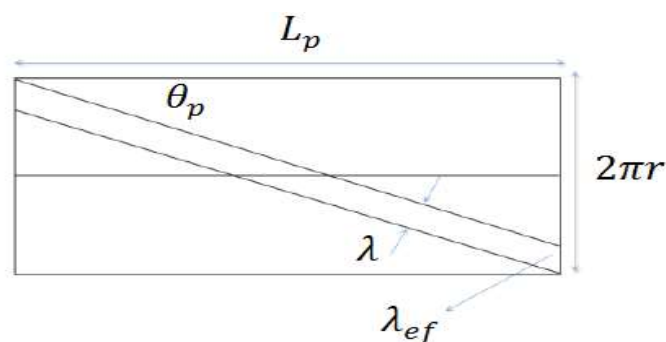


Figura 33 - Parâmetros geométricos da camada de isolamento.

Partindo da premissa de que o número de fitas de material isolante em uma camada deve ser tal que n vezes a largura efetiva da fita (λ_{ef}) seja igual ao perímetro da camada sobre a qual as fitas irão assentar, foi possível obter as seguintes equações:

$$\lambda_{ef} = \frac{\lambda}{\cos(\theta_p)} \quad (3.19)$$

$$2\pi r \cos(\theta_p) - L_p \sin(\theta_p) - \lambda = 0 \quad (3.20)$$

$$n = \frac{2\pi r}{\lambda_{ef}} = \frac{2\pi r \cdot \cos(\theta_p)}{\lambda} \quad (3.21)$$

$$L_{fita} = \frac{1}{\cos(\theta_p)} L_{HTS} \quad (3.22)$$

Considerando o raio (r) da superfície cilíndrica do condutor, onde o material isolante é assentado, igual a 15,40 m, e duas opções de largura da fita, $\lambda_1 = 15$ mm e $\lambda_2 = 20$ mm (disponíveis em escala industrial), juntamente com a espessura calculada (2.6) e seguindo as demais premissas mencionadas anteriormente, foi possível chegar a duas relações entre o comprimento total de fita de material isolante e o comprimento do cabo HTS, dadas pelas equações (3.23) e (3.24).

$$L_{fita\ 1} \approx 14,19 L_{HTS} \quad (3.23)$$

$$L_{fita\ 2} \approx 10,64 L_{HTS} \quad (3.24)$$

Onde: $L_{fita\ 1}$ e $L_{fita\ 2}$ são os comprimentos totais das fitas de material isolante para as duas larguras consideradas (λ_1, λ_2) e L_{HTS} é o comprimento total do protótipo de CSE.

As perdas dielétricas em um projeto do CSE podem ser calculadas globalmente ou por volume [77,79], sendo os valores dados pelas equações (3.25) e (3.26):

$$D_{perdas} = C \cdot V_{max}^2 \cdot \tan(\delta) \cdot \omega \quad (3.25)$$

$$D_{perdas\ volumétricas} = \varepsilon \cdot E^2 \cdot \tan(\delta) \cdot \omega \quad (3.26)$$

Onde: D_{perdas} é a potência das perdas dielétricas, $D_{perdas\ volumétricas}$ é potência das perdas por volume, ω é a frequência angular, V_{max} é a tensão de operação do cabo, δ é o ângulo de perda dielétrica, $\tan(\delta)$ é o fator de dissipação, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ é a permissividade elétrica do material e E é o campo elétrico.

Por fim, considerando um sistema de refrigeração com coeficiente de desempenho (COP), é possível obter a carga térmica estimada para este sistema devido apenas ao processo de perdas e consequente geração de calor no dielétrico.

$$P_{refrigeração} = \frac{D_{perdas\ volumétricas} \cdot VMD}{COP} \quad (3.27)$$

Onde: $P_{refrigeração}$ é a potência de resfriamento apenas para as perdas dielétricas, COP é o coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração, $D_{perdas\ volumétricas}$ é a perda dielétrica volumétrica e VMD é o volume do material dielétrico.

O valor VMD é obtido diretamente do comprimento total da fita de material isolante utilizada no protótipo do cabo, da espessura e largura de fita. Os valores do COP variam entre os esquemas do sistema de refrigeração [49].

Capítulo 4 – Resultados

A seguir, são apresentados os resultados obtidos considerando a sequência metodológica dada no capítulo anterior. Em um primeiro momento, a concepção e simulação computacional envolvidos, em seguida as medições em alta tensão da permissividade elétrica e tangente de perdas utilizando uma Ponte, e teste de rigidez dielétrica, compondo o teste de conceito do arranjo. Posteriormente, os resultados das medições em baixa tensão com LCR (temperatura ambiente e N2L). Por fim, medições de rigidez dielétrica com eletrodos (norma ASTM D149) para comparação de resultados e uma estimativa de quantidade de dielétrico na hipótese de um CSE de 10 m com NKN.

4.1 – Dimensionamento do equipamento e simulação com MEF

O material inicialmente escolhido para a câmara criogênica foi o TVE G10, que é capaz de conter o N2L com tranquilidade e possui alta tensão de ruptura dielétrica (37,8 kV/mm à temperatura ambiente). Para determinar as dimensões da câmara criogênica nossa abordagem foi avaliar a distribuição do campo elétrico ao redor dos eletrodos na presença de N2L. Isso foi feito utilizando-se MEF, através da construção de um protótipo virtual na plataforma COMSOL Multiphysics, onde foram utilizados os módulos de corrente elétrica e de circuitos elétricos para inserção de propriedades eletromagnéticas dos materiais e aplicação de tensão até 40 kV, com posterior visualização do perfil de campo elétrico. A Figura 34 apresenta a visualização da distribuição do campo após simulação no modo axissimétrico.

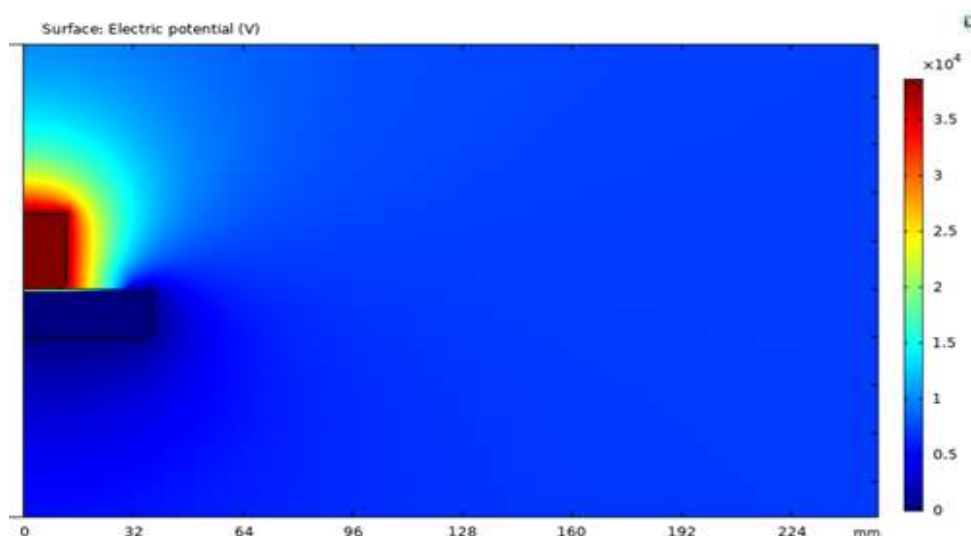


Figura 34 – Visualização da distribuição de campo elétrico.

Como mencionado, em um primeiro momento imaginou-se que seria possível e viável economicamente a construção da câmara criogênica cilíndrica, com diâmetro de 20 cm e altura de 100 cm (31 litros) toda em TVE G10, onde os barramentos que conectam o circuito externo aos eletrodos, feitos de cobre, também seriam cobertos por uma camada de TVE G10 de 10 mm de espessura. Neste caso foi pensada a utilização de um contrapeso para imprimir pressão do eletrodo superior sobre a amostra dielétrica a ser medida, que também teria a função de manter a disposição dos eletrodos (alinhamento). As Figuras 35 e 36 apresentam o esquema dos eletrodos e da câmara criogênica inicialmente pensada.

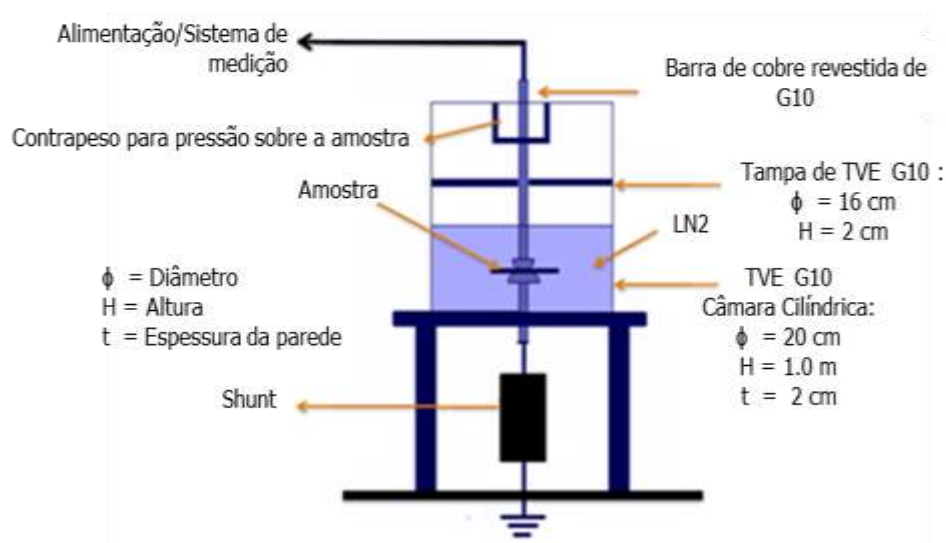


Figura 35 – Esquemático da câmara criogênica (TVEG10) e eletrodos com ajuste de pressão, inicialmente propostos (2D).



Figura 36 - Esquema do conjunto câmara criogênica e eletrodos inicialmente propostos (3D) - Câmara transparente para melhor visualização.

Contudo, o passo seguinte, que era simplesmente construir e testar esse sistema para caracterização de materiais dielétricos criogênicos foi alterado em função dos custos, da constatação de que não era necessária uma câmara tão grande (embora se tivesse pensado no uso destas para outros ensaios que demandariam maior volume de N2L), tão espessa, e da possibilidade de se utilizar câmara criogênica feita de EPS para o teste de conceito. Uma outra questão foi a disponibilidade de uma Ponte Schering e capacitor padrão para realização das medições de capacitância (permissividade relativa) e tangente de perdas. Ocasão em que foi solicitada a colaboração do LAT-EFEI.

4.2 – Medidas de tangente de perdas e constante dielétrica - alta tensão

Utilizando os equipamentos e metodologias descritos anteriormente (seção 3.5), amostras de NKN e Nomex 410 foram caracterizadas em um teste de conceito, utilizando o arranjo proposto, com Ponte Schering (PS) e também o equipamento CP 100 (disponibilizado em uma primeira rodada de medições). Como valor representativo da permissividade relativa foi utilizado o valor $\epsilon_x = 3$ como referência na Equação (3.1). Os outros parâmetros a serem utilizados nesta equação são a espessura da amostra (S), dada na Tabela 7, que fornece os dados geométricos das amostras. O perímetro do eletrodo maior (P), que tem diâmetro de 75 mm, pode ser calculado. Na Equação (3.13) foi utilizado o diâmetro de 25 mm.

Tabela 7 – Dados geométricos das amostras quadradas utilizadas no teste de conceito do arranjo proposto.

Material	Espessura (mm)	Lado (mm)
Nomex 410	0,170	78
NKN	0,215	78

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores de $\tan \delta$ e permissividade relativa para diferentes níveis de tensão para as amostras de NKN e Nomex 410, considerando as medições com a Ponte Schering (PS), e as Tabelas 10 e 11 mostram as medições realizadas com o equipamento CP 100.

Tabela 9 – Fator de dissipação e permissividade relativa do Nomex 410 - PS

Nível de Tensão (kV)	Fator de dissipação ($\tan \delta$)	Permissividade relativa (ϵ_r)
4	$8,9 \times 10^{-3}$	2,45
8	$9,0 \times 10^{-3}$	2,59
12	$9,1 \times 10^{-3}$	2,67

Tabela 10 – Fator de dissipação e permissividade relativa do NKN – CP 100

Nível de Tensão (kV)	Fator de dissipação ($\tan \delta$)	Permissividade relativa (ϵ_r)
4	$1,5 \times 10^{-3}$	3,18
8	$9,6 \times 10^{-3}$	3,29
12	$5,4 \times 10^{-2}$	3,38

Tabela 11 – Fator de dissipação e permissividade relativa do Nomex 410 – CP 100

Nível de Tensão (kV)	Fator de dissipação ($\tan \delta$)	Permissividade relativa (ϵ_r)
4	$5,3 \times 10^{-3}$	2,27
8	$6,2 \times 10^{-3}$	2,32
12	$1,1 \times 10^{-2}$	2,35

Em termos gerais, os resultados mostram que a permissividade relativa e o fator de dissipação aumentam com o crescimento da tensão aplicada. Para o NKN percebe-se que o fator de dissipação diminui com o aumento da tensão aplicada nas medições realizadas com o arranjo proposto, que envolve o uso da Ponte Schering. Embora as medidas fiquem na mesma ordem de grandeza, as medições com o Nomex 410 sozinho indicaram aumento nos dois instrumentos utilizados, embora a rigor não possam ser diretamente comparáveis. Com respeito aos valores de permissividade relativa os valores apresentam um comportamento semelhante nos dois tipos de medições (Ponte Shering e CP 100), para ambos os materiais, com medidas numericamente muito próximas. Dessa forma, são necessárias mais amostras para mais medições para tentar isolar os fatores que possam ter causado a redução do fator de dissipação, bem como analisar com mais rigor os valores encontrados, tanto para tangente de perdas quanto para permissividade.

4.3 – Medidas de rigidez dielétrica

Para o ensaio de rigidez dielétrica o circuito a ser conectado aos eletrodos dentro da câmara criogênica partiu do transformador elevador conectando também as pontas de prova de alta tensão (Figura 36). Este arranjo envolve basicamente um variac para ajustar a rampa de tensão do transformador até o ponto de ruptura da amostra dielétrica. As duas sondas de alta tensão levam o sinal aos canais do osciloscópio e a dois voltímetros. Esses dois voltímetros medem a tensão elétrica com uma função de retenção de pico ativada, ou seja, registra o pico no momento da falha do isolante. Já o osciloscópio capta os sinais de tensão ao longo da rampa e os sinais de corrente na amostra durante a realização do ensaio.



Figura 36 - Fotografia de equipamento para medição de rigidez dielétrica mostrando a câmara criogênica de EPS fechada (esquerda) com os eletrodos dentro, o transformador alta tensão (centro) e pontas de prova de alta tensão (direita e abaixo).

Neste teste de conceito, os dois voltímetros são utilizados apenas para obter redundância nas medidas e guiar a conferência pela curva registrada no osciloscópio. Após cada disrupção, o arranjo foi desenergizado, o N2L foi drenado e a amostra testada foi retirada após o porta-amostras ser colocado em tanque com água para aumento de temperatura. Todo o conjunto era então limpo com álcool isopropílico, seco com soprador térmico e uma nova amostra era instalada entre os eletrodos, uma breve medida da capacitância feita com LCR auxiliava na checagem de posicionamento da amostra, e em seguida o porta-amostras era inserido novamente na câmara criogênica. Por fim, aguardava-se o equilíbrio térmico do sistema em no tempo padrão de 25 minutos. Após todo esse procedimento, que demorava de 45 minutos a 1 hora, uma nova rampa de tensão era aplicada. Neste caso, a rampa utilizada era aproximadamente linear (cerca de 1,0 kV/s – 1,2 kV/s) e demorou cerca de 15 segundos para atingir o ponto de disrupção. A Tabela 12 indica os valores médios (5 medidas) da rigidez dielétrica encontrada para o NKN e o Nomex 410 neste teste.

Tabela 12 – Rigidez dielétrica em N2L no arranjo proposto – Eletrodos 25/75 mm

NKN	Nomex 410
78,9 kV/mm	76,1 kV/mm

Na literatura, apenas [111] utilizaram materiais e eletrodos semelhantes (25/75 mm) aos deste estudo, mas sem mensurar fator de dissipação e permissividade. Dados de rigidez dielétrica para o Nomex 410 nesta referência é de 67 kV/mm. Nesse mesmo artigo há um estudo de outro material laminado, o NMN, que utiliza Nomex® e poliéster, com valor de rigidez dielétrica de 72 kV/mm, mas não comparável com NKN. De acordo com [17], o NKN tem rigidez dielétrica de 57 kV/mm em N2L. Considerando as referências [102] e [107] existem conjunto de dados de rigidez dielétrica disponíveis para o Nomex 410, sendo o primeiro utilizando eletrodos desiguais de 15 e 75 mm, e o segundo utilizando eletrodos iguais de 25 mm e eletrodos desiguais de 25 e 75 mm. Em [102] o Nomex 410 apresenta valores de 68 kV/mm, enquanto que em [107] o valor é de 85 kV/mm. Em [72] há um estudo envolvendo Nomex 410, mas em um arranjo muito diferente, porém considerando uma situação mais próxima da aplicação ou uso real do

material, considerando a presença de bolhas no N2L. Neste caso a rigidez dielétrica encontrada foi de 42,7 kV/mm. Como alguns dos resultados para o Nomex 410 foram bastante próximos considerando a referência [111], 22% abaixo do relatado em [107], em ambos os casos com eletrodos de 25/75 mm. Para o NKN não foi encontrada outra medição além da referência [17], que diz respeito a uma medição na época do projeto SUPERCABO. Considerando essa medição o valor encontrado foi neste teste foi bastante superior, cerca de 37%.

4.4 – Medidas de tangente de perdas e constante dielétrica - baixa tensão

As medições de tangente de perdas e constante dielétrica em baixa tensão foram feitas utilizando um medidor LCR (E4980A Agilent – 20 a 2 MHz), sendo realizadas medições em temperatura de 27°C (300 K), ambiente climatizado com ar condicionado e na temperatura do banho de N2L (77 K). Seguindo o manual do fabricante, as medições foram realizadas após o equipamento ter ficado ligado por no mínimo de 30 minutos. Não foi possível desenvolver uma estratégia para medir a pressão exercida pelas placas nas amostras, mas um torque padrão de 3 N.m foi aplicado utilizando um torquímetro. Os dados apresentados na sequência referem-se aos dados de apenas uma camada isolante. Foram utilizadas duas faixas de frequência, a primeira entre 20 e 100 Hz e a outra entre 100 e 1000 Hz.

As Figuras 38 e 39 mostram o comportamento da tangente de perdas nos dois intervalos de frequência considerados na situação de temperatura ambiente. Para a frequência de 60 Hz, os valores de NKN, Nomex 410 e Kapton HN 100 foram iguais a 0,014, 0,007 e 0,004, respectivamente. Os dados do fabricante para Kapton HN e Nomex 410 mostram valores de 0,0018 e 0,006. Embora a frequência de interesse esteja na faixa de 20 a 100 Hz, verificou-se durante o experimento que, nesta região, o valor medido pelo medidor LCR apresenta flutuação mais significativa, principalmente na medida da tangente de perdas. De certa forma, isto pode ser esperado, pois com menor frequência a impedância medida é maior, gerando correntes mais baixas e mais suscetíveis a flutuações. Para a tangente de perdas e considerando o NKN e o Nomex 410, foram verificados pontos com um comportamento de distanciamento abrupto de uma linha de tendência das medidas para esses materiais. Como já se percebia uma maior flutuação das

medições, realizadas automaticamente pelo equipamento, mesmo aumentando o número de médias, esse comportamento permaneceu.

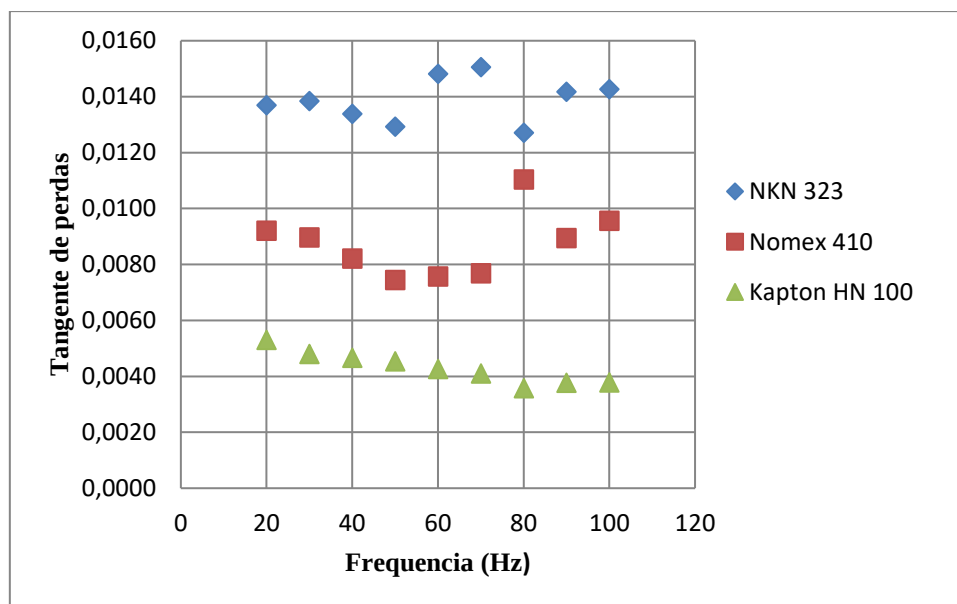


Figura 38 - Tangente de perdas em temperatura ambiente na faixa de 20 a 100 Hz.

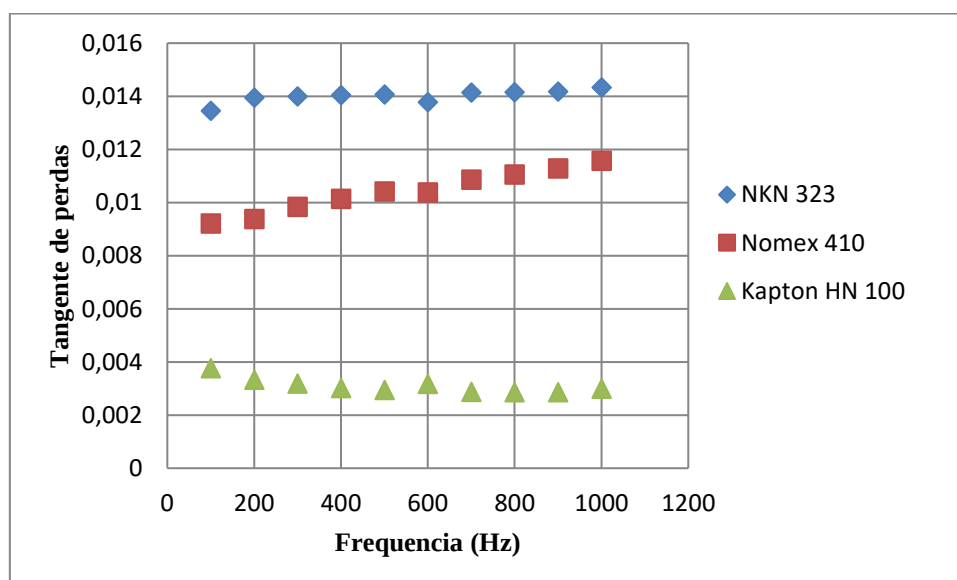


Figura 39 - Tangente de perdas em temperatura ambiente na faixa de 100 a 1000 Hz.

As Figuras 40 e 41 mostram o comportamento da permissividade relativa nos dois intervalos de frequência e também para a condição de temperatura ambiente. Para a frequência de 60 Hz, os valores de NKN, Nomex 410 e Kapton HN foram iguais a 3,09, 2,71 e 2,45, respectivamente. Os dados de fabricante estavam disponíveis apenas para o Kapton e Nomex mostram um intervalo de valores: 3,0 a 3,8 e 2,5 a 3,2. Em ambas as

medições, tangente de perdas e permissividade relativa, o NKN apresentou valores mais elevados, o que representa, neste contexto, um resultado ruim para o contexto de perdas dielétricas totais. Na sequência veremos o comportamento em situação criogênica.

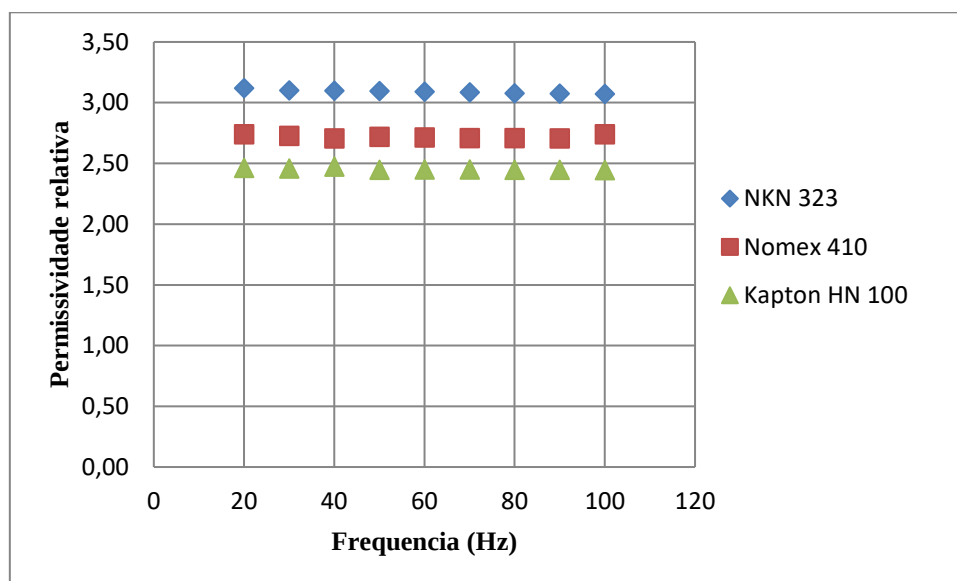


Figura 40 - Permissividade relativa em temperatura ambiente na faixa de 20 a 100 Hz.

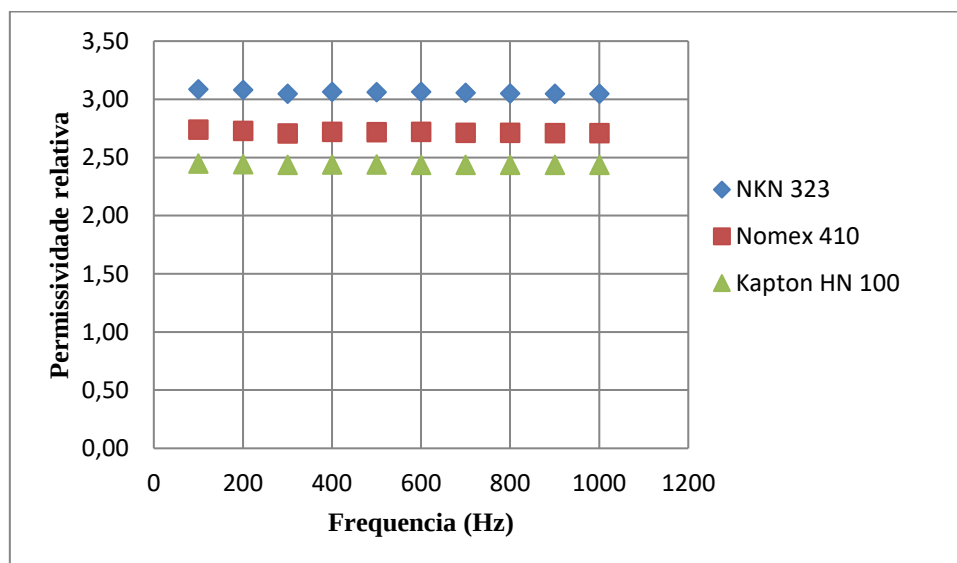


Figura 41 - Permissividade relativa em temperatura ambiente na faixa de 100 a 1000 Hz.

Para as medições em situação criogênica o porta-amstras foi colocado dentro de uma caixa de EPS, despejando-se N2L posteriormente. Foi respeitado o tempo de 25 minutos para estabilização da temperatura. Não foi possível desenvolver uma estratégia que permitisse obter as espessuras das amostras quando em banho de N2L, ou seja, após efeitos de contração térmica. Como no caso anterior, os dados apresentados na sequência

referem-se aos dados de apenas uma camada isolante. Porém, foi verificada uma dificuldade de medição na região abaixo de 100 Hz, com uma flutuação bem maior que a verificada nas medições em temperatura ambiente. Desta forma os resultados das medições em banho N2L são apresentados apenas na segunda faixa de frequência, ou seja, de 100 a 1 kHz (Figuras 42 e 43).

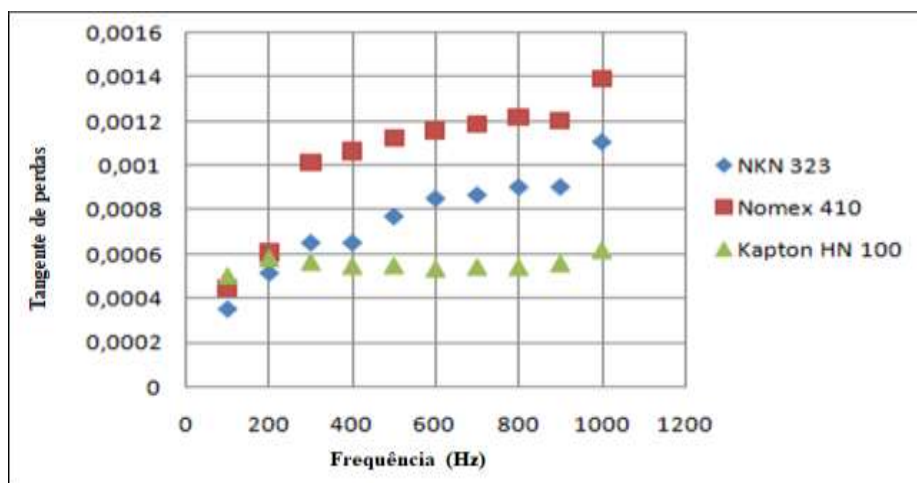


Figura 42 - Tangente de perdas em banho de N2L na faixa de 100 a 1000 Hz.

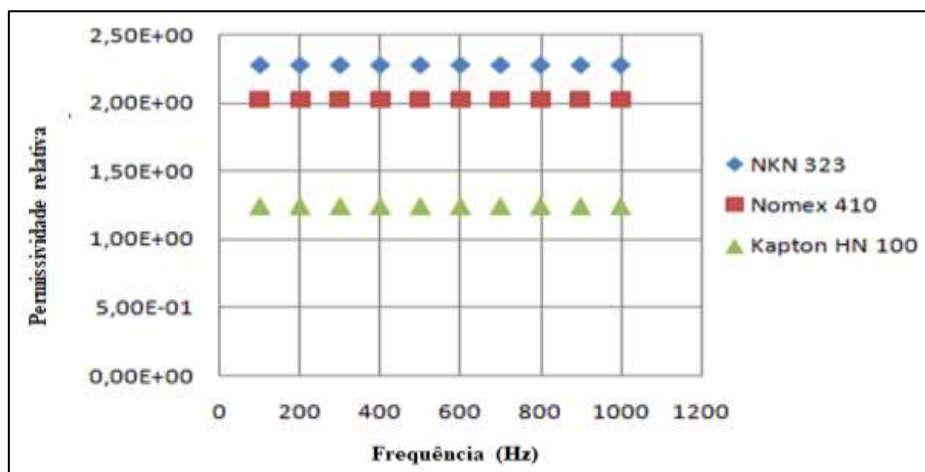


Figura 43 – Permissividade relativa em banho de N2L na faixa de 100 a 1000 Hz.

Apesar da melhora na condição de medição na faixa de frequências mais altas, os dados até 200 Hz ainda parecem sofrer flutuações em função da questão da temperatura e nível de sinal. Embora a frequência de interesse (60 Hz) não tenha sido medida no N2L, acredita-se que a medição em 100 Hz tenha a mesma ordem de grandeza. Nesse sentido, por comparação, é possível notar que a tangente de perdas da ordem de 10^{-2} para o NKN à temperatura ambiente caiu para algo em torno de 10^{-4} . Sobre a permissividade, o NKN

e o Nomex caíram 25%, enquanto Kapton caiu cerca de 48%, o que chamou a atenção pois este material é conhecido por possuir estabilidade de suas propriedades em ampla faixa de temperaturas. Por outro lado, trata-se um filme muito fino e pode ter sofrido com os efeitos de contração dos eletrodos e a pressão aplicada. No geral os valores são todos menores em banho de N2L.

Considerando as Tabelas 8 e 9 da seção 4.2, onde as medidas foram feitas em alta tensão, é possível ver que os valores de permissividade para o NKN e o Nomex 410 em baixa tensão são mais baixos, cerca de 2,3 e 2,1 contra 3,0 e 2,4 aproximadamente, mas como não foi possível executar as mesmas medidas em alta tensão para o Kapton HN, não se pode confirmar o mesmo comportamento de queda em relação a medição com alta tensão. Para a tangente de perdas ficou claro o menor valor em temperatura criogênica, e comparando com as medidas da seção 4.2 aos valores também foram menores, da ordem de 10^{-4} para Nomex 410 e NKN, contra valores na ordem de 10^{-3} em alta tensão.

4.5 – Medidas de rigidez dielétrica – eletrodos iguais

Os resultados experimentais dos ensaios de rigidez dielétrica dos três materiais, NKN, Nomex 410 e Kapton HN, com eletrodos cilíndricos iguais e com diâmetro de 6,4 mm estão listados na Tabela 13. Neste caso, a temperatura ambiente foi de 307 K, pois foi realizada em um galpão do LEAT-UFMG, ou seja, fora do ambiente climatizado. Para a situação criogênica, o experimento também foi conduzido em banho aberto de nitrogênio líquido a 77 K. Após imersão do porta-amostras em N2L foi respeitado o tempo de 25 minutos para equilíbrio térmico como nos demais testes. A tensão foi aplicada utilizando o mesmo conjunto (transformador, variac e pontas de prova) utilizado no caso com eletrodos desiguais (25/75 mm)

Tabela 13 – Valores de rigidez dielétrica em temperatura ambiente e em banho de N2L para eletrodos iguais (6,4 mm)

Material	Rigidez dielétrica (kV/mm)	
	Temperatura ambiente (307 K)	Banho de N2L (77 K)
NKN 323	69,89	78,53
Nomex 410	35,10	73,78
Kapton HN 100	216,40	280,93

De um modo geral o NKN melhorou seu desempenho na situação criogênica, mas em percentual inferior aos demais (12%). Destacou-se a melhoria do Nomex 410 (110%), o que é surpreendente. Os valores para Nomex 410 e Kapton HN 100 foram encontrados na literatura [111], neste caso em N2L, e em folhas de dados do fabricante para temperatura ambiente [123, 125]. Os valores são compatíveis, para o Nomex 410 é indicado 34 kV/mm em temperatura ambiente e 72,8 kV/mm em N2L (eletrodos de 6,4 mm), e o Kapton HN 288 kV/mm em N2L. O valor do Kapton HN em temperatura ambiente divergiu do valor do fabricante, ficou bem abaixo do valor encontrado. Isolar o fator neste caso precisa considerar que existem diversas razões para as diferenças nos resultados. Mas os resultados em foco são os em N2L e eles são bastante concordantes com os encontrados na literatura, tanto para o Nomex 410 quanto para o Kapton HN, cerca de 3% de divergência para ambos. De toda forma o Nomex 410 e o NKN estão mais sujeitos a efeitos da deformação, porosidade e umidade. Enquanto que o Kapton HN pode sofrer mais com os efeitos da rugosidade dos eletrodos, da possível presença de contaminante em sua superfície e de formação de uma lacuna entre este e a superfície do eletrodo. Por fim, os valores de rigidez em N2L para o NKN e o Nomex 410, encontrados neste teste, são muito próximos aos valores encontrados no arranjo com eletrodos desiguais proposto e testado (seção 4.3), que foram de 78,9 e 76,1 kV/mm, respectivamente, ou seja, cerca de 4% de diferença. E segundo [111] os dois arranjos de eletrodos possuem um mesmo fator de utilização do campo, que corresponde a razão entre o valor médio do campo e o valor máximo.

4.6 – Cálculo de isolamento para um protótipo de CSE - Exemplo

Para cálculo do número de tiras de material dielétrico para compor a isolamento de um protótipo de CSE de 10 m, foram consideradas as seguintes premissas: tensão de operação de 13,8 kV, raio interno da camada isolante de 15,40 mm e rigidez dielétrica do NKN em N2L igual a 78,53 kV/mm (Tabela 13). Neste caso, conforme a equação (2.6), que considera somente o critério da rigidez dielétrica, ou seja, sem considerar testes impulsivos e de descargas parciais, tem-se uma espessura mínima de 0,102 mm, que, somado a um fator de segurança arbitrado em 50%, dá uma espessura de 0,153 mm, ou seja, menor que a de uma camada de material (Tabela 6). No entanto, assumindo uma

sobreposição mínima de 50% entre as camadas, serão necessárias 2 camadas para construção de um protótipo de CSE nestas condições.

Foram consideradas duas larguras de fita para o ângulo de enrolamento (cortes disponíveis comercialmente): $\lambda_1 = 15$ mm e $\lambda_2 = 20$ mm. Considerando as equações (3.20) e (3.21) foi determinado o número de fitas para cada caso e os respectivos ângulos de inclinação. Por fim, considerando um comprimento de protótipo igual a 10 m e margem de 10% (cortes, perdas de material), as equações (3.22) e (3.23) fornecem a quantidade total de fita em cada caso (Tabela 14).

Tabela 14 - Dados utilizados nos cálculos do comprimento total de fita de material isolante para um protótipo de CSE.

	Número de camadas	Número de fitas	Ângulo de enrolamento	Comprimento total
Caso 1	2	6	21,54°	141,92 m
Caso 2	2	4	34,23°	106,44 m

Havia a expectativa inicial da possibilidade de construção de mini-modelos correspondentes a geometria do protótipo de CSE, pois seria mais um teste importante com respeito a suportabilidade e em condições mais próximas da operação real. Contudo, não foi possível a conclusão desta etapa, que como será visto na seção que segue, ficou como um trabalho futuro, juntamente com outras possibilidades não trabalhadas nesta tese. O cálculo exemplificado acima permite observar os efeitos do valor da rigidez, da margem de segurança (que pode ser mais ou menos conservativa), a sobreposição de material nos intervalos ou descontinuidades em cada camada de enrolamento, o passo de enrolamento e nível de tensão sobre a quantidade de material. Tomando os resultados da última coluna da Tabela 14, juntamente com a espessura, largura e densidade superficial da fita de material isolante é possível estimar a carga térmica adicional que deverá ser considerada no projeto do sistema de refrigeração (Equações 3.25 a 3.27). Saber se esse valor de isolamento é de fato suficiente carece de realização de teste do modelo.

Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões de Continuidade

5.1 – Conclusões

Este trabalho apresentou uma contribuição para o processo de caracterização de dielétricos em condições criogênicas e em alta tensão, a serem utilizados como isolantes elétricos em projetos de dispositivos supercondutores, em especial CSEs. O equipamento e metodologia apresentados passaram por teste de conceito, que comparou as medições com dados da literatura e outros dados obtidos durante a realização do trabalho de tese. A proposta discutida e os resultados das medições foram submetidos a congressos e periódicos especializados [134,135,136], tanto nas áreas de supercondutividade aplicada quanto de engenharia de alta tensão. O Anexo 1 lista todos os trabalhos resultantes da tese.

Inicialmente foi apresentada uma proposta de um arranjo experimental versátil e que tem o mérito de permitir a realização de medições de diferentes propriedades que caracterizam materiais dielétricos, a saber, rigidez dielétrica, constante dielétrica e tangente de perdas, em banho criogênico com N₂L, permitindo caracterizações de materiais para uso em CSEs e em toda HTSTec, contribuindo de forma relevante para viabilizar esse tipo de tecnologia no setor elétrico nacional. O sistema de medição foi concebido com base em normas brasileiras (NBR 5405) e internacionais (ASTM D149 e ASTM D150), tendo como premissa a utilização de um mesmo par de eletrodos desiguais (25/75 mm) e porta-amostras em uma câmara criogênica para as medições de todos os parâmetros citados. A pertinência e relevância de tais investigações são corroboradas por referências recentes, com destaque para uma brochura do Cigré [93] e uma extensa revisão sobre materiais dielétricos para CSEs [28].

No processo de construção do arranjo, a proposta de uso de câmara criogênica maior e feita de TVE G10 teve de ser abandonada, considerando-se o custo deste material, o custo de confecção da câmara cilíndrica e o gasto com N₂L, por se tratar de sistema aberto (pressão atmosférica). Foi utilizada uma câmara mais simples e menos resistente, porém funcional, feita de EPS e com cerca de 15 litros de volume total. Esta foi uma solução de contorno e de baixo custo, encontrada no desenrolar da pesquisa. Destaca-se que não foram identificadas deficiências em função do uso da câmara simples, o que indica sua futura utilização sempre que os custos forem uma condição limitadora, o que se configura

em uma contribuição para futuras pesquisas na área. Os eletrodos assimétricos, 25 e 75 mm, utilizados no arranjo proposto foram confeccionados de cobre e latão, já os utilizados nos testes com eletrodos iguais (6,4 mm) e em baixa tensão foram feitos em alumínio. Todos foram construídos utilizando oficina usinagem disponibilizada pelo CEFET-MG.

Foram construídos três porta-amostras, o primeiro relativo ao arranjo proposto com eletrodos desiguais (25/75 mm), o segundo para teste de rigidez com eletrodos iguais (6,4 mm) e um terceiro para medidas em baixa tensão (constante dielétrica e tangente de perdas). Para se conseguir o alinhamento dos eletrodos no primeiro porta-amostras, foi construída estrutura com duas placas de TVE G10 e discos de PTFE perfurados. Espaçadores também feitos de PTFE foram instalados de modo a permitir a visualização dos eletrodos, da amostra de dielétrico em teste, bem como permitir a penetração do N2L na região dos eletrodos. Para o segundo porta-amostras, foi construída estrutura semelhante, mas dessa vez utilizou-se duas placas de PTFE. Por fim, o terceiro consistiu de um capacitor, com ambas placas feitas de alumínio, onde uma das placas, era ajustada por meio de um parafuso feito de PTFE, sobre o qual se aplicava um torque padrão para garantir um bom contato da amostra do material dielétrico com as placas.

O material laminado NKN e o Nomex 410, um de seus constituintes, foram utilizados no teste de conceito do arranjo proposto. Neste teste os valores de tangente de perdas e permissividade relativa foram obtidos também por um equipamento comercial. Os resultados com o arranjo mostram que a permissividade relativa e o fator de dissipação do Nomex 410 aumentam um pouco com o aumento da tensão aplicada. Já para o equipamento comercial, a permissividade seguiu a mesma tendência, enquanto que a tangente de perdas de ambos os materiais aumentou muito (uma ordem de grandeza) ao atingir 12 kV de tensão. Por outro lado, comparando-se a permissividade, não houve grande diferença (6 a 13%) entre as duas medições para os dois materiais em todos os níveis de tensão atingidos. Chamou a atenção o fato de que na medida com o arranjo o fator de dissipação do NKN diminuiu com o mesmo aumento da tensão aplicada e aumentou pouco para o Nomex 410 quando atingiu 12 kV. Como foram poucas as medições, em função de disponibilidade de amostras e equipamento, essas questões devem ser abordadas com mais detalhes em estudos futuros. Os valores de $\tan \delta$ para o NKN e Nomex 410 em diferentes tensões estão na faixa de 10^{-3} até 8 kV, tanto nas medições com Ponte Schering quanto com o outro equipamento. Para os valores de rigidez foram encontrados valores de 78,9 e 76,1 kV/mm, respectivamente.

Utilizando um arranjo de eletrodos iguais (6,4 mm), foram obtidas medidas de rigidez dielétrica para os três materiais (NKN, Nomex 410 e Kapton HN) em temperatura ambiente e em N2L. O NKN melhorou pouco (12%) sua performance em N2L quando comparado com a temperatura ambiente, e atingiu valor de 78,5 kV/mm, semelhante ao medido com arranjo proposto 78,9 kV/mm. Os valores para o Nomex 410 foram de 73,8 kV/mm em N2L contra 72,8 kV/mm em uma das referências, e 76,1 kV/mm no arranjo proposto. O Kapton HN registrou 280,9 kV/mm na medida em N2L contra 288 kV/mm para o mesmo eletrodo na mesma referência e 188 kV/mm para eletrodos de (25/75 mm), semelhantes ao do arranjo proposto.

Apesar do inerente interesse em medidas em alta tensão, dada a aplicação dos materiais em projetos de CSEs e o arranjo concebido, foi proposta uma caracterização do NKN e seus constituintes em baixa tensão, considerando medidas de tangente de perdas e da permissividade relativa. Estas medições foram realizadas tanto em temperatura ambiente quanto em temperatura criogênica utilizando um medidor LCR nas frequências de 100 a 1kHz, e foram encontradas dificuldades para estabilizar as medidas abaixo dos 100 Hz nas medidas com N2L. As medidas mostraram queda nas perdas dielétricas e certa estabilidade da permissividade quando na temperatura do N2L, e em geral ambos os valores foram também menores em relação aos encontrados no teste com o arranjo proposto em alta tensão. Por fim, utilizando o dado de rigidez dielétrica do NKN, foi feito um cálculo de espessura e quantidade de material necessário para o isolamento de um hipotético protótipo de CSE em nível de tensão de distribuição, sem considerar teste de impulso e descargas parciais. O que apontou duas possibilidades de enrolamento com 2 camadas de NKN.

Importante lembrar que o desenvolvimento desta pesquisa enfrentou diversos desafios de ordem científica, tecnológica e estrutural, mas os resultados obtidos foram satisfatórios dentro da proposta apresentada. Dentre estes desafios estavam a disponibilidade de equipamento, em especial a Ponte Schering e capacitor padrão, o que foi conseguido com colaboração do LAT-EFEI, e foi decisivo para obtenção de parte das medidas que verificaram a funcionalidade da proposta de arranjo e permitiram a submissão de dois trabalhos. Uma questão estrutural foi a disponibilidade de amostras dos materiais estudados, que foram obtidas em pequenas quantidades por via de compra direta e também por doação da empresa, a Dupont Brasil. A parte estrutural também diz respeito ao acesso a estrutura de criogenia, frascos Dewar e nitrogênio líquido, o primeiro

conseguido por empréstimo e segundo por aquisição a cada medição, ambos junto ao Departamento de Física da UFMG. Por fim o efeito da pandemia de COVID-19 afetou diretamente a condução dos trabalhos dentro da universidade, gerando praticamente mais de um ano de interrupção e incertezas sobre a execução dos trabalhos. Finalizando, é possível concluir que o trabalho realizado avançou na questão da caracterização de dielétricos para uso em condições criogênicas, tanto com relação ao arranjo para realização dos testes quanto nos parâmetros determinados para os materiais citados, oferecendo uma contribuição relevante para esta área de pesquisa e desenvolvimento, uma vez que há poucos dados relativos aos materiais analisados na situação de criogenia.

5.2 – Sugestões de continuidade

Como é esperado, ainda que feito de forma objetiva e cuidadosa, um trabalho de tese não esgota o tema de pesquisa, na realidade responde a algumas questões manifestadas nos objetivos principais do trabalho, e acaba por criar novas indagações e possíveis novos campos para investigação. Além disso, pelas inerentes questões de tempo e condições de aprofundamento, principalmente em trabalhos eminentemente experimentais e com certas restrições, surgem questões que embora sejam pensadas não conseguem ser realizadas ou finalizadas no decorrer do tempo disponibilizado para conclusão dos trabalhos. Nesse sentido são apresentados a seguir algumas sugestões de trabalhos futuros, que poderão ser trabalhados em oportunidade de seguimento da pesquisa ou continuados por outros que julguem importantes as questões e apontamentos feitos a seguir.

1) Obtenção de estrutura para repetição de mais ensaios com os materiais utilizados nos testes descritos nesta tese, bem como com outros materiais, gerando dados para uma análise estatística mais substancial e análise de incertezas de medição. A questão da redução das perdas no NKN com o aumento de tensão precisa ser investigada. Também é importante analisar o desempenho de mais camadas de material, se aproximando de um dado mais próximo no que diz respeito ao projeto de um cabo. Tudo isso passa pela primeiramente pela obtenção ou empréstimo de um conjunto com Ponte Schering e capacitor padrão, bem como outro instrumento de medida de perdas dielétricas e capacitância em alta tensão, como o CP 100.

2) Construção de mini-modelos de CSEs, com vistas ao estudo apenas do isolamento elétrico. Com estes será possível a realização de ensaios com tensão impulsiva, lembrando que existe certa quantidade de fitas de NKN cortadas em largura de 20 mm, que seriam utilizadas na construção do protótipo de CSE previsto no projeto SUPERCABO. Analisar o desempenho em tensão impulsiva também é importante, e não foi possível realizar essa investigação no decorrer dos trabalhos, bem como a avaliação quanto às descargas parciais.

3) Estudar, conceber e analisar a viabilidade de realização de ensaio de envelhecimento em ambiente criogênico. Essa é uma questão que também corresponde a uma lacuna no desenvolvimento de isolamento criogênico para CSEs, e muito importante para dar maior previsibilidade sobre o desempenho e vida útil deste tipo de isolamento. Apesar do ambiente de baixa temperatura corresponder a uma expectativa de menor taxa de envelhecimento e uma maior vida útil.

4) Realizar testes com mais eletrodos, considerando campos uniformes e não-uniformes. Em especial considerando reproduzir as condições de testes encontradas na literatura, confirmando ou não os valores encontrados e permitindo uma melhor comparação dos valores de rigidez dielétrica. Também é importante pensar em um controle automático e mais preciso da rampa de aplicação de tensão, e aplicação de diferentes valores de pressão sobre a amostra, ideia originalmente pensada na câmara em TVE G10.

5) Obtenção de amostras de PPLP e outros materiais isolantes utilizados em CSEs para testes no aparato desenvolvido. Apesar do teste de conceito apresentado nesta tese, entendemos que é desejável um maior número de medições, e que estas envolvam materiais já testados, incluindo aí o PPLP, o material mais utilizado na construção de CSEs com dielétrico frio.

Referências Bibliográficas

- [1] M. N. Wilson. A century of superconducting technology, *AIP Conf. Proc.* 1435, 12 June 2012.
- [2] B. G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini and H. Ohsaki, "High-Temperature Superconductivity: A Roadmap for Electric Power Sector Applications, 2015–2030," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1-7, June 2017, Art no. 0500907, doi: 10.1109/TASC.2017.2671680.
- [3] T. Janowski *et al.*, "Superconducting devices for power engineering," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 130, no. 2, pp. 537–544, 2016, doi: 10.12693/APhysPolA.130.537.
- [4] J. X. Jin *et al.*, "HTS power devices and systems: Principles, characteristics, performance, and efficiency," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, pp. 1–26, 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2602346.
- [5] G. Angeli, B. G. Marchionini, Y. Yamada, H. Ohsaki and L. Martini, "Technology Collaboration Programme on High-Temperature Superconductivity (HTS): HTS Applications and the Need for International Standardization Activity," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, June 2018, Art no. 5000404, doi: 10.1109/TASC.2018.2793857.
- [6] IEA - International Energy Agency, High Temperature Superconductivity - A Roadmap for Electric Power Sector 2015-2030, Release, October 2015.
- [7] Y. Wang, "*Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering*", North China Electric Power University, 1st ed., New Delhi, John Wiley & Sons, 2013.
- [8] M. Noe and M. Steurer. High-temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status. Superconductor. *Science and Technology*, 20(3): R15–R29, 2007.
- [9] H. Okubo, ed. "Status of development and field test experience with high temperature superconducting power equipment". CIGRE Report 418, 2010.
- [10] J. X. Jin *et al.*, "HTS power devices and systems: Principles, characteristics, performance, and efficiency," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, pp. 1–26, 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2602346.
- [11] J. Bock, M. Bludau, R. Dommerque, A. Hobl, S. Kraemer, M. O. Rikel, *et al.* "HTS fault current limiters – first commercial devices for distribution level grids in Europe". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011; pp. 1202–1205.
- [12] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe and A. Hobl, "AmpaCity — Installation of advanced superconducting 10 kV system in city center replaces conventional 110 kV

cables," 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Beijing, China, 2013, pp. 323-326, doi: 10.1109/ASEMD.2013.6780785.

[13] A. L'Abbate, G. Migliavacca, T. Pagano, and A. Vaféas, "Advanced transmission technologies in Europe: A roadmap towards the smart grid evolution," *2011 IEEE PES Trondheim PowerTech Power Technol. a Sustain. Soc. POWERTECH 2011*, pp. 1–8, 2011, doi: 10.1109/PTC.2011.6019186.

[14] S. Nishijima *et al.*, "Superconductivity and the environment: A Roadmap," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 11, 2013, doi: 10.1088/0953-2048/26/11/113001.

[15] V. S. Andrade, S. E. M. de Oliveira, M. A. Neves, M. A. P. do Rosário. Limitação da Corrente de Curto-Circuito Utilizando Blocos Cerâmicos de YBCO [online]. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/96441.PDF>>. Acesso em: 04/09/2019.

[16] M. A. Neves *et al.*, "Development of the First Brazilian Project on Superconducting Power Cable," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1-5, April 2016, Art no. 5400805, doi: 10.1109/TASC.2016.2521582.

[17] M. A. Neves *et al.*, "Advances in the First Brazilian Project on an HTS Power Cable," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-5, June 2018, Art no. 5400405, doi: 10.1109/TASC.2018.2801758.

[18] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE. Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Agenda estratégica de CT&I no setor elétrico brasileiro. Brasília, DF: 2017. 622 p.

[19] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE. Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de transmissão de energia elétrica. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2017. v.4. 363 p.

[20] G. Angeli, B. G. Marchionini, Y. Yamada, H. Ohsaki and L. Martini, "Technology Collaboration Programme on High-Temperature Superconductivity (HTS): HTS Applications and the Need for International Standardization Activity," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, June 2018, Art no. 5000404, doi: 10.1109/TASC.2018.2793857.

[21] Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020 1v.: il.

[22] D. Van Delft, "History and significance of the discovery of superconductivity by Kamerlingh Onnes in 1911," *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 479, pp. 30–35, 2012, doi: 10.1016/j.physc.2012.02.046.

[23] H. K Onnes. "Further experiments with liquid helium. G. On the electrical resistance of pure metals, etc. VI. On the sudden change in the rate at which the resistance of

mercury disappears.” *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences*, v. 14, n. 14, pp. 818–821, 1911.

[24] D. Van Delft, Peter. Kes. "The discovery of superconductivity, *Physics Today*, vol. 63, pp. 38–43.

[25] R. Hott, R. Kleiner, T. Wolf, and G. Zwicknagl. "Review on Superconducting Materials". *Digital Encyclopedia of Applied Physics*. March 2019. 2016.

[26] Cryogenic Engineering, ed. B.A. Hands (1986) Academic Press.

[27] D. Uglietti, "A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: From wires and tapes to cables and conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 5, 2019, doi: 10.1088/1361-6668/ab06a2

[28] A. Paramane, M. Awais, T. Chandrasekaran, M. Junaid, M. T. Nazir and X. Chen, "A Review on Insulation and Dielectrics for High- Temperature Superconducting Cables for Power Distribution: Progress, Challenges, and Prospects," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 6, pp. 1-31, Sept. 2023, Art no. 4801831, doi: 10.1109/TASC.2023.3267055.

[29] H. Takigawa, H. Yumura, T. Masuda, M. Watanabe, Y. Ashibe, H. Itoh, C. Suzawa, M. Hirose, K. Yatsuka, K. Sato et al., "The installation and test results for albany hts cable project," *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 463, pp. 1127–1131, 2007.

[30] V. E. Sytnikov *et al.*, "The Test Results of AC and DC HTS Cables in Russia," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1-4, April 2016, Art no. 5401304, doi: 10.1109/TASC.2016.2535150.

[31] A. Rose-innes, E. Rhoderick, "Introduction to superconductivity". 1 ed. New York, Pergamon Publishing Company, 1969.

[32] W. Meissner, R. Ochsenfeld. "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit", *Naturwissenschaften*, v. 21, n. 44, pp. 787–788, November 1933.

[33] M. Tinkham, "Introduction to Superconductivity". 2 ed. New York, McGraw- Hill Science / Engineering/Math, October 1995.

[34] T. P. Sheahen. "Introduction to High-Temperature Superconductivity". New York, Plenum Press, 1994.

[35] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Microscopic Theory of Superconductivity", *Phys. Rev.*, v. 106, pp. 162–164, April 1957.

[36] J. G. Bednorz, K. A. Müller "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", *Z. Physik B*, v. 64, n. 2, pp. 189–193, 1986.

- [37] M. K. Wu *et al.*, “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Yb-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 9, pp. 908–910, 1987, doi: 10.1103/PhysRevLett.58.908.
- [38] C. Michel, M. Hervieu, M. M. Borel, et al. “Superconductivity in Bi- Sr-Cu-O system”, *Z. Physik B*, v. 68, n. 4, pp. 421–423, 1987.
- [39] S. Kondoh, Y. Ando, M. Onoda, et al. “Superconductivity in Tl-Ba- Cu-O System”, *Solid State Commun.*, v. 65, n. 11, pp. 1329–1331, March 1988.
- [40] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, “Superconductivity at 39 K in magnesium diboride,” *Nature*, vol. 410, no. 6824, pp. 63–64, Mar. 2001, doi: 10.1038/35065039.
- [41] A. Polasek *et al.*, “Application of IEC 61788-3 for the determination of the DC critical current of high temperature superconductors of second generation,” CIGRE Sess. 45 - 45th Int. Conf. Large High Volt. Electr. Syst. 2014, vol. 2014-Augus, no. November, 2014, doi: 10.13140/2.1.4792.6720.
- [42] W. T. B. Sousa *Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [43] J. Langston, M. Steurer, S. Woodruff, T. Baldwin, and J. Tang, “A generic real-time computer simulation model for superconducting fault current limiters and its application in system protection studies,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2 PART II, pp. 2090–2093, 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849459.
- [44] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, R. Dias, C. F. T. Matt, and R. de Andrade, “Thermal-electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters,” *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 62, pp. 97–109, 2014, doi: 10.1016/j.cryogenics.2014.04.015.
- [45] D. I. Doukas, “Superconducting Transmission Systems: Review, Classification, and Technology Readiness Assessment,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, 2019, doi: 10.1109/TASC.2019.2895395.
- [46] E. A. A. Junior, “Impacto Econômico das Aplicações de Supercondutividade de Alta Temperatura no Sistema Elétrico Brasileiro”. Tese de Doutorado., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- [47] R. Zuijderduin, “Integration of High-Tc Superconducting Cables in the Dutch Power Grid of the Future,” Technische Universiteit Delf, 2016.
- [48] C. Rey (Editor), “*Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications*”, 1st ed., Elsevier Science, 2015.
- [49] Z. Zhang, “Electrical characterizing of superconducting power cable consisted of Second-Generation High-temperature superconducting tapes,” University Bath, 2016.

- [50] Y. Ivanov *et al.*, "Current imbalance and AC losses of long distance DC HTS cable," *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Shanghai, China, 2015, pp. 578-579, doi: 10.1109/ASEMD.2015.7453712.
- [51] V. S. Vysotsky, A. Nosov, and I. V. Antukhov, "Hybrid Energy Transfer Line With Liquid Hydrogen and Superconducting MgB₂ Cable — First Experimental Proof of Concept," no. June 2015, 2013, doi: 10.1109/TASC.2013.2238574.
- [52] R. Zuijderduin, O. Chevtchenko, J. J. Smit *et al.*, "AC HTS transmission cable for integration into the future EHV grid of the Netherlands," *Superconductivity Centennial Conference 2011*, vol. 36, pp. 1149-1152, 2012.
- [53] T. L. Baldwin, M. Steurer, and Y. Z. Liu, "A novel method of controlling the effective impedance of a cold-dielectric, very low impedance, superconducting cable," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1783-1786, Jun, 2005.
- [54] A. P. Malozemoff, A. Kehrli, J. Diaz de Leon, S. Kalsi. Superconductor technologies for a controllable and reliable high capacity grid. In: *Proceedings of PSCE04 New York*, October 10–13, 2004. 2004 IEEE Catalog No. 04EX943C
- [55] *Application Guide for AC High Temperature Superconducting (HTS) Cables*, AMSC, February, 2020.
- [56] A. Ballarino *et al.*, "The BEST PATHS Project on MgB₂ Superconducting Cables for Very High Power Transmission," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1-6, April 2016, Art no. 5401705, doi: 10.1109/TASC.2016.2545116.
- [57] H. Thomas, A. Marian, A. Chervyakov, S. Stückrad, D. Salmieri, C. Rubbia, Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 55, 2016, Pages 59-72, ISSN 1364-0321.
- [58] N. Magnusson *et al.*, "SCARLET – A European Effort to develop HTS and MgB₂ Based MVDC Cables," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, pp. 1-5, May 2024, Art no. 5400205, doi: 10.1109/TASC.2023.3340646.
- [59] L. Xiao *et al.*, "Development of a 10 kA HTS DC Power Cable," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, pp. 5800404-5800404, June 2012, Art no. 5800404, doi: 10.1109/TASC.2011.2176090.
- [60] A. Morandi. HTS dc transmission and distribution: concepts, applications and benefits, *Superconductor Science. Technology*, 28, 2015, DOI 10.1088/0953-2048/28/12/123001.

- [61] M. Stemmle, F. Merschel, M. Noe et al., "AmpaCity - Installation of AdvancedSuperconducting 10 kV System in City Center Replaces Conventional 110 kV Cables", 2013, IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), pp. 323-326, 2013.
- [62] Y. X. Tan *et al.*, "Resistive type superconducting fault current limiter and current flowing time," *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Shanghai, China, 2015, pp. 290-291, doi: 10.1109/ASEMD.2015.7453578.
- [63] P. Tixador, Fault current limiter based on high temperature superconductors, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Volume 615, 2023, 1354398, ISSN 0921-4534.
- [64] B. Lee, K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H.G Lee, H. R. Kim, *et al.* Design and experiments of novel hybrid type superconducting fault current limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008;18:624–627.
- [65] Guilherme Gonçalves Sotelo, Gabriel dos Santos, Felipe Sass, Bruno Wanderley França, Daniel Henrique Nogueira Dias, Marcio Zamboti Fortes, Alexander Polasek, Rubens de Andrade Jr., A review of superconducting fault current limiters compared with other proven technologies, *Superconductivity*, Volume 3, 2022, 100018, ISSN 2772-8307.
- [66] S. Hellmann, "Development on Superconducting Current Limiting Transformers," 2018, [Online]. Available: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000088555>.
- [67] V. Lebedev, "Transformer basics," 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Nashville, TN, USA, 2007, pp. 356-359, doi: 10.1109/EEIC.2007.4562642.
- [68] K. Funaki, M. Iwakuma, M. Takeo, K. Yamafuji, J. Suehiro, and M. Hara, "Preliminary tests of a 500 kVA-class oxide superconducting transformer cooled by subcooled Nitrogen," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, no. 2 PART 1, pp. 824–827, 1997, doi: 10.1109/77.614630.
- [69] F. Irannezhad and H. Heydari, "Conducting a Survey of Research on High Temperature Superconducting Transformers," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 6, pp. 1-13, Sept. 2020, Art no. 5500613, doi: 10.1109/TASC.2020.2983970.
- [70] J. Gerhold, "Properties of cryogenic insulants", *Cryogenics*, Vol. 38, No. 11, pp. 1063-1081, 1998 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(98\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00094-0).
- [71] S. Nishimachi, N. Hayakawa, H. Kojima, M. Hanai and H. Okubo, "Pressure and temperature dependence of breakdown characteristics of sub-cooled liquid nitrogen," 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2012, pp. 440-443, doi: 10.1109/CEIDP.2012.6378814.

- [72] D. Gromoll¹, R. Schumacher¹ and C. Humpert, Dielectric strength of insulating material in LN₂ with thermally induced bubbles. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1559, 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019) 1-5 September 2019, Glasgow, UK. DOI 10.1088/1742-6596/1559/1/012087
- [73] T. Nitta, “Superconducting rotating machines: A review of the past 30 years and future perspectives,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1054, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742
- [74] Calvin C.T. Chow, Mark D. Ainslie, K.T. Chau, High temperature superconducting rotating electrical machines: An overview, *Energy Reports*, Volume 9, 2023, Pages 1124-1156, ISSN 2352-4847.
- [75] D. Zhou, M. Izumi, M. Miki, B. Felder, T. Ida, M. Kitano. An overview of rotating machine systems with high-temperature bulk superconductors. *Superconductor Science and Technology*. 2012;25:1–12
- [76] CCAS. *Superconductivity: Present and Future Applications*. Coalition for the Commercial Application of Superconductors (CCAS) [online]. Disponível em: <http://www.ccas-web.org/pdf/CCAS_Brochure.pdf>. Acesso em: 10/08/2022.
- [77] Schmidt, W., “Materiais Elétricos: Isolantes e Magnéticos”. Vol.2, Blucher, 2019.
- [78] Agilent – Release. Basic of Measuring the Dielectric Properties of Materials, 2006.
- [79] E. Kuffel, E. W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, Oxford, U.K.: Pergamon Press, 2000.
- [80] ASTM Standard D 257-99. Standard test methods for DC resistance or conductance of insulating materials, 1999.
- [81] ANSI/ESD STM 11.11-2001 Standard. Surface resistance measurement of static dissipative planar materials, 2001.
- [82] D. Politano, M. Sjöström, G. Schnyder, and J. Rhyner, “Technical and economical assessment of hts cables,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, pp. 2477–2480, 2001.
- [83] O. Tsukamoto, “Roads for hts power applications to go into the real world: Cost issues and technical issues,” *Cryogenics*, vol. 45, no. 1, pp. 3–10, 2005.
- [84] L. Ren, Y. Tang, J. Shi, L. Li, J. Li, and S. C. Cheng, “Techno-economic feasibility study on hts power cables,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 1774–1777, 2009.
- [85] W. Yuan, S. Venuturumilli, Z. Zhang, Y. Mavrocousti, and M. Zhang, “Economic feasibility study of using high-temperature superconducting cables in uk’s electrical distribution networks,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1–5, 2018.

- [86] C. Lee, J. Choi, H. Yang, M. Park, and M. Iwakuma, "Economic evaluation of 23 kv tri-axial hts cable application to power system," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 5, pp.1–7, 2019.
- [87] T. Han, X. Zhao, Y. Yao, Z. Zhang, and Z. Li, "Effect of electricalaging on pplp insulation characteristics in ln 2," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1–4, 2021.
- [88] F. Ombello, G. Attolini, P. Caracino, M. Nassi, S. Spreafico, and G. Montanari, "Insulating materials evaluation for cold dielectric superconducting cables," *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 9, no. 6, pp. 958–963, 2002.
- [89] Y. Xin, B. Hou, Y. Bi, H. Xi, Y. Zhang, A. Ren, X. Yang, Z. Han, S. Wu, and H. Ding, "Introduction of china's first live grid installed hts power cable system," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1814–1817, 2005.
- [90] L. Xiao, S. Dai, Y. Lin, Z. Gao, F. Zhang, X. Xu, and L. Lin, "Development of hts ac power transmission cables," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 1652–1655, 2007.
- [91] D. Kwag, V. Nguyen, S. Baek, H. Kim, J. Cho, and S. Kim, "A study on the composite dielectric properties for an hts cable," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1731–1734, 2005.
- [92] P. Cheetham, W. Kim, C. H. Kim, S. V. Pamidi, L. Graber, and H. Rodrigo, "Use of partial discharge inception voltage measurements to design a gaseous helium cooled high temperature superconducting power cable," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 191–199, 2017.
- [93] CIGRE Technical Brochure - 846, "Electrical insulation systems at cryogenic temperatures," Oct. 2021.
- [94] Y. Mizuno, M. Iizuka, Y. Mitsuyama, M. Nagao, M. Kosaki, N. Shimizu, and K. Horii, "Evaluation of ethylene propylene rubber as solid electrical insulation material of superconducting cable," *Fusion Engineering and Design*, vol. 20, pp. 475–481, 1993.
- [95] A. Minoda, Y. Mitsuyama, Y. Mizuno, M. Nagao, and M. Kosaki, "ac treeing of ethylene-propylene rubber in cryogenic temperature region," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 124, no. 3, pp. 1–9, 1998.
- [96] C. Zuidema, W. Kegerise, R. Fleming, M. Welker, and S. Boggs, "A short history of rubber cables," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 4, no. 27, pp. 45–50, 2011.
- [97] C. Esendal and R. Findlay, "A review of the composite dielectric insulated underground transmission cable," in *Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. IEEE*, 1988, pp. 754–757.

- [98] C. Peng, Y. Wang, S. Dai, Q. Yang, M. Liu, H. Chen, M. Wang, and Y. Hu, "Insulation characteristics of dielectric material for cd hts cable," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, 2018.
- [99] W. Kim, S. Kim, H. Kim, J. Cho, J. Lee, and H. Lee, "The fundamental characteristics of pplp as insulating material for hts dc cable," IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 23, no. 3, pp. 5 401 704– 5 401 704, 2013.
- [100] D. Gromoll *et al.* "Dielectric strength of insulating material in LN2 with thermally induced bubbles", 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1559 012087.
- [101] B. Weedy and S. Swingler, "Review of tape materials for cable insulation at liquid nitrogen temperatures," Cryogenics, vol. 27, no. 12, pp. 667–672, 1987.
- [103] E. Tuncer, I. Sauers, D. R. James, A. R. Ellis, and M. O. Pace, "Breakdown statistics of polyimide at low temperatures," in 2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 2006, pp. 561–564
- [102] W.G. Li, Z. K. Liu, B. Wei, M. Qiu, X. J. Gao, C. Gao, Y.Q. Zhao, S. Li, J.Z. Hou, and P.-P. Chen, "Comparison between the dc and ac breakdown characteristics of dielectric sheets in liquid nitrogen," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 24, no. 6, pp.1–6, 2014.
- [104] Z. Jin, A. Laphorn and M. Staines, "The Dielectric Strength of Nomex 410 Paper in Liquid Nitrogen Under Boiling Situations," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 7, pp. 1-10, Oct. 2017, Art no. 5500710, doi: 10.1109/TASC.2017.2732282.
- [105] F Krahenbuhl, F. et al., "Properties of Electrical Insulating Materials at Cryogenic Temperatures: A Literature Review", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 10, no. 4, pp. 10-22, July-Aug. 1994, doi:10.1109/57.298084.
- [106] N. Hill and M. Kurrat, "Discharge Mechanisms in Liquid Nitrogen—Breakdown Field Strength of Gaseous Nitrogen", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 4, pp. 1-5, June 2018, Art no. 7700605, doi: 10.1109/TASC.2018.2809460.
- [107] J. K. Seong, I. J. Seo, J. S. Hwang and B. W. Lee, "Comparative Evaluation Between DC and AC Breakdown Characteristic of Dielectric Insulating Materials in Liquid Nitrogen", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, pp. 7701504-7701504, June 2012, Art no. 7701504, doi: 10.1109/TASC.2011.2178222.
- [108] M. Kosaki, "Super Electrical Insulation of Polymers in Cryogenic Region," Prop. Appl. Dielectr. Mater. 2003 Proc. 7th Int. Conf., vol. 1, pp. 9–14, 2003
- [109] M. Garzem, M. Grunwald, R. Schnorrenberg, R. Schumacher and C. Humpert, "Breakdown and Partial Discharge Characteristics of Transformer Board and Insulating Paper Materials in Liquid Nitrogen", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 4, pp. 1-5, June 2018, Art no. 7700405

- [110] M. Runde, N. Magnusson, O. Lillevik, G. Balog, and F. Schmidt, "Comparative tests of tape dielectrics impregnated with liquid nitrogen", IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, vol. 13, no. 6, pp. 1371–1376, 2006.
- [111] Z. Jin, A. Laphorn, and M. Staines, "An investigation on the AC dielectric strength of paper sheet insulation in liquid nitrogen," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 1, Jan. 2019, Art. no. 8800107, doi: 10.1109/TASC.2018.2854664.
- [112] O. Maruyama et al., "Development of 66 kV and 275 kV class REBCO HTS power cables," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, Jun. 2013, Art. no. 5401405.
- [113] N. Hayakawa et al., "A novel electrical insulating material for 275 kV high-voltage HTS cable with low dielectric loss," J. Phys.: Conf. Ser., vol. 507, May 2014, Art. no. 032021
- [114] EPRI. Superconducting Power Equipment: Technology Watch 2011. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. Report Number 1021890.
- [115] KALSI, S. S., Applications of high temperature superconductors to electric power equipment. Singapore: Wiley, 2011. pp. 219-260.
- [116] H. Yumura et al., "Phase II of the Albany HTS Cable Project", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 1698-1701, June 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2017865.
- [117] S. J. Lee, M. Park, I. -K. Yu, Y. Won, Y. Kwak and C. Lee, "Recent Status and Progress on HTS Cables for AC and DC Power Transmission in Korea," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 4, pp. 1-5, June 2018, Art no. 5401205, doi: 10.1109/TASC.2018.2820721.
- [118] A. Buchholz, M. Noe, D. Kottonau, E. Shabagin and M. Weil, "Environmental Life-Cycle Assessment of a 10 kV High-Temperature Superconducting Cable System for Energy Distribution", in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 31, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2021, Art no. 4802405, doi: 10.1109/TASC.2021.3070703.
- [119] G. Angeli, B. G. Marchionini, Y. Yamada, H. Ohsaki and L. Martini, "Technology Collaboration Programme on High-Temperature Superconductivity (HTS): HTS Applications and the Need for International Standardization Activity", in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, June 2018, Art no. 5000404, doi: 10.1109/TASC.2018.2793857.
- [120] CIGRE, Technical Brochure - Recommendations for testing of Superconducting cables, 2013
- [121] CCAS Brochure. *Superconductivity: Present and Future Applications*. Coalition for the Commercial Application of Superconductors (CCAS).

- [122] B. G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini and H. Ohsaki, "High-Temperature Superconductivity: A Roadmap for Electric Power Sector Applications, 2015–2030", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp. 1-7, June 2017, Art no. 0500907, doi: 10.1109/TASC.2017.2671680.
- [123] DUPONT, Nomex® Paper Properties [Online]. Disponível em: <<http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electricalmaterials/electrical-insulation/brands/nomex-electricalinsulation/articles/characteristics-of-Nomex-forinsulation.html>>. Acesso em março de 2023.
- [124] P. Cheetham, C. Manankandayalage, M. M. Alam, C. H. Kim and S. V. Pamidi, "Radiation-Resistant Electrical Insulation Materials for Superconducting Magnet Applications," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 33, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2023, Art no. 7700505, doi: 10.1109/TASC.2023.3264954.
- [125] DUPONT. Kapton® Properties [Online]. Disponível em: <<https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/eitransformation/public/documents/en/EI-10206-Kapton-HN-Data-Sheet.pdf>>. Acesso em Março de 2023.
- [126] T. Takahashi, H. Suzuki, M. Ichikawa, T. Okamoto, S. Akita, S. Maruyama, and A. Kimura, "Dielectric Properties of 500 m Long HTS Power Cable", IEEE Trans. Applied Supercond., vol. 15, no. 2, 2005.
- [127] O. Maruyama, S. Honjo, T. Nakano, T. Masuda, M. Watanabe, M. Ohya, H. Yaguchi, N. Nakamura, A. Machida, "Results of Japan's First In-Grid Operation of 200-MVA Superconducting Cable System", IEEE Trans. Applied Supercond. Vol. 25, Issue 3, 2015.
- [128] ABNT, "ABNT NBR 5405:2014: Materiais isolantes solidos – Determinação da rigidez dielétrica sob tensão em frequência industrial," Associação Brasileira de Normas Técnicas: Brasil, 2014.
- [129] ASTM D149-20, "Standard test method for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials at commercial power frequencies," ASTM Int., West Conshohocken, PA, USA, 2020, doi: 10.1520/D0149-20.
- [130] ASTM D150-98, "Standard test methods for AC loss characteristics and permittivity (Dielectric constant) of solid electrical insulation," ASTM Int., West Conshohocken, PA, USA, 1998
- [131] Ribeiro, F. L. B., "Introdução ao Método dos Elementos Finitos", Ciência Moderna, 2020.
- [132] TVE G10 Ficha Técnica, [Online]. Disponível em: <<https://isolaplast.com.br/wp-content/uploads/2023/02/ficha-tve.pdf>>.
- [133] OMICRON CPC 100 – Ficha técnica, [Online] Disponível em: <<https://www.omicronenergy.com/pt/produtos/cpc-100/>>.

- [134] V. S. Andrade, M. A. Neves, W. C. Boaventura and X. Granados, "Development of a Measurement System to Characterize Dielectric Materials in Cryogenic Temperature," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, June 2022, Art no. 0600105, doi: 10.1109/TASC.2022.3148045.
- [135] V. S. Andrade, W. C. Boaventura and M. A. Neves, "Experimental characterization of laminated dielectric in LN2 bath for use in Brazilian HTS cable project", IET Conference Proceedings, vol.2023, Issue 46, <https://doi.org/10.1049/icp.2024.0596>.
- [136] V. S. Andrade, W. C. Boaventura, M. A. Neves and X. Granados, "Dielectric Characterization of NKN in LN2 Using a Proposed Arrangement," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 34, no. 3, pp. 1-5, May 2024, Art no. 6600805, doi: 10.1109/TASC.2024.3354227.

Anexo 1 – Lista de trabalhos resultantes da tese

Apresentações em congressos

1 – EUCAS 2021 – 15th European Conference on Applied Superconductivity

Local e período: Moscou, 5 a 10 de setembro (on line).

Título do trabalho: Development of a measurement system to characterize dielectric materials in cryogenic temperature.

Autores: Valcimar Silva de Andrade, Marcelo Azevedo, Wallace do Couto Boaventura, Xavier Granados.

Forma de Apresentação: Poster (on line).

2 – ISH 2023 - 23rd International Symposium on High Voltage Engineering

Local e período: Glasgow, 28 de agosto a 01 de setembro.

Título do trabalho: Experimental characterization of laminated dielectric in LN2 bath for use in brazilian hts cable project.

Autores: Valcimar Silva de Andrade, Wallace do Couto Boaventura, Marcelo Azevedo Neves.

Forma de Apresentação: Oral.

3 – EUCAS 2023 - 16th European Conference on Applied Superconductivity

Local e período: Bolonha, 03 a 07 de setembro.

Título do trabalho: Dielectric characterization of NKN in LN2 using a proposed arrangement.

Autores: Valcimar Silva de Andrade, Marcelo Azevedo Neves e Wallace do Couto Boaventura.

Forma de Apresentação: Poster.

4 – EOSBF 2024 – Autumn Meeting Brazilian Physical Society

Local e período: Florianópolis, 19 a 23 de maio.

Título do trabalho: A new equipment proposal to characterize dielectric material for using on high T_c superconductivity technology.

Autores: Valcimar Silva de Andrade, Marcelo Azevedo Neves e Wallace do Couto Boaventura.

Forma de Apresentação: Poster.

Publicações em Periódicos

1 – IEEE 2022

V. S. Andrade, M. A. Neves, W. C. Boaventura and X. Granados, "Development of a Measurement System to Characterize Dielectric Materials in Cryogenic Temperature," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, June 2022, Art no. 0600105, doi: 10.1109/TASC.2022.3148045.

2 – IET 2023

V. S. Andrade, W. C. Boaventura and M. A. Neves, "Experimental characterization of laminated dielectric in LN₂ bath for use in Brazilian HTS cable project", IET Conference Proceedings, vol.2023, Issue 46, <https://doi.org/10.1049/icp.2024.0596>.

3 – IEEE 2024

V. S. Andrade, W. C. Boaventura, M. A. Neves and X. Granados, "Dielectric Characterization of NKN in LN₂ Using a Proposed Arrangement," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 34, no. 3, pp. 1-5, May 2024, Art no. 6600805, doi: 10.1109/TASC.2024.3354227.