



MAGNETIZAÇÃO DE LAÇOS SUPERCONDUTORES 2G COM PULSOS CURTOS DE CORRENTE

Guilherme Theophilo Telles

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Rubens de Andrade Jr.

Rio de Janeiro
Julho de 2018

MAGNETIZAÇÃO DE LAÇOS SUPERCONDUTORES 2G COM PULSOS
CURTOS DE CORRENTE

Guilherme Theophilo Telles

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.

Dr. Alexander Polasek, D.Sc.

Prof. Claudio Lenz Cesar, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2018

Telles, Guilherme Theophilo

Magnetização de Laços Supercondutores 2G com Pulsos Curtos de Corrente/Guilherme Theophilo Telles. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVI, 73 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Rubens de Andrade Jr.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 63 – 66.

1. Magnetização por Pulsos.
 2. Laços 2G.
 3. Pulsos Curtos.
- I. Andrade Jr., Rubens de.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico esta obra a meu avô,
Fernando Pinto Theophilo, cuja
lembrança ainda se reflete no
coração e no semblante daqueles
que o conheceram.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro. Ao Laboratório de Supercondutividade do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e ao Laboratório de Super-Espectroscopia do Rio (LASER), agradeço pela parceria, que possibilitou diversos aspectos deste trabalho.

A toda a equipe do LASUP, agradeço pelo constante apoio e boa vontade. O ambiente de companheirismo do laboratório é algo precioso e produtor. Em especial, gostaria de agradecer ao Vagner, pela ajuda e parceria, e ao Prof. Rubens, por sua paciência e sabedoria, sem que este trabalho certamente não seria possível.

A minha família, devo múltiplos agradecimentos em todas as esferas da minha vida. No que se refere ao trabalho desses últimos anos, agradeço pelo apoio, pela confiança e pela fé que depositaram em mim. A minha mãe, Andrea, e a minha avó, Maria Ângela, devo especiais agradecimentos. Espero um dia poder retribuir tudo aquilo que me proporcionam, dez vezes mais.

Agradeço à família Brauns por me receber sempre com portas e braços abertos. Sua casa é um bastião contra as ansiedades do mundo afora. Em um mundo onde os laços de amizade esfriam, sortudo é aquele que pode contar não com uma, mas duas famílias.

Finalmente, gostaria de agradecer à Juliana Brauns, que está sempre ao meu lado, não importa o caminho a se trilhar. Obrigado por me oferecer o seu amor, que eu me esforço todo dia para merecer.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MAGNETIZAÇÃO DE LAÇOS SUPERCONDUTORES 2G COM PULSOS CURTOS DE CORRENTE

Guilherme Theophilo Telles

Julho/2018

Orientador: Rubens de Andrade Jr.

Programa: Engenharia Elétrica

Materiais supercondutores são capazes de aprisionar campo magnético em seu interior, o que permite que sejam utilizados para levitação magnética. No que diz respeito ao aprisionamento de campo, os laços 2G, feitos de segmentos de fitas supercondutoras de segunda geração, funcionam de forma semelhante a blocos supercondutores, gerando correntes que anulam parcialmente o campo magnético externo. Ao serem expostos a pulsos de campo magnético, os laços 2G são capazes de transportar altas densidades de corrente de forma persistente. Este trabalho tem como tema o estudo da magnetização de laços 2G por meio da aplicação de pulsos curtos de corrente no primário de um transformador. Ao longo do trabalho são apresentados resultados experimentais obtidos durante ensaios de magnetização do laço 2G, em que são variados a largura e a intensidade do pulso para se verificar a influência desses parâmetros na energia transferida ao laço e na corrente persistente. Os resultados do campo elétrico e da corrente medidos nesses ensaios são confrontados com um modelo proposto do sistema, que é utilizado para se explicar o transitório do fenômeno de magnetização. Finalmente, os resultados dos ensaios com pulsos curtos são comparados com ensaios de pulsos cuja duração é duas ordens de grandeza maior. São analisadas as diferenças tanto do comportamento transitório quanto nos valores finais de corrente persistente e energia alcançados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MAGNETIZATION OF SUPERCONDUCTING 2G LOOPS WITH SHORT CURRENT PULSES

Guilherme Theophilo Telles

July/2018

Advisor: Rubens de Andrade Jr.

Department: Electrical Engineering

Superconducting materials are able to trap magnetic field in their interior, which allows them to be used for magnetic levitation. As far as field entrapment is concerned, 2G loops, made from segments of second generation superconducting tapes, work similarly to superconducting bulks, generating currents that partially cancel out the external magnetic field. When exposed to magnetic field pulses, 2G loops are capable of carrying high current densities persistently. This work has as its theme the study of the magnetization of 2G loops through the application of short current pulses in the primary of a transformer. Throughout the work, experimental results are presented, obtained during magnetization tests of the 2G loop, in which the width and intensity of the pulse are varied to verify the influence of these parameters on the energy transferred to the loop and the persistent current. The results of the electric field and current measured in these tests are confronted with a proposed model of the system, which is used to explain the transient of the magnetization phenomenon. Finally, the results of the short pulse tests are compared to tests with pulses whose duration is two orders of magnitude higher. The differences in both the transient behaviour and the final values of persistent current and energy are analysed.

Sumário

| | |
|--|-------------|
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas | xiii |
| Lista de Símbolos | xiv |
| Lista de Abreviaturas | xvi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 2 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Organização | 3 |
| 2 Conceitos de Supercondutividade | 4 |
| 2.1 Propriedades dos Supercondutores | 4 |
| 2.2 Fitas 2G | 6 |
| 2.3 Laços 2G | 10 |
| 2.4 Métodos de Magnetização de Supercondutores | 13 |
| 2.5 Magnetização com Pulsos Longos de Corrente | 14 |
| 3 Metodologia e Equipamentos | 17 |
| 3.1 Amostra de Laço 2G | 17 |
| 3.2 Sistema de Caracterização de Quatro Pontos | 19 |
| 3.3 Sistema de Magnetização de Laços 2G | 23 |
| 3.3.1 Geração do Pulso de Fluxo Magnético | 23 |
| 3.3.2 Medição das Correntes e Campo Elétrico | 24 |
| 3.3.3 Modelagem do Sistema de Magnetização | 26 |
| 3.3.4 Ensaios Realizados com o Sistema de Magnetização | 30 |
| 4 Resultados e Discussões | 33 |
| 4.1 Resultados da Caracterização da Amostra | 33 |
| 4.2 Resultados da Magnetização por Pulsos Curtos | 37 |
| 4.2.1 Análise do Transitório | 38 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.2 | Influência dos Parâmetros do Pulso | 41 |
| 4.3 | Validação do Modelo: Ajuste Numérico | 44 |
| 4.4 | Comparação da Magnetização com Pulsos Longos e Curtos | 51 |
| 5 | Conclusões e Trabalhos Futuros | 60 |
| | Referências Bibliográficas | 63 |
| A | Resultados dos Ajustes Numéricos | 67 |
| B | Simulações do Modelo do Sistema | 69 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Limites da Supercondutividade | 4 |
| 2.2 | Efeito Meissner | 5 |
| 2.3 | Efeito Meissner e Estado Misto | 6 |
| 2.4 | Exemplo de arquitetura básica das fitas 2G | 7 |
| 2.5 | Regimes de operação do supercondutor (adaptado de [26]) | 9 |
| 2.6 | Efeito do n na curva $E \times J$ | 9 |
| 2.7 | Produção de um laço 2G a partir de uma fita 2G | 10 |
| 2.8 | Aprisionamento de campo no bloco e no laço 2G | 11 |
| 2.9 | Curva de corrente por força magnetomotriz do laço 2G | 12 |
| 2.10 | Métodos de Magnetização de Supercondutores: (a) <i>Field Cooling</i> ; (b) <i>Zero Field Cooling</i> e <i>Pulse Magnetization</i> | 14 |
| 2.11 | Comportamento da corrente e do campo elétrico no laço 2G em resposta a um pulso de corrente no primário de um transformador com o laço 2G como secundário | 15 |
| 3.1 | Procedimento de preparação do Laço 2G | 18 |
| 3.2 | Laço 2G no porta-amostras: (a) vista frontal; (b) vista superior sem a tampa evidenciando a fita e os terminais de tensão | 19 |
| 3.3 | Sistema de Caracterização por Imposição de Corrente | 20 |
| 3.4 | Passo a passo do ensaio de caracterização convencional | 21 |
| 3.5 | Caminho da corrente no laço 2G durante (a) a caracterização de quatro pontos; (b) a magnetização por pulsos | 22 |
| 3.6 | Esquema de montagem do transformador | 23 |
| 3.7 | Pulsos gerado pela fonte de corrente no primário do transformador | 24 |
| 3.8 | Curva de calibração do sensor de efeito Hall | 25 |
| 3.9 | Sensor de corrente para medição da corrente no supercondutor | 25 |
| 3.10 | Sistema de Magnetização | 26 |
| 3.11 | Modelo básico do transformador (a); modelo do sistema de magnetização (b) | 27 |
| 3.12 | Respostas a um pulso de corrente de 1 A e 10 ms com $I_C = 35$ A segundo as equações 3.2 e 3.6 calculadas numericamente | 29 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.13 | Ensaio de Caracterização Indutiva: Passo a passo | 31 |
| 3.14 | Ensaio de magnetização: Passo a passo | 32 |
| 4.1 | Relação entre os processos apresentados no capítulo 4 e sua organização | 34 |
| 4.2 | Caracterização com quatro pontos da amostra com corte | 35 |
| 4.3 | Caracterização com quatro pontos da amostra sem corte | 35 |
| 4.4 | Caracterização por indução ao longo do tempo | 36 |
| 4.5 | Caracterização por indução da amostra com corte parcial | 36 |
| 4.6 | Magnetização com pulso de 1,23 A e 10 ms | 38 |
| 4.7 | Magnetização com pulso de 0,77 A e 10 ms | 39 |
| 4.8 | Magnetização com pulso de 1,89 A e 10 ms | 40 |
| 4.9 | Comparação entre os ensaios de 1,23 e 1,89 A | 41 |
| 4.10 | Representação dos parâmetros do pulso nos gráficos de múltiplos ensaios | 42 |
| 4.11 | Influência dos parâmetros do pulso na corrente persistente (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 42 |
| 4.12 | Influência dos parâmetros do pulso na energia transferida (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 43 |
| 4.13 | Relação entre energia transferida e corrente persistente (para os va- lores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 44 |
| 4.14 | Relação entre energia transferida e energia armazenada em forma de campo magnético (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 44 |
| 4.15 | Ajuste numérico: pulso de 1,89 A e 10 ms | 45 |
| 4.16 | Ajuste numérico: componentes de corrente e campo elétrico do pulso de 1,89 A e 9 ms | 46 |
| 4.17 | Comportamento das correntes no circuito (a) durante o pulso; (b) depois do pulso | 47 |
| 4.18 | Erro dos ajustes numéricos | 48 |
| 4.19 | Efeito da fixação das grandezas no erro do ajuste numérico | 49 |
| 4.20 | Efeito da fixação das grandezas no cálculo do campo elétrico e da corrente | 50 |
| 4.21 | Representação dos pulsos curtos e longos | 51 |
| 4.22 | Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a energia transferida e a duração dos pulsos (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21) | 52 |
| 4.23 | Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a corrente persistente e a intensidade dos pulsos (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21) | 54 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.24 | Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a corrente persistente e a energia transferida (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21) | 55 |
| 4.25 | Efeito da temperatura no formato dos pulsos com corrente persistente acima de 60% da corrente crítica | 56 |
| 4.26 | Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a energia recebida e a energia armazenada (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21) | 57 |
| 4.27 | Comparação entre o transitório de pulsos curtos e longos | 58 |
| B.1 | Diagrama de blocos da simulação do sistema | 69 |
| B.2 | Comparação entre simulação e dados experimentais: energia e duração (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 70 |
| B.3 | Comparação entre simulação e dados experimentais: Corrente persistente e intensidade (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 71 |
| B.4 | Comparação entre simulação e dados experimentais: energia recebida e armazenada (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 72 |
| B.5 | Comparação entre simulação e dados experimentais: corrente persistente e energia (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10) | 73 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Resultados da caracterização com quatro pontos | 34 |
| 4.2 | Resultados de ambas as caracterizações | 37 |
| 4.3 | Resultados do ajuste numérico para os ensaios de magnetização (re- sultados completos no apêndice A | 48 |
| A.1 | Resultados completos dos ajustes numéricos | 68 |

Lista de Símbolos

| | |
|-----------|---|
| B | Densidade de Fluxo Magnético, p. 8 |
| E | Campo Elétrico, p. 8 |
| E_C | Campo Elétrico Crítico, p. 8 |
| E_L | Campo Elétrico Indutivo (Quadratura), p. 27 |
| E_R | Campo Elétrico Resistivo (Direto), p. 27 |
| H_C | Intensidade de Campo Magnético Crítico, p. 4 |
| H_{C1} | Intensidade de Campo Magnético Crítico Inferior, p. 5 |
| H_{C2} | Intensidade de Campo Magnético Crítico Superior, p. 5 |
| I | Corrente, p. 19 |
| I_1 | Corrente no Primário do Transformador, p. 27 |
| I_C | Corrente Crítica, p. 19 |
| I_L | Corrente da Indutância de Magnetização, p. 28 |
| I_R | Corrente de Perdas no Cobre, p. 28 |
| I_{per} | Corrente Persistente no Laço Supercondutor, p. 29 |
| I_{sc} | Corrente no Laço Supercondutor, p. 27 |
| J | Densidade de Corrente, p. 8 |
| J_C | Densidade de Corrente Crítica, p. 4 |
| L_1 | Indutância do Primário do Transformador, p. 27 |
| L_2 | Indutância do Secundário do Transformador, p. 27 |
| L_m | Indutância de Magnetização do Transformador, p. 27 |

| | |
|------------|--|
| L_{circ} | Indutância Própria do Círculo, p. 37 |
| L_{sc} | Indutância Própria do Laço Supercondutor, p. 27 |
| N | Relação de Transformação do Transformador, p. 27 |
| R_1 | Resistência do Primário do Transformador, p. 27 |
| R_2 | Resistência do Secundário do Transformador, p. 27 |
| R_c | Resistência de Perdas no Cobre do Transformador, p. 27 |
| R_{sc} | Resistência do Laço Supercondutor, p. 27 |
| T_C | Temperatura Crítica, p. 4 |
| W_{arm} | Energia Armazenada pelo Laço Supercondutor, p. 43 |
| W_{rec} | Energia Recebida pelo Laço Supercondutor, p. 42 |
| μ_0 | Permeabilidade Magnética do Vácuo, p. 37 |
| a | Raio da Seção Circular do Condutor, p. 37 |
| l | Comprimento entre os Terminais de Tensão, p. 27 |
| n | Índice de Transição, p. 8 |
| r | Raio do Anel, p. 37 |
| t | Tempo, p. 27 |

Lista de Abreviaturas

| | |
|-------|--|
| 2G | Segunda Geração, p. 1 |
| BSCCO | Óxido de Bismuto-Estrôncio-Cálcio-Cobre, p. 6 |
| COPPE | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, p. 2 |
| Cepel | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, p. 19 |
| FC | Resfriamento na Presença de Campo, p. 13 |
| HTS | Supercondutores de Alta Temperatura Crítica, p. 1 |
| LASER | Laboratório de Super-Espectroscopia do Rio, p. 23 |
| LASUP | Laboratório de Aplicações de Supercondutores, p. 2 |
| LTS | Supercondutores de Baixa Temperatura Crítica, p. 1 |
| PM | Magnetização por Pulsos, p. 13 |
| SMES | Superconducting Magnetic Energy Storage, p. 1 |
| UFRJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 2 |
| YBCO | Óxido de Ítrio-Bário-Cobre, p. 6 |
| ZFC | Resfriamento com Campo Nulo, p. 13 |

Capítulo 1

Introdução

A supercondutividade, descoberta há mais de um século, é um estado da matéria em que certos materiais apresentam resistividade elétrica nula e diamagnetismo perfeito. O surgimento dos supercondutores de baixa temperatura crítica (*Low Temperature Superconductors* - LTS) representou a revelação de algumas aplicações para a recém desenvolvida tecnologia, apesar das dificuldades impostas pela necessidade de um sistema de refrigeração capaz de alcançar temperaturas abaixo de 30 K.

Os supercondutores de alta temperatura crítica (*High Temperature Superconductors* - HTS), descobertos apenas em 1986, possuem valores de temperatura crítica acima de 30 K, dentre os quais muitos podem ser resfriados através do uso de nitrogênio líquido, um insumo barato e abundante, cuja temperatura de ebulição é 77,2 K. O uso do nitrogênio líquido representa uma redução significativa no custo de refrigeração, o que estimula o estudo dos HTS em diversas aplicações, como máquinas elétricas [1], limitadores de corrente [2] e mancais magnéticos [3].

O advento das fitas supercondutoras de segunda geração, ou fitas 2G, representou outro ponto importante na trajetória da supercondutividade. São fitas de HTS produzidas em larga escala segundo um processo industrial, o que garante maior homogeneidade do que no caso dos tradicionais blocos maciços. Podem transportar altas densidades de corrente e gerar elevados níveis de força, mesmo com muito menos material supercondutor do que os blocos. As fitas supercondutoras de segunda geração, 2G, já são empregadas em protótipos de diversas aplicações, como máquinas elétricas [4], eletromagnetos de alto campo [5], veículos de levitação magnética (MagLev) [6], limitadores de corrente [7] e SMES [8].

1.1 Motivação

O Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP - COPPE/UFRJ), no Rio de Janeiro, conduziu recentes estudos das fitas supercondutoras [9] que mostraram a viabilidade de utilizá-las no lugar dos *bulks* para levitação magnética, em especial no veículo Maglev Cobra [10]. Diferentes arranjos e geometrias foram analisados até que se chegou à geometria do laço de fitas 2G sem emendas, ou laço 2G, na busca de maximizar a força de levitação utilizando-se o mínimo de material supercondutor e ocupando o menor volume possível. Forças de 30% daquelas encontradas com *bulks* foram encontradas para um volume de material supercondutor de apenas 0,5%, uma relação de força por volume sessenta vezes maior.

Apesar da constante busca pelo aumento da eficiência dos mancais supercondutores, eles apresentam comportamento totalmente passivo. Devido às próprias oscilações do veículo e às freqüentes variações de carga ao longo do tempo, há uma queda da força e, conseqüentemente, da altura de levitação [11]. A fim de se estudar uma possível solução, iniciou-se uma pesquisa acerca da magnetização dos laços sem emendas por meio de pulsos de corrente [12, 13], com a intenção de que seja possível utilizar esta técnica, uma vez que seja consolidada, para compensar o decaimento natural da altura de levitação dos mancais magnéticos supercondutores.

1.2 Objetivos

A partir dos resultados das pesquisas anteriores, tornou-se interessante a investigação do fenômeno da magnetização por pulsos de corrente para larguras de pulso curtas, na ordem de alguns milissegundos. O objetivo deste trabalho é estudar a magnetização de um laço 2G através da aplicação de pulsos curtos (entre 1 e 10 ms) de campo magnético em seu interior para que se possa compreender melhor o fenômeno da magnetização e, em especial, a dependência da corrente persistente no laço supercondutor com a largura e intensidade do pulso utilizado.

Os resultados dos ensaios são comparados com uma modelagem simplificada do sistema por meio de simulações e ajustes numéricos. Espera-se que as discussões abordadas ao longo desta dissertação permitam um maior esclarecimento sobre o funcionamento dos HTS, em especial no que diz respeito ao comportamento da corrente e do campo elétrico no laço 2G durante a magnetização.

1.3 Organização

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: discute os principais conceitos necessários para o desenvolvimento e compreensão desta dissertação. São abordados os princípios básicos de supercondutividade, além de uma breve revisão histórica da ciência desses materiais;
- Capítulo 3: mostra os equipamentos e a metodologia utilizada para aplicação dos pulsos de corrente e medição das grandezas relevantes. São apresentados os sistemas de caracterização e de magnetização utilizados ao longo do trabalho, além das técnicas utilizadas para análise e tratamento dos dados obtidos;
- Capítulo 4: apresenta os resultados do comportamento do campo elétrico e da corrente no supercondutor durante o processo de magnetização. A partir destes dados são obtidas a corrente persistente e a energia transferida ao supercondutor em função da largura e intensidade do pulso aplicado. Os resultados experimentais obtidos são ajustados ao modelo proposto do sistema e são realizadas simulações, com o mesmo modelo, utilizando os parâmetros médios calculados nos ajustes para se verificar a influência da largura e intensidade do pulso também no modelo.
- Capítulo 5: finaliza o trabalho, revisando os principais pontos de discussão e as conclusões provenientes deles e sugere temas de estudo e aprimoramentos para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos de Supercondutividade

Neste capítulo serão revistos os principais conceitos de supercondutividade no que diz respeito à magnetização por pulsos de laços 2G. Essa revisão é necessária para que se possam compreender com mais clareza os fenômenos físicos que se dão durante a exposição do laço supercondutor a um pulso de campo magnético.

2.1 Propriedades dos Supercondutores

A supercondutividade, descoberta em 1911 por Heike Kamerlingh Onnes [14, 15], é um estado da matéria em que determinados materiais apresentam resistividade nula e diamagnetismo perfeito quando submetidos a condições apropriadas de campo magnético, densidade de corrente elétrica e temperatura. Os três parâmetros que definem os limites da supercondutividade são, portanto, *temperatura crítica* (T_C), *densidade de corrente crítica* (J_C) e *intensidade de campo magnético crítica* (H_C), como mostrado na figura 2.1.

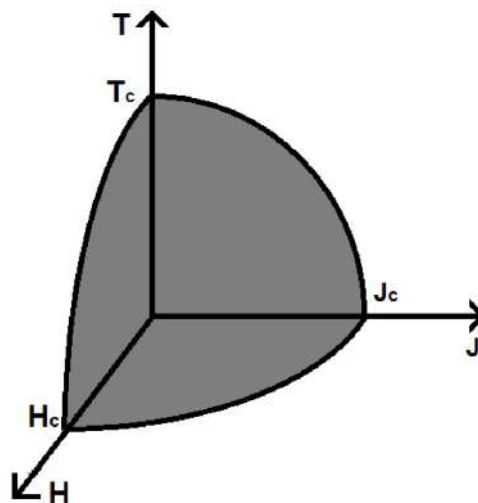


Figura 2.1: Limites da Supercondutividade

Por serem materiais perfeitamente diamagnéticos, os supercondutores são capazes de, até certo ponto, expulsar completamente o campo magnético de seu interior. Isso acontece porque, quando ocorre uma variação no campo magnético externo ao supercondutor, este gera correntes elétricas superficiais de forma a blindar o campo magnético. As correntes geradas são persistentes devido à resistividade nula apresentada por esses materiais. O fenômeno, descoberto em 1933 por Meissner e Ochsenfeld [16] e ratificado por Fritz e Heinz London segundo as equações de Maxwell [17], foi denominado Efeito Meissner (figura 2.2).

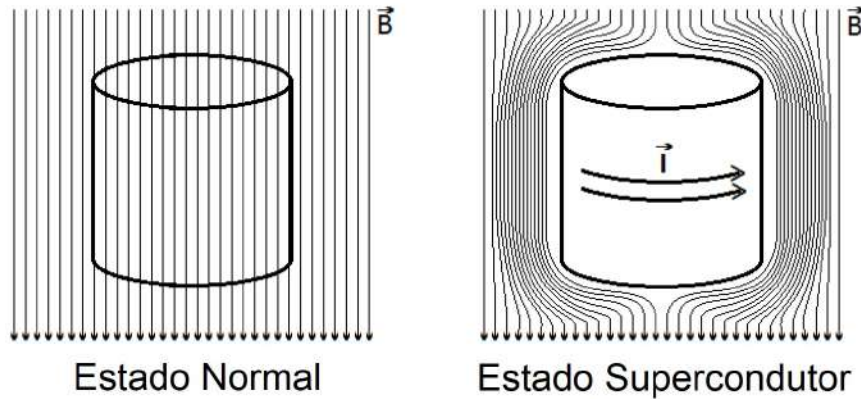


Figura 2.2: Efeito Meissner

Em 1950, Ginzburg e Landau classificaram os supercondutores em dois tipos: os supercondutores de tipo I, ou supercondutores moles, e os supercondutores de tipo II, ou supercondutores duros [18]. Enquanto os de tipo I apresentam apenas um valor de campo crítico, H_C , os de tipo II apresentam dois valores, H_{C1} e H_{C2} . Abaixo de H_{C1} , o material apresenta diamagnetismo perfeito; acima de H_{C2} , encontra-se no estado normal; mas quando o campo magnético se encontra entre esses valores, respeitando-se os limites de J_C e T_C , o material encontra-se em um estado misto (figura 2.3), em que parte do campo magnético é expulsa e parte é aprisionada no interior do material em regiões microscópicas que não transitam para o estado supercondutor. Essas regiões, os fluxóides, se organizam de forma regular pelo material segundo a rede de Abrikosov [19], descoberta por Alexei A. Abrikosov, permitindo a penetração quantizada de fluxo magnético.

A força de aprisionamento dos vórtices, ou força de *pinning*, é a maior força a que os vórtices podem ser submetidos sem se deslocarem pelo material. Caso isso aconteça, contudo, haverá dissipação de energia em forma de calor. A fim de aumentar a força de *pinning* no supercondutor de tipo II, impurezas são introduzidas no material, constituindo centros de aprisionamento onde os vórtices tendem a se posicionar.

Em 1986, foram descobertos os supercondutores de alta temperatura crítica (*High Temperature Superconductors* - HTS), com valores de temperatura crítica acima de



Figura 2.3: Efeito Meissner e Estado Misto

39 K. Em comparação com seus predecessores, então denominados supercondutores de baixa temperatura crítica (*Low Temperature Superconductors* - LTS), apresentam a vantagem de poderem ser resfriados através de sistemas criogênicos menos custosos, e em sua maioria através de nitrogênio líquido, um insumo barato e abundante com temperatura de ebulição de 77,2 K, ao contrário do hélio líquido, utilizado para os LTS, com temperatura de ebulição de 4,2 K.

2.2 Fitas 2G

Os supercondutores HTS eram predominantemente produzidos de forma semi-artesanal em peças maciças no formato de blocos. Para tal, o processo a que são submetidos é naturalmente heterogêneo, o que compromete sua qualidade e previsibilidade, tornando cada bloco um elemento individual com características distintas. As fitas supercondutoras, por outro lado, são produzidas em larga escala e segundo padrão industrial, destacando-se por sua relativa homogeneidade. Além disso, devido à flexibilidade mecânica que lhes é conferida e ao seu formato semelhante aos condutores convencionais, podem ser usadas em diversas aplicações antes impossíveis.

A primeira geração de fitas supercondutoras (Fitas 1G) é composta de filamentos de BSCCO (Bi-2223) e uma matriz de prata representando por volta de 70% de seu volume. Devido à alta dependência de J_C com o campo magnético, contudo, as fitas 1G têm sua aplicabilidade limitada.

Em 2005, todavia, o despontamento das fitas supercondutoras de segunda geração (Fitas 2G) trouxe uma série de benefícios [20, 21]. Com um processo produtivo mais avançado, as fitas de YBCO apresentam um maior potencial de redução de seu custo relativo, além de um campo de irreversibilidade, ou seja, um campo máximo em aplicações práticas, de 6 T em 77 K. O YBCO também é capaz de atingir um grau alto de orientação, o que faz com que seu comportamento se aproxime de um monocristal.

O processo de produção das fitas 2G consiste na subsequente deposição de camadas de diferentes materiais sobre um substrato para que se atinja estabilidade química, térmica, mecânica e elétrica. Cada camada deve ser depositada com grande precisão, a fim de se alcançar o melhor desempenho elétrico possível. A maioria das fitas 2G segue um mesmo padrão, mas variações de material e de estrutura podem ocorrer de acordo com a aplicação em questão. A figura 2.4 mostra um exemplo de arquitetura de uma fita 2G, o modelo SCS4050, da SuperPower [22]. Ao longo deste trabalho, foram usadas fitas supercondutoras de YBCO revestidas de cobre em sua camada externa.

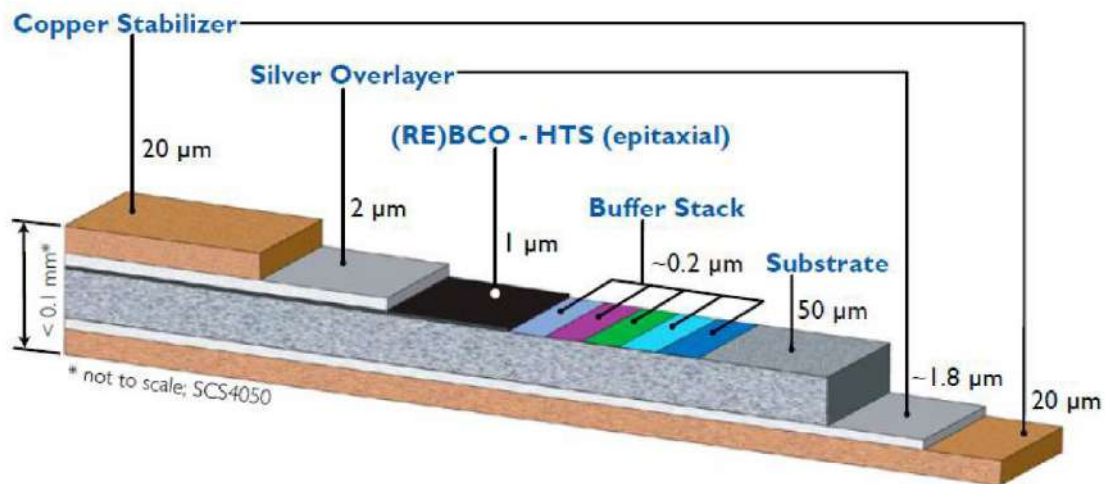


Figura 2.4: Exemplo de arquitetura básica das fitas 2G

Algumas das camadas que pertencem à arquitetura básica das fitas 2G são:

- Substrato: serve de base para a alta orientação dos grãos da camada supercondutora;
- *Buffer Stack*: entre outras funções, altera gradualmente a orientação do material, aproximando-se cada vez mais da estrutura do material supercondutor;
- Camada Supercondutora: camada efetiva de material supercondutor na fita, orientada de acordo com o substrato e o *buffer stack*;
- Prata: funciona como um caminho paralelo para a corrente em caso de aumento da resistência da camada supercondutora e protege o supercondutor do ambiente externo;
- Camada Externa: aumenta a resistência mecânica e oferece estabilidade térmica, além de contribuir para a proteção do supercondutor.

A resistividade de materiais supercondutores, diferentemente daquela dos condutores convencionais, é altamente não linear. Existem diversos modelos para descrever o comportamento do campo elétrico em função da densidade de corrente no supercondutor. É amplamente utilizada a *Power Law* de Anderson-Kim [23] para explicar sua relação com a densidade de corrente que percorre o material, como mostrado na equação 2.1.

$$\frac{E}{E_C} = \left(\frac{J}{J_C} \right)^n \quad (2.1)$$

E_C é o campo elétrico crítico, normalmente considerado $1 \mu V/cm$ [24], J_C é a densidade de corrente crítica, e n é um parâmetro de ajuste do modelo, sendo esses dois últimos dependentes da temperatura e da densidade de campo magnético, portanto, $n(T, B)$ e $J_C(T, B)$. Vale lembrar que a *Power Law* se aplica apenas para valores constantes de densidade de corrente, de forma que pode apenas ser aplicada com ressalvas para densidades de corrente variantes no tempo.

Como mencionado na seção anterior, dependendo do ponto de operação e da configuração de campo magnético ao redor do supercondutor, podem surgir forças capazes de deslocar os fluxóides e os vórtices de corrente que os circundam, as forças de Lorentz, dissipando energia em forma de calor e fazendo surgir um campo elétrico ao longo da fita. O valor do índice n está intimamente associado à força de *pinning* e às condições de operação do material. Quanto maior for n , mais rápida será a transição entre os estados supercondutor e normal, como pode ser visto nas figuras 2.5 e 2.6, e diferentes valores de n representam diferentes regimes de operação:

- $n \approx 1$ - Estado Normal: resistividade se comporta de forma linear;
- $2 \leq n \leq 4$ - *Flux Flow*: Forças de Lorentz, que movem os fluxóides, superam em muito as forças de *pinning*;
- $25 \leq n \leq 50$ (YBCO) - *Flux Creep*: Forças de Lorentz e Forças de *pinning* são da mesma ordem;[25];
- $n \rightarrow \infty$ - Estado de Resistência Nula: não há movimentação de fluxóides.

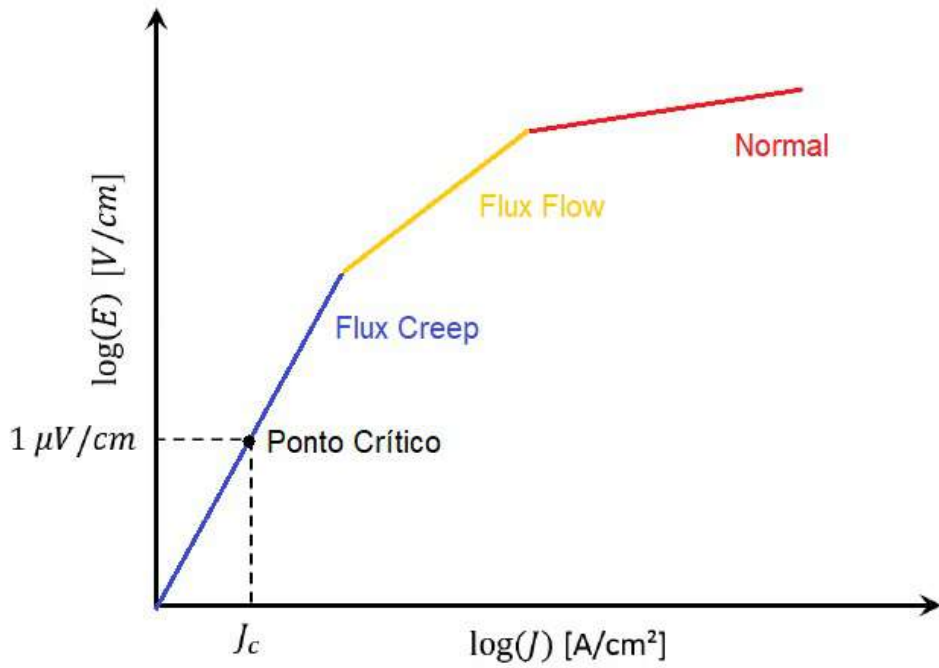


Figura 2.5: Regimes de operação do supercondutor (adaptado de [26])

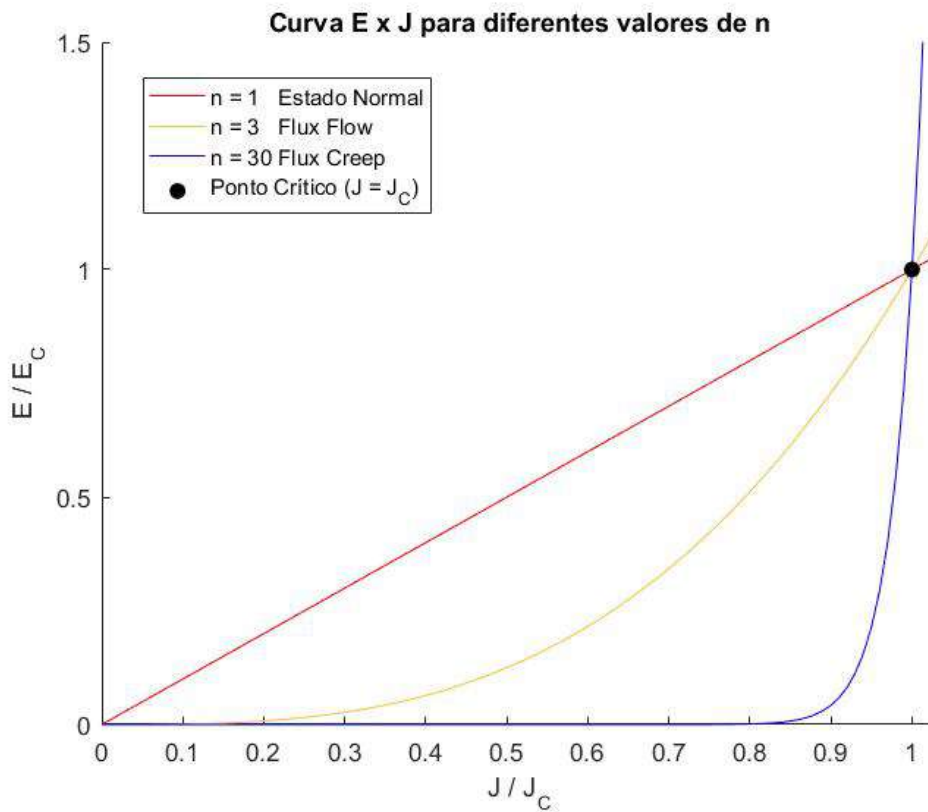


Figura 2.6: Efeito do n na curva E x J

2.3 Laços 2G

Desde seu surgimento, as fitas 2G têm sido objeto de estudo em diversas aplicações. No que diz respeito a mancais magnéticos, pesquisas foram conduzidas comparando a eficiência de pilhas (*stacks*) de fitas 2G com blocos supercondutores de mesmo volume total. No entanto, sabe-se que a geometria é um fator muito relevante para essa aplicação, de forma que tornou-se interessante investigar novos arranjos e disposições de fitas 2G.

O Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP), na UFRJ, têm conduzido pesquisas em torno de uma geometria conhecida como "laço 2G", que consiste em uma fita 2G parcialmente cortada, de forma que se possa traçar um caminho fechado de corrente sem emendas [9, 27, 28]. Os dois ramos são então separados de modo a formar um laço. A figura 2.7 mostra como um laço 2G é produzido a partir de uma fita 2G.

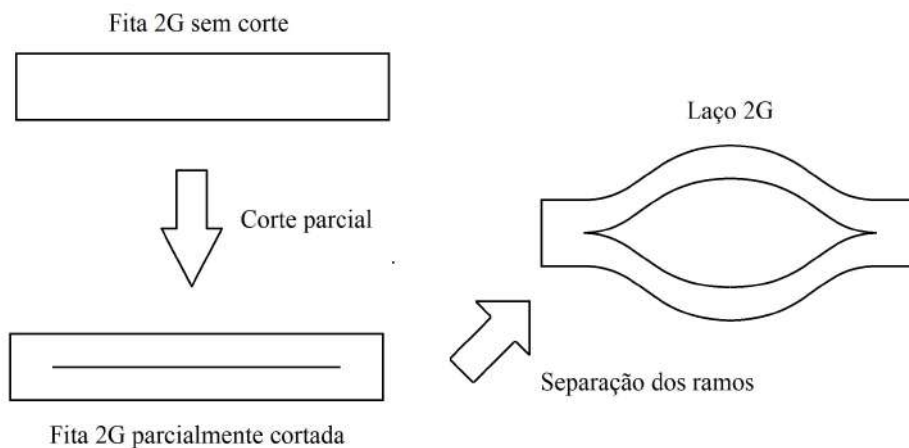


Figura 2.7: Produção de um laço 2G a partir de uma fita 2G

Devido a sua geometria, os laços 2G conseguem aprisionar campo magnético em seu interior de forma semelhante aos blocos, quando submetidos a resfriamento na presença de campo magnético (*field cooling*) ou a variações de campo externo suficientemente altas após resfriamento com magnético nulo (*zero field cooling*), como será visto na próxima seção. Todavia, enquanto nos blocos, o campo interno é dado pelo surgimento de fluxóides de campo magnético em seu interior, o campo interno dos laços é dado exclusivamente pela diferença entre a corrente que circula por ele e aquela que seria necessária para blindar totalmente o campo externo. A corrente que circula pelo laço, portanto, blinda apenas parcialmente o campo externo, permitindo a entrada de campo magnético em seu interior. Em outras palavras, o laço é como um

bloco com corrente de blindagem e um único fluxóide de proporções muito maiores em seu interior. A sobreposição da corrente de blindagem com o vórtice de corrente resulta na corrente total que circula pelo laço. Essa comparação é detalhada na figura 2.8.

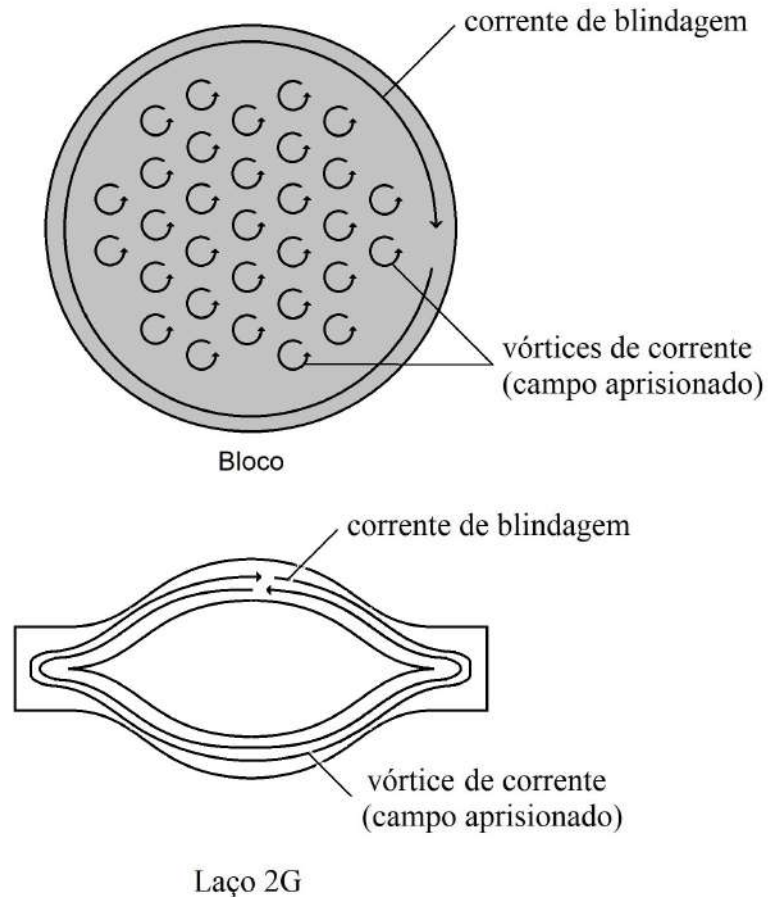


Figura 2.8: Aprisionamento de campo no bloco e no laço 2G

Neste ponto é necessário estabelecer uma importante diferença entre o modo de operação dos laços e das fitas 2G. Enquanto normalmente a fita 2G sofre uma imposição de corrente, ou seja, a corrente elétrica a que é submetida é aplicada diretamente sobre seus terminais, o laço 2G é submetido a uma indução de corrente. Seja por meio de um eletroímã ou pela variação da altura de levitação sobre um trilho de ímãs, como é o caso de um veículo de levitação magnética, a corrente no laço é induzida pelo campo magnético externo. Isso é necessário pois não se tem acesso aos terminais do laço supercondutor.

A relação entre a corrente circulante no laço 2G e o campo magnético externo que a induz é semelhante à curva de histerese magnética de um material ferromagnético, com um ponto de saturação dependendo do valor da corrente crítica. Ao se chegar próximo do valor da corrente crítica, o supercondutor entra em um

estado dissipativo, não conseguindo anular completamente o campo magnético em seu interior. Dessa forma, a corrente no laço não depende somente do valor atual de campo magnético externo, mas também do seu histórico. Além disso, devido às condições elétricas, magnéticas e térmicas, o material supercondutor pode mudar de regime de operação, ou mesmo transitar entre estados. Qualquer desses fenômenos tem um efeito instantâneo na corrente circulante, podendo reduzi-la drasticamente ou mesmo anulá-la momentaneamente.

Esse comportamento histerético do laço 2G é o que permite a indução de correntes persistentes e pode ser observado em outras aplicações. Na levitação magnética, a força de levitação gerada ao se deslocar o laço com relação a ímãs também apresenta uma histerese com a altura de levitação [9]. No caso da magnetização, o campo aprisionado produzido pela corrente circulante após o processo de indução pode ser diretamente comparado ao campo de magnetização de um ímã. A figura 2.9 mostra a curva da corrente no laço 2G pela força magnetomotriz a que é exposta durante um pulso de campo magnético. A curva foi obtida através da aplicação de um pulso de corrente no primário de um transformador cujo secundário era um laço supercondutor. Para cada valor de corrente no primário e, conseqüentemente, de força magnetomotriz, foi medida a corrente circulante no supercondutor.

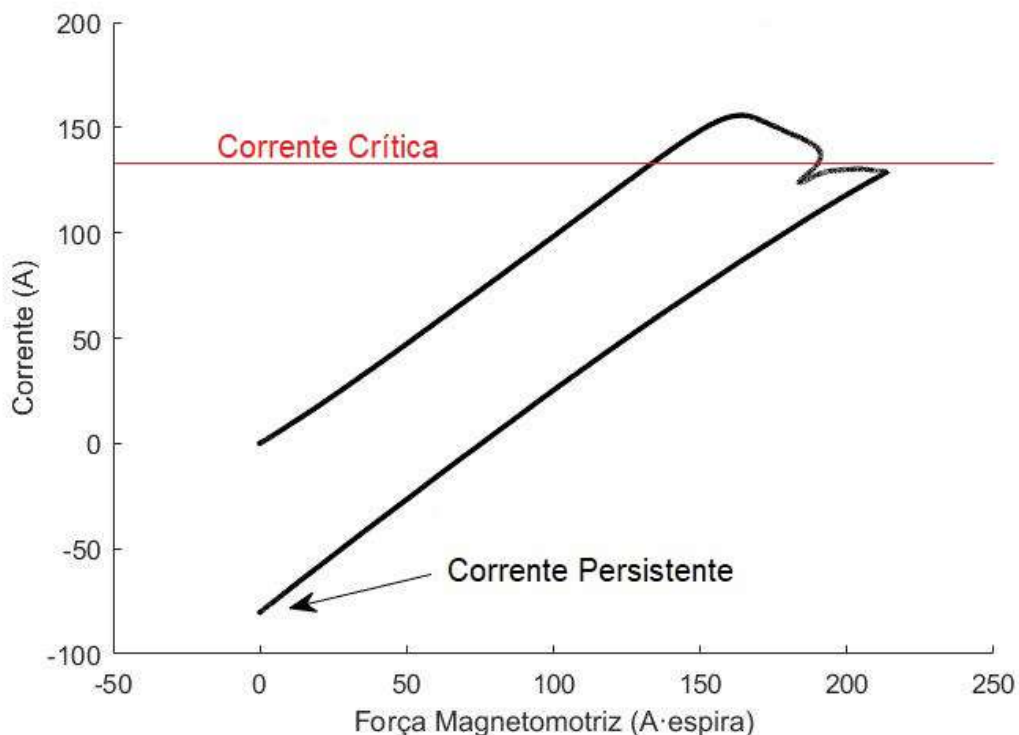


Figura 2.9: Curva de corrente por força magnetomotriz do laço 2G

2.4 Métodos de Magnetização de Supercondutores

Os laços 2G não apresentam perdas resistivas por conta de emendas. Desta forma, o decaimento da corrente é provocado unicamente por *flux creep* ou por influência externa, como mudança na temperatura ou no campo magnético. Esta seção apresenta diferentes métodos de magnetização [29–32], que têm por finalidade a indução e manutenção de correntes persistentes no laço ao longo do tempo. Espera-se que a possibilidade de manutenção da corrente persistente por meio da magnetização amplie a variedade de possíveis aplicações comerciais dos laços 2G.

- **Magnetização por *Field Cooling*:** O FC, ou *Field Cooling* (resfriamento na presença de campo) trata-se da transição do material para o estado misto por meio da redução da temperatura enquanto exposto a um campo magnético externo. Uma vez que o campo magnético externo é retirado, surgem vórtices de corrente no supercondutor de forma a contrabalancear a variação de fluxo magnético no interior do material. O resultado final é um supercondutor com campo magnético aprisionado, cuja corrente decai de forma logarítmica no tempo devido ao *flux creep* (Figura 2.10a);
- **Magnetização após *Zero Field Cooling*:** Neste método de magnetização, o material já se encontra abaixo da temperatura crítica por ter sido resfriado com campo magnético externo nulo (*Zero Field Cooling* - ZFC). É aplicado então um campo magnético externo acima de H_{C1} . Em resposta, surgem correntes de blindagem que bloqueiam apenas parcialmente o campo externo, de forma que, quando retirado, parte dele é aprisionada no interior do supercondutor. Este método é menos eficiente do que a magnetização por FC devido a necessidade de se ultrapassar a corrente crítica. Contudo, o fato de não precisar de variação de temperatura significa que pode ser empregado em situações em que o supercondutor não pode ter sua operação interrompida (Figura 2.10b);
- ***Pulse Magnetization*:** Na magnetização por pulsos (*Pulse Magnetization* - PM), objeto de estudo deste trabalho, o material, já abaixo da temperatura crítica, é submetido a variações intensas de campo magnético em seu interior, em forma de pulsos [33–35]. Da mesma forma que na magnetização após ZFC, o campo magnético intenso a que o supercondutor é submetido provoca a blindagem parcial do campo e seu consequente aprisionamento no interior do material. A aplicação de múltiplos pulsos de campo pode ser utilizada para a manutenção da corrente persistente e do campo aprisionado no material (Figura 2.10b).

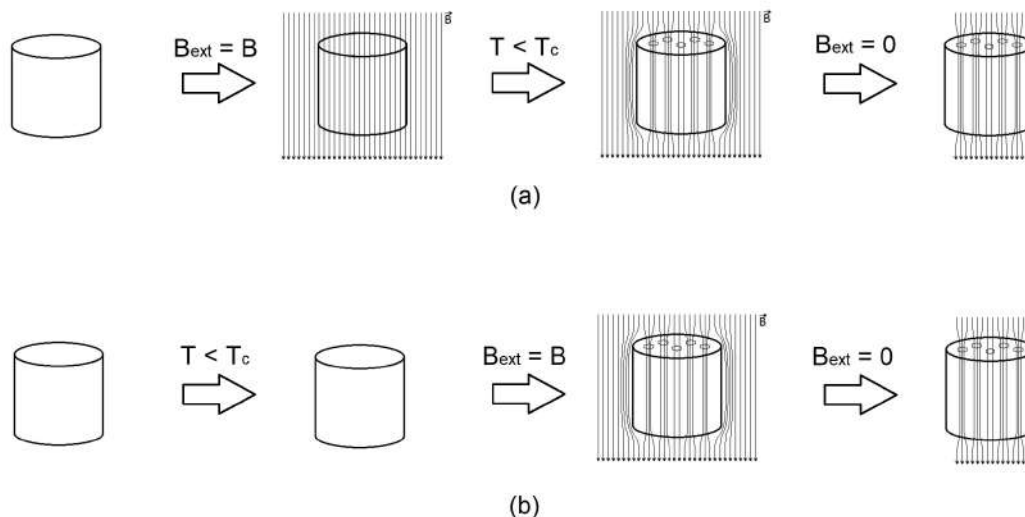


Figura 2.10: Métodos de Magnetização de Supercondutores: (a) *Field Cooling*; (b) *Zero Field Cooling* e *Pulse Magnetization*

Vale ressaltar que nada impede que os métodos sejam utilizados de forma combinada. Um laço supercondutor poderia ser submetido a *Field Cooling* seguido da aplicação de subsequentes pulsos de campo. Desta forma, o FC, um método eficiente e apropriado para o início da operação, seria responsável pela indução de corrente persistente enquanto o *Pulse Magnetization* seria utilizado para manutenção da corrente persistente durante a operação. De fato, espera-se que os resultados da pesquisa acerca da magnetização por pulsos seja útil para a compensação do decaimento da levitação de mancais magnéticos durante sua operação.

2.5 Magnetização com Pulsos Longos de Corrente

Foi investigado o comportamento da corrente e do campo elétrico em laços sem emendas durante e após variação do campo magnético em seu interior através da aplicação de pulsos de corrente no primário de um transformador [12, 13] e foi estudada a relação entre a corrente persistente e os parâmetros do pulso, como largura do pulso de corrente aplicada ao primário do transformador, da intensidade, do número de pulsos aplicados em sequência e do intervalo de tempo entre cada um deles.

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que, enquanto a mudança dos parâmetros em questão realmente tem grande efeito na corrente persistente, um aumento demasiado no número de pulsos ou na largura dos pulsos oferece incrementos cada vez menores à corrente persistente. A fim de exemplificar o comportamento da corrente e do campo elétrico no laço 2G em resposta a um pulso de

campo magnético em seu interior, a figura 2.11 mostra os resultados de um ensaio com pulso de corrente de 3 A e 1000 ms no primário do transformador com um laço 2G de $J_C = 134$ A.

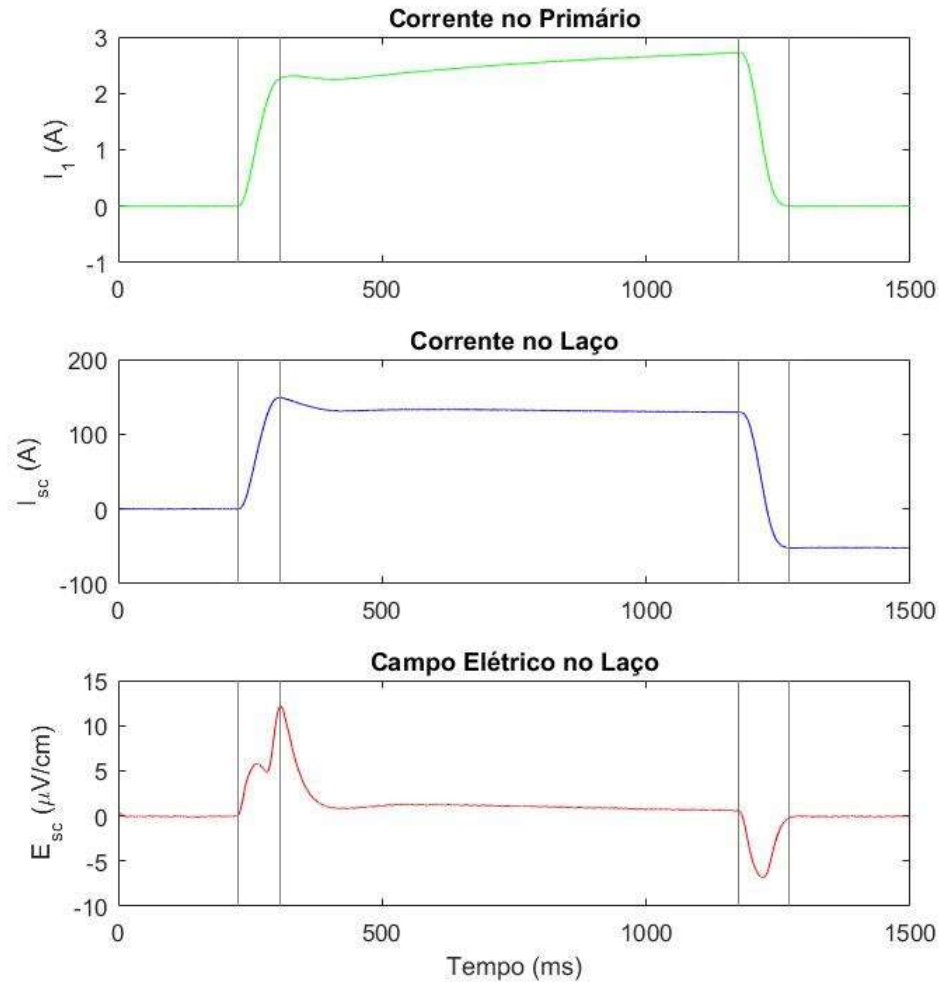


Figura 2.11: Comportamento da corrente e do campo elétrico no laço 2G em resposta a um pulso de corrente no primário de um transformador com o laço 2G como secundário

Percebe-se que a corrente circulando no laço 2G ultrapassou seu valor crítico, fazendo com que o supercondutor entrasse em um estado dissipativo, com campo elétrico elevado. Após o pico inicial de corrente e campo elétrico, ambos se reduzem até valores próximos dos críticos até o fim do pulso, quando a corrente no supercondutor cai e inverte, até atingir o valor persistente de 52 A. Durante a subida e descida do pulso, surge um campo elétrico de natureza indutiva.

Nota-se que a corrente no secundário inicialmente acompanha aquela no primário, até o surgimento do campo elétrico resistivo (*Power Law*), quando se limita. Essa discrepância entre as correntes, a menos da relação de transformação, está associada

ao surgimento de uma corrente persistente ao fim do pulso. De fato, em ensaios em que não se atinge a corrente crítica, não há campo elétrico de natureza resistiva e não há corrente persistente. O comportamento transitório do campo elétrico e da corrente no supercondutor serão analisados com mais detalhes ao longo dos próximos capítulos.

Durante esse trabalho, contudo, utilizou-se uma fonte de corrente com tempo de resposta relativamente longo, de forma que só foi possível gerar pulsos de corrente com um formato satisfatório para valores de largura de pulso a partir de 100 ms [12]. Desta forma, não foi possível estudar o comportamento da corrente persistente e do laço supercondutor, de forma geral, para pulsos curtos. Isto, aliado ao fato de que é possível provocar mudanças de regime do supercondutor mesmo com pulsos curtos, torna interessante a investigação do comportamento tanto da corrente quanto do campo elétrico no supercondutor quando submetido a pulsos curtos de campo magnético.

Capítulo 3

Metodologia e Equipamentos

O presente capítulo apresenta o procedimento para produção do laço 2G, os sistemas utilizados tanto para caracterização do laço 2G quanto para o processo de magnetização por pulsos curtos e os tipos de ensaios realizados, descrevendo os equipamentos, técnicas e métodos utilizados. Além disso, será abordada uma modelagem para o sistema de magnetização, na tentativa de se fazer possível a estimação do campo elétrico e da corrente no laço 2G tendo como entrada a corrente no primário.

3.1 Amostra de Laço 2G

O laço 2G submetido à magnetização por pulsos foi produzido a partir de um segmento de fita 2G de modelo SCS4050-AP, da Superpower, com quatro milímetros de largura, 0.092 mm de espessura e 250 mm de comprimento e revestimento de cobre. As camadas de cobre utilizadas para revestimento garantem uma maior estabilidade térmica e proteção do material supercondutor. Apesar delas, foram utilizadas luvas durante seu manuseio para minimizar sua degradação. O valor médio de corrente crítica, fornecido pela Superpower, é de 105 A.

Um corte parcial foi feito no segmento de fita, com comprimento de 100 mm, de forma que as pontas da fita permanecessem conectadas, mas sua parte central fosse dividida em dois ramos, como mostra a Figura 3.1. Essa geometria permite que uma corrente induzida no laço circule em um caminho fechado e com perdas desprezíveis quando comparadas com fitas com emendas.

Após o corte, são soldados dois fios de manganina (AWG 40) a um dos ramos da fita para servir como terminais de tensão, distantes de 80 mm entre si. A solda utilizada foi de 63Sn/37Pb com ponto de fusão de 183 °C e índio-estanho com ponto de fusão próximo de 120 °C. As camadas de cobre protegem a fita da reação química que ocorreria entre a camada de prata e a solda caso não houvesse esse revestimento, contribuindo para o aumento da vida útil da fita.

A fim de se evitar o uso de luvas durante os ensaios, proteger a amostra de

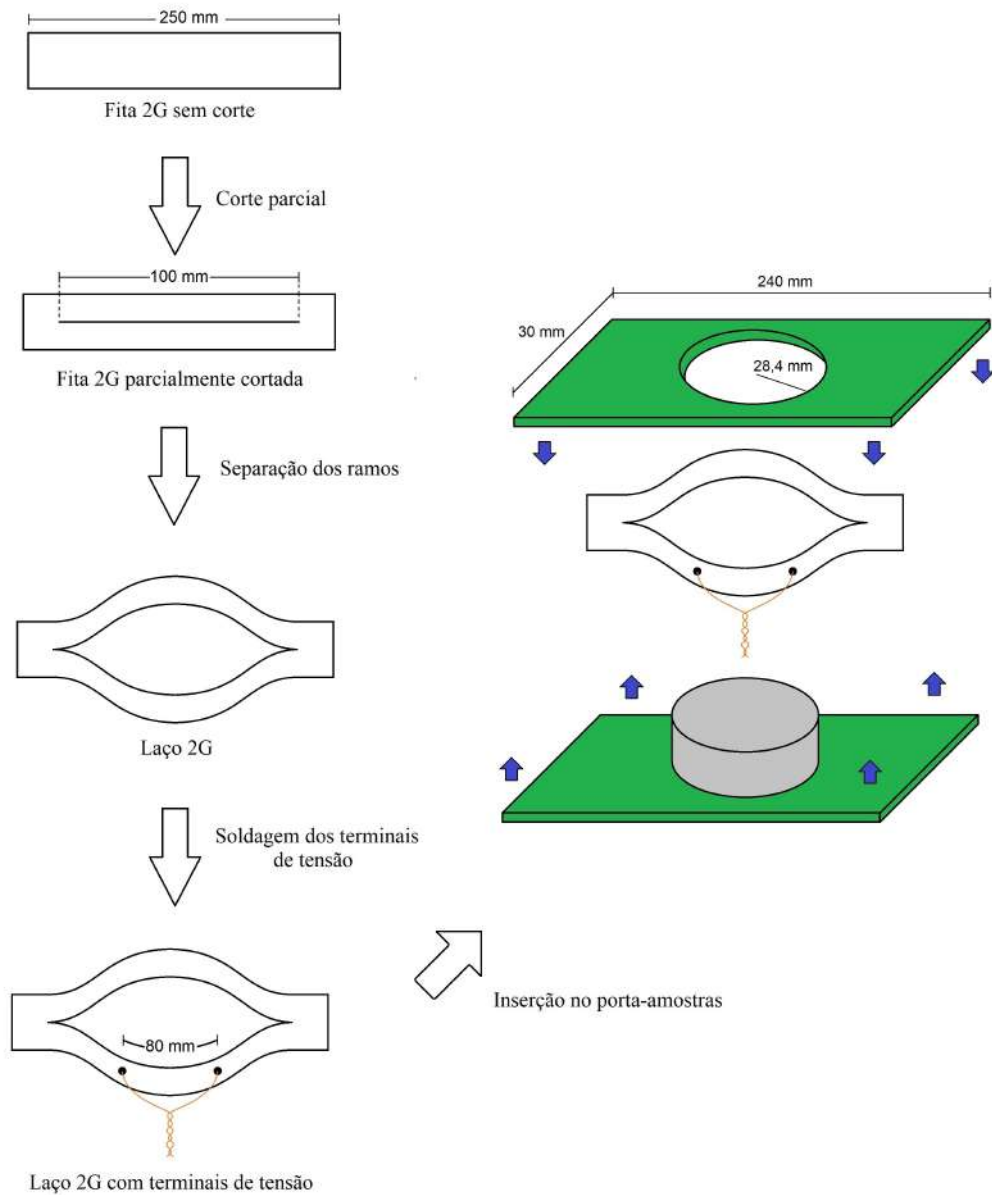


Figura 3.1: Procedimento de preparação do Laço 2G

eventuais impactos acidentais e facilitar o posicionamento da amostra no sistema de magnetização, foi projetado e construído um porta-amostras de G10, que consiste basicamente em duas placas conectadas por um cilindro. A fita envolve o cilindro e fica entre as duas placas, como pode ser visto na Figura 3.2, que mostra o laço pronto já no porta-amostras.

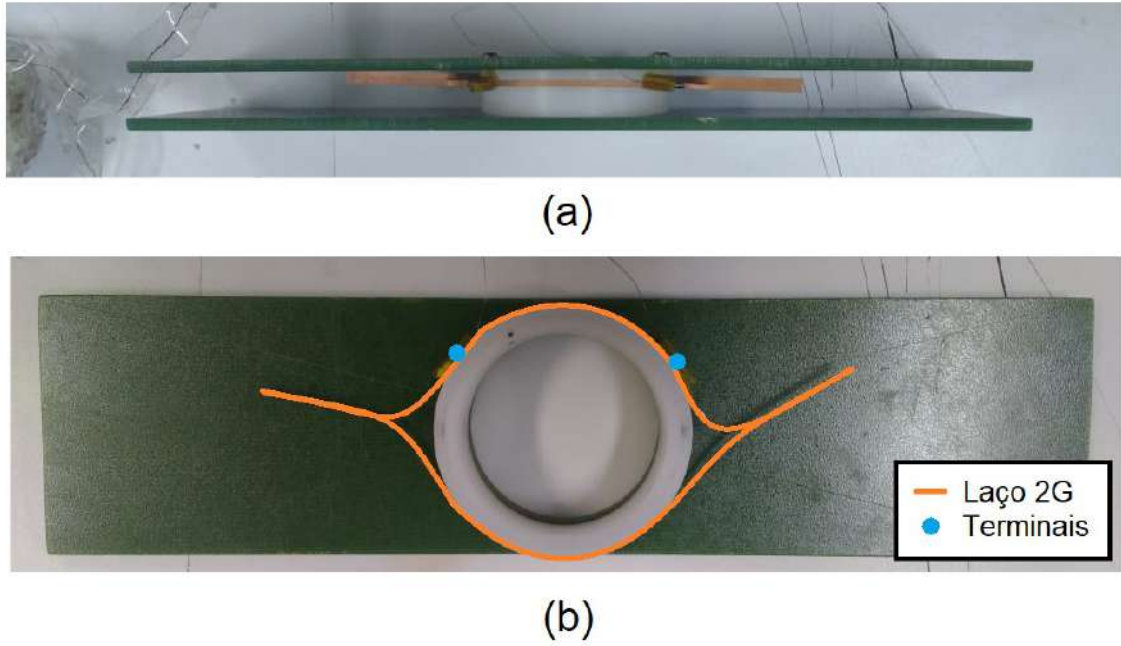


Figura 3.2: Laço 2G no porta-amostras: (a) vista frontal; (b) vista superior sem a tampa evidenciando a fita e os terminais de tensão

3.2 Sistema de Caracterização de Quatro Pontos

A equação 2.1, que descreve a relação entre o campo elétrico e a densidade de corrente no supercondutor, pode ser reescrita em termos da corrente no supercondutor de acordo com a equação 3.1.

$$E = E_C \left(\frac{I}{I_C} \right)^n \quad (3.1)$$

A caracterização elétrica de quatro pontos de fitas 2G tem como objetivo a determinação dos valores de n e, principalmente, I_C (corrente crítica) da equação 3.1. Para isso, é imposta uma corrente conhecida sobre a fita supercondutora resfriada sem presença de campo (*Zero Field Cooling* - ZFC) e o valor de campo elétrico que surge em seus terminais de tensão é medido. O processo é repetido para vários valores de corrente, de forma que se obtenha a curva de campo elétrico por corrente da fita. A partir dessa curva é possível estimar os valores de corrente crítica e do índice n da amostra através de um ajuste numérico.

O sistema utilizado foi desenvolvido numa parceria do Lasup com o Laboratório de Supercondutividade do Cepel [36]. A geração de corrente do sistema de caracterização é proporcionada por uma fonte de corrente contínua, modelo KDC 30 500. Dois nanovoltímetros 2182A são responsáveis pela medição indireta da corrente, através de um resistor com resistência conhecida de $400 \text{ m}\Omega$ em série com a amostra, e do campo elétrico, através de dois terminais conectados diretamente à fita 2G.

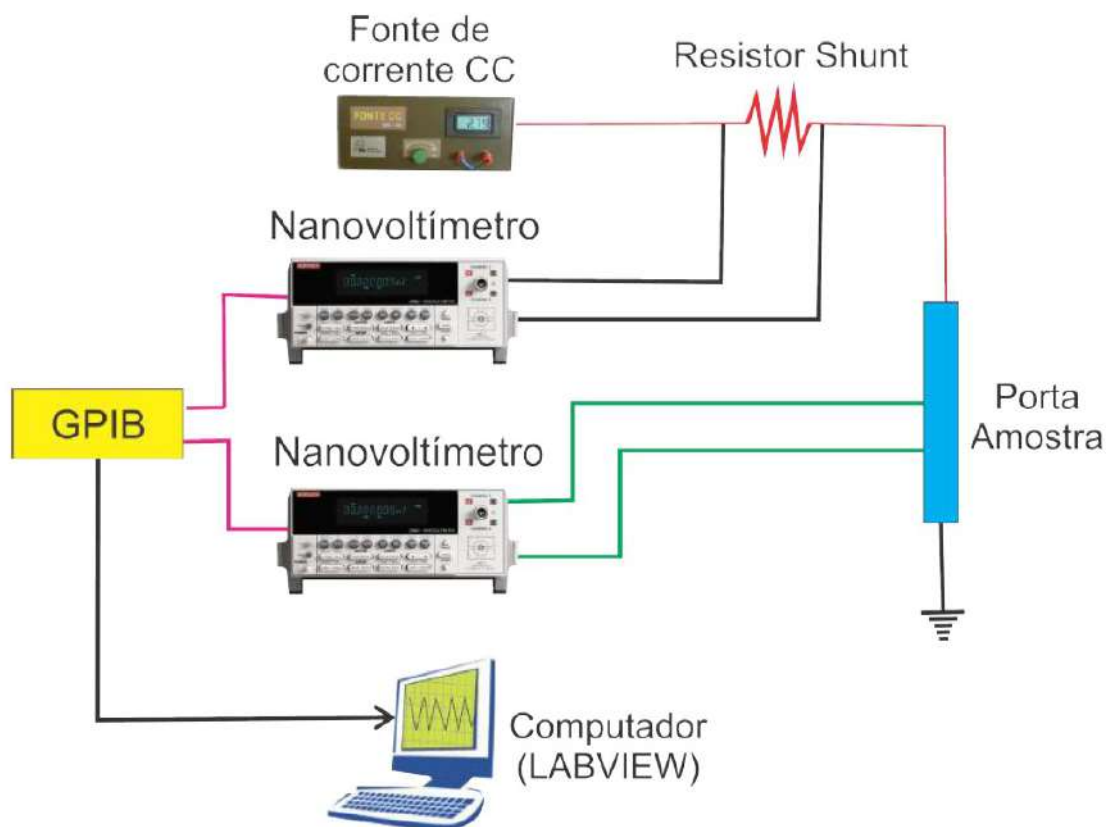


Figura 3.3: Sistema de Caracterização por Imposição de Corrente

O *software* LabVIEW processa e armazena os dados medidos pelos nanovoltímetros, que recebe por meio de comunicação GPIB. Um esquema representativo do sistema pode ser visto na Figura 3.3 e a Figura 3.4 mostra o passo a passo do ensaio de caracterização pelo método de quatro pontos.

Normalmente, com o intuito de se ancorar termicamente a amostra e evitar que efeitos de temperatura alterem o resultado da caracterização, utiliza-se um porta-amostras de cobre a que fica presa a amostra. Contudo, devido ao corte parcial na amostra utilizada para este trabalho e aos terminais soldados a ela, a caracterização com o porta-amostras mostrou-se de difícil execução e optou-se que este não fosse utilizado.

A caracterização de quatro pontos, contudo, mostra um obstáculo ao se tentar determinar a corrente crítica de um laço 2G. Nesse processo de caracterização, a corrente imposta sobre o laço se divide entre seus dois ramos que, nesse arranjo, estão conectados em paralelo (figura 3.5a). Durante a magnetização por pulsos, contudo, a corrente a circular pelo laço é induzida por um campo magnético externo e percorre um caminho fechado, de forma que os ramos do laço estão em série (figura 3.5b). Por isso, a corrente fornecida ao supercondutor na caracterização quando E_C é igual a $1 \mu V/cm$ não corresponde à corrente crítica do laço. Na realidade, a corrente

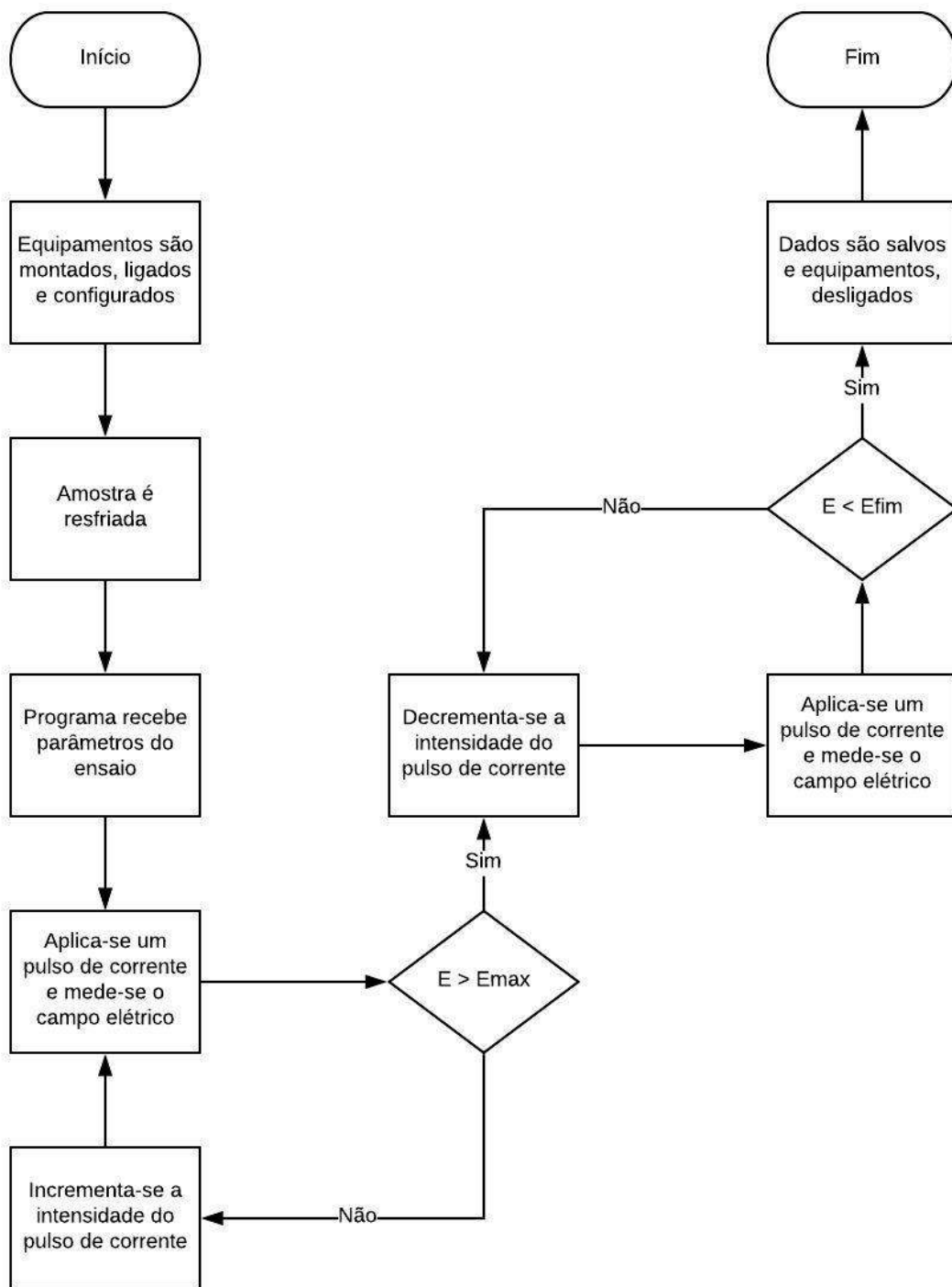


Figura 3.4: Passo a passo do ensaio de caracterização convencional

crítica é aquela que passa pelo ramo onde estão conectados os terminais de tensão quando o campo elétrico medido é $1 \mu V/cm$.

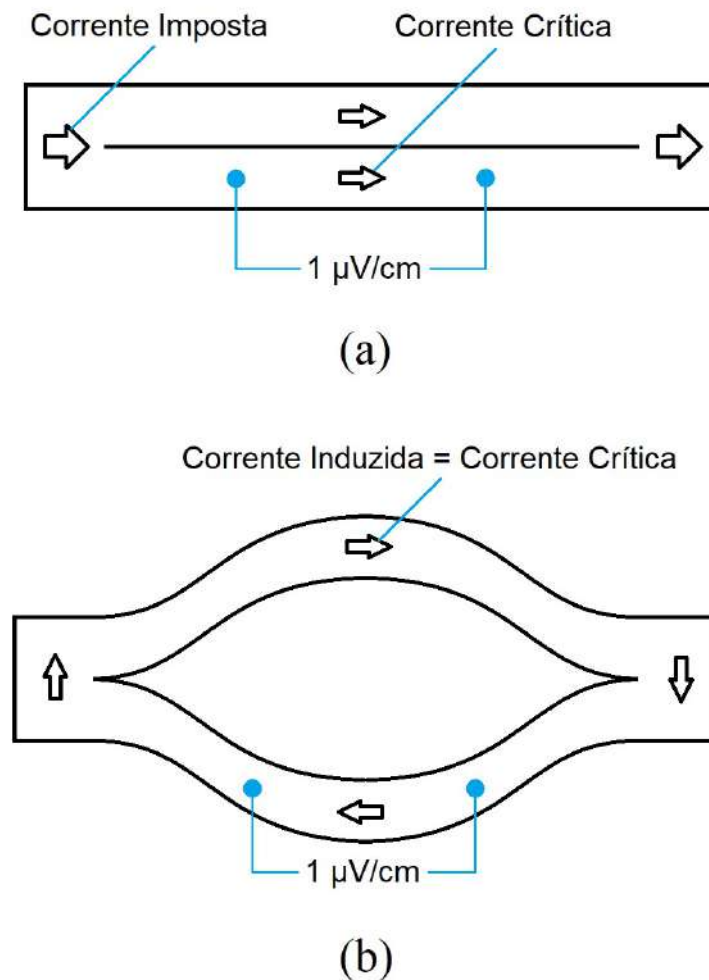


Figura 3.5: Caminho da corrente no laço 2G durante (a) a caracterização de quatro pontos; (b) a magnetização por pulsos

Portanto, a corrente medida segundo o critério de $1 \mu V/cm$ corresponde a, no mínimo, o dobro do valor crítico real, dependendo da assimetria entre os dois ramos do laço. Quanto mais retilíneo e centralizado for o corte parcial, mais próximos serão os valores de corrente em cada ramo durante a caracterização, e mais próxima ficará a corrente crítica da metade do valor medido quando $E = 1 \mu V/cm$, permitindo uma estimativa mais acurada da corrente crítica. Contudo, como não se pode garantir a qualidade do corte parcial, sempre haverá um alto erro associado ao se determinar a corrente crítica do laço por esse método.

Na tentativa de prover um meio mais confiável para se determinar a corrente crítica do laço 2G, o método de caracterização por indução de corrente será introduzido mais adiante na próxima seção.

3.3 Sistema de Magnetização de Laços 2G

A fim de se induzir corrente persistente no laço supercondutor, é necessário que ele seja exposto a campos magnéticos externos de forma que, uma vez que o campo externo seja retirado, se mantenha corrente circulando ao longo do laço. O sistema utilizado foi desenvolvido especificamente para a aplicação de pulsos de fluxo magnético no interior do laço 2G e medição das grandezas relacionadas ao fenômeno da magnetização, embora outras formas de onda possam ser empregadas.

3.3.1 Geração do Pulso de Fluxo Magnético

O sistema de magnetização do laço consiste em um circuito magnético com núcleo de aço a que estão acoplados, de um lado, um enrolamento convencional de cobre com cem espiras, e de outro, o laço 2G a ser magnetizado, formando efetivamente um transformador. Desta forma, a corrente circulante nos enrolamentos de cobre (primário) induz uma corrente no laço 2G (secundário).

O primário do transformador é alimentado por uma fonte de corrente acionada por um IGBT. Em desenvolvimento numa parceria entre o LASUP, o Laboratório de Super-Espectroscopia do Rio (LASER) e o Laboratório de Supercondutividade do Cepel, a fonte é capaz de gerar pulsos de corrente de acima de 1000 A, com tempos de subida na ordem de microssegundos e tempo de descida na ordem de alguns milissegundos devido à natureza indutiva do transformador. Em contrapartida, a configuração atual da fonte limita o valor máximo de corrente em 3,3 A, o que demanda que os demais componentes do sistema sejam dimensionados de forma a compensar o baixo nível de corrente no primário. A figura 3.6 mostra o esquema de montagem do transformador acoplado à fonte de corrente e ao laço 2G.

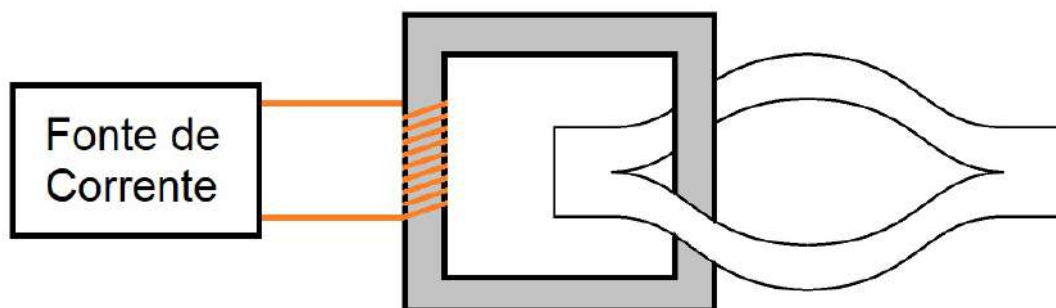


Figura 3.6: Esquema de montagem do transformador

O acionamento da corrente por meio do IGBT permite que sejam regulados os valores de intensidade e duração dos pulsos, conferindo a flexibilidade necessária

para o estudo da influência desses parâmetros na corrente persistente. Um pulso de corrente de 1,9 A e 10 ms gerado pela fonte pode ser visto na Figura 3.7.

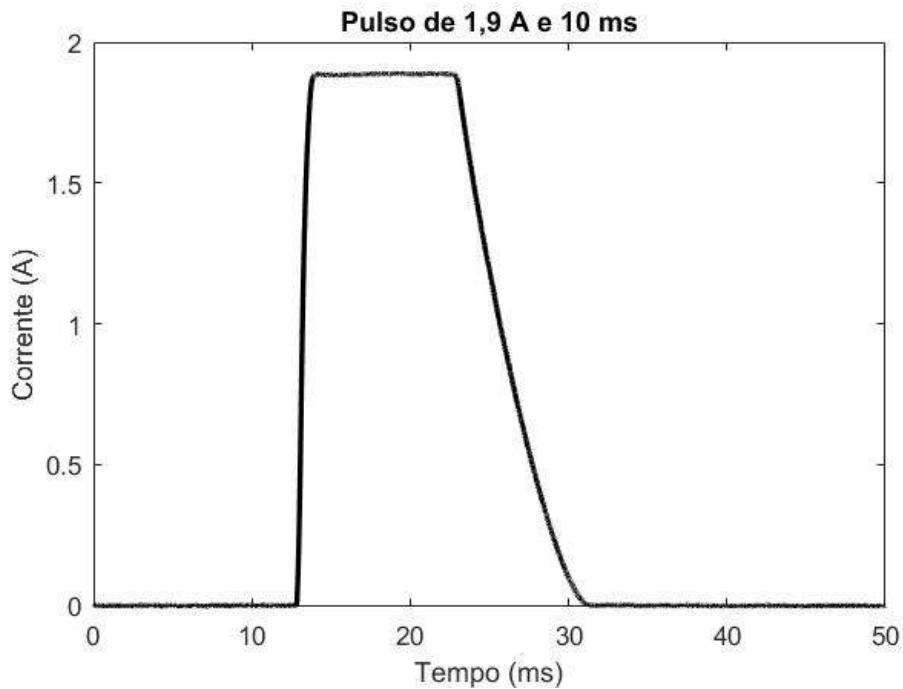


Figura 3.7: Pulsos gerado pela fonte de corrente no primário do transformador

3.3.2 Medição das Correntes e Campo Elétrico

Uma vez que se induz corrente no laço 2G, contudo, é necessário que sejam medidos os valores de corrente e campo elétrico ao longo do material supercondutor, além da corrente imposta sobre o primário. Para isso utiliza-se o osciloscópio Agilent modelo DSO-X 4024A, com quatro canais e frequência de amostragem de 200 MHz.

Corrente no Primário (I_1)

A corrente imposta no primário, ou seja, a corrente gerada pela fonte de corrente, é medida através de uma ponteira de corrente envolvendo os cabos que conectam a fonte ao transformador. A ponteira em questão possui um ganho de dez ou cem vezes em seu circuito interno, permitindo medidas precisas com pouco ruído. A saída da ponteira é lida diretamente por um dos canais do osciloscópio, dispensando o uso de um amplificador ou filtro externo.

Corrente no Laço 2G (I_{sc})

A corrente induzida no secundário, ou seja, a corrente no laço 2G, se mede por meio de um sensor de corrente desenvolvido pela equipe do Lasup [37]. Trata-se de

um circuito magnético em cujo gap localiza-se um sensor de efeito hall CY SJ106C. Um dos ramos do laço 2G é posicionado no interior do circuito, de tal forma que, quando houver corrente circulando no laço, será induzido um campo magnético ao longo do circuito magnético, que por sua vez será captado pelo sensor de efeito hall e convertido em um sinal de tensão.

Apesar de não ter sido fabricado para uso em nitrogênio líquido e de seu comportamento variar com a temperatura, é possível obter-se a curva de calibração neste ponto de operação aplicando-se uma corrente conhecida no interior de seu circuito magnético e medindo-se o sinal de tensão gerado na temperatura do nitrogênio líquido. De fato, a curva obtida mostrou-se linear para os valores de corrente a que o supercondutor foi submetido, como pode ser visto na Figura 3.8.

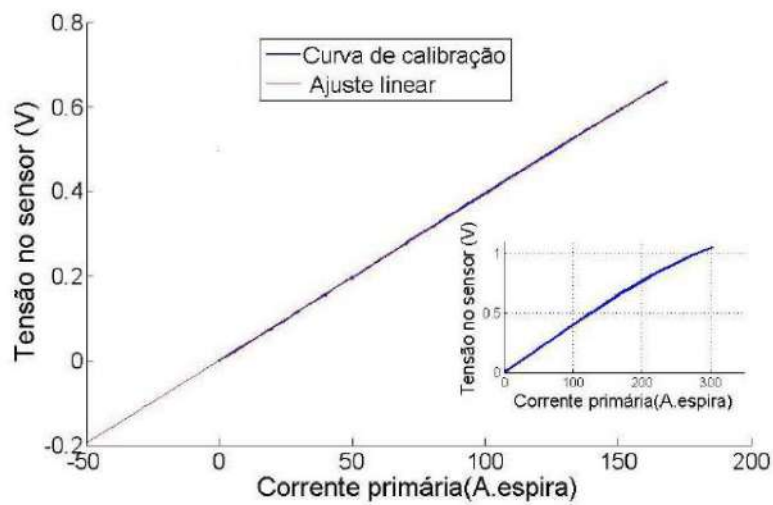


Figura 3.8: Curva de calibração do sensor de efeito Hall

Após ser medido, o sinal do sensor passa por um amplificador com ganho de cinco vezes e é então recebido pelo osciloscópio. A figura 3.9 mostra o sensor de corrente para medição de corrente no laço.

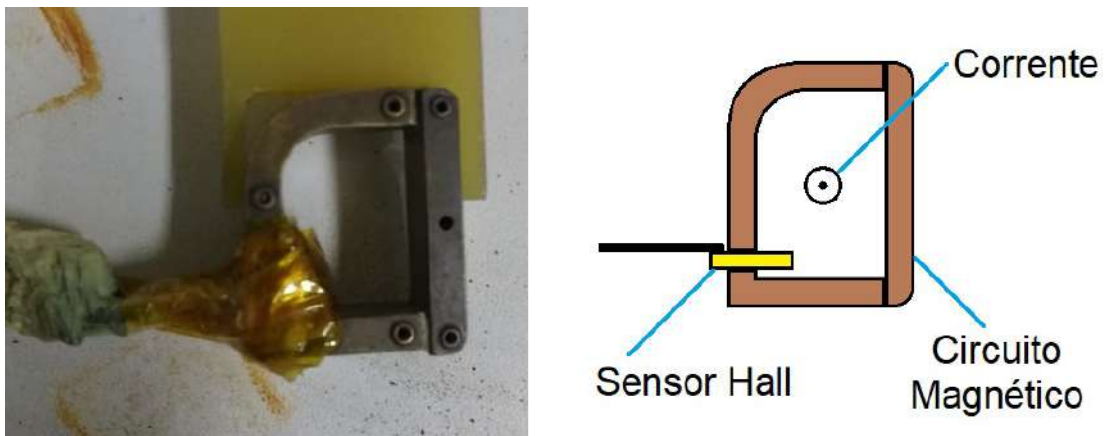


Figura 3.9: Sensor de corrente para medição da corrente no supercondutor

Campo Elétrico no Laço 2G (E)

O campo elétrico induzido no laço 2G, por sua vez, é medido diretamente através de dois terminais soldados à fita. A tensão medida é amplificada em mil vezes por um amplificador AD620ANZ e lida por um dos canais do osciloscópio. Dividindo-se a tensão medida pela distância entre os terminais, encontra-se o campo elétrico.

Uma vez que os três sinais são medidos e recebidos pelo osciloscópio, são então enviados para um computador por meio de comunicação GPIB e do *software* LabVIEW. Os dados são então armazenados para posteriormente serem analisados via Matlab. Um esquema do sistema com todos os seus componentes e conexões pode ser visto na Figura 3.10.

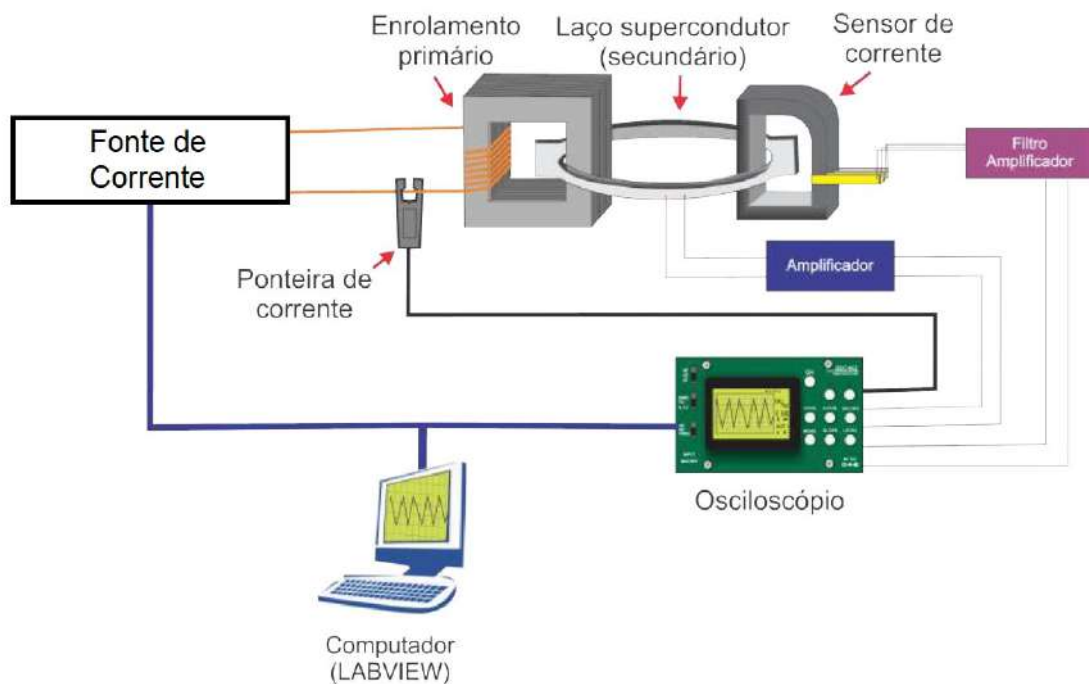


Figura 3.10: Sistema de Magnetização

Conhecendo-se os valores de campo elétrico, corrente no primário e corrente no supercondutor, é possível calcular a energia transferida para o supercondutor e se fazer uma análise do comportamento do supercondutor quando exposto a pulsos de campo magnético.

3.3.3 Modelagem do Sistema de Magnetização

Através da equação 3.1, conhecemos a relação entre o campo elétrico e a corrente para valores de corrente constantes no tempo. Contudo, durante o processo de magnetização, o laço 2G é exposto a um pulso de campo magnético, induzindo uma corrente com variação intensa no tempo.

A fim de representar o efeito dessas variações no campo elétrico, deve-se considerar uma componente indutiva, como apresentado na equação 3.2, onde L_{sc} e l são a indutância e o comprimento entre os terminais do laço. Pode-se dizer então que o campo elétrico no laço 2G é composto por uma parcela resistiva não linear (direta), descrita pela *Power Law*, e por uma parcela indutiva (em quadratura), proporcional à derivada da corrente.

$$E(t) = E_C \left[\frac{I(t)}{I_C} \right]^n + \frac{L_{sc}}{l} \cdot \frac{dI(t)}{dt} = E_R + E_L \quad (3.2)$$

Desta forma, recebendo como entrada a corrente no laço, é possível se encontrar o campo elétrico ao longo do supercondutor. Contudo, o sistema real de magnetização recebe como entrada a corrente no primário. Esta induz uma corrente no secundário que, por sua vez, gera um campo elétrico. É interessante, portanto, encontrar uma relação clara entre a corrente no laço 2G e a corrente no primário.

O sistema de magnetização consiste basicamente em um transformador com primário de cobre e um laço 2G em seu secundário, alimentado por uma fonte de corrente. Portanto, a fim de se representar o sistema completo, parte-se do modelo elétrico básico de um transformador, apresentado na figura 3.11a.

O secundário do transformador que representa o sistema, contudo, trata-se de um laço supercondutor. Uma vez que o campo elétrico do laço possui tanto uma componente resistiva quanto uma indutiva, deve ser representado por uma indutância em série com uma resistência variável segundo a *Power Law*. Como o laço é um caminho fechado, os terminais do secundário do transformador devem ser curto-circuitados. Chega-se então ao modelo apresentado na figura 3.11b.

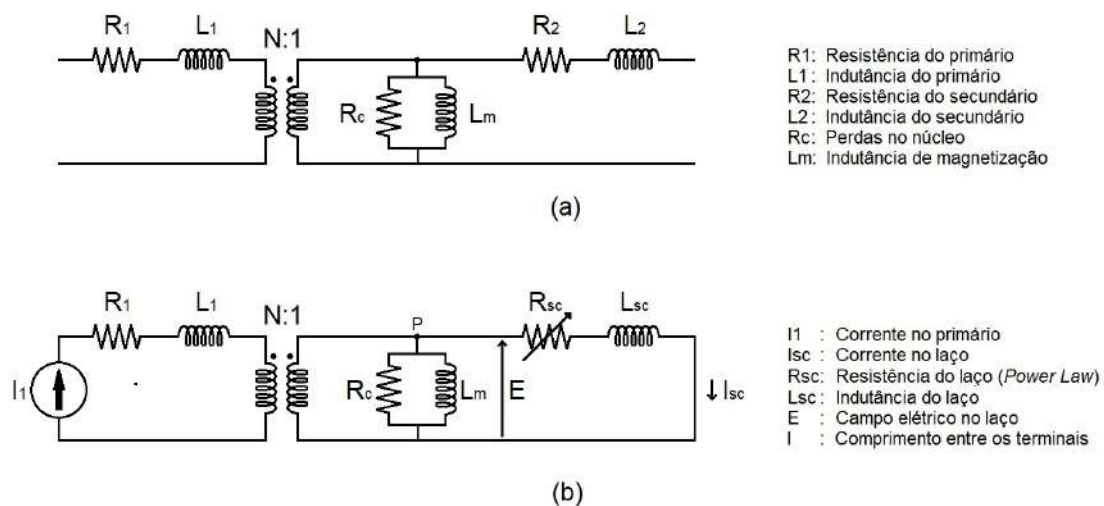


Figura 3.11: Modelo básico do transformador (a); modelo do sistema de magnetização (b)

Agora que se tem o circuito que representa de forma simplificada o sistema, é possível encontrar as equações que relacionam o campo elétrico e a corrente no supercondutor com a corrente do primário. Aplicando a Lei dos Nós de Kirchoff ao nó P e reescrevendo as correntes em função do campo elétrico nesse ponto, chega-se às equações 3.3 e 3.4.

$$NI_1(t) = I_R(t) + I_L(t) + I_{sc}(t) \quad (3.3)$$

$$NI_1(t) = \frac{l \cdot E(t)}{R_c} + \frac{l}{L_m} \int_0^t E(t)dt + I_{sc}(t) \quad (3.4)$$

Essa última equação já relaciona o campo elétrico e a corrente no supercondutor com a corrente no primário. Sabe-se, contudo, que o campo elétrico no ponto P é justamente o campo elétrico do supercondutor, definido na equação 3.2. Substituindo, encontra-se à equação 3.5.

$$NI_1(t) = \frac{1}{R_c} \left[L_{sc} \frac{d}{dt} I_{sc}(t) + l \cdot E_c \left(\frac{I_{sc}(t)}{I_c} \right)^n \right] + \frac{1}{L_m} \int_0^t \left[L_{sc} \frac{d}{dt} I_{sc}(t) + l \cdot E_c \left(\frac{I_{sc}(t)}{I_c} \right)^n \right] dt + I_{sc} \quad (3.5)$$

Assumindo a resistência de perdas no núcleo, R_C , infinita, pode-se obter uma versão simplificada na equação 3.6.

$$NI_1(t) = \left(\frac{L_{sc}}{L_m} + 1 \right) I_{sc}(t) + \frac{l \cdot E_c}{L_m} \int_0^t \left[\left(\frac{I_{sc}(t)}{I_c} \right)^n \right] dt \quad (3.6)$$

Assim chega-se à relação entre a corrente no laço 2G e a corrente no primário do transformador. Embora seja uma equação diferencial ordinária não linear, pode ser resolvida numericamente através de *softwares* como o Matlab e o Simulink. Para fins de ilustração, a figura 3.12 mostra as respostas de corrente e campo elétrico no laço para um pulso de corrente no primário. As respostas foram calculadas numericamente através do Matlab tomando como base as equações 3.2 e 3.6 e adotando valores arbitrários para N , L_{sc}/l , L_m/l , I_C e n .

Nota-se um comportamento semelhante àquele apresentado sobre pulsos longos no capítulo anterior. Mais uma vez a corrente no supercondutor decai com relação à corrente no primário ao longo do pulso, a menos da relação de transformação. Surge uma parcela de campo elétrico indutiva de mesma intensidade na subida e na descida da corrente e uma outra, resistiva, que aparece apenas no início do pulso, quando os valores de corrente ultrapassam a corrente crítica.

Para se analisar apenas a corrente persistente, pode-se fazer $I_1 = 0$ para valores

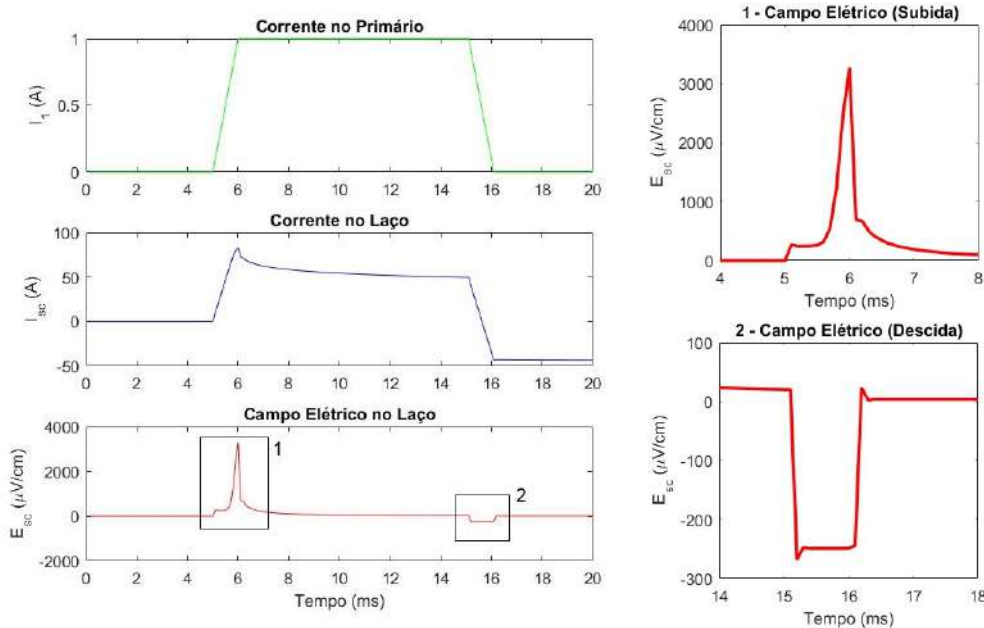


Figura 3.12: Respostas a um pulso de corrente de 1 A e 10 ms com $I_C = 35$ A segundo as equações 3.2 e 3.6 calculadas numericamente

após o pulso de corrente. A equação 3.6 fica, portanto:

$$I_{per} = - \left(\frac{l \cdot E_C}{L_m + L_{sc}} \right) \int_0^t \left[\left(\frac{I_{sc}(t)}{I_C} \right)^n \right] dt = - \left(\frac{l}{L_m + L_{sc}} \right) \int_0^t E_r(t) dt \quad (3.7)$$

É interessante notar, portanto, que segundo essa modelagem, a corrente persistente depende apenas da integral do campo elétrico resistivo para uma determinada entrada de corrente no primário. Logo, conclui-se que apenas haverá corrente persistente se a corrente atingir valores próximos ou acima da corrente crítica, o que concorda com os resultados de experimentos anteriores.

Algumas ressalvas devem ser feitas, contudo. Esta modelagem assume que os valores de I_C e n são constantes. Sabe-se que alterações na temperatura ou campo magnético, por exemplo, poderiam comprometer a confiabilidade do modelo, exigindo adaptações. Outro ponto a ser ressaltado é que o transformador utilizado neste trabalho possui núcleo de aço, que não é apropriado para operar com correntes em alta frequência, como é o caso, devido à saturação do núcleo. Desta forma, espera-se de antemão uma divergência do sistema real com relação ao modelo. Apesar disso, o confronto dos dados experimentais com o modelo pode ser útil para uma maior compreensão acerca do fenômeno da magnetização.

3.3.4 Ensaios Realizados com o Sistema de Magnetização

O Sistema de Magnetização por Pulsos Curtos, apesar do nome, é utilizado para a realização de dois tipos de ensaios distintos: a caracterização elétrica por indução de corrente (caracterização indutiva), introduzida no capítulo anterior, e a magnetização por pulsos curtos, real objeto de estudo deste trabalho. Ambos os procedimentos são bastante semelhantes e serão detalhados a seguir.

Ensaio de Caracterização por Indução de Corrente

O processo de caracterização indutiva da amostra consiste na refrigeração da amostra em ZFC, aplicação de uma rampa de corrente no primário do transformador e subsequente medição dos valores de corrente e campo elétrico na amostra supercondutora.

Como a corrente imposta é variável no tempo, a corrente no laço 2G também o será, fazendo com que o campo elétrico gerado apresente uma componente indutiva (Eq. 3.2). Opta-se pela aplicação de uma rampa com inclinação relativamente branda, de forma que a componente indutiva do campo elétrico não seja muito grande em relação à componente resistiva.

Uma vez que se obteve a curva de campo elétrico por corrente no laço, é possível calcularem-se os valores de n , I_c e L_{sc}/l que melhor se adequam à curva de campo elétrico medido a partir da entrada de corrente no supercondutor segundo a modelagem empregada. Para isso, utiliza-se um método de ajuste numérico por mínimos quadrados. A Figura 3.13 mostra o passo a passo do ensaio de caracterização indutiva.

Ensaio de Magnetização por Pulsos Curtos

Em cada ensaio de magnetização, a amostra é mais uma vez resfriada em ZFC, é aplicado um pulso de corrente no primário do transformador e os valores de corrente e campo elétrico são medidos no laço 2G. Em cada ensaio, os parâmetros do pulso de corrente, ou seja, duração e intensidade, são variados, de forma que se possa compreender o impacto desses parâmetros no processo.

Neste ensaio, assim como no de caracterização, a corrente no supercondutor varia no tempo, de forma que o campo elétrico apresentará tanto uma componente indutiva quanto uma resistiva. Espera-se que os valores de campo elétrico superem em muito os medidos durante a magnetização por pulsos longos, devido às variações mais bruscas de corrente em pulsos curtos.

Depois de se aquisitarem os sinais de campo elétrico, corrente no primário e corrente no secundário, os dados são mais uma vez submetidos ao processo de ajuste

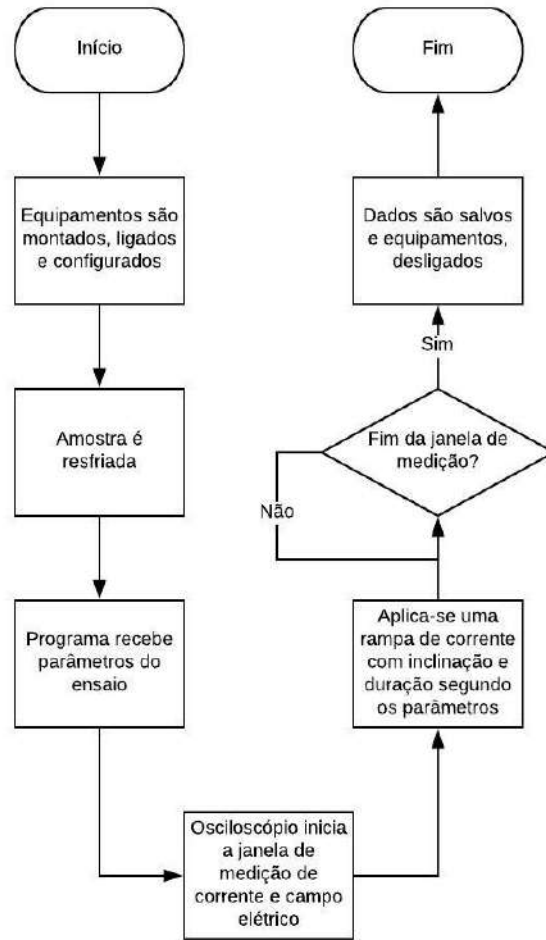


Figura 3.13: Ensaio de Caracterização Indutiva: Passo a passo

numérico e comparando-se os sinais de campo elétrico e corrente no secundário obtêm-se os valores de n , I_c e L_{sc}/l da amostra.

Neste ponto, contudo, o ensaio de magnetização apresenta um passo adicional com relação ao ensaio de caracterização. Um novo ajuste numérico é feito, desta vez utilizando o campo elétrico e a corrente no primário como entrada e comparando o valor da corrente no supercondutor (Eq. 3.4). A partir desse ajuste, é possível conhecer os valores estimados dos parâmetros do transformador, N , L_m/l e R_c/l , para que a corrente no supercondutor seja a mais próxima da medida, dados a corrente no primário e o campo elétrico, segundo a modelagem. A Figura 3.14 mostra o passo a passo do ensaio de magnetização.

Embora o transformador em si não seja o foco do trabalho, a análise dos seus parâmetros permite relacionar a corrente e o campo elétrico na amostra à corrente imposta no primário, que é, na realidade, a única entrada fornecida ao sistema físico.



Figura 3.14: Ensaio de magnetização: Passo a passo

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais da caracterização da amostra através dos dois métodos apresentados e da magnetização por pulsos curtos de corrente. É feita uma análise do comportamento do campo elétrico e da corrente no laço 2G como resposta a um pulso de corrente no primário e o resultado de múltiplos ensaios é levado em consideração para se estudar a influência da largura e intensidade do pulso na energia transferida ao supercondutor e na corrente persistente.

Os resultados experimentais são comparados à modelagem apresentada através de ajustes numéricos da corrente e do campo elétrico no supercondutor para cada ensaio de magnetização.

No fim do capítulo, são comparados os resultados da magnetização com pulsos curtos e longos. A figura 4.1 mostra a relação entre cada um dos processos realizados e sua organização ao longo do capítulo.

4.1 Resultados da Caracterização da Amostra

A amostra supercondutora, já com o corte parcial, utilizada ao longo dos experimentos, foi primeiro submetida aos processos de caracterização com quatro pontos e por indução de corrente. A fim de comparação, uma outra amostra, de controle, com as mesmas dimensões, mas sem o corte parcial, foi submetida à caracterização com quatro pontos, para se observar o efeito do corte nos parâmetros da amostra.

A curva de campo elétrico por corrente para a caracterização com quatro pontos pode ser observada na figura 4.2, enquanto que a curva da amostra de controle é apresentada na figura 4.3. A partir do ajuste numérico a que foram submetidos os resultados, podem-se extrair os valores de n e I_c para ambos os casos, conforme mostrado na tabela 4.1.

Pode-se perceber que houve uma queda de 27 A na corrente crítica e 11 no índice n , da amostra sem corte para aquela com corte. Além disso, observa-se na figura 4.2

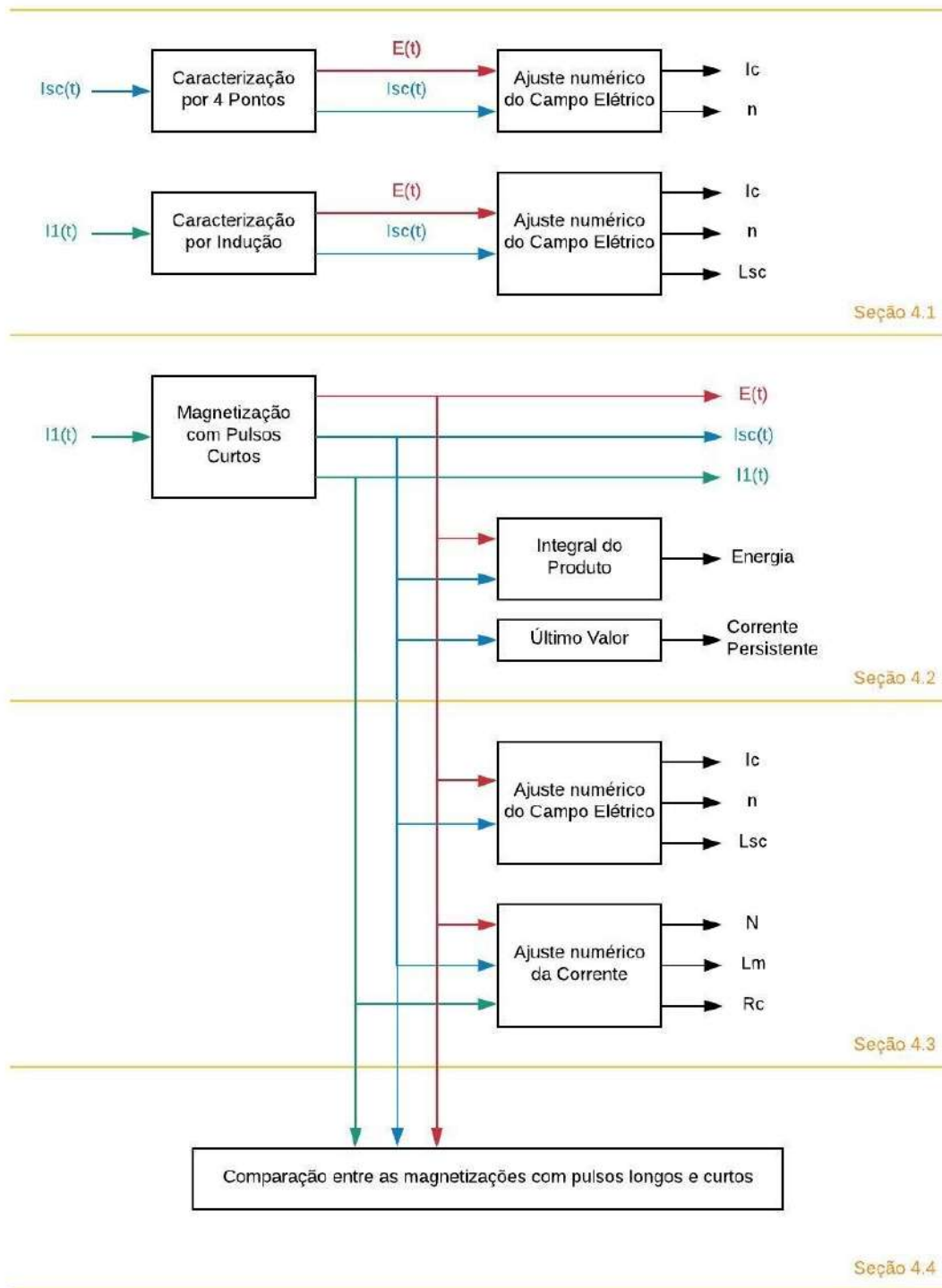


Figura 4.1: Relação entre os processos apresentados no capítulo 4 e sua organização

Tabela 4.1: Resultados da caracterização com quatro pontos

| | $I_c(A)$ | n |
|-------------------|----------|-----|
| Amostra sem Corte | 104 | 31 |
| Amostra com Corte | 77 | 20 |

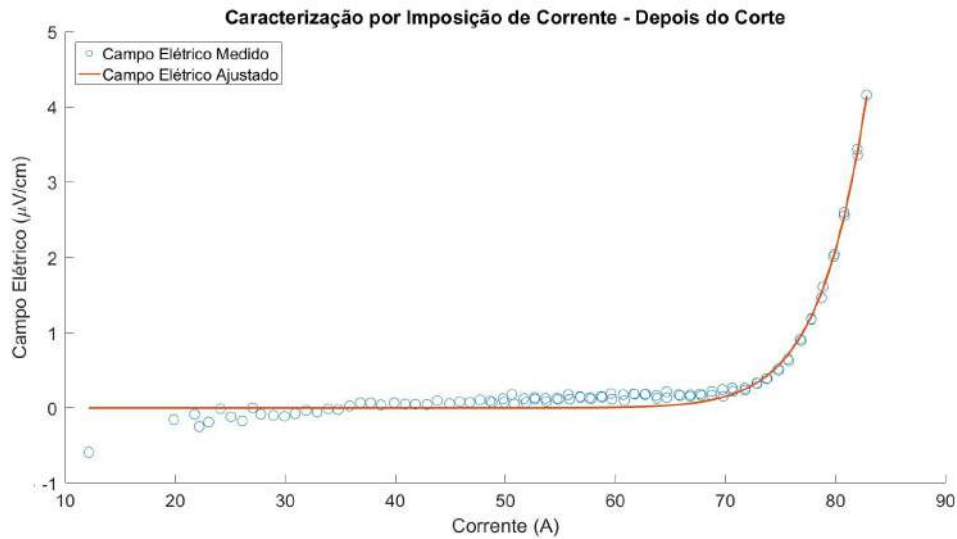


Figura 4.2: Caracterização com quatro pontos da amostra com corte

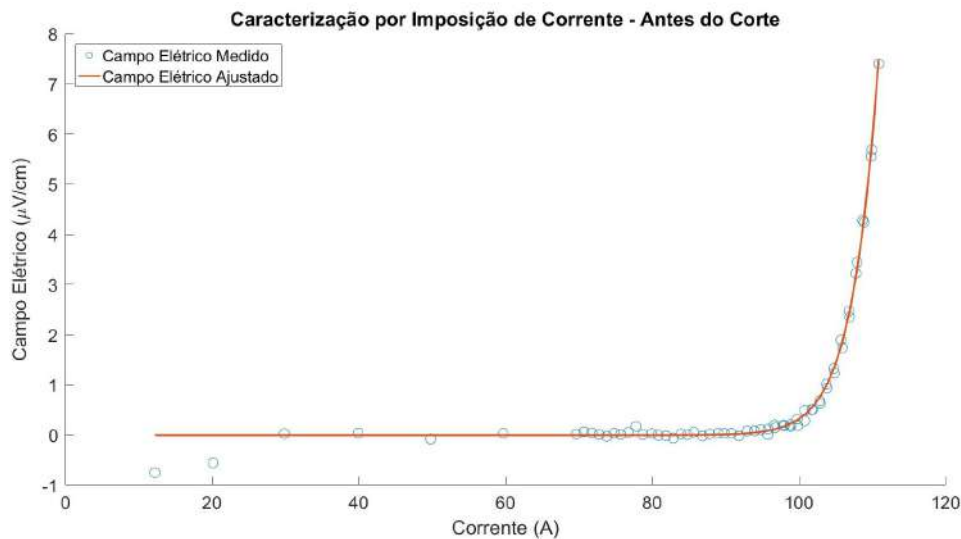


Figura 4.3: Caracterização com quatro pontos da amostra sem corte

que os dados experimentais não se adequam tão bem ao ajuste quanto na figura 4.3. Enquanto já se esperava uma redução da corrente crítica por conta do corte, que diminui a área da seção transversal e danifica a fita, o resultado pode também ter sido afetado por variações de temperatura, já que não foi feita ancoragem térmica da amostra. Mesmo assim, um aumento da temperatura não é suficiente para explicar a grande discrepância entre os valores de n . Um estudo com mais amostras é necessário para se compreender o ocorrido.

A amostra a ser utilizada para a magnetização, aquela com o corte, é então submetida à caracterização por indução de corrente. Vale lembrar que, devido à nova disposição dos ramos com relação ao caminho da corrente, o valor de corrente crítica esperado é cerca de metade daquele encontrado na caracterização por imposição. As

curvas de corrente no primário, corrente no laço supercondutor e campo elétrico no laço ao longo do tempo podem ser vistas na figura 4.4.

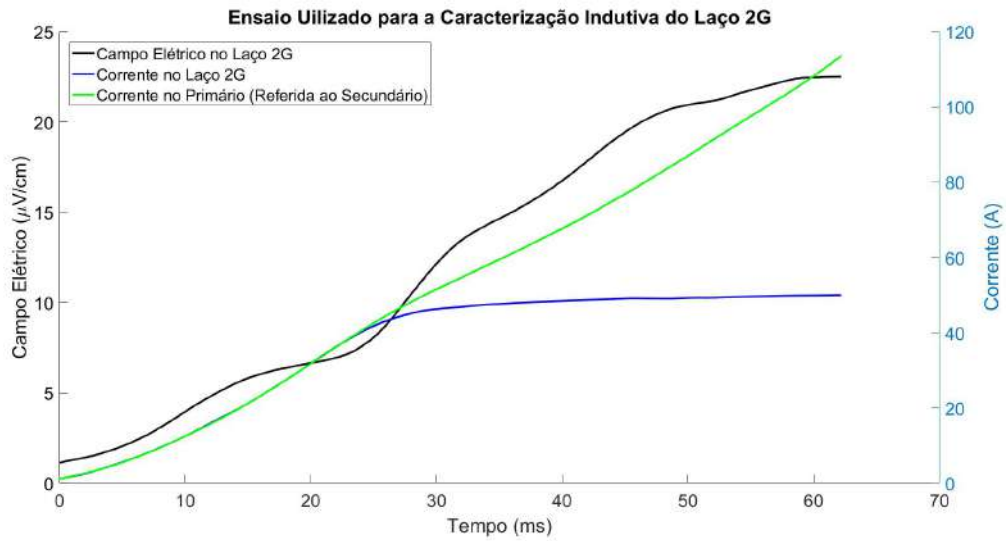


Figura 4.4: Caracterização por indução ao longo do tempo

Como discutido anteriormente, o campo elétrico no laço pode ser decomposto em uma componente resistiva, dependente de I_c e n , e uma componente indutiva, dependente de L_{sc}/l . A figura 4.5 mostra a curva de campo elétrico por corrente e as duas componentes. A tabela 4.2 mostra os valores atualizados de n e I_c , além da indutância por unidade de comprimento, L_{sc}/l , encontrada na caracterização indutiva.

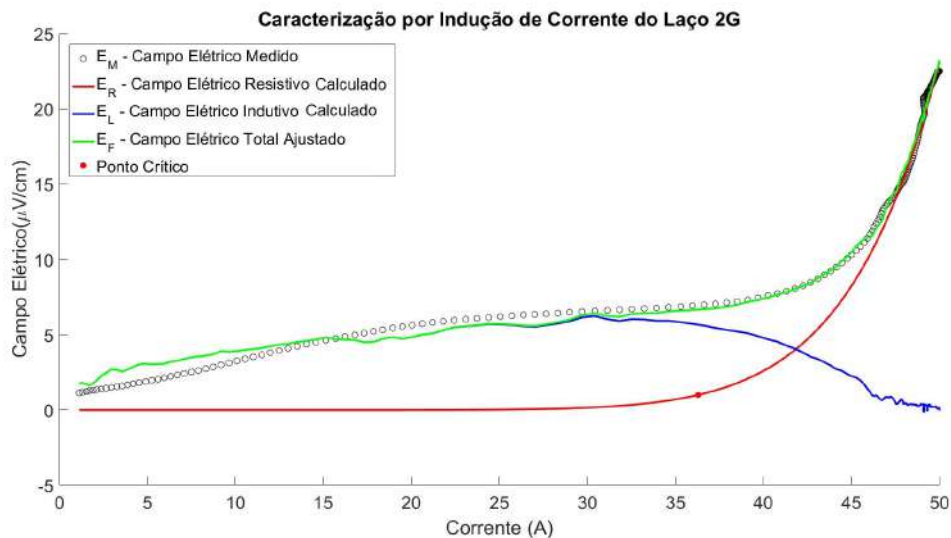


Figura 4.5: Caracterização por indução da amostra com corte parcial

Como esperado, o valor encontrado de corrente crítica na caracterização por indução corresponde a pouco menos da metade daquele encontrado na caracterização

Tabela 4.2: Resultados de ambas as caracterizações

| | | $I_c(A)$ | n | $L_{sc}/l(nH/cm)$ |
|---------------|-------------------|----------|-----|-------------------|
| Quatro pontos | Amostra sem Corte | 104 | 31 | |
| | Amostra com Corte | 77 | 20 | |
| Indução | Amostra com Corte | 35 | 10 | 2,7 |

por quatro pontos. Em contrapartida, o valor de n apresentou uma queda de mais de 50%, chegando a 10. Ao observarem-se os valores alcançados de campo elétrico e corrente no laço durante a caracterização por indução, fica claro que o intervalo de operação é muito diferente daquele atingido durante a caracterização com quatro pontos. De fato, os valores de corrente chegam a 140% da corrente crítica, e o campo elétrico, a 25 vezes seu valor crítico. Esses valores caracterizam um regime de operação entre o *flux creep* e o *flux flow*, o que justifica um valor tão baixo de n .

Para verificar-se o valor encontrado de indutância por unidade de comprimento, esta grandeza foi estimada com base na geometria do laço, aproximando-se seu formato para um círculo perfeito com mesmo raio do cilindro do porta-amostras. Para tal, foi utilizada a equação 4.1, uma aproximação da indutância de um anel de raio r com um condutor de seção circular com raio a [38]. Os valores utilizados para os raios foram $r = 28,4 \text{ mm}$ e $a = 25 \text{ }\mu\text{m}$, de forma que a área do círculo com raio a fosse igual à da seção da camada supercondutora.

$$\frac{L_{circ}}{l} [nH/cm] = \frac{\mu_0 r_{[m]}}{2\pi r_{[cm]}} \left[\ln \left(\frac{8r_{[m]}}{a_{[m]}} \right) - 1,75 \right] = \frac{\mu_0}{200\pi} \left[\ln \left(\frac{8r}{a} \right) - 1,75 \right] \quad (4.1)$$

O valor encontrado foi de $L_{circ}/l = 14,7 \text{ nH/cm}$, mais de cinco vezes acima daquele encontrado por meio do ajuste da caracterização. Contudo, vale lembrar que um anel com condutor circular está longe de representar com exatidão o laço supercondutor. Além disso, a equação 4.1 depende da relação entre o raio do anel e o raio da seção circular por onde circula a corrente. Neste caso, contudo, não apenas trata-se de uma seção retangular, como o caminho da corrente pode variar, uma vez que pode haver fuga de corrente pela camada de prata. Somado a isso está o fato de que os ramos do laço 2G não estão no mesmo plano, o que afeta ainda mais a precisão dessa aproximação.

4.2 Resultados da Magnetização por Pulsos Curtos

Durante a magnetização por pulsos do laço supercondutor, foram aplicados pulsos de corrente no primário do transformador de 0,7 a 1,9 A de intensidade e 1 a 10

ms de duração. Esperava-se que a variação desses parâmetros impactasse na corrente persistente induzida no laço supercondutor, como foi observado em trabalhos anteriores.

4.2.1 Análise do Transitório

A figura 4.6 mostra as medidas de corrente no primário e no secundário e o campo elétrico no secundário para um ensaio com pulso de 1,23 A e 10 ms. Ao analisar-se o comportamento das três grandezas medidas ao longo do ensaio, podem-se ressaltar alguns pontos em concordância com a modelagem apresentada no capítulo anterior:

- É induzida uma corrente no secundário que inicialmente acompanha a corrente no primário, caindo com relação a esta ao longo do pulso;
- O campo elétrico que surge no laço supercondutor é inicialmente intenso mas cai rapidamente com o decréscimo da corrente no laço; e
- Ao fim do ensaio, como a corrente no primário é nula, a diferença entre as correntes no primário e no secundário, a menos da relação de transformação, é a própria corrente persistente, o que indica que o fenômeno que causa essa diferença é o mesmo que permite a indução de corrente persistente.

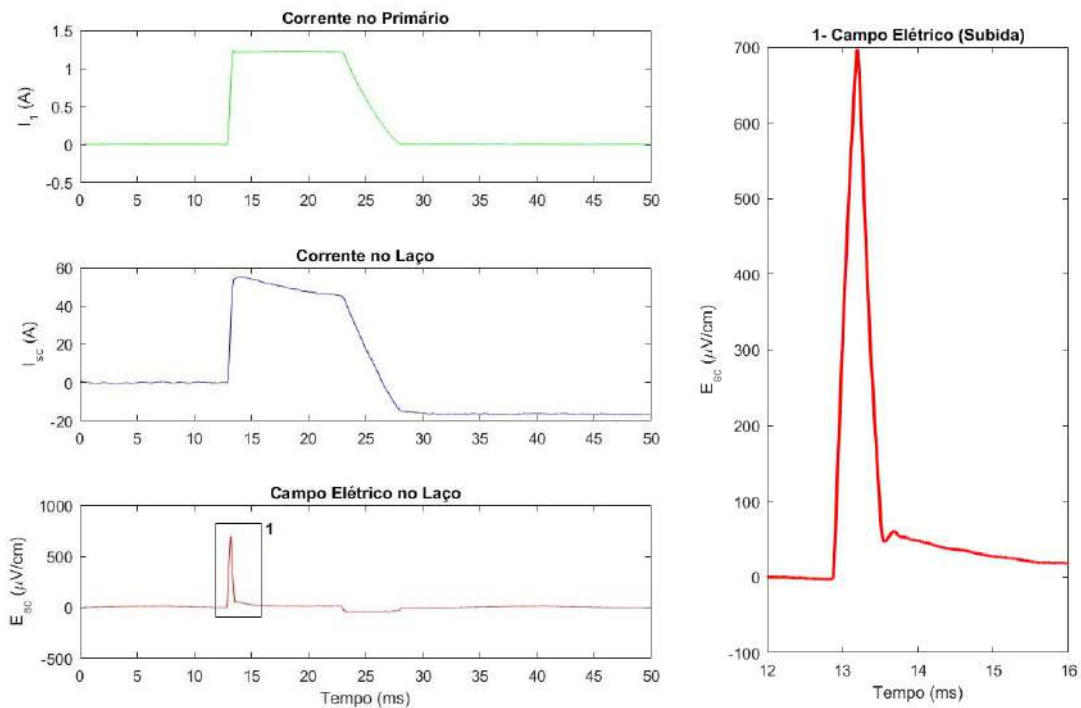


Figura 4.6: Magnetização com pulso de 1,23 A e 10 ms

De acordo com a modelagem proposta, o fenômeno que causa a discrepância entre as correntes, e portanto, a indução de uma corrente persistente, é o surgimento de um estado dissipativo por conta do aumento da resistência do supercondutor. De fato, tal estado pode ser percebido pelo aumento do campo elétrico nos instantes iniciais do pulso. O que acontece, portanto, é inicialmente uma indução de corrente no secundário devido à circulação de corrente no primário. Conforme a corrente no supercondutor atinge valores próximos da corrente crítica, surge um campo elétrico de natureza resistiva. O campo elétrico resistivo está associado à taxa de decaimento da corrente: para uma dada corrente no primário, quanto maior for o campo elétrico resistivo, maior será a taxa de decaimento da corrente no supercondutor. Desta forma, uma vez que se atingem valores altos de campo elétrico resistivo, passa a aumentar a diferença entre a corrente no primário e a do laço, a menos da relação de transformação. A corrente no supercondutor é, portanto, uma resposta à entrada de corrente no primário realimentada pelo campo elétrico, que por sua vez é consequência da própria corrente circulando na amostra.

As figuras 4.7 e 4.8 mostram os resultados da magnetização para dois outros pulsos: com 0,77 A, e com 1,89 A, ambos com 10 ms. Estes dois casos mostram situações particulares em que não houve indução de corrente persistente ou em que a indução foi máxima, ou seja, próxima da corrente crítica.

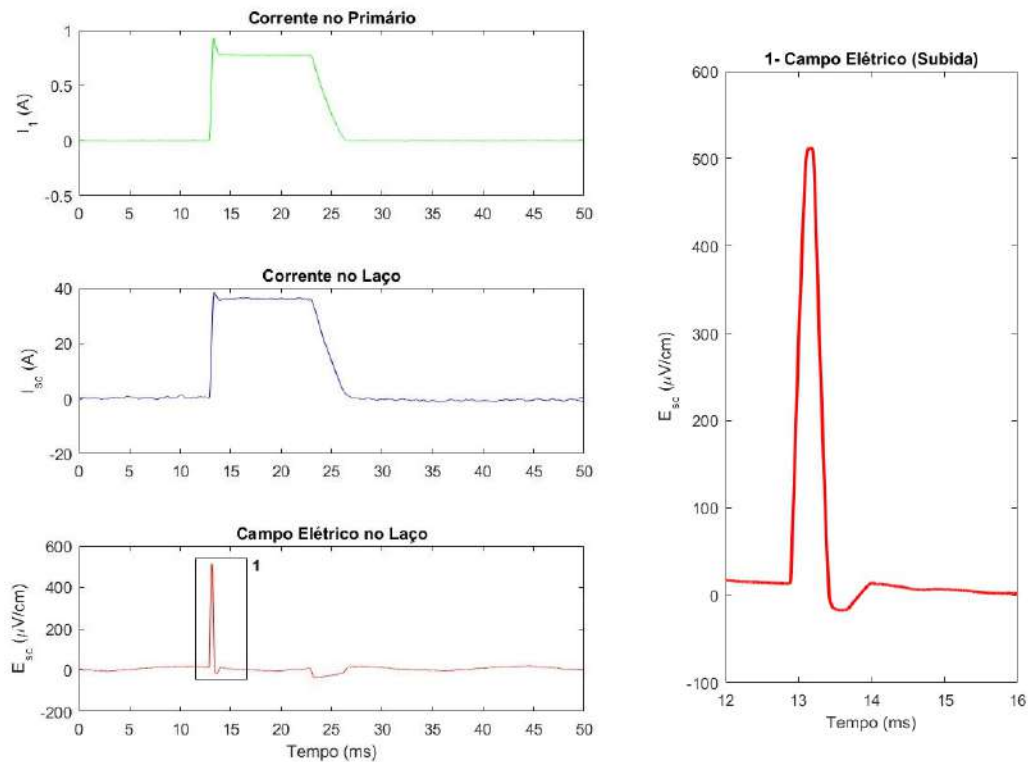


Figura 4.7: Magnetização com pulso de 0,77 A e 10 ms

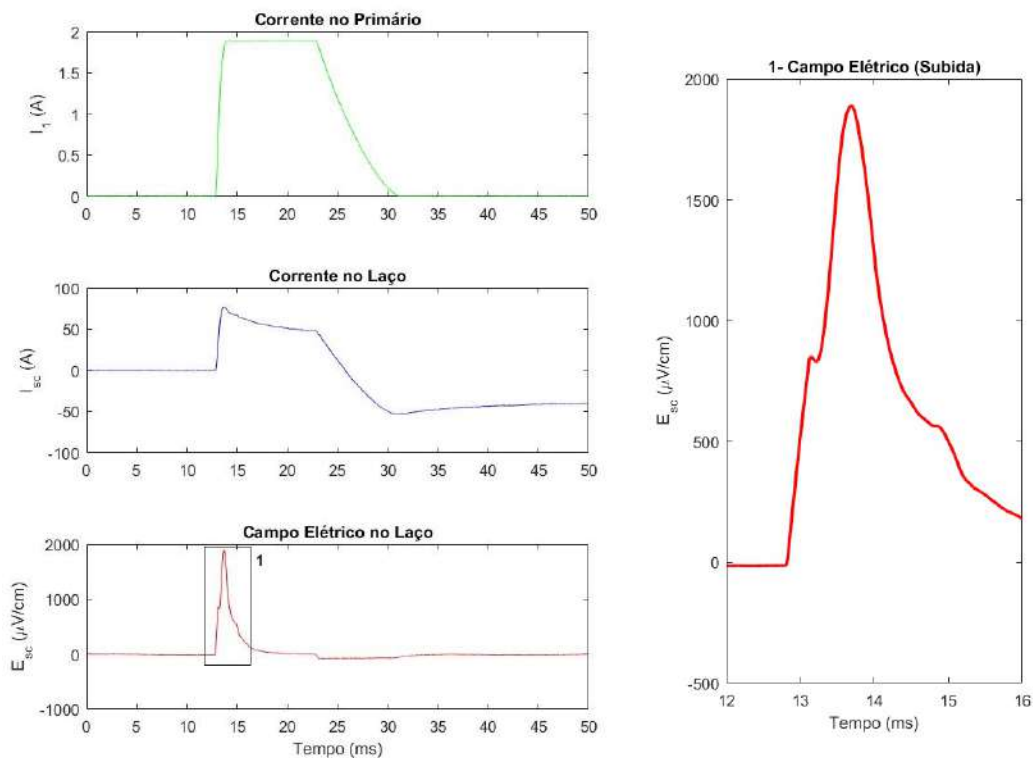


Figura 4.8: Magnetização com pulso de 1,89 A e 10 ms

Na figura 4.7, pode-se perceber que não houve indução de corrente persistente ao fim do ensaio com pulso de 0,77 A. De fato, a corrente no secundário acompanha aquela no primário ao longo de todo o pulso. Observando-se o campo elétrico, percebe-se que os únicos momentos em que há um valor significativo de campo é durante a subida e descida da corrente, caracterizando um campo elétrico de natureza indutiva. Como era de se esperar, a ausência de valores significativos de campo elétrico resistivo acarreta uma corrente persistente nula, apesar dos altos valores de campo elétrico indutivo.

Já na figura 4.8, os valores de corrente e, conseqüentemente, os de campo elétrico, são tão intensos, que a corrente persistente ao fim do pulso chega a valores próximos da corrente crítica. Isso faz com que surja um campo elétrico resistivo após o pulso, o que provoca um decaimento acentuado da corrente induzida. A figura 4.9 mostra a comparação entre os campos elétricos dos ensaios de corrente persistente média e máxima, para evidenciar o papel do campo elétrico resistivo na indução de corrente persistente. As componentes dos campos elétricos foram obtidas através do ajuste numérico mencionado no capítulo anterior. Não foi possível calcular a componente resistiva do ensaio com corrente persistente nula pois, devido à sua característica predominantemente indutiva, o campo elétrico resistivo se confunde com o ruído das medidas, impossibilitando a atuação do ajuste numérico.

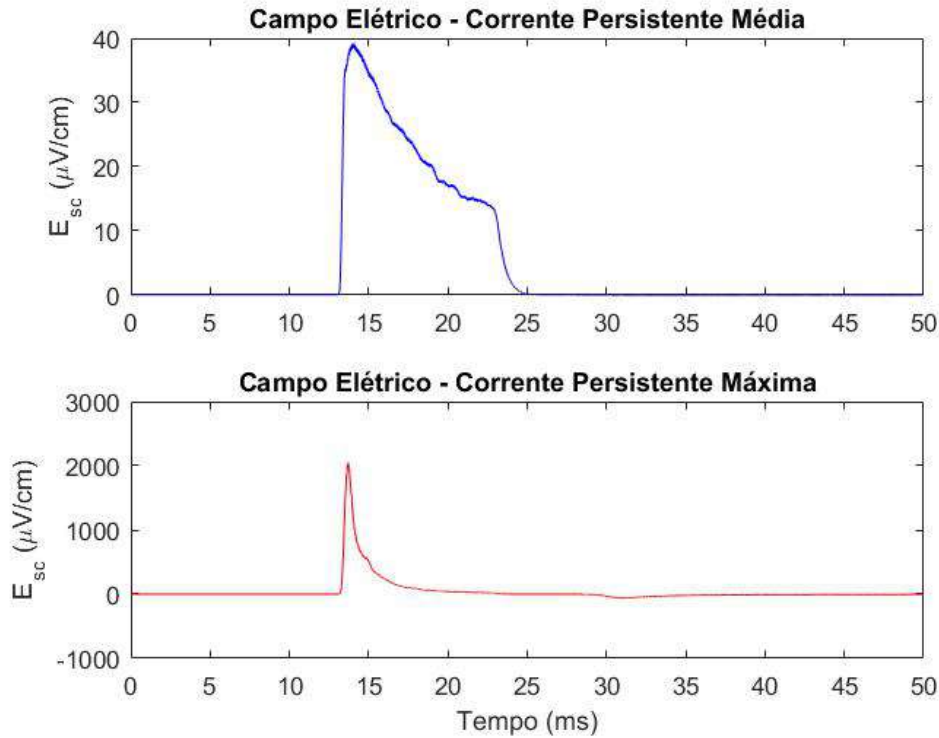


Figura 4.9: Comparação entre os ensaios de 1,23 e 1,89 A

4.2.2 Influência dos Parâmetros do Pulso

A partir dos resultados dos diversos ensaios realizados, é possível se analisar de uma forma global a influência dos parâmetros do pulso, intensidade e largura, na indução de corrente crítica na amostra supercondutora. A partir desta seção, são apresentados resultados de múltiplos ensaios unificados em uns poucos gráficos. Para esses gráficos, os parâmetros do pulso, intensidade e largura, são simbolizados, respectivamente, pelo tamanho e cor do ponto no gráfico, como mostrado na figura 4.10.

A figura 4.11 mostra a corrente persistente em função da intensidade do pulso de corrente no primário para os ensaios realizados. Observa-se que existe uma região em que a intensidade dos pulsos é baixa o suficiente para que não haja indução de corrente persistente, outra em que a corrente persistente aumenta com a intensidade do pulso e uma terceira, de saturação, em que não há aumento da corrente persistente, apesar do aumento na intensidade do pulso. Essa análise está de acordo com os três exemplos apresentados nas figuras 4.6 a 4.8.

Ao observar-se a energia transferida ao supercondutor em função da largura do pulso, apresentada na figura 4.12, percebe-se que o incremento de energia é cada vez menor conforme a largura aumenta. Um erro mais alto pode ser percebido, mas ele é justificado pela presença de um alto ruído no campo elétrico medido em alguns ensaios. Como a energia é calculada através de uma integral que leva em conta esse campo elétrico (equação 4.2), o erro associado tem um impacto considerável nesses

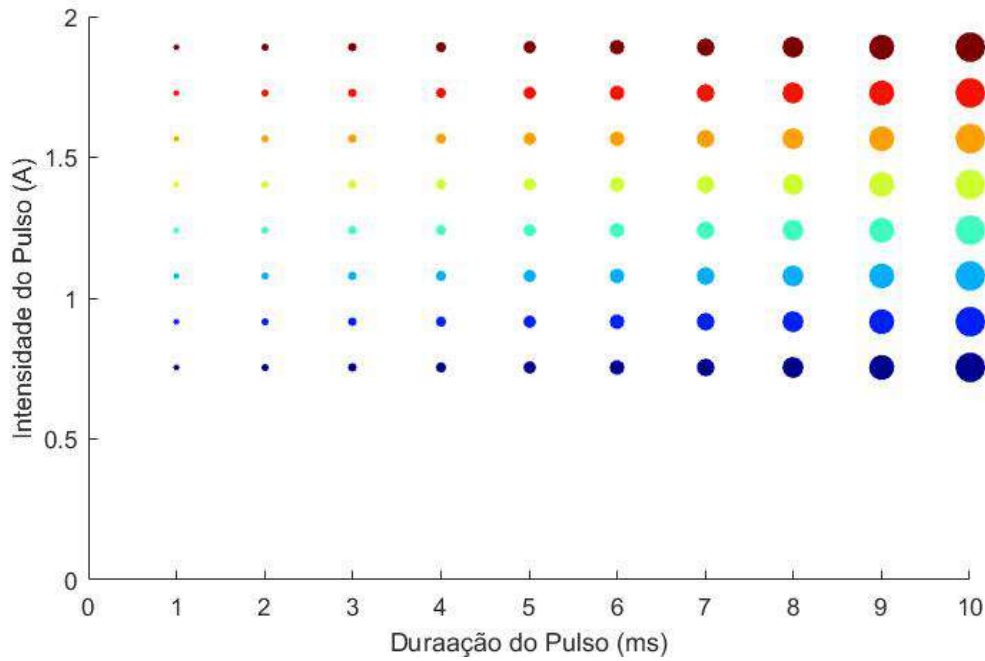


Figura 4.10: Representação dos parâmetros do pulso nos gráficos de múltiplos ensaios

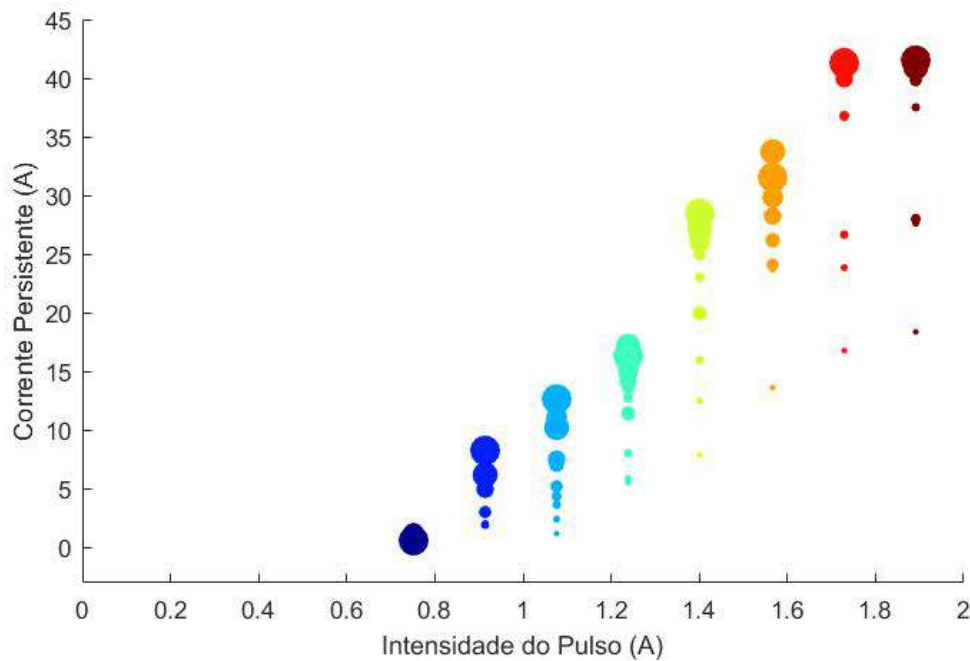


Figura 4.11: Influência dos parâmetros do pulso na corrente persistente (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)

resultados.

$$\frac{W_{rec}}{l} = \int_0^t E(t) \cdot I_{sc}(t) dt \quad (4.2)$$

Finalmente, analisando-se a energia transferida ao supercondutor tendo em vista a corrente persistente (Figura 4.13), percebe-se que a corrente persistente e a energia transferida aumentam juntas até o ponto em que a corrente persistente atinge valores próximos da corrente crítica, a partir dos quais a corrente persistente não aumenta, apesar do aumento na energia.

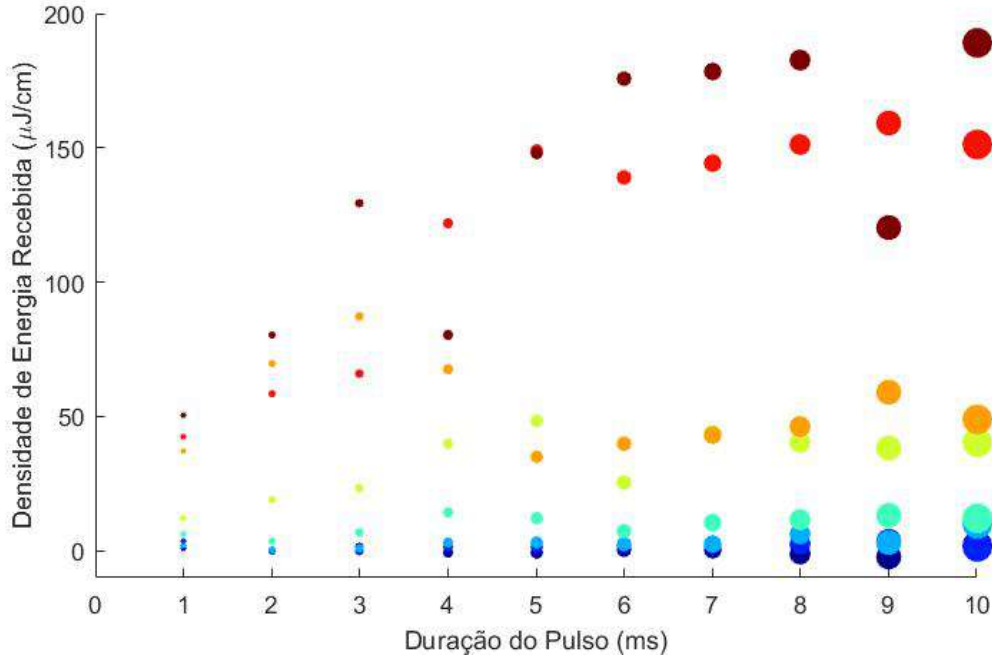


Figura 4.12: Influência dos parâmetros do pulso na energia transferida (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)

Além disso, pode-se extrair da figura que, para uma mesma corrente persistente, pulsos com menor duração (pontos menores) e maior intensidade (mais amarelos) demandam mais energia do que pulsos com maior duração e menor intensidade. Isso sugere que é mais eficiente, do ponto de vista energético, aplicar pulsos mais largos e menos intensos do que o contrário. Deve-se lembrar, contudo, que as medidas de energia estão associadas a um alto ruído, de forma que seus resultados devem ser analisados com ressalvas.

A figura 4.14 mostra a relação entre a densidade de energia armazenada em forma de campo magnético e aquela recebida pelo supercondutor. A energia armazenada é calculada com base na equação 4.3 com indutância de 4.4 nH/cm . Percebe-se que o valor máximo armazenado foi de pouco menos de 4 μJ/cm , com uma eficiência de cerca de 3%. Valores de energia recebida acima de 120 μJ/cm são menos eficientes, uma vez que não ultrapassam esse valor máximo de energia armazenada.

$$\frac{W_{arm}}{l} = \frac{1}{2} \frac{L_{sc}}{l} I_{per}^2 \quad (4.3)$$

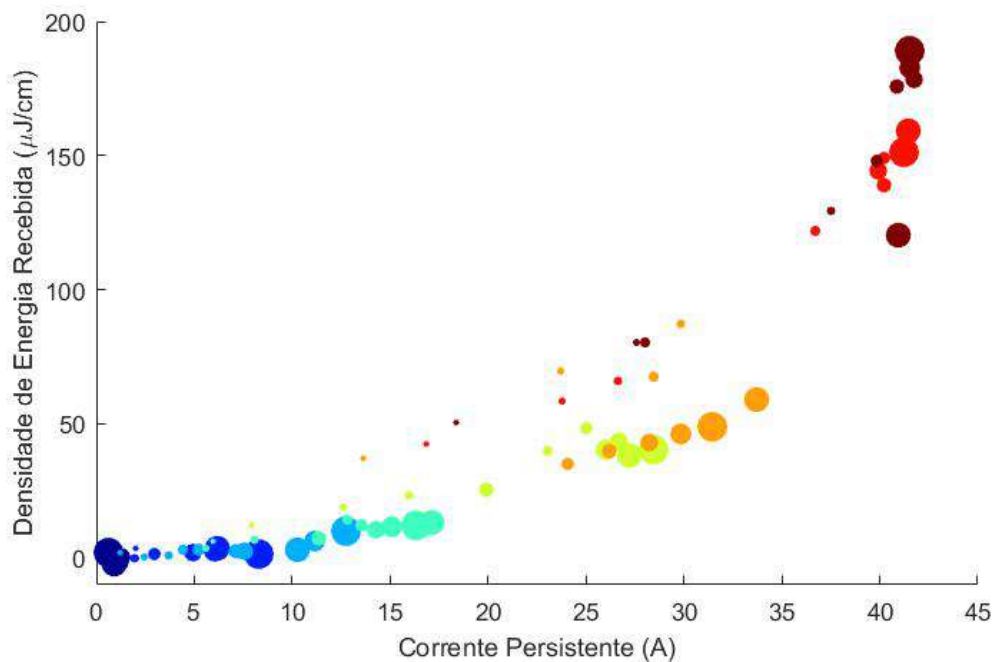


Figura 4.13: Relação entre energia transferida e corrente persistente (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)

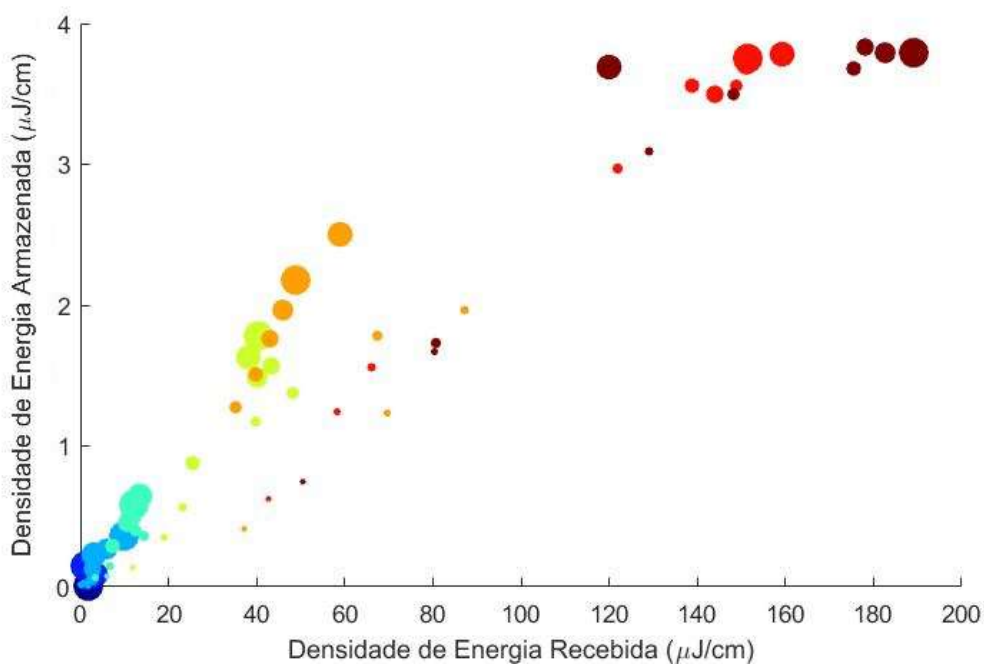


Figura 4.14: Relação entre energia transferida e energia armazenada em forma de campo magnético (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)

4.3 Validação do Modelo: Ajuste Numérico

Cada ensaio de magnetização foi submetido ao ajuste numérico, mais uma vez através do *software* Matlab. O ajuste do campo elétrico é feito a partir da equação

3.2, e determina os valores da indutância do supercondutor por unidade de comprimento (L_{sc}/l), do índice n e da corrente crítica (I_c) por meio do método dos mínimos quadrados. Já o ajuste da corrente é feito a partir da equação 3.4, e determina os valores da relação de transformação (N), da indutância de magnetização por unidade de comprimento (L_m/l) e da resistência de perdas no cobre (R_c/l), também por unidade de comprimento.

O resultado do ajuste numérico para o ensaio com pulso de 1,89 A e 10 ms pode ser visto na figura 4.15. Pode-se observar que o ajuste, tanto da corrente quanto do campo elétrico no supercondutor, replica satisfatoriamente o comportamento das grandezas medidas. Os valores encontrados neste ajuste foram $I_c = 34.5$ A, $n = 9.5$, $L_{sc} = 4.67$ nH/cm, $N = 61$, $L_m = 39.3$ nH/cm e $R_c = 152$ $\mu\Omega/cm$.

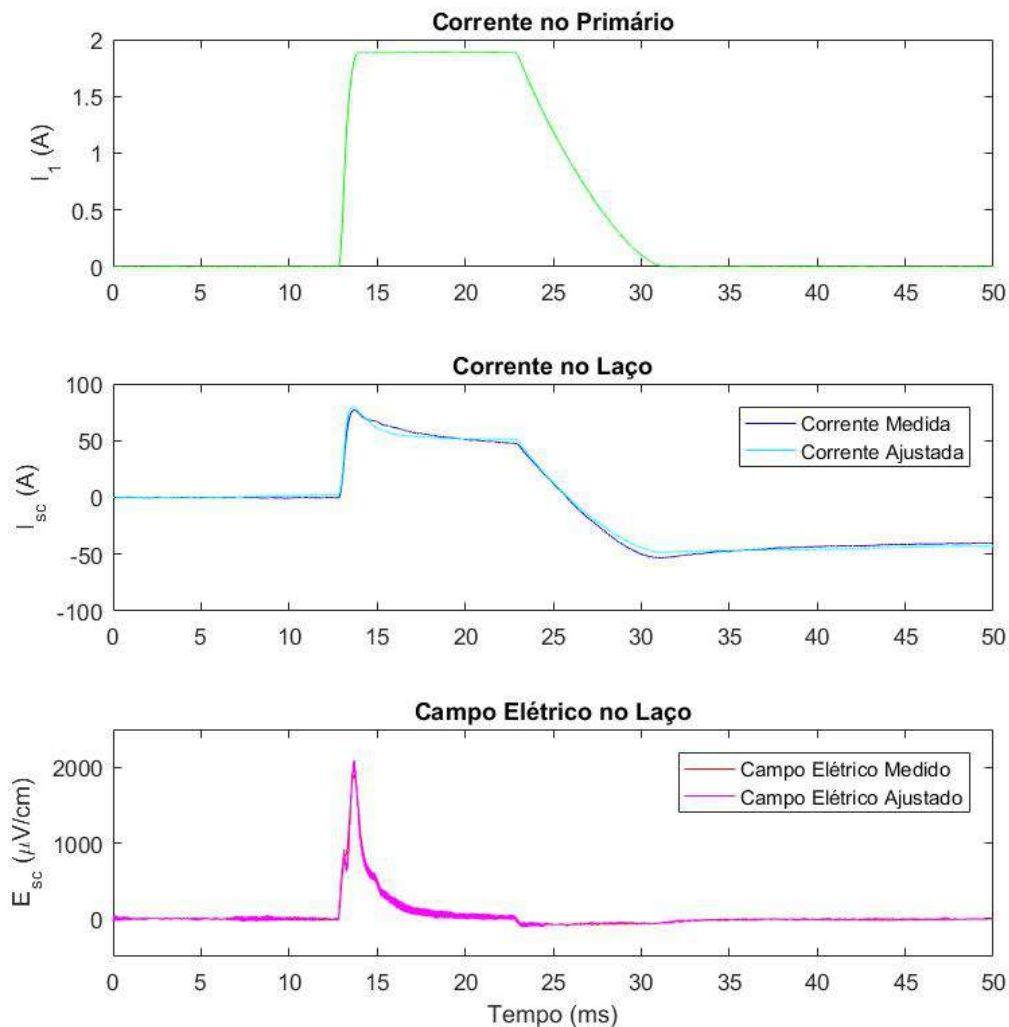


Figura 4.15: Ajuste numérico: pulso de 1,89 A e 10 ms

A figura 4.16, por sua vez, mostra as componentes de campo elétrico e corrente

para o ajuste numérico do pulso de 1,89 A e 9 ms. No gráfico da corrente, a corrente total fornecida pelo primário e referida ao secundário ($N \cdot I_1$) é dividida entre a corrente no laço 2G (I_{sc}) e a corrente no ramo de magnetização ($I_R + I_L$), que estão em paralelo. Já no gráfico do campo elétrico, o campo elétrico total no laço (E) é a soma da sua parcela resistiva (E_R), descrita pela *Power Law*, e sua componente indutiva (E_L).

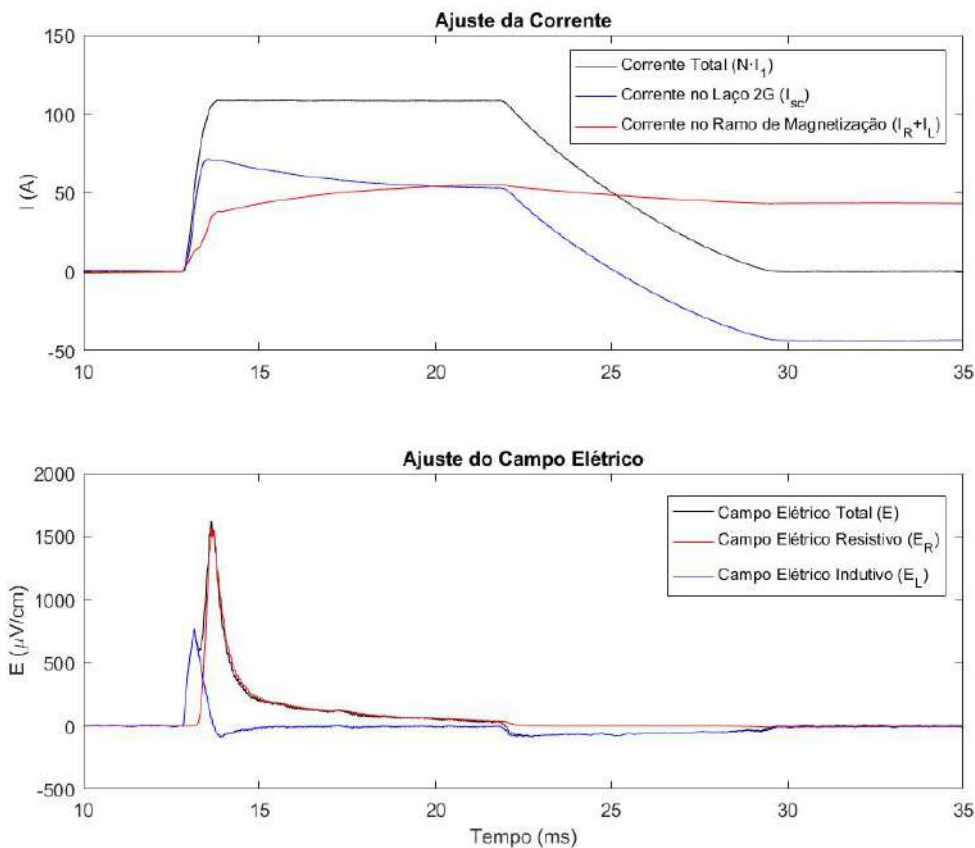


Figura 4.16: Ajuste numérico: componentes de corrente e campo elétrico do pulso de 1,89 A e 9 ms

A fim de uma maior compreensão do fenômeno, os dois gráficos devem ser analisados coletivamente. Inicialmente, a corrente é fornecida ao primário e induz uma corrente no laço 2G. Isso gera um campo elétrico indutivo durante a subida do pulso. A medida que a corrente no supercondutor aumenta, surge um campo elétrico resistivo crescente. Por conta do aumento da resistência do supercondutor, uma parcela cada vez maior da corrente é desviada para o ramo de magnetização, provocando a diferença entre a corrente do primário e a do laço, como mencionado na seção 4.2.1. Quando o pulso chega em seu máximo, como ainda há um campo elétrico resistivo, a corrente continua se desviando para o ramo de magnetização, diminuindo a corrente no laço e, conseqüentemente, o campo elétrico. A medida que este diminui, também

diminui a taxa de decaimento da corrente, associada a ele. Quando a corrente no primário é retirada, a corrente no laço 2G a acompanha, enquanto a corrente no ramo de magnetização permanece. Mais uma vez surge um campo elétrico indutivo durante a retirada da corrente. Após o pulso, o mesmo valor de corrente que circula pelo laço também circula pelo ramo de magnetização. O fato de haver uma corrente persistente após o pulso mostra que houve magnetização do laço. O comportamento das correntes no circuito pode ser visto na figura 4.17, de acordo com a modelagem.

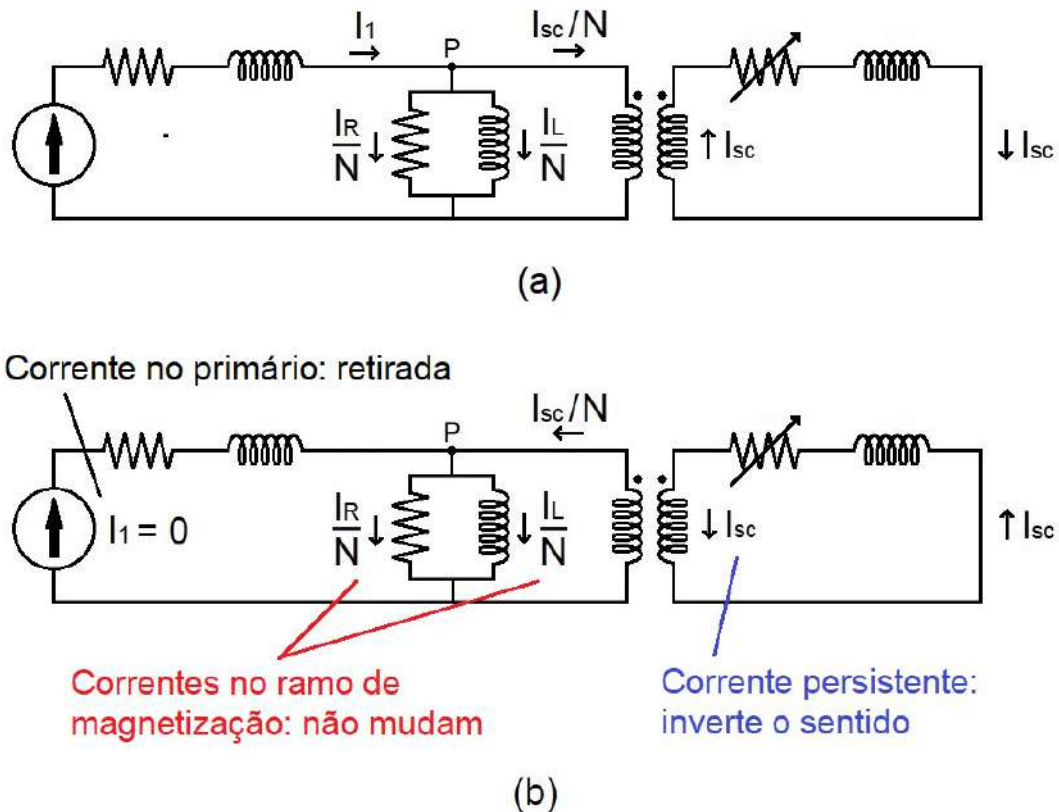


Figura 4.17: Comportamento das correntes no circuito (a) durante o pulso; (b) depois do pulso

Mais uma vez, é interessante ressaltar os casos extremos, em que não há corrente persistente ou em que a corrente persistente é máxima. Como mostrado na figura 4.9, quando não há campo elétrico resistivo, não há corrente persistente; quando o pulso é muito intenso, o campo elétrico resistivo surge também na remoção da corrente no primário, limitando a corrente persistente.

A tabela 4.3 mostra a média, o desvio padrão e o desvio padrão relativo à média para cada parâmetro, levando em consideração os ensaios de magnetização com pulsos variando de 1.4 a 1.9 A e 1 a 10 ms. Os resultados completos dos ajustes numéricos podem ser vistos no apêndice A. Relativamente falando, pode-se observar que as grandezas referentes ao supercondutor têm desvios padrões menores do que

as do transformador, mas ainda assim são significativas.

Tabela 4.3: Resultados do ajuste numérico para os ensaios de magnetização (resultados completos no apêndice A)

| | Supercondutor | | | Transformador | | |
|------------------------|---------------|-------|------------|---------------|---------|---------|
| | I_c | n | L_{sc}/l | N | L_m/l | R_c/l |
| Média | 36,4 | 10,3 | 4,34 | 61,5 | 33,8 | 64,5 |
| Desvio Padrão | 2,5 | 1,2 | 0,25 | 7,2 | 11,1 | 60,2 |
| Desvio Padrão Relativo | 6,9% | 11,3% | 5,7% | 11,7% | 32,9% | 93,3% |

É possível observar, na figura 4.18, o erro dos ajustes numéricos, em termos relativos. Nota-se que, tirando uns poucos pontos atípicos, o erro dos ajustes, tanto do campo elétrico quando da corrente, restringe-se a valores abaixo de 5%. Apesar dos baixos valores de erro, o alto desvio padrão encontrado principalmente para as grandezas do transformador geram dúvida sobre a confiabilidade da modelagem empregada.

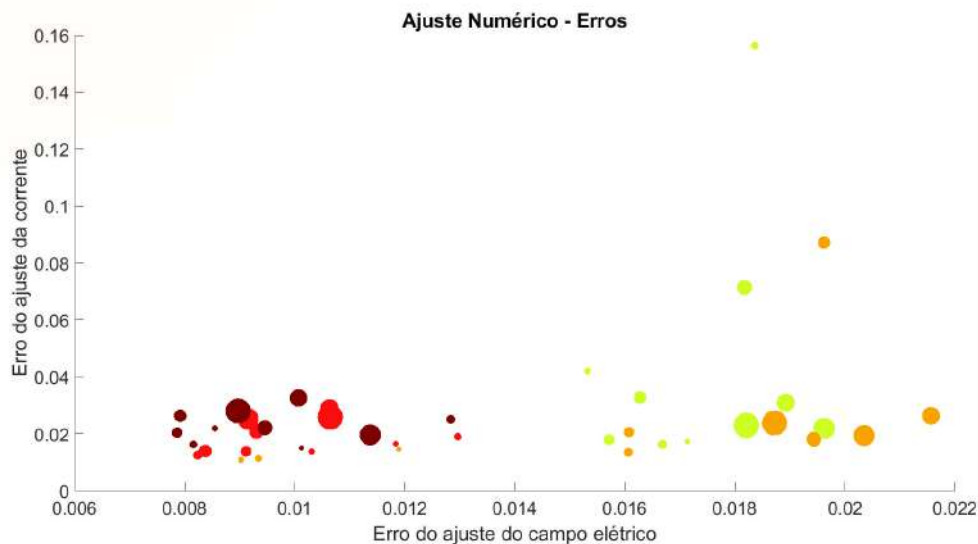


Figura 4.18: Erro dos ajustes numéricos

A fim de verificar a robustez do modelo utilizado, foi fixado o valor de cada grandeza, cumulativamente, tanto para o transformador (N , L_m/l e R_c/l) quando para o supercondutor (I_c , n e L_{sc}/l), a fim de verificar-se o efeito desta fixação no erro do ajuste numérico, até o ponto em que todos os parâmetros estão fixos. A figura 4.19 mostra essa progressão.

Verifica-se que, enquanto o erro do ajuste numérico do campo elétrico (modelagem do supercondutor) permanece dentro dos limites anteriores, sem grandes alterações, o erro do ajuste da corrente (modelagem do transformador) mostra um aumento significativo. Percebe-se que o desvio padrão relativo cresce significativamente quando a indutância por unidade de comprimento, L_m é fixada, atingindo

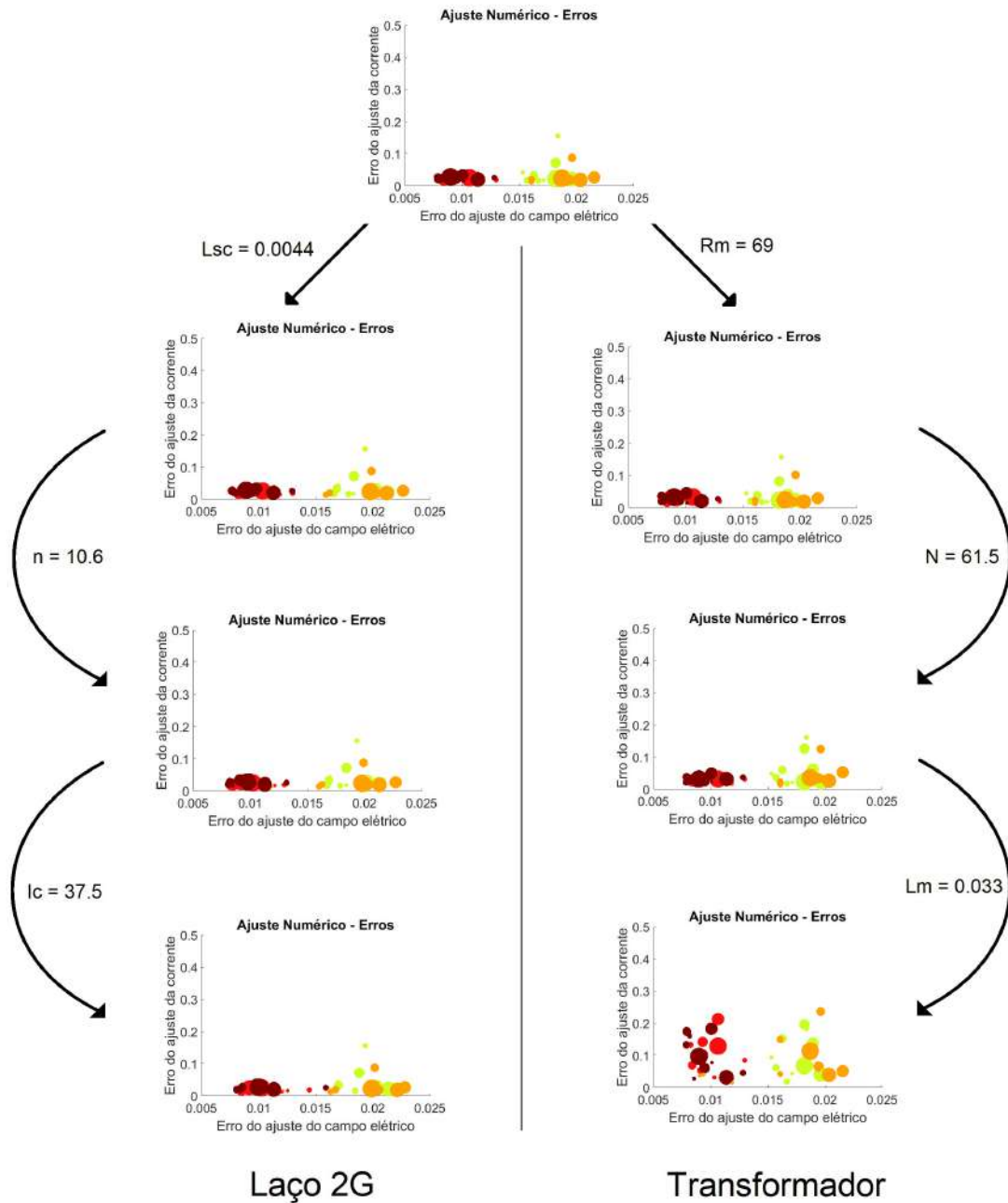


Figura 4.19: Efeito da fixação das grandezas no erro do ajuste numérico

valores próximos de 50%. Isto está de acordo com o esperado, visto que o transformador utilizado e, conseqüentemente, o modelo utilizado não são apropriadas para componentes de correntes em alta frequência, como discutido anteriormente. O fato de cada ensaio demandar uma indutância diferente corrobora com essa observação. Além disso, pode haver variações na indutância de ensaio para ensaio por conta do movimento do transformador e do conseqüente surgimento de um entreferro.

A fim de ilustrar o efeito da fixação no ajuste numérico, a figura 4.20 mostra o ajuste antes e depois da fixação para um dos ensaios realizados. De fato, enquanto

o campo elétrico ainda é bem representado pelo resultado do ajuste, a corrente calculada se distancia da medida, evidenciando as falhas nessa modelagem.

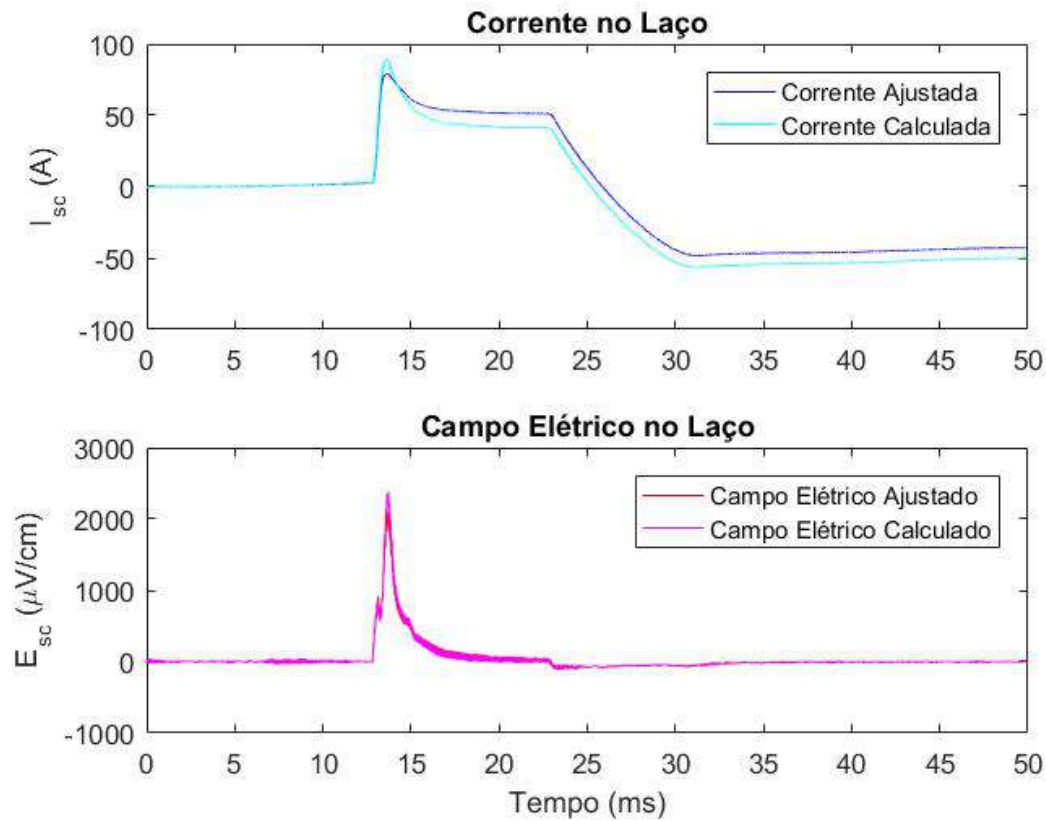


Figura 4.20: Efeito da fixação das grandezas no cálculo do campo elétrico e da corrente

O modelo adotado para o transformador é, portanto, muito simples para descrever com detalhes o processo de magnetização levando em conta todos os ensaios, mas é suficiente para se obter uma estimativa do comportamento transitório da corrente. A partir da análise da modelagem, chegou-se à mesma conclusão do que ao observarem-se os resultados dos ensaios: a corrente persistente depende diretamente do campo elétrico resistivo que surge na amostra. Contudo, uma vez que a indutância também varia ao longo dos ensaios, isto também terá um efeito na corrente persistente. Simulações investigando a dependência da energia e da corrente persistente com a largura e a intensidade no pulso de acordo com o modelo são apresentadas no apêndice B.

4.4 Comparação da Magnetização com Pulsos Longos e Curtos

Nesta seção são comparados os resultados da magnetização com pulsos entre 1 e 10 ms, apresentados neste capítulo, com os resultados da magnetização com pulsos entre 100 e 1000 ms [13]. O laço utilizado na magnetização com pulsos longos foi feito a partir de um segmento de fita modelo SF12050 da Superpower, sem revestimento de cobre. Os resultados da caracterização por indução de corrente foram de $I_C = 133$ A e $n = 22.7$. A figura 4.21 mostra a representação dos pulsos curtos e longos nos gráficos desta seção.

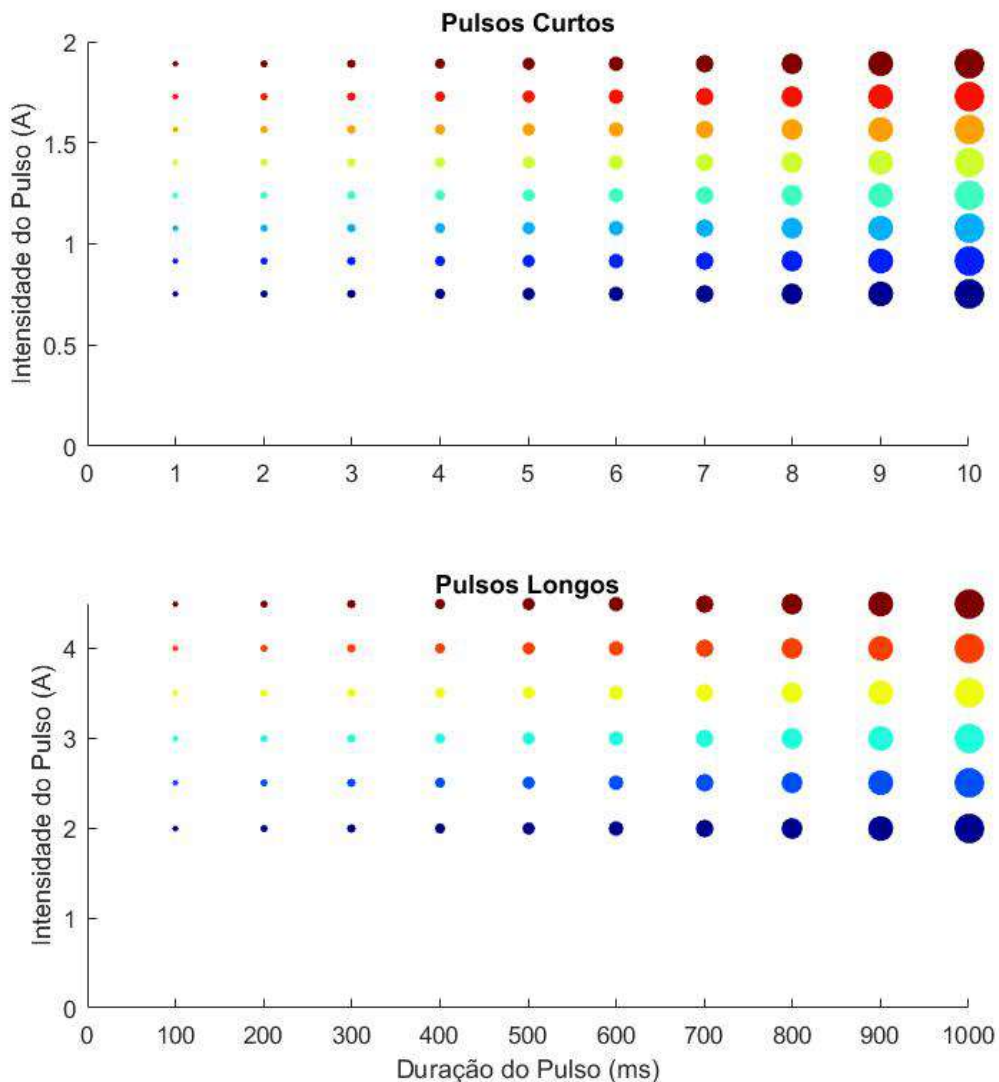


Figura 4.21: Representação dos pulsos curtos e longos

A figura 4.22 mostra, mais uma vez, a relação entre a energia e a duração dos

pulsos, desta vez comparando os resultados de pulsos curtos, com intensidades de 0,77 a 1,89 A, com os de pulsos longos, com intensidades de 2 a 4,5 A. As diferentes faixas de valores de intensidade do pulso utilizadas para cada ensaio se devem aos diferentes valores de corrente crítica de cada laço.

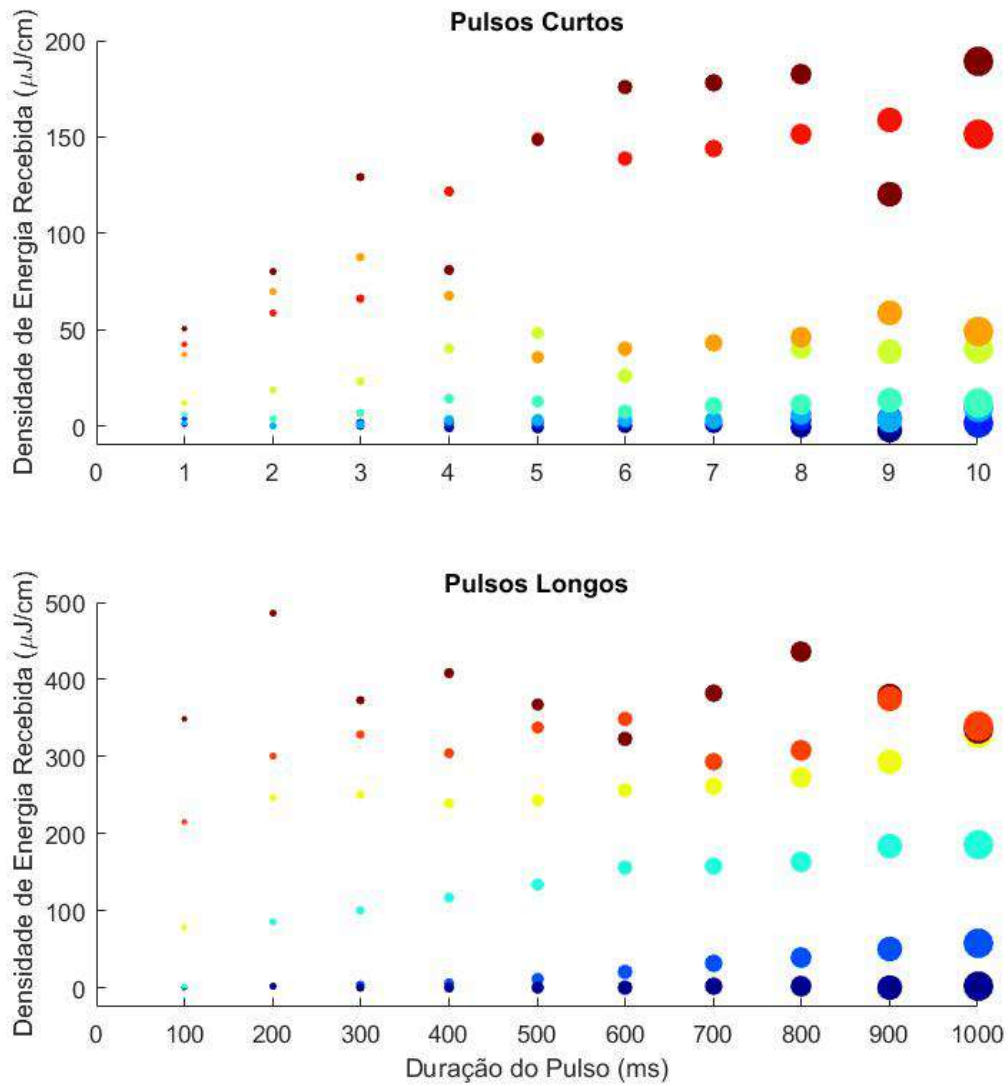


Figura 4.22: Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a energia transferida e a duração dos pulsos (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21)

Como se pode observar, o comportamento da energia com a duração do pulso é semelhante para os ensaios de curta e longa duração. A energia transferida ao supercondutor tem incrementos com o aumento tanto da intensidade quanto da duração dos pulsos. Para uma dada intensidade, esse incremento é cada vez menor a medida em que se aumenta a duração do pulso.

Nota-se, contudo, que essa tendência à estabilização parece mais rápida nos

ensaios de pulsos longos do que nos curtos. Os pontos de 200 ms já representam de 60 a 100% do valor alcançado com 1000 ms, enquanto os pulsos de 2 ms chegam a, no máximo, 50% do valor alcançado com 10 ms. Em termos absolutos, a energia máxima transferida com pulsos curtos é menor do que $200 \mu J/cm$, chegando a mais de 400 com os pulsos longos.

Observando-se a dependência da corrente persistente, relativa à corrente crítica para fins de comparação, com a intensidade do pulso, na figura 4.23, observa-se um comportamento semelhante para ambas as baterias de ensaios. Ao aumentar a intensidade do pulso, tanto com curta duração quanto com longa, aumenta-se a corrente persistente. Nota-se um valor mínimo necessário para a indução e um valor máximo em que se alcança a corrente crítica em ambos os casos.

Percebe-se que, assim como na energia, o efeito da duração na corrente persistente afeta de forma mais repentina os pulsos longos do que os curtos. De fato, para as intensidades de 4 e 4,5 A dos pulsos longos, os valores de corrente persistente estão mais agrupados do que para as intensidades de 1,75 e 1,89 A dos pulsos curtos, apesar de os pulsos de maior duração terem atingido a corrente crítica em ambos os casos.

Finalmente, através da figura 4.24, analisa-se de forma conjunta o comportamento da energia e da corrente persistente para os diferentes conjuntos de dados. Neste ponto se percebe uma divergência entre os resultados dos pulsos curtos e longos.

Nos pulsos curtos, a energia parece ter uma mesma tendência para todos os pontos a medida em que a corrente persistente se aproxima da corrente crítica. Além disso, os pulsos de diferentes intensidades se confundem, tendo valores próximos entre si dependendo da largura do pulso. O mesmo não ocorre para os pulsos longos. Neste conjunto de dados, a energia segue de forma linear com a corrente persistente até esta chegar a 60% da corrente crítica. A partir daí seu comportamento muda notavelmente: em vez de a energia continuar com incrementos constantes ou cada vez maiores, os valores alcançados próximos da corrente crítica superam em pouco aqueles obtidos com 60% dela e os valores de energia para uma mesma intensidade ficam mais próximos. Nota-se também que, para todos os pulsos longos, os pontos ficam mais concentrados para uma dada intensidade de pulso, diferentemente dos pulsos curtos.

Deve-se ressaltar, contudo, que nos pulsos longos com corrente persistente superior a 60% da corrente crítica, verificou-se que o efeito da variação da temperatura não pôde ser desprezado [13]. A figura 4.25 mostra o ajuste numérico do campo elétrico, que não leva em consideração o efeito da temperatura, aplicado aos pulsos de 1000 ms com 2,5 e 4,5 A, com corrente persistente igual a 20 e 107% da corrente crítica, respectivamente.

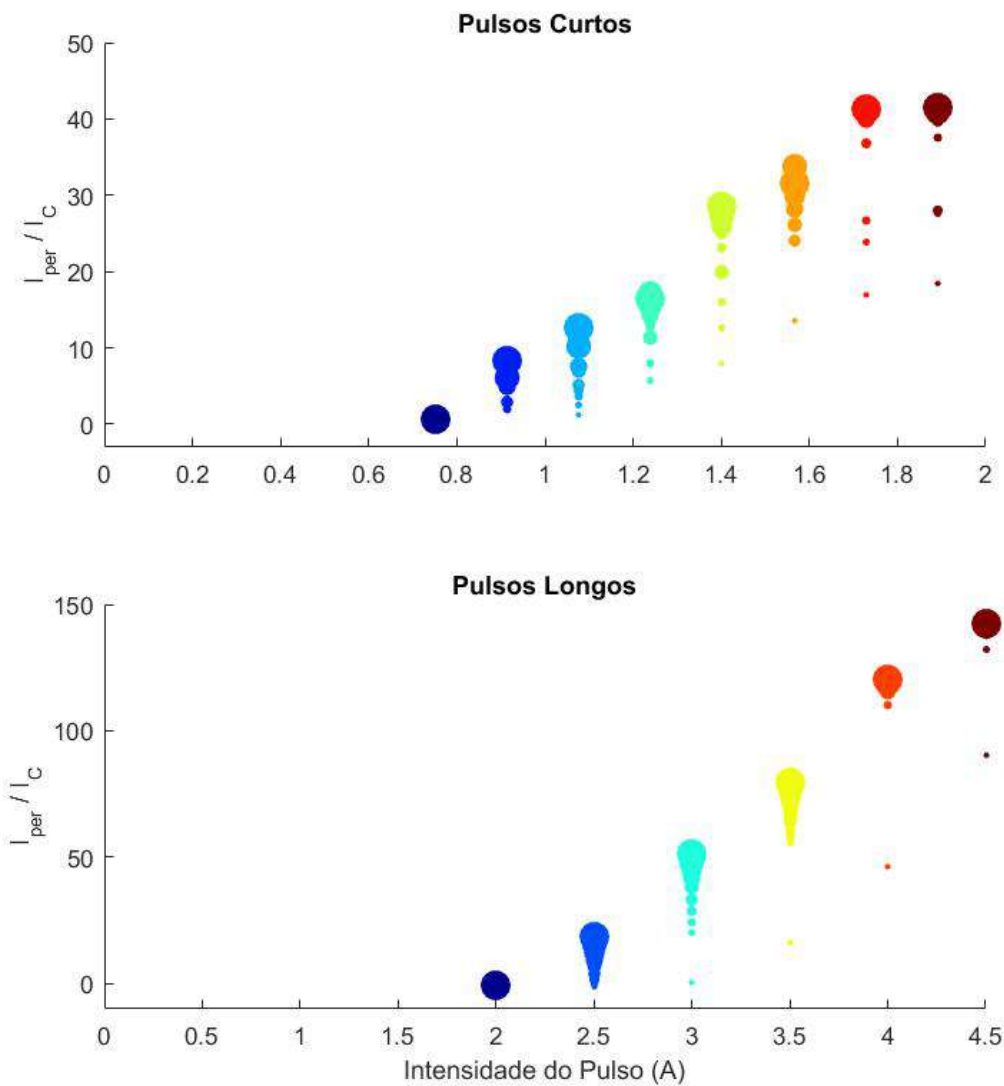


Figura 4.23: Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a corrente persistente e a intensidade dos pulsos (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21)

Vê-se que o efeito da temperatura altera perceptivelmente o formato da curva com relação a um gráfico que não leva esse efeito em consideração. A coincidência da alteração do comportamento da curva de energia por corrente persistente com os efeitos de temperatura sugere uma correlação entre esses eventos. Isto explica a diferença entre o comportamento dos pulsos curtos e longos mais intensos no que diz respeito à curva de energia por corrente persistente, uma vez que não há efeito de temperatura perceptível nos pulsos curtos. Isto por sua vez, deve-se a sua curta duração e ao revestimento de cobre dos laços utilizados nos pulsos curtos, que contribuem para a ancoragem térmica da amostra.

É interessante notar que, por meio dos pulsos longos, foi necessária uma energia

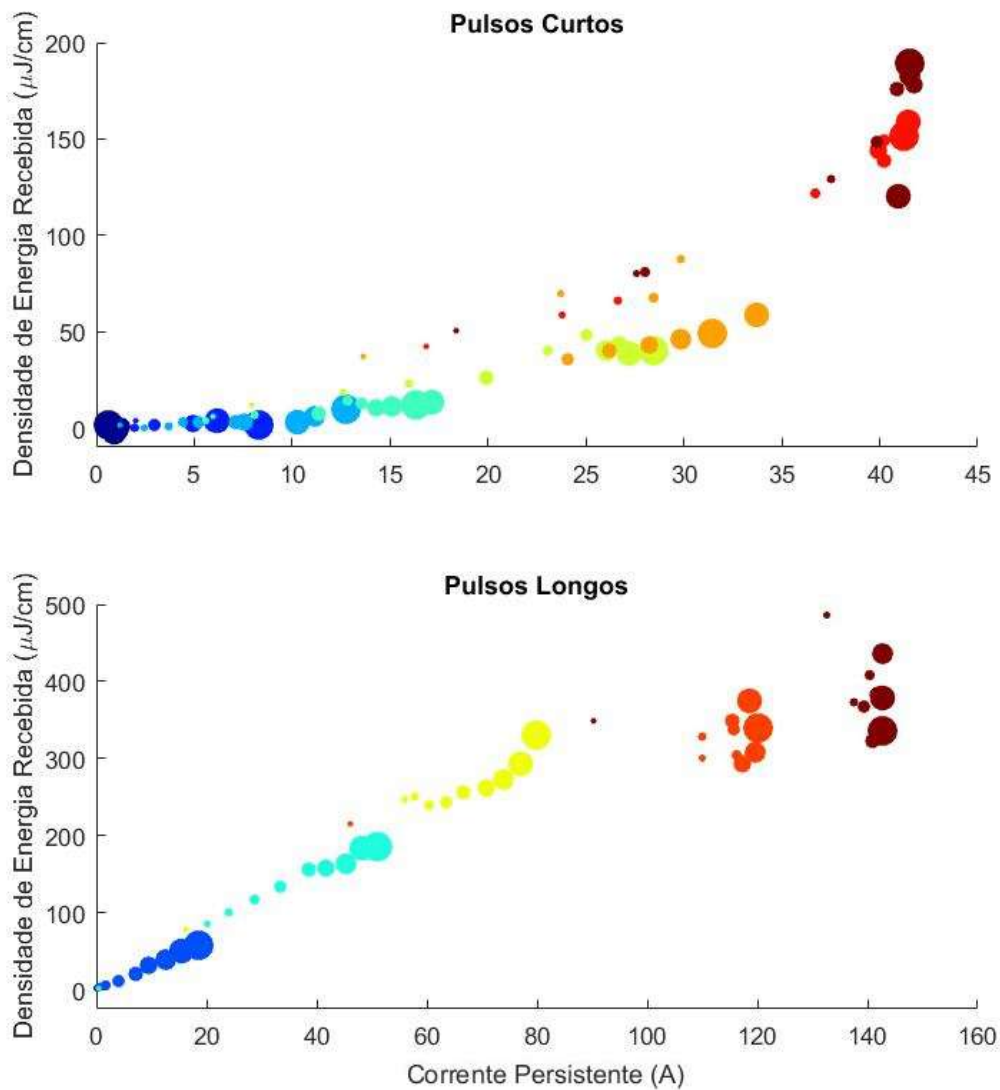


Figura 4.24: Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a corrente persistente e a energia transferida (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21)

de cerca de $380 \mu J/cm$ para se alcançar uma corrente persistente igual a corrente crítica, mesmo com a redução da inclinação da curva proveniente do efeito da temperatura. Com os pulsos curtos, por sua vez, atingiu-se a corrente crítica com valores em torno de $100 \mu J/cm$. Em termos absolutos, contudo, tanto os pulsos longos quanto os curtos atingem corrente persistente igual à corrente crítica com gasto energético de aproximadamente $2,8 \mu J/cm/A$, o que não mostra uma vantagem clara de se utilizar um método com relação ao outro nesse ponto de operação. Contudo, como esse resultado depende da mudança de comportamento dos pulsos longos a partir de 60% da corrente crítica, para valores menores de corrente persistente, os pulsos curtos se mostram mais eficientes.

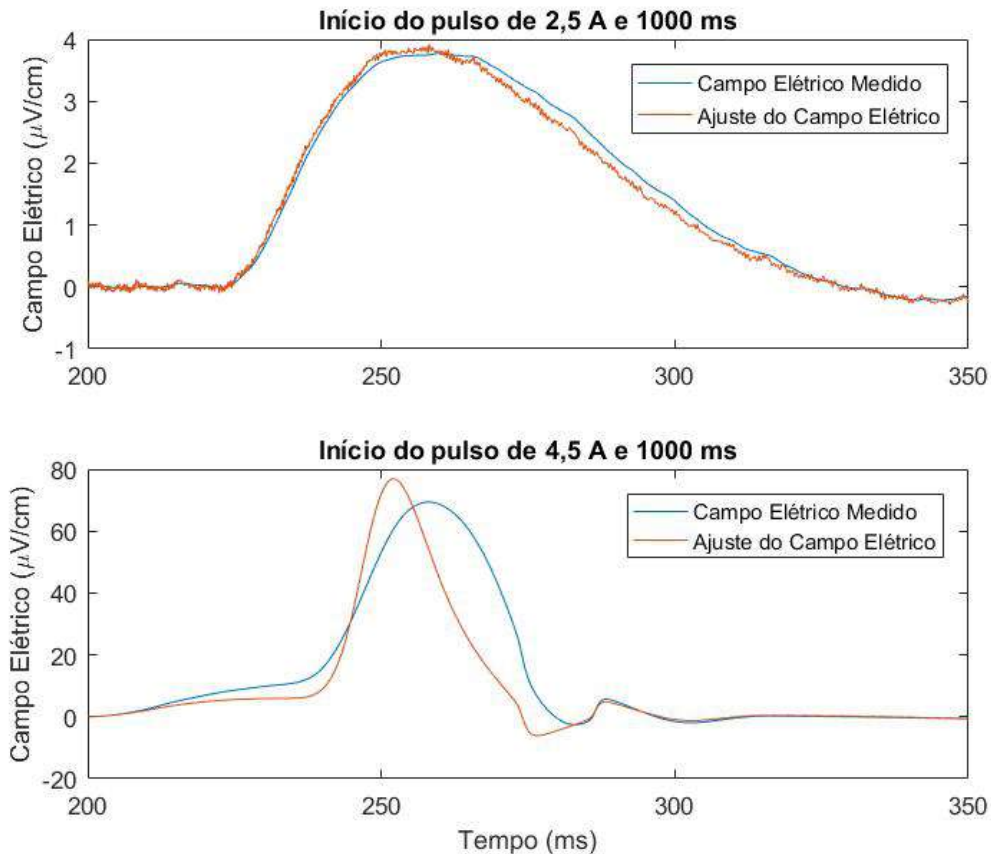


Figura 4.25: Efeito da temperatura no formato dos pulsos com corrente persistente acima de 60% da corrente crítica

Observando a figura 4.26, que apresenta a relação entre densidade de energia recebida e armazenada em ambos os casos, percebe-se mais uma vez a diferença de comportamento. O valor da indutância para cálculo da energia armazenada nos pulsos longos foi de $1,6 \text{ nH/cm}$, também encontrado através da média dos resultados de indutância dos ajustes numéricos dos ensaios de magnetização. No que diz respeito à energia armazenada, os resultados parecem corroborar com a figura 4.24. Para os valores mais baixos de energia recebida, a energia armazenada é maior para pulsos curtos do que para os longos. Para os valores maiores, Os pulsos longos passam a ser mais eficientes. O efeito da temperatura é perceptível nos pulsos longos mais intensos.

A figura 4.27 compara o campo elétrico e a corrente para dois ensaios com pulso longo e curto, ambos alcançando corrente persistente máxima ao fim do pulso. Enquanto o comportamento das grandezas é semelhante, algumas distinções podem ser feitas entre o ensaio de pulso curto e o ensaio de pulso longo.

Primeiramente, a corrente máxima alcançada durante o pulso para o ensaio de pulso curto foi de 77 A, pouco mais do que o dobro da corrente crítica. Por sua vez, a corrente no ensaio de pulso longo chegou a 162 A, o que corresponde a apenas

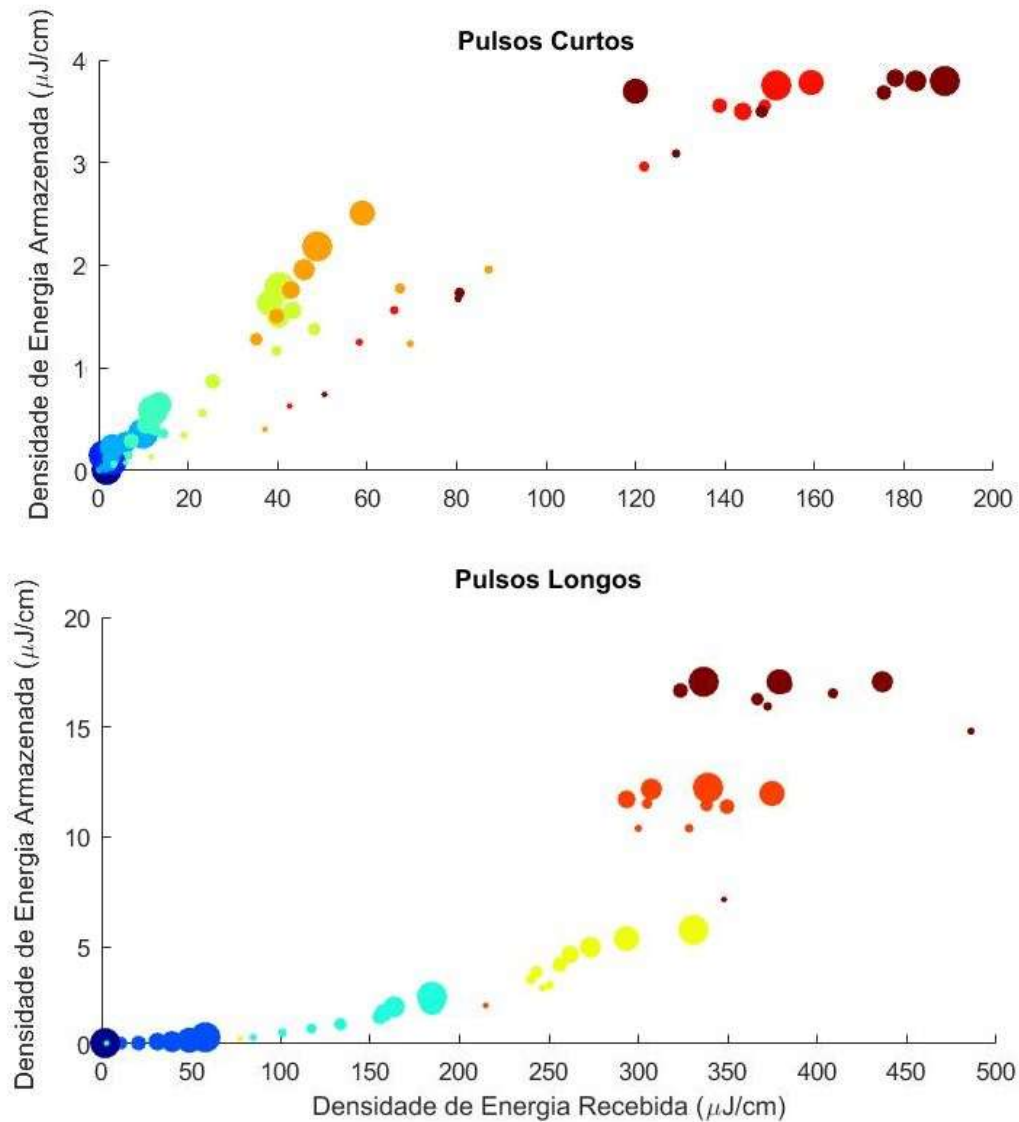


Figura 4.26: Comparação entre os pulsos longos e curtos: dependência entre a energia recebida e a energia armazenada (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.21)

122% do valor crítico. Os valores máximos de campo elétrico, por sua vez, foram de $1900 \mu\text{V}/\text{cm}$ e $70 \mu\text{V}/\text{cm}$, para o pulso curto e longo, respectivamente, apesar de o valor do índice n da amostra utilizada no ensaio de pulso longo ser mais do que o dobro do que o índice n da outra amostra.

De acordo com o modelo apresentando anteriormente neste trabalho, um pulso com tempo de subida mais curto provocaria, em um primeiro momento, uma subida acentuada da corrente no supercondutor. Como a corrente que passa pelo ramo de magnetização ($I_R + I_L$) é proporcional à integral do campo elétrico resistivo no tempo, a corrente no laço atingiria valores bem mais altos do que em um pulso com

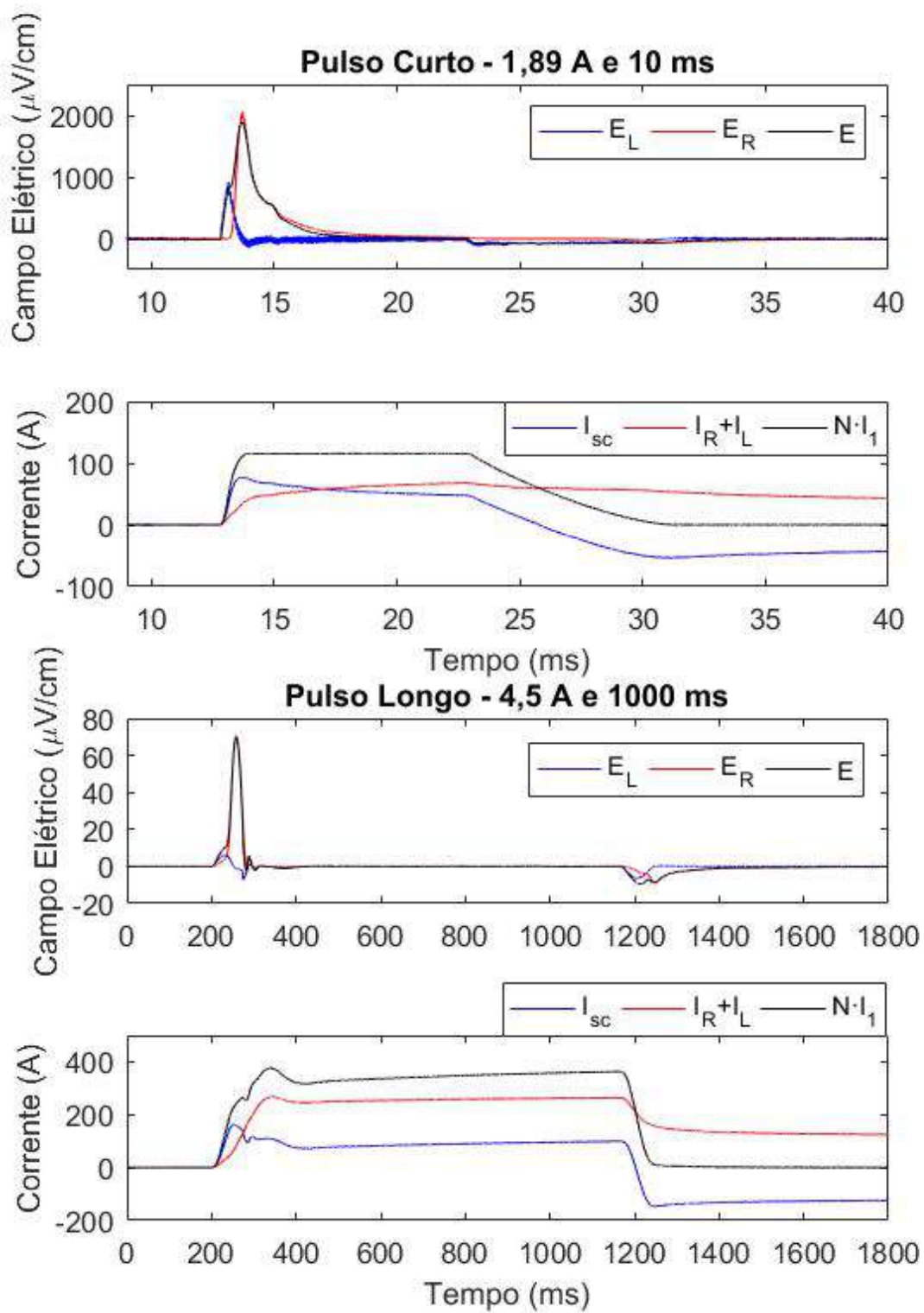


Figura 4.27: Comparação entre o transitório de pulsos curtos e longos

maior tempo de subida, antes de o campo elétrico surtir efeito e limitar a corrente no laço. Como consequência à limitação da corrente, o próprio campo elétrico diminui. Isto explica a diferença entre os valores máximos de corrente e campo elétrico entre os dois ensaios, por mais que o modelo seja uma representação simplificada do processo. Os altos valores de campo elétrico alcançados estão, portanto, mais associados ao tempo de subida do pulso do que à duração do pulso propriamente dita.

Apesar dos altos valores de campo elétrico encontrados, a duração desse pico é muito menor no pulso curto do que no longo, justamente devido à intensidade do campo elétrico e consequente limitação da corrente. Isto resulta em valores de corrente persistente na mesma ordem de grandeza para ambos os pulsos. Mais uma vez, de acordo com o modelo, a corrente persistente é igual à corrente no ramo de magnetização após o pulso, ou seja, também é proporcional à integral do campo elétrico no tempo. O aumento do campo elétrico é compensado pela diminuição do tempo em que seu valor é significativo, resultado em uma corrente persistente semelhante em ambos os casos.

Finalmente, nota-se que é possível alcançar níveis semelhantes de corrente crítica com pulsos curtos e longos, contanto que a relação entre o tempo de subida e a duração dos pulsos seja semelhante e a intensidade do pulso seja suficiente. A diminuição do tempo de subida, contudo, implica maiores componentes indutivas de campo elétrico, o que pode exigir fontes de corrente mais potentes caso esse valor seja reduzido demasiadamente. Enfim, apesar das diferenças entre os valores de corrente e campo elétrico dos ensaios de pulso curto e longo, eles apresentam comportamentos semelhantes, com exceção do efeito da temperatura, que só foi observado em pulsos longos mais intensos.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho teve como tema a magnetização de laços supercondutores por meio de pulsos curtos de corrente. A magnetização de laços supercondutores, por si só, é um assunto pouco abordado, ainda mais no que diz respeito ao estudo do comportamento do campo elétrico no laço durante o processo de magnetização.

Esta dissertação teve como objetivo, portanto, proporcionar uma maior compreensão sobre o fenômeno da indução de corrente persistente no laço supercondutor através de modelagem, simulação e ensaios experimentais de magnetização. Com os resultados obtidos, espera-se entender os mecanismos de indução de corrente persistente com mais detalhe, tanto através de uma análise direta do comportamento das grandezas medidas, quanto por meio de um confronto entre os valores medidos e simulados.

A amostra supercondutora utilizada durante os ensaios foi caracterizada tanto segundo o método de caracterização com quatro pontos quanto segundo o de indução de corrente, cada um através de um aparato experimental adequado. Os resultados desses processos mostram divergência entre os valores obtidos para o índice n , provavelmente devido aos diferentes regimes de operação em cada caso, mas apresentam valores coerentes de corrente crítica. Quando a aplicação em questão trata-se de magnetização por meio da aplicação de um pulso de campo magnético no interior do laço supercondutor, mostra-se vantajoso optar pela utilização da caracterização por indução de corrente. Além de contar com um aparato experimental mais simples e proteger naturalmente a amostra contra sobrecorrentes, este método replica condições mais próximas da realidade para este tipo de aplicação, sendo seus resultados, portanto, mais confiáveis neste caso.

No âmbito experimental do trabalho, o laço supercondutor pôde ser magnetizado através de pulsos curtos de corrente no primário do transformador. Percebeu-se que existe uma faixa de operação em que a corrente persistente no laço é crescente com o incremento da intensidade do pulso. Valores demasiadamente baixos de intensidade, contudo, não são suficientes para a magnetização da amostra, enquanto que valores

demasiadamente altos fazem com que a corrente persistente atinja um valor máximo, próximo da corrente crítica da amostra. Além disso, embora seja perceptível a elevação da energia transferida com o aumento da duração do pulso, essa elevação é cada vez menor conforme se aumenta a duração. Esses resultados estão de acordo com aqueles obtidos em trabalhos anteriores, cujo tema foi a magnetização de laços supercondutores com pulsos de corrente com duração a partir de 100 ms. A curta duração dos pulsos utilizados neste trabalho permitiu que se chegasse a valores de corrente mais intensos no transitório da magnetização, e por consequência, foram atingidos valores bem mais altos de campo elétrico do que no trabalho anterior. Isso explica o baixo valor do índice n encontrado durante a caracterização por indução de corrente, além de esclarecer como é possível a indução de correntes persistentes intensas apesar da curta duração dos pulsos aplicados.

Quanto à modelagem utilizada ao longo desta dissertação para representar o sistema de magnetização, podem-se ressaltar prós e contras. Enquanto a relação entre o campo elétrico e a corrente no laço supercondutor está bem representada pela adição de uma componente indutiva à *Power Law*, a representação do transformador, ou seja, a relação dessas grandezas com a corrente no primário, ainda demanda ajustes. Apesar disso, a atual modelagem, ainda que deficiente, serve para prever o comportamento geral da corrente no supercondutor, mesmo que não coincida numericamente com os valores obtidos na prática.

Conciliando os resultados obtidos experimentalmente com a modelagem utilizada, principalmente no que diz respeito ao comportamento do campo elétrico, nota-se que valores mais altos de campo elétrico resistivo e, conseqüentemente, de energia transferida ao supercondutor, concentram-se no início dos pulsos de corrente. O surgimento do estado dissipativo caracterizado pelos altos valores de campo elétrico resistivo, ou seja, de resistência no supercondutor, é o que, ao remover-se o pulso, permite a permanência de uma corrente persistente. Portanto, fica claro que a corrente persistente tem uma alta dependência com a intensidade do pulso aplicado, uma vez que é necessário atingir valores próximos ou acima da corrente crítica para que o laço seja magnetizado. Desta forma, e de acordo com o modelo, a componente indutiva do campo elétrico não parece ter efeito na corrente persistente. Os altos valores de campo elétrico resistivo no início do pulso também explicam por que a corrente persistente tem um incremento cada vez menor a medida que a duração do pulso aumenta.

Ao compararem-se os resultados entre os ensaios de pulsos curtos e longos, percebe-se que é possível se chegar a correntes persistentes próximas por ambos os métodos e que seu comportamento é semelhante para intensidades de pulso mais baixas. Para intensidades mais altas, o efeito da temperatura não pode ser desprezado em pulsos longos [13]. Não se pode observar efeito de temperatura para pulsos

curtos. Do ponto de vista energético, não há uma vantagem clara de um método com relação ao outro.

Finalmente, o funcionamento da magnetização dos laços supercondutores pôde ser estudado com mais detalhes ao longo deste trabalho. Embora ainda haja questões a serem respondidas, permitiu-se uma maior compreensão acerca do processo de magnetização, principalmente no que diz respeito à dependência da corrente persistente com o campo elétrico resistivo ao longo do pulso e suas implicações.

Mostra-se interessante, em trabalhos futuros, a melhoria do sistema utilizado. Embora seja notável a curta duração dos pulsos permitida pela fonte atual, os trabalhos subsequentes usufruiriam largamente do emprego da mesma fonte utilizada neste trabalho, mas com uma configuração que permita níveis mais elevados de corrente, de forma que possam ser magnetizadas amostras com valores mais altos de corrente crítica. Além disso, a diminuição dos ruídos na medição do campo elétrico também seria de grande vantagem para a análise do transitório do campo elétrico e da relação entre a energia e os parâmetros do pulso. A substituição do transformador por um adequado a altas frequências de corrente também permitiria um confronto mais preciso entre o modelo e os dados obtidos.

Como tema dos trabalhos por vir, sugerem-se o estudo da magnetização de laços supercondutores em diferentes temperaturas e com a aplicação de campos externos de ângulo e intensidade variados. Além disso, a melhoria da modelagem do sistema de magnetização seria excelente para uma melhor previsibilidade do comportamento da corrente no laço, pois permitiria a otimização da corrente persistente em função da largura e intensidade do pulso, além de oferecer maior confiabilidade para uma eventual malha de controle a ser utilizada em conjunto com o sistema.

Referências Bibliográficas

- [1] WERFEL, F. N., FLOEGEL-DELOR, U., ROTHFELD, R., et al. “Superconductor bearings, flywheels and transportation”, *Superconductor Science and Technology*, v. 25, n. 1, pp. 014007, 2012.
- [2] ZHANG, J., DAI, S., TENG, Y., et al. “Development, Updating and Long-Term Operations of a 10.5 kV HTS Fault Current Limiter”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, v. 27, n. 10, pp. 2195–2203, Oct 2014. ISSN: 1557-1947. doi: 10.1007/s10948-014-2586-0.
- [3] KLAUS, G., NICK, W., NEUMULLER, H., et al. “Advances in the development of synchronous machines with high-temperature superconducting field winding at Siemens AG”, *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 7 pp.–, 2006.
- [4] PEI, R., VELICHKO, A., HONG, Z., et al. “Numerical and Experimental Analysis of IC and AC Loss for Bent 2G HTS Wires Used in an Electric Machine”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 3356–3360, 2009.
- [5] HAZELTON, D. W., SELVAMANICKAM, V. “SuperPower’s YBCO Coated High-Temperature Superconducting (HTS) Wire and Magnet Applications”, *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 11, pp. 1831–1836, 2009.
- [6] OGATA, M., MIYAZAKI, Y., HASEGAWA, H., et al. “Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train”, *Physica C: Superconductivity and its applications*, v. 470, n. 20, pp. 1782–1786, 2010.
- [7] BALDAN, C. A., LAMAS, J. S., SHIGUE, C. Y., et al. “Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor-The Limiting Factor and Its Recovery Time”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 1810–1813, 2009.
- [8] YUAN, W., XIAN, M., AINSLIE, Z., et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 20, n. 3, pp. 1379–1382, 2010.

- [9] SASS, F. *Modelagem do comportamento de mancais magnéticos utilizando fitas e blocos maciços supercondutores*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- [10] SOUSA, W. T. B., STEPHAN, R. M., COSTA, F. S., et al. “Projeto MagLev Cobra - Levitação Supercondutora para Transporte Urbano”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, 00 2016. ISSN: 1806-1117.
- [11] DIAS, D. H. N., SOTELO, G. G., RODRIGUEZ, E. F., et al. “Emulation of a Full Scale MagLev Vehicle Behavior Under Operational Conditions”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, pp. 3601105–3601105, June 2013. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2012.2233832.
- [12] DA CRUZ, V. S., TELLES, G. T., FERREIRA, A. C., et al. “Pulse Magnetization of Jointless Superconducting Loops for Magnetic Bearings Height Control”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, pp. 1–4, June 2018. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2018.2816105.
- [13] DA CRUZ, V. S. *Carregamento Indutivo de Corrente em Laços Supercondutores*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [14] ONNES, H. K. “The Superconductivity of Mercury”, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 1911.
- [15] ONNES, H. K. “Report on the researches made in Leiden cryogenic laboratory between the second and third international congress of refrigeration”, *Selected Reprints of American Association of Physics Teachers*, v. 24, n. b, pp. 55–70, 1913.
- [16] MEISSNER, W., OCHSENFELD, R. “Ein neuer effekt bei eintritt der supra-leitfähigkeit”, *Die Naturwissenschaften*, v. 21, pp. 787–788, 1933.
- [17] LONDON, F., LONDON, H. “The electromagnetic equations of the supraconductor”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, v. 149, n. 866, pp. 71–88, 1935.
- [18] GINZBURG, V. L., LANDAU, L. D. “On the theory of superconductivity”, *JETP*, pp. 1064–1082, 1950.
- [19] ABRIKOSOV, A. A. “On the magnetic properties of superconductors of the second group”, *Soviet Physics (JETP)*, v. 5, n. 6, pp. 1174–1182, 1957.
- [20] RUPICH, M. W., SCHOOP, U., VEREBELYI, D. T., et al. “The Development of Second Generation HTS Wire at American Superconductor”, *IEEE*

Transactions on Applied Superconductivity, v. 17, n. 2, pp. 3379–3382, June 2007. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2007.899076.

- [21] SELVAMANICKAM, V., CHEN, Y., XIONG, X., et al. “High Performance 2G Wires: From R&D to Pilot-Scale Manufacturing”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 3225–3230, June 2009. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2009.2018792.
- [22] “ Superpower ”. Disponível em: <\protect\unhbox\voidb@x\penalty\@M\www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire\protect\unhbox\voidb@x\penalty\@M>. Acesso em Janeiro de 2018 .
- [23] ANDERSON, P. W., KIM, Y. B. “Hard Superconductivity: Theory of the Motion of Abrikosov Flux Lines”, *Rev. Mod. Phys.*, v. 36, pp. 39–43, Jan 1964. doi: 10.1103/RevModPhys.36.39.
- [24] AMEMIYA, N., MURASAWA, S.-I., BANNO, N., et al. “Numerical modelings of superconducting wires for AC loss calculations”, *Physica C: Superconductivity*, v. 310, pp. 16–29, 12 1998.
- [25] RETTELBACH, T., SCHMITZ, G. J. “3D simulation of temperature, electric field and current density evolution in superconducting components”, *Superconductor Science and Technology*, v. 16, n. 5, pp. 645, 2003.
- [26] DE SOUSA., W. T. B. *Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- [27] DE CASTRO., A. R. *Mancais Magnéticos com Fitas Supercondutoras 2G*. Trabalho de conclusão de curso., Universidade Federal do Rio de Janeiro., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- [28] DOS REIS MARTINS, F. G. *Mancais Magnético Supercondutor com Laços de Fitas de Segunda Geração*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [29] AINSLIE, M. D., FUJISHIRO, H., UJIIE, T., et al. “Modelling and comparison of trapped fields in (RE)BCO bulk superconductors for activation using pulsed field magnetization”, *Superconductor Science and Technology*, v. 27, n. 6, pp. 065008, 2014.
- [30] XU, Z., LEWIN, R., CAMPBELL, A. M., et al. “Simulation studies on the magnetization of (RE)BCO bulk superconductors using various split-coil arrangements”, *Superconductor Science and Technology*, v. 25, n. 2, pp. 025016, 2012.

- [31] FUCHS, G., KRABBES, G., SCHATZLE, P., et al. “Trapped fields larger than 11 T in bulk YBa/sub 2/Cu/sub 3/O/sub 7-x/ material”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 10, n. 1, pp. 890–893, March 2000. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/77.828374.
- [32] MASARU, T., MASATO, M. “High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K”, *Macmillian Magazines Ltd.*, v. 421, n. 1, 2003.
- [33] MIZUTANI, U., OKA, T., ITOH, Y., et al. “Pulsed-field magnetization applied to high-Tc superconductors”, *Applied Superconductivity*, v. 6, n. 2–5, pp. 235 – 246, 1998. ISSN: 0964-1807. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0964-1807\(98\)00106-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0964-1807(98)00106-9).
- [34] FABBRI, M., ALBANO, P. G., PRETELLI, M., et al. “Flux trapping in a ring-shaped YBCO bulk by pulsed field magnetization”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 11, n. 4, pp. 4116–4122, Dec 2001. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/77.979850.
- [35] FUKUOKA, K., HASHIMOTO, M. “Observation of pulsed field magnetization process for a YBCO bulk superconductor”, *The Netherlands: IOS*, pp. 203–206, 2000.
- [36] BARUSCO, P. *Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G HTS em Regime de Flux Flow*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- [37] SASS, F., SOTELO, G. G., DE ANDRADE JUNIOR, R. “Desenvolvimento de um sensor de corrente de baixo custo para operar imerso em nitrogênio líquido”, *Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 2877–2882, Sep 2012.
- [38] ROSA, E. B., COHEN, L. “On the Self-Inductance of Circles”, *Bulletin of the Bureau of Standards*, v. 4, n. 1, pp. 149–159, 1908.

Apêndice A

Resultados dos Ajustes Numéricos

A tabela A mostra os resultados completos dos ajustes numéricos realizados com os dados dos ensaios de intensidade entre 1,40 e 1,89 A.

Tabela A.1: Resultados completos dos ajustes numéricos

| Int(A) | Dur(ms) | Supercondutor | | | Transformador | | |
|-----------|---------|---------------|---------|---------|---------------|---------|----------------|
| | | Ic | n | Lsc/l | N | Lm/l | l / Rc |
| 1,40 | 1 | 31.3804 | 7.8274 | 4.0277 | 54.6518 | 48.9628 | 11.7877 |
| | 2 | 36.2652 | 9.7970 | 3.9007 | 69.7106 | 13.5722 | 38.2819 |
| | 3 | 39.3384 | 11.6467 | 3.9555 | 46.6661 | 38.6484 | -21.1204 |
| | 4 | 38.5640 | 11.5455 | 4.0625 | 61.1740 | 32.1008 | 8.2195 |
| | 5 | 39.9809 | 12.0336 | 4.1317 | 68.4944 | 24.3575 | 24.6597 |
| | 6 | 39.8133 | 11.7829 | 4.1083 | 71.3007 | 12.5373 | 41.2318 |
| | 7 | 39.0566 | 11.8769 | 4.2807 | 85.5840 | 10.6681 | 61.0683 |
| | 8 | 38.8955 | 11.2805 | 3.9236 | 71.9194 | 16.4632 | 46.7031 |
| | 9 | 38.6461 | 11.4922 | 3.9612 | 59.6360 | 30.5212 | 9.7639 |
| | 10 | 38.1432 | 10.7963 | 3.9580 | 63.0017 | 26.4663 | 16.7750 |
| 1,57 | 1 | 33.6585 | 9.0942 | 4.4075 | 63.3292 | 33.1205 | 17.7418 |
| | 2 | 35.5828 | 9.9323 | 4.5068 | 66.0788 | 36.7652 | 17.9957 |
| | 3 | 36.1556 | 10.1885 | 4.5464 | 66.6659 | 35.7674 | 12.7753 |
| | 4 | 39.1701 | 11.6576 | 4.4814 | 61.7277 | 37.6017 | 16.7486 |
| | 5 | 38.3512 | 11.4801 | 4.3133 | 62.0904 | 17.4240 | 29.0541 |
| | 6 | 39.6107 | 12.1502 | 4.2202 | 80.3265 | 9.1987 | 68.7781 |
| | 7 | 38.9521 | 11.5654 | 4.1523 | 55.6966 | 29.1646 | 5.8774 |
| | 8 | 38.6612 | 11.3553 | 4.1015 | 53.6756 | 34.2025 | -1.2756 |
| | 9 | 38.7376 | 11.6708 | 4.1870 | 58.1673 | 32.0396 | 14.0236 |
| | 10 | 37.7809 | 10.9051 | 4.0993 | 57.5429 | 25.5950 | 10.7401 |
| 1,73 | 1 | 32.3115 | 8.6753 | 4.3783 | 59.9202 | 29.1319 | 20.5233 |
| | 2 | 35.1907 | 9.8833 | 4.3883 | 58.8504 | 30.3557 | 19.6394 |
| | 3 | 36.9867 | 10.6872 | 4.3979 | 53.5709 | 43.9721 | 9.1574 |
| | 4 | 33.9594 | 9.2848 | 4.5468 | 58.8990 | 45.6168 | 4.9389 |
| | 5 | 31.6500 | 8.4774 | 4.5943 | 65.8465 | 35.6518 | 8.9017 |
| | 6 | 34.8598 | 9.5604 | 4.7098 | 63.9736 | 37.3901 | 10.6837 |
| | 7 | 36.8561 | 10.3348 | 4.5523 | 61.2965 | 44.1878 | 8.8183 |
| | 8 | 34.3434 | 9.3395 | 4.5258 | 58.7262 | 50.3223 | 1.1381 |
| | 9 | 34.1551 | 9.3021 | 4.7055 | 63.5787 | 38.8632 | 6.4737 |
| | 10 | 34.7246 | 9.5303 | 4.5743 | 60.4449 | 42.6324 | 3.2239 |
| 1,89 | 1 | 34.6486 | 9.2804 | 4.5665 | 52.7327 | 47.7068 | 10.3058 |
| | 2 | 34.1411 | 9.5003 | 4.2342 | 57.3824 | 32.5857 | 16.7465 |
| | 3 | 33.0031 | 8.8971 | 4.4360 | 56.5530 | 48.7059 | 5.5547 |
| | 4 | 39.8083 | 11.3517 | 4.3397 | 56.2994 | 30.7857 | 21.1707 |
| | 5 | 36.2327 | 10.0825 | 4.3456 | 58.7217 | 44.6939 | 12.5674 |
| | 6 | 33.9413 | 9.1012 | 4.6464 | 58.0088 | 47.2864 | 1.8555 |
| | 7 | 34.9540 | 9.6806 | 4.7203 | 62.9400 | 36.2235 | 10.5112 |
| | 8 | 33.8713 | 9.0225 | 4.6670 | 56.9587 | 48.0793 | -1.3348 |
| | 9 | 37.3344 | 10.5672 | 4.4423 | 57.5241 | 35.0356 | 10.9137 |
| | 10 | 34.5342 | 9.4929 | 4.6750 | 61.1861 | 39.3368 | 6.5918 |
| Unidades: | | A | - | nH/cm | - | nH/cm | $cm/\mu\Omega$ |

Apêndice B

Simulações do Modelo do Sistema

Neste apêndice são apresentados os resultados de simulações da corrente e campo elétrico no laço, tendo em vista uma entrada de corrente. Para isso, tanto o campo elétrico quanto a corrente no laço foram calculados numericamente através das equações 3.2 e 3.4 a partir da corrente no primário medida em cada ensaio. O diagrama de blocos que representa o cálculo dessas grandezas pode ser visto na figura B.1.

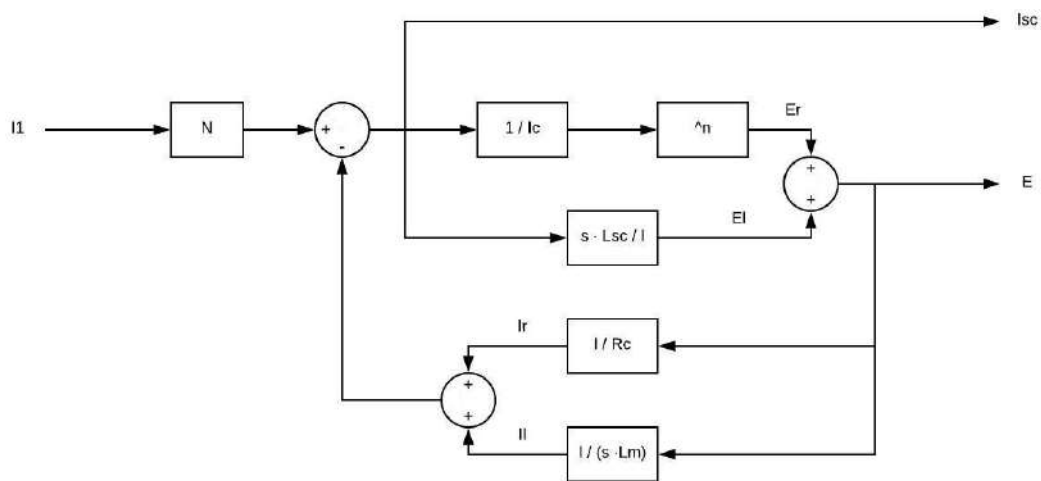


Figura B.1: Diagrama de blocos da simulação do sistema

As simulações foram feitas para que, uma vez fixados os parâmetros do sistema, se verifique a influência da largura e intensidade do pulso na energia e corrente persistente de acordo com o modelo. Como as entradas do ajuste numérico são justamente os dados de campo elétrico e corrente obtidos a partir dos ensaios experimentais, a energia e corrente persistente calculadas seriam as mesmas para o ajuste e para os ensaios. As simulações, por sua vez, geram valores de corrente e campo elétrico de acordo com o modelo. Desta forma, a energia e corrente persis-

tente podem ser calculadas e comparadas com os valores reais medidos. Os valores dos parâmetros do sistema utilizados foram os valores médios apresentados na tabela 4.3, com exceção de R_c , que foi considerado zero para facilitar a convergência das simulações. O *software* utilizado foi mais uma vez o Matlab.

As figuras B.2 a B.5 mostram os resultados das simulações realizadas dessa forma para todos os ensaios entre 0,7 e 1,9 A. Pode-se perceber que o comportamento do laço 2G na simulação é semelhante aos dados experimentais, embora não coincidam numericamente. Mais uma vez, atribui-se essa diferença à deficiência da modelagem, que não leva em consideração a saturação do núcleo para os diferentes harmônicos de corrente.

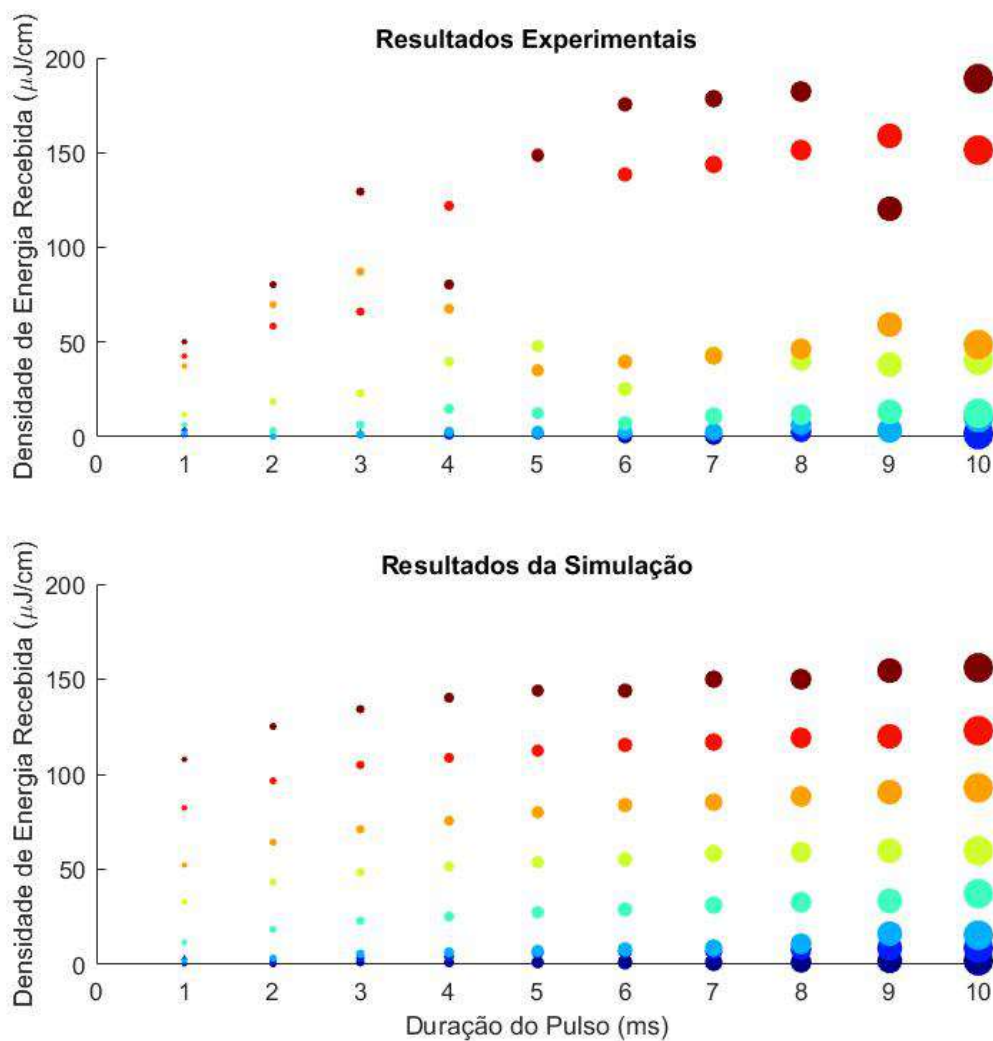


Figura B.2: Comparação entre simulação e dados experimentais: energia e duração (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)

Conclui-se, portanto, que a modelagem do sistema é satisfatória no que diz respeito ao laço supercondutor, mas é apenas uma representação simplificada no que se

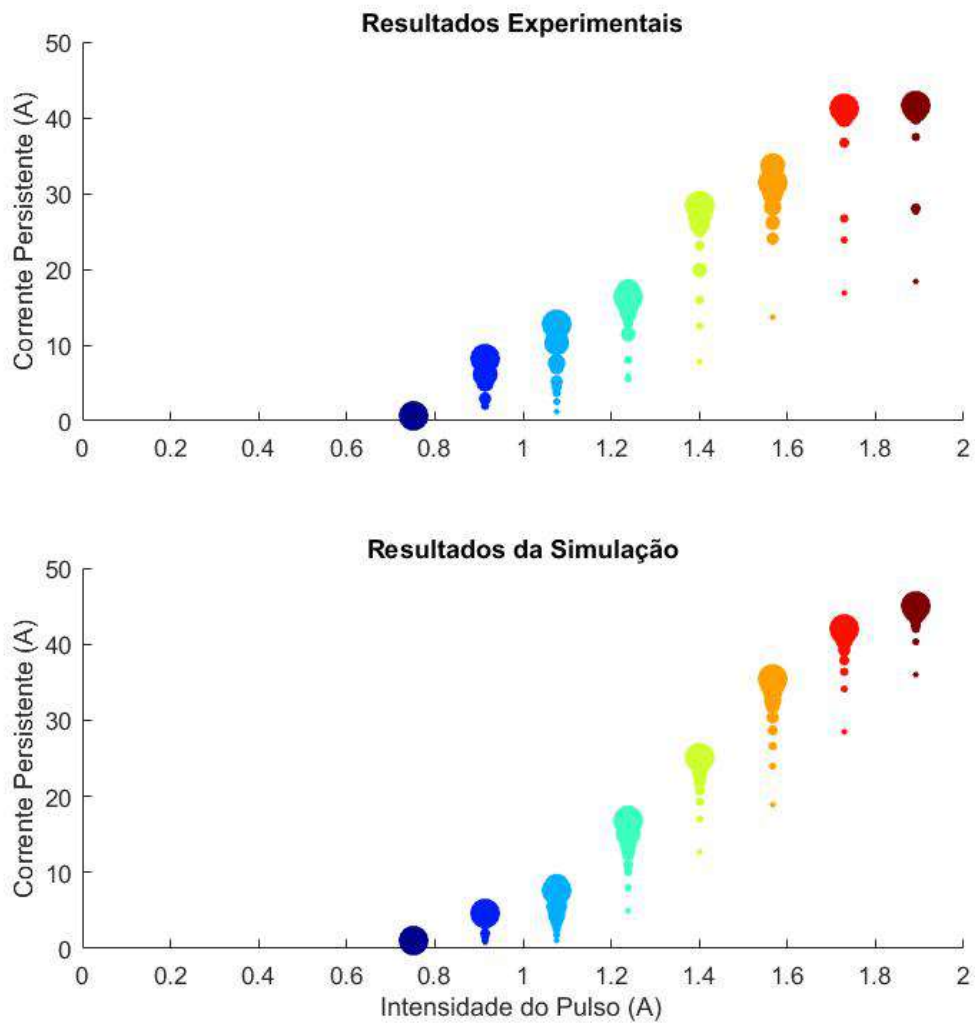


Figura B.3: Comparação entre simulação e dados experimentais: Corrente persistente e intensidade (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)

refere ao sistema completo de magnetização. A tendência da energia e da corrente persistente se mantém, mas seus valores não coincidem com os dados experimentais, exigindo uma melhoria nas simulações para levar em consideração as componentes harmônicas de alta frequência das correntes nos enrolamentos do transformador.

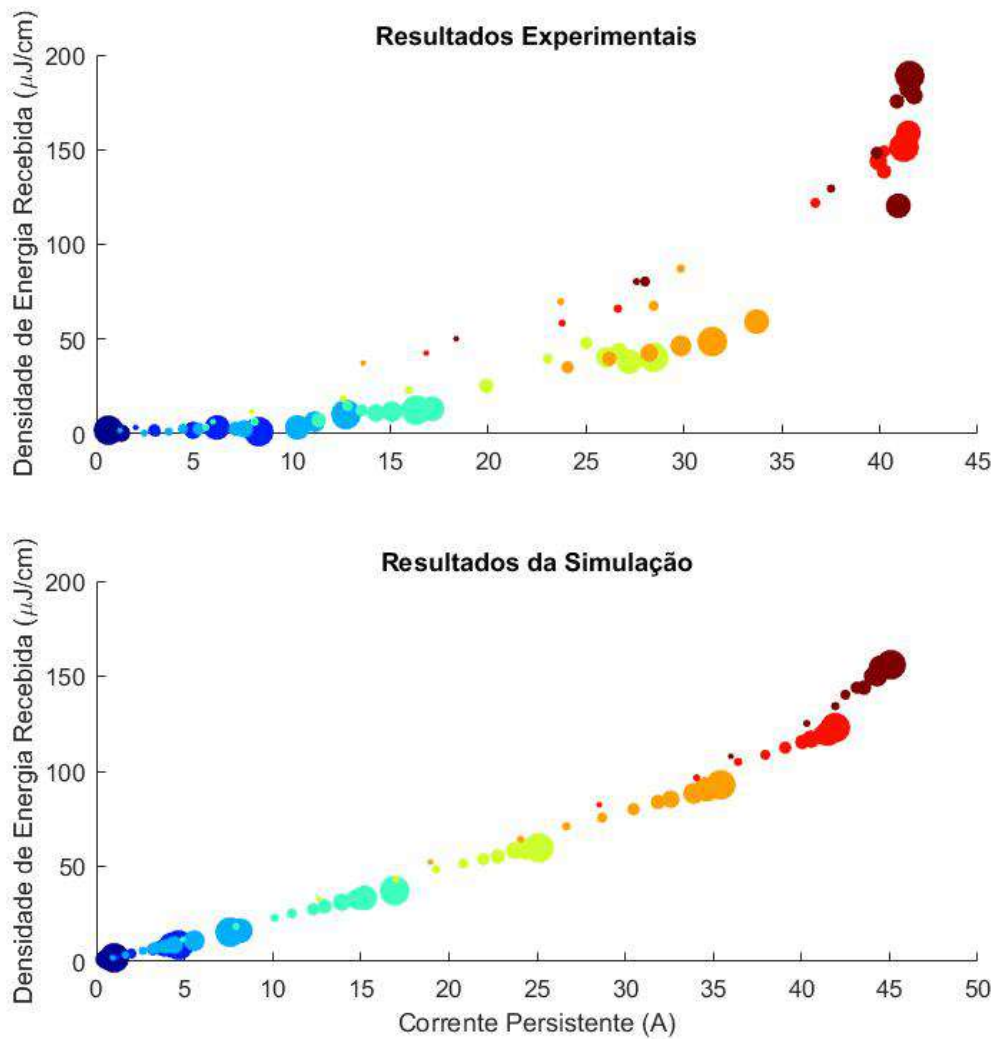


Figura B.4: Comparação entre simulação e dados experimentais: energia recebida e armazenada (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)

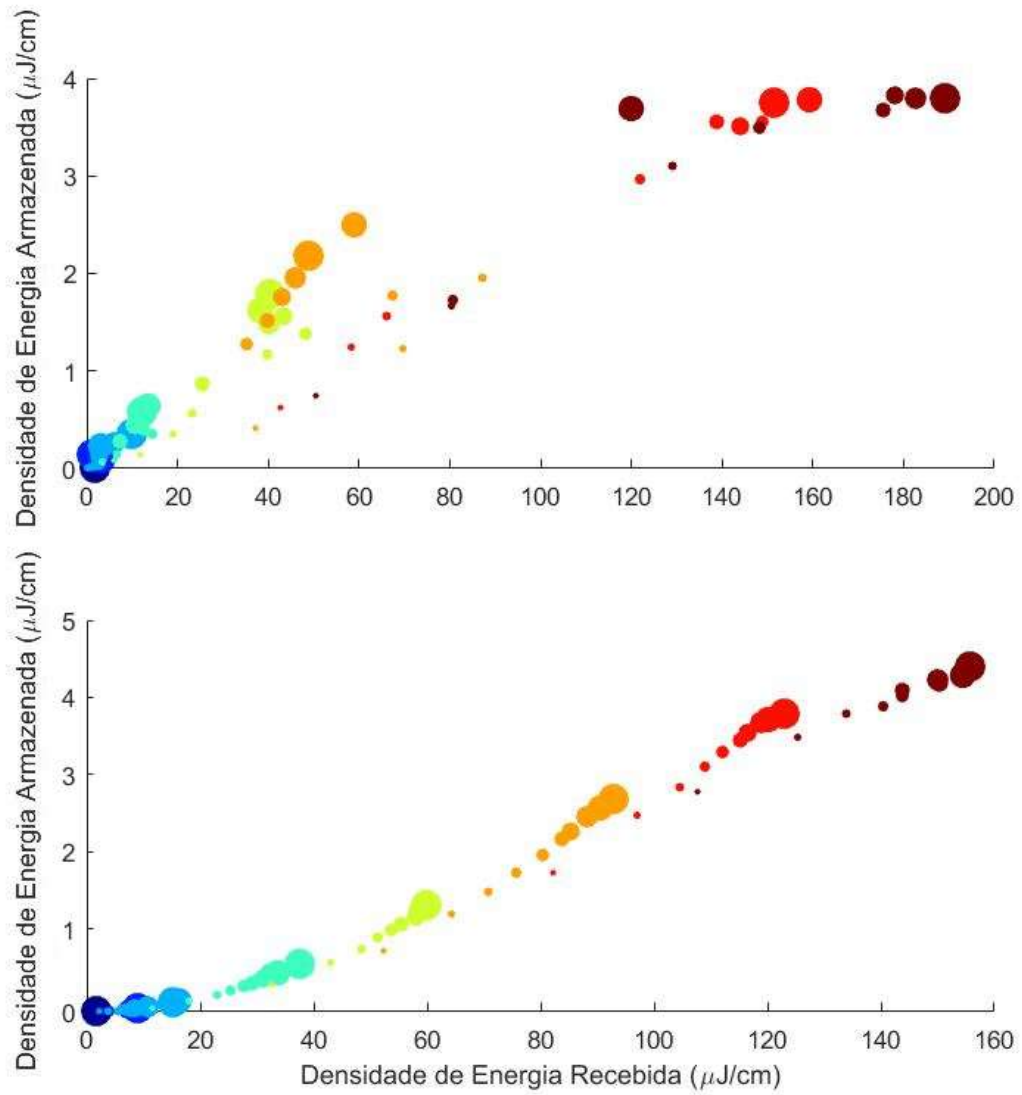


Figura B.5: Comparação entre simulação e dados experimentais: corrente persistente e energia (para os valores exatos de intensidade e duração, ver figura 4.10)