



**ANDRÉ MENDES RIBEIRO GONÇALVES**

Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA  
DE DESIGN E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS  
SMES (SUPERCONDUCTING MAGNETIC  
ENERGY STORAGE)**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa  
Setembro, 2024



**NOVA**

NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

# DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE DESIGN E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS SMES (SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANDRÉ MENDES RIBEIRO GONÇALVES**

Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Orientador:** João Miguel Murta Pina

*Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa*

## Júri

**Presidente:** José Manuel Matos Ribeiro da Fonseca  
*Professor Auxiliar, FCT-NOVA*

**Arguente:** Nuno Manuel Ortega Amaro  
*Professor Auxiliar, FCT-NOVA*

**Orientador:** João Miguel Murta Pina  
*Professor Auxiliar, FCT-NOVA*

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2024

## **Desenvolvimento de uma ferramenta de design e otimização de sistemas SMES (superconducting magnetic energy storage)**

**Dissertação de mestrado**

Copyright © André Mendes Ribeiro Gonçalves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar um profundo obrigado à minha família, namorada, amigos e a todos os que me apoiaram nesta etapa da minha vida.

## RESUMO

Os supercondutores são materiais que quando abaixo uma certa temperatura crítica, apresentam resistência elétrica desprezável em regime contínuo, permitindo que a corrente elétrica flua sem perdas. Esta característica faz com que seja possível o armazenamento de energia em sistemas SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). As SMES armazenam energia em bobinas supercondutoras e permitem a mitigação da distorção harmônica em sistemas integrando, por exemplo, conversores de eletrônica de potência. No âmbito das tecnologias para melhoria da qualidade de energia, o objetivo desta dissertação é assim desenvolver uma ferramenta que apoie o projeto de sistemas SMES, facilitando o seu design e fornecendo um primeiro dimensionamento da bobina supercondutora desses dispositivos. A ferramenta será composta por uma base de dados criada com recurso a software de elementos finitos, e uma interface gráfica que fará a ligação entre o utilizador e o programa. A ferramenta fornece os resultados de forma rápida e precisa, poupando tempo e recursos, estará disponível de forma livre, terá um manual de utilizador. Foi construído um protótipo de uma bobina supercondutora com fitas supercondutoras de segunda geração e comparada com os resultados obtidos pela ferramenta de modo a avaliar o seu funcionamento, tendo sido assim comprovada a sua eficácia e precisão.

**Palavras-chave:** SMES, Bobinas supercondutoras Materiais supercondutores, Distorção Harmónica



## ABSTRACT

Superconductors are materials that, when below a certain critical temperature, have negligible electrical resistance in a continuous regime, allowing electric current to flow without losses. This characteristic enables energy storage in SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) systems. SMES store energy in superconducting coils and help mitigate harmonic distortion in systems integrating, for example, power electronics converters. In the context of technologies for improving power quality, the aim of this dissertation is to develop a tool that supports the design of superconducting coils, facilitating the design of SMES and providing an initial sizing of the superconducting coil of these devices. The tool will consist of a database created using finite element software and a graphical interface that will serve as the link between the user and the program. The tool delivers results quickly and accurately, saving time and resources, will be freely available, and will include a user manual. A prototype of a superconducting coil using second-generation superconducting tapes was built and compared with the results obtained by the tool to evaluate its performance, thus proving its effectiveness and accuracy.

**Keywords:** SMES, Superconducting coils, Superconducting materials, Harmonic distortion,



# ÍNDICE

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Índice de Figuras</b>                              | <b>ix</b>   |
| <b>Índice de Tabelas</b>                              | <b>xii</b>  |
| <b>Siglas</b>   | <b>xiii</b> |
| <b>1 Introdução</b>                                   | <b>1</b>    |
| 1.1 Contextualização do problema . . . . .            | 2           |
| 1.2 Motivação do problema . . . . .                   | 2           |
| <b>2 Estado da arte</b>                               | <b>3</b>    |
| 2.1 Contextualização . . . . .                        | 3           |
| 2.1.1 História dos supercondutores . . . . .          | 3           |
| 2.1.2 Aplicações dos supercondutores . . . . .        | 4           |
| 2.1.3 Fitas supercondutoras . . . . .                 | 5           |
| 2.1.4 SMES e as suas aplicações . . . . .             | 7           |
| 2.2 Taxa de distorção harmónica . . . . .             | 8           |
| 2.2.1 Consequências da distorção harmónica . . . . .  | 10          |
| 2.2.2 Soluções existentes . . . . .                   | 10          |
| 2.3 Superconducting magnetic energy storage . . . . . | 12          |
| 2.3.1 Constituição . . . . .                          | 12          |
| 2.3.2 Funcionamento de uma SMES . . . . .             | 13          |
| 2.3.3 Topologias possíveis das bobinas . . . . .      | 15          |
| 2.3.4 Projetos já existentes . . . . .                | 17          |
| <b>3 Trabalho prévio</b>                              | <b>20</b>   |
| 3.1 Estudo de caso . . . . .                          | 20          |
| 3.2 Definição do sistema alvo . . . . .               | 23          |
| 3.3 Remoção da taxa harmónica de distorção . . . . .  | 26          |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>4</b>  | <b>Metodologia</b>                              | <b>28</b> |
| 4.1       | Dimensão e geometria dos enrolamentos . . . . . | 28        |
| 4.2       | Método dos elementos finitos . . . . .          | 30        |
| 4.2.1     | Vantagens . . . . .                             | 30        |
| 4.2.2     | Desvantagens . . . . .                          | 31        |
| 4.3       | Interface gráfica do programa (GUI) . . . . .   | 31        |
| <b>5</b>  | <b>Implementação</b>                            | <b>33</b> |
| 5.1       | Criação da base de dados . . . . .              | 33        |
| 5.2       | Desenvolvimento do Script Matlab . . . . .      | 38        |
| 5.3       | Implementação da interface gráfica . . . . .    | 38        |
| 5.3.1     | Composição da interface gráfica . . . . .       | 38        |
| 5.3.2     | Funcionamento da interface . . . . .            | 38        |
| <b>6</b>  | <b>Resultados e Discussão</b>                   | <b>44</b> |
| 6.1       | Comparação entre topologias . . . . .           | 44        |
| 6.2       | Protótipo . . . . .                             | 49        |
| 6.3       | Resultados . . . . .                            | 51        |
| 6.3.1     | Otimização pelo Comprimento . . . . .           | 51        |
| 6.3.2     | Otimização pela Indutância . . . . .            | 55        |
| <b>7</b>  | <b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>             | <b>60</b> |
| 7.1       | Conclusões . . . . .                            | 60        |
| 7.2       | Trabalho Futuro . . . . .                       | 61        |
|           | <b>Bibliografia</b>                             | <b>62</b> |
|           | <b>Anexos</b>                                   |           |
| <b>I</b>  | <b>Anexo 1 - Manual do utilizador</b>           | <b>65</b> |
| <b>II</b> | <b>Anexo 2 - Figuras diversas</b>               | <b>67</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Tipos I e II de supercondutores (Stroski, s.d.) . . . . .   | 4  |
| 2.2  | Aplicações dos supercondutores e as suas áreas (Yao e Ma, 2021) . . . . .   | 5  |
| 2.3  | Arquitetura de fita HTS de segunda geração (Selvamanickam, 2012) . . . . .  | 6  |
| 2.4  | Cabo feito com fita supercondutora de segunda geração (Selvamanickam, 2012)   | 6  |
| 2.5  | Fita supercondutora YBCO (CERN, s.d.) . . . . .   | 7  |
| 2.6  | sistema SMES 10 MVA/1s (Nagaya et al., 2012) . . . . .  | 7  |
| 2.7  | Decomposição de um sinal nas suas harmónicas (Cadence, s.d.) . . . . .  | 9  |
| 2.8  | Sinal com harmónicas (Braga, s.d.) . . . . .  | 9  |
| 2.9  | Comparação do tempo de resposta entre várias tecnologias (Tixador, 2013) .  | 11 |
| 2.10 | Sistema SMES (Magnetics, s.d.) . . . . .  | 12 |
| 2.11 | Constituição de um sistema SMES (Yuan, 2011) . . . . .  | 13 |
| 2.12 | Esquema de uma SMES com os terminais curto circuitados (Tixador, 2013) .  | 15 |
| 2.13 | Topologia toroidal (Mukherjee e Rao, 2019) . . . . .  | 16 |
| 2.14 | Topologia solenoide (Mukherjee e Rao, 2019) . . . . .   | 16 |
| 2.15 | Topologia de panqueca dupla, criada pelo <i>Kurchatov institute</i> (Krasnoperov<br>et al., 2020) . . . . .                           | 17 |
| 2.16 | Sistema SMES instalado numa fábrica de LEDs da <i>Chubu electric power company</i><br>(Rogalla e Kes, 2011) . . . . .                 | 18 |
| 2.17 | Mapa temporal do desenvolvimento de SMES no Japão (Nagaya et al., 2012)   | 19 |
| 2.18 | SMES de 30 MJ construída pela Bonneville Power Administration e pela admi-<br>nistração de Los Alamos (Rogalla e Kes, 2011) . . . . . | 19 |
| 3.1  | Sinal de estudo de caso no domínio da frequência . . . . .  | 20 |
| 3.2  | Sinal de estudo de caso no domínio do tempo . . . . .   | 21 |
| 3.3  | Sinal de estudo de caso no domínio do tempo com as três fases . . . . .   | 21 |
| 3.4  | Harmónica fundamental e terceira harmónica . . . . .  | 22 |
| 3.5  | Harmónica fundamental e quinta harmónica . . . . .  | 22 |
| 3.6  | Modelo filtro SMES . . . . .  | 23 |
| 3.7  | Fonte do modelo utilizado . . . . .   | 24 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.8  | Carga utilizada no modelo . . . . .   | 24 |
| 3.9  | Modelo da SMES simulado através do modelo . . . . .   | 25 |
| 3.10 | Corrente da linha sem a SMES . . . . .  | 26 |
| 3.11 | Evolução da Corrente e da Tensão da SMES . . . . .  | 26 |
| 3.12 | Corrente da linha com a SMES ligada em paralelo . . . . .   | 27 |
| 4.1  | Dimensões de uma bobina em panqueca, imagem retirada do documento Amaro, 2015 . . . . .                   | 28 |
| 4.2  | Dimensões de uma bobina em panqueca . . . . .   | 29 |
| 4.3  | Método dos elementos finitos, retirado de Okumoto et al., 2009 . . . . .                                  | 30 |
| 5.3  | Geometria da topologia de uma bobina e seu campo magnético a três dimensões                               | 33 |
| 5.1  | Geometria da topologia de uma bobina . . . . .  | 34 |
| 5.2  | Geometria da topologia de uma bobina detalhada . . . . .  | 34 |
| 5.4  | Disposição dos ficheiros obtidos . . . . .  | 36 |
| 5.5  | Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de uma bobina . . . . .             | 37 |
| 5.6  | Esquema do funcionamento e composição da interface gráfica . . . . .                                      | 39 |
| 5.7  | Página de rosto do programa . . . . .   | 40 |
| 5.8  | Página de escolha da funcionalidade pretendida e respetivas descrições . . . . .                          | 40 |
| 5.9  | Página de inserção dos dados de indutância ou comprimento da bobina pretendidos pelo utilizador . . . . . | 41 |
| 5.10 | Página de inserção dos ficheiros do utilizador . . . . .  | 41 |
| 5.11 | Página de visualização dos resultados referentes aos dados inseridos pelo utilizador . . . . .            | 42 |
| 5.12 | Página de escolha dos dados a visualizar . . . . .  | 42 |
| 5.13 | Página de visualização dos gráficos referentes aos dados da base de dados nativa . . . . .                | 43 |
| 6.1  | Desvio das topologias de 1 bobina e 2 bobinas . . . . .   | 45 |
| 6.2  | Desvio das topologias de 1 bobina e 2 bobinas (detalhe) . . . . .   | 45 |
| 6.3  | Desvio das topologias de 2 bobinas e 3 bobinas . . . . .  | 46 |
| 6.4  | Desvio das topologias de 2 bobinas e 3 bobinas (detalhe) . . . . .  | 46 |
| 6.5  | Desvio das topologias de 3 bobinas e 4 bobinas . . . . .  | 47 |
| 6.6  | Desvio das topologias de 3 bobinas e 4 bobinas (detalhe) . . . . .  | 47 |
| 6.7  | Desvio das topologias de 4 bobinas e 5 bobinas . . . . .  | 48 |
| 6.8  | Desvio das topologias de 4 bobinas e 5 bobinas (detalhe) . . . . .  | 48 |
| 6.9  | SMES desenvolvida . . . . .   | 50 |
| 6.10 | Indutância protótipo . . . . .  | 50 |
| 6.11 | Página de resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 1,2 m . . . . .              | 52 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 6.12 | Página de resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,6 m . . . . .        | 53 |
| 6.13 | Página de resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,2 m . . . . .        | 54 |
| 6.14 | Página de resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH e uma tolerância de 0,08 mH . . . . .  | 56 |
| 6.15 | Página de resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH e uma tolerância de 0,02 mH . . . . .  | 57 |
| 6.16 | Página de resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH e uma tolerância de 0,003 mH . . . . . | 58 |
| I.1  | Diagramas de como utilizar as funcionalidades 4 e 5 . . . . .                                       | 66 |
| II.1 | Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 2 bobinas . . . . .        | 67 |
| II.2 | Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 3 bobinas . . . . .        | 68 |
| II.3 | Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 4 bobinas . . . . .        | 68 |
| II.4 | Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 5 bobinas . . . . .        | 69 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 5.1 | Valores limite da base de dados do programa . . . . .  | 38 |
| 6.1 | Tabela dos resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 1,2 m . . . . .          | 52 |
| 6.2 | Tabela dos resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,6 m . . . . .          | 53 |
| 6.3 | Tabela dos resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,2 m . . . . .          | 54 |
| 6.4 | Tabela dos resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH m e uma tolerância de 0,08 mH . . . . .  | 55 |
| 6.5 | Tabela dos resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH m e uma tolerância de 0,02 mH . . . . .  | 56 |
| 6.6 | Tabela dos resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH m e uma tolerância de 0,003 mH . . . . . | 57 |

## SIGLAS

- BLCO** *Barium, lanthanum and copper oxide*, Óxido de Bário, Lantânio e Cobre (p. 4)
- BSCCO** *Bismuth strontium calcium copper oxide*, Óxido de bismuto, estrôncio, cálcio e cobre (p. 6)
- ERSE** Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (p. 2)
- REBCO** *Rare earth barium cooper oxide*, Óxido de cobre de terras raras e bário (p. 6)
- SMES** *Superconducting Magnetic Energy Storage* (pp. ix, x, 1–5, 7, 8, 11–15, 17–20, 23, 25–28, 32, 49, 50, 60)
- THD** *Total Harmonic Distortion* (pp. 10, 25, 27)
- YBCO** *Yttrium barium cooper oxide*, Óxido de cobre ítrio-bário (pp. 4, 6, 33, 49)

# INTRODUÇÃO

Os supercondutores têm o potencial para desempenhar um papel crucial no avanço das tecnologias devido às suas propriedades únicas, como a capacidade de conduzir corrente elétrica sem perdas quando submetidos a temperaturas muito baixas. À medida que a procura por energia elétrica cresce, a necessidade de soluções que minimizem perdas e melhorem a qualidade da energia torna-se cada vez mais importante. Os supercondutores surgem como uma solução promissora para este problema, permitindo a melhoria da qualidade de energia em sistemas de eletrónica de potência através das [SMES](#) (Superconducting Magnetic Energy Storage). Estas utilizam bobinas supercondutoras para armazenar energia e através da rápida absorção ou libertação de energia conseguem mitigar a distorção harmónica de um circuito.

O tema estudado insere-se numa linha de trabalhos que visam desenvolver (dimensionando, projetando, simulando e implementando) um sistema [SMES](#). Pretende-se fazer uma ferramenta que facilite o design deste tipo de sistemas, o objetivo será realizar e simular esta ferramenta através de uma interface gráfica criada em MATLAB e de uma base de dados criada em COMSOL Multiphysics. A base de dados será composta por vários ficheiros de texto que serão posteriormente carregados no programa desenvolvido. A interface gráfica fará a ligação entre o utilizador e a base de dados desenvolvida, desempenhando assim um papel fundamental nesta dissertação. Será construída uma bobina supercondutora com fitas supercondutoras de segunda geração e comparada com os resultados obtidos pela ferramenta de modo a avaliar o seu funcionamento.

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, sendo estes: a introdução; o estado da arte, onde se apresenta a pesquisa realizada e se aprofunda nas consequências da taxa de distorção harmónica e no funcionamento de uma [SMES](#); o trabalho prévio, realizado de forma a entender melhor o funcionamento das [SMES](#), assim como a familiarização com as consequências da distorção harmónica; a metodologia, onde se definem os métodos e

ferramentas utilizados na criação da interface gráfica e da base de dados; a implementação, onde estão descritos os passos seguidos para implementar todos os componentes da ferramenta desenvolvida. Por fim, há o capítulo dos resultados e discussão, onde são apresentados os resultados obtidos e a sua análise crítica, e a conclusão, que reúne uma reflexão sobre o trabalho desenvolvido, propondo possíveis caminhos para melhorar a ferramenta criada.

### 1.1 Contextualização do problema

Como estará exposto no documento, uma das aplicações de sistemas [SMES](#) é na atenuação da taxa de distorção harmónica, problema que traz consequências adversas para os equipamentos que afeta. Como tal, é de grande utilidade que a projeção de sistemas [SMES](#) para os colmatar seja eficiente em termos de tempo e quantidade de material utilizado. Com esta ferramenta, pretende-se aproximar utilizadores menos familiarizados com estes sistemas, através de uma ferramenta que faça a projeção da bobina supercondutora, componente constituinte dos sistema [SMES](#), obtendo assim o resultado desejado de forma rápida e eficiente. Pode-se dizer então que o problema em questão que se pretende resolver é a taxa de distorção harmónica em sistemas de eletrónica de potência.

### 1.2 Motivação do problema

Atenuar a distorção harmónica, mantendo-a dentro dos limites recomendados é importante para o bom funcionamento de qualquer equipamento e material, pois a presença de harmónicas sobreaquece e degrada o equipamento, levando ao aumento da sua resistência interna, na secção [2.2.1](#) está uma descrição detalhada das consequências adversas deste problema. Os limites indicados para a taxa de distorção harmónica pela [ERSE](#) são os indicados no relatório da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos no documento [ERSE, 2023](#). É também referido que o valor em percentagem da distorção harmónica total não deverá ser superior a 4%.

Estabelece-se assim o objetivo de criar uma ferramenta que faça a projeção de bobinas supercondutoras tendo em conta a indutância da bobina pretendida e a quantidade de fita supercondutora disponível e que tenham a capacidade de integrar um sistema [SMES](#). Sistema esse que deve ser capaz de atenuar a distorção harmónica em sistemas de eletrónica de potência.

## ESTADO DA ARTE

Nesta secção será abordado o estado de arte da tecnologia, sendo feita uma revisão da história dos supercondutores e a exposição de alguns projetos em que se usam as [SMES](#).

### 2.1 Contextualização

#### 2.1.1 História dos supercondutores

O fenómeno da supercondutividade foi descoberto pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes em 1911. Ele verificou que quando à mesma temperatura que a do hélio líquido, a resistência do mercúrio era nula. Os primeiros metais supercondutores descobertos foram o alumínio, o índio, o zinco e o estanho (Huebener, [2021](#)).

Mais tarde, em 1933 foi descoberto que o fluxo magnético era expulso do interior de materiais no estado supercondutor quando estes eram arrefecidos até à sua temperatura crítica. A este diamagnetismo perfeito deu-se o nome de efeito Meissner, cientista alemão que juntamente com R. Ochsenfeld realizou esta descoberta (Huebener, [2021](#)). Ficou assim demonstrado que os supercondutores não eram apenas condutores de corrente elétrica com resistividade nula. Ficou estabelecido que a transição do estado normal para o estado supercondutor era uma transição reversível do ponto de vista termodinâmico e magnético já que o material possuía uma temperatura crítica e um campo magnético crítico (Huebener, [2021](#)).

Anos mais tarde, foram desenvolvidos supercondutores que permitiam a penetração de fluxo magnético no seu interior sem que se perdesse a supercondutividade, entrando num novo estado chamado estado misto (Pina, [2010](#)). A comparação entre os dois tipos de supercondutores pode ser visualizado na figura [2.1](#). Isto faz com que os supercondutores do tipo I tenham a sua supercondutividade menos robusta quanto à interferência de campo magnético em relação aos do tipo II, o que faz deles menos escolhidos e utilizados em aplicações em contexto não académico.

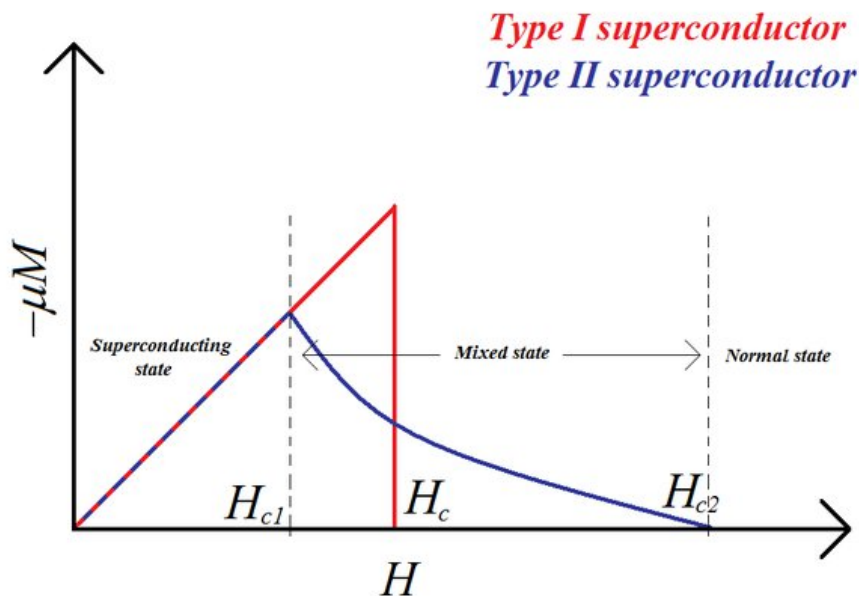


Figura 2.1: Tipos I e II de supercondutores (Stroski, s.d.).

Em março de 1987 Paul Ching-Wu Chu desenvolveu um supercondutor com uma temperatura crítica de 92 K, denominado de **YBCO** e foi importante porque possuía uma temperatura crítica superior à do ponto de ebulição do azoto, de 77 K (Huebener, 2021). Esta descoberta apenas foi possível devido ao trabalho realizado por J. Georg Bednorz e K. Alex Mueller em 1986, pois desenvolveram um material que tinha uma temperatura crítica de cerca de 35 K, denominado **BLCO** (Pina, 2010).

O desenvolvimento de supercondutores de alta temperatura foi um grande passo na história da supercondutividade, pois permitiu um aumento do interesse comercial já que os custos com a refrigeração do material seriam bastante inferiores quando comparados com os supercondutores de baixa temperatura.

### 2.1.2 Aplicações dos supercondutores

Os supercondutores possuem diversas aplicações, entre as quais se incluem a transmissão de corrente elétrica, da distribuição, da melhoria da qualidade energética através de sistemas (**SMES**) e proteção contra campos magnéticos (Hull, 2003; Busmann-Holder e Keller, 2020). Outras aplicações encontram-se relatadas em baixo e na figura 2.2.

#### Equipamento Médico:

- Ressonância magnética (RM);

**Armazenamento de energia:**

- Volantes inerciais com chumaceiras supercondutoras;

**Transmissão e distribuição de energia elétrica:**

- Motores supercondutores;
- Levitação magnética;
- Cabos supercondutores;
- Limitadores de corrente supercondutores;
- Transformadores supercondutores;

**Melhoria da qualidade energética:**

- Feito através de bobinas supercondutoras (SMES);

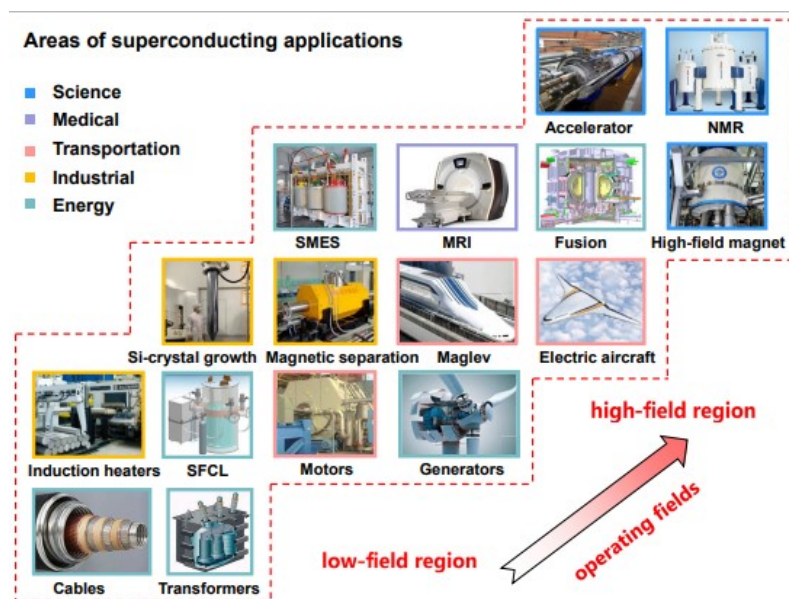


Figura 2.2: Aplicações dos supercondutores e as suas áreas (Yao e Ma, 2021)

**2.1.3 Fitas supercondutoras**

Sendo uma bobina um enrolamento de fio, as bobinas supercondutoras constituintes dos sistemas SMES são bobinas de fio supercondutor, feito de fita supercondutora (Selvamanickam, 2012). Na figura 2.3 encontra-se um exemplo de arquitetura de fita de segunda geração, sendo estas mais utilizadas do que as de primeira geração devido às suas características, como campo magnético crítico mais elevado. A fita presente na imagem é composta por diversas camadas, tais como a camada de material supercondutor e a camada de material condutor como o cobre.

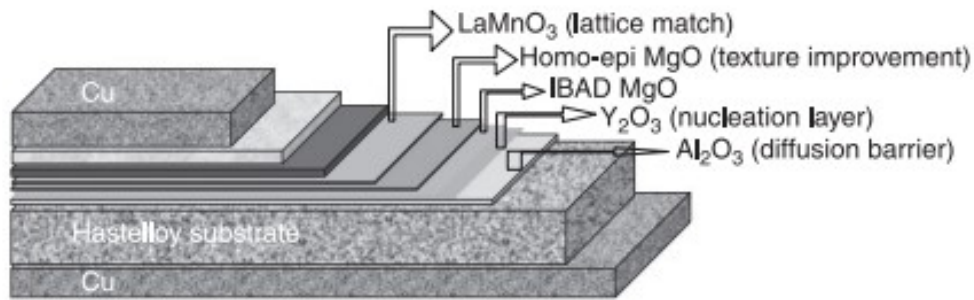


Figura 2.3: Arquitetura de fita HTS de segunda geração (Selvamanickam, 2012)

Após a descoberta do fenómeno da supercondutividade, a geração de um campo magnético era um dos objetivos que se previa alcançar. Inicialmente a tecnologia existente não permitia alcançar este objetivo pois os supercondutores de tipo I possuem um campo magnético crítico demasiado baixo. Foi alcançado com a descoberta dos supercondutores de tipo II, que são compostos por várias camadas depositadas num substrato flexível supercondutor (Uglietti, 2019). Esta tecnologia tem tido avanços muito rápidos na sua evolução apesar do seu custo elevado. Apesar disso a tecnologia encontra-se em diversas aplicações, tais como cabos de transporte de energia, como se pode ver pela figura 2.4. Este cabo foi instalado na rede elétrica da rede nacional de Nova Iorque, nos Estados Unidos da América ligando duas subestações (Selvamanickam, 2012).

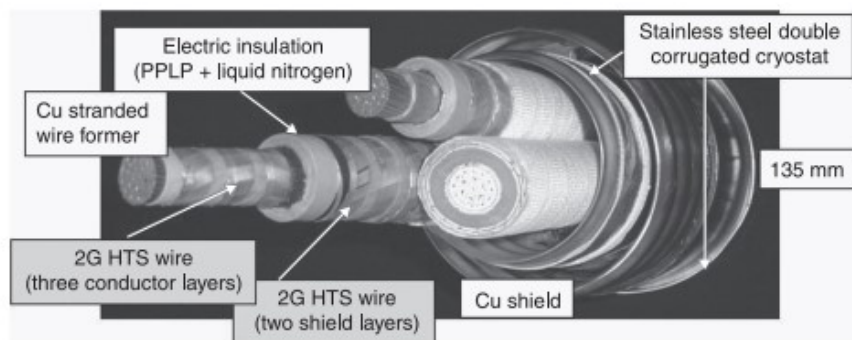


Figura 2.4: Cabo feito com fita supercondutora de segunda geração (Selvamanickam, 2012)

Existem duas gerações de fitas supercondutoras, a primeira geração cujas fitas eram compostas por **BSCCO** e a segunda geração, mais recente, cujas fitas são compostas por **REBCO**, que é composto por uma terra rara, bário, cobre e oxigénio. Um dos casos particulares de **REBCO** mais utilizado é o **YBCO**, em que a terra rara que o compõe é ítrio.

Na criação do enrolamento a ser projetado neste trabalho (ver secção 6.2) será usada fita supercondutora baseada em **REBCO** (ver figura 2.5).

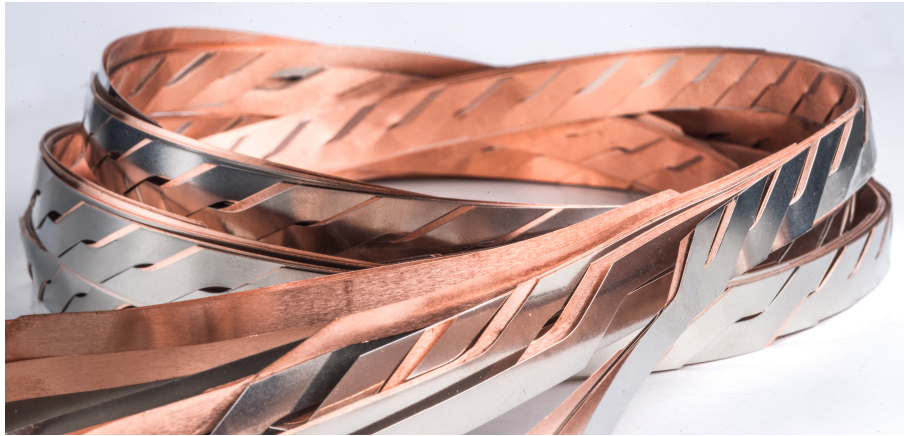


Figura 2.5: Fita supercondutora YBCO (CERN, *s.d.*)

#### 2.1.4 SMES e as suas aplicações

De todas as aplicações existentes dos supercondutores, aquela que irá ser focada em pormenor será a **SMES** (Superconducting magnetic energy storage), pois é nesta aplicação que o meu trabalho se baseará. A figura 2.6 tem presente um sistema **SMES** de 10 MVA criado para controlar cavas de tensão numa fábrica japonesa (Nagaya et al., 2012).



Figura 2.6: sistema **SMES** 10 MVA/1s (Nagaya et al., 2012)

Os sistemas **SMES** têm utilidade no fornecimento de energia por breves segundos numa rede elétrica durante perturbações no fornecimento de energia. Têm capacidade para ter uma velocidade de resposta rápida, capazes de empregar uma alta densidade de potência, como é o caso do sistema da figura 2.6, que é capaz de aplicar 10 MVA em 1 segundo. Efetuam um controlo do fluxo de energia com precisão.

Por essas razões, sistemas deste tipo têm possíveis aplicações em:

- **Micro redes:**

Correção de problemas inerentes à utilização de micro redes, tais como variações de carga e interrupções inesperadas da rede (Papageorgiou et al., 2023 ; Rogalla e Kes, 2011).

- **Melhoria da qualidade de energia:**

As redes elétricas podem sofrer grandes problemas de qualidade de energia, tais como elevada distorção harmónica, variações de frequência e de tensão. Considera-se que um sistema elétrico tem boa qualidade de energia quando tem uma tensão sinusoidal constante com frequência nominal e sem ruído de alta frequência (harmónicas). No caso da produção de energia eólica, a variação de tensão é produzida devido à natureza imprevisível da velocidade do vento e a interrupções durante a alta velocidade do vento (Mukherjee e Rao, 2019). As SMES podem ser utilizadas para restringir dentro dos limites especificados flutuações de energia e assim melhorar a qualidade da energia da rede (Papageorgiou et al., 2023;Rogalla e Kes, 2011).

- **Controlo da frequência:**

Disparidades entre a carga e geração de energia provocadas por variações repentinas da carga são um problema de controlo de frequência. Nestes casos a SMES pode ser utilizada para melhorar o perfil de carga descarregando durante a sobrecarga e carregando em subcarga, respetivamente. No caso de geração eólica, os problemas de controlo de frequência são mais frequentes devido à baixa inércia do sistema (Mukherjee e Rao, 2019).

Portanto, absorvendo ou libertando energia, as SMES podem reduzir as flutuações intermitentes ocorridas na produção de energia, assim como tornar o sistema mais robusto e resistente a falhas de geração de energia.

## 2.2 Taxa de distorção harmónica

A análise de Fourier estabelece que qualquer sinal pode ser representado como uma soma de sinusoides com diferentes frequências e fases. Estabelece-se que uma harmónica é um sinal cuja sua frequência é um múltiplo da frequência fundamental do sinal original, como se pode verificar pela decomposição do sinal da figura 2.7 (Abbas e Saqib, 2007). Tendo em conta que a frequência fundamental do sinal em estudo será de 50 Hz, prevê-se que este sinal terá harmónicas em 150 e 250 Hz pelo menos, que serão a 3ª e a 5ª harmónicas.

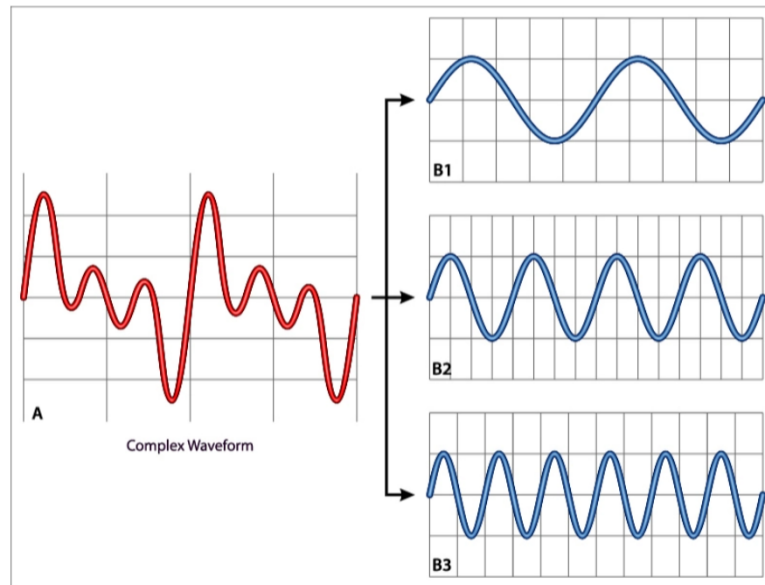


Figura 2.7: Decomposição de um sinal nas suas harmônicas (Cadence, s.d.)

Sistemas elétricos podem ser classificados como lineares ou não lineares dependendo se a corrente consumida pela carga tenha uma forma de onda sinusoidal sem a presença de harmônicas ou se a forma de onda da corrente não seja uma senoide e possua harmônicas (Abbas e Saqib, 2007). Na figura 2.8 está representado um sinal decomposto em frequência fundamental e respectivas harmônicas.

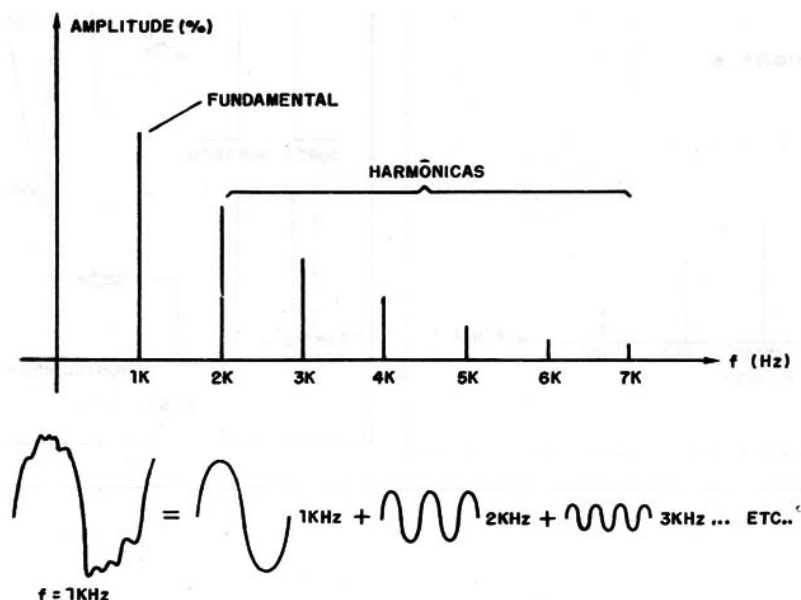


Figura 2.8: Sinal com harmônicas (Braga, s.d.)

A crescente tendência para o aumento do consumo e utilização de circuitos eletrônicos feitos de materiais semicondutores que controlam a passagem de corrente elétrica, de

circuitos com fontes de alimentação sem transformador, entre outros, tem agravado o problema da não-linearidade. Isto pode representar um problema de qualidade de energia.

### 2.2.1 Consequências da distorção harmónica

Se o conteúdo harmónico estiver acima dos limites especificados, os seus efeitos adversos podem criar diversos problemas, como os apresentados a seguir (Abbas e Saqib, 2007).

#### Efeitos da Taxa de distorção harmónica

- Sobreaquecimento de equipamentos;
- Diminuição do rendimento de máquinas elétricas, assim como da geração e transmissão e utilização de energia elétrica;
- Possibilidade de ressonância elétrica;
- Redução do tempo de vida útil das instalações elétricas pois existe um maior envelhecimento da isolação dos seus componentes;

Para caracterizar e avaliar o conteúdo harmónico o índice mais utilizado é a distorção harmónica total (THD). A Distorção Harmónica Total é caracterizada pela geração de componentes espectrais indesejadas relacionadas com a frequência do sinal desejado, sendo definida como a razão entre a quantidade de energia de todos os componentes harmónicos e a energia da componente da frequência fundamental, é portanto a medida do desvio entre a forma de onda do sinal e uma onda sinusoidal perfeita. Matematicamente existem duas maneiras de a calcular, uma que mede o conteúdo harmónico de uma forma de onda com a componente fundamental e outra com o seu valor eficaz, sendo a 2.1 mais precisa e por isso mais indicada (Abbas e Saqib, 2007).

As suas expressões estão presentes nas equações 2.1 e 2.2, respetivamente.

$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.1)$$

$$THD_R = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n I_n^2}{\sum_{n=1}^n I_n^2}} \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Soluções existentes

A distorção harmónica não é um problema recente e por isso já existem várias soluções para a colmatar. Nesta secção serão apresentadas as soluções existentes e a devida

comparação com a [SMES](#). As tecnologias concorrentes com os sistemas [SMES](#) são supercondensadores e bancos de condensadores, filtros de potência, volantes de inércia e geração hídrica na vertente de armazenamento de energia.

#### Pontos a favor da tecnologia SMES:

- Elevada densidade de potência;
- Alta velocidade de resposta;
- Elevada eficiência no carregamento e na descarga de energia;

#### Pontos contra a tecnologia SMES:

- Investimento inicial elevado;
- Necessidade de ter um sistema de criogenia;

Este sistema tem como aspetos positivos uma elevada densidade de potência, velocidade de resposta muito alta e a sua elevada eficiência no armazenamento de energia, pois a energia armazenada pode ser mantida em armazenamento por longos períodos de tempo sem perda significativa devido às capacidades supercondutoras do material (Yuan, 2011). Alguns aspetos negativos são o investimento inicial elevado devido ao supercondutor e a necessidade de ter um sistema de criogenia de modo a manter o material em estado supercondutor, o que encarece a utilização da tecnologia (Yuan, 2011). A figura 2.9 apresenta uma comparação entre o tempo de resposta de várias tecnologias.

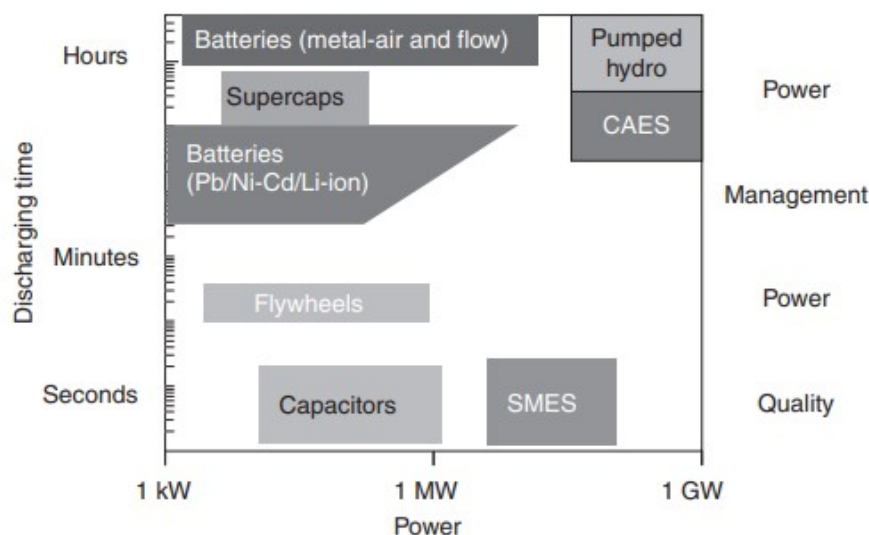


Figura 2.9: Comparação do tempo de resposta entre várias tecnologias (Tixador, 2013)

Os sistemas [SMES](#) têm uma baixa capacidade de armazenamento energético, mas em contrapartida possuem uma velocidade de resposta muito elevada e uma densidade de

potência também muito elevada, como se pode ver na figura 2.9, o que faz com que seja uma boa solução para a redução da taxa de distorção harmónica. Os supercondensadores também seriam uma boa solução para este problema e seriam por isso o maior competidor da SMES nesta aplicação. Um aspeto positivo da SMES em relação aos supercondensadores é a baixa degradação do material e do equipamento.

## 2.3 Superconducting magnetic energy storage

A SMES é um conjunto de enrolamentos feitos de um material supercondutor, armazena energia quando uma corrente elétrica a atravessa e um campo magnético é criado em seu redor. A energia armazenada no campo magnético pode ser devolvida ao circuito descarregando o enrolamento quando for pretendido. Sendo o enrolamento feito de um material supercondutor, quando está numa temperatura inferior à sua temperatura crítica possui resistência nula, ou seja, se a bobina estiver em curto-circuito a corrente que nela circula não se dissipará. Na figura 2.10 está presente um projeto de SMES feito pela *American Magnetics*.

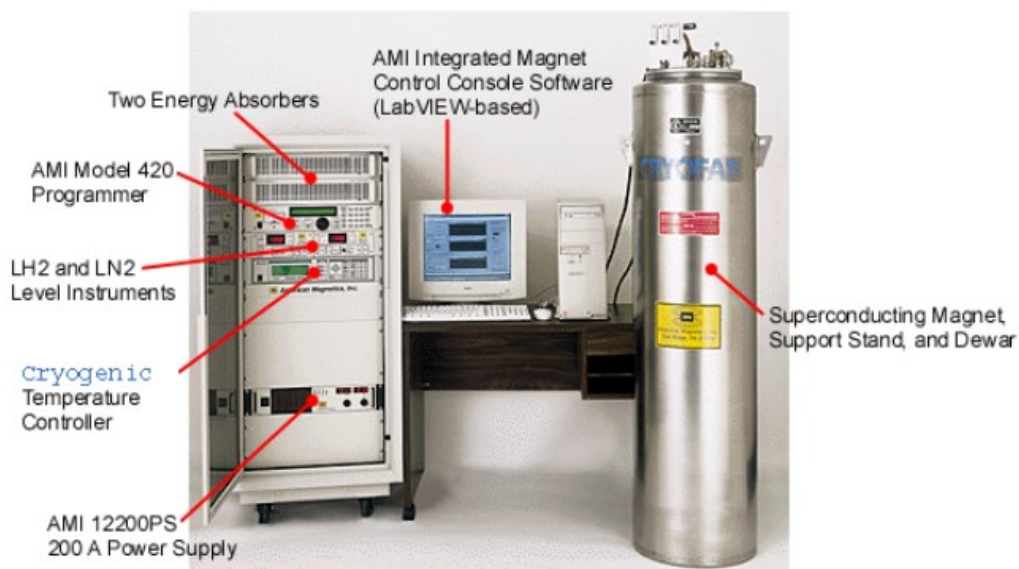


Figura 2.10: Sistema SMES (Magnetics, s.d.)

### 2.3.1 Constituição

Um sistema SMES é tipicamente constituído por um enrolamento de material supercondutor, um sistema de criogenia, um sistema de condicionamento de potência de modo a realizar a interface entre a carga desejada e o enrolamento supercondutor e por fim, por um sistema de controlo (Tixador, 2013).

- **Sistema de criogenia**, mantém o enrolamento a uma temperatura abaixo da temperatura crítica de modo a manter o material em regime supercondutor.

- **Sistema de condicionamento de potência**, realiza a interface entre a carga desejada e o enrolamento supercondutor, convertendo a tensão da bobina à tensão do circuito e vice-versa.
- **Sistema de controlo**, efetua a ligação e gestão das trocas de energia entre a SMES e a rede/carga. Permite fazer a monitorização e controlo do sistema de criogenia (Pina, 2010).

Na figura 2.11 pode ser visto um sistema SMES com os seus componentes.

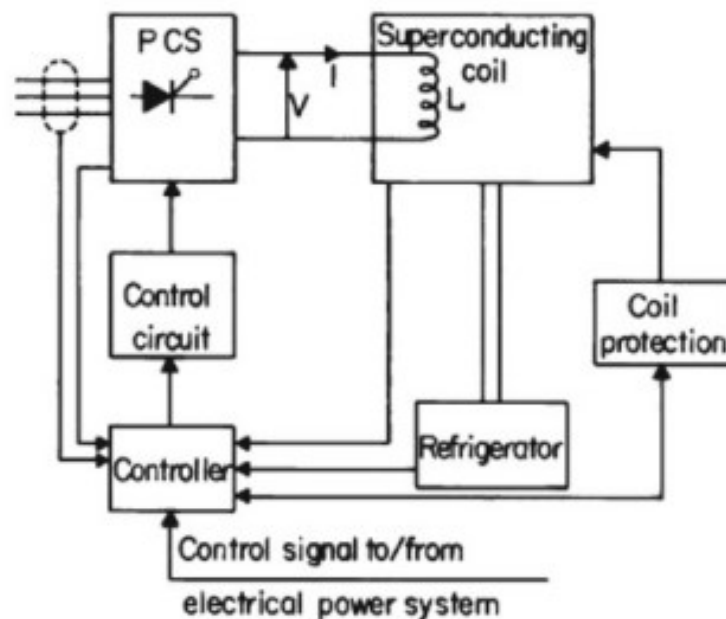


Figura 2.11: Constituição de um sistema SMES (Yuan, 2011)

### 2.3.2 Funcionamento de uma SMES

Todos os condutores de corrente elétrica são, na prática indutores, mas só se considera esse efeito significativo em bobinas. Uma bobina, seja supercondutora ou não, funciona da seguinte forma: uma corrente elétrica flui através de um condutor e é gerado um campo magnético, desta forma a bobina armazena energia na forma de um campo magnético (Alexander e no Sadiku, 2000).

A tensão nos seus terminais é a seguinte:

$$U(t) = L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

O valor da indutância depende dos fatores geométricos do condutor e por isso existem várias fórmulas para a calcular, dependendo da configuração do circuito e da sua geometria.

Segundo Haus e Melcher, 1989 e Alexander e no Sadiku, 2000 a indutância de uma bobina

é dada pela seguinte fórmula:

$$L(t) = \frac{N\Phi}{I} \quad (2.4)$$

Sendo:

- $N$ , o número de espiras.
- $\Phi$ , fluxo magnético.
- $I$ , a corrente elétrica.

Quando o sistema **SMES** é composto por duas ou mais bobinas, elas passam a possuir uma indutância mútua. Isto ocorre pois a segunda bobina é parcialmente afetada pelo campo magnético da primeira e vice-versa, o fluxo magnético criado por uma bobina liga-se á outra bobina, induzindo uma tensão na última (Alexander e no Sadiku, 2000), tensão esta que é dada pela seguinte expressão:

$$U_2(t) = M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (2.5)$$

Sendo que:

$$M_{21}(t) = N_2 \frac{d\Phi_{12}}{di_1} \quad (2.6)$$

$$M_{12}(t) = N_1 \frac{d\Phi_{21}}{di_2} \quad (2.7)$$

$$M_{12}(t) = M_{21}(t) = M(t) \quad (2.8)$$

Sendo por isso a indutância de cada bobina dada pela sua própria indutância mais a indutância mutua e a indutância total numa configuração de 2 bobinas dada por:

$$L_{total(t)} = L_1(t) + L_2(t) + 2M(t) \quad (2.9)$$

Este efeito é afetado por desalinhamentos entre condutores e pela distância entre eles (Babic e Akyel, 2008). A energia magnética armazenada na bobina ( $W_{mag}$ ) obtém-se da seguinte expressão:

$$W_{mag} = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.10)$$

Sendo  $L$  a indutância total e  $I$  a sua corrente.

Quando o curto-circuito é aberto a energia flui para uma carga com recurso ao sistema de condicionamento de energia, PCS (ver figura 2.11), diminuindo assim energia armazenada parcialmente ou na sua totalidade. Para carregar a bobina aplica-se uma tensão positiva enquanto que a descarga é feita através de uma tensão negativa, ver fórmula 2.3.

As **SMES** absorvem corrente e armazenam essa energia na forma de campo magnético. Para armazenar a energia absorvida, o enrolamento tem de ter os seus terminais em curto-circuito tal como está representado na figura 2.12.

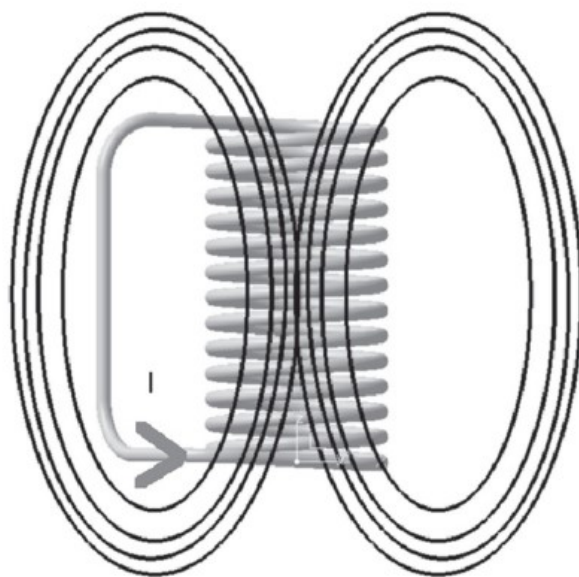


Figura 2.12: Esquema de uma SMES com os terminais curto circuitados (Tixador, 2013)

Nas bobinas convencionais o enrolamento que as constitui não está em modo supercondutor por isso se fosse feito um curto circuito aos seus terminais a corrente seria dissipada devido ao efeito de Joule. No caso de uma SMES, o enrolamento é composto por um material no estado supercondutor, o que faz com que a corrente contínua permaneça constante ao longo do tempo pois os supercondutores têm uma resistência quase nula à passagem da corrente elétrica contínua. Foi determinado que a corrente tinha uma constante de decaimento de  $10^5$  anos num material supercondutor, ao contrário de um enrolamento de cobre em que a corrente teria uma constante de decaimento de 0,1 ms Tixador, 2013.

### 2.3.3 Topologias possíveis das bobinas

Os enrolamentos da SMES agrupam-se em panquecas que estão ligadas entre si por contactos metálicos de baixa resistência. A forma de agrupar estas panquecas tem impactos significativos na quantidade de material supercondutor necessário utilizar, no fluxo de dispersão criado pela SMES e na energia armazenada. As duas topologias mais comuns são a solenoide (figura 2.14) e a toroidal (figura 2.13).

- Na topologia solenoide a bobina tem uma forma cilíndrica, com elevada dispersão de campo magnético, uma tensão mecânica baixa e armazena mais energia que a toroidal (Tixador et al., s.d.).
- Na topologia toroidal a bobina forma um anel, tem uma baixa dispersão de campo magnético, o que faz com que o campo criado pela própria bobina se mantenha no seu interior, requerendo menos fita supercondutora e ocupa menos espaço (Tixador et al., s.d.).

Neste projeto optou-se por uma topologia denominada por *flat coil* ou panqueca, sendo portanto considerado um solenoide de panquecas. Esta foi a topologia escolhida devido á sua facilidade de fabrico, na figura 2.15 está a representação de uma bobina composta por duas *flat coils* empilhadas.

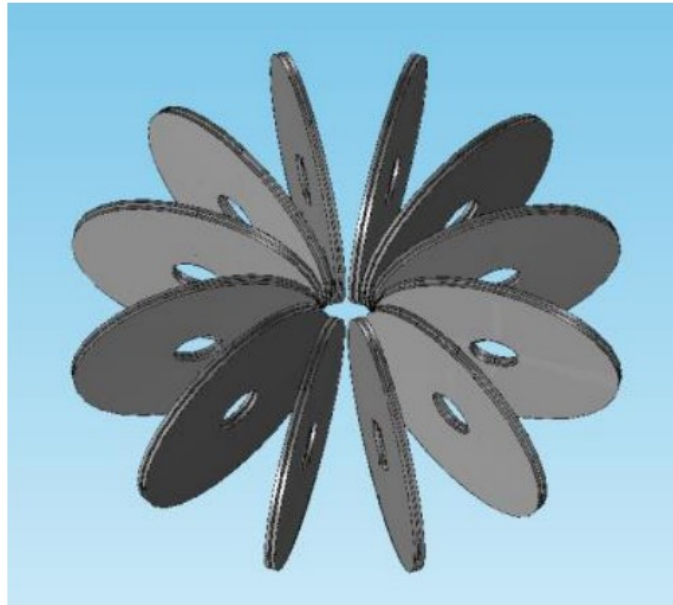


Figura 2.13: Topologia toroidal (Mukherjee e Rao, 2019)

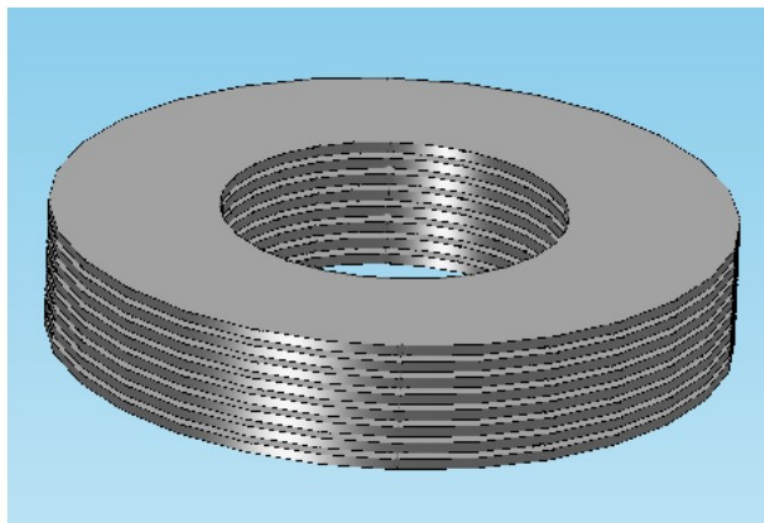


Figura 2.14: Topologia solenoide (Mukherjee e Rao, 2019)

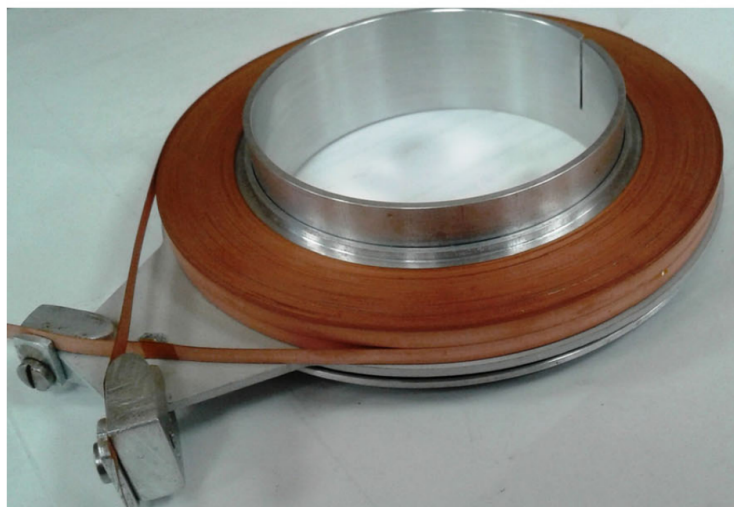


Figura 2.15: Topologia de panqueca dupla, criada pelo *Kurchatov institute* (Krasnoperov et al., 2020)

### 2.3.4 Projetos já existentes

Os países que mais impulsionam a investigação e utilização das **SMES** são o Japão e os Estados Unidos da América, apesar de cada vez mais serem desenvolvidos projetos de **SMES** noutros países, como a África do Sul, a França e a Polónia.

Embora tenha possíveis aplicações muito específicas, existem bastantes projetos de **SMES** em funcionamento. Alguns deles são apresentados a seguir.

#### Projetos de SMES no Japão:

1. A **SMES** foi usada e estudada para colmatar quedas de tensão instantâneas para proteger fábricas e outras indústrias em que eram necessárias potências de saída muito elevadas (Nagaya et al., 2012).
2. De 2004 a 2008 foi desenvolvido uma **SMES** de 20 MVA para corrigir flutuações de potência numa refinaria de cobre, este objetivo foi atingido com sucesso (Rogalla e Kes, 2011).
3. Em 2003 a *Chubu electric power company* e a *Toshiba* desenvolveram em conjunto uma **SMES** de 10MVA (ver figura 2.16) para compensar quedas de tensão na rede (Rogalla e Kes, 2011).

No Japão, em Kameyama, existiram três gerações de sistemas **SMES** em funcionamento, como se pode verificar pela figura 2.17 (Nagaya et al., 2012).

#### Projetos de SMES nos Estados Unidos da América:

Uma das maiores empresas fabricantes de **SMES** é a *American Superconductor* ([http://www.americanmagnetics.com/system\\_apps.php#Superconducting%20Magnetic%20Energy%20Storage%20\(SMES\)%20Systems](http://www.americanmagnetics.com/system_apps.php#Superconducting%20Magnetic%20Energy%20Storage%20(SMES)%20Systems)).

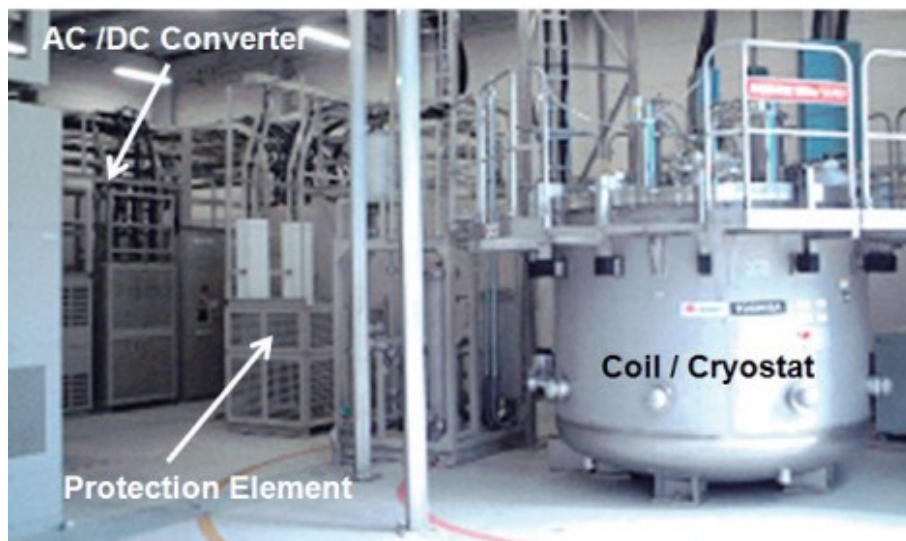


Figura 2.16: Sistema SMES instalado numa fábrica de LEDs da *Chubu electric power company* (Rogalla e Kes, 2011)

1. Um dos projetos pioneiros a ser construído foi o da SMES de 30 MJ construída pela *Bonneville Power Administration* e pela administração de Los Alamos presente na figura 2.18. Foi construída com o intuito de corrigir instabilidades numa linha de transporte dos Estados Unidos da América (Rogalla e Kes, 2011 ; Boenig e Hauer, 1985).
2. Uma SMES de 2,4 MJ foi instalada no *Laboratório Nacional de Brookhaven* para fornecer energia durante cavas de tensão ou interrupções momentâneas para evitar a perda do feixe de uma fonte de radiação sincrotrónica (Tixador, 2013).
3. As linhas de produção da *Owens Corning* na Carolina do Norte, foram protegidas por SMES contra cavas de tensão (Tixador, 2013).

Existe também um projeto na Polónia que à semelhança dos outros apresentados anteriormente, visa melhorar a qualidade de energia prevenindo e reduzindo cavas súbitas de tensão (Kozak et al., 2009).

Na África do Sul está instalada uma SMES de 2.7 MJ numa fábrica de papel, já a tendo protegido contra 72 cavas de tensão em 11 meses. O esquemático do sistema SMES está presente no documento Schottler e Coney, 1999.

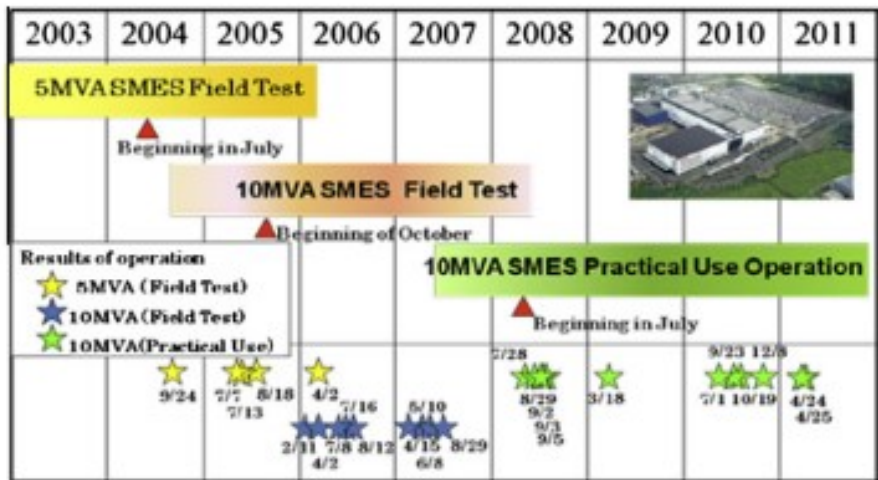


Figura 2.17: Mapa temporal do desenvolvimento de SMES no Japão (Nagaya et al., 2012)

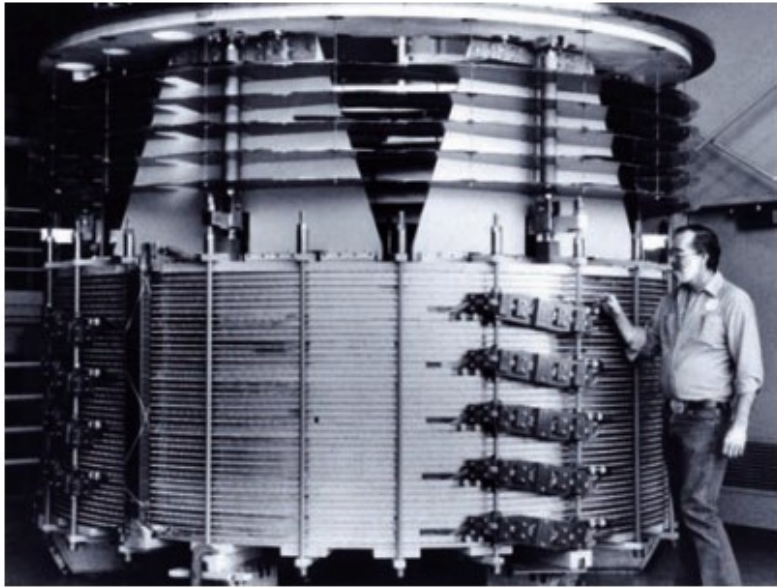


Figura 2.18: SMES de 30 MJ construída pela Bonneville Power Administration e pela administração de Los Alamos (Rogalla e Kes, 2011)

## TRABALHO PRÉVIO

Neste capítulo da dissertação estarão presentes os passos e metodologias preliminares efetuados de modo a abordar o problema em questão e a entender melhor o funcionamento das [SMES](#), assim como a familiarização com a Distorção Harmónica e as suas consequências.

### 3.1 Estudo de caso

Foi realizado um estudo de caso preliminar de forma a ilustrar a Distorção harmónica, como indicado nas figuras [3.1](#) e [3.2](#). O primeiro passo foi, com recurso ao MATLAB, a elaboração de um sinal com distorção de modo a ter um estudo de caso. Foi desenvolvido um script onde foi possível definir as harmónicas presentes, a amplitude de cada uma delas e as suas defasagens por ordem do utilizador. O sinal obtido presente tem um valor médio de corrente de 20 A, um valor máximo de 31.76 A e um valor mínimo de 8.23 A. O sinal está presente na imagem [3.1](#) no domínio da frequência e na imagem [3.2](#) e [3.3](#) no domínio do tempo.

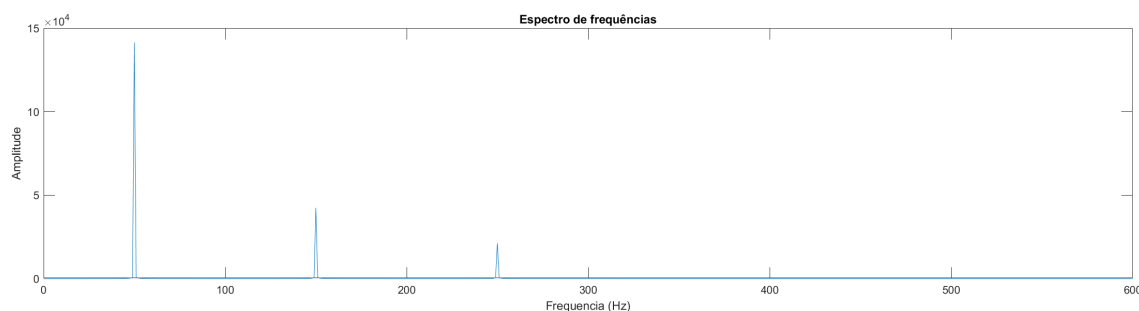


Figura 3.1: Sinal de estudo de caso no domínio da frequência

As configurações das harmónicas do sinal obtido são as seguintes:

- Terceira harmónica, presente a 150 Hz com uma amplitude de 30 % em relação á harmónica original.

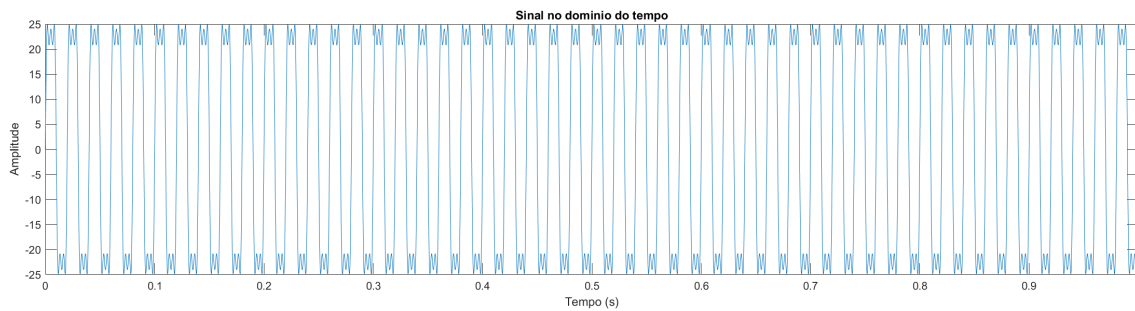


Figura 3.2: Sinal de estudo de caso no domínio do tempo

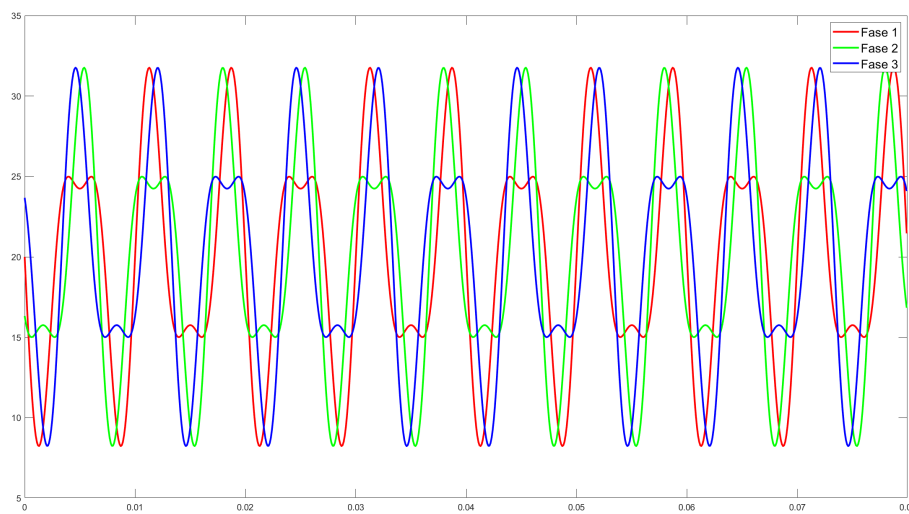


Figura 3.3: Sinal de estudo de caso no domínio do tempo com as três fases

- Quinta harmónica, presente a 250 Hz com uma amplitude de 15 % em relação á harmónica original.

De maneira a ser verificado o efeito de cada harmónica, no sinal foi verificada a forma do sinal no caso em que as harmónicas presentes eram o conjunto da fundamental e da terceira harmónica e no caso das harmónicas presentes serem o conjunto da fundamental e da quinta harmónica. Nas imagens 3.4 e 3.5 estão representados os gráficos do sinal obtido quando tem presente apenas a harmónica fundamental e a terceira e a quinta, respetivamente.

Os sinais e gráficos resultantes foram obtidos com recurso à seguinte fórmula:

$$I_n = 20 \times \sqrt{2} \times Amp_n \times \sin\left(n \times \left(2 \times \pi \times f_0 \times t - \frac{\pi}{180}\right)\right) \quad (3.1)$$

Sendo:

- $I_n$ , o sinal da corrente da harmónica  $n$ .
- $Amp_n$ , a amplitude da harmónica  $n$  em relação à harmónica fundamental.
- $f_0$ , a frequência fundamental, 50 Hz.

Substituindo n por 3 e 5, respetivamente obtém-se:

$$I_3 = 20 \times \sqrt{2} \times 0.3 \times \sin\left(3 \times \left(2 \times \pi \times 50 \times t - \frac{\pi}{180}\right)\right) \quad (3.2)$$

$$I_5 = 20 \times \sqrt{2} \times 0.15 \times \sin\left(5 \times \left(2 \times \pi \times 50 \times t - \frac{\pi}{180}\right)\right) \quad (3.3)$$

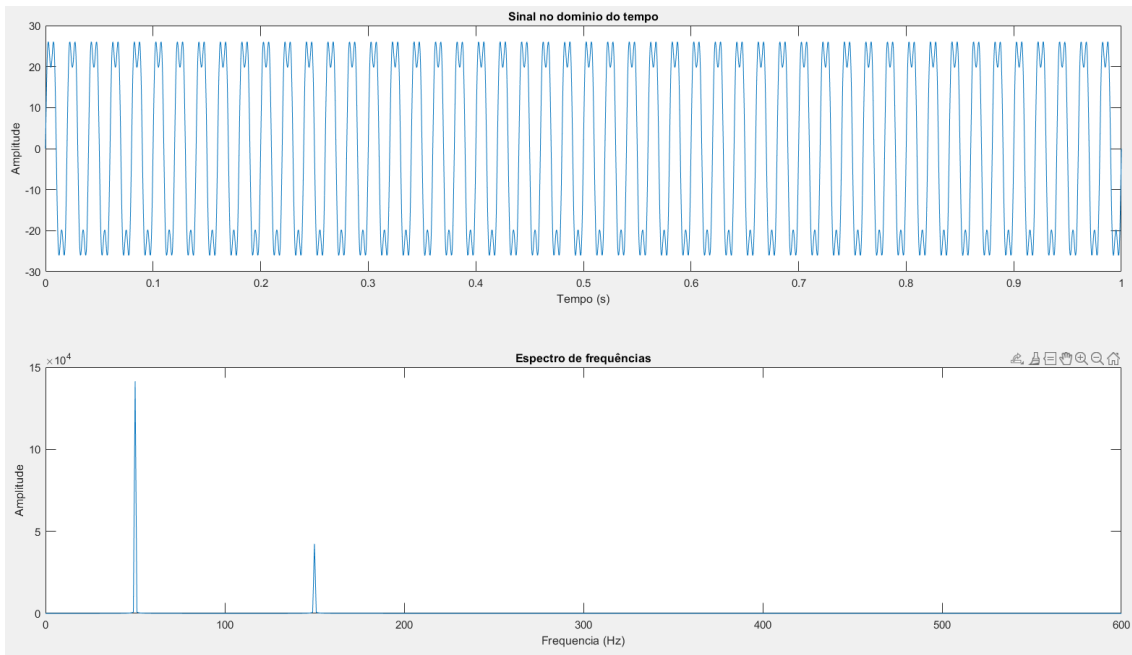


Figura 3.4: Harmónica fundamental e terceira harmónica

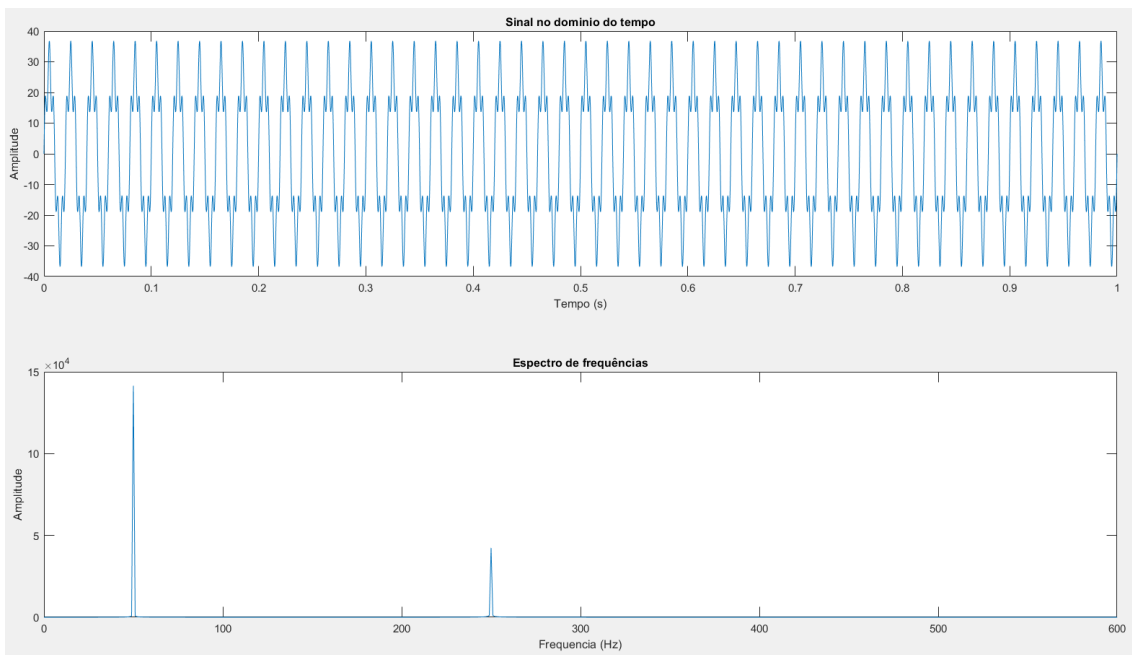


Figura 3.5: Harmónica fundamental e quinta harmónica

## 3.2 Definição do sistema alvo

Nesta secção define-se o sistema alvo com o objetivo de corrigir o sinal com harmónicas desenvolvido na secção anterior 3.1. Para o fazer foi utilizado como base o modelo de SIMULINK desenvolvido por Francisco Simões no documento Simões, 2021. Este modelo tem como base um sistema SMES que juntamente com uma ponte de tiristores e um sistema de controlo agem como filtro ativo da corrente elétrica que circula de uma fonte para uma carga não linear e está representado na imagem 3.6 e representado mais detalhadamente nas figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

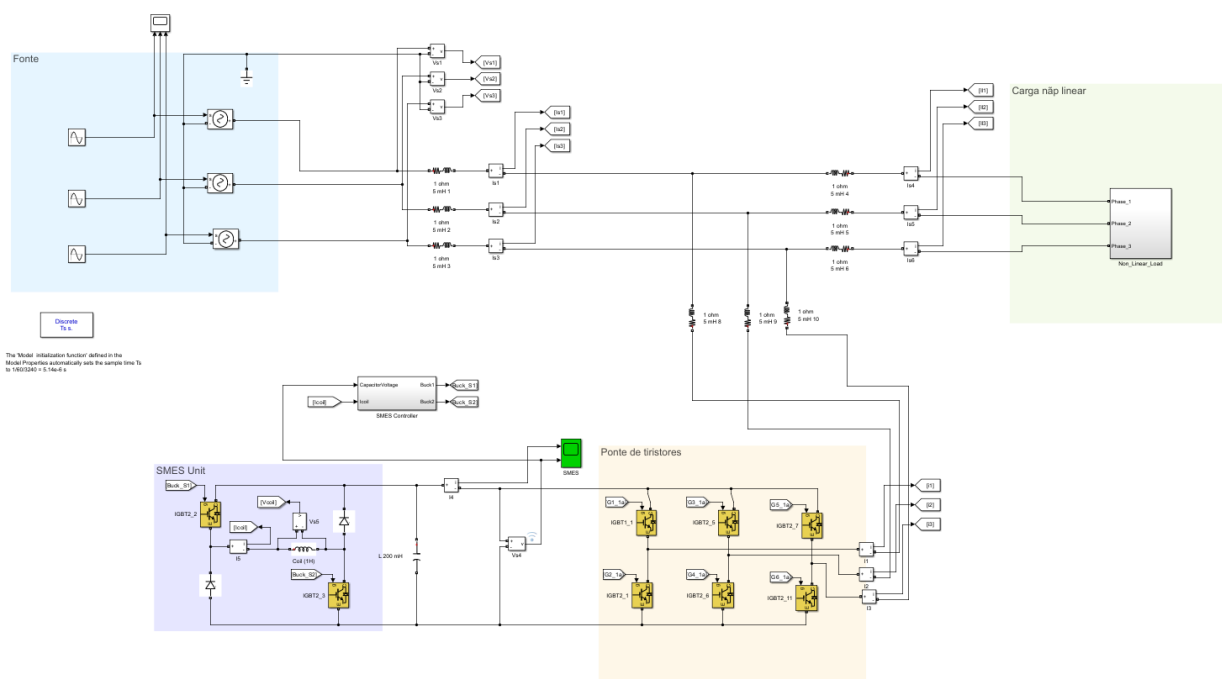


Figura 3.6: Modelo filtro SMES

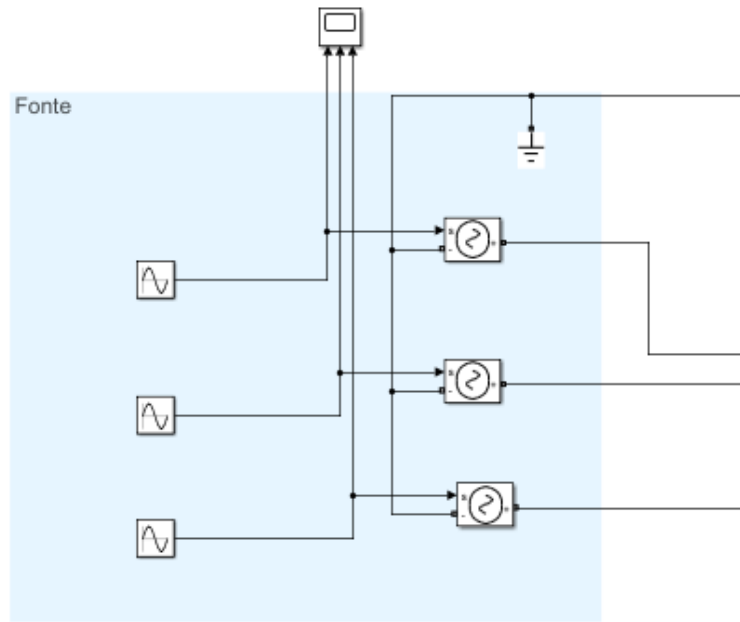


Figura 3.7: Fonte do modelo utilizado

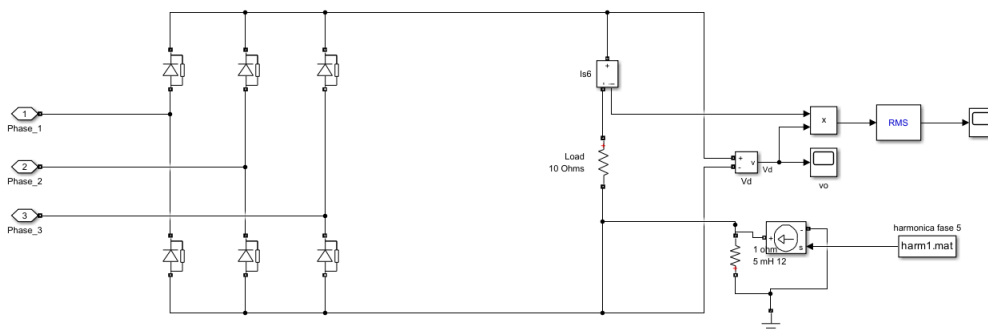


Figura 3.8: Carga utilizada no modelo

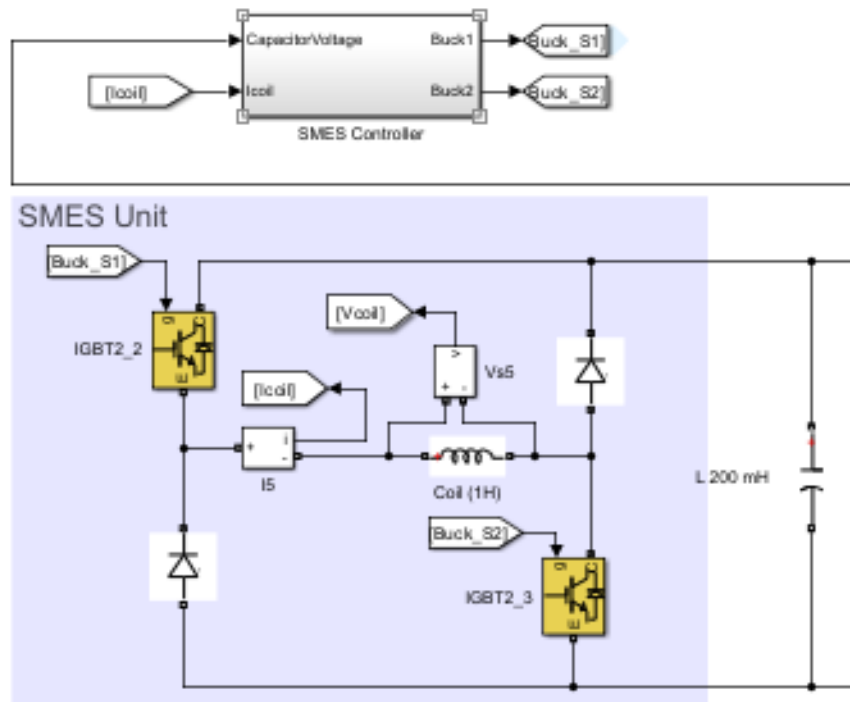


Figura 3.9: Modelo da SMES simulado através do modelo

De modo a introduzir o sinal de caso de estudo neste modelo, foi adicionada à carga não linear existente a corrente harmónica criada na secção 3.1, como se pode verificar na figura 3.8. De modo a estudar e comprovar a utilidade do modelo da SMES efetuou-se primeiro a sua simulação sem ter acoplado a SMES, apenas a fonte e a carga. O resultado está presente na figura 3.10 onde se verifica que a corrente da linha não é sinusoidal e em vez disso apresenta uma forma distorcida.

Para o comprovar colocou-se um bloco de análise da THD no MATLAB SIMULINK e obtiveram-se os valores da taxa de distorção harmónica de cada fase da corrente da linha, sendo os seus valores, em percentagem, os seguintes:

- 39,8%
- 43,1%
- 45,4%

Como é evidente, sendo os valores recomendados da secção 1.2 menores que cerca de 4% então considera-se que os valores obtidos têm uma distorção elevada como pretendido de modo a ter um caso de estudo.

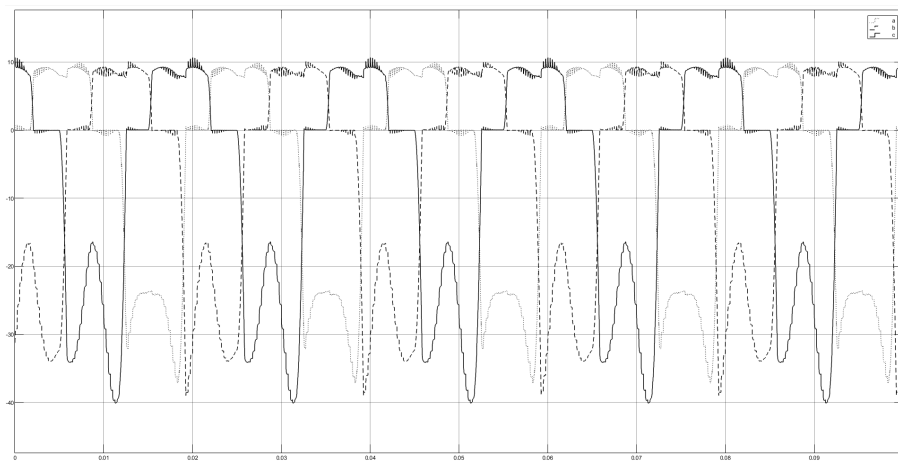


Figura 3.10: Corrente da linha sem a SMES

### 3.3 Remoção da taxa harmónica de distorção

De modo a atingir o objetivo de remover a taxa harmónica de distorção introduzida o modelo foi testado com vários valores de indutância para a SMES. Os resultados apresentados dizem respeito aos valores obtidos para 0,125 H.

Acoplando a SMES em paralelo, esta vai atuar como filtro ativo através da rápida absorção ou libertação de corrente. O contributo deste sistema está representado na figura 3.11, onde se verifica a evolução da sua tensão e corrente, respetivamente.

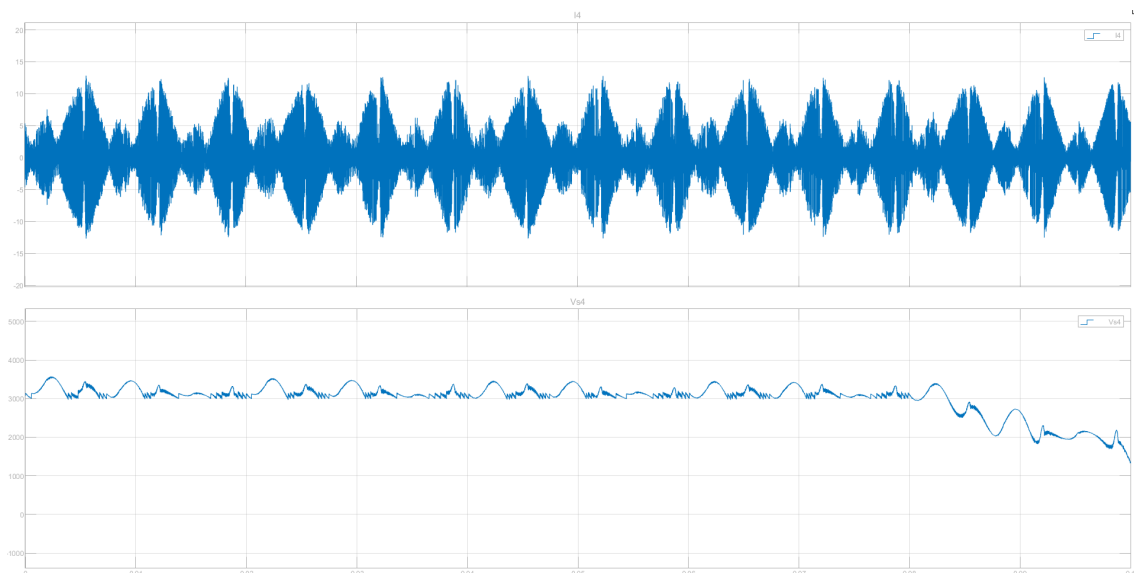


Figura 3.11: Evolução da Corrente e da Tensão da SMES

Após acoplar a SMES em paralelo e realizado a simulação do circuito a corrente de linha terá a forma presente na figura 3.12. Na figura 3.12 está presente o mesmo sinal

### 3.3. REMOÇÃO DA TAXA HARMÓNICA DE DISTORÇÃO

mas apenas com 1 fase de modo a facilitar a visualização. Como se pode comprovar pela sua forma a corrente é agora sinusoidal e possui bastante menos distorção. À semelhança da simulação do circuito sem a SMES nesta simulação também foi utilizado o bloco de análise THD de modo a obter os valores da taxa de distorção harmónica da corrente de linha para cada fase, sendo os valores obtidos, em percentagem, os seguintes:

- 10,9%
- 10,7%
- 9,8%

Como referido anteriormente, os valores da taxa de distorção harmónica recomendados são cerca de 3%. Apesar dos valores obtidos na simulação estarem acima deste limite, considera-se a utilização da SMES uma grande mais-valia e comprova-se assim a sua utilidade na correção da taxa de distorção harmónica em circuitos de potência.

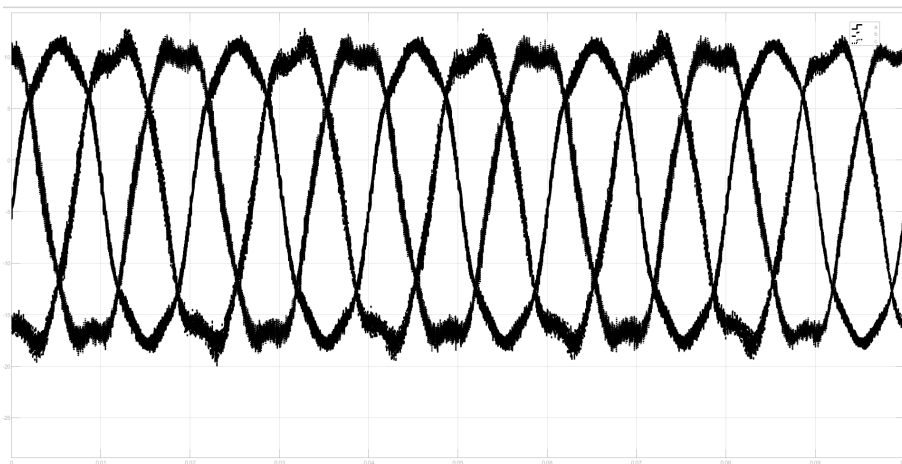


Figura 3.12: Corrente da linha com a SMES ligada em paralelo

## METODOLOGIA

### 4.1 Dimensão e geometria dos enrolamentos

Sendo o objetivo deste trabalho o desenvolvimento de um programa que ajude na otimização dos parâmetros de um sistema SMES, torna-se imperativo ter maneiras de calcular o comprimento total do enrolamento em panqueca através da aplicação de fórmulas a medidas feitas aos enrolamentos.

As medidas são representadas pelas grandezas seguintes:

- $R_{int}$ , raio interior do enrolamento.
- $R_{out}$ , raio exterior do enrolamento, raio total.
- $b$ , altura da fita supercondutora.
- $N$ , número de espiras/voltas.

As grandezas representadas graficamente nas figuras 4.1 e 4.2.

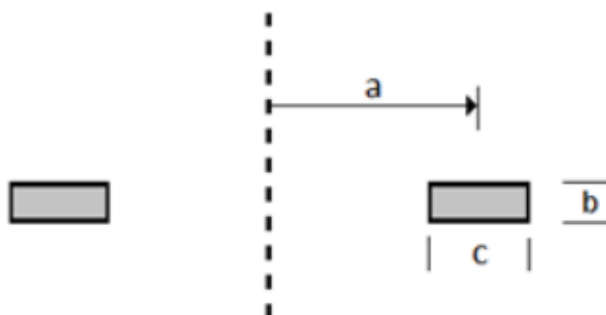


Figura 4.1: Dimensões de uma bobina em panqueca, imagem retirada do documento Amaro, 2015

Para simplificar, estas grandezas estão representadas da seguinte forma:

- $a$ , raio médio do enrolamento.
- $b$ , altura da fita supercondutora.
- $c$ , largura do conjunto de fita supercondutora.

Sendo:

$$\text{Raio exterior} = R_e \quad (4.1)$$

$$\text{Raio interior} = R_i \quad (4.2)$$

$$c = N \times \text{espessura} \quad (4.3)$$

Tem-se que:

$$a = R_e - \frac{c}{2} = R_i + \frac{c}{2} \quad (4.4)$$

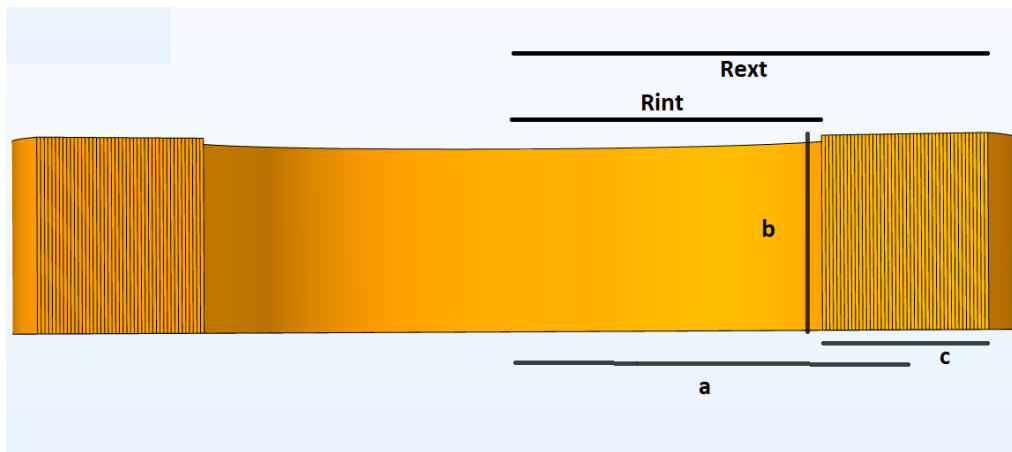


Figura 4.2: Dimensões de uma bobina em panqueca

Para obter o comprimento de fita é necessário primeiro obter o perímetro interior e exterior, que correspondem aos perímetros da fita mais interior e da fita mais exterior, respetivamente, que são obtidos da seguinte forma:

$$\text{Perímetro interior} = 2 \times \pi \times R_i = 2 \times \pi \times a - \pi \times c \quad (4.5)$$

$$= 2\pi a - \pi c \quad (4.6)$$

$$\text{Perímetro exterior} = 2 \times \pi \times R_e = 2 \times \pi \times a + \pi \times c \quad (4.7)$$

$$= 2\pi a + \pi c \quad (4.8)$$

Portanto o comprimento de fita de cada enrolamento é obtido da seguinte forma:

$$\text{Comprimento Bobina} = (\text{Perímetro interior} + \text{Perímetro exterior}) \times \frac{N}{2} \quad (4.9)$$

$$= (2 \times \pi \times a - \pi \times c + 2 \times \pi \times a + \pi \times c) \times \frac{N}{2} \quad (4.10)$$

$$= 2aN\pi \quad (4.11)$$

Sendo  $n$  o número de bobinas da topologia pretendida, o comprimento total de fita de uma certa topologia é dado por:

$$\text{Comprimento Total Topologia } n = n \times (2aN\pi) \quad (4.12)$$

## 4.2 Método dos elementos finitos

O Método dos elementos finitos é uma técnica de análise numérica bastante utilizada para resolver problemas de engenharia complexos que possuem uma resposta exata muito difícil ou impossível de obter. Este método proporciona soluções aproximadas por partes às equações que definem o problema em questão, úteis nessas exatas situações em que obter uma resposta exata é de grande dificuldade. O princípio deste método é que uma região de soluções pode ser discretizada e aproximada, ou seja, substituída por um conjunto de elementos discretos que no seu todo representam um modelo seu (Jagota et al., 2013).

Este método funciona da seguinte forma:

- Divide um problema em elementos mais simples.
- Considera que cada elemento obtido pode ser substituído por um modelo matemático.
- Agrupa todos os elementos e obtém uma solução para o conjunto.

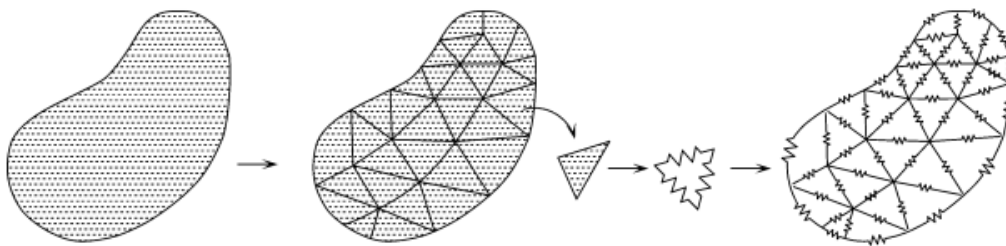


Figura 4.3: Método dos elementos finitos, retirado de Okumoto et al., 2009

### 4.2.1 Vantagens

Relativamente a outros métodos existentes, como o método das Diferenças Finitas e o dos Volumes Finitos o método dos elementos finitos possui as suas vantagens mas também desvantagens como descrito nas secções 4.2.1 e 4.2.2.

- Precisão, este método usa malhas que podem ser ajustadas conforme a precisão pretendida, pelo custo de poder computacional pode ser obtida uma precisão muito elevada.

- Facilidade de utilização, pode ser usada como caixa negra, os programas de métodos de elementos finitos são fáceis de operar e podem ser usados sem ter conhecimento absoluto do problema a estudar (Okumoto et al., 2009).
- Versatilidade, pode ser aplicado a uma gama de problemas bastante vasta, que inclui problemas com geometria complexa, com condições de fronteira variadas e comportamentos não lineares.

#### 4.2.2 Desvantagens

Algumas das suas desvantagens são:

- Erros de discretização: o método está sujeito a erros numéricos devido à aproximação de uma solução contínua por uma solução discreta tendo em conta que a solução obtida é uma solução aproximada por funções de interpolação. Estes erros ocorrem porque essa discretização do domínio contínuo em elementos finitos não consegue capturar na perfeição todas as variações da solução (Hughes, 2000).
- Dependência da Qualidade da Malha: a precisão da solução obtida depende fortemente da qualidade da malha projetada, caso seja mal projetada o resultado obtido pode ser imperfeito (Hughes, 2000).

O método escolhido foi o dos elementos finitos devido principalmente à sua versatilidade e precisão. O programa usado será o COMSOL Multiphysics.

### 4.3 Interface gráfica do programa (GUI)

Com o objetivo de facilitar a utilização do programa e de proporcionar uma melhor apresentação dos resultados obtidos pelo programa criado foi desenvolvida uma interface gráfica. Inicialmente desenvolveu-se o programa num script MATLAB simples e posteriormente desenvolveu-se a interface gráfica e outras funcionalidades. A interface gráfica foi desenvolvida em MATLAB com a ferramenta *App Designer* pois as funcionalidades oferecidas eram suficientes, teria uma compatibilidade perfeita com o script desenvolvido anteriormente e a versão final desenvolvida seria compatível com utilizadores que não possuíssem o programa MATLAB instalado.

As funcionalidades pretendidas seriam as seguintes:

1. Utilizar a base de dados criada através das simulações COMSOL no desenvolvimento desta dissertação caso pretendido pelo utilizador.
2. Inserir a base de dados do utilizador através de vários ficheiros de texto caso pretenda.
3. Visualizar a informação da base de dados nativa do programa em forma de gráficos.

4. Devolver o valor máximo de indutância de um sistema [SMES](#) para um devido comprimento máximo de bobina, assim como a topologia correspondente a esse valor e guardar o resultado num ficheiro de texto.
5. Devolver o valor mínimo de comprimento de bobina de um sistema [SMES](#) necessário para obter um devido valor de indutância, assim como a topologia correspondente a esse valor e guardar o resultado num ficheiro de texto.
6. Criar um esboço da configuração obtida em cada uma das opções escolhidas na página de resultados obtida.

## IMPLEMENTAÇÃO

Nesta secção da dissertação estarão presentes os métodos de implementação do programa desenvolvido, assim como todos os passos seguidos para o fazer, estará também presente um manual do utilizador para os interessados no seu uso.

### 5.1 Criação da base de dados

Como referido na secção 4.2 da dissertação, o software utilizado para aplicar o método de elementos finitos é o COMSOL Multiphysics. Inicialmente desenhou-se a geometria do problema, composta pela secção da bobina feita de YBCO e por um semicírculo representante do meio cuja a bobina estará envolvida, neste caso o ar. Nas figuras 5.1 e 5.2 está representada a geometria desenvolvida para a topologia de 1 bobina. Esta simulação foi feita utilizando a opção *2D Axisymmetric*, que representa o modelo tridimensional da bobina num modelo bidimensional, já que possuía simetria circular. Foi desenhado um corte transversal da bobina e um semicirculo representando o ar e obtidos os resultados pretendidos. Na figura 5.3 está representada a bobina e o seu campo magnético após ser realizada a simulação.

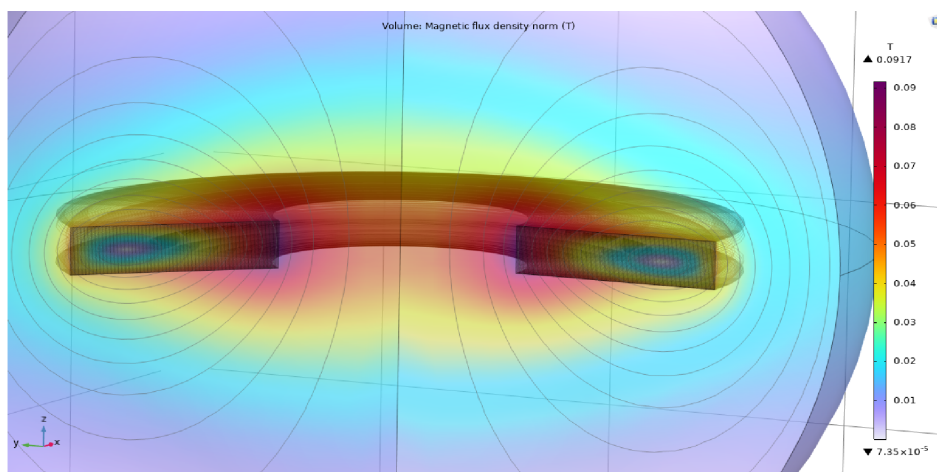


Figura 5.3: Geometria da topologia de uma bobina e seu campo magnético a três dimensões

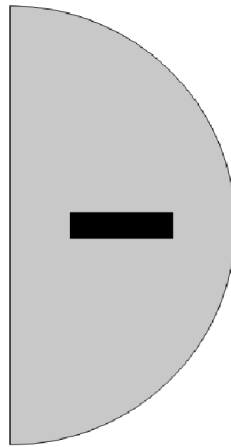


Figura 5.1: Geometria da topologia de uma bobina

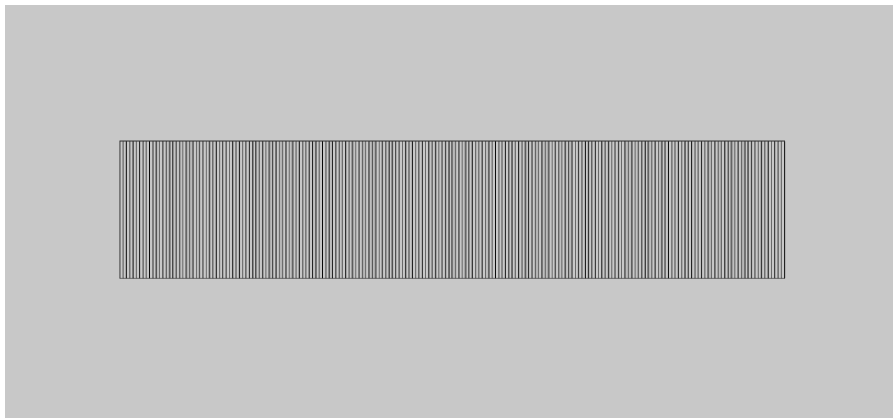


Figura 5.2: Geometria da topologia de uma bobina detalhada

Para as restantes topologias o processo de desenvolvimento foi bastante semelhante, bastou empilhar bobinas em panqueca até obter a configuração pretendida. Nos modelos desenvolvidos foram considerados os valores para os seguintes parâmetros:

- $b$ , altura da fita de 1 cm.
- Espessura de cada fita 0,2 mm.
- Distância horizontal de fitas, ou seja, espaçamento nulo entre fitas.
- Distância vertical entre bobinas em topologias com mais de uma bobina de aproximadamente 1,2 cm, proveniente da seguinte fórmula:

$$Distancia\ Vertical = b + \frac{b}{7} \quad (5.1)$$

O espaçamento entre cada fita foi considerado igual a 0 de modo a simplificar as simulações realizadas, dado que o seu impacto na indutância total não foi considerado relevante face à complexidade que adicionava ao modelo.

Para obter os valores pretendidos de indutância e de comprimento necessários foi preciso criar modelos de cada topologia com diferentes parâmetros para o número de espiras (N) e raio médio (a), foram realizados dois sweeps dos parâmetros para cada topologia. O primeiro sweep foi feito de modo a obter um alcance de valores vasto, o segundo foi feito para valores de raio médio mais pequenos numa tentativa de obter resultados mais precisos na gama de valores de indutância para a qual o programa foi inicialmente definido.

Dito isso, de maneira mais detalhada, o primeiro sweep foi o seguinte:

- Topologia 1 bobina:
  - a de 0,05 cm a 0.48676 cm com um passo de 0,016176 cm.
  - N de 60 a 400 com um passo de 10.
- Topologia 2 bobinas:
  - a de 0,05 cm a 0,59999 cm com um passo de 0,016176 cm.
  - N de 60 a 400 com um passo de 10.
- Topologia 3 bobinas:
  - a de 0,05 cm a 0.48676 cm com um passo de 0,016176 cm.
  - N de 60 a 400 com um passo de 10.
- Topologia 4 bobinas:
  - a de 0,05 cm a 0,59999 cm com um passo de 0,016176 cm.
  - N de 60 a 400 com um passo de 10.
- Topologia 5 bobinas:
  - a de 0,05 cm a 0.48676 cm com um passo de 0,016176 cm.
  - N de 30 a 300 com um passo de 10.

O segundo sweep foi o seguinte:

- Topologia 1 bobina:
  - a de 0,015 cm a 0,045 cm com um passo de 0,006 cm.
  - N de 60 a 400 com um passo de 10.
- Topologia 2 bobinas:

- a de 0,015 cm a 0,045 cm com um passo de 0,006 cm.
- N de 50 a 400 com um passo de 10.
- Topologia 3 bobinas:
  - a de 0,015 cm a 0,045 cm com um passo de 0,006 cm.
  - N de 50 a 400 com um passo de 10.
- Topologia 4 bobinas:
  - a de 0,015 cm a 0,045 cm com um passo de 0,006 cm.
  - N de 30 a 300 com um passo de 10.
- Topologia 5 bobinas:
  - a de 0,015 cm a 0,045 cm com um passo de 0,006 cm.
  - N de 60 a 400 com um passo de 10.

Após criar os modelos de todas as topologias, foram aplicadas as fórmulas do comprimento de fita 4.12 e a fórmula nativa do COMSOL da indutância 2.4 aos modelos, como resultado foram obtidos ficheiros de texto com os dados pretendidos organizados em colunas da seguinte forma: a(cm) N L(H) length(m). A figura 5.4 contém um excerto de um dos ficheiros obtidos como exemplo:

| a(cm) | N      | L(mH)     | length(m) |
|-------|--------|-----------|-----------|
| 0.015 | 60.000 | 8.5154E-5 | 5.6549    |
| 0.015 | 70.000 | 1.1176E-4 | 6.5973    |
| 0.015 | 80.000 | 1.4086E-4 | 7.5398    |
| 0.015 | 90.000 | 1.7219E-4 | 8.4823    |
| 0.015 | 100.00 | 2.0551E-4 | 9.4248    |
| 0.015 | 110.00 | 2.4061E-4 | 10.367    |
| 0.015 | 120.00 | 2.7735E-4 | 11.310    |
| 0.015 | 130.00 | 3.1558E-4 | 12.252    |
| 0.015 | 140.00 | 3.5522E-4 | 13.195    |
| 0.015 | 150.00 | 3.9619E-4 | 14.137    |
| 0.015 | 160.00 | 4.3848E-4 | 15.080    |
| 0.015 | 170.00 | 4.8206E-4 | 16.022    |
| 0.015 | 180.00 | 5.2698E-4 | 16.965    |
| 0.015 | 190.00 | 5.7327E-4 | 17.907    |
| 0.015 | 200.00 | 6.2103E-4 | 18.850    |
| 0.015 | 210.00 | 6.7036E-4 | 19.792    |
| 0.015 | 220.00 | 7.2140E-4 | 20.735    |
| 0.015 | 230.00 | 7.7434E-4 | 21.677    |
| 0.015 | 240.00 | 8.2937E-4 | 22.619    |
| 0.015 | 250.00 | 8.8675E-4 | 23.562    |

Figura 5.4: Disposição dos ficheiros obtidos

Após criar a base dados seguiu-se uma avaliação da densidade de dados. Para cada configuração de bobinas obtida, foi representado graficamente a quantidade de dados para cada intervalo de valores de comprimento e de indutância, os resultados obtidos estão

presentes na figura 5.5 para a configuração de uma bobina. Para as restantes configurações, os dados estão presentes nas figuras II.1, II.2, II.3 e II.4 do anexo, secção II. Pelas figuras é possível verificar que a densidade de dados tem um comportamento descendente tanto no comprimento quanto na indutância, algo que ocorre de forma semelhante em todas as configurações. Este comportamento é propositado e ocorre pois a base de dados foi projetada de modo a possuir a maior quantidade de dados nos valores de comprimento total de 400 metros ou menos, sendo que não é possível ter uma base de dados infinita optou-se por ter uma maior densidade de dados nesta gama de valores.

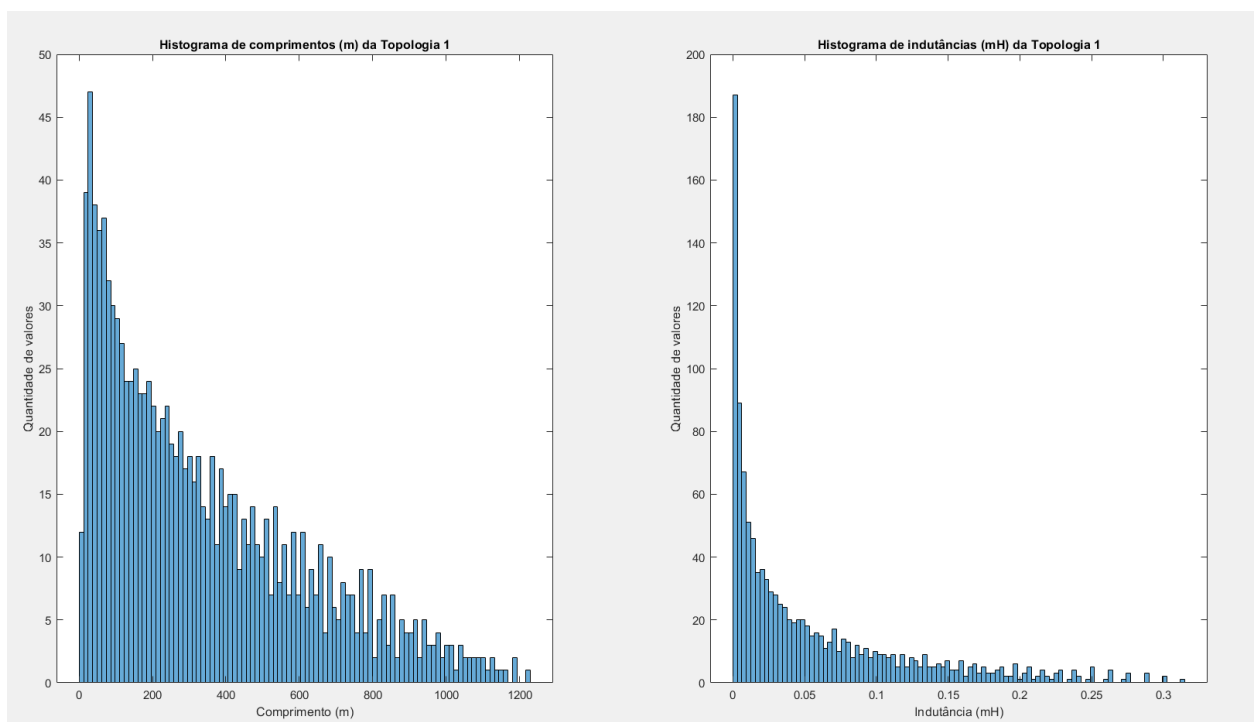


Figura 5.5: Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de uma bobina

Dito isso, o alcance da base de dados varia consoante a topologia: quanto maior a quantidade de bobinas presentes, maiores serão o valor máximo de comprimento e a indutância obtida. Os limites da base de dados para cada topologia estão presentes na tabela 5.1. É possível verificar que o valor mínimo da indutância é  $6,475e-5$  mH e de comprimento é 5,6549 metros e que o valor máximo de indutância é 5,9699 mH e de comprimento é 6031,9 metros. Posto isto, pode dizer-se que estes são os limites do programa.

Tabela 5.1: Valores limite da base de dados do programa

| Número bobinas da configuração | 1        | 2         | 3         | 4         | 5         |
|--------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Indutância máxima (mH)         | 0,3146   | 1,5906    | 2,6257    | 5,9699    | 4,1937    |
| Comprimento máximo (m)         | 1223,4   | 3015,9    | 3670,1    | 6031,9    | 4693,5    |
| Indutância mínima (mH)         | 6,475e-5 | 1,6856e-4 | 2,9239e-4 | 1,6791e-4 | 2,3249e-4 |
| Comprimento mínimo (m)         | 5,6549   | 9,4248    | 14,137    | 11,31     | 14,137    |

## 5.2 Desenvolvimento do Script Matlab

Após concluir a etapa anterior descrita na secção 5.1, procedeu-se à elaboração de código MATLAB com o intuito de desenvolver algumas das funcionalidades propostas na secção 4.3, nomeadamente as funcionalidades 4 e 5. Têm modos de funcionamento semelhantes, através do valor de indutância ou de comprimento e respetiva tolerância introduzidos pelo utilizador, são criados vetores para cada topologia com os valores da base de dados que estão dentro dos limites inseridos, ou seja, dos valores pertencentes aos intervalos seguintes, sendo o 5.2 referente à funcionalidade 4 e o 5.3 referente à 5.

$$[\text{Comprimento} - \text{Tolerancia} , \text{Comprimento} + \text{Tolerancia}] \quad (5.2)$$

$$[\text{Indutancia} - \text{Tolerancia} , \text{Indutancia} + \text{Tolerancia}] \quad (5.3)$$

O passo seguinte é ordenar os valores filtrados no passo anterior, sendo que no caso da funcionalidade 4 os valores apresentados ficam ordenados de forma ascendente consoante o comprimento total de fita de cada topologia e na funcionalidade 5 os valores apresentados ficam ordenados de forma descendente consoante a indutância total de cada topologia.

## 5.3 Implementação da interface gráfica

Como referido na secção 4.3, foi desenvolvida uma interface gráfica para auxiliar o utilizador na utilização do software. Nesta secção estarão presentes o seu funcionamento e as várias páginas que a compõem.

### 5.3.1 Composição da interface gráfica

A interface gráfica é composta por várias páginas, esta secção apresenta um esquema, representado na figura 5.6, com todos os componentes.

### 5.3.2 Funcionamento da interface

A interface gráfica desenvolvida é composta por vários ficheiros *.mlapp* representando cada um deles uma página diferente. Em cada uma são chamadas funções relevantes desenvolvidas previamente em MATLAB e guardadas em ficheiros *.m*. Como referido anteriormente, a interface gráfica desenvolvida é composta por várias páginas, na figura 5.7 está a página de rosto do programa, composta pelo título, por uma imagem de uma

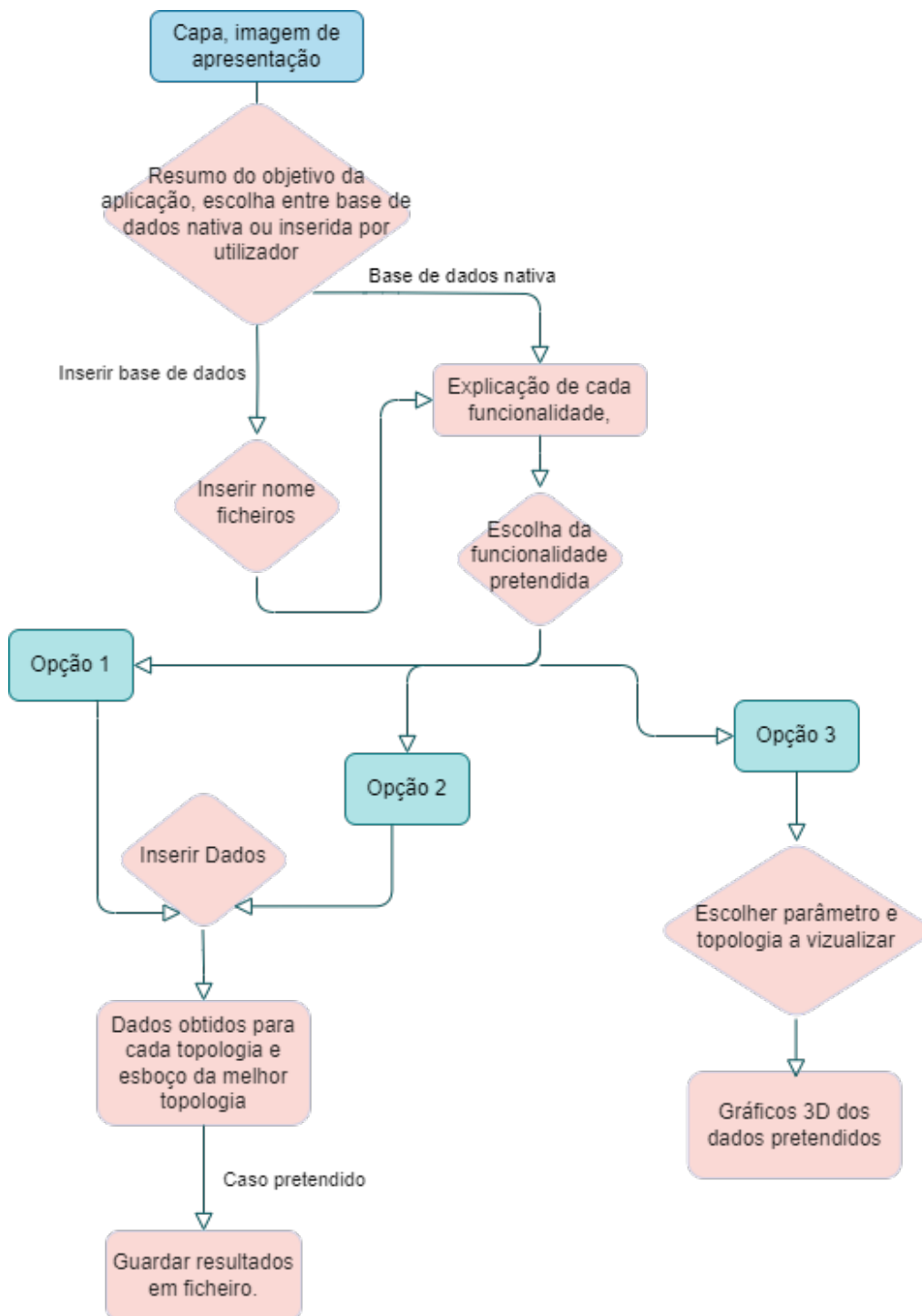


Figura 5.6: Esquema do funcionamento e composição da interface gráfica

bobina supercondutora e por um link referente à página do repositório online do autor. A seguir segue-se uma página em que é dada a escolha ao utilizador entre recorrer à base de dados criada no desenvolvimento desta dissertação ou de inserir uma base de dados. Após o utilizador inserir a sua base de dados ou caso tenha escolhido usar a nativa, segue-se a página em que se escolhe a funcionalidade a usar, sendo uma de três opções, escolhendo



Figura 5.7: Página de rosto do programa

entre as funcionalidades 3, 4 e 5 da secção 4.3. Após introduzir os dados, os resultados

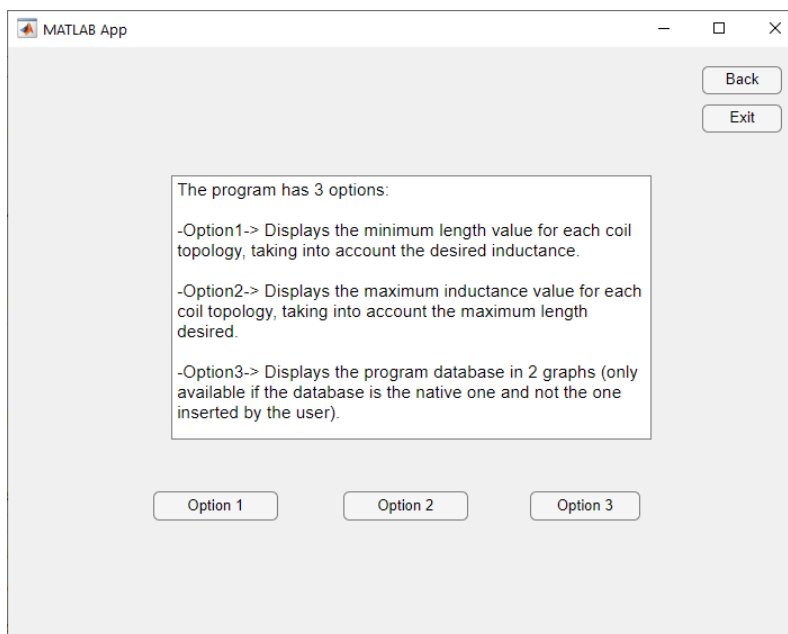


Figura 5.8: Página de escolha da funcionalidade pretendida e respetivas descrições

são mostrados numa nova página. Em cada página da aplicação o utilizador tem ainda a possibilidade de regressar à página anterior ou de sair do programa completamente caso não pretenda prosseguir. Na secção 5.3.1 está presente um esquema mais detalhado do funcionamento das várias páginas constituintes do programa, na figura 5.6.

As funcionalidades definidas na secção 4.3 estão demonstradas nas figuras a seguir, a funcionalidade de escolher qual base de dados usar, nomeadamente as funcionalidades 1 e 2, presentes na figura 5.10; a 3, funcionalidade que permite ao utilizador visualizar os dados

### 5.3. IMPLEMENTAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA

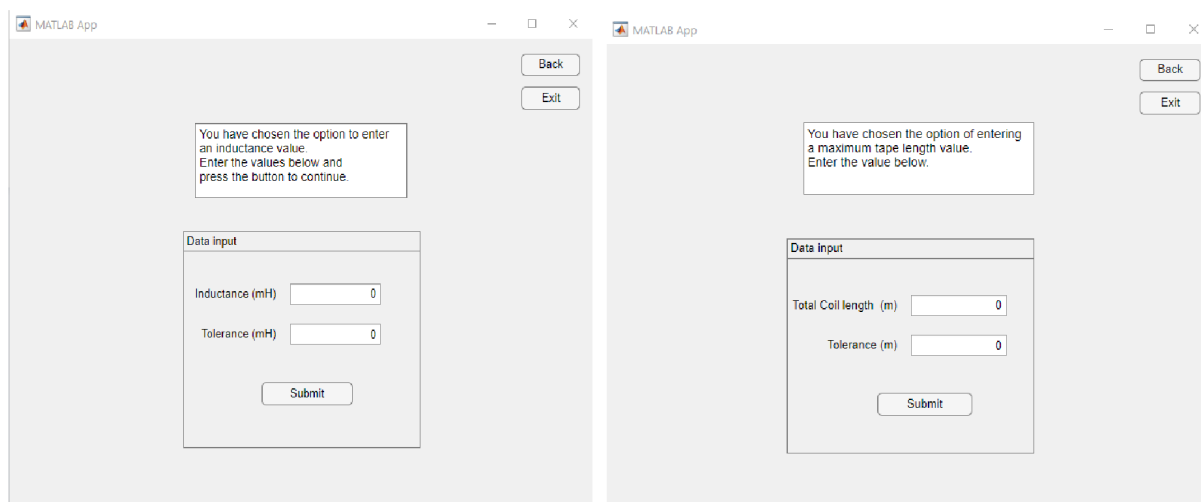


Figura 5.9: Página de inserção dos dados de indutância ou comprimento da bobina pretendidos pelo utilizador

usados está representada nas figuras 5.13 e 5.12. Nesta página os gráficos de visualização dos dados estão divididos em dois gráficos para ser mais fácil a observação dos dados para bobinas com um raio médio ( $a$ ) de 0,015 cm a 0,045 cm. As restantes funcionalidades (4,5 e 6) estão presentes nas figuras 5.9 e 5.11 e dizem respeito à ordenação das topologias consoante os valores de indutância ou comprimento de bobina inseridos pelo utilizador.

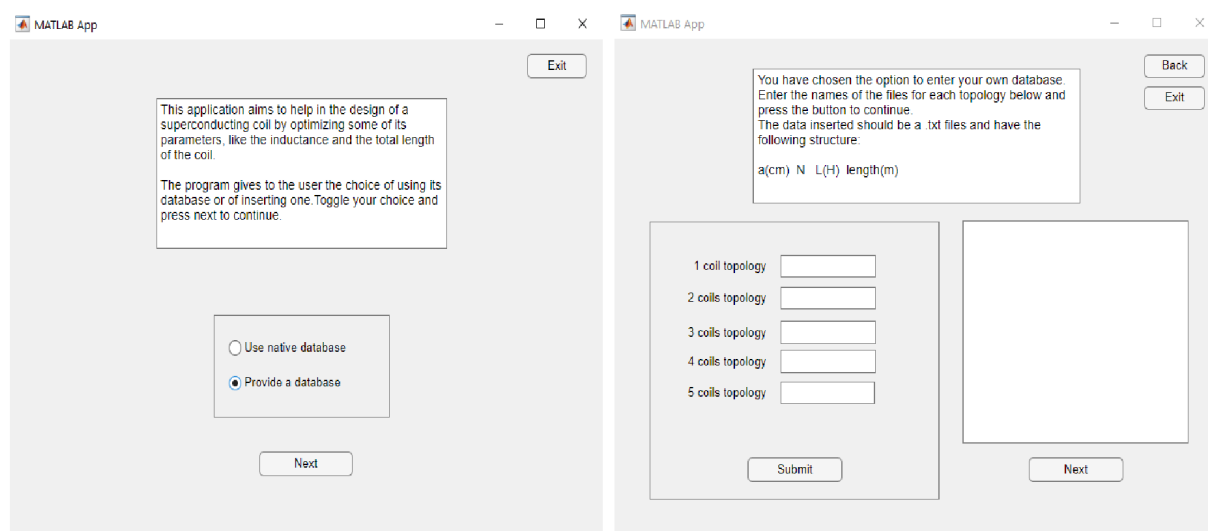


Figura 5.10: Página de inserção dos ficheiros do utilizador

Nos anexos, na secção I está presente um manual do utilizador, contendo uma descrição da aplicação (1), os requisitos do sistema (2), um guia de instalação (3) e um conjunto

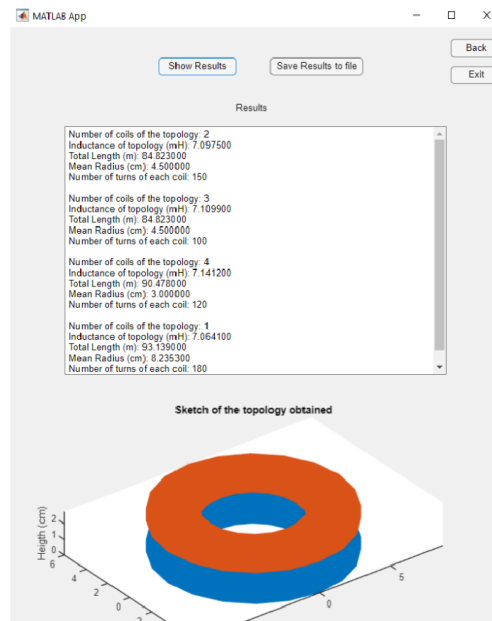


Figura 5.11: Página de visualização dos resultados referentes aos dados inseridos pelo utilizador

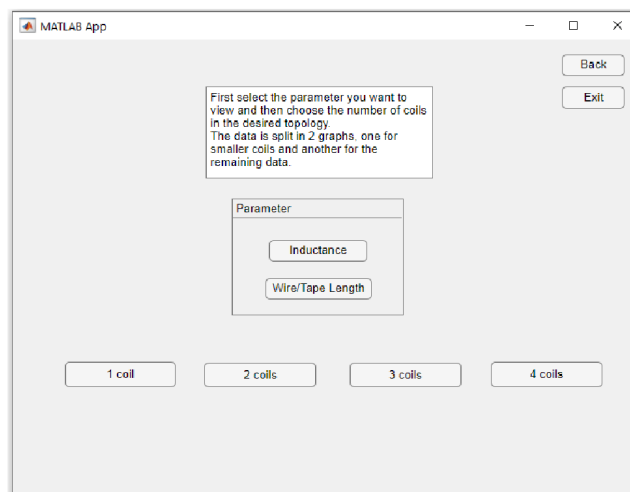


Figura 5.12: Página de escolha dos dados a visualizar

de informações anteriormente referidas neste documento como uma descrição das funcionalidades principais (4) e de como o utilizador deve navegar dentro da aplicação (5). Estarão também presentes algumas limitações do programa e bugs (6) de modo a serem evitados por parte do utilizador.

### 5.3. IMPLEMENTAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA

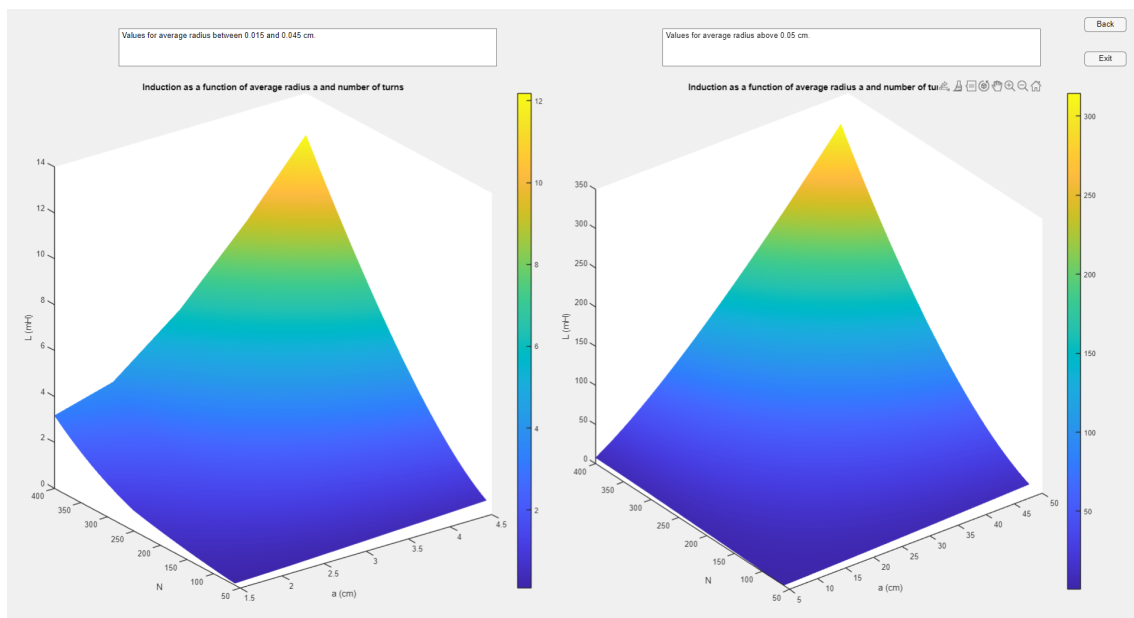


Figura 5.13: Página de visualização dos gráficos referentes aos dados da base de dados nativa

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção da dissertação estão apresentados os resultados obtidos e as conclusões tiradas sobre eles.

### 6.1 Comparação entre topologias

Devido ao fenómeno de indução mútua, já explorado na secção 2.3.2, é possível obter valores de indutância superiores para configurações de várias bobinas empilhadas face a configurações de apenas uma bobina em certas regiões de comprimento de fita supercondutora.

Dando uso a este princípio, projetou-se a aplicação para várias topologias de bobinas, como referido. Para isso dividiu-se os dados em três grupos consoante o comprimento total da topologia: o primeiro de 0 a 40 m; o segundo de 40 a 200 m; o terceiro a partir de 200 m.

Logo após, compararam-se os valores de cada topologia calculando a diferença percentual média em relação a cada topologia e á topologia com mais uma bobina que ela. Isto é, foi vista a diferença na indutância caso cada configuração tivesse mais uma bobina empilhada, comparou-se então a configuração de 2 bobinas com 1 bobina, de 3 bobinas com 2 bobinas, 4 bobinas com 3 bobinas e 5 bobinas com 4 bobinas, sendo que o resultado é obtido em percentagem e avalia o desvio no valor de indutância entre as duas topologias comparadas para o mesmo comprimento.

Uma percentagem positiva indica que a configuração com mais uma bobina possui, em relação à outra configuração a ser comparada, essa percentagem de indutância a mais para comprimentos semelhantes, caso seja negativa possui essa percentagem a menos de indutância. Caso a percentagem seja 0% não existe variação entre elas. Os resultados obtidos estão nas figuras a seguir: cada figura demonstra a comparação em percentagem

## 6.1. COMPARAÇÃO ENTRE TOPOLOGIAS

dos valores de indutância para o mesmo comprimento das duas topologias a serem comparadas.

Comparação entre topologia de 1 bobina e de 2 bobinas:

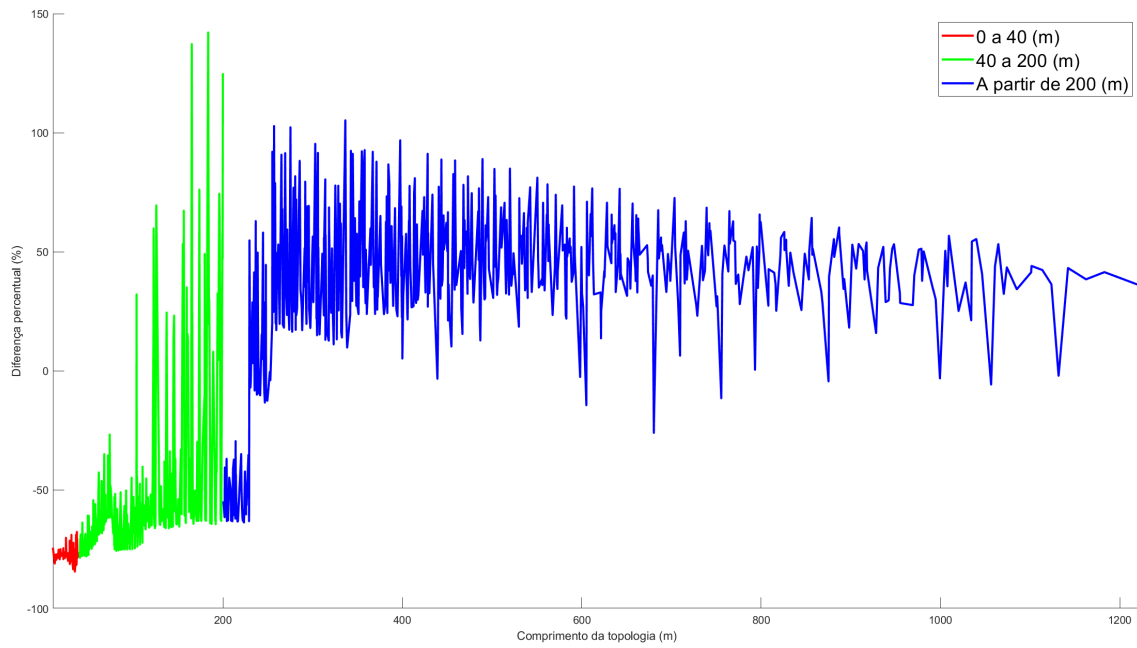


Figura 6.1: Desvio das topologias de 1 bobina e 2 bobinas

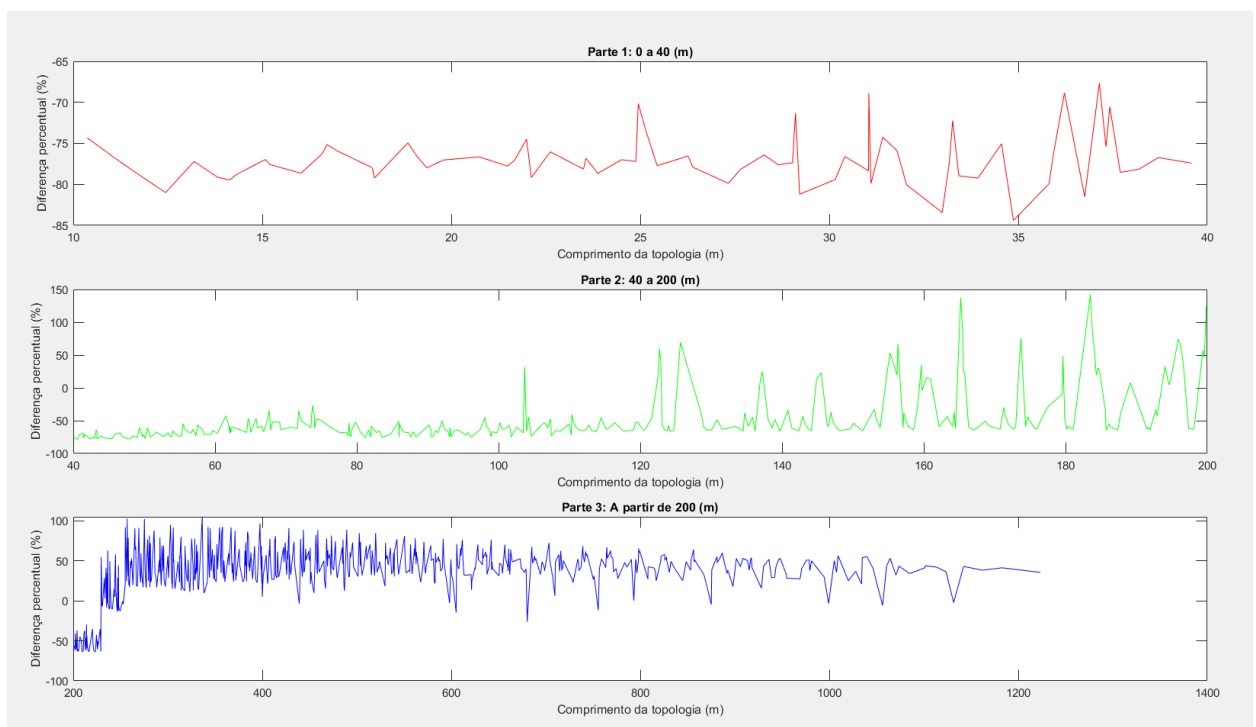


Figura 6.2: Desvio das topologias de 1 bobina e 2 bobinas (detalhe)

Diferença percentual média:

- 0 a 40 (m): 7,55%
- 40 a 200 (m): -57,66%
- a partir de 200 (m): 40,14%

Comparação entre topologia de 2 bobinas e de 3 bobinas:

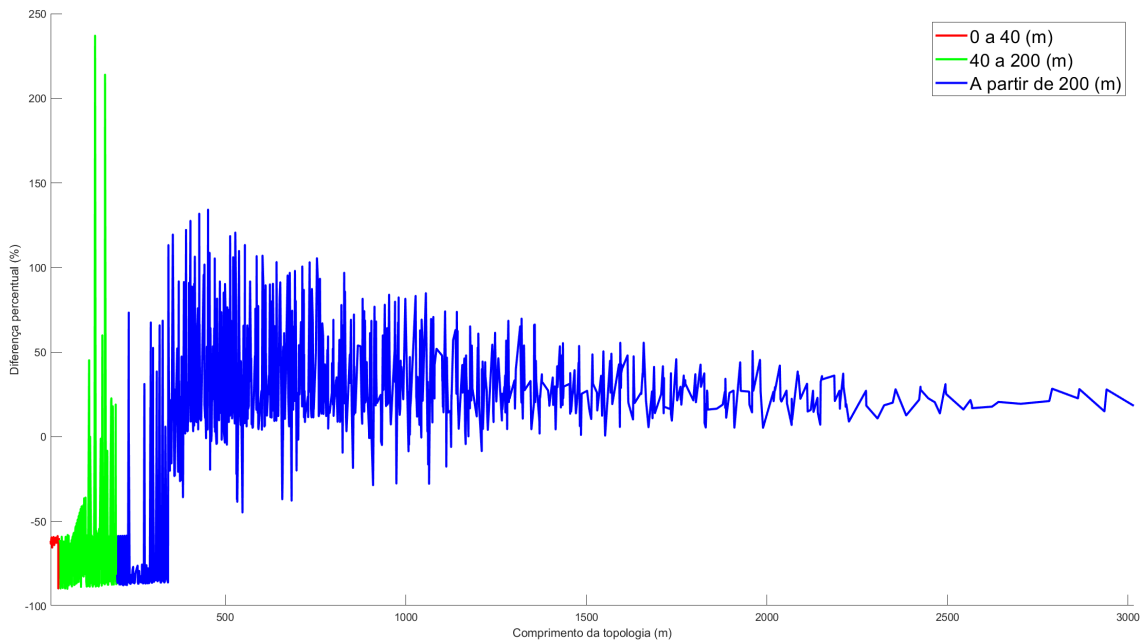


Figura 6.3: Desvio das topologias de 2 bobinas e 3 bobinas

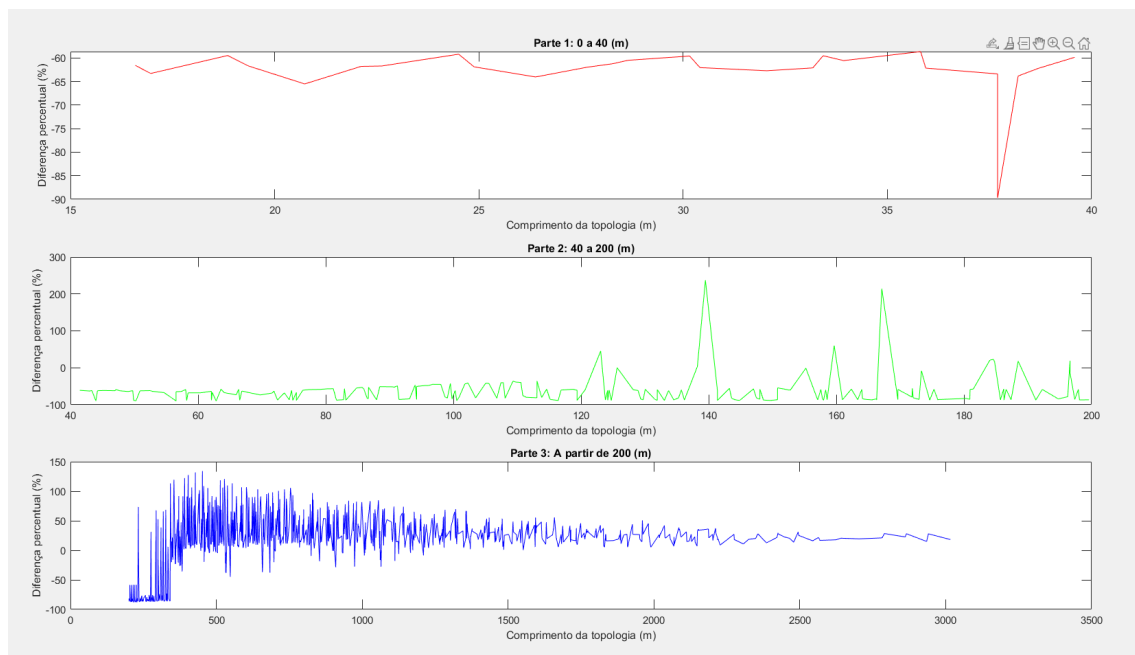


Figura 6.4: Desvio das topologias de 2 bobinas e 3 bobinas (detalhe)

## 6.1. COMPARAÇÃO ENTRE TOPOLOGIAS

Diferença percentual média:

- 0 a 40 (m): 13,05%
- 40 a 200 (m): -62,17%
- a partir de 200 (m): 24,61%

Comparação entre topologia de 3 bobinas e de 4 bobinas:

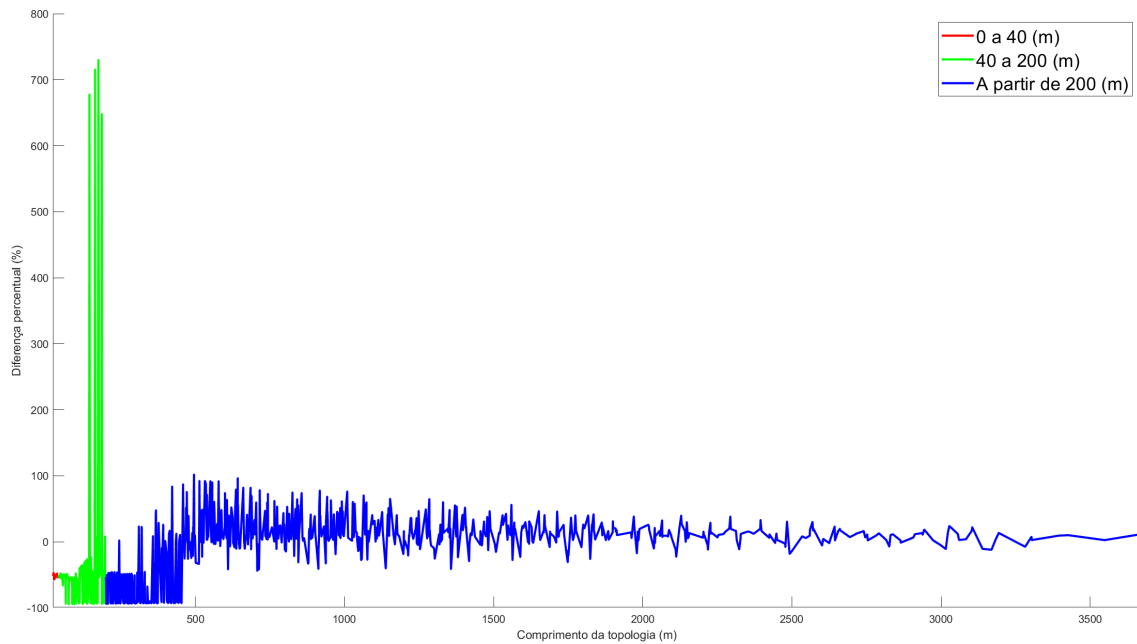


Figura 6.5: Desvio das topologias de 3 bobinas e 4 bobinas

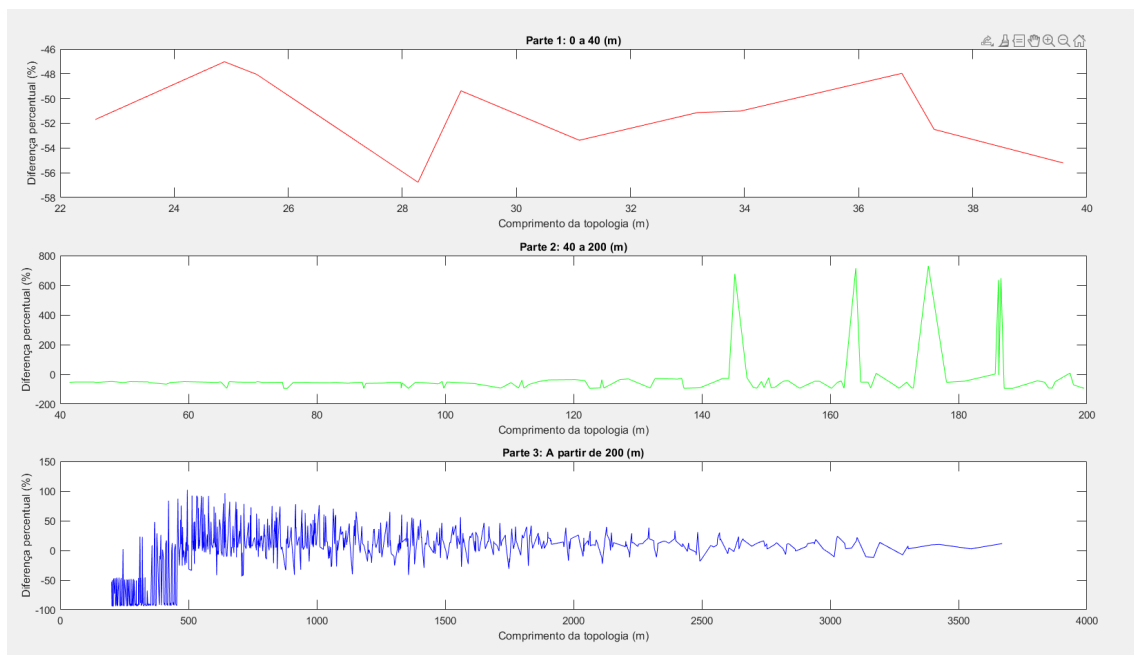


Figura 6.6: Desvio das topologias de 3 bobinas e 4 bobinas (detalhe)

Diferença percentual média:

- 0 a 40 (m): -3,49%
- 40 a 200 (m): -34,24%
- a partir de 200 (m): 18,45%

Comparação entre topologia de 4 bobinas e de 5 bobinas:

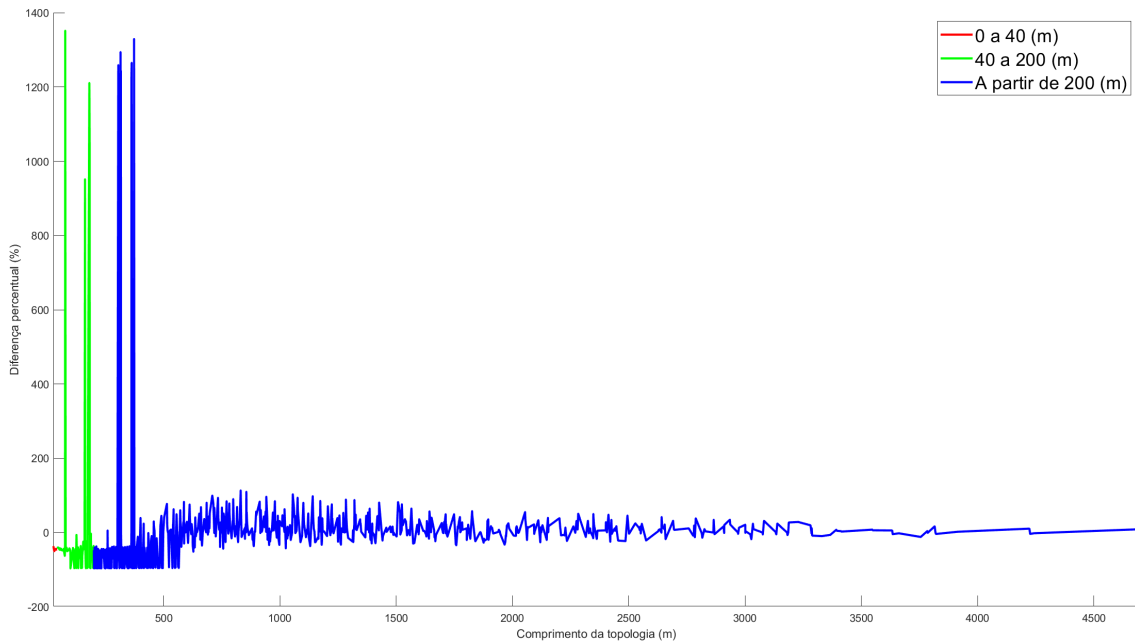


Figura 6.7: Desvio das topologias de 4 bobinas e 5 bobinas

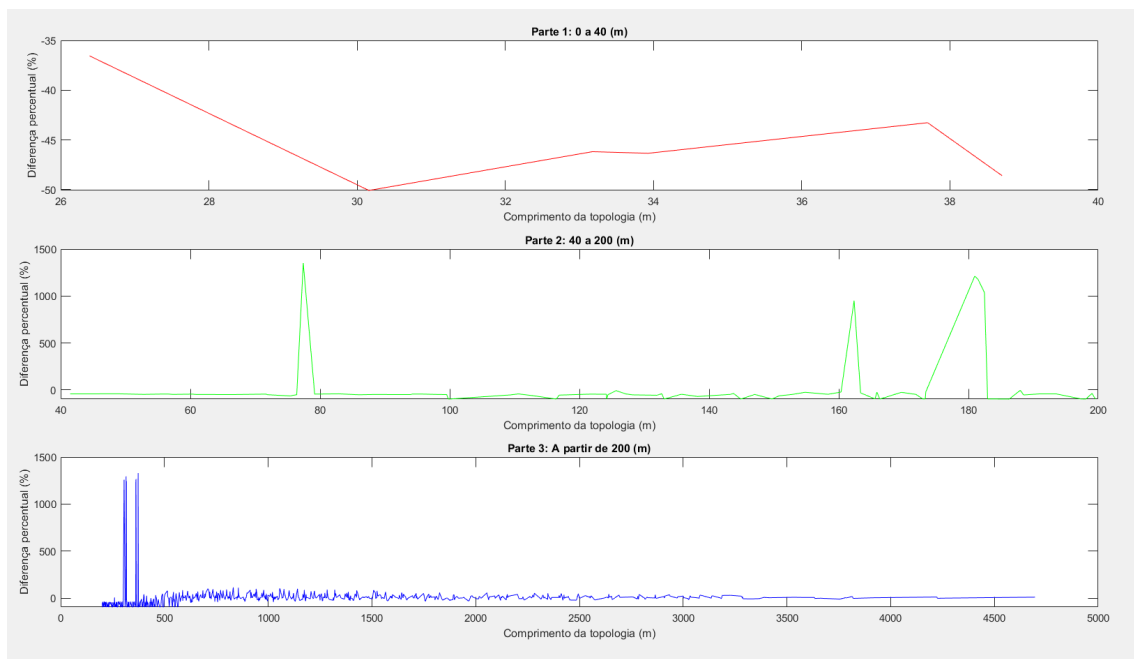


Figura 6.8: Desvio das topologias de 4 bobinas e 5 bobinas (detalhe)

Diferença percentual média:

- 0 a 40 (m): -16,52%
- 40 a 200 (m): -47,90%
- a partir de 200 (m): 16,08%

Como se pode reparar pelos resultados obtidos, existem diferenças expressivas entre topologias consoante o respetivo comprimento total. Dito isto, de modo geral afirma-se que para bobinas mais pequenas (0 a 40 m) não há grande benefício em escolher topologias com mais bobinas, mas para bobinas grandes (maior que 200 m) aconselha-se uma topologia com mais bobinas. Para bobinas médias (40 a 200 m) desaconselha-se aumentar o número de bobinas.

Conclui-se então que a escolha entre a topologia a usar deve ser feita com base no comprimento de fita, sendo que as bobinas grandes atingem valores de indutância bastante superiores caso estejam em grupos de várias bobinas ao contrário de bobinas mais pequenas.

## 6.2 Protótipo

De modo a comprovar a validade dos resultados obtidos na aplicação desenvolvida e a provar a precisão do método de elementos finitos utilizado procedeu-se à elaboração de um protótipo físico de uma SMES, composta por fita supercondutora constituída por YBCO e um molde impresso em 3D.

A figura 6.9 apresenta o protótipo desenvolvido com as seguintes dimensões:

- Raio médio (a): 5,6635 cm
- Numero de espiras (N): 45
- Espessura da fita: 0,125 mm
- Comprimento: 16,013 m

Como se pode ver nas imagens 6.10 e ??, utilizando um medidor de indutância, verifica-se que o protótipo tem uma indutância de 0.414 mH.



Figura 6.9: SMES desenvolvida



Figura 6.10: Indutância protótipo

Ao simular a SMES protótipo no COMSOL Multiphysics obtém-se uma indutância de

0,40544 mH. Para comparar os dois valores utilizamos a seguinte fórmula:

$$\text{Desvio Percentual Indutancia} = \frac{(0,414 - 0,405) \times 100}{0,414} = 2,17\% \quad (6.1)$$

Uma variação de valores tão pequena deve-se muito provavelmente à incerteza da ferramenta utilizada na medição das dimensões do protótipo. Dito isso, uma desvio de 2,17% comprova a precisão da ferramenta utilizada na criação da base de dados.

### 6.3 Resultados

Procedeu-se de seguida à comparação do protótipo com a base de dados e a aplicação desenvolvidas. Para isso, tentou projetar-se uma topologia com parâmetros semelhantes utilizando primeiro, a funcionalidade de obter as topologias com o comprimento desejado, ou seja, 16 m e em segundo, outra topologia com a funcionalidade de obter as topologias com a indutância pretendida, ou seja, com 0,414 mH. Foram utilizados três níveis de precisão, tendo obtido resultados para três níveis de tolerância, um nível mais abrangente, um nível médio e um nível mais restrito, de modo a compará-los. Para efetuar a comparação entre protótipo, utilizou-se a fórmula do desvio percentual 6.2, sendo que quando se compara os comprimentos, sendo  $l$  o comprimento da topologia a comparar, a fórmula fica:

$$\text{Desvio Percentual Comprimento} = \frac{(16,013 - l) \times 100}{16,013} \quad (6.2)$$

Os resultados e as suas respetivas análises estão presentes nas secções seguintes. São apresentados através de uma tabela que tem os desvios percentuais da indutância e do comprimento das topologias obtidas comparadamente ao protótipo físico. Um valor negativo no desvio da indutância indica que o protótipo possui menos indutância do que o resultado obtido, à semelhança do desvio do comprimento, caso negativo indica que o protótipo possui um comprimento menor.

#### 6.3.1 Otimização pelo Comprimento

Para dimensionar a bobina protótipo com a aplicação, utilizou-se a base de dados para encontrar as configurações com 16 m de comprimento e 1,2, 0,6 e 0,2 m de tolerância. Os resultados estão apresentados a seguir.

##### 6.3.1.1 Caso de tolerância de 1,2 metros

Neste caso o valor da tolerância foi abrangente para certificar que o resultado tinha várias configurações de bobinas para visualizar as diferenças entre elas. Na tabela 6.1 e na figura 6.11, estão presentes os dados obtidos.

Tabela 6.1: Tabela dos resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 1,2 m

|             | Número bobinas da configuração | 1       | 2      | 3        | 4        | 5 |
|-------------|--------------------------------|---------|--------|----------|----------|---|
| Indutância  | Valor obtido (mH)              | 0,56187 | 0,1263 | 0,046364 | 0,020791 | X |
|             | Desvio                         | -35,7%  | 69,5%  | 88,8%    | 95,0%    | X |
| Comprimento | Valor obtido (m)               | 16,965  | 16,965 | 16,965   | 16,588   | X |
|             | Desvio                         | -5,9%   | -5,9%  | -5,9%    | -3,6%    | X |

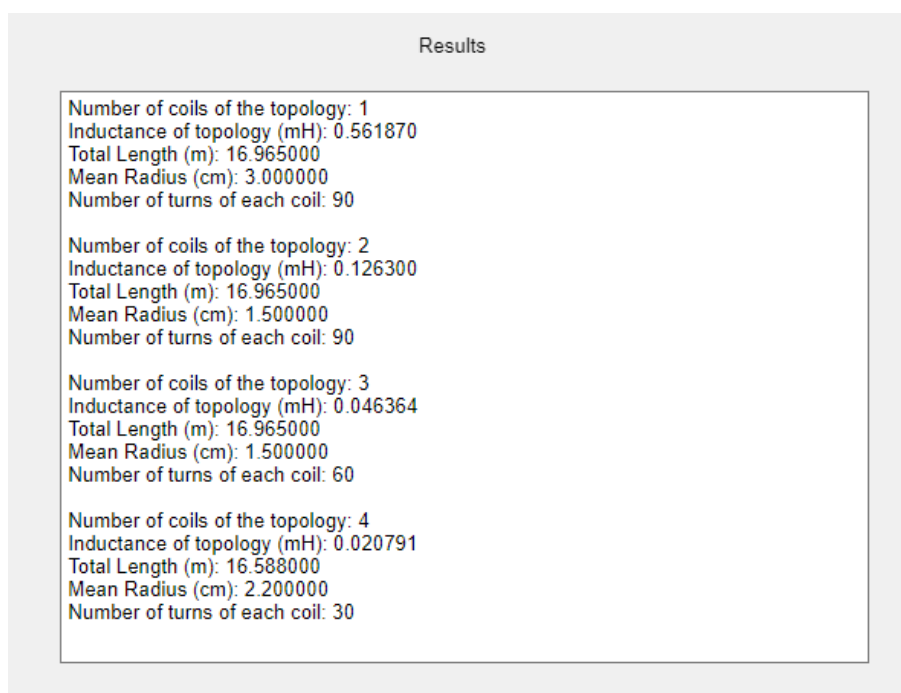


Figura 6.11: Página de resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 1,2 m

Verifica-se que, embora os valores de indutância sejam semelhantes aos do protótipo, possuem um desvio substancial. Obtém-se que a configuração de uma bobina possui um desvio relativamente à indutância de -35,7% e relativamente ao comprimento de -5,9% quando comparados com o protótipo, o que é um valor muito positivo. Mas apesar de a configuração obtida ter mais indutância, considera-se que o aumento necessário no comprimento é demasiado longe do pretendido, concluindo-se assim que é necessário refinar os resultados.

### 6.3.1.2 Caso de tolerância de 0,6 metros

Neste caso diminui-se a tolerância para refinar os resultados obtidos, tendo simulado as configurações com 16 m com uma tolerância de 0,6 m. Na tabela 6.2 e na figura 6.12 estão presentes os resultados obtidos.

Tabela 6.2: Tabela dos resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,6 m

|             |                   | Número bobinas da configuração | 1       | 2       | 3 | 4        | 5 |
|-------------|-------------------|--------------------------------|---------|---------|---|----------|---|
| Indutância  | Valor obtido (mH) |                                | 0,53191 | 0,12066 | X | 0,020791 | X |
|             | Desvio            |                                | -28,5%  | 70,9%   | X | 95,0%    | X |
| Comprimento | Valor obtido (m)  |                                | 16,588  | 16,588  | X | 16,588   | X |
|             | Desvio            |                                | -3,6%   | -3,6%   | X | -3,6%    | X |

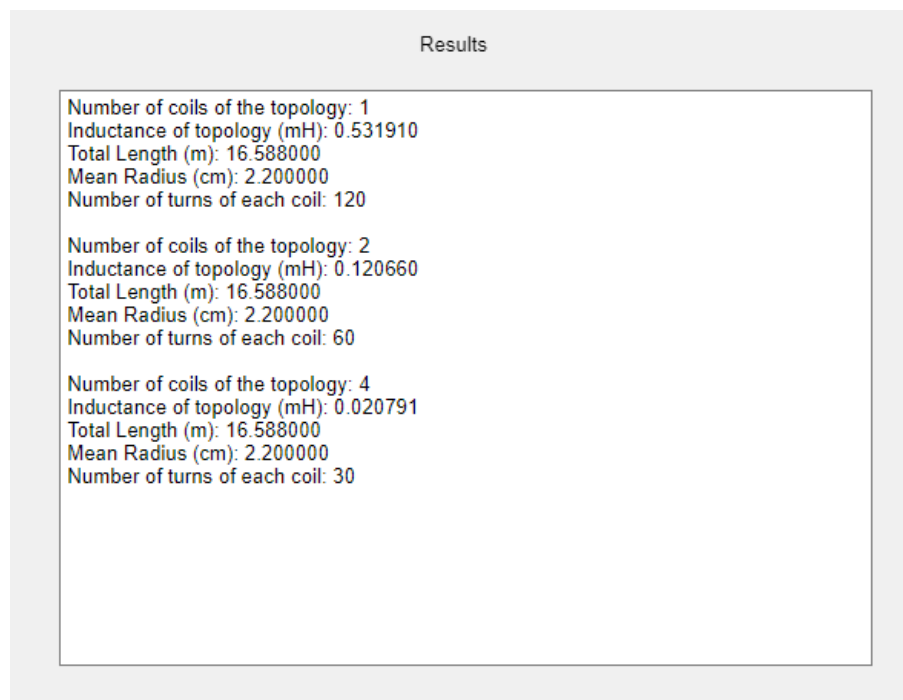


Figura 6.12: Página de resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,6 m

Através dos resultados obtidos, verifica-se que os valores de indutância são bastante próximos relativamente aos obtidos com uma tolerância superior quando comparados aos do protótipo. Verifica-se também que não foram obtidos resultados para configurações de 3 e 5 bobinas.

Através dos resultados obtidos, verifica-se que os valores de indutância são bastante próximos dos obtidos com uma tolerância superior, quando comparados aos do protótipo. Contudo necessitam ainda de serem mais aproximados. Adicionalmente, repara-se que não foram obtidos resultados para as configurações de 3 e 5 bobinas.

### 6.3.1.3 Caso de tolerância de 0,2 metros

Numa tentativa de aproximar ainda mais os resultados, fez-se uma última simulação, desta vez com uma tolerância de apenas 0,2 metros. Na tabela e figura seguintes, 6.3 e

6.13, estão presentes os resultados obtidos.

Tabela 6.3: Tabela dos resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,2 m

|             | Número bobinas da configuração | 1       | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|--------------------------------|---------|---|---|---|---|
| Indutância  | Valor obtido (mH)              | 0,48206 | X | X | X | X |
|             | Desvio                         | -16,4%  | X | X | X | X |
| Comprimento | Valor obtido (m)               | 16,022  | X | X | X | X |
|             | Desvio                         | -0,1%   | X | X | X | X |

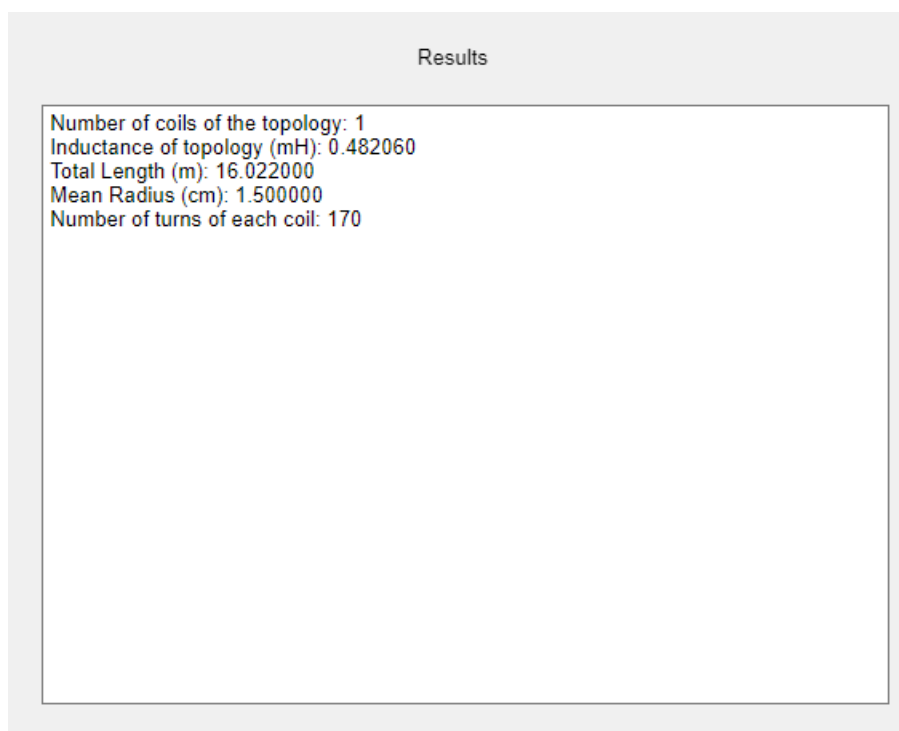


Figura 6.13: Página de resultados obtidos para um comprimento de 16 m e uma tolerância de 0,2 m

Com a tolerância de 0,2 metros, obtiveram-se resultados com um desvio percentual de -16,4% e de -0,1% na indutância no comprimento, respetivamente. É possível concluir relativamente a esta tolerância a base de dados desenvolvida não possui dados suficientes para obter resultados satisfatórios para todas as configurações nesta gama de comprimentos. Apesar disso o resultado obtido foi uma configuração muito satisfatória.

#### 6.3.1.4 Análise de resultados

Face aos resultados obtidos para cada tolerância, repara-se que com uma tolerância de 1,2 m e de 0,6 m os resultados estão um pouco longe do pretendido, apesar de serem

satisfatórios. Enquanto para uma tolerância de 0,2 m se obtém um resultado muito satisfatório. Os resultados mais precisos foram obtidos com a tolerância mais baixa, foram os mais próximos dos do protótipo físico, sendo que seria possível otimizar a configuração utilizada no protótipo modificando-a para ter dimensões presentes na figura 6.13, o que resultaria numa topologia com mais indutância. Se este caminho fosse seguido, obter-se-ia uma configuração com um comprimento 0,1% superior mas com 0,48206 mH, ou seja, com mais 16,4% de indutância face ao protótipo.

Na tabela 6.2 e na figura 6.12 não estão presentes dados referentes às topologias de 3 e 5 bobinas pois a base de dados não possui dados suficientes destas duas topologias nesta região de comprimentos. À semelhança da tabela 6.3 que apenas possui valores para a configuração de 1 bobina. Dito isso, de acordo com a secção 6.1 prevê-se que substituir a topologia encontrada por outra com mais bobinas não apresentaria benefícios dado o comprimento de fita utilizado, afirmação corroborada pelos resultados obtidos também pela figura 6.11. É importante referir que na sua maioria, os resultados obtidos foram semelhantes aos do protótipo na medida que o seu desvio percentual é baixo.

### 6.3.2 Otimização pela Indutância

À semelhança da secção anterior 6.3.1, projetou-se uma topologia com os parâmetros do protótipo, neste caso a indutância. Desta vez foi utilizada a funcionalidade de obter as topologias com o comprimento desejado correspondentes da indutância inserida, para o fazer utilizou-se uma indutância de 0,414 mH com tolerâncias de 0,08, 0,02 e 0,003 mH.

#### 6.3.2.1 Caso de tolerância de 0,08 mH

À semelhança do que se fez anteriormente na secção 6.3.1.1, iniciou-se uma simulação com uma tolerância elevada para obter resultados abrangentes, obtendo-se resultados para todas as configurações, que estão representados na tabela 6.4 na figura 6.14.

Tabela 6.4: Tabela dos resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH m e uma tolerância de 0,08 mH

|             |                   | Número bobinas da configuração | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       |
|-------------|-------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Indutância  | Valor obtido (mH) |                                | 0,35522 | 0,34183 | 0,3425  | 0,35113 | 0,3467  |
|             | Desvio            |                                | 14,2%   | 17,4%   | 17,3%   | 15,2%   | 16,3%   |
| Comprimento | Valor obtido (m)  |                                | 13,195  | 30,159  | 50,894  | 75,398  | 103,67  |
|             | Desvio            |                                | 17,6%   | -88,3%  | -217,8% | -370,9% | -547,4% |

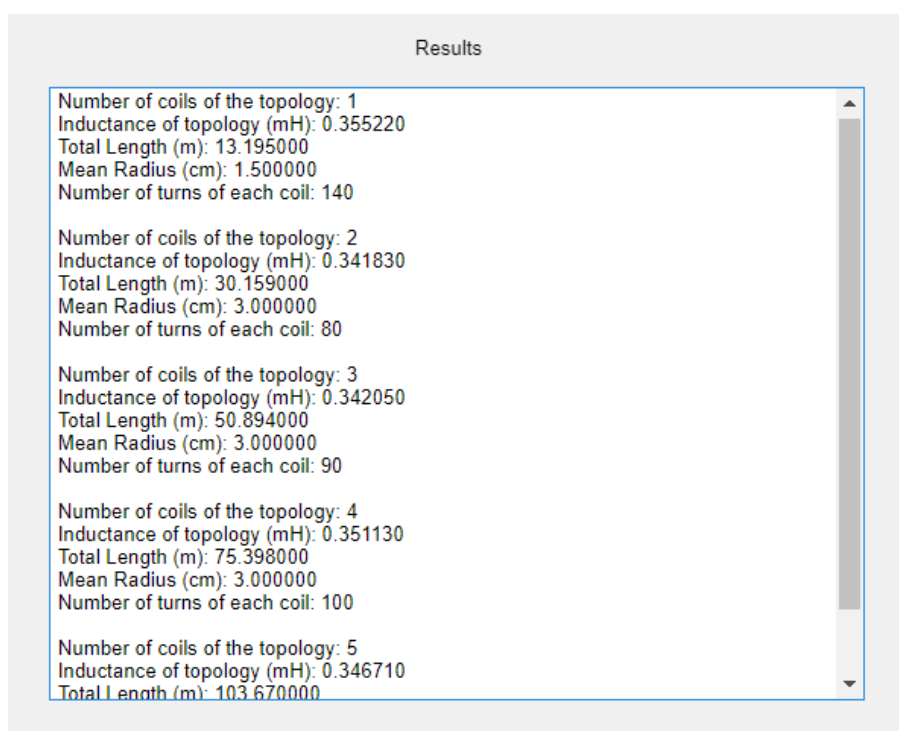


Figura 6.14: Página de resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH e uma tolerância de 0,08 mH

Como se pode ver pelos resultados, a tolerância foi demasiado abrangente, os resultados obtidos contemplam configurações de bobinas com valores afastados do pretendido, obtendo valores de comprimento nada satisfatórios.

### 6.3.2.2 Caso de tolerância de 0,02 mH

Mais uma vez a tolerância aplicada foi diminuída de modo a tentar obter correspondências mais satisfatórias na base de dados. Na tabela 6.5 e na figura 6.15 estão presentes os resultados obtidos, desta vez para uma tolerância de 0,02 mH.

Tabela 6.5: Tabela dos resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH m e uma tolerância de 0,02 mH

|             |                   | Número bobinas da configuração | 1      | 2       | 3       | 4       | 5       |
|-------------|-------------------|--------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Indutância  | Valor obtido (mH) |                                | 0,3962 | 0,415   | 0,41458 | 0,4042  | 0,424   |
|             | Desvio            |                                | 4,3%   | -0,2%   | -0,1%   | 2,4%    | -2,4%   |
| Comprimento | Valor obtido (m)  |                                | 14,137 | 33,175  | 56,549  | 82,938  | 113,1   |
|             | Desvio            |                                | 11,7%  | -107,2% | -253,1% | -417,9% | -606,3% |

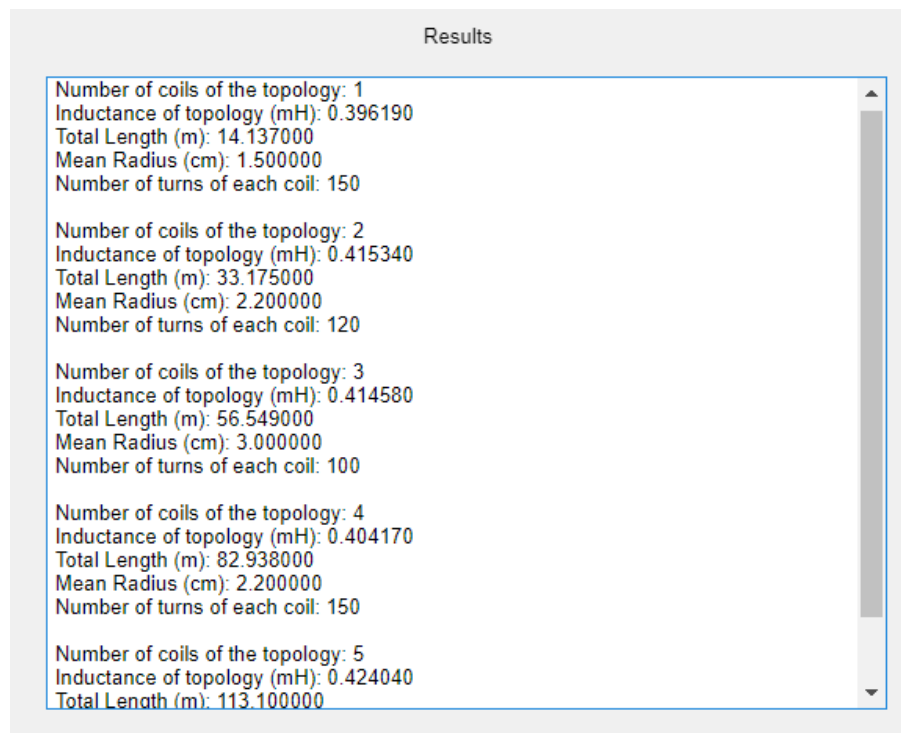


Figura 6.15: Página de resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH e uma tolerância de 0,02 mH

Com esta tolerância verificou-se que os resultados obtidos foram, na sua maioria, bastante semelhantes aos obtidos recorrendo a tolerância anterior. A topologia mais satisfatória foi a configuração de 1 bobina com um desvio de 4,3% na indutância e de 11,7% no comprimento. Este resultado foi bastante satisfatório mas as restantes configurações obtidas possuíam valores de comprimento muito distantes do pretendido.

### 6.3.2.3 Caso de tolerância de 0,003 mH

A terceira simulação foi realizada com uma tolerância ainda menor, na tabela 6.6 e na figura 6.16 estão os resultados obtidos.

Tabela 6.6: Tabela dos resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH m e uma tolerância de 0,003 mH

|             |                   | Número bobinas da configuração | 1       | 2       | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-------------------|--------------------------------|---------|---------|---|---|---|
| Indutância  | Valor obtido (mH) |                                | 0,41534 | 0,41458 | X | X | X |
|             | Desvio            |                                | -0,3%   | -0,1%   | X | X | X |
| Comprimento | Valor obtido (m)  |                                | 33,175  | 56,55   | X | X | X |
|             | Desvio            |                                | -107,2% | -253,2% | X | X | X |

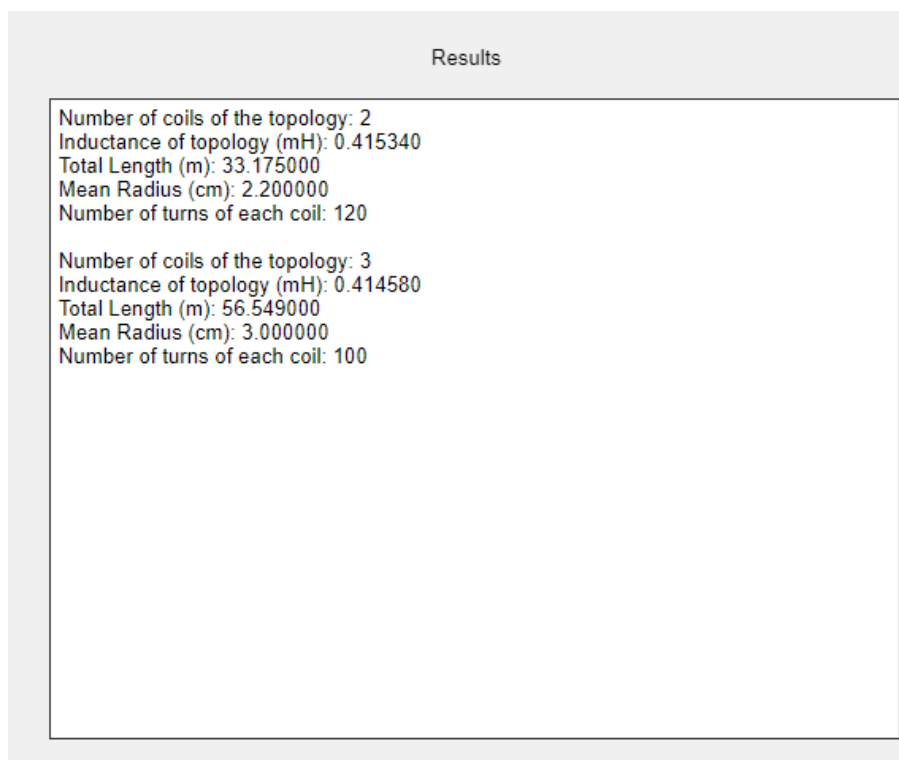


Figura 6.16: Página de resultados obtidos para uma indutância de 0,414 mH e uma tolerância de 0,003 mH

A configuração obtida foi a mesma da secção 6.3.2.2, verifica-se assim que não foi possível refinar os resultados com esta simulação, mais uma vez os comprimentos das configurações de bobinas tinham desvios muito elevados.

#### 6.3.2.4 Análise de resultados

Diante dos resultados obtidos na otimização pela indutância, para as várias tolerâncias verifica-se que as simulações resultaram em resultados abrangentes e longes do pretendido quanto ao comprimento da configuração. Quanto à indutância possuíram um desvio muito reduzido.

Na simulação com o valor de tolerância mais baixo, 0,003 mH, numa tentativa de refinar os resultados, as únicas topologias encontradas foram as de 2 e 3 bobinas.

Para o valor intermédio e para o valor superior de tolerâncias, obteram-se valores de comprimento bastante distantes do protótipo. Para a tolerância mais reduzida os resultados obtidos foram um pouco mais satisfatórios embora com um desvio do comprimento ainda significativo.

Repara-se também que, globalmente os resultados foram, na sua maioria distantes no comprimento mas muito precisos na indutância quando comparados aos do protótipo.

## CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

### 7.1 Conclusões

Ao longo desta dissertação foi realizada a análise e demonstração da ferramenta desenvolvida, denominada *SMES Design Tool*, com o intuito de assistir e otimizar a construção de sistemas *SMES*. Começou por se abordar o estado de arte da tecnologia, observando tanto a história dos supercondutores como também os materiais que compõe as fitas supercondutoras constituinte de todos os sistemas *SMES* e de alguns projetos existentes atualmente que empregam um sistema deste tipo. Foi feita uma análise do funcionamento de uma *SMES*, em que se reduziu as *SMES* a bobinas supercondutoras e se introduziu algumas fórmulas utilizadas ao longo da dissertação.

Apresentaram-se as vários componentes destes sistemas de modo a providenciar uma introdução do objetivo de uma *SMES* e de como usar um sistema destes é benéfico. O caso utilizado para o demonstrar foi o de diminuir a taxa de distorção harmónica da corrente de um circuito com uma carga não linear de modo a melhorar a qualidade de energia de uma fonte de energia eléctrica. Isto foi demonstrado com sucesso recorrendo a um modelo de SIMULINK criado numa dissertação anterior por um outro aluno (Simões, 2021) e a um sinal parametrizado de modo a possuir harmónicas com 150 e 250 Hz.

Posteriormente, foi apresentada a metodologia usada na elaboração da base de dados e da interface gráfica. Para criar a base de dados utilizou-se o programa do método de elementos finitos COMSOL Multiphysics e para criar a interface gráfica utilizou-se a ferramenta *App Designer* do MATLAB. No capítulo seguinte abordou-se a implementação de ambas e a composição da interface gráfica. Nos anexos, a secção I tem presente um manual do utilizador.

Esta secção tem presente uma explicação detalhada de cada página que a constitui composto por:

- Objetivo da aplicação.

- Requisitos do sistema.
- Guia de instalação.
- Descrição das principais funcionalidades.
- Descrição de como navegar na aplicação.
- Lista de limitações do programa e bugs a evitar.

Por último esta dissertação tem presente um capítulo que reúne os resultados obtidos e a sua análise crítica.

Apesar de os resultados obtidos nas duas últimas secções (6.3.1 e 6.3.2) possuírem um desvio comparativamente aos do protótipo, consideram-se bastante satisfatórios, dado que foram obtidos resultados muito próximos dos valores do protótipo. Os maiores desvios correram na secção 6.3.2, referente à otimização pela indutância. As configurações obtidas possuíam um desvio do comprimento muito elevado mas um desvio de indutância quase nulo, sendo difícil encontrar um meio termo. Na secção 6.3.1 os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, obtendo valores de desvio de comprimento e indutância reduzidos. Os resultados obtidos com a tolerância mais reduzida foram mais satisfatórios e corresponderam ao pretendido, é portanto, importante ressaltar que, mesmo com os desvios apresentados e discutidos neste capítulo, o desempenho geral da ferramenta desenvolvida correspondeu às expectativas iniciais, demonstrando a precisão da base de dados, assim como a eficácia da interface gráfica. Considera-se assim que a ferramenta desenvolvida é um sucesso devido ao seu bom funcionamento aqui demonstrado. Dito isso, a funcionalidade da otimização pelo comprimento é mais robusta, enquanto que a funcionalidade de otimização pela indutância tem um desempenho mais limitado e indicado apenas para cenários específicos.

## 7.2 Trabalho Futuro

De modo a melhorar a ferramenta desenvolvida como trabalho futuro, a base de dados poderia ser alargada, aumentar a densidade de dados apresentada e discutida nas figuras 5.5, II.1, II.2, II.3 e II.4 e alargar os dados obtidos para bobinas com fitas supercondutoras com outro tipo de dimensões, com altura e espessuras diferentes. Nesse sentido, será necessário modificar a interface gráfica para acomodar estas mudanças.

Outra mudança a realizar seria criar a interface gráfica numa linguagem de programação mais eficiente, visto que ser desenvolvida em MATLAB faz com que seja preciso que o utilizador tenha o MATLAB runtime, que apesar de estar disponível para todos os utilizadores, adiciona complexidade indesejada ao programa.

## BIBLIOGRAFIA

- Abbas, W., & Saqib, M. A. (2007). Effect of Nonlinear Load Distributions on Total Harmonic Distortion in a Power System. *2007 International Conference on Electrical Engineering*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEE.2007.4287356> (ver pp. 8–10).
- Alexander, C. K., & no Sadiku, M. (2000). Electric circuits. *Transformation*, 135, 4–5 (ver pp. 13, 14).
- Amaro, N. M. O. (2015, dezembro). *Study of AC losses in medium-sized high temperature superconducting coils* [Dissertação de doutoramento, NOVA School of Science and Technology]. Obtido 2024-08-05, de <https://run.unl.pt/handle/10362/16554> (ver p. 28).
- Babic, S. I., & Akyel, C. (2008). Calculating mutual inductance between circular coils with inclined axes in air. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(7), 1743–1750 (ver p. 14).
- Boenig, H. J., & Hauer, J. F. (1985). Commissioning Tests Of The Bonneville Power Administration 30 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage Unit. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(2), 302–312. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.319044> (ver p. 18).
- Braga, I. N. C. (s.d.). Sinal complexo decomposto em componentes cujas frequências são múltiplas, até o infinito [Accessed: 2024-06-15]. <https://www.newtonbraga.com.br/?view=article&id=10522> (ver p. 9).
- Bussmann-Holder, A., & Keller, H. (2020). High-temperature superconductors: underlying physics and applications. *Zeitschrift für Naturforschung B*, 75(1-2), 3–14. <https://doi.org/doi:10.1515/znb-2019-0103> (ver p. 4).
- Cadence. (s.d.). The non-sinusoidal periodic voltage can be decomposed into sinusoidal voltages of fundamental frequency and frequencies that are integer multiples of the fundamental frequency. [Accessed: 2024-06-15]. <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2020-total-harmonic-distortion-thd-power-factor-measurements-for-voltage-and-current-distortions> (ver p. 9).
- CERN. (s.d.). Prototype Roebel cable to be used to wind a HTS accelerator demonstration dipole [Accessed: 2024-06-15]. <https://cds.cern.ch/record/1744900> (ver p. 7).

- ERSE. (2023). Regulamento n.º 826/2023: Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço dos setores elétrico e gás [Aprovado pelo Conselho de Administração em 17 de julho de 2023]. [https://www.erse.pt/media/rx0n51ds/regulamento-n-%C2%BA-826\\_2023\\_mpbs\\_capa\\_%C3%ADndice.pdf](https://www.erse.pt/media/rx0n51ds/regulamento-n-%C2%BA-826_2023_mpbs_capa_%C3%ADndice.pdf) (ver p. 2).
- Haus, H. A., & Melcher, J. R. (1989). *Electromagnetic fields and energy* (Vol. 107). Prentice Hall Englewood Cliffs. (Ver p. 13).
- Huebener, R. P. (2021). *History and Theory of Superconductors: A Compact Introduction*. Springer Nature. (Ver pp. 3, 4).
- Hughes, T. J. (2000). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis* (2nd). John Wiley & Sons. (Ver p. 31).
- Hull, J. R. (2003). Applications of high-temperature superconductors in power technology. *Reports on Progress in Physics*, 66(11), 1865 (ver p. 4).
- Jagota, V., Preet, A., Sethi, S., & Kumar, K. (2013). Finite Element Method: An Overview. <http://wjst.wu.ac.th> (ver p. 30).
- Kozak, J., Kozak, S., Janowski, T., & Majka, M. (2009). Design and Performance Results of First Polish SMES. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 1981–1984. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2018753> (ver p. 18).
- Krasnoperov, E. P., Sychugov, V. V., Guryev, V. V., Shavkin, S. V., Krylov, V. E., & Volkov, P. V. (2020). 2G HTS tape and double pancake coil for cryogen-free superconducting magnet. *Electrical Engineering*, 102(3), 1769–1774. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-00977-w> (ver p. 17).
- Lourenço, J. M. (2021). *The NOVAthesis L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. <https://github.com/joamlourenco/novathesis/raw/main/template.pdf> (ver p. i).
- Magnetics, A. (s.d.). SMES system [Accessed: 2024-06-15]. <https://www.windpowerengineering.com/wp-content/uploads/2017/08/smes.gif> (ver p. 12).
- Mukherjee, P., & Rao, V. (2019). Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications - A review. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 563, 67–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.05.001> (ver pp. 8, 16).
- Nagaya, S., Hirano, N., Katagiri, T., Tamada, T., Shikimachi, K., Iwatani, Y., Saito, F., & Ishii, Y. (2012). The state of the art of the development of SMES for bridging instantaneous voltage dips in Japan [Special Issue: ACASC 2011]. *Cryogenics*, 52(12), 708–712. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2012.04.014> (ver pp. 7, 17, 19).
- Okumoto, Y., Takeda, Y., Mano, M., & Okada, T. (2009). *Design of ship hull structures: A practical guide for engineers*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88445-3> (ver pp. 30, 31).
- Papageorgiou, P. G., Oureilidis, K. O., & Christoforidis, G. C. (2023). A systematic review of hybrid superconducting magnetic/battery energy storage systems: Applications, control strategies, benefits, limitations and future prospects. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 183, 113436. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113436> (ver p. 8).
- Pina, J. M. M. (2010). Desenho e modelização de sistemas de energia empregando materiais supercondutores de alta temperatura (ver pp. 3, 4, 13).
- Rogalla, H., & Kes, P. H. (2011). *100 years of superconductivity*. Taylor & Francis. (Ver pp. 8, 17–19).
- Schottler, R., & Coney, R. (1999). Commercial application experiences with SMES. *Power Engineering Journal*, 13(3), 149–152. <https://doi.org/10.1049/pe:19990308> (ver p. 18).
- Selvamanickam, V. (2012). 2 - High temperature superconductor (HTS) wires and tapes. Em Z. Melhem (Ed.), *High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications* (pp. 34–68). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857095299.1.34> (ver pp. 5, 6).
- Simões, F. L. G. (2021). *Assessment of Using Superconducting Magnetic Energy Storage for Current Harmonic Compensation Polytechnic Institute of Setúbal*. <http://hdl.handle.net/10362/133296> (ver pp. 23, 60).
- Stroski, P. N. (s.d.). Comparação entre tipo I e II de supercondutores [Accessed: 2024-06-15]. <https://www.electricalibrary.com/en/2019/11/27/the-superconductivity-phenomenon/> (ver p. 4).
- Tixador, P. (2013). *Superconducting magnetic energy storage (SMES) systems*. <https://doi.org/10.1533/9780857097378.3.442> (ver pp. 11, 12, 15, 18).
- Tixador, P., et al. (s.d.). Superconducting magnetic energy storage: Status and perspective (ver p. 15).
- Uglietti, D. (2019). A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors. *Superconductor Science and Technology*, 32(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab06a2> (ver p. 6).
- Yao, C., & Ma, Y. (2021). Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications. *Iscience*, 24(6) (ver p. 5).
- Yuan, W. (2011). Development of SMES Systems. Em *Second-Generation High-Temperature Superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage* (pp. 25–37). Springer London. [https://doi.org/10.1007/978-0-85729-742-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-742-6_3) (ver pp. 11, 13).

## ANEXO 1 - MANUAL DO UTILIZADOR

1 - Esta aplicação tem como público alvo pessoas que se queiram familiarizar com alguns termos do tema SMES e pessoas, nomeadamente estudantes do ensino superior que necessitem de uma ferramenta de dimensionamento de bobinas, tendo como objetivo ajudar no design de uma bobina supercondutora (SMES) através da otimização de alguns dos seus parâmetros, como o a indutância e o comprimento de fita supercondutora. O programa também pode ser utilizado para bobinas de materiais não supercondutores mas a base de dados nativa contém dados referentes apenas a uma bobina supercondutora com parâmetros definidos (ver secção 5.1), logo os resultados podem não corresponder ao desejado caso seja usado para bobinas de outros materiais.

2 - Para utilizar esta aplicação, é necessário o MATLAB runtime. Caso o utilizador possua o MATLAB instalado, para utilizar a aplicação é só correr o ficheiro executável, caso não possua, a pasta disponibilizada possui um ficheiro executável que instala o MATLAB runtime. É necessário um espaço livre em disco de 2,12 GB.

3- Na pasta transferida do github estão presentes 2 subpastas: a primeira contém o executável para quem não possui o MATLAB instalado e o quer instalar, (após concluir a instalação, é criado um atalho para o programa); a segunda contém o executável do programa, destinando-se a utilizadores que já tenham o MATLAB instalado. Esta última opção é a recomendada.

4 - As principais funções da aplicação são encontrar as topologias de bobinas correspondentes aos dados inseridos pelo utilizador e ordenar os resultados obtidos consoante o comprimento de fita supercondutora ou a indutância da bobina e mostrar um esboço da bobina obtida.

5 - A interface da aplicação é bastante simples, todas as janelas possuem um botão para retornar à página anterior (a) e um botão para sair completamente do programa (b), possuem também um botão para proceder á próxima página (c) e quando necessário

um botão para submeter os dados inseridos (d), por vezes o mesmo botão serve para submeter dados e passar á página seguinte. Existem também dois botões que funcionam como interruptores (e) para selecionar uma de duas opções.

6 - Para o bom funcionamento da aplicação, siga sempre as indicações das caixas de texto apresentadas, devendo respeitar as unidades indicadas de modo a obter resultados apropriados. Quando submeter valores certifique-se de que inseriu uma tolerância razoável (poderá refinar a sua pesquisa diminuindo depois o seu valor). Quando o programa pedir nomes de ficheiros, certifique-se que todos foram lidos corretamente e, caso algum não tenha sido corrija-o e submeta de novo, só depois passe à página seguinte. Caso não possua dados para todas as topologias do programa recomenda-se que se utilize a base de dados nativa da aplicação.

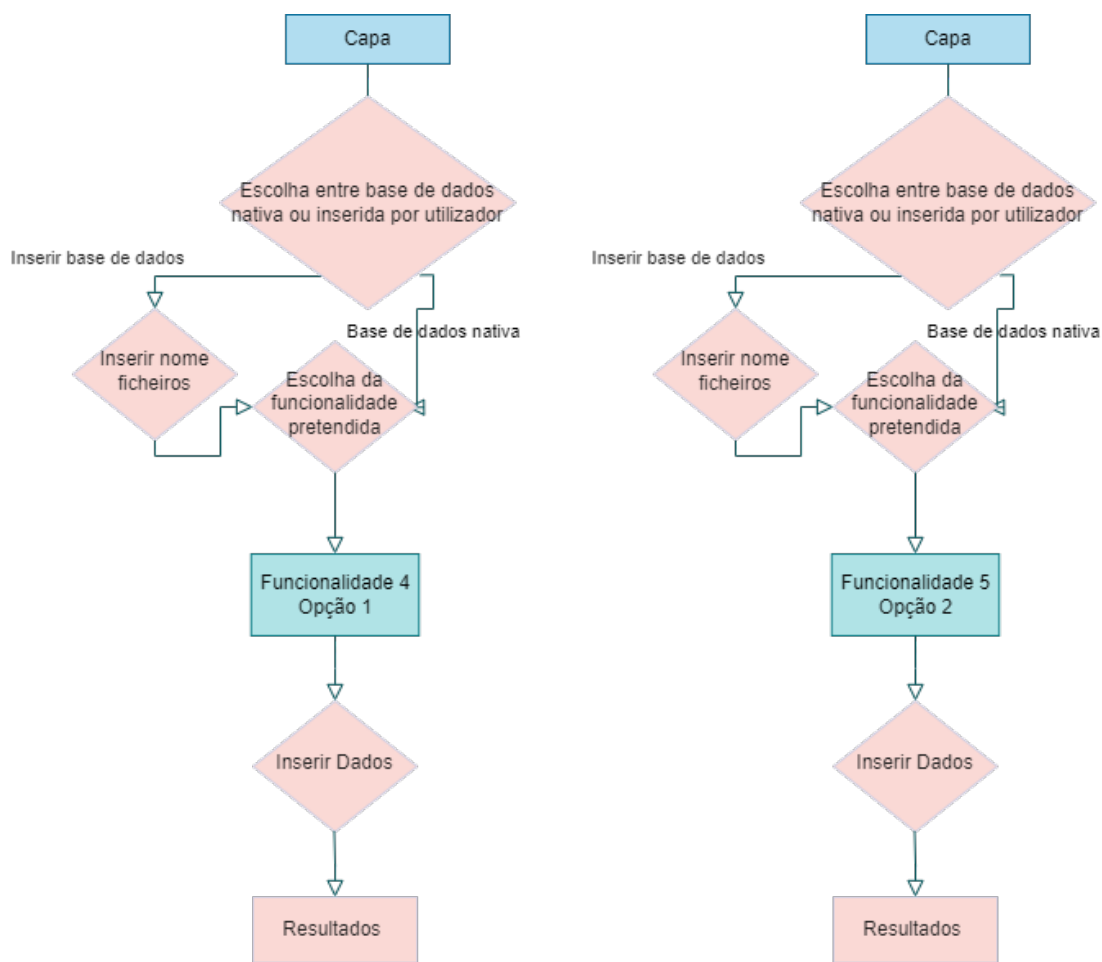


Figura I.1: Diagramas de como utilizar as funcionalidades 4 e 5

## ANEXO 2 - FIGURAS DIVERSAS

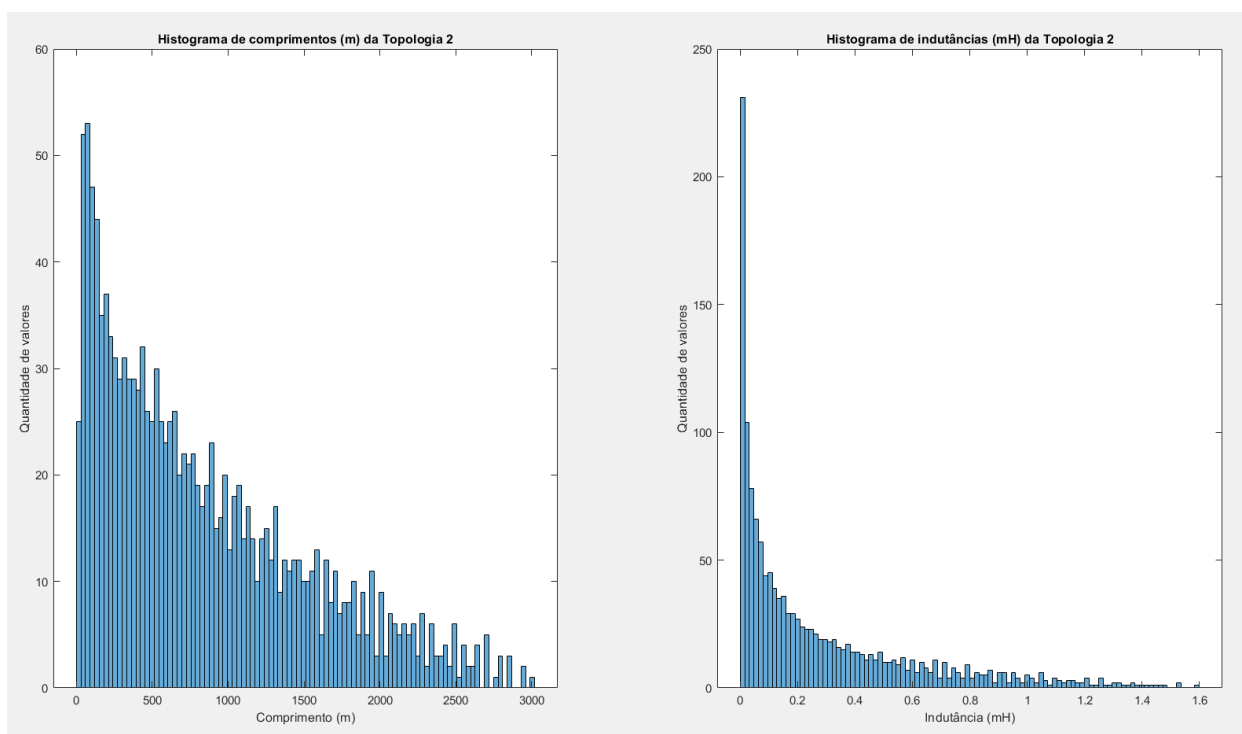


Figura II.1: Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 2 bobinas

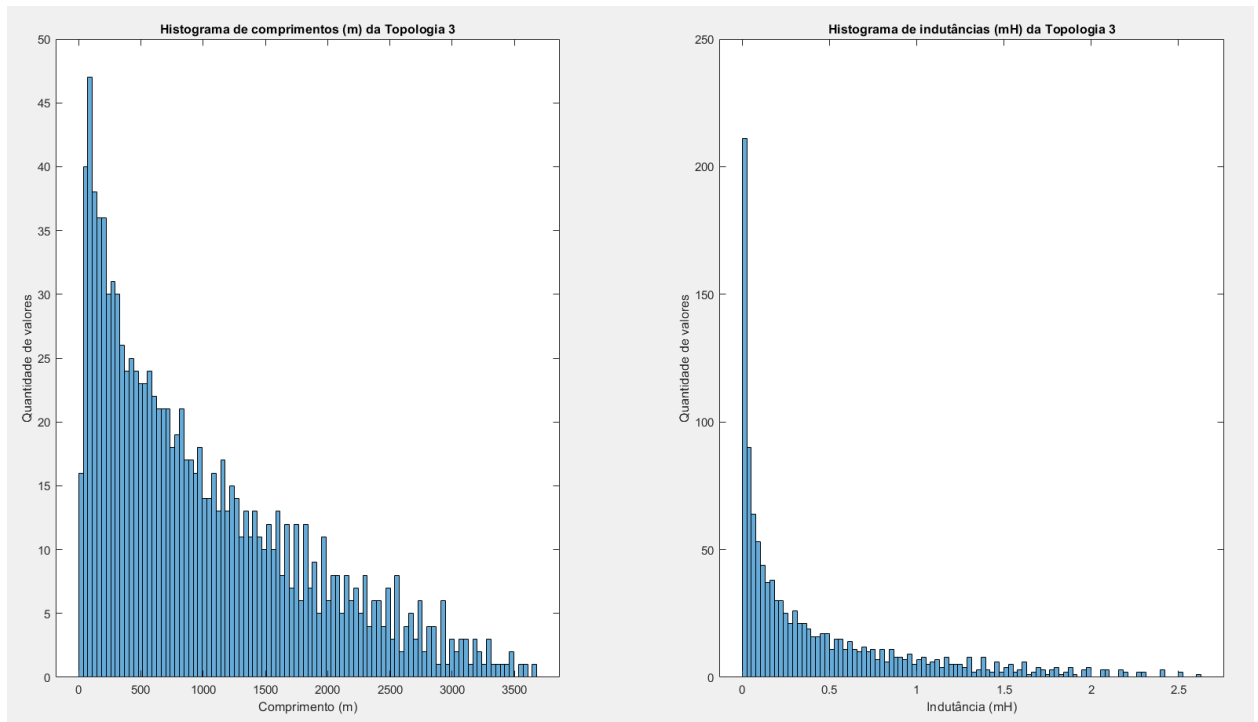


Figura II.2: Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 3 bobinas

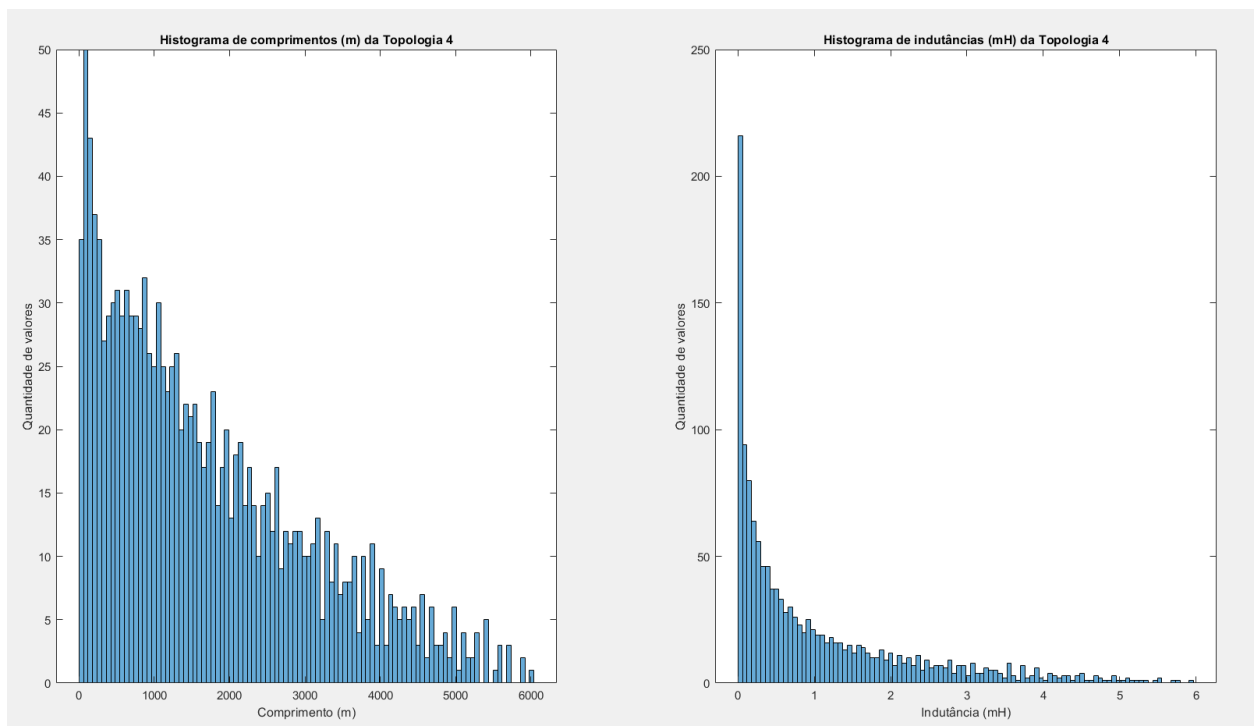


Figura II.3: Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 4 bobinas

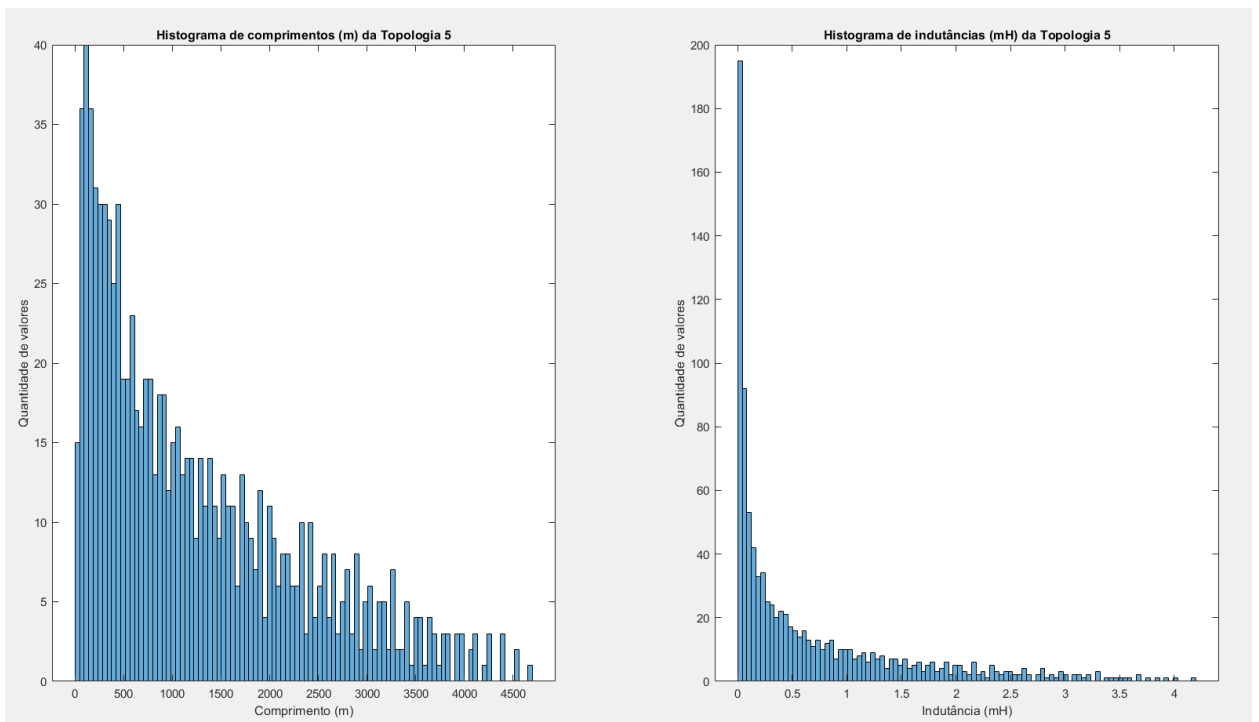


Figura II.4: Histograma da densidade de dados da base de dados para a configuração de 5 bobinas



2024

Desenvolvimento de uma ferramenta de design e otimização de sistemas SMES (superconducting magnetic energy storage): Dissertação de mestrado

André Gonçalves

**Nova**

UNIVERSITY OF  
LISBON

SCHOOL OF  
ENGINEERING

DEPARTMENT OF  
ELECTRICAL ENGINEERING

TECHNOLOGY