



NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E
DE COMPUTADORES

ALEXANDRE MANUEL SILVA CARDOSO

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e
de Computadores

PREVISÃO DE PERDAS AC EM TRANS- FORMADORES SUPERCONDUTORES POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE
COMPUTADORES
Universidade NOVA de Lisboa
Janeiro, 2023

PREVISÃO DE PERDAS AC EM TRANSFORMADORES SUPERCONDUTORES POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Alexandre Manuel Silva Cardoso

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

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

Coorientadores: Mestre Masoud Ardestani,
Mestre, FCT-NOVA

Júri:

Presidente: Doutor José Manuel Matos Ribeiro da Fonseca,
Professor Associado, FCT-NOVA

Arguentes: Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

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

Previsão de perda AC em transformadores supercondutores por inteligência artificial

Copyright © Alexandre Manuel Silva Cardoso, 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

Com o terminar desta dissertação, quero deixar um especial agradecimento aqueles que contribuíram para a sua concretização:

Ao Professor Doutor João Murta Pina por toda a ajuda disponibilizada e por todo o trabalho;

Ao Professor Nuno Vilhena e ao Mestre Massoud pelos conselhos e ajuda disponibilizada na concretização da parte laboratorial;

Aos professores do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pelos conhecimentos transmitidos;

À minha família em especial, aos meus pais e ao meu irmão por toda a incansável paciência, motivação e apoio demonstrado;

À minha namorada por me encorajar, pela ajuda incessante em todas as horas e dias gastos a desenvolver este trabalho e por todo o carinho ao longo deste processo;

Aos meus amigos por toda a motivação e pela boa disposição ao longo destes anos, principalmente nesta etapa.

"Só vou por onde me levam meus próprios passos..."
(José Régio).

RESUMO

Atualmente, verifica-se um aumento da corrente na rede elétrica, existindo a necessidade de procurar soluções. Neste sentido, surge a supercondutividade aplicada a equipamentos da rede (*e.g.*, transformadores). Todavia, a sua utilização tem demonstrado algumas problemáticas, nomeadamente associadas às perdas AC, devido à necessidade de manutenção da temperatura criogénica inerente ao custo associado. De modo a reduzir estas perdas é necessária a modulação e simulação dos dispositivos. Usualmente esta é feita utilizando métodos numéricos, aos quais estão associados a necessidade de um poder computacional significativo e um processo demoroso. Neste sentido, desenvolveu-se este trabalho que se encontra inserido no projeto tLoss, utilizando um modelo com recurso a redes neuronais baseado em dados, que pretende tornar mais acessível a determinação das perdas AC associadas a equipamentos supercondutores. Foram utilizadas duas redes neuronais distintas, uma para as bobinas sem estarem acopladas a um núcleo e outra associada às bobinas quando acopladas ao núcleo, recebendo os dados de saída da anterior, sendo estes ensaios distintos e realizados em laboratório. Assim sendo, através desta abordagem foi possível obter a determinação das perdas AC de uma forma rápida, utilizando apenas uma descrição dos dispositivos.

Palavras chave: Supercondutores, Rede Neuronal, Perdas AC, Transformadores.

ABSTRACT

Currently, there is an increase in current in the electric grid, and there is a need to search solutions. In this sense, superconductivity appears applied to network equipment (e.g., transformers). However, its use has shown some issues, namely associated with AC losses, due to the need to maintain the cryogenic temperature inherent to the associated cost. In order to reduce these losses, is necessary the modulation and simulation of the devices. Usually this is done using numerical methods, which are associated with the need for significant computational power and a time-consuming process. In this sense, this work was developed, which is part of the tLoss project, with a model using neural networks based on data, which aims to make the determination of AC losses associated with superconducting equipment more accessible. Two distinct neural networks were used, one for the coils without being coupled to any core and another associated with the coils coupled to the core, receiving the output data from the previous one, these tests being different and carried out in the laboratory. Therefore, through this approach it was possible to obtain the determination of AC losses quickly, using only a description of the devices.

Keywords: Superconductors, Neural Network, AC Losses, Transformers.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto e Motivação	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Abordagem e Contribuições.....	2
1.4	Organização do Documento.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Supercondutividade	3
2.1.1	Enquadramento Histórico.....	3
2.1.2	Propriedades Macroscópicas.....	5
2.1.3	Tipos de Supercondutores	7
2.1.4	Perdas AC Associadas a SC	8
2.1.5	Maciços e Fitas.....	10
2.2	Dispositivos Supercondutores.....	12
2.3	Transformadores	13
2.3.1	Funcionamento e Principais Características.....	13
2.3.2	Perdas Magnéticas	15
2.3.3	Transformadores Supercondutores	16
2.4	Redes Neurais.....	17
2.5	Estudos Relacionados	18
3	PARTE EXPERIMENTAL	21

3.1	Materiais e Métodos	21
3.1.1	Bobinas	21
3.1.2	Crióstatos	23
3.1.3	Ensaio.....	24
3.1.4	Núcleo	29
3.2	Resultados.....	31
3.2.1	Caracterização da Fita Supercondutora	31
3.2.2	Característica do Núcleo	32
3.2.3	Ensaio sem Núcleo	34
3.2.4	Ensaio com núcleo.....	35
4	MODELAÇÃO DAS REDES NEURONAIS.....	39
4.1	Metodologia e Objetivos do Projeto tLoss	39
4.2	Rede Neuronal da Bobina.....	41
4.3	Rede Neuronal do Transformador.....	44
5	CONCLUSÃO	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 — Evolução da T_c dos materiais SC ao longo dos anos, adaptado de [4].	5
Figura 2.2— Comparação lado a lado da reação de um material supercondutor e de um condutor perfeito quando sujeitos a um campo magnético (antes e após a passagem da T_c), adaptado de [6].	6
Figura 2.3— Gráfico da zona em que se encontram reunidas as condições para a supercondução em relação à temperatura, campo magnético e densidade de corrente críticos, adaptado de [8].	7
Figura 2.4— Gráficos do campo magnético em função da temperatura, para supercondutores do tipo II e I, a) e b) respetivamente, N - zona de estado normal, S - zona de supercondução, M - zona mista, adaptado de [9].	8
Figura 2.5— Esquema representativo das diferentes categorias de perdas associadas a um SAT.	9
Figura 2.6— Maciços em forma de disco e anel [20].	10
Figura 2.7 — Exemplo da composição de uma fita de segunda geração, adaptado de [22].	11
Figura 2.8 — Esquema representativo dos componentes básicos de um transformador. Adaptado de [29].	14
Figura 2.9 — Esquema equivalente de um transformador.	15
Figura 2.10 — a) Enrolamentos supercondutores (T1-T3 indicam os pontos de aquisição das medições de temperatura). b) Crióstato antes da instalação das bobinas (adaptado de [37]).	17
Figura 2.11— RNA simples, adaptado de [42].	18
Figura 2.12— Relação entre os dados previstos e os obtidos por simulação, adaptado de [43].	19

Figura 3.1 — a) Suporte para os enrolamentos impresso numa impressora 3D. b) Placas de cobre usadas para a conexão à fita supercondutora.....	22
Figura 3.2 — a) Crióstato utilizado para a contenção do azoto líquido. b) Ferramenta utilizada para esculpir o crióstato.	24
Figura 3.3 — a) Autotransformador utilizado nos ensaios. b) Placa de especificações de um dos três transformadores utilizados.	25
Figura 3.4 — Conector utilizado para a junção em paralelo dos três transformadores.....	25
Figura 3.5 — a) Aparelhos utilizados no ensaio sem núcleo. b) Esquema do ensaio sem núcleo.	26
Figura 3.6 — Exemplo de sinal extraído do osciloscópio. A rosa a corrente e a amarelo a tensão.	27
Figura 3.7 — Exemplo do esquema do circuito secundário de um transformador composto pelas resistências R1, R2 e R3.....	28
Figura 3.8 — Montagem do ensaio com núcleo.....	29
Figura 3.9 — Esquemático do ensaio para obtenção da curva B-H do núcleo.....	31
Figura 3.10 — Gráfico da evolução das perdas associadas à fita supercondutora, consoante o aumento da corrente para os diferentes tipos de fita. As expressões apresentadas estão associadas ao método dos mínimos quadrados.....	32
Figura 3.11 — Gráfico da característica B-H do núcleo e da aproximação realizada à mesma. a) Curva B-H completa; b) Secção linear da curva B-H.....	33
Figura 3.12 — Gráfico da variação das perdas associadas ao ensaio sem núcleo, consoante a variação da corrente.....	35
Figura 3.13 — Gráfico da variação das perdas associadas ao ensaio com núcleo, consoante a variação da corrente.....	36
Figura 4.1 — Esquemático representativo do modelo das redes neuronais utilizadas.....	40
Figura 4.2 — Estrutura da rede neuronal final que obteve o melhor desempenho.....	42
Figura 4.3 — Gráficos das regressões associadas à rede neuronal da bobina, onde é apresentado o gráfico dos dados de treino, validação, teste e de todos em conjunto.....	43
Figura 4.4 — Comparação dos dados medidos em relação aos dados previstos pela RNA. QRNA correspondendo aos dados associados à rede neuronal e Q aos dados obtidos experimentalmente.....	44
Figura 4.5 — Gráfico dos dados de entrada da rede neuronal do transformador processados pela rede neuronal da bobina.....	46

Figura 4.6 — Estrutura da rede neuronal final.	46
Figura 4.7 — Gráficos das regressões associadas à rede neuronal do transformador onde é apresentado o gráfico dos dados de treino, validação, teste e de todos em conjunto.....	47
Figura 4.8 — Comparação dos dados medidos em relação aos dados previstos pela RNA. QRNA correspondendo aos dados associados à rede neuronal e Q aos dados obtidos experimentalmente.....	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1— Especificações da fita supercondutora, adaptado de [23].....	11
Tabela 3.1 — Características individuais das bobinas utilizadas.....	23
Tabela 3.2 — Características do núcleo ferromagnético utilizado para o ensaio com transformador.....	30
Tabela 3.3 — Propriedades das fitas utilizadas.....	31
Tabela 4.1 — Amostra dum conjunto de dados fornecido à rede neuronal para treino e validação da mesma, onde, a e b são os coeficientes do modelo de Norris, N o número enrolamentos, D_{int} o diâmetro interno F a frequência de operação, I/I_c o coeficiente da divisão entre a corrente de operação e a J_c da fita e Q as perdas medidas em joule por ciclo.....	41

SIGLAS

AC	Corrente alternada.
SC	Supercondutor.
T _c	Temperatura Crítica.
YBCO	Óxido de Cobre de Ítrio e Bário.
SAT	Supercondutor de Alta Temperatura
DC	Corrente Contínua.
H	Campo Magnético.
H _c	Campo Magnético Crítico.
J _c	Densidade de Corrente Crítica.
BSCCO	Óxido de Cobre de Bismuto Estrôncio Cálcio.
LCS	Limitador de Corrente Supercondutor.
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage.
P _f	Perdas por Correntes de Foucault
P _h	Perdas por Histerese
FEM	Força Eletromotriz
TSC	Transformadores Supercondutores
FEM	Métodos Elementos Finitos
RNA	Rede Neuronal Artificial

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

Decorrente do aumento do uso da rede elétrica no cotidiano, tem-se observado um interesse pela procura de soluções mais eficientes de forma a melhorar o seu funcionamento, nomeadamente os supercondutores. No entanto, a implementação destes dispositivos supercondutores apresenta algumas adversidades, tais como as perdas AC. Neste contexto, devido à necessidade em minimizar o desperdício de energia é necessário que estas perdas se mantenham baixas de forma a não gerarem calor prejudicial à manutenção das temperaturas criogénicas.

Este problema pode ser minimizado em fase de projeto através da modelação e simulação dos dispositivos supercondutores. Todavia, atualmente para realizar estas simulações são utilizados por norma processos como o método dos elementos finitos que têm associados alguns problemas, como a necessidade de um poder computacional elevado e a demora no processamento. Neste sentido, é de grande interesse o desenvolvimento de um processo rápido e viável para a obtenção das perdas associadas aos dispositivos supercondutores.

1.2 Objetivos

No presente estudo, pretende-se o desenvolvimento de um modelo capaz de prever as perdas AC em transformadores supercondutores, de forma rápida e sem necessidade de grande poder computacional, tendo em consideração as características destes dispositivos, como por exemplo, número de enrolamentos, dimensões do núcleo ferromagnético, diâmetro interno das bobinas, entre outros.

Para isso propõe-se o desenvolvimento de duas redes neuronais distintas e a obtenção dos dados através de ensaios laboratoriais para o treino das mesmas. Uma das redes associada ao ensaio sem núcleo, ou seja, apenas a bobina e a segunda que recebe os dados de saída da anterior como parâmetro de entrada associada ao ensaio da bobina enquanto usado como secundário do transformador supercondutor.

1.3 Abordagem e Contribuições

No âmbito do projeto em que este trabalho se insere, projeto tLoss "Transformando o Cálculo de Perdas em Sistemas de Potência com Supercondutores de Alta Temperatura", (referência PTDC/EEI EEE/32508/2017_LISBOA-01-0145-FEDER-032508), este projeto pretende desenvolver métodos capazes de realizar o cálculo de perdas associadas a equipamentos supercondutores. A contribuição pretendida com este trabalho é o desenvolvimento de uma rede neuronal capaz de deduzir as perdas AC associadas a um transformador tendo em consideração as suas especificações.

1.4 Organização do Documento

O presente trabalho encontra-se dividido nos seguintes capítulos:

- **Revisão bibliográfica:** Em que é realizada uma revisão dos conceitos teóricos relevantes sobre a supercondutividade, dispositivos supercondutores, transformadores, redes neuronais e estudos relacionados ao trabalho desenvolvido;
- **Parte experimental:** Onde é discutido todo o processo que foi necessário para a conceção dos resultados experimentais e a apresentação dos mesmos;
- **Modelação das redes neuronais:** No qual se demonstra a metodologia para a obtenção das redes neuronais, apresentadas as especificações destas e os resultados obtidos;
- **Conclusão e trabalho futuro:** Em que é discutido os resultados obtidos no decorrer do trabalho e analisadas possíveis melhorias e desenvolvimentos que seriam interessantes realizar.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizada uma revisão de tópicos relevantes para o tema do trabalho desenvolvido. O mesmo está dividido nas seguintes secções:

- Supercondutividade, onde é contextualizado historicamente o seu aparecimento e evolução, os princípios básicos e principais propriedades da mesma, bem como, os diferentes tipos de supercondutores e as perdas associadas aos mesmos;
- Dispositivos supercondutores, na qual são apresentados alguns dos dispositivos onde é possível o uso de supercondutores, apresentando algumas vantagens e desvantagens face ao uso desta tecnologia;
- Transformadores, em que são demonstradas as suas características, os seus princípios de funcionamento, as perdas associadas ao mesmo e apresenta-se também com maior detalhe os transformadores supercondutores;
- Redes neuronais, na qual explicita-se o porquê da aplicação neste projeto e o funcionamento das mesmas;
- Estudos relacionados, em que são apresentados os principais estudos análogos à temática deste projeto.

2.1 Supercondutividade

2.1.1 Enquadramento Histórico

A supercondutividade surgiu em 1911, três anos após a liquefação do hélio, quando Heike Kamerlingh Onnes (professor na Universidade de Leiden na Holanda), investigava as propriedades de substâncias a baixas temperaturas [1]. Onnes descobriu que ao arrefecer uma

amostra de mercúrio abaixo dos 4,2K, a resistência elétrica da mesma desaparecia de uma forma abrupta, defendendo assim, que a resistência tendia para zero com a temperatura [2].

Posteriormente em 1933, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram que um supercondutor (SC) no seu estado de supercondução repele todo o campo elétrico do seu interior. Este efeito é reconhecido como "efeito de Meissner", justificando a repulsão de qualquer ímã que se aproxime do supercondutor, sendo até possível a levitação dos mesmos [3].

Em 1986, Alex Müller e Georg Bednorz, investigadores da IBM Research Laboratory em Rüschlikon, na Suíça, criaram um composto de cerâmica que atingia o estado de supercondutividade com uma temperatura crítica (T_c) de 30K (sendo a cerâmica um mau condutor e um isolante a temperaturas não criogénicas). Esta descoberta desencadeou o aparecimento de pesquisas globalmente, surgindo outros compostos, com o intuito de procurar uma combinação com uma T_c maior. Seguidamente em 1987 na Universidade de Alabama-Huntsville, uma equipa de investigadores descobriu um material com uma T_c de 92K, designado atualmente por óxido de cobre de ítrio e bário (YBCO) (supercondutor de alta temperatura (SAT)). Este material possibilitou um avanço nesta área, devido à sua T_c ser superior à temperatura máxima do azoto líquido, tornando possível a sua utilização no arrefecimento dos SC. Nos dias de hoje são utilizados maioritariamente supercondutores de alta temperatura, uma vez que é muito mais simples de obter o azoto líquido e menos dispendioso face ao hélio líquido usado anteriormente [4]. Na Figura 2.1 é ilustrada a evolução das T_c 's ao longo dos anos.

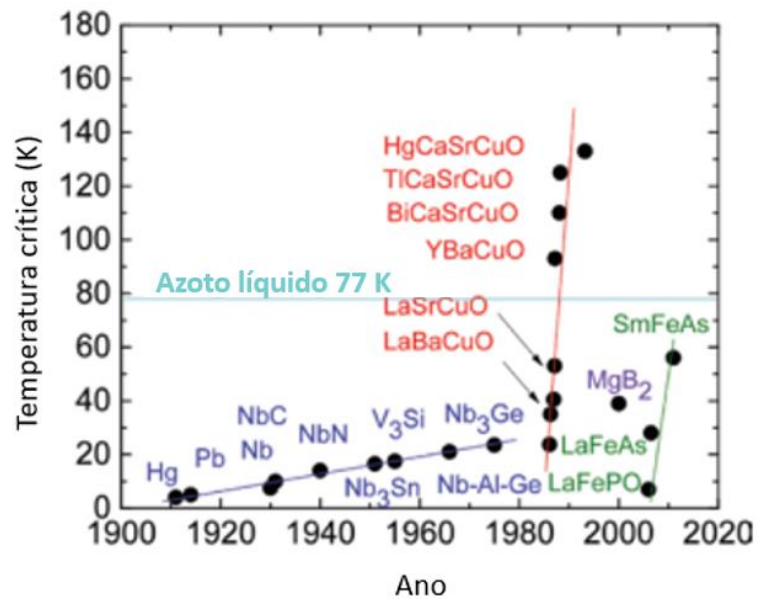


Figura 2.1 — Evolução da T_c dos materiais SC ao longo dos anos, adaptado de [4].

2.1.2 Propriedades Macroscópicas

2.1.2.1 Resistividade Nula

O conceito de resistividade nula, consiste na inexistência de uma queda de tensão entre dois pontos dum material supercondutor quando submetido a uma corrente DC, implicando a ausência de perdas quando aplicada uma corrente contínua [5].

Esta propriedade justifica a elevada densidade de corrente suportada nos SC's comparativamente à de materiais usados como o cobre ou o alumínio. Estes materiais apresentam limitações, podendo fundir-se quando submetidos a altas densidades de corrente, o que não acontece quando se verifica a resistividade nula, pelo que é passível de um aumento da densidade de corrente. Deste modo, o aumento da capacidade da densidade de corrente proporciona soluções mais compactas no que se refere a equipamentos com a necessidade de uma elevada corrente [6]. No entanto, os materiais SC's também apresentam limitações quanto à densidade de corrente, abordadas na subsecção 2.1.2.3.

2.1.2.2 Efeito De Meissner

O efeito de Meissner também conhecido como diamagnetismo perfeito é descrito pela exclusão do fluxo magnético do interior do material SC. Considerando-se diamagnetismo quando a magnetização de um material tem sentido oposto ao do campo que lhe é aplicado, e diamagnetismo perfeito quando ocorre a expulsão de todo o campo magnético a que o

material é sujeito [1]. Segundo este efeito, independentemente das condições iniciais a que o material está exposto, no interior do supercondutor o valor do campo magnético (H) será sempre nulo desde que não seja ultrapassado o seu valor crítico (H_c), a partir do qual acontece a transição do material para o estado normal [7]. Esta propriedade, justifica fenómenos que não poderiam ser apenas explicados com o fenómeno da resistividade nula, adicionalmente comprovando a impossibilidade de um supercondutor ser considerado um condutor perfeito. Este material ideal apresentaria um comportamento semelhante ao de um SC, mas que, em vez de expelir todo o campo a partir de uma dada T_c , conservaria o estado a que inicialmente estava sujeito, como se pode analisar na Figura 2.2. Quando comparados lado a lado o comportamento de ambos os materiais, o condutor perfeito conserva idealmente o estado antes do arrefecimento, mesmo que, como apresentado no ponto g da mesma figura, já não se encontre sob as condições iniciais.

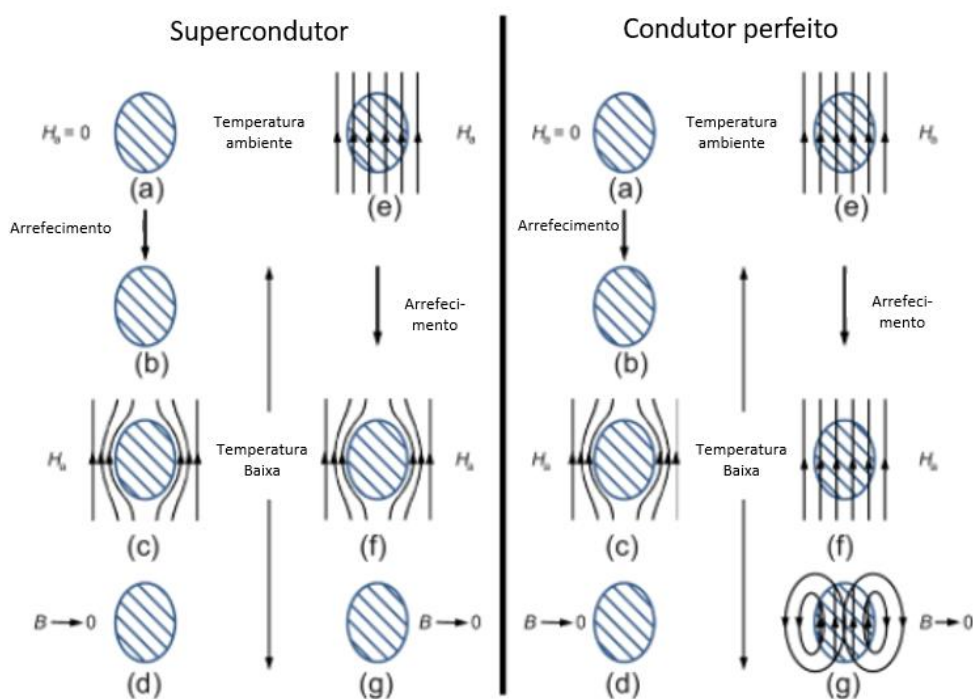


Figura 2.2— Comparação lado a lado da reação de um material supercondutor e de um condutor perfeito quando sujeitos a um campo magnético (antes e após a passagem da T_c), adaptado de [6].

2.1.2.3 Fases T-J-H

Todos os supercondutores têm o seu regime de funcionamento consignado por três pontos críticos que se correlacionam: temperatura, densidade de corrente e campo magnético. Quando se ultrapassa um destes pontos críticos, os materiais deixam de operar como

supercondutores. A T_c , campo magnético crítico (H_c) e densidade de corrente crítica (J_c), correspondem respectivamente, à temperatura mais elevada a que o supercondutor pode operar, ao campo magnético a partir do qual é desfeita a supercondutividade e ao limite máximo de densidade de corrente que o material pode suportar sem existir uma mudança para o estado normal [8].

Como se pode observar na Figura 2.3, a zona da supercondutividade dos materiais, é delimitada por estes três pontos críticos.

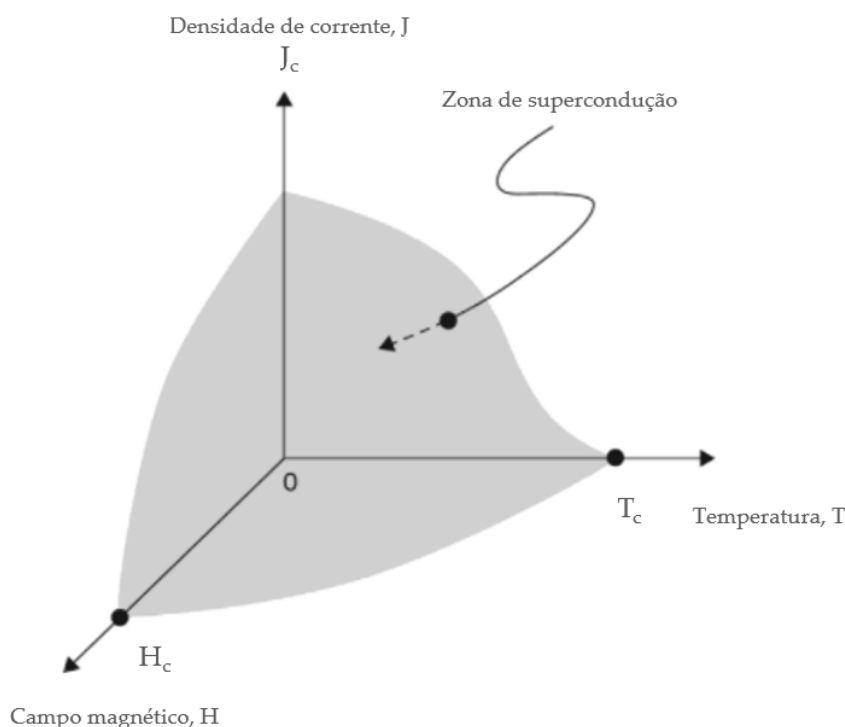


Figura 2.3— Gráfico da zona em que se encontram reunidas as condições para a supercondução em relação à temperatura, campo magnético e densidade de corrente críticos, adaptado de [8].

2.1.3 Tipos de Supercondutores

Ao longo dos anos, verificaram-se em várias experiências com materiais supercondutores, inconsistências de acordo com as teorias existentes na altura. Posteriormente, em 1957, Alexei A. Abrikosov, publicou um artigo onde explicava estas anomalias e que as mesmas se deviam à existência de outro tipo de supercondutores, hoje conhecidos como supercondutores do tipo II, que exibem propriedades diferentes dos já conhecidos [6].

Um supercondutor do tipo I quando sujeito a um campo magnético comporta-se como demonstrado na Figura 2.4 a), onde abaixo de um certo valor de H_c o campo magnético é repellido do interior do material. Para supercondutores do tipo II como apresentado na Figura 2.4 b), existem dois limites, H_{c1} para o qual acima desse valor o material ainda se encontra no

estado de supercondução, mas existe uma penetração parcial do fluxo no interior do SC e H_{c2} onde o material passa ao estado normal [9]. A zona intermédia entre H_{c1} e H_{c2} denomina-se estado misto onde algumas partes do material se encontram em supercondução e outras no estado normal.

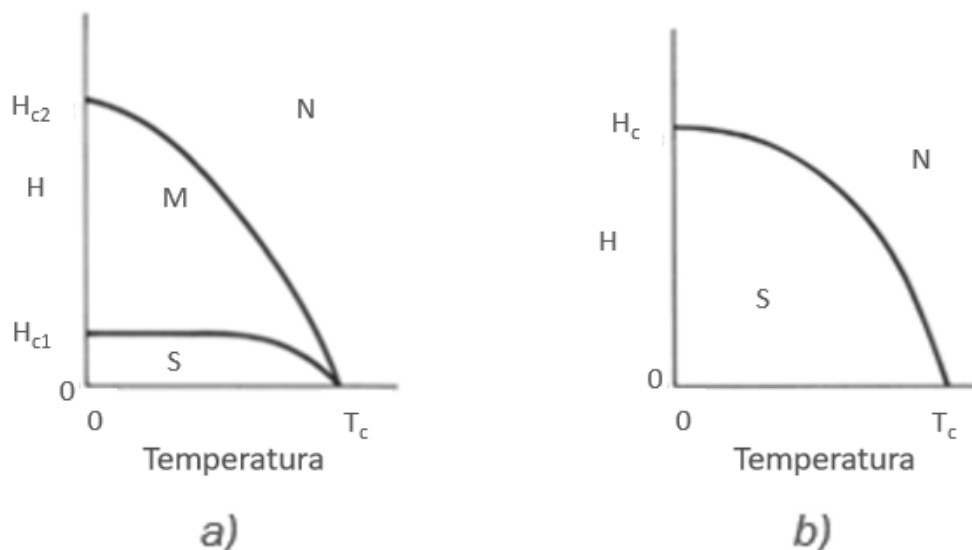


Figura 2.4— Gráficos do campo magnético em função da temperatura, para supercondutores do tipo II e I, a) e b) respetivamente, N - zona de estado normal, S - zona de supercondução, M - zona mista, adaptado de [9].

2.1.4 Perdas AC Associadas a SC

Denominam-se perdas AC a todas as perdas provenientes de uma corrente alternada que acesse um condutor. No caso dos materiais supercondutores, é de extrema importância manter estas perdas baixas, devido às mesmas ocorrerem em ambientes criogénicos necessários para a permanência no estado de supercondução.

Estas perdas traduzem-se em calor, sendo que a energia necessária para manter a temperatura do ambiente criogénico pode chegar a ser, segundo a teoria do ciclo de Carnot, 70 vezes superior à energia perdida. No entanto os equipamentos refrigeradores não atingem o rendimento de Carnot, pelo que, esta estimativa é referente a um mínimo inatingível, sendo a quantidade de energia necessária para manter o estado de supercondução superior à referida [10]. Esta energia traduz-se, no caso dos supercondutores, na evaporação de azoto líquido

pelo que, num sistema em que as perdas não sejam minimizadas, os custos de arrefecimento podem tornar a sua utilização inviável.

Em condições AC os supercondutores apresentam perdas quando sujeitos a correntes alternadas e/ou a campos magnéticos variáveis [11]. Existem duas vertentes nas perdas de um SAT (secção 2.1.3):

- Perdas por magnetização, que surgem com a variação do campo magnético aplicado ao supercondutor;
- Perdas por corrente de transporte, que se manifestam devido à variação da corrente de transporte no supercondutor.

As perdas por magnetização podem ocorrer devido à variação do campo por parte da fonte, por exemplo, um campo magnético criado por uma corrente alternada, bem como, na eventualidade do supercondutor ou a fonte de um campo magnético constante se movimentarem [12].

As perdas por corrente de transporte ocorrem devido à passagem de corrente alternada pelo material, estas perdas devem-se à variação do campo magnético criado SAT, ao movimento dos vórtices magnéticos no supercondutor [13] e a perdas por joule originadas pela proximidade da intensidade da corrente que flui pelo supercondutor com a J_c do mesmo ou no caso das fitas pela passagem de corrente nas camadas não supercondutoras [14].

Na Figura 2.5 é apresentada a categorização comum das perdas num SAT.

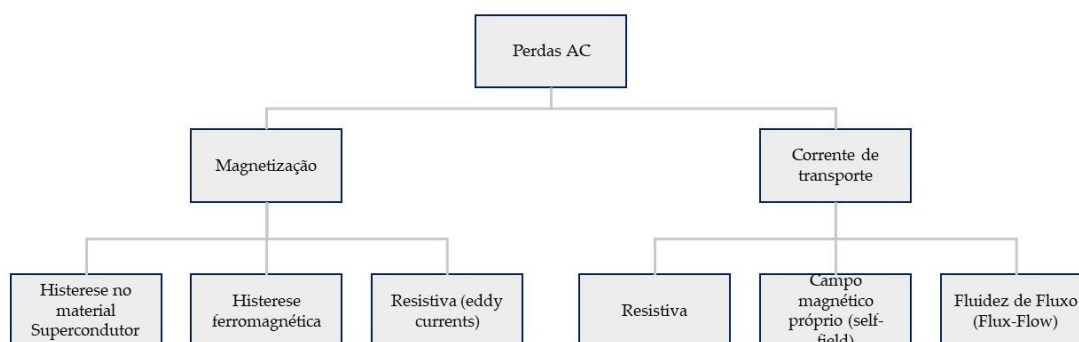


Figura 2.5— Esquema representativo das diferentes categorias de perdas associadas a um SAT.

Existem vários métodos analíticos que são capazes de calcular e quantificar as perdas num supercondutor, todavia o mais utilizado para o cálculo de perdas em fitas supercondutoras é o modelo de Norris. Este considera que as perdas AC numa fita supercondutora com uma secção elíptica podem ser calculadas através da seguinte fórmula [12]:

$$Q_{Norris}[W/m] = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left\{ \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right) \ln \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right) + \left(1 + \frac{I_0}{I_c}\right) \ln \left(1 + \frac{I_0}{I_c}\right) - \left(\frac{I_0}{I_c}\right)^2 \right\} \quad (2.1)$$

Assim sendo, sabendo apenas o valor da J_c é possível calcular uma representação viável das perdas AC de uma fita, este método é apenas adequado para a determinação das perdas em amostras de fitas simples não sendo adequado o seu uso no cálculo de perdas em bobinas.

As perdas AC podem ser medidas experimentalmente através de métodos magnéticos, elétricos e calorimétricos. Do método magnético é exemplo a medição do ciclo de histerese, do método elétrico, a técnica com recurso ao *Lock-in-Amplifier* e por fim do método calorimétrico a medição do volume de líquido criogénico que é evaporado [15].

2.1.5 Maciços e Fitas

Existem duas formas em que o material SC pode ser encontrado num transformador, maciço (Figura 2.6) ou em fita, sendo este último melhor na quantidade de perdas AC e propriedades mecânicas, pelo que se adequa melhor às necessidades de um transformador [16-19].



Figura 2.6— Maciços em forma de disco e anel [20].

As fitas são categorizadas de primeira ou segunda geração (1G ou 2G, respetivamente). As fitas de primeira geração são constituídas por óxido de cobre de bismuto estrôncio cálcio (BSCCO) em pó, posteriormente liquefeito e colocado num tubo de prata, que após ação térmica e mecânica forma as fitas. Por outro lado, as fitas de segunda geração são formadas pela deposição de várias camadas finas de diferentes materiais [21]. A Figura 2.7 demonstra a espessura, a posição e quais os materiais que integram um exemplo de uma fita 2G.

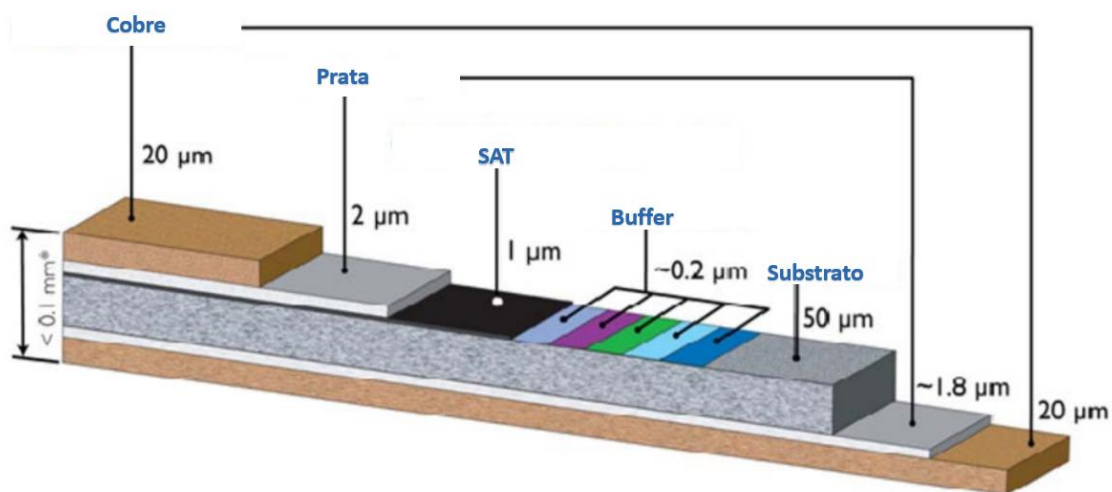


Figura 2.7 — Exemplo da composição de uma fita de segunda geração, adaptado de [22].

A título de exemplo, recentemente na china, procedeu-se ao desenvolvimento e testagem de um limitador de corrente do tipo resistivo, sendo utilizada uma fita de segunda geração de YBCO como elemento limitador. O LCS em questão é composto por 84,5 metros de material supercondutor enrolado. Na Tabela 2.1 são apresentadas as especificações da fita utilizada. Neste projeto, utilizando as mesmas condições, foi possível obter consecutivamente resultados bem-sucedidos, demonstrando a possibilidade do uso a longo termo do limitador em questão, sem que seja danificado ou perca qualidade nos resultados apresentados [23].

Tabela 2.1— Especificações da fita supercondutora, adaptado de [23].

Parâmetros	Especificações
Espessura do aço inoxidável	75µm
Espessura de substrato	50 µm
Espessura da camada de prata	1.5 µm
Espessura da camada de cobre	5 µm
Corrente crítica	250 ± 10 A
Largura média	12.0 mm
Peso médio	23 g/m
Resistividade (temperatura ambiente)	0.11 ± 0.005 Ω/m

2.2 Dispositivos Supercondutores

Com o aumento emergente da necessidade de energia e com as limitações apresentadas pela rede elétrica atual, é necessária a procura de novas tecnologias e soluções que satisfaçam essas necessidades. Uma tecnologia em evolução que tem o potencial de ser aplicada na rede através de dispositivos associados à mesma é a supercondutividade.

Diferentes tipos de dispositivos supercondutores, podem ser apresentados como solução em distintos pontos da rede elétrica, sendo possível obter características que não seriam possíveis com materiais ditos convencionais [24].

Exemplos de dispositivos supercondutores são:

- Cabos de energia - Suportam uma grande quantidade de energia com baixas perdas principalmente quando sujeitos a correntes DC, em particular com recurso a SAT é possível transmitir mais energia quando comparado com cabos convencionais com dimensões idênticas. Estas peculiaridades permitem também minimizar o número de subestações em áreas metropolitanas interconectando subestações podendo as que seriam adicionalmente necessárias, substituídas por plataformas de comutação [25];
- Transformadores – Retiram vantagens pelo facto das dimensões e pesos serem reduzidos, devido ao aumento da densidade de corrente e a ser irrelevante o uso de dissipadores de calor. Beneficiam também da possibilidade de operarem em sobrecarga sem riscos acrescidos, o que nos transformadores convencionais não é possível devido à possibilidade de diminuição do tempo de vida útil do equipamento. Por fim, os transformadores com enrolamentos supercondutores causam um menor risco ambiental visto o líquido envolvente (óleo vs azoto líquido) não apresentar o problema de contaminação e inflamação exibidos pelos transformadores convencionais [26];
- Limitadores de corrente – Têm como objetivo não causarem quaisquer perturbações na rede em regime normal, no entanto em caso de falha na rede e de haver um aumento abrupto da corrente, é expectável que limitem a mesma de forma a prevenir a danificação de outros dispositivos da rede elétrica. Os limitadores de corrente, relativamente à sua tipologia, apresentam uma grande variedade, podendo recorrer à supercondutividade ou não. Embora os LCS's (Limitadores de Corrente Supercondutores) em geral sejam mais pesados, de maiores dimensões

e requeiram maior investimento, os mesmos são mais eficientes. Esta eficiência está relacionada com as perdas aquando do seu normal funcionamento e com a existência de uma deteção / ativação automática em caso de uma falha na rede, conseguindo reativar a mesma num curto intervalo de tempo sem qualquer necessidade de intervenção [27];

- Armazenamento de Energia em Electromagnetos Supercondutores (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage) - dispositivo que permite o armazenamento de energia no campo magnético de uma bobina supercondutora e tem a capacidade de descarregar a mesma para a rede. Pela bobina supercondutora percorre uma corrente contínua o que, como já foi referido, causa a resistência da mesma ser aproximadamente nula sendo assim possível, armazenar energia com um mínimo de perdas [28];
- Motores e Geradores Eléctricos com Supercondutores de Alta Temperatura – O uso de SAT's em motores e geradores é vantajoso devido ao aumento da capacidade de condução de densidades de corrente e o resultante aumento da densidade de fluxo no redor do supercondutor, quando comparado com condutores ou magnetos permanentes que se usam usualmente. Destes efeitos resulta que as máquinas onde este material é aplicado são mais leves, compactas e eficientes em termos de energia, possibilitando o seu uso para o solucionamento de problemáticas em setores como o dos transportes e das energias renováveis que necessitam exatamente das qualidades que estas máquinas podem oferecer [29].

2.3 Transformadores

2.3.1 Funcionamento e Principais Características

Os transformadores baseiam-se, na lei de Faraday ou lei geral de indução para o seu funcionamento, ou seja, quando existe uma variação no fluxo de campo magnético através de materiais condutores, a mesma induz uma força eletromotriz. No caso específico destes dispositivos, o funcionamento requer uma ligação mediante um fluxo magnético entre pelo menos dois circuitos que se induzem mutuamente [30].

Assim sendo, o transformador é uma máquina que se limita a transferir energia elétrica entre dois ou mais circuitos elétricos. O esquema da Figura 2.8 representa os componentes básicos de um transformador, os enrolamentos e o núcleo.

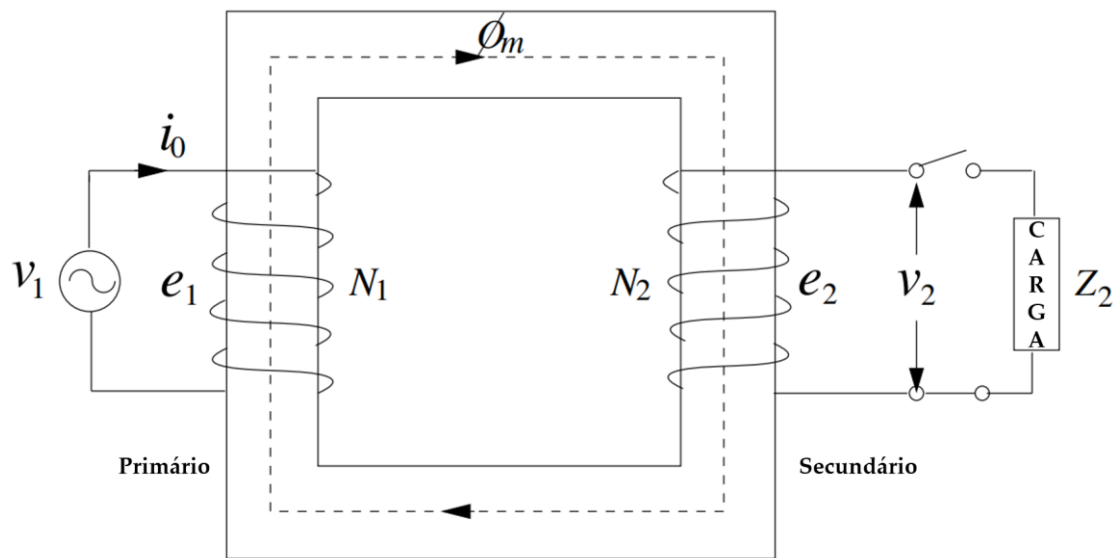


Figura 2.8 — Esquema representativo dos componentes básicos de um transformador. Adaptado de [29].

Na Figura 2.9 é apresentado o esquema equivalente de um transformador com duas bobinas, onde R_1 e X_{L1} representam as perdas ohmicas e as perdas por dispersão respectivamente associadas ao primário, similarmente, R'_2 e X'_{L2} representam as mesmas características, mas associadas ao secundário. Considerando os enrolamentos, R_1 e R'_2 refletem a resistência das bobinas, enquanto, X_{L1} e X'_{L2} a queda de tensão causada pelo fluxo que escapa da interligação das duas bobinas. Ainda no mesmo esquema, X_m representa a componente de magnetização, responsável por produzir o fluxo magnético e R_c as perdas ativas associadas ao núcleo. O esquema apresentado está reduzido ao primário, o que quer dizer que os parâmetros relativos ao secundário são substituídos por imagens vistas do primário.

A tensão aos terminais da bobina do secundário (V_2) depende intrinsecamente da relação entre o número de enrolamentos do primário e do secundário apresentado no esquema com a letra a .

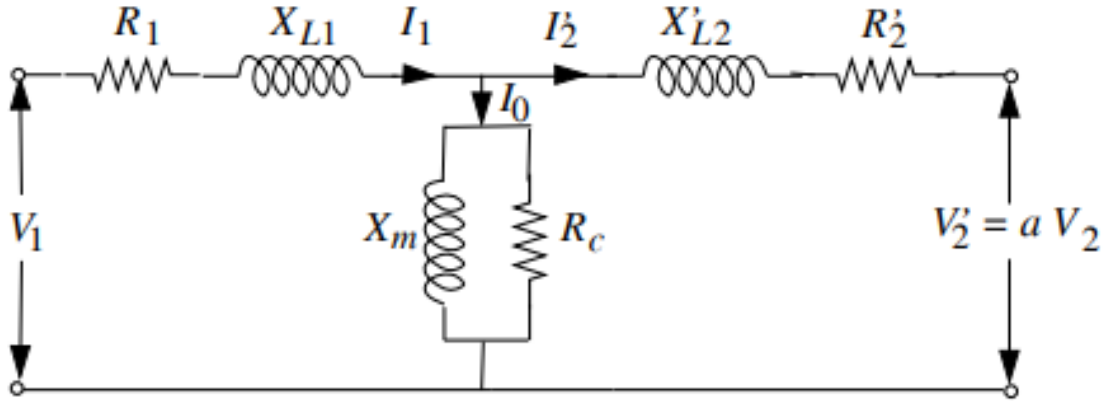


Figura 2.9 — Esquema equivalente de um transformador.

2.3.2 Perdas Magnéticas

As perdas num transformador podem ser divididas em perdas associadas à carga ou não, as primeiras resultam principalmente da resistência óhmica nos enrolamentos do transformador sendo que dependem principalmente da carga do transformador e são proporcionais ao quadrado da corrente. As segundas estão associadas principalmente ao núcleo ferromagnético e à sua morfologia, estas podem ser divididas em 3 conjuntos de perdas [31]:

- Perdas por correntes de Foucault;
- Perdas por histerese;
- Perdas dielétricas.

No entanto, 99% destas perdas são associadas às perdas por correntes de Foucault (P_F) e às perdas por histerese (P_h) [32]. Assim sendo, o cálculo destas pode ser realizado pela equação que se segue.

$$P = P_h + P_F \quad (2.2)$$

As perdas por histerese dependem principalmente da frequência, da densidade de fluxo e das características físicas do núcleo e podem ser calculadas pela seguinte equação

$$P_h = K_h \cdot f \cdot (B_{max})^n \quad (2.3)$$

em que K_h é o coeficiente da corrente associada às perdas por histerese, B_{max} a densidade de fluxo máxima em Wb/m^2 , f a frequência em Hz e n o coeficiente de Steinmetz [31].

As perdas por correntes de Foucault são originadas pois ao induzir uma força eletromotriz (FEM) no secundário parte do fluxo induz também uma FEM noutras partes condutoras como é o caso do núcleo, resultando assim, na dissipação de alguma energia na forma de calor. Este efeito é menor em núcleos laminados e depende intrinsecamente do quadrado da frequência, como se pode verificar pela equação 2.4, em que K_F é o coeficiente associado às

correntes de Foucault, B_{max} a densidade de fluxo máxima em Wb/m² e f a frequência em Hz [31].

$$P_F = K_F \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \quad (2.4)$$

2.3.3 Transformadores Supercondutores

Os transformadores supercondutores (TSC) são em tudo idênticos a um transformador convencional, à exceção de que nos TSC's os enrolamentos são formados por material supercondutor e um crióstato de forma que seja possível submergir o mesmo num líquido de baixa temperatura (*e.g.*, azoto líquido) com o intuito de manter o SC abaixo da sua T_c [33].

Estes crióstatos podem ser dimensionados através da imersão de todo o transformador e por consequente todas as partes constituintes do mesmo são arrefecidas a temperaturas criogénicas, ou então, são dimensionados individualmente crióstatos de forma a envolver cada um dos enrolamentos. Na primeira opção é necessária uma maior quantidade de líquido, mas tendo os benefícios de obter um TSC de núcleo frio [34], o que possibilita um processo de construção do crióstato mais facilitado e beneficia também da redução do fluxo disperso quando comparado com a segunda opção.

Outros aspetos que influenciam o desempenho global deste tipo de transformadores são a estrutura do núcleo e a sua morfologia, a aplicação de métodos de redução do campo magnético disperso (*i.e.*, flux-diverter) [35], o material supercondutor utilizado e a configuração dos enrolamentos das bobinas que afeta a quantidade de perdas AC, a quantidade de fluxo que é disperso, as forças mecânicas exercidas nos enrolamentos, entre outros [36].

Para além dos benefícios já referidos (secção 2.2) os TSC's possuem uma característica única não atingível com materiais convencionais que é a capacidade de atuar como limitador de corrente devido à possibilidade de mudança de estado autónoma. Assim sendo, é possível obter um maior nível de segurança como também é benéfico na atenuação de problemas na rede elétrica que advenham da falha em equipamentos de controlo, como por exemplo disjuntores [36].

Na Figura 2.10 é apresentado um transformador projetado com a função simultânea de limitador de corrente.

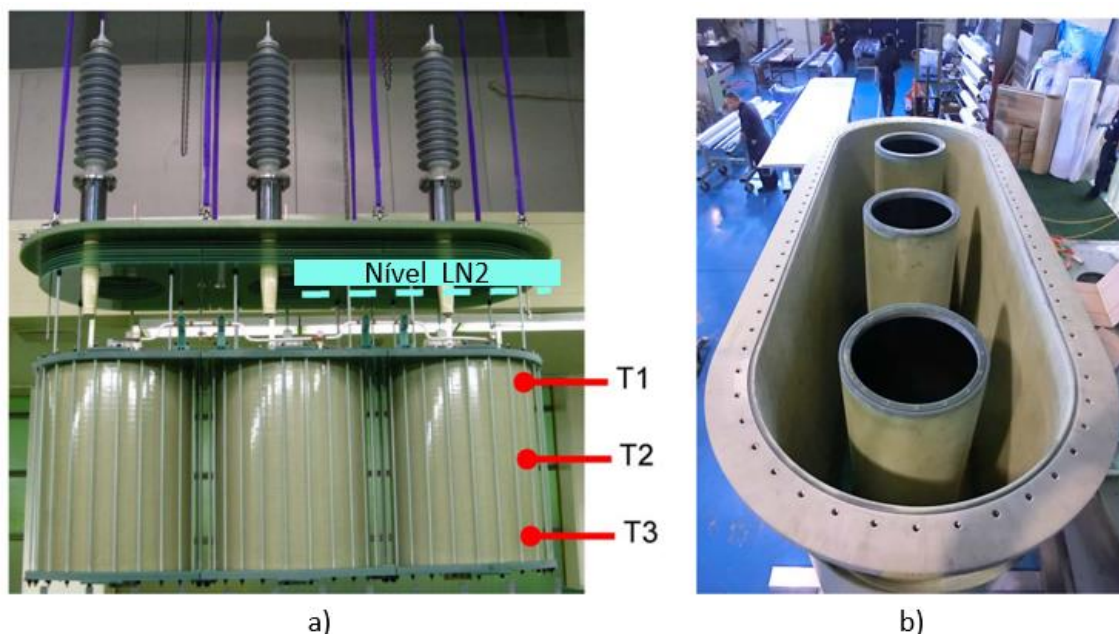


Figura 2.10 — a) Enrolamentos supercondutores (T1-T3 indicam os pontos de aquisição das medições de temperatura). b) Crióstato antes da instalação das bobinas (adaptado de [37]).

2.4 Redes Neurais

Existem vários métodos para a previsão de comportamentos de um material quando sujeito a diferentes condições. No entanto é necessária uma previsão com um tempo de resposta viável, ou seja, processamento rápido e de baixa complexidade, com resultados aproximados da realidade. Com recurso a expressões analíticas é possível prever as perdas, porém, esta metodologia realiza um elevado número de aproximações o que se traduz num resultado pouco exato. Outro método possível seria o dos elementos finitos (FEM) todavia, este resulta em cálculos muito complexos causando assim um tempo de processamento elevado. Assim sendo, uma solução para ambos os problemas dos métodos referidos, são as redes neurais que embora não realizem operações complexas, são capazes de obter resultados aproximados da realidade [38]. As redes neurais podem ser classificadas tendo em conta aspetos como, o número de camadas, a direção de conexão ou o tipo de modelo utilizado para a regressão [39, 40].

A ideia principal de uma rede neuronal artificial (RNA) é que para um dado conjunto de parâmetros de entrada, não relacionados entre si, a RNA é capaz de atribuir pesos e cruzar dados, gerando um resultado à saída que depende inteiramente dos parâmetros de entrada e dos pesos atribuídos aos mesmos. Esta atribuição de pesos é obtida através das sinapses ou

ligações onde são ajustados os mesmos, de modo a obter-se os resultados de saída desejados. Em geral, quanto maior o peso, que pode ser positivo ou negativo, maior a influência de uma variável à saída. A ligação entre os neurónios gera o cruzamento de dados pretendidos através das diferentes camadas da rede [41].

A Figura 2.11 ilustra o funcionamento básico de uma RNA como já descrito anteriormente.

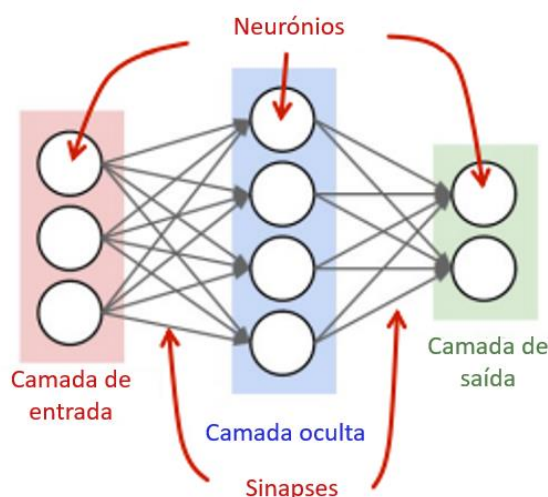


Figura 2.11— RNA simples, adaptado de [42].

A modelação de uma rede é realizada em duas etapas, nas quais é utilizado um conjunto de dados onde os valores dos parâmetros de entrada e dos resultados de saída são conhecidos. A etapa de treino, em que são ajustados os pesos, de modo a obter uma rede consistente com os dados de treino e a de teste que consiste na corroboração da rede, em que são fornecidos dados diferentes dos da etapa anterior e é verificado se os resultados são os esperados.

2.5 Estudos Relacionados

Em 2018, na China, um projeto de previsão de perdas AC com recurso a redes neuronais, foi implementado num sistema de armazenamento de energia em bobinas supercondutoras. Neste estudo, verificou-se que as redes neuronais permitem a obtenção de resultados rápidos e confiáveis, assim como, um aumento de eficácia nas previsões com o aumento de dados de treino [42].

Em 2015 foi realizado um projeto através de dados gerados computacionalmente por um software de simulação, sendo realizado o treino e verificação de uma rede neuronal

artificial que tinha como objetivo prever as perdas de um filamento supercondutor. Através deste estudo com o recurso a redes neurais foi possível obter resultados aceitáveis, com menos tempo de processamento, na ordem dos milissegundos, o que proporciona um processo de iteração na busca de melhores resultados na fase de planeamento de qualquer equipamento. Adicionalmente também proporciona a possibilidade de obter resultados credíveis quanto à determinação de perdas no caso da influência de campos magnéticos elípticos o que coloca este método como sendo melhor do que métodos analíticos em que são realizadas aproximações que não permitem previsões tão exatas [38].

Com um objetivo semelhante em 2016 foi realizado um estudo em que se analisou diferentes modelos de inteligência artificial com aplicação em redes neurais para a previsão de perdas em corrente alternada não sinusoidal. À semelhança do projeto anterior, as redes foram treinadas e testadas com dados adquiridos computacionalmente através de simulações, em que se simulou uma fita supercondutora de alta temperatura. Observando-se que as redes se adaptam e produzem resultados satisfatórios no que consta à previsão, quando o material se encontra sujeito a correntes não sinusoidais. Na Figura 2.12 é apresentado o gráfico da validação da rede que obteve melhores resultados [43].

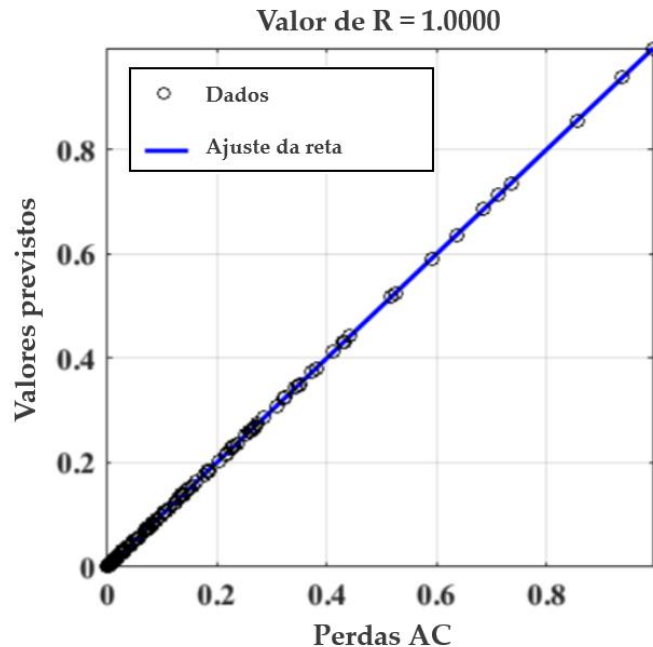


Figura 2.12— Relação entre os dados previstos e os obtidos por simulação, adaptado de [43].

PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo é discutido todo o processo para a obtenção dos resultados experimentais.

O trabalho prático realizado no âmbito deste projeto envolve duas montagens distintas. A primeira com o intuito de adquirir os resultados das perdas para uma bobina individualmente, sem estar inserida no núcleo. A segunda com o objetivo de medir as perdas de uma bobina quando esta se encontra como primário ou secundário de um transformador.

Ainda no presente capítulo é apresentado, o processo laboratorial realizado para esse efeito, a caracterização da fita, (embora se trate de um processo analítico, foi realizada a obtenção de dados associados à mesma) e por fim a apresentação dos resultados obtidos das montagens descritas e da caracterização do núcleo.

3.1 Materiais e Métodos

3.1.1 Bobinas

Como suporte para os enrolamentos foram utilizados moldes impressos numa impressora 3D (Figura 3.1 a)). Estes no lado superior têm um suporte, de modo a ser possível a fixação de barras de cobre cortadas à medida (Figura 3.1 b)), entre as quais é fixa a fita supercondutora. Esta está conectada às placas de cobre devido à pressão realizada pelos parafusos contra o suporte impresso. Por fim, a estas placas está conectado um cabo de cobre por onde é feita a ligação aos transformadores. Na zona inferior o mecanismo é semelhante, no entanto as conexões são realizadas na horizontal e não na vertical. O enrolamento da fita nos moldes é realizado iniciando-se pela parte inferior, bobinando a mesma entre as ranhuras existentes para este efeito e realizando as conexões já descritas. Exatamente a meio de cada processo de

enrolamento foi colocado um fio de cobre com 4 cm fixados à fita para possível uso na medição de perdas.

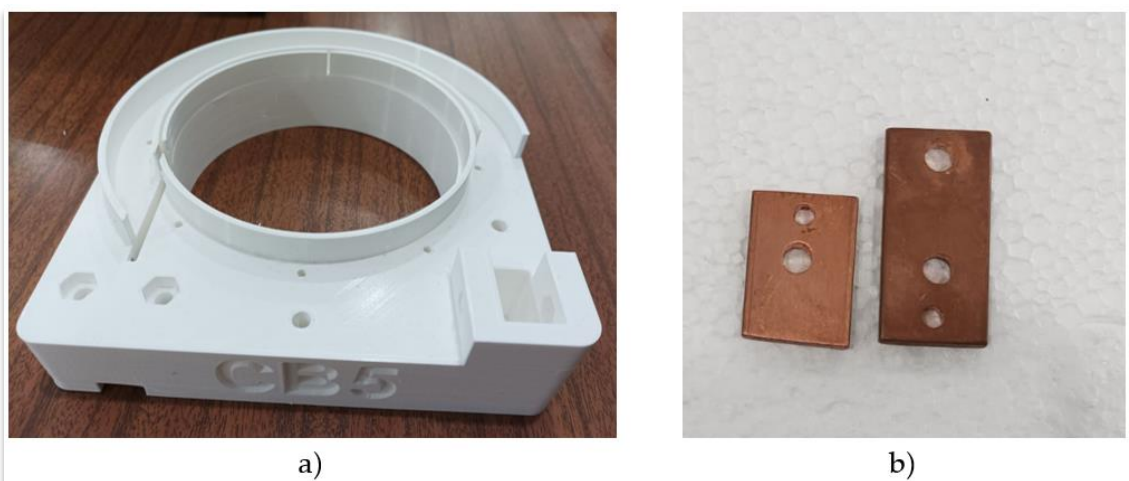


Figura 3.1 — a) Suporte para os enrolamentos impresso numa impressora 3D. b) Placas de cobre usadas para a conexão à fita supercondutora.

Na Tabela 3.1, é possível observar-se as bobinas e algumas características como: o diâmetro interno e o número de enrolamentos.

De forma a facilitar a identificação das bobinas, utilizou-se a seguinte nomenclatura:

- 1ª letra -Com o intuito de distinguir as bobinas das restantes presentes no laboratório a primeira letra das mesmas é um C;
- 2ª letra -De forma a diferenciar em termos de tipos de fita a letra A está associada à fita fabricada pela S-Innovations e a B à fita fabricada pela Shanghai Superconductor;
- Número -Todas as bobinas estão numeradas sem qualquer critério de forma a serem identificáveis.

A bobina CB1 presente na Tabela 3.1, devido a problemas técnicos teve de ser rebobinada com um número de enrolamentos diferentes, tendo sido possível obter dados para a primeira montagem com a mesma bobina, mas com um diferente número de enrolamentos. Assim sendo na Tabela 3.1 é apresentada como CB1 e CB1r, visto que na última o r é a referência à mesma ser rebobinada.

Tabela 3.1 — Características individuais das bobinas utilizadas.

Nome	Número De Enrolamentos	Diâmetro Interno (mm)
CA2	49	122
CB1	39	122
CB1r	28	122
CB3	59	118
CB4	49	122

3.1.2 Crióstatos

A partir de cubos de poliestireno expandido construiu-se os crióstatos, com comprimento de 30 cm, derretidos de forma a caber no núcleo ferromagnético e ao mesmo tempo acomodar o molde da Figura 3.1 a). Na Figura 3.2 a), é apresentado um exemplar de um dos dois crióstatos criados. Optou-se pelo uso deste material devido à facilidade em moldar o mesmo ao formato dos protótipos criados e ao baixo custo associado.

De forma a esculpir os crióstatos, utilizou-se a ferramenta apresentada na Figura 3.2 b). Esta é equipada com uma ponteira, fixa na extremidade de uma estrutura metálica móvel, que aquece e possibilita a extração do material necessário. A base de madeira move-se com uma trajetória concêntrica circular, sendo possível, a partir do culminar do movimento da estrutura metálica com o movimento da base, esculpir a peça de poliestireno expandido, de forma circular. Todavia é possível observar na Figura 3.2 a) algumas imprecisões devido a ajustes realizados durante o processo e simultaneamente aos cortes não circulares realizados, no entanto estas irregularidades são aceitáveis para o propósito deste projeto.

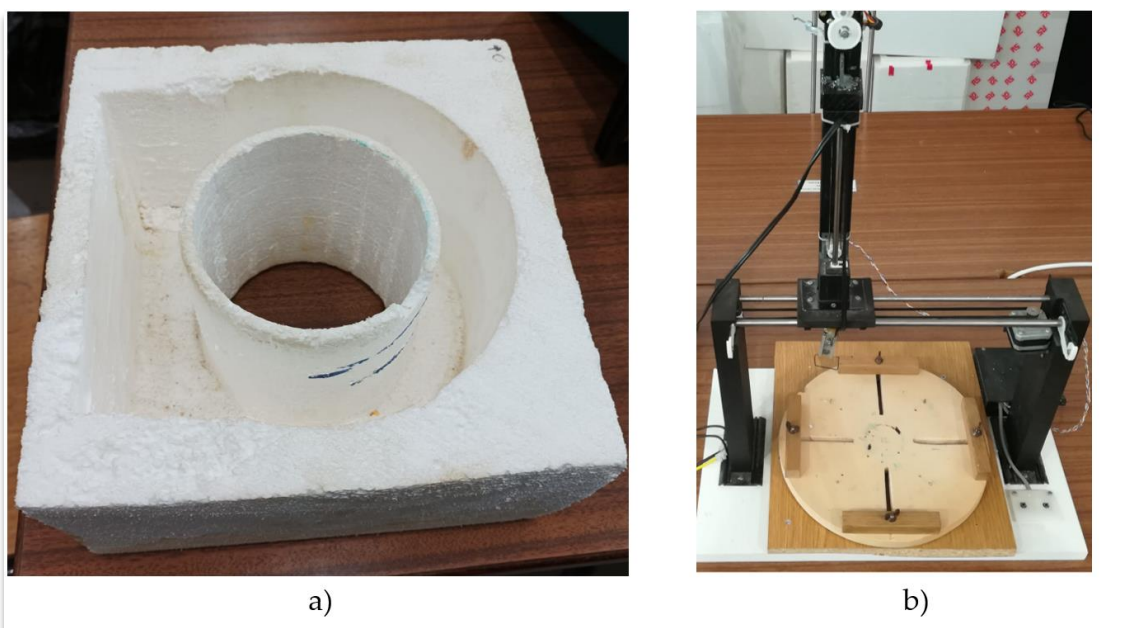


Figura 3.2 — a) Crióstato utilizado para a contenção do azoto líquido. b) Ferramenta utilizada para esculpir o crióstato.

3.1.3 Ensaios

Como já referido, no início do presente capítulo, foram necessárias duas montagens para adquirir todos os dados relevantes para a caracterização de uma bobina quando associada a um transformador. São estas, a medição de perdas quando a mesma não se encontra inserida num núcleo de ferro e não sofre qualquer efeito de nenhuma outra bobina, que se denominará por ensaio sem núcleo e a montagem com a bobina na função de secundário de um transformador, em que se encontra inserida num núcleo e, portanto, se denomina por ensaio com núcleo.

Para ambos foi utilizado o autotransformador presente na Figura 3.3 a) de forma a possibilitar a variação da tensão e consequentemente da corrente com o intuito de obter uma variedade de dados suficiente para o treino das redes neuronais. Foram também inseridos nas ligações entre o autotransformador e a bobina, três transformadores em paralelo entre si com as especificações presentes na Figura 3.3 b). Através destes é possível colmatar o défice de corrente existente caso se utilizasse apenas o autotransformador. Desta forma apenas seria possível testar com tensões menores e com um grau de controlo das condições de teste reduzido, o que não é pretendido.



a)



b)

Figura 3.3 — a) Autotransformador utilizado nos ensaios. b) Placa de especificações de um dos três transformadores utilizados.

Com o intuito de realizar as ligações em paralelo dos três transformadores foram construídos os conectores presentes na Figura 3.4 e colocados numa caixa de derivação de forma a prevenir quaisquer acidentes. O uso destes conectores não é vantajoso do lado do primário dos três transformadores, visto que a corrente está limitada, a secção dos cabos é inferior e existirem soluções mais práticas.

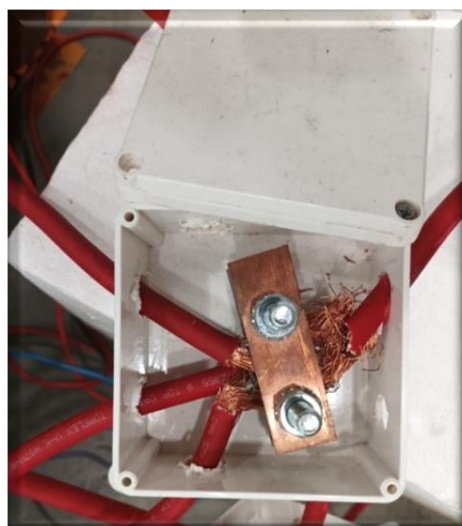


Figura 3.4 — Conector utilizado para a junção em paralelo dos três transformadores.

Durante os ensaios foram utilizadas as ligações entre fase e neutro de forma a obter uma tensão mais controlável com um passo mais pequeno entre medições e as ligações entre fases

com o intuito de atingir tensões mais elevadas. Desta forma, é possível a obtenção de uma maior quantidade de dados com condições diversificadas.

Em ambos os ensaios, foram realizadas medições da tensão aos terminais dos enrolamentos. As conexões da parte inferior dos enrolamentos foram realizadas a partir de um fio de cobre soldado diretamente à fita supercondutora, com um pequeno espaço entre as conexões aos transformadores e este fio de forma a prevenir qualquer incerteza nas medições efetuadas. Na zona superior da bobina o mesmo conceito é aplicado, no entanto em vez de soldado à fita, o fio é soldado a uma pinça que é colocada na fita. Esta diferença deve-se a esta zona estar sujeita a movimentos, vibrações e a instabilidades que provocam a não viabilização do uso da soldadura.

3.1.3.1 Ensaio Sem Núcleo

As ligações e todos os aparelhos utilizados neste ensaio estão apresentados na Figura 3.5 a) bem como, o esquemático do mesmo Figura 3.5 b).

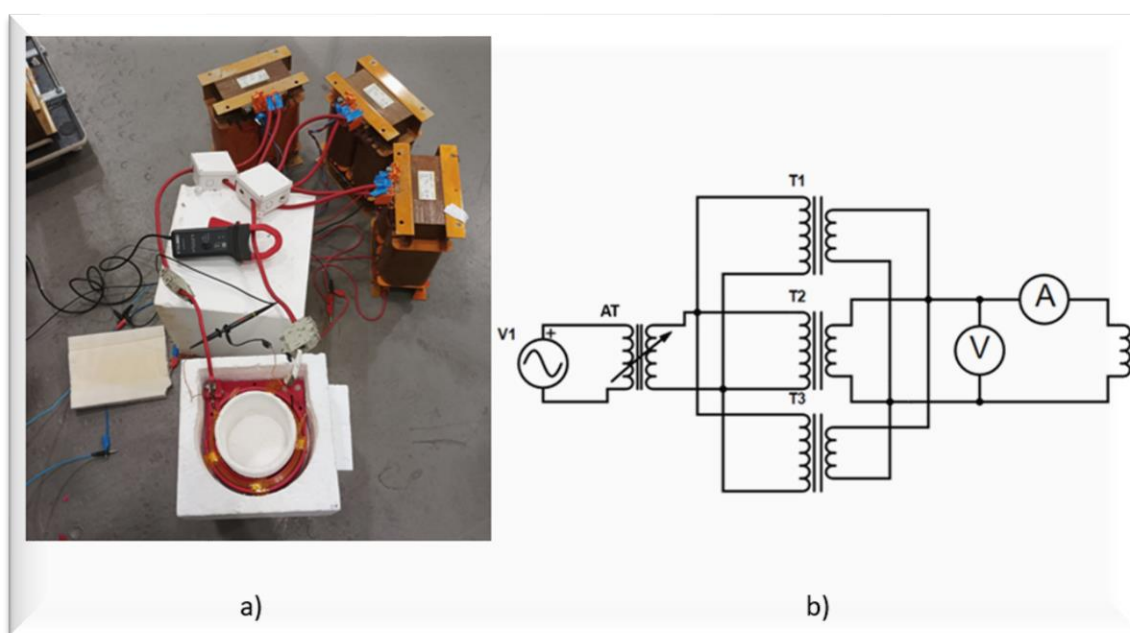


Figura 3.5 — a) Aparelhos utilizados no ensaio sem núcleo. b) Esquema do ensaio sem núcleo.

Para o cálculo das perdas AC das bobinas, foi necessária a medição da queda de tensão aos terminais da bobina e a corrente na mesma. Para este efeito foi utilizado um osciloscópio e gravados os resultados de forma a serem processados computacionalmente após os testes.

Uma amostra das ondas obtidas num dos testes é apresentada na Figura 3.6, em que a rosa está a corrente e a amarelo a tensão.

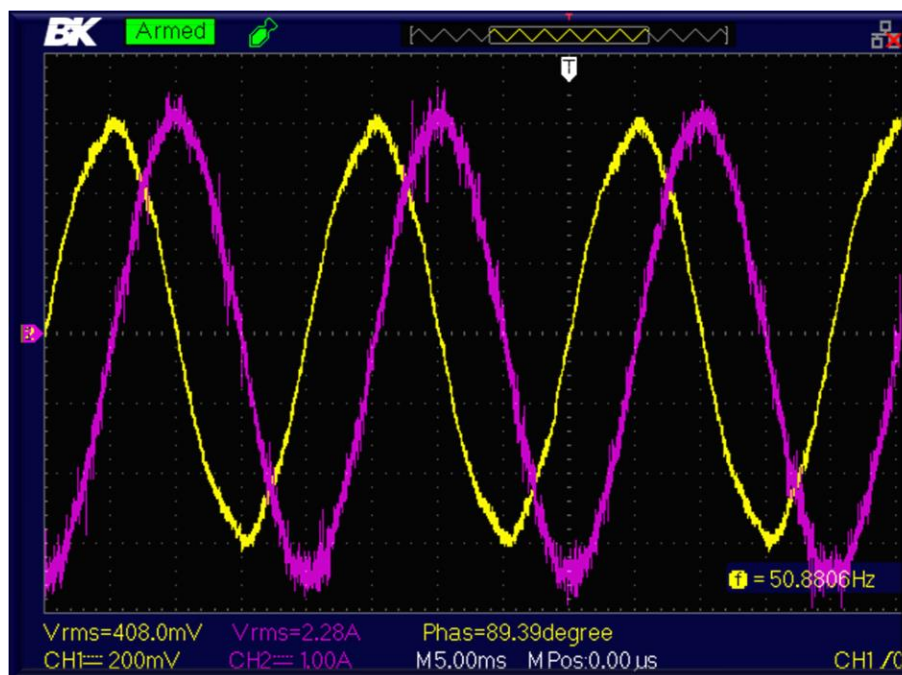


Figura 3.6 — Exemplo de sinal extraído do osciloscópio. A rosa a corrente e a amarelo a tensão.

Com o intuito de processar os dados obtidos e calcular as perdas para cada ensaio, foi realizado um script em python presente no anexo 2. Neste é isolado um ciclo da onda presente na Figura 3.6 e realizada a multiplicação ponto a ponto da corrente com a tensão, de forma a obter a potência instantânea. Após o cálculo da potência, este sinal é integrado ao longo do ciclo e obtém-se as perdas AC na bobina em joule por ciclo (J/ciclo).

3.1.3.2 Ensaio Com Núcleo

Numa primeira abordagem foi ponderada a montagem aferindo as perdas de todo o transformador, pois, de forma semelhante à montagem sem núcleo, é possível a partir da queda de tensão aos terminais das bobinas e da corrente, calcular a energia consumida, em joule por ciclo, no primário e calcular o mesmo no secundário. Assim sendo, com estes dados, subtrai-se a energia consumida na carga à energia consumida no primário e obter-se-ia as perdas no transformador.

Todavia, como referido, este não é o objetivo deste projeto, visto que se pretende avaliar apenas as perdas associadas à fita supercondutora e não as perdas associadas ao núcleo.

Desta forma, com o objetivo de obter apenas as perdas desejadas, tentou-se desenvolver o método descrito em [44], onde se observou que ao desprezar a existência de quedas de tensão indutivas, é possível considerar que a queda de tensão aos terminais de um condutor que abrace um núcleo ferromagnético é obtida através da parte real, da derivada em função do tempo do fluxo magnético no núcleo, como descrito na equação:

$$U_r = Re \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \quad (3.1)$$

Assim sendo, analisando a Figura 3.7, pode se concluir que a tensão aos terminais das resistências é igual à tensão de U_r ou seja:

$$U_r = U_C = R_{sum} I_2 \quad (3.2)$$

Desta forma pode se extrapolar que a queda de tensão da parte real de duas bobinas, com o mesmo número de enrolamentos é idêntica.

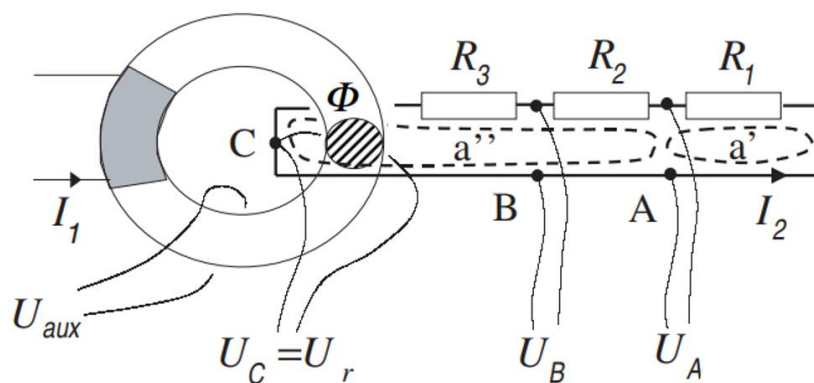


Figura 3.7 — Exemplo do esquema do circuito secundário de um transformador composto pelas resistências R1, R2 e R3.

Consequentemente, se houver uma bobina supercondutora como secundário e uma bobina auxiliar envolvente ao núcleo com o mesmo número de enrolamentos, é possível obter a queda de tensão aos terminais do material supercondutor subtraindo a tensão aos terminais da resistência do secundário, ao valor da tensão do enrolamento auxiliar como descrito na equação.

$$U_{SC} = U_{aux} - U_R \quad (3.3)$$

Onde, U_R é a queda de tensão aos terminais das resistências colocadas a conectar os terminais do secundário, U_{aux} a queda de tensão aos terminais da bobina auxiliar e U_{SC} a queda de tensão associada ao material supercondutor.

Visto que se pretende analisar as perdas apenas no material supercondutor, resta a medição da corrente associada ao secundário e a realização dos cálculos realizados na montagem sem núcleo.

Na Figura 3.8 é apresentado a montagem física desta metodologia.



Figura 3.8 — Montagem do ensaio com núcleo.

3.1.4 Núcleo

Relativamente à caracterização do núcleo, esta também é importante no que concerne à previsão de perdas AC, visto que, o valor das mesmas altera-se de acordo com as características do núcleo utilizado.

Para a caracterização deste, foi utilizada a característica B-H. De acordo com o primeiro modelo descrito em [45], um modelo linear, é possível descrever a curva de magnetização com a equação seguinte:

$$B(H) = \begin{cases} B_s & \text{for } \mu_a H \geq B_s \\ \mu_a H & \text{for } -B_s < \mu_a H < B_s \\ -B_s & \text{for } \mu_a H \leq -B_s \end{cases} \quad (3.4)$$

Onde, B_s representa o valor da densidade de fluxo de saturação, ou seja, a zona aproximadamente horizontal do gráfico e μ_a o declive da reta aproximada. Em síntese, a aproximação realizada por este modelo prende-se pelo facto de que existem três zonas diferenciadas nas curvas de magnetização de um núcleo ferromagnético, uma em que apresenta um aumento na densidade de fluxo magnético proporcional ao aumento da intensidade de campo magnético e outra em que a mesma se mantém aproximadamente constante. Assim sendo, beneficia-se do uso de um número diminuto de variáveis (duas), garantindo a diferenciação entre núcleos. Esta quantidade reduzida de variáveis, é vantajosa para o projeto visto que as redes neuronais aumentam de complexidade conforme o aumento do número de variáveis.

Desta forma na Tabela 3.2 são apresentadas as características do núcleo ferromagnético utilizado.

Tabela 3.2 — Características do núcleo ferromagnético utilizado para o ensaio com transformador.

Núcleo Ferromagnético	
Número de janelas	2
Altura (mm)	400
Diâmetro (mm)	100
Espessura das placas (mm)	0.5
Tipo de material	Aço-Silício de grão não orientado

Com as seguintes equações conclui-se a possibilidade de obter os valores de B e de H através da medição da corrente no primário e da tensão no secundário de um transformador:

$$H \times l = N \times i \Leftrightarrow H = \frac{N_1 \times i}{l} \quad (3.5)$$

$$\phi = \frac{\int u dt}{N_2} \quad (3.6)$$

$$\psi = B \times S \Rightarrow B = \frac{\int u dt}{N_2 \times S} \quad (3.7)$$

Onde H é a Intensidade Campo Magnético em ampere por metro, B densidade de fluxo magnético em tesla, l a distância em metros do caminho interno do núcleo, i a corrente no

primário em amperes, N_1 e N_2 o número de enrolamentos do primário e do secundário respetivamente e u a tensão do secundário em volts.

Com o intuito de obter a característica B-H do núcleo realizou-se o ensaio esquematizado na Figura 3.9:

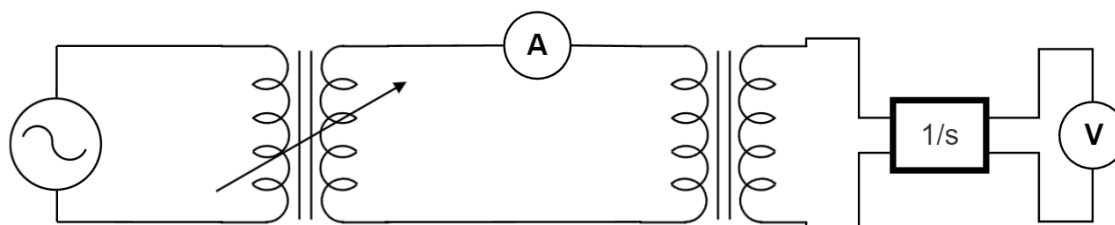


Figura 3.9 — Esquemático do ensaio para obtenção da curva B-H do núcleo.

Neste é realizada a medição da corrente de um enrolamento primário e a queda de tensão pós integração de um enrolamento secundário, ambos os enrolamentos com um número de enrolamentos conhecido (N_1 e N_2). A partir destas medições e com a informação das dimensões do núcleo é possível a avaliação da característica B-H.

3.2 Resultados

3.2.1 Caracterização da Fita Supercondutora

Como já descrito na subsecção 3.1.1, foram utilizadas duas fitas de diferentes fabricantes. As propriedades das mesmas são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 — Propriedades das fitas utilizadas.

Propriedades	Shanghai Superconductor	S-Innovations
Largura (mm)	10 ± 0.1	12
Espessura (μm)	155 ± 5	164
Corrente crítica a 77K (A)	498	656
Espessura de substrato (μm)	50	60
Tipo de substrato	Hastelloy	Hastelloy C-276

As perdas numa fita supercondutora podem ser aproximadamente descritas pela expressão,

$$Q = a \cdot \left(\frac{I}{I_c}\right)^b \quad (3.5)$$

onde Q representa as perdas, em J/m/ciclo, I a corrente e I_c a corrente crítica da fita. Os coeficientes a e b podem ser determinados através do método dos mínimos quadrados.

Como descrito na subsecção 2.1.4 é possível, a partir do modelo de Norris e apenas com a J_c , obter uma representação precisa das perdas AC numa fita supercondutora.

Assim sendo, é possível calcular as perdas para diferentes valores de $\frac{I}{I_c}$ utilizando o método de Norris, criando o gráfico apresentado na Figura 3.10. Aplicando o método dos mínimos quadrados a estes valores, são obtidos os coeficientes a e b .

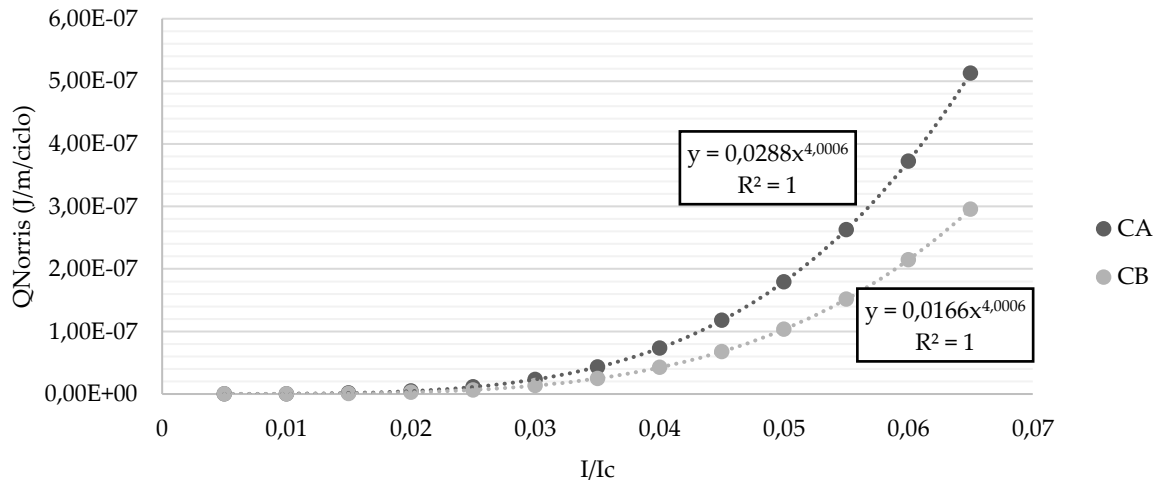


Figura 3.10 — Gráfico da evolução das perdas associadas à fita supercondutora, consoante o aumento da corrente para os diferentes tipos de fita. As expressões apresentadas estão associadas ao método dos mínimos quadrados.

Para a fita da Shanghai Superconductor os coeficientes obtidos são $a = 0,0166$ e $b = 4,0006$ e para a fita da S-Innovations $a = 0,0288$ e $b = 4,0006$. Com estes valores é possível caracterizar as perdas AC das fitas em amostras simples, não bobinadas para posterior utilização como dados de entrada na rede neuronal (Capítulo 4).

3.2.2 Característica do Núcleo

A partir do ensaio descrito na subsecção 3.1.4 foi obtida a característica B-H. Através desta e com a aproximação descrita na mesma subsecção foram obtidos os seguintes valores para os coeficientes, $B_s = 1,2$ e $\mu_a = 0,002$, representados na Figura 3.11.

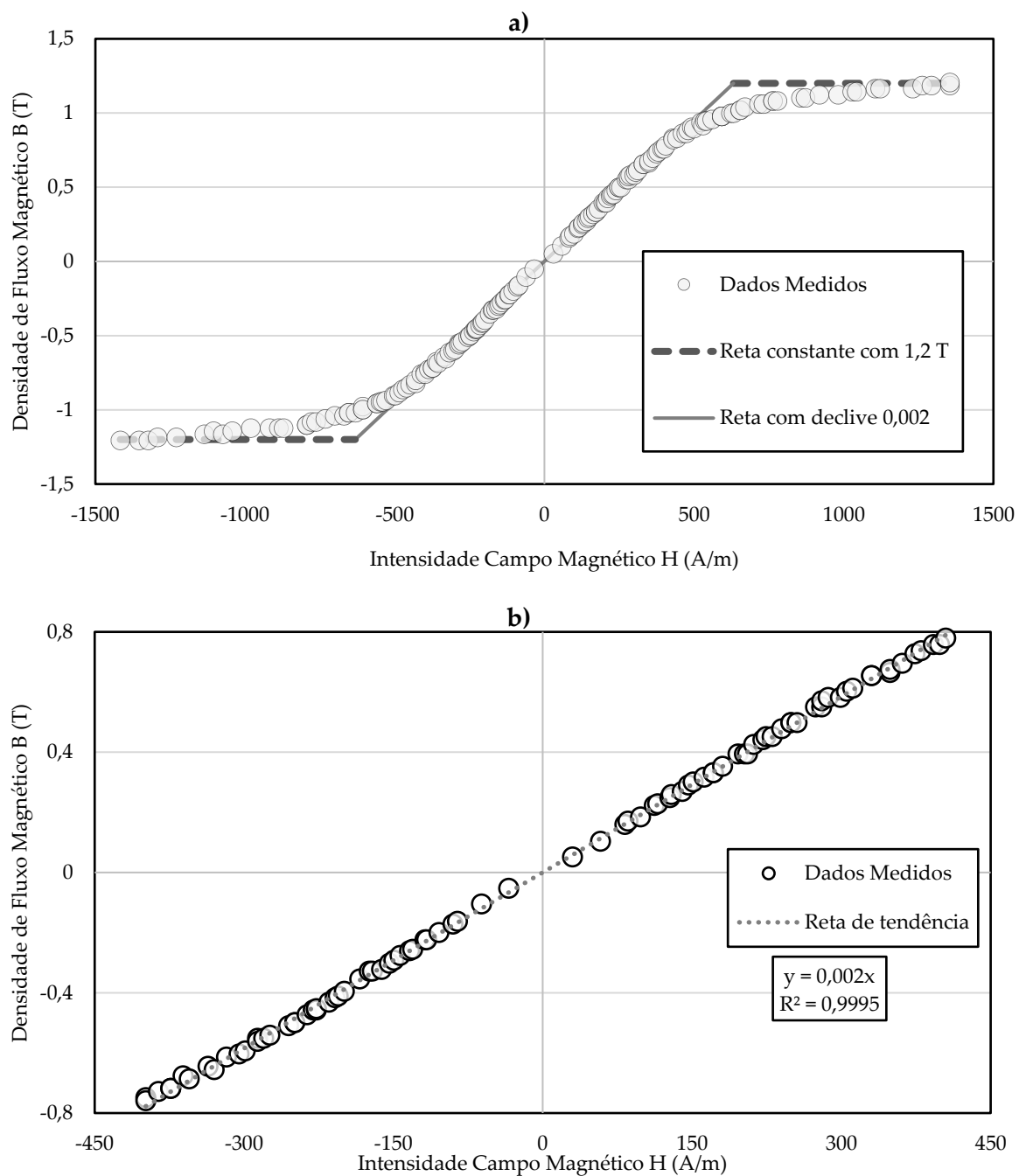


Figura 3.11 — Gráfico da característica B-H do núcleo e da aproximação realizada à mesma. a) Curva B-H completa; b) Secção linear da curva B-H.

De forma a caracterizar a curva com o mínimo de variáveis possíveis, foi realizada uma aproximação à parte linear e não linear da curva, sendo que a primeira foi realizada com sucesso, enquanto a segunda apresentou algumas diferenças entre a previsão e os dados

obtidos. Todavia, como já explicado, o intuito desta aproximação não é conseguir um resultado aproximado da realidade.

3.2.3 Ensaio sem Núcleo

Para a primeira montagem, (ensaio sem núcleo) foram realizados ensaios com diferentes bobinas e com tensões variadas, mantendo a frequência constante nos 50 Hz. Este ensaio considerou a variação do número de espiras das bobinas, a tensão aos terminais das mesmas e o tipo de fita. Na Figura 3.12 são apresentados os resultados obtidos para todas as bobinas, onde o eixo horizontal corresponde ao quociente entre a corrente e a I_c (i.e., corrente normalizada), de forma a ser possível comparar bobinas com diferentes tipos de fita.

Considerando os diferentes ensaios sem núcleo, observou-se que a fita CA2 levou a mais perdas AC) e a fita CB1r correspondeu à fita com um menor valor de perdas AC. Desta forma, é possível observar uma tendência crescente das perdas no material SC com o aumento da corrente e número de espiras. Apesar desta tendência, também se verificou que estas perdas dependem de outras variáveis, nomeadamente através dos resultados das bobinas CA2 e CB4 (com 49 enrolamentos), onde se constata diferenças de valores para a mesma variação de corrente. Estes resultados estão de acordo com a literatura, onde se considera as características da fita SC como um fator de influência nos valores das perdas AC (sendo este ensaio realizado com fitas que apresentam diferentes características).

Relativamente aos valores de corrente, as bobinas com um número de espiras mais reduzido, como é o caso da CB1r, apresentam dados com correntes mínimas maiores ($0.6\% I_c$) enquanto bobinas com maior número de espiras conseguem ter resultados para valores de corrente mínimas menores como é o caso da CA2 ($0.2\% I_c$). Sendo de evidenciar, que esta diferença se deve à dificuldade no controlo da tensão e medição nas bobinas com menos enrolamentos, uma vez que, ao terem menos material SC apresentam uma menor resistência. Assim sendo, nestas bobinas para a mesma corrente a tensão é menor comparativamente a bobinas com um maior número de enrolamentos. Adicionalmente, a fiabilidade das medições com estas tensões baixas é comprometida, devido à sensibilidade dos equipamentos utilizados, uma vez que estes não permitem um incremento menor de tensão e ao ruído apresentado durante o ensaio.

Atentando às variáveis mencionadas neste ensaio, seria possível considerar outras características / parâmetros como a frequência, uma vez que seria expectável o aumento das perdas

com o aumento da frequência, ou também o diâmetro interno das bobinas. Adicionalmente, também seria vantajoso ter-se conseguido utilizar valores superiores de corrente, uma vez que estes cobrem um pequeno intervalo da capacidade das fitas SC, estando sempre abaixo de um décimo da corrente crítica das mesmas. Assim sendo, tendo em conta que a corrente crítica se altera também com o campo magnético, seria benéfico para este projeto que pretende uma variabilidade de dados máxima, a obtenção de dados com correntes mais elevadas, mais próximas deste limite, o que não foi possível abranger neste trabalho experimental.

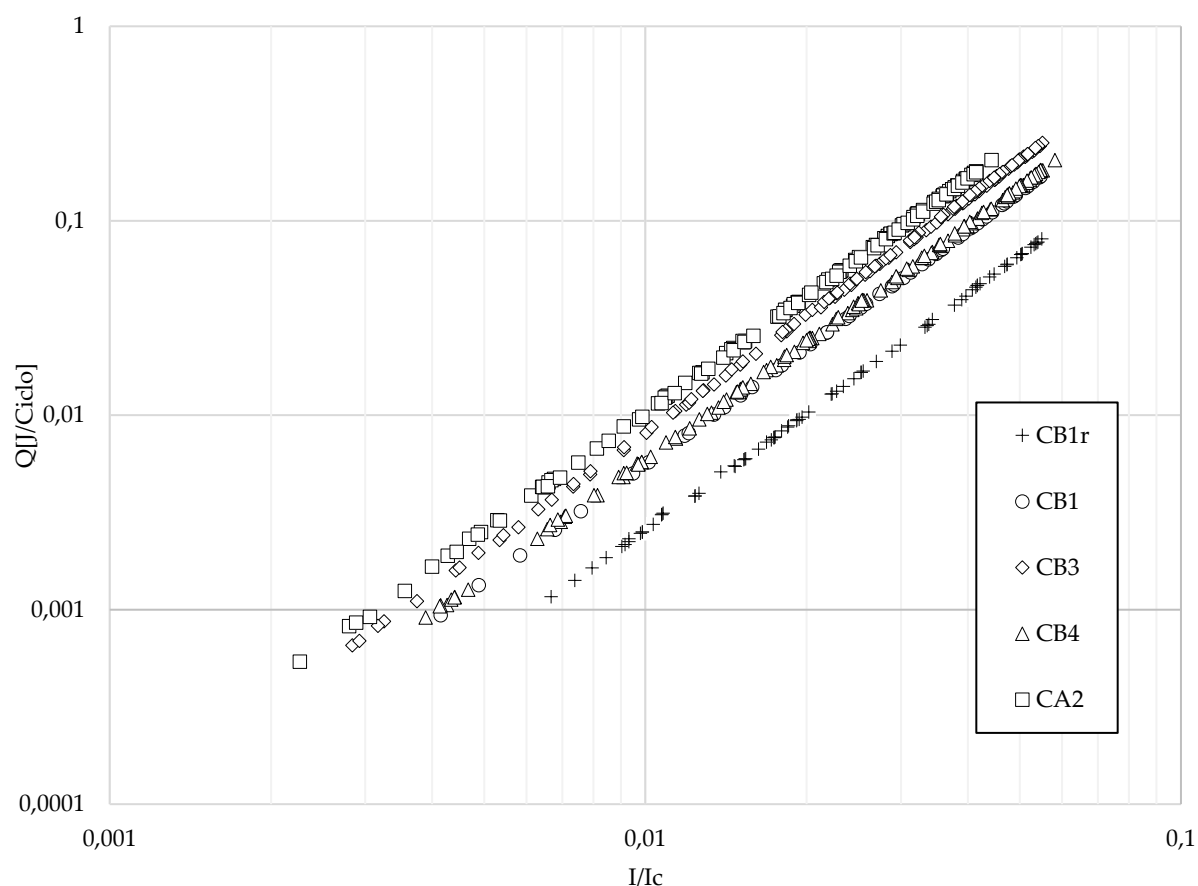


Figura 3.12 — Gráfico da variação das perdas associadas ao ensaio sem núcleo, consoante a variação da corrente.

3.2.4 Ensaio com núcleo

Relativamente à segunda montagem (ensaio com núcleo), à semelhança do ensaio anterior foram realizados diferentes ensaios com bobinas e com tensões variadas, onde a frequência não foi alterada em nenhum dos testes efetuados mantendo-se nos 50 Hz. As conjugações entre bobinas foram desprezadas visto não haver qualquer sinal de que as perdas se alterem conforme as mesmas se encontrarem no primário ou no secundário. Na Figura 3.13 são apresentados os resultados obtidos para todas as bobinas observando-se, similarmente ao ensaio sem núcleo, um aumento das perdas conforme o aumento do número de

enrolamentos. A disparidade referida na secção anterior, das perdas entre bobinas com diferentes fitas com o mesmo número de enrolamentos (CA2 e CB4), é também notada no gráfico apresentado abaixo, (Figura 3.13) sendo que, para este ensaio as perdas associadas à CA2 (49 espiras) encontram-se mais próximas da bobina CB1r (28 espiras) do que da CB4. Esta diferença poderá dever-se às perdas associadas à fita das bobinas CB terem uma maior dependência na quantidade de campo magnético a que se encontram sujeitas.

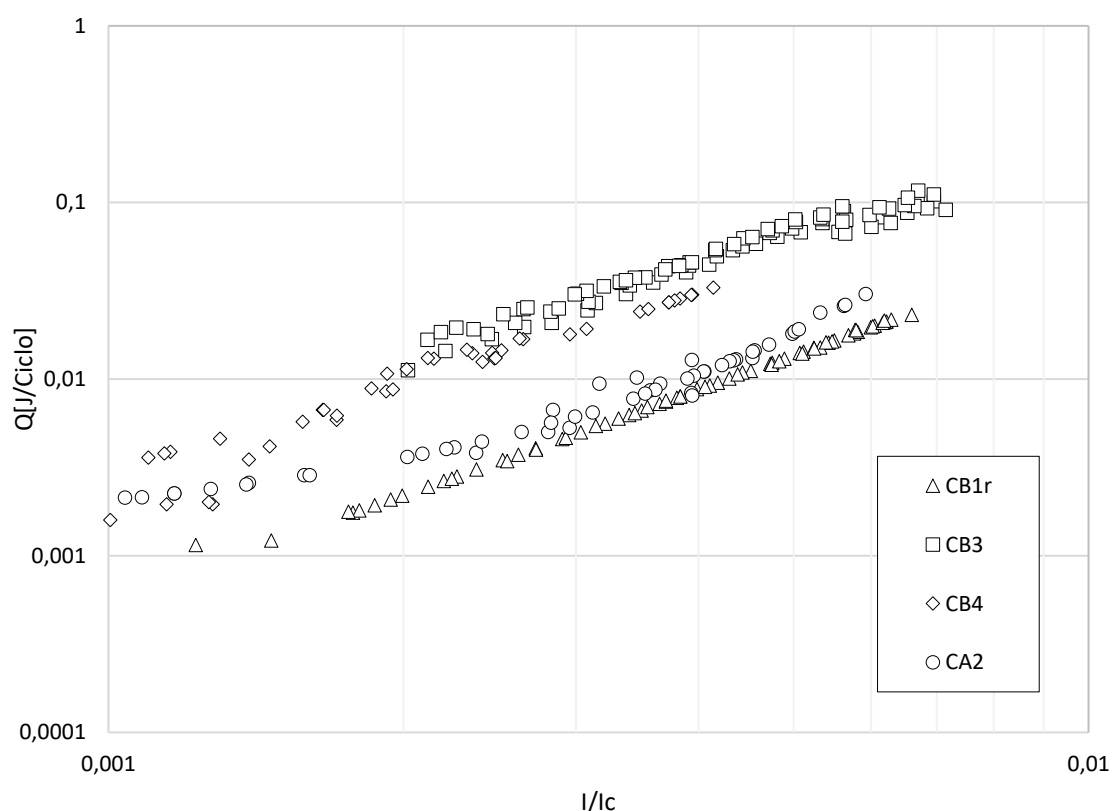


Figura 3.13 — Gráfico da variação das perdas associadas ao ensaio com núcleo, consoante a variação da corrente.

Aquando da realização do ensaio, verificou-se que a variação da resistência de carga aos terminais do secundário não influenciou os valores medidos das perdas, o que valida o método usado (confirmando-se a medição unicamente das perdas associadas à bobina). Todavia, o crescimento das perdas com o aumento da corrente apresentado na Figura 3.13, não se encontra de acordo com o ensaio sem núcleo, pois para cada bobina não são apresentadas linhas claras no gráfico logarítmico. Esta falta de precisão nos dados obtidos, poderá dever-se a influências externas que façam variar as perdas, nomeadamente dos componentes associados a

este ensaio (*i.e.*, núcleo, bobina e resistência). Por outro lado, uma vez que o método é mais complexo que o ensaio realizado sem núcleo, existe uma maior suscetibilidade para imprecisões nos dados obtidos. Evidenciando-se em correntes menores, uma maior tendência para o aparecimento de valores com um comportamento anômalo, podendo-se associar à imprecisão das medições aquando de tensões com valores menores.

Similarmente ao que foi referido no ensaio sem núcleo, também seria de interesse a variação da frequência e aumento das correntes inseridas nas bobinas, e adicionalmente neste caso um ensaio com mais núcleos. Sendo de realçar neste caso, uma maior relevância visto que os intervalos de corrente testados se encontram a 10% dos testados no ensaio sem núcleo, (devido a limitações de material).

MODELAÇÃO DAS REDES NEURONAIS

Neste capítulo é apresentado todo o trabalho realizado no contexto das redes neuronais, explicando a metodologia utilizada e os resultados obtidos para as diferentes etapas.

4.1 Metodologia e Objetivos do Projeto tLoss

O corrente trabalho encontra-se inserido no projeto tLoss. Este tem como principal objetivo encontrar métodos mais eficientes face aos utilizados convencionalmente, para o cálculo de perdas em sistemas de energia com recurso a supercondutores de alta temperatura. As metodologias atuais consomem bastante tempo, não sendo as mais viáveis em fases de projeto de equipamentos, uma vez que não se aproximam das condições reais de funcionamento (*i.e.*, presença de harmónicas).

Assim sendo, o projeto pretende transformar as metodologias de cálculo de perdas em dispositivos SAT, tornando-as aplicáveis numa fase de projeto ou otimizar os equipamentos. Consequentemente, expandindo as fronteiras do conhecimento das perdas em SAT sob diferentes regimes harmónicos, fomentando novas aplicações de materiais SAT, desenvolvendo a partilha de dados e atualização cooperativa de modelos.

Deste modo, o trabalho desenvolvido enquadra-se na necessidade de encontrar soluções para o cálculo de perdas em dispositivos SAT baseando-se este numa modelização hierárquica, do elemento ao sistema. Esta abordagem pretende uma metodologia que divida a previsão das perdas por crescentes níveis de complexidade onde cada nível fornece informação ao seguinte de forma a simplificar a complexidade de uma dispositivo SAT. Por conseguinte para este trabalho foram desenvolvidos os seguintes níveis:

- Fita supercondutora, que através do modelo de Norris já descrito na subsecção 2.1.4 é possível a previsão das perdas não sendo necessário o recurso a redes neuronais;
- Bobina, através do treino de uma rede neuronal que recebe como input as diferentes características da bobina, bem como, os coeficientes a e b , calculadas na secção 2.1.4, sendo capaz de prever os valores das perdas na bobina;
- Dispositivo, mais especificamente da bobina associada a um transformador, que similarmente à bobina recorre ao treino de uma rede neuronal para a previsão das perdas recebendo como input as características do transformador e o output da rede neuronal da bobina;

Com intenção de sistematizar a informação referida na Figura 4.1 é apresentado o esquema das redes neuronais com os respetivos inputs e outputs detalhados nas secções referentes a cada uma das redes neuronais.

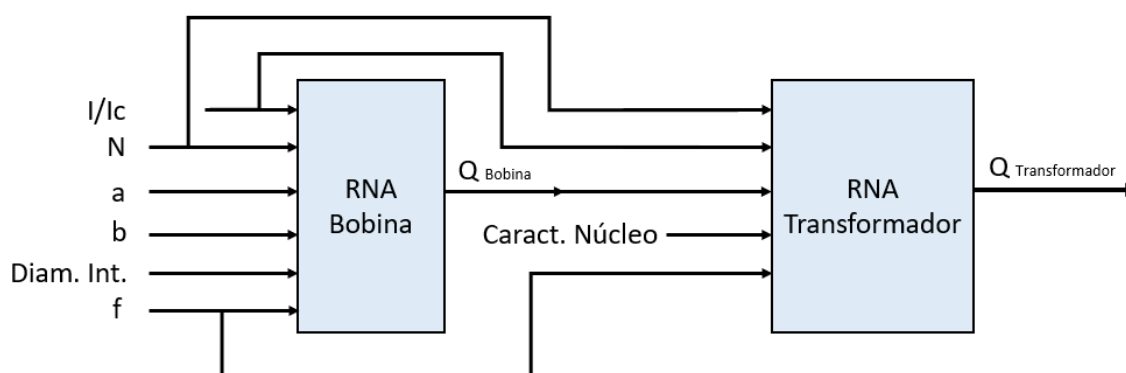


Figura 4.1 — Esquemático representativo do modelo das redes neuronais utilizadas.

O projeto em que este trabalho se insere tem também em perspetiva, a variação da frequência, desde a frequência normal da rede elétrica até a altas frequências na ordem dos kHz, a quantidade de distorção do sinal, ou seja, a quantidade de harmónicas presentes na rede elétrica e a aplicação em diferentes dispositivos que incorporam SAT's, como por exemplo transformadores. Todavia a presente dissertação foca-se na previsão através da hierarquia descrita anteriormente, com uma frequência fixa de 50 Hz e com um sinal AC, sem harmónicas.

4.2 Rede Neuronal da Bobina

A rede neuronal definida para a bobina tem como dados de entrada os coeficientes a e b calculados na secção 3.2.1 como forma de caracterização das fitas, o número de enrolamentos de cada bobina, o diâmetro interno, a frequência de operação e o coeficiente entre a corrente de operação e a I_c da fita. Como dados de saída da rede neuronal obtém-se as perdas em joule por ciclo.

Na Tabela 4.1 é apresentada uma amostra dos dados de treino da rede neuronal.

Tabela 4.1 — Amostra de um conjunto de dados fornecido à rede neuronal para treino e validação da mesma, onde, a e b são os coeficientes do modelo de Norris, N o número enrolamentos, D_{int} o diâmetro interno F a frequência de operação, I/I_c o coeficiente da divisão entre a corrente de operação e a I_c da fita e Q as perdas medidas em joule por ciclo.

Nome	Entrada						Saída
	a	b	N	D_{int} [mm]	F [Hz]	I/I_c	Q [J/ciclo]
CB3	0,0166	4,0006	59	118	50	0,0113	0,0103

Com a base de dados obtida, foi realizado o treino da rede neuronal de forma a obter a melhor configuração entre o número de camadas e o número de neurónios em cada camada. No anexo 1 encontra-se o código matlab utilizado para efetuar este processo. Em síntese, analisaram-se as diferentes configurações possíveis, avaliando e mantendo sempre guardada a configuração que melhor desempenho obteve, sendo este medido através do cálculo do erro médio quadrático. Adicionalmente, foram efetuadas algumas iterações, pois ao treinar a rede neuronal é possível obter diferentes resultados para os mesmos dados de entrada.

Deste modo, obteve-se a melhor combinação de camadas e neurónios estando esta apresentada na Figura 4.2.

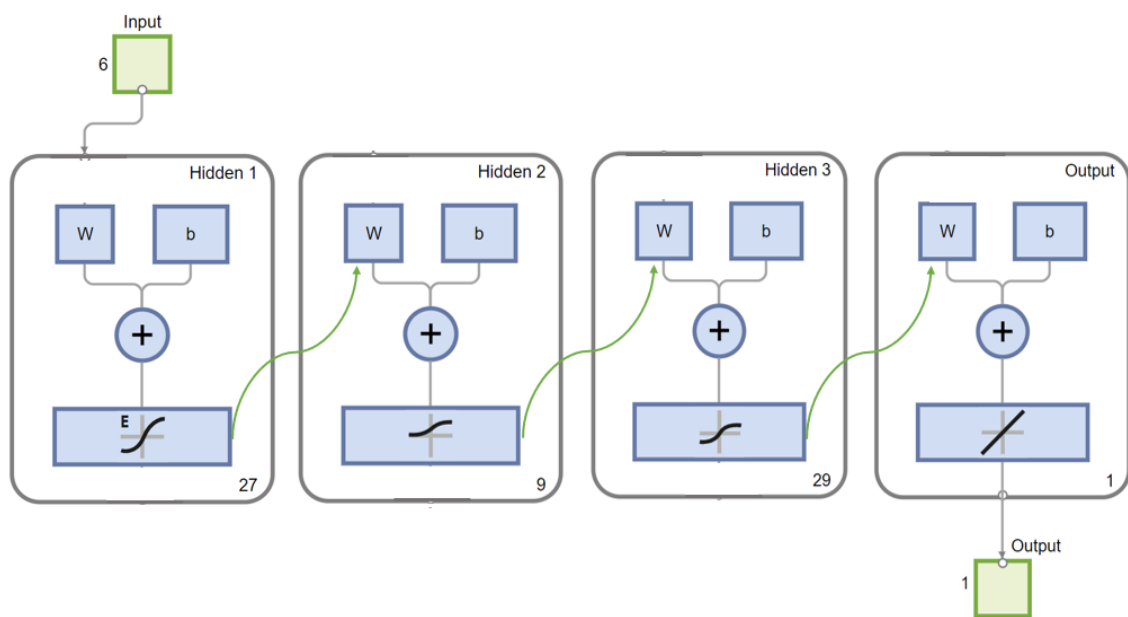


Figura 4.2 — Estrutura da rede neuronal final que obteve o melhor desempenho.

Esta rede obteve uma performance de $9,2494 \times 10^{-5}$, à 25º ciclo e um valor de R de 0.99991. Os gráficos das regressões respetivamente à etapa de treino, validação e teste são apresentadas na Figura 4.3.

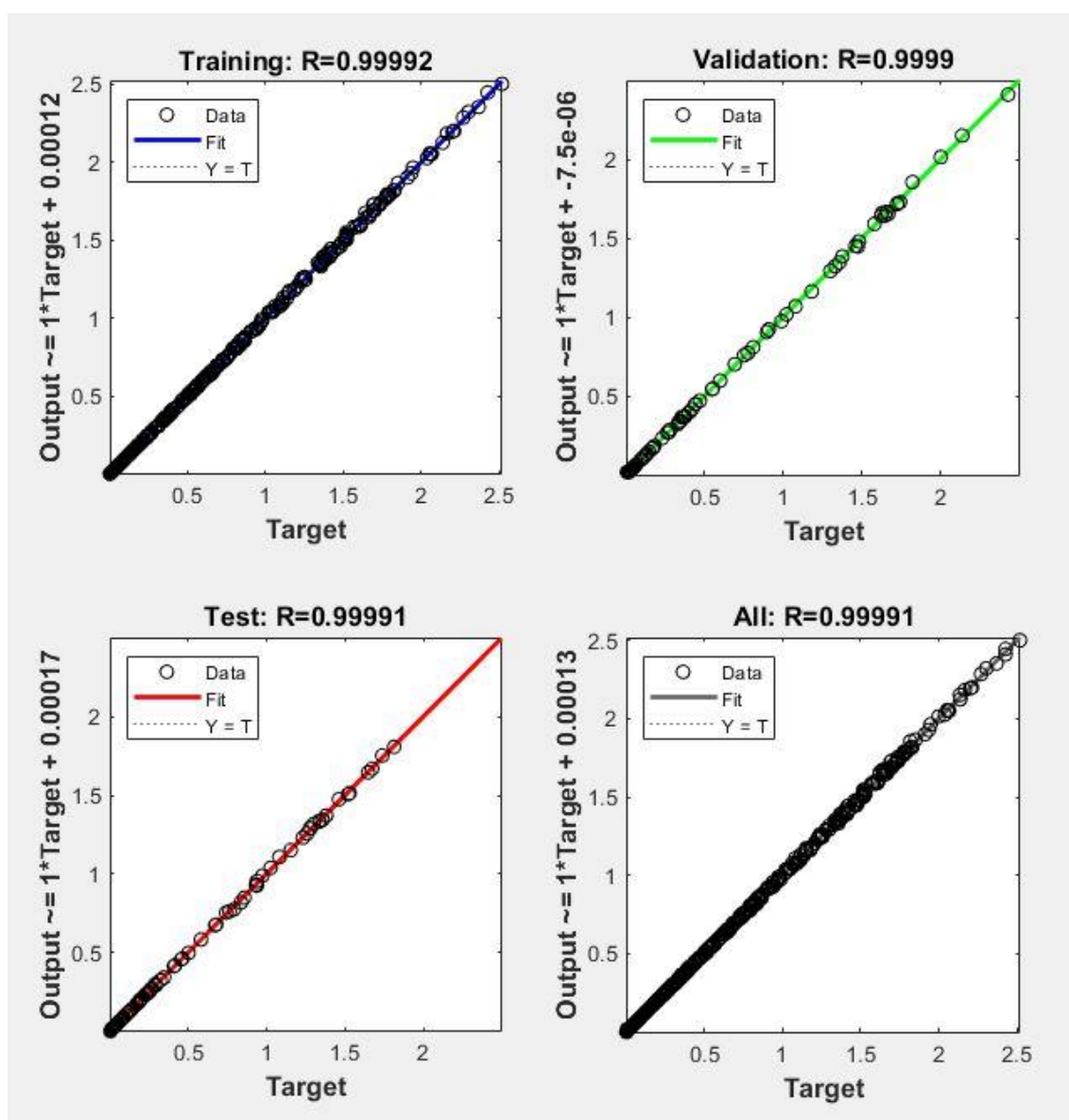


Figura 4.3 — Gráficos das regressões associadas à rede neuronal da bobina, onde é apresentado o gráfico dos dados de treino, validação, teste e de todos em conjunto.

Na Figura 4.4 é apresentado um gráfico, com as perdas medidas experimentalmente e as perdas simuladas pela rede neuronal, de forma a ser possível a comparação dos dados. Nestes gráficos é possível concluir, como apresentado também nos gráficos da Figura 4.3, que existe uma aproximação satisfatória dos resultados práticos.

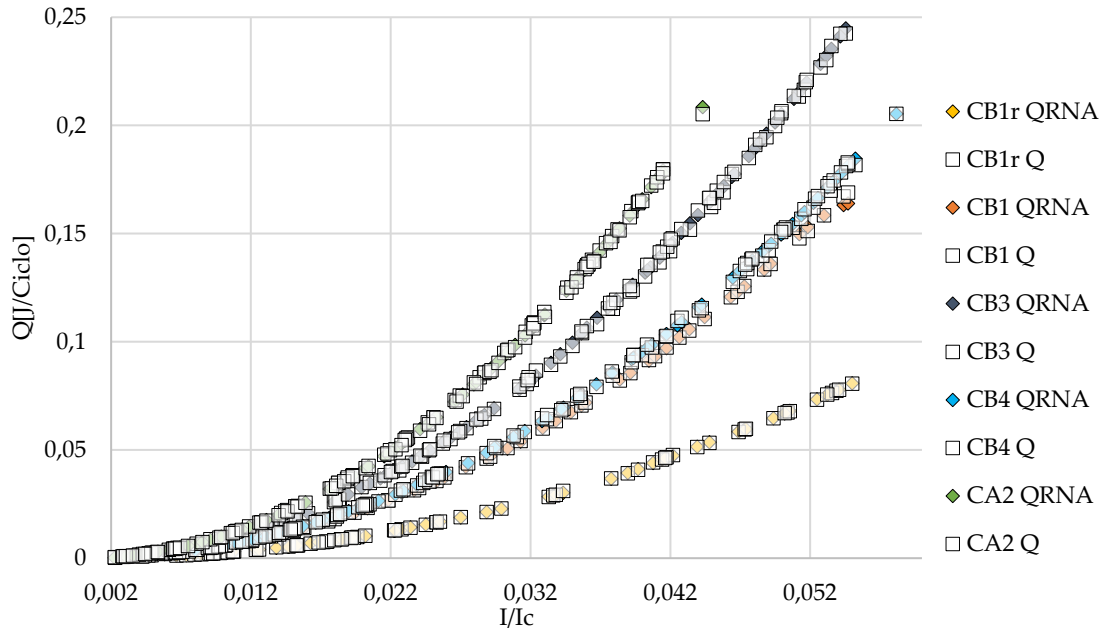


Figura 4.4 — Comparação dos dados medidos em relação aos dados previstos pela RNA. QRNA correspondendo aos dados associados à rede neuronal e Q aos dados obtidos experimentalmente.

Com estes resultados, perspectiva-se a possibilidade do uso das redes neurais para esta fase de projeto. Todavia, é necessária uma base de dados mais diversificada e com um maior volume, com o intuito de não haver a possibilidade da rede neuronal apenas ser capaz de prever os dados dentro do intervalo em que é treinada (*i.e.*, não conseguir prever dados fora dos intervalos em que foi treinada).

4.3 Rede Neuronal do Transformador

À semelhança da rede neuronal descrita na secção 4.2, a rede do transformador tem como parâmetros de entrada o número de enrolamentos, a frequência, a corrente normalizada e os parâmetros caracterizadores do transformador, ou seja, os coeficientes calculados na secção 3.2.2, B_s e μ_a caracterizadores da curva B-H do núcleo e o resultado do processamento dos dados pela rede neuronal da bobina. Como dados de saída da rede neuronal obtiveram-se as perdas previstas para a bobina associada ao transformador, em joule por ciclo.

No gráfico da Figura 4.5 são apresentados os dados de saída processados pela rede neuronal da bobina e na Tabela 4.2 é apresentada uma amostra dos dados de treino da rede neuronal.

Tabela 4.2 — Amostra de um conjunto de dados fornecido à rede neuronal para treino e validação da mesma, onde, B_s e μ_a são os coeficientes de caracterização da curva B-H, N o número enrolamentos, Q_b as perdas previstas pela RNA da bobina, F a frequência de operação, I/I_c o coeficiente da divisão entre a corrente de operação e a J_c da fita e Q as perdas medidas em joule por ciclo.

Nome	Entrada						Saída
	N	F [Hz]	I/I_c	B_s	μ_a	Q_b [J/ciclo]	Q [J/ciclo]
CB1r	28	50	0,00332	1,2	0,002	0,0004688	0,00598

O gráfico da Figura 4.5 apresenta um comportamento anómalo principalmente para valores de corrente abaixo dos 3% da corrente crítica. Este deve-se à rede neuronal da bobina ter poucos dados para correntes abaixo deste limite e assim sendo, a mesma não possui o rigor necessário para efectuar previsões nestas condições. Para tal, seria necessário um treino mais abrangente com dados mais diversificados ou que as condições do ensaio com núcleo se restringissem ao intervalo de dados que a rede neuronal é capaz de prever.

Com o intuito de demonstrar esta hipótese, no anexo 3 são apresentados dois gráficos onde aos dados medidos, foram alterados os valores da corrente (*i.e.*, variando de forma crescente entre $5 \times 10^{-3} \%$ e 8% da J_c). Desta forma, abrangendo uma zona em que a rede é capaz de prever as perdas AC e outra em que é possível observar-se que os resultados não seguem o padrão espectável.

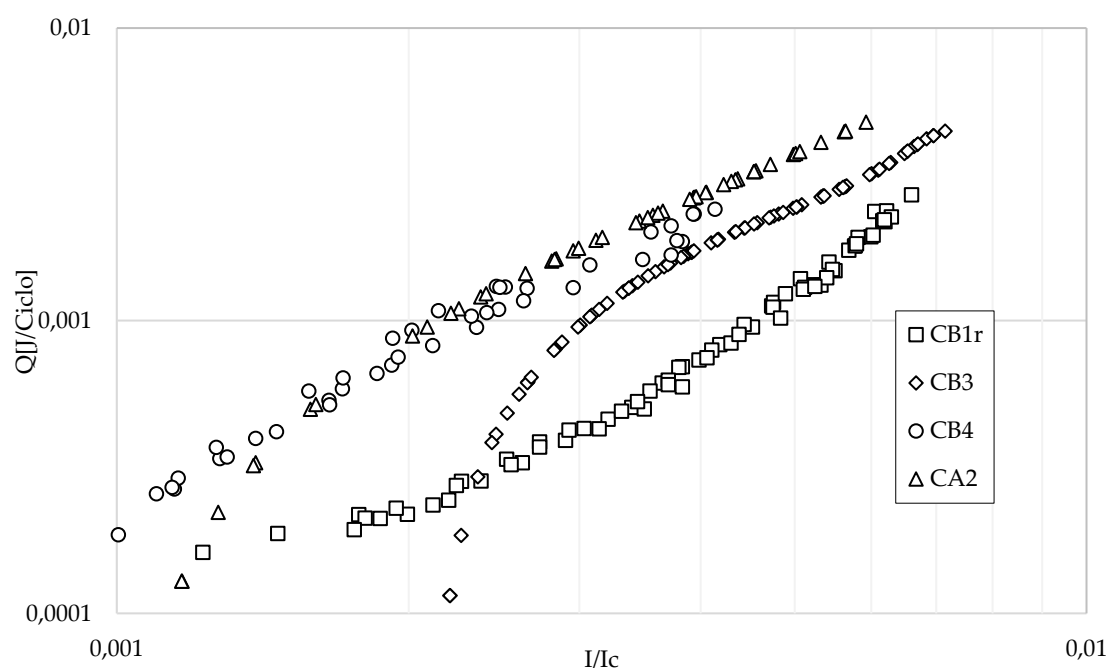


Figura 4.5 — Gráfico dos dados de entrada da rede neuronal do transformador processados pela rede neuronal da bobina.

Após a realização do treino da rede neuronal conclui-se que a melhor arquitetura é a apresentada na Figura 4.6, que é composta por 2 camadas, ambas com 31 neurónios.

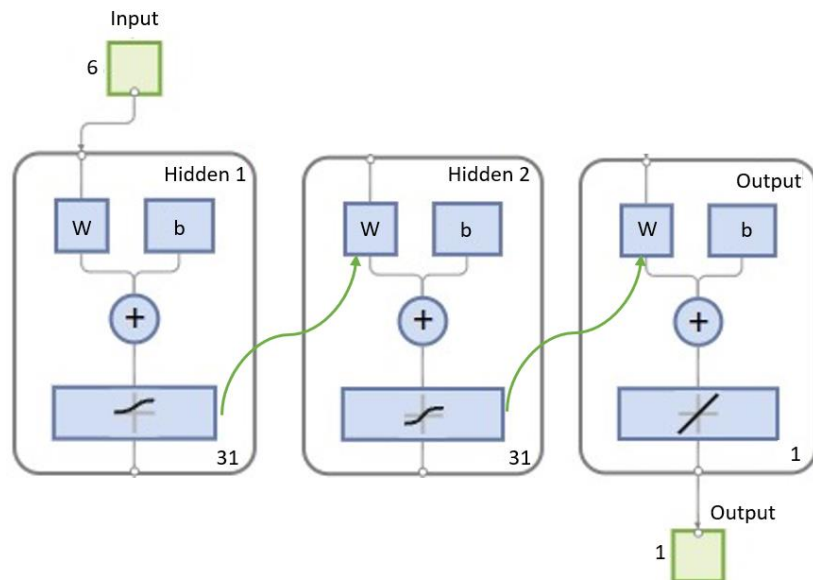


Figura 4.6 — Estrutura da rede neuronal final.

O resultado do treino da rede neuronal apresenta-se na Figura 4.7, com quatro gráficos onde estão representadas as aproximações dos dados previstos pela rede neuronal com os dados que foram medidos. Cada gráfico, está associado a um grupo de dados (*i.e.*, Treino, Teste e Validação) contando adicionalmente com um gráfico que compara a globalidade dos dados. Para esta rede foi possível obter uma performance de $7,2075 \times 10^{-06}$ ao 8º ciclo com um valor de R de 0,99343. Considerando a rede neuronal da bobina, os resultados apresentados nestes gráficos não são tão satisfatórios. Esta diferença observada, poderá dever-se à qualidade dos dados utilizados (uma vez que não apresentam uma tendência clara), como mencionado na secção 3.2.4.

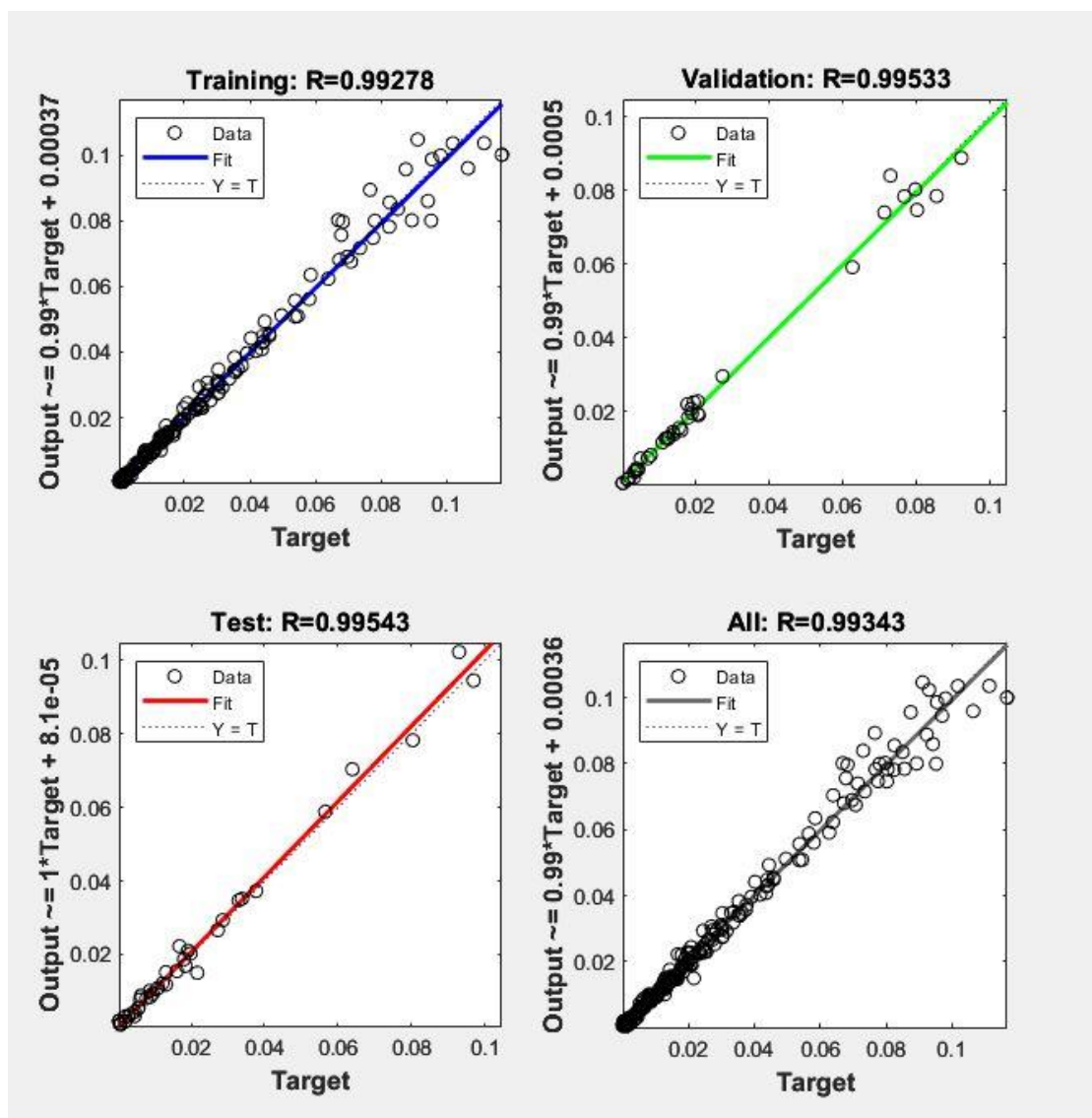


Figura 4.7 — Gráficos das regressões associadas à rede neuronal do transformador onde é apresentado o gráfico dos dados de treino, validação, teste e de todos em conjunto.

Complementarmente, no gráfico da Figura 4.8 é apresentada a sobreposição dos dados previstos pela rede neuronal em comparação com os dados do ensaio. Sendo possível verificar que para valores de corrente abaixo de 0,17% da I_c a disparidade entre os valores medidos em comparação com os valores previstos aumenta. Esta análise vai ao encontro da problemática já descrita nos dados de entrada provenientes da rede neuronal da bobina, que para valores de corrente menores apresenta um padrão anômalo nos valores das perdas, pelo que é mais suscetível a erros de previsão.

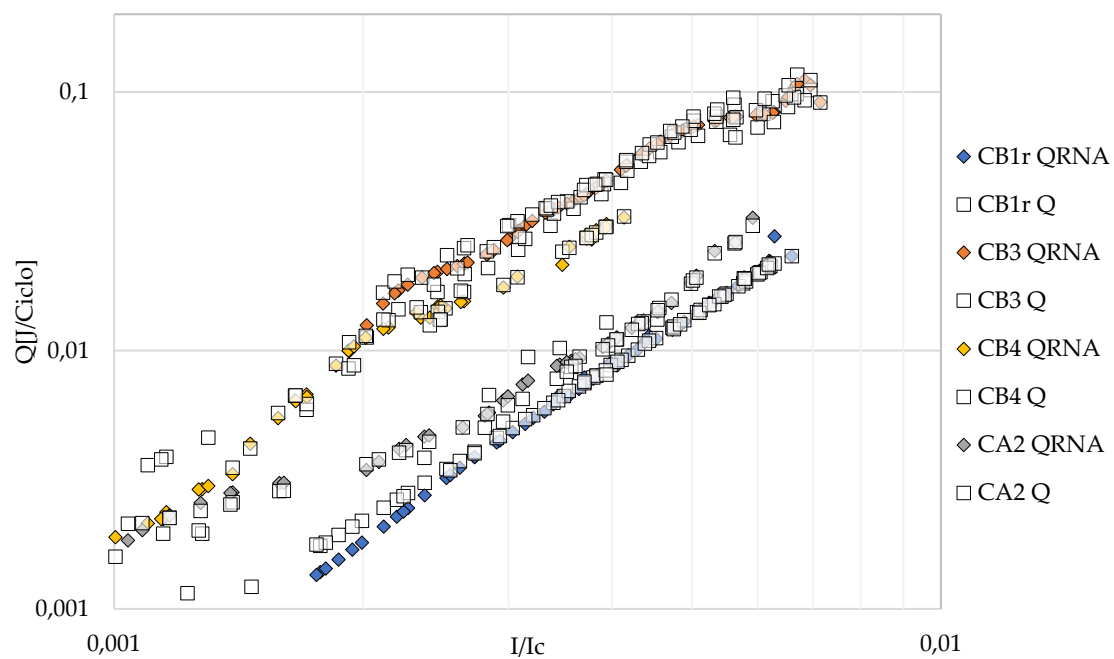


Figura 4.8 — Comparação dos dados medidos em relação aos dados previstos pela RNA. QRNA correspondendo aos dados associados à rede neuronal e Q aos dados obtidos experimentalmente.

CONCLUSÃO

Com o intuito de evitar o uso do método dos elementos finitos e facilitar a fase de projeto de equipamentos supercondutores foi realizada uma abordagem baseada na obtenção de dados experimentais e no uso de redes neurais como forma de previsão das perdas AC associadas a um dado dispositivo. Estes objetivos foram parcialmente alcançados, sendo que foi provada a possibilidade de prever as perdas AC associadas a um transformador através do método descrito, no entanto, com um grau de certeza insatisfatório, devido ao intervalo de correntes dos dados das redes neurais ser diferente e às medições práticas do transformador não apresentarem um padrão preciso.

Neste sentido, com os resultados obtidos e a validação do conceito pretendido, existem várias propostas de trabalho futuro de forma a dar seguimento ao projeto que está a ser desenvolvido (tLoss). Numa perspetiva de expansão da base de dados para treino das redes, seria de interesse elaborar ensaios com diferentes núcleos, diferentes frequências para além dos 50 Hz utilizados, utilização de uma maior variedade de fitas supercondutoras, realizar ensaios com um transformador trifásico, elaborar testes com diferentes formas de enrolamentos, assim como, utilizar uma maior variedade de número de enrolamentos nas bobinas e a realização de ensaios com diferentes metodologias para corroboração dos dados obtidos. Adicionalmente, com o mesmo objetivo também seria relevante abranger diferentes criostatos com maior robustez e menos perdas calorimétricas e análise da viabilidade da realização de estudos em diferentes dispositivos supercondutores, em que este modelo, com recurso a redes neurais, poderá ser útil.

Por fim, equacionando os resultados obtidos e a problemática abordada neste trabalho, verifica-se a possibilidade da previsão de perdas AC associadas a equipamentos supercondutores, devido à proximidade das previsões efetuadas com os dados reais obtidos. Todavia, salienta-se a necessidade do desenvolvimento de uma base de dados maior e diversificada de modo a alcançar resultados conclusivos sobre a viabilidade deste modelo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Costa, M. B. S. e Pavao, A. C. (2012). Supercondutividade: um século de desafios e superação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 34, 2602-2615. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172012000200017>.
- [2] Van Delft, D. e Kes, P. (2010). The discovery of superconductivity. *Physics Today*, 63, 38-43. <https://doi.org/10.1063/1.3490499>.
- [3] Khorrami, M. (2013). New research in Superconductivity. Em APS March Meeting Abstracts, Baltimore, 58, H1-235. <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2013.MAR.H1.235>.
- [4] Bussmann-Holder, A. e Keller, H. (2020). High-temperature superconductors: underlying physics and applications. *Zeitschrift für Naturforschung B*, 75, 3-14. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2761740>.
- [5] Sarangi, S., Chockalingam, S. P. e Bhat, S. V. (2005). Frequent Josephson junction decoupling is the main origin of ac losses in the superconducting state. *Journal of applied physics*, 98, 073906. <https://doi.org/10.1063/1.2073975>.
- [6] Rey, C. (2015). Superconductors in the power grid: Materials and applications. Elsevier Science. ISBN 978-1-78242-037-8.
- [7] Tinkham, M. (2004). Introduction to superconductivity. New york: Courier Corporation. ISBN 978-0-486-43503-9.
- [8] Kalsi, S. S. (2011). Applications of high temperature superconductors to electric power equipment. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-16768-7.

[9] Allen, P. B., Bedard, F. D., Belitz, D., Crow, J. E., Ferrell, R. A., Lynn, J. W., ... Wang, C. S. (1990). High temperature superconductivity. New york: Lynn J.W. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3222-3>.

[10] Carr Jr, W. J. (2001). AC loss and macroscopic theory of superconductors. London: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482264760>.

[11] Norris, W. T. (1970). Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 3(4), 489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2017.07.013>

[12] Shen, B., Li, J., Geng, J., Fu, L., Zhang, X., Li, C., Zhang, H., Dong, Q., Jun, M., e Coombs, T. A. (2017). Investigation and comparison of AC losses on stabilizer-free and copper stabilizer HTS tapes. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 541, 40-44. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2017.07.013>

[13] Poole, C. P., Farach, H. A., e Creswick, R. J. (2013). Superconductivity. Academic press. ISBN 0-12-561456-X

[14] Stavrev, S., e Dutoit, B. (1998). Frequency dependence of AC loss in Bi (2223) Ag-sheathed tapes. *Physica C: Superconductivity*, 310, 86-89.

[15] Wang, Y., Guan, X. e Dai, J. (2014). Review of AC loss measuring methods for HTS tape and unit. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24, 1-6. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2340457>.

Feito até aqui a numeração

[16] Elschner, S., Kudymow, A., Fink, S., Goldacker, W., Grilli, F., Schacherer, C., ... Noe, M. (2011). ENSYSTROB—Resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. Em: *IEEE transactions on applied superconductivity*, 21, 1209-1212. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2100799>.

[17] Yazdani-Asrami, M., Gholamian, S. A., Mirimani, S. M. e Adabi, J. (2021). Influence of field-dependent critical current on harmonic AC loss analysis in HTS coils for superconducting

transformers supplying non-linear loads. *Cryogenics*, 113, 103234. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103234>.

[18] Sohn, M. H., Sim, K., Eom, B., Jeong, Y. W., Kim, H. S., Ha, D. W. e Seong, K. (2016). Stability and quench behaviors of conduction-cooled 2G HTS coil cowound with SS tape. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26, 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2535998>.

[19] Sytnikov, V. E., Vysotsky, V. S., Radchenko, I. P. e Polyakova, N. V. (2008). 1G versus 2G-comparison from the practical standpoint for HTS power cables use. Em: *Journal of Physics: Conference Series, Brussels*, 97, 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/97/1/012058>.

[20] Kurbatova, E., Kurbatov, P., Kuschenko, E., Sysoev, M. e Kulaev, Y. (2020). Comparison of properties of a bulk HTS and a stack of HTS tapes after FC and ZFC. Em: *Journal of Physics: Conference Series, Glasgow*, 1559, 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1559/1/012049>.

[21] Dondapati, R. S. (2019). Manufacturing of Superconducting Tapes for Energy Storage Applications: A Comprehensive Review. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6, 823-830. ISSN-2349-5162.

[22] Song, H., Brownsey, P., Zhang, Y., Waterman, J., Fukushima, T. e Hazelton, D. (2012). 2G HTS coil technology development at SuperPower. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23, 4600806-4600806. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2233837>.

[23] Dai, S., Ma, T., Xue, C., Zhao, L., Huang, Y., Hu, L., ... Chen, H. (2019). Development and test of a 220 kV/1.5 kA resistive type superconducting fault current limiter. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 565, 1253501. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.06.004>.

[24] Hassenzahl, W. V., Hazelton, D. W., Johnson, B. K., Komarek, P., Noe, M., e Reis, C. T. (2004). Electric power applications of superconductivity. *Proceedings of the IEEE*, 92(10), 1655-1674. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.833674>

- [25] Lee, C., Son, H., Won, Y., Kim, Y., Ryu, C., Park, M., e Iwakuma, M. (2020). Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPCO in Korea. *Superconductor Science and Technology*, 33, 044006. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab6ec3>
- [26] Mehta, S. P., Aversa, N. e Walker, M.S. (1997). Transfonning transformers [superconducting windings]. *IEEE Spectrum*, 34, 43-49. <https://doi.org/10.1109/6.609815>
- [27] Alam, M. S., Abido, M. A. Y., e El-Amin, I. (2018). Fault current limiters in power systems: A comprehensive review. *Energies*, 11, 1025. <https://doi.org/10.3390/en11051025>
- [28] Chen, X. Y., Jin, J. X., Xin, Y., Shu, B., Tang, C. L., Zhu, Y. P., e Sun, R. M. (2014). Integrated SMES technology for modern power system and future smart grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24, 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2346502>
- [29] Zhang, H., Wen, Z., Grilli, F., Gyftakis, K., e Mueller, M. (2021). Alternating current loss of superconductors applied to superconducting electrical machines. *Energies*, 14, 2234. <https://doi.org/10.3390/en14082234>
- [30] Kulkarni, S. V., e Khaparde, S. A. (2013). Transformer engineering: design, technology, and diagnostics. CRC press. ISBN: 978-1-4398-5418-1
- [31] Dawood, K., Komurgoz, G., e Isik, F. (2019). Modeling of distribution transformer for analysis of core losses of different core materials using FEM. Em: 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), pp. 1-5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2019.8880392>
- [32] Dawood, K., CINAR, M. A., ALBOYACI, B., e SONMEZ, O. (2017). Efficient Finite Element Models for Calculation of the No-load losses of the Transformer. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 11-21. <https://doi.org/10.24107/ijeas.309933>
- [33] Morandi, A., Trevisani, L., Ribani, P. L., Fabbri, M., Martini, L., e Bocchi, M. (2008, February). Superconducting transformers: key design aspects for power applications. Em: Journal of Physics: Conference Series, p. 012318. IOP Publishing.

- [34] Donnier-Valentin, G., Tixador, P., e Vinot, E. (2001). Considerations about HTS superconducting transformers. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 11, 1498-1501. <https://doi.org/10.1109/77.920059>
- [35] Wu, S., Fang, J., Fang, L., Zhang, A., Wang, Y. e Wu, Y. (2019). The influence of flux diverter structures on the AC loss of HTS transformer windings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29, 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2891586>
- [36] Irannezhad, F. e Heydari, H. (2020). Conducting a survey of research on high temperature superconducting transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30, 1-13. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2983970>
- [37] Iwakuma, M., Sakaki, K., Tomioka, A., Miyayama, T., Konno, M., Hayashi, H., Okamoto, H., Gosho, Y., Eguchi, T., Yoshida, S., Suzuki, Y., Hirai, H., Iijima, Y., Saitoh, T., Izumi, T. e Shiohara, Y. (2014). Development of a 3 Φ -66/6.9 kV-2 MVA REBCO Superconducting Transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25, 1-6. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2364615>
- [38] Leclerc, J., Hell L. M., Lorin, C. e Masson, P. J. (2016). Artificial neural networks for AC losses prediction in superconducting round filaments. *Superconductor Science and Technology*, 29, 065008. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/6/065008>.
- [39] Yazdani-Asrami, M., Taghipour-Gorjikolaie, M., Song, W., Zhang, M. e Yuan, W. (2020). Prediction of nonsinusoidal AC loss of superconducting tapes using artificial intelligence-based models. *IEEE Access*, 8, 207287-207297. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037685>.
- [40] Elsheikh, A. H., Sharshir, S. W., Abd Elaziz, M., Kabeel, A. E., Guilan, W. e Haiou, Z. (2019). Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review. *Solar Energy*, 180, 622-639. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.037>.
- [41] Anwar, K. e Deshmukh, S. (2018). Use of artificial neural networks for prediction of solar energy potential in southern states of India. Em: *2018 2nd International conference on green*

energy and applications (ICGEA), Singapore, 63-68.
<https://doi.org/10.1109/ICGEA.2018.8356321>.

[42] Zhang, Z., Ren, L., Xu, Y., Wang, Z., Xia, Y., Liang, S., ... Tang, Y. (2018). AC loss prediction model of a 150 kJ HTS SMES based on multi-scale model and artificial neural networks. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54, 1-5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2829711>.

[43] Yazdani-Asrami, M., Taghipour-Gorjikolaie, M., Song, W., Zhang, M., e Yuan, W. (2020). Prediction of nonsinusoidal AC loss of superconducting tapes using artificial intelligence-based models. *IEEE Access*, 8, 207287-207297. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037685>

[44] Šouc, J., & Gömöry, F. (2002). New approach to the ac loss measurement in the superconducting secondary circuit of an iron-core transformer. *Superconductor Science and Technology*, 15, 927. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/15/6/316>

[45] Szewczyk, R. (2016). Technical BH saturation magnetization curve models for SPICE, FEM and MoM simulations. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 10, 3-7. https://doi.org/10.14313/JAMRIS_2-2016/10

1. Código Matlab

```
T = readtable('bobina_resultados_all_coils_s_grafico.xlsx');
T = removevars(T,{'Nome','I','Ic_B','Ic_A'});
Inputs = removevars(T, {'Q'});
Targets = [T.Q];
Inputs = table2array(Inputs);
Inputs = Inputs.';
Targets = Targets.';
transferFunc = ["elliotsig", "logsig", "tansig"];
minH = 1;
maxH = 30;
numNN = 3;
bestNetOne = cell(1, 3);
bestNetTwo = cell(1, 3);
bestNetThree = cell(1, 3);
best_perf = 10000;
best_perf2 = 10000;
best_perf3 = 10000;
k=0;
global_start = tic;
len_transfer_function = length(transferFunc);
for nnn = 1:1:numNN
    for k1 = minH:2:maxH
        loop_start = tic;
        net = feedforwardnet(k1,'trainlm');
        net.layers{1}.transferFcn = transferFunc(1);
```

```

[best_perf, auxNet] = trainNetwork(net, best_perf, Inputs, Targets);
if isa(auxNet, 'cell')
    bestNetOne = auxNet;
end
for k2 = minH:2:maxH
    net = feedforwardnet([k1 k2], 'trainlm');
    net.layers{1}.transferFcn = transferFunc(1);
    net.layers{2}.transferFcn = transferFunc(2);
    [best_perf2, auxNet] = trainNetwork(net, best_perf2, Inputs, Targets);
    if isa(auxNet, 'cell')
        bestNetTwo = auxNet;
    end
    for k3 = minH:2:maxH
        net = feedforwardnet([k1 k2 k3], 'trainlm');
        net.layers{1}.transferFcn = transferFunc(1);
        net.layers{2}.transferFcn = transferFunc(2);
        net.layers{3}.transferFcn = transferFunc(3);
        [best_perf3, auxNet] = trainNetwork(net, best_perf3, Inputs, Targets);
        if isa(auxNet, 'cell')
            bestNetThree = auxNet;
        end
    end
end
disp(k);
k=k+1;
loop_time = toc(loop_start);
end
end
global_time = toc(global_start);
clear i k1;
net = bestNetOne{1, 1};
tr = bestNetOne{1, 2};

```

```

net2 = bestNetTwo{1, 1};
tr2 = bestNetTwo{1, 2};
net3 = bestNetThree{1, 1};
tr3 = bestNetThree{1, 2};
save('coil_4_net_1_layer.mat', 'net');
save('coil_4_net_2_layers.mat', 'net2');
save('coil_4_net_3_layers.mat', 'net3');
function [best_perf, bestNet] = trainNetwork(net, best_perf, Inputs, Targets)
    net.trainParam.showWindow = false;
    net = init(net);
    [net, tr] = train(net, Inputs, Targets);

    Outputs = net(Inputs);

    perf = perform(net, Targets, Outputs);

    if best_perf > perf
        best_perf = perf;
        bestNet{1, 1} = net;
        bestNet{1, 2} = tr;
        bestNet{1, 3} = perf;
    else
        bestNet = 0;
    end
end
end

```

2 Código Python

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""

```

Created on Sat Jun 11 17:40:12 2022

@author: Alexandre Cardoso

''''''

```
import csv
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import integrate
from numpy import diff
import numpy as np
import scipy.interpolate
import pylab
from scipy.integrate import quad
import pandas as pd
import math

perdas=np.zeros( (5, 271) )
matrixCorrente=np.zeros( (5, 271) )
phi=np.zeros( (5, 271) )

j=1
i=1

while j<2:
    if j==1:
        cb="CB"+str(j)
        print(cb)
        while i<98:
            if i<10:
                path="CA2_v2\ \BK00000"+str(i)+".CSV"
            else:
                path="CA2_v2\ \BK0000"+str(i)+".CSV"
            print(path)
            with open(path, 'r') as file:
                csvreader = csv.reader(file)
```

```

header = next(csvreader)
subheader = next(csvreader)

tempo = []
tensao = []
corrente = []
potencia = []
energia = []

for row in csvreader:

    tempo.append(float(row[3]))
    tensao.append(float(row[4]))
    corrente.append(float(row[5]))
    potenciaTemp=float(row[4])*float(row[5])
    potencia.append(potenciaTemp)
    #I1 = integrate.trapz(potencia, tempo)
    # energia.append(I1)

# plt.figure()
# plt.plot(tempo[3750:6250], tensao[3750:6250], 'r', tempo[3750:6250], corrente[3750:6250],
'b', tempo[3750:6250], potencia[3750:6250], 'g')
# plt.show()

# energiaAbs=[abs(ele) for ele in energia[3750:6250]]
tuple_max_tensao = np.where(tensao[3750:6250] == np.max(tensao[3750:6250]))
tuple_max_corrente = np.where(corrente[3750:6250] == np.max(corrente[3750:6250]))
max_tensao=tuple_max_tensao[0]
max_corrente=tuple_max_corrente[0]
deltaT=tempo[max_tensao[0]+3750]-tempo[max_corrente[0]+3750]
T=-tempo[3750]+tempo[6250]
phi[j][i]=deltaT*2*math.pi/T

```

```

cosphi=abs(math.cos(phi[j][i]))

correnteSquare=[(ele*ele) for ele in corrente[3750:6250]]
# plt.figure()
# plt.plot(tempo[3600:6400], energiaAbs, 'r', )
# plt.show()

# f = scipy.interpolate.interp1d(tempo[3750:6250], energiaAbs, kind='linear')
# f2 = scipy.interpolate.interp1d(tempo[3750:6250], correnteSquare, kind='linear')

# joulePerCycle, erroDeCalculo = quad(f, tempo[3751],tempo[6249])
# correnteIntegral, erro = quad(f2, tempo[3751],tempo[6249])

potenciaAbs=[ele for ele in potencia[3750:6250]]
joulePerCycle=scipy.integrate.trapz(potenciaAbs,tempo[3750:6250])
correnteIntegral=scipy.integrate.trapz(correnteSquare,tempo[3750:6250])

plt.figure()
plt.plot(tensao[3750:6250])
plt.show

perdas[j][i]=joulePerCycle
print(correnteIntegral)
matrixCorrente[j][i] = math.sqrt(correnteIntegral/(-tempo[3750]+tempo[6250]))
phi[j][i]=cosphi

i+=1
j+=1

CB1=[]
CB1corrente=[]

```

```
CB1phi=[]
```

```
CB2=[]
```

```
CB2corrente=[]
```

```
CB2phi=[]
```

```
CB3=[]
```

```
CB3corrente=[]
```

```
CB3phi=[]
```

```
CB4=[]
```

```
CB4corrente=[]
```

```
CB4phi=[]
```

```
for ele in perdas[1][:]:
```

```
    if ele != 0:
```

```
        CB1.append(ele)
```

```
for ele in perdas[2][:]:
```

```
    if ele != 0:
```

```
        CB2.append(ele)
```

```
for ele in perdas[3][:]:
```

```
    if ele != 0:
```

```
        CB3.append(ele)
```

```
for ele in perdas[4][:]:
```

```
    if ele != 0:
```

```
        CB4.append(ele)
```

```
for ele in matrixCorrente[1][:]:
```

```

if ele != 0:
    CB1corrente.append(ele)

for ele in matrixCorrente[2][:]:
    if ele != 0:
        CB2corrente.append(ele)

for ele in matrixCorrente[3][:]:
    if ele != 0:
        CB3corrente.append(ele)

for ele in matrixCorrente[4][:]:
    if ele != 0:
        CB4corrente.append(ele)

for ele in phi[1][:]:
    if ele != 0:
        CB1phi.append(ele)

for ele in phi[1][:]:
    if ele != 0:
        CB2phi.append(ele)

for ele in phi[1][:]:
    if ele != 0:
        CB3phi.append(ele)

for ele in phi[1][:]:
    if ele != 0:
        CB4phi.append(ele)

```

```
data = {"Corrente CB1":CB1corrente,"CB1": CB1,"Corrente CB3":CB3corrente,"CB3": CB3,"Cor-  
rente CB4":CB4corrente,"CB4": CB4}  
df = pd.DataFrame(data)  
df.to_csv('exp.csv')
```

3 Gráficos Adicionais

