

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR

Célia Marli Tokarski Dieguez

**Sistema de Caracterização de Susceptibilidade
Magnética por Refletometria no Domínio do Tempo**

Curitiba

2017

Célia Marli Tokarski Dieguez

**Sistema de Caracterização de Susceptibilidade
Magnética por Refletometria no Domínio do Tempo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração de Sistemas Eletrônicos, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora
(DELT/UFPR)

Co-Orientador: Prof. Dr. Márlcio José do Couto
Bonfim (DELT/UFPR)

Curitiba

2017

D559s

Dieguez, Célia Marli Tokarski

Sistema de caracterização de susceptibilidade magnética por refletometria no domínio do tempo / Célia Marli Tokarski Dieguez. – Curitiba, 2017.
72 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

Orientador: César Augusto Dartora
Coorientador: Márlío José do Couto Bonfim.

1. Magnetismo. 2. Susceptibilidade magnética. 3. Curva de histerese.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Dartora, César Augusto. III. Bonfim,
Márlío José do Couto IV. Título.

CDD: 538



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGE
Setor de Tecnologia

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de CELIA MARLI TOKARSKI DIEGUEZ intitulada: Sistema de Caracterização de Susceptibilidade Magnética por Refletometria no Domínio do Tempo, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 10 de Maio de 2017.

MARLIO JOSE DO COUTO BONFIM
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

EDUARDO GONÇALVES DE LIMA

Avaliador Interno (UFPR)

ISMAEL CHIAMENTI

Avaliador Externo (UTFPR)

Agradecimentos

Agradecimento especial à minha filha Fernanda, que me fez ver a vida de outro ângulo e impulsionou iniciar este projeto. Ao meu orientador Dr. César Augusto Dartora, pelo apoio e dedicação neste trabalho, pois sem todo seu auxílio este projeto não seria viável. Ao meu coorientador Dr. Marlio J. do C. Bonfim, por todo seu conhecimento técnico. Ao Lécio V. Montanheiro, técnico do laboratório LAMMI, pela presteza e parceria. Ao Fabiano Thomazi, pela cooperação na confecção de amostras e dicas de trabalho. Ao aluno de iniciação científica Lucas Berbeka Cleto, pela ajuda e companheirismo em todos os momentos. À minha família, pelo suporte e compreensão. A todos os alunos de iniciação científica e aos demais com quem dividi o espaço do laboratório LAMMI neste período, pelos momentos de descontração e aprendizado que passamos juntos, entre eles: Bruna Resende, Bruno Ricobom, Cassiano Miranda, Henrique Dezidério, Igor Simão, Jean Alves, João Predebon, Leonardo Costa, Lucas Ferreira, Matheus Drummond e Miguel Jimenez. À UFPR e Lactec pela bolsa de estudos. E por fim, a todos os que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste projeto.

Resumo

Materiais com propriedades magnéticas pronunciadas têm importantes aplicações em uma variada gama de itens que utilizamos diariamente, indo desde máquinas elétricas e transformadores, passando pelas etiquetas magnéticas e indo até as nanoestruturas utilizadas em sensores de magnetorresistência gigante. O presente trabalho investiga um aparato experimental de refletometria no domínio do tempo (TDR) para a caracterização de susceptibilidade magnética de amostras de materiais magnéticos em diversas temperaturas, variando de 9 K até temperatura de 300 K. A técnica de TDR utiliza-se da reflexão que ocorre quando um pulso propagante em uma linha de transmissão encontra uma terminação na qual a impedância da carga conectada à linha é distinta da impedância característica da linha. O pulso resultante é devidamente tratado com auxílio das ferramentas numéricas, permitindo calcular a susceptibilidade magnética e determinar a curva de histerese do material analisado. Caracterizou-se uma fita magnética composta de níquel e ferro, principalmente, que é empregada em etiquetas de segurança, e também um material do tipo Heusler, cuja composição estequiométrica é Ni_2MnGa .

Palavras Chave: Magnetismo, Refletometria no Domínio do Tempo, Susceptibilidade Magnética, Curva de Histerese, Criogenia.

Abstract

Materials possessing pronounced magnetic properties have relevant uses in a vast range of technological applications, such as electrical machines, transformers, inductors and nanostructures used in giant magnetoresistance sensors. The present work investigates an experimental apparatus using the time domain reflectometry (TDR) technique, for magnetic susceptibility characterization at temperatures ranging from 9K to room temperature. The TDR considers the reflection effect that occurs when a propagating pulse on a transmission line encounters a load impedance connected to its termination, which differs from the transmission line characteristic impedance. After numerical analysis of the reflected pulse it is possible to obtain magnetic susceptibility and hysteresis loop of the material under study. A material composed mainly by Ni and Fe, commonly used as a magnetic tag, and a Heusler compound with stoichiometry Ni_2MnGa were characterized.

Keywords: Time Domain Reflectometry, Magnetic Susceptibility, Hysteresis Loop, Cryogenics.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Justificativa e Objetivos	17
1.2	Estrutura desta Dissertação	19
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Materiais Magnéticos e Histerese	20
2.1.1	Fontes de Campo Magnetostático	23
2.1.2	Susceptibilidade Magnética Dinâmica	25
2.2	Técnica de Refletometria no Domínio do Tempo	27
3	Métodos Experimentais	32
3.1	Desenvolvimento do Aparato Experimental	32
3.2	Validação do Aparato Experimental	37
3.3	Sistema para Temperaturas Criogênicas	50
4	Resultados	53
4.1	Heusler	53
4.2	Fita Magnética	58
5	Conclusão	64
5.1	Perspectivas	66

Lista de Figuras

2.1	Gráfico ilustrativo de uma curva de histerese, com diferentes campos magnéticos [28].	23
2.2	A técnica de refletometria no domínio do tempo, utilizando um cabo coaxial e um indutor com núcleo do material a ser analisado na terminação como impedância de carga.	31
3.1	Diagrama esquemático do gerador de pulsos, onde (1) Multivibrador astável assimétrico, (2) Inversor e deslocador de nível e (3) Defasador.	33
3.2	Simulação de Transitório na Ferramenta QUCS, do circuito gerador do pulso desenvolvido no LAMMI. Onde a onda apresentada é a onda resultante.	34
3.3	Placa do circuito gerador do pulso, desenvolvido no LAMMI.	34
3.4	Porta Amostra indutivo, com núcleo da amostra do material a ser analisado.	36
3.5	Ímã de neodímio-ferro-boro.	37
3.6	Bobina com núcleo de ferrite. Campo magnético medido no centro da abertura no ferrite de 35,7 mT/A.	37
3.7	Comparação de uma onda incidente teórica com a onda obtida pelo gerador de pulsos utilizados no experimento.	38

3.8	Intensidade espectral de uma onda incidente teórica comparada com a intensidade espectral da onda obtida pelo gerador de pulsos utilizados no experimento.	39
3.9	Resultado do Teste Curto-Circuito, onde (a) é a resistência e (b) é a reatância.	40
3.10	Pulso Incidente $V_{inc}(0, t)$ e Pulso Refletido $V_{refl}(0, t)$ em função do tempo, observado no osciloscópio em $z = 0$ para uma carga resistiva de 68Ω	41
3.11	Intensidade espectral do (a) pulso incidente e (b) pulso refletido, por uma carga $R_L = 68\Omega$, calculada a partir da medida em $z = 0$	42
3.12	Resultado da Resistência de Carga $R_L = 68 \Omega$, em função da Frequência, extraído experimentalmente pelo processo de TDR. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.	43
3.13	Detalhe ampliado para a Resistência (a) e Reatância (b) da Carga $R_L = 68 \Omega$, em função da frequência, na faixa de 10 a 50 MHz, medidos pelo método TDR.	44
3.14	Resultado para uma resistência de carga $R_L = 68 \Omega$, em função da frequência, extraído experimentalmente pelo Analisador de Redes. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.	45
3.15	Gráfico comparativo para os resultados de cargas resistivas conhecidas, medidos pelo Analisador de Redes (AR), representado pela linha tracejada com asterisco e pelo método de Refletometria no Domínio do Tempo (TDR), representado pela linha contínua com zeros.	47

3.16	Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo método TDR.	48
3.17	Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo Analisador de Redes.	48
3.18	Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo método TDR, na faixa de frequência de 10 MHz a 50 MHz.	49
3.19	Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo Analisador de Redes, na faixa de frequência de 10 MHz a 50 MHz.	50
3.20	Criostato do laboratório LAMMI. A torre de resfriamento, onde fica a amostra sob temperatura criogênica pode ser observada sobre a mesa, ao lado direito da figura.	51
3.21	Representação do Sistema de Criogenia implementado no Laboratório LAMMI da UFPR.	51
4.1	Amostra de material Heusler, inserida em um porta amostra indutivo com 12 espiras.	54
4.2	Pulso Incidente $V_{inc}(0, t)$ e Pulso Refletido $V_{refl}(0, t)$ em função do tempo, observados no osciloscópio em $z = 0$ para uma amostra de material Heusler.	54
4.3	Intensidade espectral do (a) pulso incidente e (b) pulso refletido, por uma carga indutiva com material Heusler, calculadas a partir da medida em $z = 0$	55

4.4	Resultado da Resistência de Carga indutiva com material Heusler em função da Frequência, extraído experimentalmente pelo processo de TDR. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.	56
4.5	Comparação entre a curva do material à 10 K de temperatura com o mesmo material em temperatura ambiente.	56
4.6	Comparação entre a curva de histerese do material à 10 K: sem campo magnético, com campo magnético (positivo) e com campo magnético invertido(negativo).	57
4.7	Porta amostra indutivo com 11 espiras, com núcleo de Fita Magnética.	59
4.8	Pulso Incidente $V_{inc}(0, t)$ e Pulso Refletido $V_{refl}(0, t)$ em função do tempo, observados no osciloscópio em $z = 0$ para a carga de Bobina com núcleo de Fita Magnética.	59
4.9	Resultado da Impedância de Carga indutiva com Fita Magnética em função da Frequência, extraído experimentalmente pelo processo de TDR. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.	60
4.10	Valores de reatância com a variação de temperatura, na faixa de frequência de 10 a 50MHz.	60
4.11	Comparação entre a curva de histerese da Fita Magnética à 9 K: com aplicação de campo magnético ao eixo duro, ao eixo fácil e sem campo magnético.	61
4.12	Comparação entre a curva de histerese da Fita Magnética à Temperatura ambiente: com campo magnético aplicado ao eixo fácil, ao eixo duro e sem campo magnético.	61

4.13	Comparação da curva de histerese da Fita Magnética com campo no eixo fácil, à temperatura de 9 K com 300 K.	62
4.14	Permeabilidade Aparente em função da Temperatura, para a amostra Sem Campo aplicado, com Campo Magnético aplicado ao Eixo Duro e com o Campo Magnético aplicado ao Eixo Fácil.	63

Lista de Tabelas

3.1	Comparação de valores de cargas resistivas conhecidas, medidos com o Analisador de Redes e via método TDR	46
-----	---	----

Lista de Siglas e Abreviaturas

LAMMI - Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação

TDR - Refletometria no Domínio do Tempo

CC - Corrente Contínua

VHF - do inglês *Very High Frequency*, Frequência Muito Alta

AWG - *American Wire Gauge* (Escala americana para bitola de fios)

R_L - Resistência de Carga [Ω]

X_L - Reatância de Carga [Ω]

Γ_L - Coeficiente de Reflexão da Carga

α - Constante de Atenuação [np/m]

β - Constante de Fase [rad/m]

ω - Frequência Angular [rad/s]

\mathbf{M} - Magnetização [A/m]

\mathbf{H} - Intensidade de Campo Magnético [A/m]

\mathbf{B} - Indução Magnética ou Densidade de Fluxo Magnético [Wb/m² ou T]

\mathbf{H}_0 - Intensidade de Campo Magnetostático [A/m]

\mathbf{h} - Intensidade de Campo Magnético Variante no Tempo [A/m]

μ - Permeabilidade Magnética no Meio Material [H/m]

χ - Susceptibilidade Magnética

μ_0 - Permeabilidade Magnética do Vácuo ($\mu_0=4\pi 10^{-7}$ H/m)

c - Velocidade da Luz no Vácuo ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s)

v - Velocidade de Propagação da Onda Eletromagnética na Linha de Transmissão [m/s]

q - Carga da Partícula [C]

m - Massa da Partícula [kg]

f - Frequência [Hz]

ϕ_m - Fluxo Magnético [Wb/m]

γ - Constante Giromagnética [C/Kg]

T - Temperatura Absoluta [K]

Capítulo 1

Introdução

Materiais ferromagnéticos encontram importantes aplicações no contexto da Engenharia Elétrica, devido à ampla gama de aplicações tecnológicas, que vão desde a fabricação de indutores e transformadores, passando por circuladores de ferrites empregados em micro-ondas, fitas magnéticas de etiquetas e sistemas de RFID [1], até as memórias magnéticas e dispositivos de magnetorresistência gigante (GMR - do inglês *Giant Magneto-Resistance*)[2] ou ainda em discos de armazenamento de dados e cabeças de leitura.

O magnetismo é amplamente utilizado em inúmeras aplicações tecnológicas atuais, indo da escala macroscópica até os limites atômico-moleculares [3], [4], [5]:

- Geomagnetismo e magnetismo em larga escala [6];
- Desenvolvimento de materiais magnéticos para aplicações na indústria de motores elétricos e geradores de energia elétrica, eletroeletrônicos, dispositivos de micro-ondas, etc [7], [8], [9];
- Spintrônica e efeitos dependentes de *spin*, para aplicações em armazenamento e manipulação de dados. Futuramente vislumbra-se a com-

putação quântica, onde o *spin* pode ter papel relevante [7], [10], [11];

- Ressonância nuclear magnética e aplicações em tomógrafos de alta resolução [12], [13], [14].

Do exposto acima pode-se concluir que o domínio das propriedades magnéticas dos materiais é de fundamental importância tanto na Engenharia Elétrica, nas mais variadas aplicações, quanto como Ciência básica. Dessa forma, a caracterização da susceptibilidade magnética pode produzir informações úteis sobre o comportamento dos materiais na presença de campos magnéticos, com potencial de contribuição para o avanço tecnológico.

1.1 Justificativa e Objetivos

Dado o contexto apresentado acima, justifica-se a busca por técnicas e aparatos de medidas simples que sejam capazes de caracterizar a susceptibilidade magnética de amostras de materiais de propriedades magnéticas acentuadas, tendo em vista o amplo espectro de aplicações, indo desde baixas frequências até o domínio das micro-ondas, onde são utilizadas ferrites (ou ferritas) para melhor desempenho de indutores e transformadores, ou ainda em discos de armazenamento de dados e cabeças de leitura. É fundamental caracterizar de forma apropriada propriedades magnéticas e ciclos de histerese de materiais magnéticos, seja na forma de volume ou em filmes finos e nanoestruturas. Em regime de baixas frequências, pode-se utilizar a teoria de circuitos elétricos e medir uma indutância de um circuito RL (composto de Resistor e Indutor) por exemplo, para determinar a susceptibilidade magnética no núcleo do indutor. Métodos baseados em balanças de torção ou outros instrumentos capazes de determinar a susceptibilidade magnética à partir de conceitos mecânicos também são bastante utilizados [15]. Uma

abordagem mais sofisticada, baseada no efeito Kerr Magneto Óptico (MOKE - *Magneto-Optic Kerr Effect*) [16], [17], que consiste em medir a rotação de polarização da luz refletida por uma superfície magnetizada [18], também é muito empregada, sobretudo para determinar as propriedades magnéticas de filmes finos (porém com restrições devido à utilização de campo magnético pulsado de alta intensidade, gerando altas tensões induzidas nos terminais).

Outros métodos para determinação da susceptibilidade magnética de materiais, tais como a Tomografia de Ressonância Magnética (*Magnetic Resonance Imaging*- MRI) [19], Raio-X [20], Espectroscopia [21], entre outros, tornam-se caros e necessitam de equipamentos muito específicos para sua implementação. Nesse caso uma técnica bastante consagrada em vários tipos de caracterizações, mas não usual na caracterização magnética, denominada Refletometria no Domínio do Tempo (TDR - *Time Domain Reflectometry*) [22], que permite caracterizar a dinâmica de resposta magnética de amostras tanto no domínio de uns poucos MHz quanto no espectro das micro-ondas, onde a teoria de circuitos não é estritamente válida, por ser não-linear. A técnica de refletometria no domínio do tempo é versátil [23], [24], porque em um só tipo de caracterização, pode-se obter ciclos de histerese e, através de transformadas de Fourier, obter as funções de susceptibilidade no domínio da frequência.

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver um sistema de medidas magnéticas utilizando a técnica de refletometria no domínio do tempo, acoplado a um sistema de criogenia de ciclo fechado para permitir caracterizar a susceptibilidade magnética em amostras de alguns materiais magnéticos.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Desenvolver um sistema experimental baseado na refletometria no domínio do tempo para realizar medidas de susceptibilidade magnética, em ma-

teriais submetidos à campos magnetostáticos com amplitude de algumas dezenas de militeslas;

- Validar o uso do aparato de medida, realizando medições de referência em impedâncias de carga conhecidas, como resistores;
- Caracterização de susceptibilidade magnética em materiais de volume e de filmes finos, tanto em temperatura ambiente como em temperaturas criogênicas (Temperatura entre 9 kelvin e 373 kelvin, ou seja, entre -264°C e $+100^{\circ}\text{C}$).

1.2 Estrutura desta Dissertação

No capítulo presente foi apresentado o estado da arte, buscando explicar a contribuição deste trabalho no âmbito da Engenharia Elétrica. No Capítulo 2 será apresentada a Fundamentação Teórica pertinente para a compreensão da técnica de refletometria no domínio do tempo, que será empregada no aparato proposto. No Capítulo 3 serão apresentados os principais equipamentos utilizados bem como a validação de funcionamento do aparato com a medição de impedâncias de cargas conhecidas. No Capítulo 4 serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para medidas de uma fita magnética composta principalmente de uma liga de Ni e Fe, bem como uma liga do tipo Heusler, que possui como característica a memória de forma e, finalmente, no Capítulo 5 a conclusão geral do trabalho realizado, bem como perspectivas futuras, serão apresentadas.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo tem por finalidade apresentar de forma tão sucinta quanto possível os principais fundamentos teóricos necessários para compreender a metodologia experimental proposta na presente dissertação. Em primeiro lugar será discutido um modelo simples para a susceptibilidade magnética dinâmica, em regime linear, através de um tratamento puramente clássico, para depois discutir a técnica de refletometria no domínio do tempo, um método bastante versátil para caracterização de materiais e circuitos.

2.1 Materiais Magnéticos e Histerese

A origem da resposta magnética dos materiais está na sua estrutura atômico-molecular, sendo resultante da combinação do momento angular orbital e do momento angular de *spin* do elétron. A forma como ocorre a combinação entre esses momentos angulares determina como o material irá se comportar na presença de campos magnéticos aplicados. Na presença de uma excitação magnética os vários momentos magnéticos, eletrônicos e/ou nucleares - ou seja, os dipolos magnéticos de escala microscópica - vão se

reorientar segundo os níveis de energia que lhes sejam mais convenientes. A forma como a matéria responde à estimulação magnética depende, entretanto, não apenas do comportamento individual destes dipolos magnéticos frente ao estímulo externo, mas também de como estes relacionam-se entre si e de como esta relação é afetada pelo campo estimulante. A resposta ao estímulo é expressa na forma de uma magnetização do material, e há materiais que respondem de forma a opor-se fracamente à presença do estímulo em seu interior e há os que respondem fracamente a favor do estímulo, ambos fazendo-no de forma geralmente proporcional ao estímulo. Os primeiros são classificados como materiais diamagnéticos (por exemplo, o bismuto, o cobre, a prata, o chumbo, etc) e os últimos constituem o grupo dos materiais paramagnéticos (por exemplo, o alumínio, o magnésio, o sulfato de cobre, etc.). Há ainda os materiais que respondem de forma intensa ao campo estimulante, chamados de ferromagnéticos (são exemplos, seja na forma elementar ou em ligas, o ferro, o cobalto, o níquel, o gadolínio e o neodímio).

Os meios com propriedades magnéticas bastante pronunciadas geralmente apresentam anisotropia, sendo amplamente utilizados em dispositivos de micro-ondas, onde essa característica pode ser bem vinda. Exemplos típicos são as ferrites, compostos óxidos da forma $MO.FeO_2$, onde M é um metal. Na natureza é comum o composto $FeO.FeO_2$.

De modo simples pode-se definir os seguintes conceitos, particularizados para a resposta magnética dos materiais [25], [26], [27]:

- Homogeneidade: o meio homogêneo apresenta o mesmo valor de susceptibilidade em todos os pontos, ou seja, a função de susceptibilidade magnética independente da posição;
- Linearidade: um meio linear quanto à susceptibilidade magnética é aquele para o qual a magnetização \mathbf{M} é uma função linear do campo

\mathbf{H} , ou seja, \mathbf{M} e \mathbf{H} são proporcionais, e a razão entre seus módulos não depende da magnitude do campo aplicado \mathbf{H} . Em geral, os meios ferromagnéticos são altamente não-lineares, mas a susceptibilidade dinâmica pode ser linearizada em torno do ponto de operação, para pequenos sinais. Uma característica marcante de sistemas não-lineares é que podem apresentar curvas de histerese;

- Isotropia: em um meio isotrópico todas as direções e eixos de simetria são equivalentes, ou seja, não há direção preferencial ou distinta em um meio isotrópico. Corresponde à uma susceptibilidade na forma $\chi_{ij} = \chi\delta_{ij}$ sendo δ_{ij} a função delta de Kronecker. Materiais magnéticos geralmente apresentam algum grau de anisotropia, ou seja, as direções são distintas. Costuma-se definir dois eixos de referência:

[*] *Easy Axis* (Eixo Fácil): é o eixo onde a magnetização é preferencial. Em estado natural a magnetização tende a se alinhar ao *easy axis* do material, sendo necessária a aplicação do campo externo para reorientar a magnetização em outra direção;

[*] *Hard Axis* (Eixo Duro): corresponde ao eixo onde é necessária maior energia para alinhar a magnetização na direção paralela a este eixo.

A tendência que um material tem em conservar a sua magnetização, após esta ser retirada do sistema, pode ser entendida como histerese magnética (a densidade de fluxo magnético não diminui tão rapidamente quanto o campo magnetizante, como pode ser ilustrado na Figura 2.1). Cada material tem seu ponto de saturação, que pode ser definido como o máximo de magnetização que um material pode assumir. Um aumento do campo magnético acima do limiar de saturação não provocará nenhum aumento da

magnetização [28].

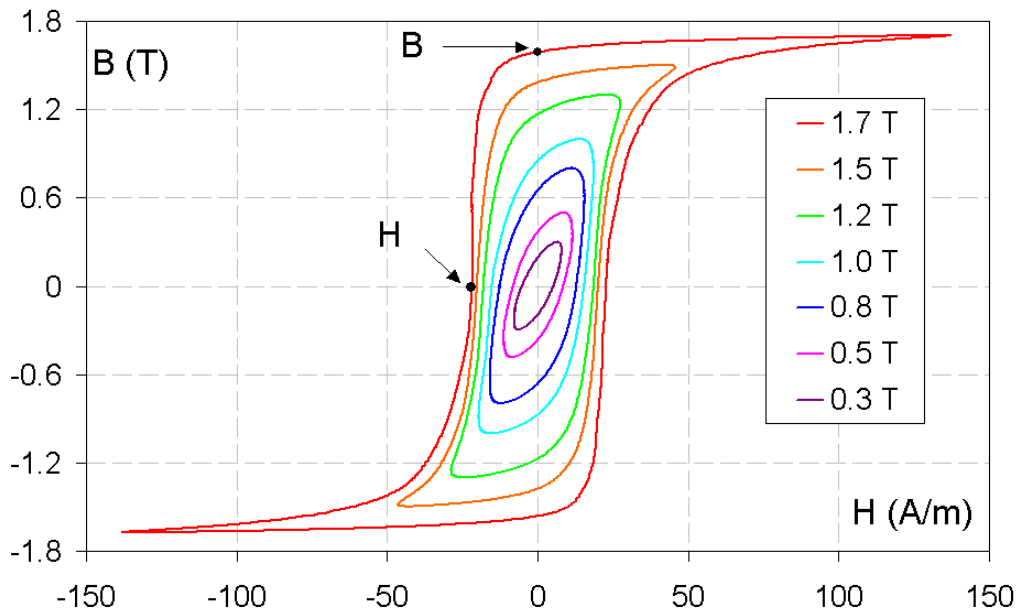


Figura 2.1: Gráfico ilustrativo de uma curva de histerese, com diferentes campos magnéticos [28].

2.1.1 Fontes de Campo Magnetostático

De acordo com a história das ciências, muitos séculos atrás, foram observados materiais que tinham a capacidade de atrair o ferro e interagir entre si. Essas pedras receberam a denominação de imãs e o fenômeno nelas observado, de Fenômeno Magnético, ou Campo Magnético [27], nome dado devido à região na qual essas pedras foram encontradas (Magnésia - Grécia).

Ao longo do tempo, descobriu-se que o campo magnético pode ser dividido em: Natural ou Artificial. O primeiro, como o próprio nome diz, são minerais com propriedades magnéticas, como a Magnetita (formado pelos óxidos de ferro II e III ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)).

Já os Imãs Artificiais são corpos de material ferromagnético que,

submetidos a um campo magnético intenso, adquirem propriedades magnéticas [8], [9], [29], [30], [31] e [32] . Os ímãs artificiais também são subdivididos em: permanentes ou temporais. Define-se como Imã Permanente aquele que mantém seu poder magnético permanentemente, ou seja, feito de material capaz de manter as propriedades magnéticas mesmo após cessar o processo de imantação. No entanto, devido às suas características mecânicas, elétricas e térmicas, eles podem perder o magnetismo (por exemplo, um forte impacto, uma descarga elétrica ou uma aplicação elevada de calor fazem com que os ímãs permanentes percam seu magnetismo temporariamente ou irreversivelmente). Um exemplo são os Imãs de Neodímio, ou imã de terras raras ou ainda imã de neodímio-ferro-boro, que é um imã poderoso, feito a partir de Neodímio, Ferro e Boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Os ímãs de Neodímio são de baixo custo e alto poder, levando em consideração sua massa (sendo o mais forte disponível comercialmente), além de uma resistência a desmagnetização elevada em relação aos demais, porém são mecanicamente frágeis e perdem irreversivelmente sua magnetização quando em temperaturas acima de 80°C (para os graus *standard* de Neodímios).

Um ímã temporal tem propriedades magnéticas apenas enquanto se encontra sob ação de uma fonte de ondas eletromagnéticas para serem temporariamente magnetizados, de modo que, ao se interromper estas ondas, o campo magnético gerado também é cessado. Neste caso são exemplos os materiais paramagnéticos sofrendo a ação de um campo magnético externo e os eletroímãs. Um eletroímã gera o campo magnético a partir de uma corrente elétrica circulando por uma bobina, ao cessar a passagem de corrente cessa também a existência do campo magnético em torno deste.

2.1.2 Susceptibilidade Magnética Dinâmica

A partir da equação de dinâmica de magnetização vamos determinar a susceptibilidade dinâmica [33], [34], [35], [36]. Podemos assumir em um material qualquer cuja magnetização CC correspondente a um campo aplicado em um dado eixo de referência seja dada na forma

$$\mathbf{M} = \chi_{dc} \cdot \mathbf{H}_0 = M_0 \hat{\mathbf{a}}_z , \quad (2.1)$$

que para pequenas perturbações em torno do valor \mathbf{H}_0 tenhamos

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}(t) + \mu_0 (\delta M_x, \delta M_y, M_0 + \delta M_z) , \quad (2.2)$$

sendo $\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}_0 + \mathbf{h}(t)$.

A susceptibilidade dinâmica corresponde a relação de linearidade entre $\delta \mathbf{M}(t)$ e $\mathbf{h}(t)$, sendo obtida através da expressão

$$\chi_{ij} = \frac{\delta M_i}{h_j} .$$

Vamos utilizar a equação de movimento

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B} .$$

reescrevendo-a na forma explícita

$$\frac{dM_x}{dt} = \gamma (M_y B_z - M_z B_y) , \quad (2.3)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \gamma (M_z B_x - M_x B_z) , \quad (2.4)$$

$$\frac{dM_z}{dt} = \gamma (M_x B_y - M_y B_x) , \quad (2.5)$$

onde temos

$$B_x = \mu_0(\delta M_x + h_x) , \quad (2.6)$$

$$B_y = \mu_0(\delta M_y + h_y) , \quad (2.7)$$

$$B_z = \mu_0(M_0 + \delta M_z + h_z) . \quad (2.8)$$

Substituindo o campo \mathbf{B} nas equações (2.3)-(2.5) obtêm-se as seguintes equações

$$\frac{d\delta M_x}{dt} = \mu_0\gamma[\delta M_y(M_0 + \delta M_z + h_z) - (M_0 + \delta M_z)(\delta M_y + h_y)] , \quad (2.9)$$

$$\frac{d\delta M_y}{dt} = \mu_0\gamma[(M_0 + \delta M_z)(\delta M_x + h_x) - \delta M_x(M_0 + \delta M_z + h_z)] , \quad (2.10)$$

$$\frac{d\delta M_z}{dt} = \mu_0\gamma[\delta M_x(\delta M_y + h_y) - \delta M_y(\delta M_x + h_x)] , \quad (2.11)$$

Se assumir que $|\mathbf{h}| \ll |\mathbf{H}_0|$ e que $|\delta\mathbf{M}| \ll M_0$, pode-se linearizar as equações. Para $\mathbf{h} = \mathbf{h}_0 e^{i\omega t}$, negligenciando termos quadráticos ($\delta M_i \delta M_j$) e harmônicas ($\delta M_i h_j$), ou seja, termos na forma $e^{\pm 2i\omega t}$, encontram-se as seguintes equações

$$i\omega\delta M_x = \omega_0\delta M_y - \gamma\mu_0 M_0 h_y , \quad (2.12)$$

$$i\omega\delta M_y = \mu_0\gamma M_0 h_x - \omega_0\delta M_x , \quad (2.13)$$

$$i\omega\delta M_z = 0 , \quad (2.14)$$

onde define-se

$$\omega_0 = \mu_0\gamma H_0 = \frac{q}{2m}(B_0 - \mu_0 M_0) . \quad (2.15)$$

Resolvendo o sistema acima, pode-se expressar na forma matricial

$$\begin{pmatrix} \delta M_x \\ \delta M_y \\ \delta M_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} & 0 \\ \chi_{yx} & \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{zz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

onde define-se

$$\chi_{xx} = \chi_{yy} = \chi = \frac{\gamma\mu_0 M_0 \omega_0}{\omega^2 - \omega_0^2}, \quad (2.17)$$

$$\chi_{xy} = -\chi_{yx} = -i\eta = -i \frac{\gamma\mu_0 M_0 \omega}{\omega^2 - \omega_0^2}, \quad (2.18)$$

$$\chi_{zz} = 0. \quad (2.19)$$

Observa-se que χ e η são funções diretas da magnetização estática.

Pode-se escrever agora o tensor de permeabilidade magnética na forma

$$\mu = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & -i\eta & 0 \\ i\eta & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

onde μ representa a matriz de permeabilidade e $\mu = 1 + \chi$. Um meio com o tensor na forma (2.20) é dito meio giromagnético.

2.2 Técnica de Refletometria no Domínio do Tempo

A técnica de refletometria no domínio do tempo (TDR) [22], descoberta para inicialmente detectar falhas em cabos, considera essencialmente o efeito de reflexão que ocorre quando um pulso propagante em uma linha de trans-

missão encontra uma terminação na qual a impedância da carga conectada à linha é distinta da impedância característica da linha, gerando um pulso refletido, que pode ser separado do pulso incidente na entrada da linha, desde que esse último seja suficientemente curto no tempo, comparativamente ao tempo necessário para que o pulso incidente viaje até a terminação da linha, e o pulso refletido retorne até a entrada da linha, tomada como referência, caso contrário haverá interferência entre o pulso incidente e o pulso refletido nesse ponto, sendo muito difícil extrair informações confiáveis nessa situação.

Essa técnica é vastamente utilizada em redes de comunicação para testes de descontinuidade. Dependendo do guia de onda e do método de análise, o sinal refletido pode ser usado para monitorar os mais diversos parâmetros da engenharia [36], [37]. Desde sua descoberta o TDR tem sido aplicado à espectroscopia dielétrica em físico-química, como medição da umidade em solo, condutividade elétrica, nível de água, sólidos suspensos, entre outros [38], [39] e [40].

Em uma linha de transmissão a tensão $V(z, t)$ e a corrente $I(z, t)$ satisfazem as chamadas equações do telegrafista, que implica uma equação de ondas em $(1 + 1)$ dimensões, e cuja solução é da forma

$$V(z, t) = V_{\text{inc}}(z, t) + V_{\text{refl}}(z, t) , \quad (2.21)$$

$$I(z, t) = \frac{1}{Z_0} [V_{\text{inc}}(z, t) - V_{\text{refl}}(z, t)] , \quad (2.22)$$

onde $V_{\text{inc}}(z, t)$ é a onda de tensão propagante no sentido positivo do eixo z , ou ainda denominada incidente, e $V_{\text{refl}}(z, t)$ é a onda refletida na terminação da linha, ou também denominada contra-propagante, Z_0 é a impedância característica da linha de transmissão.

A conexão do coeficiente de reflexão, Γ , com os elementos da teo-

ria de circuitos elétricos torna-se mais evidente através da definição de impedância $Z_{in}(z, \omega)$, medida no plano z para a componente de frequência ω , sendo a razão entre $V(z, \omega)$ e $I(z, \omega)$,

$$\Gamma(z, \omega) = \frac{V_{\text{refl}}(0, \omega)}{V_{\text{inc}}(0, \omega)} e^{2i\beta z + 2\alpha z} . \quad (2.23)$$

Da teoria de linhas de transmissão, obtemos então a impedância em qualquer ponto z no domínio da frequência,

$$Z_{in}(z, \omega) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(z, \omega)}{1 - \Gamma(z, \omega)} . \quad (2.24)$$

Fazendo $z = l$ pode-se calcular Z_L , que deve ter a forma

$$Z_L = R_L + iX_L , \quad (2.25)$$

onde, para uma impedância de natureza indutiva $X_L = \omega L$.

Desse modo pode-se calcular a indutância L e as perdas resistivas no material, representadas por R_L e conhecendo os fatores geométricos do indutor, determinar a parte real e imaginária da permeabilidade magnética dinâmica na frequência ω . O experimento pode ser repetido para várias temperaturas e com diversos valores de campo magnético estático aplicado, inclusive variando-se a orientação deste (eixo fácil ou eixo duro).

Para pulsos incidentes de alta intensidade a curva de histerese pode ser determinada fazendo-se os cálculos de $V(z = l, t)$ e $I(z = l, t)$ através das equações (2.21)-(2.22). Pode-se apresentar o gráfico de fluxo magnético ϕ_m em função da corrente I na carga, uma vez que ϕ_m é proporcional a \mathbf{B} enquanto I é proporcional a \mathbf{H} . O fluxo magnético é calculado integrando-se

a tensão medida na carga, ou seja,

$$\phi_m = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = \frac{1}{N} \int^t V(z = l, t') dt' , \quad (2.26)$$

sendo N o número de espiras do indutor em teste e A a área da superfície atravessada pelo vetor densidade de fluxo magnético \mathbf{B} .

Para um gerador de sinal de impedância $Z_g = Z_0$, perfeitamente casado à linha de transmissão, as reflexões somente podem ocorrer na terminação da linha em $z = l$, onde uma impedância de carga Z_L é conectada. As ondas de tensão incidente e refletida podem ser representadas através de uma transformada de Fourier,

$$V_{\text{inc}}(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_{\text{inc}}(0, \omega) e^{i(\omega t - \beta z)} e^{-\alpha z} d\omega , \quad (2.27)$$

$$V_{\text{refl}}(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_{\text{refl}}(0, \omega) e^{i(\omega t + \beta z)} e^{\alpha z} d\omega , \quad (2.28)$$

onde $\beta(\omega) = \omega/v$ é o número de onda e $\alpha(\omega)$ é a constante de atenuação na linha. As densidades espectrais das ondas incidente e refletida, $V_{\text{inc}}(0, \omega)$ e $V_{\text{refl}}(0, \omega)$, respectivamente, na entrada da linha, $z = 0$, são dadas pelas expressões

$$V_{\text{inc}}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{\text{inc}}(0, t) e^{-i\omega t} dt , \quad (2.29)$$

$$V_{\text{refl}}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{\text{refl}}(0, t) e^{-i\omega t} dt . \quad (2.30)$$

A entrada da linha em $z = 0$, à qual está ligado o gerador de pulsos, é também conectada a um osciloscópio no modo de alta impedância, para não perturbar o casamento de impedância entre a linha e o gerador de pulsos, e nesse ponto monitoram-se a onda de tensão incidente e refletida, $V_{\text{inc}}(0, t)$

e $V_{\text{refl}}(0, t)$. Para poder separar os sinais é necessário que a largura temporal τ_0 do pulso incidente $V_{\text{inc}}(0, t)$ seja menor que o atraso de propagação Δt necessário para o pulso incidente chegar até a carga Z_L e retornar até $z = 0$, ou seja, $\tau_0 < \Delta t = 2l/v$.

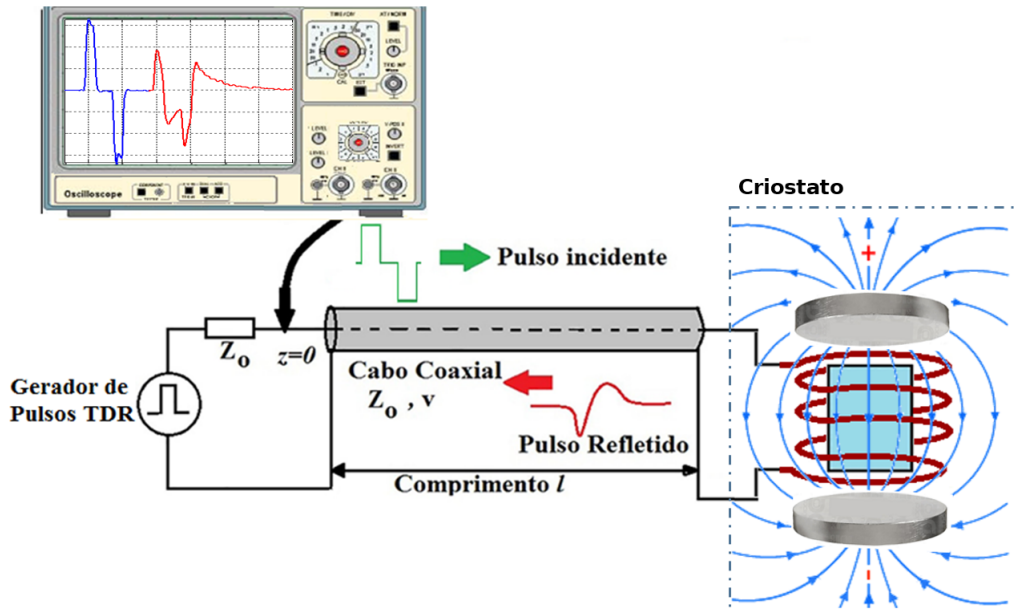


Figura 2.2: A técnica de refletometria no domínio do tempo, utilizando um cabo coaxial e um indutor com núcleo do material a ser analisado na terminação como impedância de carga.

Na técnica experimental, ilustrada na Figura 2.2, a amostra magnética a ser caracterizada pode fazer o papel de núcleo de um indutor, que é colocado como carga Z_L na terminação do cabo coaxial. O pulso é emitido pelo gerador de pulsos e espera-se o pulso refletido. São efetuadas médias sobre várias medidas e após a coleta dos dados experimentais, deve-se realizar o devido tratamento matemático para cálculos numéricos.

Capítulo 3

Métodos Experimentais

Neste capítulo serão descritos os equipamentos de medição, materiais e métodos empregados na técnica de refletometria no domínio do tempo, bem como o sistema de obtenção de temperaturas criogênicas. A validação do aparato experimental é também discutida.

3.1 Desenvolvimento do Aparato Experimental

A técnica de TDR baseia-se no envio de um pulso de investigação e na análise do sinal de retorno. Para tanto, faz-se necessário o uso de um gerador de pulsos específico, sendo os principais parâmetros de projeto a forma e o tempo de duração dos pulsos gerados, bem como a impedância interna Z_g . Deseja-se, na presente dissertação, que os pulsos tenham ciclo positivo e negativo, sendo estes simétricos, duração na escala de uma dezena de nanossegundos, para sondar uma banda de frequências na região do VHF (30 MHz - 300 MHz) e impedância interna compatível com a linha de transmissão, no caso específico um cabo coaxial de baixa perda, de resistência interna

de 50Ω , a ser descrito em maiores detalhes posteriormente. Como o escopo desse trabalho é a utilização do aparato de medida com a técnica de TDR, para a análise da susceptibilidade magnética do material, o desenvolvimento do gerador de pulsos não será descrito em detalhes aqui. O circuito gerador de pulsos utilizado no aparato experimental, cujo diagrama esquemático está apresentado na Figura 3.1, foi desenvolvido pela equipe do Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação (LAMMI) do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR. Na Figura 3.1-(1) está representado o Multivibrador astável assimétrico, que gera uma onda retangular com período de 1 ms e ciclo de trabalho de 0,1%, na Figura 3.1-(2) temos o inversor e deslocador de nível, cuja função é inverter o pulso do multivibrador e somar um nível CC através da carga do capacitor e, finalmente, na Figura 3.1-(3) temos o defasador, que defasa o pulso do multivibrador (atraso no tempo). O resultado da simulação deste gerador, realizado na ferramenta QUCS, encontra-se na Figura 3.2.

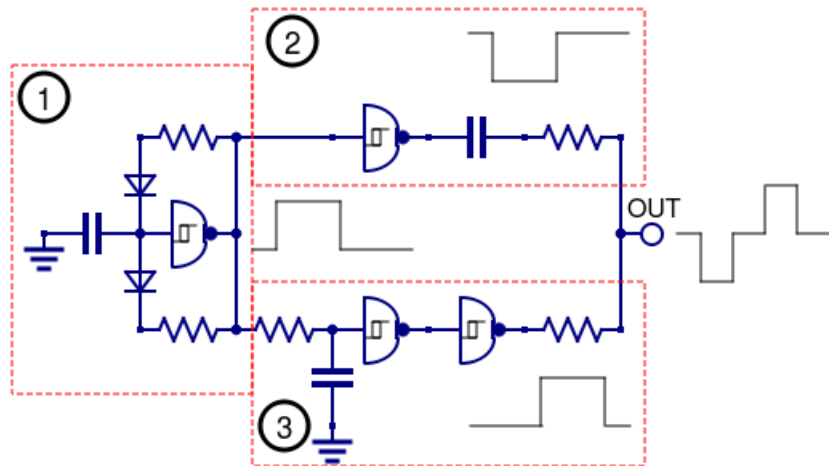


Figura 3.1: Diagrama esquemático do gerador de pulsos, onde (1) Multivibrador astável assimétrico, (2) Inversor e deslocador de nível e (3) Defasador.

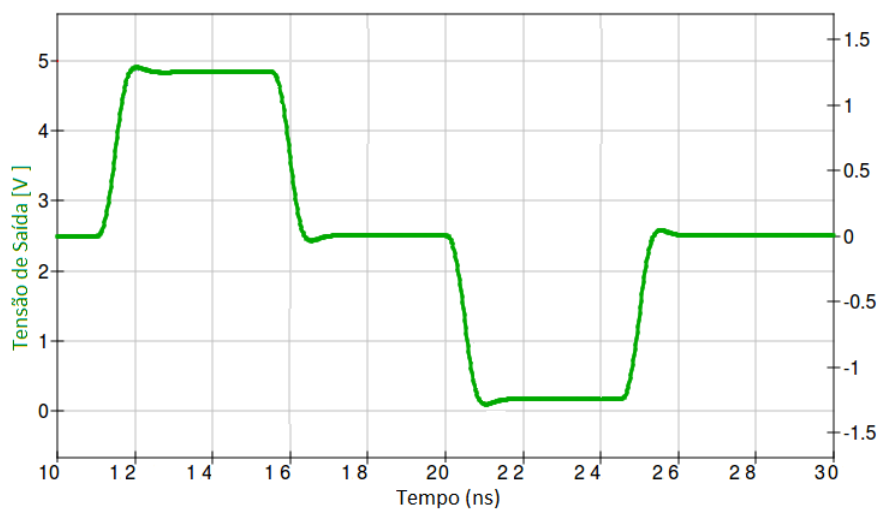


Figura 3.2: Simulação de Transitório na Ferramenta QUCS, do circuito gerador do pulso desenvolvido no LAMMI. Onde a onda apresentada é a onda resultante.

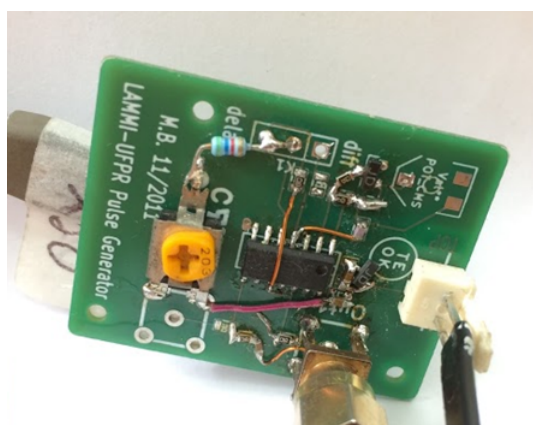


Figura 3.3: Placa do circuito gerador do pulso, desenvolvido no LAMMI.

O circuito gerador de pulsos, da Figura 3.3, apresenta como resultado final um pulso aproximadamente simétrico de 0,65 V de tensão de pico, duração de cada ciclo de 9,5 ns. Seu tempo de subida está em torno de 3 ns e o tempo entre o pulso positivo e negativo é de 7,3 ns. Considerando que o pulso tem uma duração em torno de 25 ns e o fator de velocidade típico dos cabos coaxiais comercialmente disponíveis encontra-se entre 0,6 e 0,9 m/s, e

sabendo-se que o comprimento do cabo $l > v\tau_0/2\text{m}$ para permitir separar o pulso incidente e refletido em $z = 0$, obtém-se $l > 2,25\text{m}$ para velocidade de propagação no cabo de $v = 0,6c$ e $l > 3,37\text{m}$ para $v = 0,9c$, sendo $c \approx 3 \times 10^8$ m/s.

O comprimento da linha torna-se ainda um fator limitante para medições devido às perdas de propagação, representadas pela constante de atenuação α (Equação 3.1), e por isso deve-se escolher uma linha de transmissão que tenha bom desempenho em ampla faixa de frequências. Além disso, a maior imunidade à interferências eletromagnéticas e sua flexibilidade faz do cabo coaxial a linha de transmissão mais apropriada para o aparato experimental proposto (Figura 2.2). Para o experimento foi escolhido um cabo coaxial RG 316, cujo dielétrico é de Teflon, com impedância característica de $Z_0 = 50\Omega$, velocidade de propagação de ondas de $0,7c$ e atenuação máxima de $96,46$ pF/m. Esse cabo pode ser operado até 3 GHz, enquanto a largura de banda dos pulsos que utilizou-se não excede 400 MHz. Para não operar no limite de separabilidade dos pulsos, optou-se por um cabo coaxial com comprimento total de $4,06$ m, o que resulta em um atraso aproximado de 41 ns. Para o cabo RG 316 a constante de atenuação α varia com a frequência angular ω na forma

$$\alpha(\omega) = a_1\sqrt{\omega} + a_2\omega, \quad (3.1)$$

onde $a_1 = 1,1859 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} (\text{rad/s})^{-1/2}$ e $a_2 = 7,2139 \times 10^{-13} \text{ m}^{-1} (\text{rad/s})^{-1}$, conforme dados do fabricante EMC Technology & Florida RF Labs. No processamento numérico, essa expressão foi considerada para determinar a tensão e a corrente na impedância de carga em $z = l$.

Na terminação da linha de transmissão, durante a realização dos testes com o TDR, foram utilizados porta amostras indutivos, de tal maneira adaptado ao tamanho de cada amostra. Dentre as possíveis geometrias de

indutores, nesse trabalho foi utilizado o tipo solenoidal (ou bobina) composto por um fio condutor enrolado em forma de espiral. Cada volta da bobina é chamada de espira e a sua quantidade influencia diretamente na intensidade do campo magnético gerado. O material a ser analisado é utilizado como núcleo do indutor, de forma que também contribui para o aumento da indutância concentrando as linhas de força do campo magnético que fluem pelo interior das espiras. No núcleo da bobina inseriu-se o material a ser analisado, como pode-se observar na Figura 3.4. Neste exemplo temos uma amostra de material de célula solar fotovoltaica, envolto por uma bobina de fio de cobre esmaltado de diâmetro 28 AWG, com 10 espiras.



Figura 3.4: Porta Amostra indutivo, com núcleo da amostra do material a ser analisado.

O campo magnetostático foi providenciado por imãs permanentes de neodímio, conforme Figura 3.5 com densidade de fluxo magnético variando em torno de 100 mT a 400 mT, na superfície (valor medido via Gaussímetro da marca Phywe). Além da magnetização com imãs de neodímio, utilizou-se bobina de corrente contínua para gerar a magnetização controlada. Para esta forma de magnetização utilizou-se uma bobina com núcleo de ferrite, conforme Figura 3.6, que gera uma magnetização proporcional à corrente de entrada. Para esta bobina, o campo gerado no espaço aberto na ferrite é de aproximadamente 35,7 mT/A.

No aparato experimental, a amostra pode ser colocada no dedo frio do criostato (parte da torre de resfriamento onde a temperatura medida



Figura 3.5: Imã de neodímio-ferro-boro.



Figura 3.6: Bobina com núcleo de ferrite. Campo magnético medido no centro da abertura no ferrite de 35,7 mT/A.

é confiável), e submetida a campos magnéticos estáticos adicionais, para medição das propriedades em função da temperatura.

3.2 Validação do Aparato Experimental

A fim de realizar a validação do gerador de pulsos e da Transformada de Fourier para geração da intensidade espectral e assim obter os valores de impedância da carga na terminação da linha, realizou-se uma simulação de onda incidente perfeitamente simétrica, comparando com a onda obtida pelo circuito gerador de pulso da Figura 3.3. A ilustração da comparação destas ondas pode ser visto na Figura 3.7. Após isso, realizou-se a Transformada de Fourier de ambas as ondas (teórica e prática), através da Equação 2.27, encontrando assim a intensidade espectral destas ondas. O resultado pode ser observados na Figura 3.8. Pode-se observar que o resultado para a onda

incidente teórica e para a onda incidente prática estão similares na faixa de frequência de 10 MHz e 50 MHz, alterando apenas sua amplitude, desta forma, apesar da onda prática, gerada pelo gerador de sinais, não ser completamente simétrica, o resultado está dentro de valores aceitáveis e portanto completamente válida para obtenção de resultados neste método.

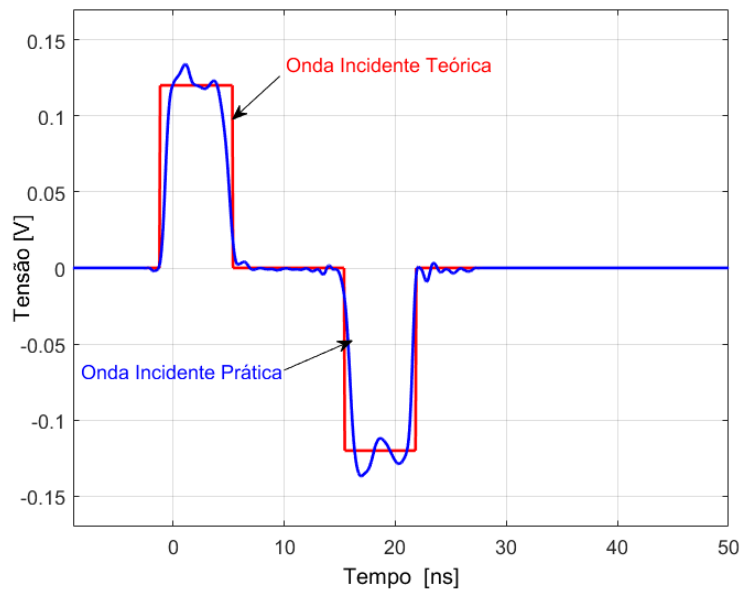


Figura 3.7: Comparação de uma onda incidente teórica com a onda obtida pelo gerador de pulsos utilizados no experimento.

A fim de validar o aparato experimental, foram realizadas medições em cargas resistivas conhecidas. O coeficiente de reflexão da carga, $\Gamma_L = (R_L - Z_0)/(R_L + Z_0)$, nessa situação é, idealmente, independente da frequência. Nesse caso, em uma linha de transmissão sem perdas, o pulso refletido deve ter a mesma forma do pulso incidente, sendo dado por $V_{refl}(0, t) = \Gamma_L V_{inc}(0, t - \Delta t)$, onde $\Delta t = 2l/v$. Para linhas reais, as perdas produzem atenuação distinta das componentes de frequência, o que produz uma deformação do pulso refletido em relação à forma do pulso incidente. A análise

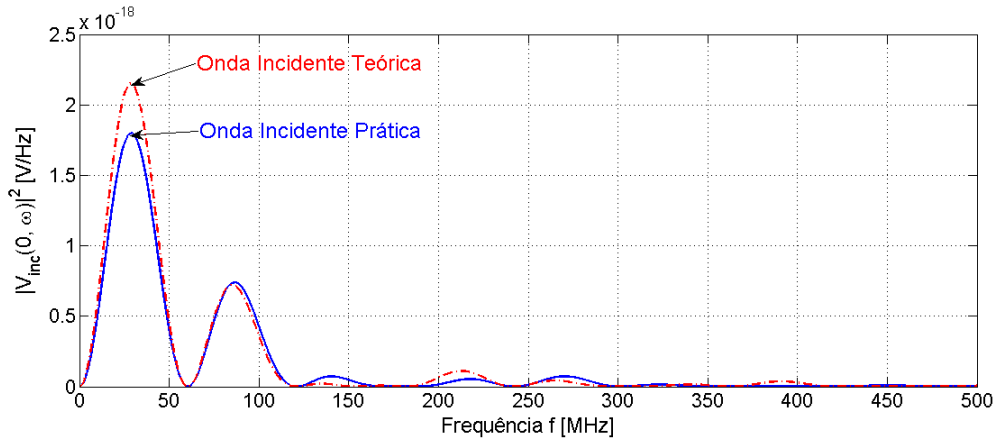


Figura 3.8: Intensidade espectral de uma onda incidente teórica comparada com a intensidade espectral da onda obtida pelo gerador de pulsos utilizados no experimento.

numérica, levando em conta a atenuação do cabo coaxial utilizado, deve permitir comparar o valor de Γ_L e R_L ideal ou conhecido, com o valor medido através do aparato experimental construído.

Para testes da linha terminada em circuito aberto $\Gamma_L = 1$ pode-se comparar a constante de atenuação α fornecida pelo fabricante do cabo com o valor experimentalmente determinado. Essa situação permite ainda determinar a constante de fase $\beta = \omega/v$, fornecendo assim os fatores $exp(\pm i\beta z \pm \alpha z)$ utilizados nos cálculos dos pulsos incidente e refletido em qualquer posição z da linha de transmissão. Na Figura 3.9 pode-se observar o resultado para o teste com o cabo em curto-circuito, nesse resultado, a resistência (Figura 3.9 (a)) apresenta valor praticamente nulo na faixa de frequência entre 10 e 50 MHz, como era esperado para este tipo de teste, uma vez que não há carga acoplada. A reatância (Figura 3.9 (b)), apresentou uma elevação com o aumento da frequência, devido ao loop que forma ao realizar o curto-circuito na extremidade do cabo (formando assim um indutor). No teste para circuito aberto, por ter impedância infinita, o cálculo através da Transformada de

Fourier não foi possível de ser realizado por apresentar indeterminações.

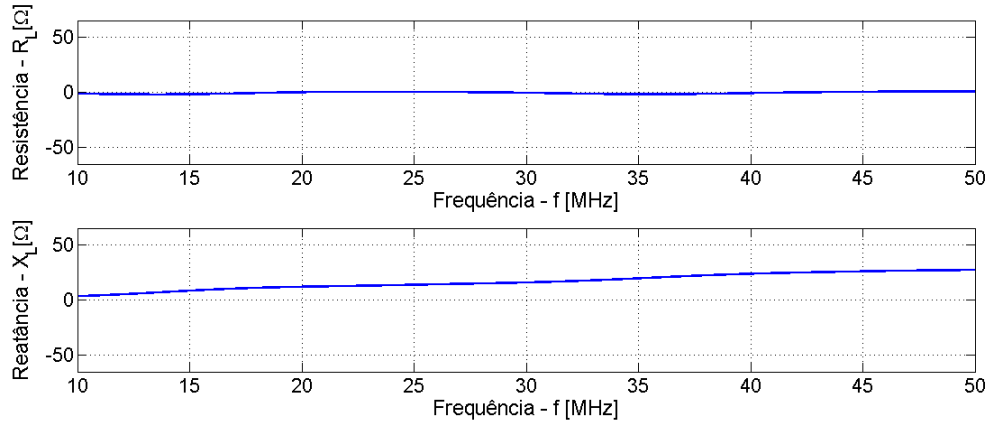


Figura 3.9: Resultado do Teste Curto-Circuito, onde (a) é a resistência e (b) é a reatância.

Para validar o aparato experimental foram consideradas as medidas de várias cargas resistivas, das quais serão apresentados os resultados detalhados para o resistor $R_L = 68 \Omega$, posteriormente serão apresentados os demais resultados para as cargas testadas (Figura 3.15 e Tabela 3.1). Através da Equação

$$\Gamma_L = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}, \quad (3.2)$$

considerando os valores teóricos para $R_L = 68 \Omega$ e $Z_0 = 50 \Omega$, temos o valor de $\Gamma_L = 0,1525$, o que significa que para linhas sem perdas e cargas resistivas ideais o pulso refletido deveria voltar atrasado de um intervalo Δt , com a mesma forma do pulso incidente, porém multiplicado pelo valor de Γ_L (0,1525).

A Figura 3.10 apresenta o pulso incidente e refletido para o caso de uma carga resistiva de 68Ω .

Esses dados foram coletados através do osciloscópio LeCroy Waverunner LT584, de 1 GHz, com taxa de amostragem de 4 GS/s (*Giga Sample* por

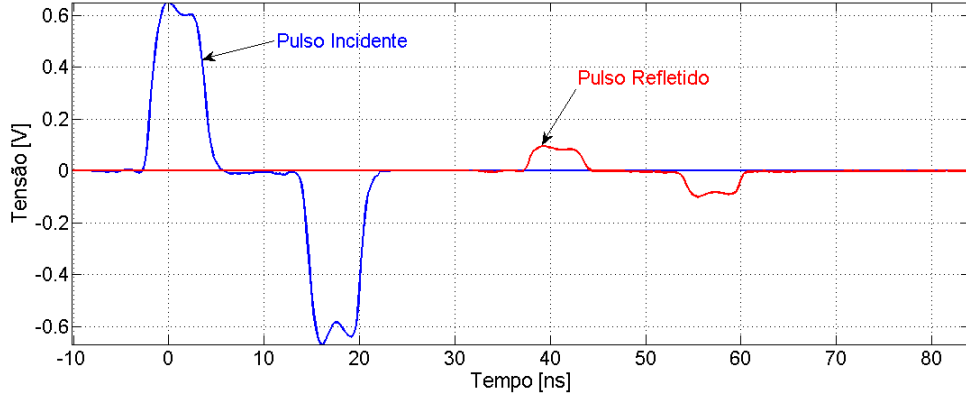


Figura 3.10: Pulso Incidente $V_{inc}(0, t)$ e Pulso Refletido $V_{refl}(0, t)$ em função do tempo, observado no osciloscópio em $z = 0$ para uma carga resistiva de 68Ω .

Segundo), com a ponta de prova ativa Tektronix P6243 conectada ao canal 1 do osciloscópio. Os dados foram transferidos para o *software* MatLab para tratativa. Visualmente, o pulso refletido tem o mesmo aspecto do pulso incidente, porém ponderado por um fator $\Gamma_L = 0,1V/0,65V = 0,1538$, sendo apenas 0,85 % de erro em relação ao valor esperado (de $\Gamma_L = 0,1525$). O atraso tem valor aproximado de 40 ns, o que permite inferir que a velocidade de propagação $v = 2l/\Delta t = 2,0741 \times 10^8$ m/s, correspondendo a um fator de velocidade $v/c = 0,69$, para $l = 4,2$ m já considerando tamanhos de conectores (o comprimento total do cabo e conectores medido no local).

A intensidade espectral dos pulsos incidente e refletido, $|V_{inc}(0, \omega)|^2$ e $|V_{refl}(0, \omega)|^2$, respectivamente, obtidos realizando a transformada de Fourier numérica dos pulsos medidos experimentalmente, conforme as definições (2.29) e (2.30), está ilustrada na Figura 3.11.

Como pode ser observado, o espectro do pulso refletido (Figura 3.11 (b)) assemelha-se ao do pulso incidente (Figura 3.11 (a)), o que é esperado para cargas resistivas lineares. O primeiro máximo ocorre em aproximadamente 31 MHz e há uma repetição espectral centrada no harmônico ímpar

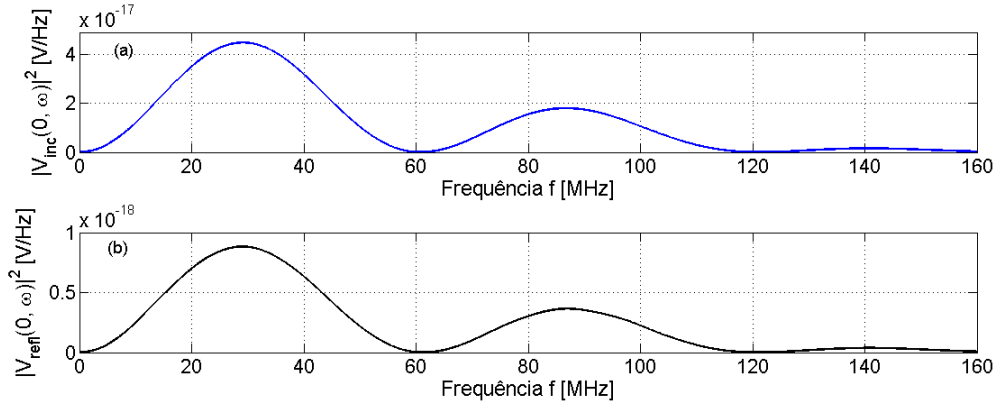


Figura 3.11: Intensidade espectral do (a) pulso incidente e (b) pulso refletido, por uma carga $R_L = 68\Omega$, calculada a partir da medida em $z = 0$.

seguinte, 93 MHz. O valor de intensidade espectral torna-se praticamente nulo em aproximadamente 62 MHz, depois em 124 MHz e a partir daí o conteúdo espectral torna-se desprezível. Valores calculados muito próximos dos valores de nulos do espectro do pulso incidente não são confiáveis, e pode-se considerar que a faixa de boa resolução das medidas encontra-se na região do máximo espectral que ocorre em aproximadamente 31 MHz, com largura de banda, considerada meia altura em relação ao máximo com faixa de 40 MHz, ou seja, o espectro considerado para a análise está entre 10 MHz e 50 MHz.

Pode-se ainda verificar a relação entre as intensidades espectrais do pulso refletido e incidente, conforme cálculo na Equação 3.2 cujo resultado teórico deve fornecer $|\Gamma_L|^2 = 0,0233$. Uma inspeção dos valores de pico através do *software* Matlab, utilizado para gerar as Figuras 3.11-(a) e 3.11-(b) forneceu o valor $|\Gamma_L|^2 = 0,022$, gerando uma diferença de 5,58% em relação ao valor esperado. A análise da impedância de carga, através da Equação (2.24) permite obter a Figura 3.12. Nesta figura é possível observar discontinuidades no valor calculado para as frequências próximas a 62 MHz,

124 MHz e suas harmônicas, que estão diretamente relacionadas à indeterminação causada pelo valor nulo no espectro do pulso incidente e refletido nesses pontos (a amplitude da tensão nestes pontos é próxima de zero). Da mesma forma, pode-se observar novamente que os de valores mais coerentes estão na faixa de frequência entre 10 MHz e 50 MHz, portanto, esta faixa foi ampliada na Figura 3.13, para uma análise mais detalhada.

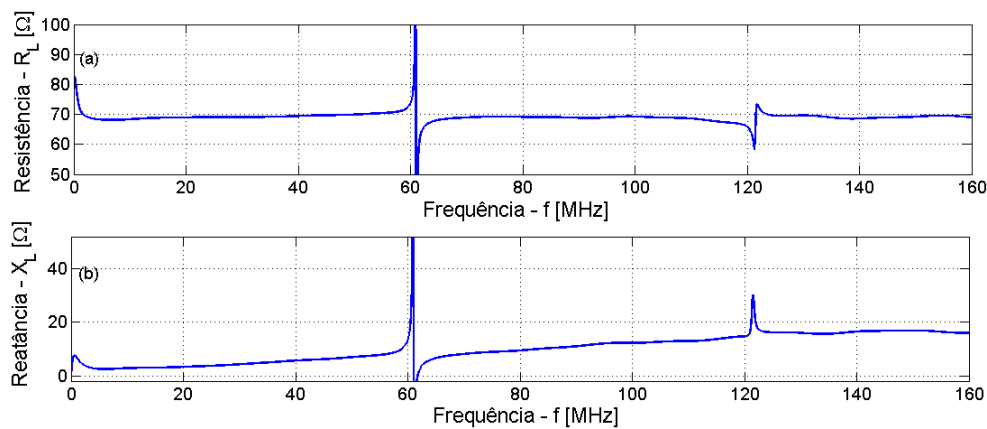


Figura 3.12: Resultado da Resistência de Carga $R_L = 68 \Omega$, em função da Frequência, extraído experimentalmente pelo processo de TDR. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.

Pode-se observar na Figura 3.13 (a) que a resistência de carga R_L está próxima do valor de 68Ω , no intervalo entre 10 MHz e 50 MHz, validando assim o método utilizado. Na Figura 3.13 (b) $X_L = \omega L$ e portanto $X_L \ll R_L$, tendendo a valores positivos para frequências superiores, indicando desta forma um comportamento indutivo. O maior erro experimental nesta faixa de frequência, foi identificado em 50 MHz, onde o valor de resistência é de $69,9 \Omega$, admitindo-se que valor de resistência de carga teórico seja 68Ω , o erro percentual neste caso é de 2,79% ($\text{Erro} = |(68 - 69.9)/68| \times 100$), o que é aceitável para uma validação de conceito de medida e implementação inicial do aparato. A Figura 3.14, apresenta a medição realizada via Analisador de

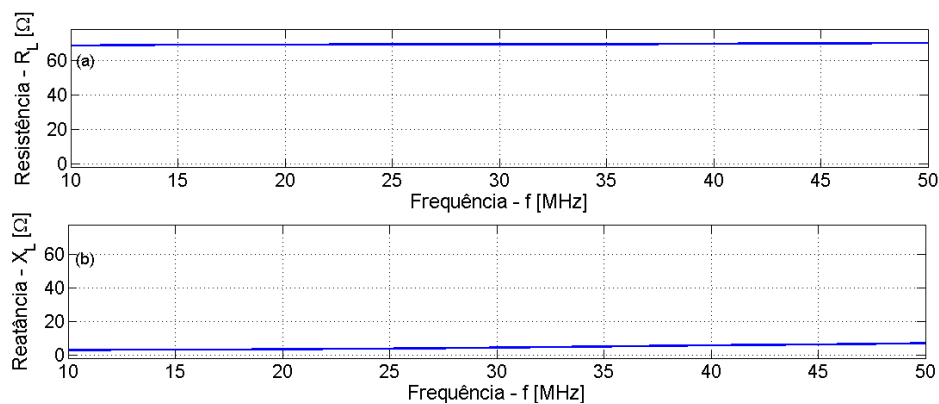


Figura 3.13: Detalhe ampliado para a Resistência (a) e Reatância (b) da Carga $R_L = 68 \Omega$, em função da frequência, na faixa de 10 a 50 MHz, medidos pelo método TDR.

Redes, marca HP, modelo 3577A, de 5Hz a 200MHz, para o mesmo resistor de 68Ω . Ao comparar este resultado da com o valor teórico do resistor (68Ω), temos o maior erro percentual em torno de 40 MHz, onde o valor medido foi de $63,5 \Omega$, gerando um erro percentual de $6,62\%$, ultrapassando o erro percentual medido pelo método TDR. Para fins de mais um método de medição, o resistor utilizado foi medido através de um multímetro digital, marca Politerm, modelo POL-41 tendo valor de aproximadamente 68Ω em regime CC.

Outros resultados para impedâncias conhecidas, podem ser observados na Figura 3.15 e na Tabela 3.1 na página 46.

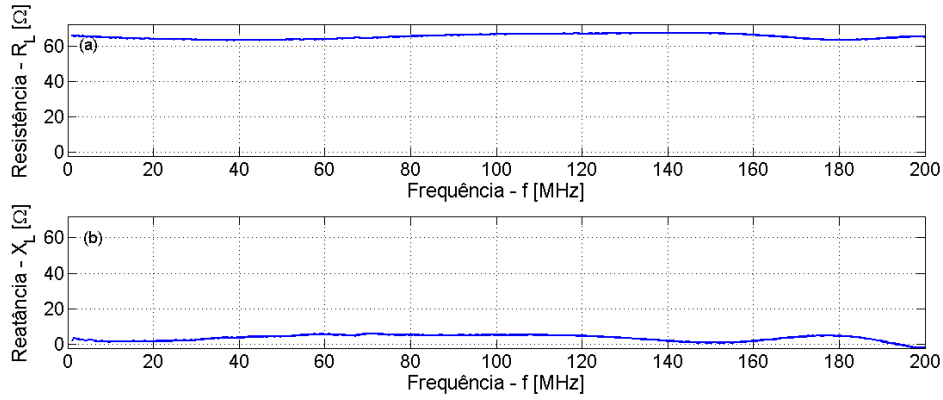


Figura 3.14: Resultado para uma resistência de carga $R_L = 68 \Omega$, em função da frequência, extraído experimentalmente pelo Analisador de Redes. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.

A Tabela 3.1 apresenta a comparação entre os valores medidos pelo Analisador de Redes e pelo método TDR. Nesta tabela pode-se verificar o teste de cargas conhecidas, com a variação da frequência. O erro percentual foi determinado pela equação

$$Erro\% = \frac{R_{LAR} - R_{LTDR}}{|Z_{teórico}|} * 100 , \quad (3.3)$$

onde R_{LAR} é a resistência medida pelo Analisador de Redes, R_{LTDR} é a resistência medida pelo método TDR e Z_{AR} corresponde ao módulo da impedância, medida pelo Analisador de Redes.

Da mesma forma para Reatância

$$Erro\% = \frac{X_{LAR} - X_{LTDR}}{|Z_{teórico}|} * 100 , \quad (3.4)$$

sendo X_{LAR} a reatância medida pelo Analisador de Redes e X_{LTDR} a reatância medida pelo método TDR.

Pode-se perceber que o erro percentual entre os valores de re-

Tabela 3.1: Comparação de valores de cargas resistivas conhecidas, medidos com o Analisador de Redes e via método TDR

Carga [Ω]	f [MHz]	Analisador		TDR		Erro[%]	
		R_L	X_L	R_L	X_L	ΔR_L	ΔX_L
12	20	11.35	0.61	11.62	3.89	1.65	28.82
12	30	11.30	1.04	11.01	4.98	1.84	34.72
12	40	11.29	1.50	10.92	7.85	2.34	55.77
12	50	11.33	1.95	10.86	9.16	3.03	62.68
33	20	30.64	0.20	33.35	3.01	5.97	9.16
33	30	30.50	0.59	33.70	3.59	7.04	9.85
33	40	30.46	1.06	34.33	6.20	8.43	16.85
33	50	30.58	1.50	34.82	8.55	9.14	23.01
56	10	53.54	-0.16	56.77	1.05	4.14	2.26
56	20	52.98	-0.01	56.91	-0.83	5.05	1.54
56	30	52.67	0.46	56.91	-0.83	5.47	2.45
56	40	52.58	1.10	56.91	-0.83	5.59	3.66
56	50	52.71	1.72	56.73	-1.63	5.19	6.35
68	10	65.11	-0.41	68.15	3.69	3.22	6.29
68	20	64.42	-0.36	68.40	5.50	4.24	9.10
68	30	63.98	0.07	68.31	8.27	4.63	12.81
68	40	63.89	0.66	67.94	9.50	4.34	13.84
68	50	64.11	1.17	67.34	11.50	3.48	16.11
120	10	114.39	-1.42	121.90	-0.13	4.49	1.13
120	20	112.99	-1.93	120.60	-0.98	4.61	0.84
120	30	112.52	-1.37	120.90	1.09	5.07	2.18
120	40	112.01	-0.58	120.30	4.29	5.04	4.34
120	50	112.54	0.15	121.00	9.75	5.12	8.53
220	10	211.78	-0.82	216.90	-9.86	1.69	4.27
220	20	208.93	-1.89	209.80	-10.21	0.29	3.98
220	30	208.11	-0.76	211.40	-3.47	1.11	1.30
220	40	207.96	0.11	207.90	5.48	0.02	2.58
220	50	208.49	1.61	208.20	23.65	0.10	10.57

sistência R_L medidos pelo método TDR ficou abaixo dos valores medidos pelo Analisador de Redes. Uma vez que o Analisador de Redes já é um equipamento confiável para este tipo de medida, pode-se dizer que os resultados do TDR foram satisfatórios. Caso os resistores analisados fossem ideais, os valores de reatância X_L deveriam ser nulos. Porém, em se tratando de com-

ponentes reais, sempre vai existir uma indutância e/ou capacitância parasita associada à resistência propriamente dita. Assim, para os resistores analisados na faixa de frequência de 10 a 50 MHz, observa-se uma predominância do comportamento indutivo, indicado pela reatância positiva na maioria das medidas. Esta indutância parasita está vinculada aos aspectos contrutivos dos resistores utilizados, tais como o material resistivo depositado na forma de uma espiral em torno de um cilindro dielétrico, formando intrinsecamente uma bobina.

Pela Figura 3.15, pode-se observar que os valores obtidos pelo Analisador de Redes, representado pela linha tracejada com asteriscos, e os valores obtidos pelo método TDR, representado pela linha contínua com zeros, estão muito coerentes para a faixa de frequência considerada. Ambos os métodos tiveram uma pequena variação considerada normal (até mesmo os fabricantes destas cargas aceitam pequenas variação nos valores medidos).

As outras cargas consideradas apresentaram resultados que corroboram com o resultado experimental.

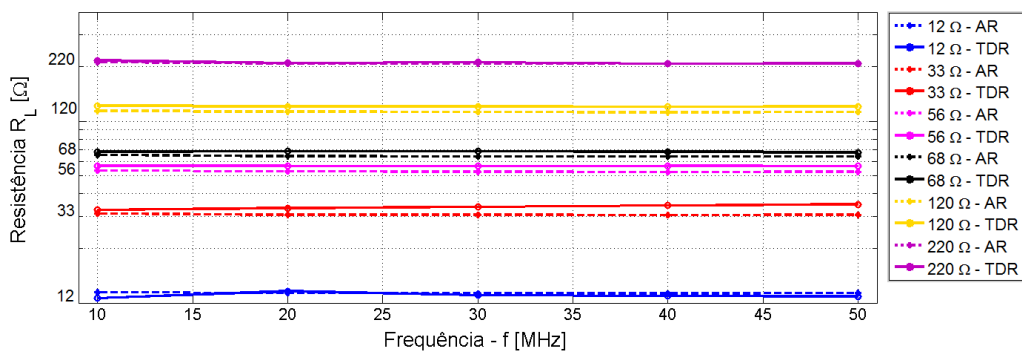


Figura 3.15: Gráfico comparativo para os resultados de cargas resistivas conhecidas, medidos pelo Analisador de Redes (AR), representado pela linha tracejada com asterisco e pelo método de Refletometria no Domínio do Tempo (TDR), representado pela linha contínua com zeros.

Ainda como forma de validação do método, foi realizada a medição

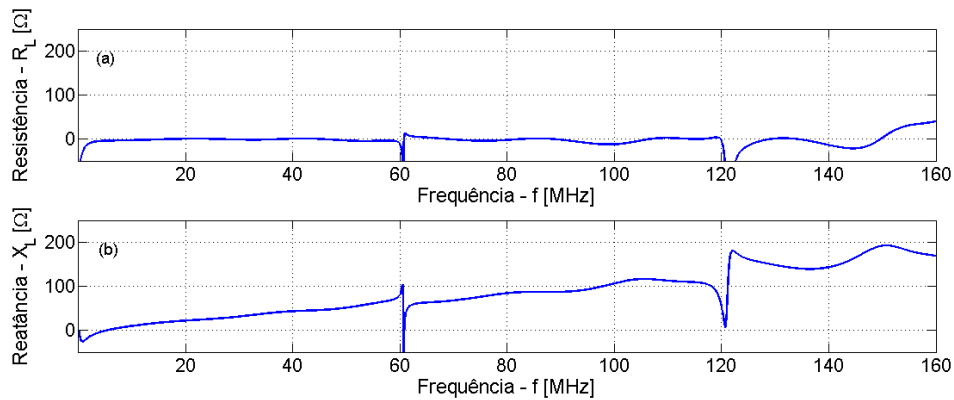


Figura 3.16: Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo método TDR.

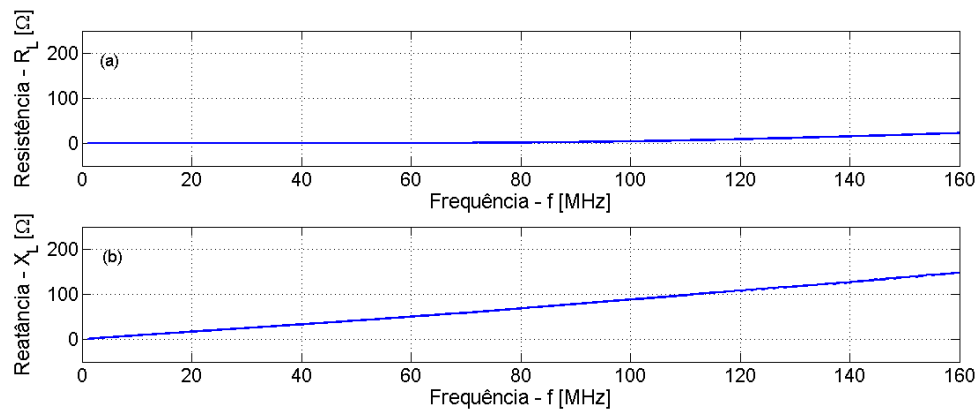


Figura 3.17: Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo Analisador de Redes.

da bobina utilizada no experimento (cujos resultados estão apresentados na Seção 4.2 Fita Magnética). Os resultados para este indutor obtidos através do método TDR podem ser observados na Figura 3.16 e os resultados obtidos pelo Analisador de Redes podem ser observados na Figura 3.17. Pode-se observar que os resultados da resistência obtidos por ambos os métodos foi linear e praticamente nulo tanto na Figura 3.16 (a) como na Figura 3.17 (a). Salientando na Figura 3.18 a faixa de frequência em que o resultado é con-

siderado mais satisfatório (10 MHz a 50 MHz), percebe-se que na medição pelo método TDR (Figura 3.18(a)), temos algumas pequenas variações em torno do zero, em relação à medição realizada via Analisador de Redes (Figura 3.19(a)). O máximo erro para este caso encontra-se na frequência de 50 MHz, onde o método TDR apresenta o valor de $-3,859 \Omega$ e o resultado via Analisador de Redes é de $0,667 \Omega$. Essa diferença pode ser explicada pelo fato do gerador de pulsos não estar exatamente na mesma impedância do cabo, assim como devido à Transformada de Fourier apresentar pequenas variações durante o cálculo do valor da resistência, porém como os valores estão muito próximos, essa diferença é desprezível.

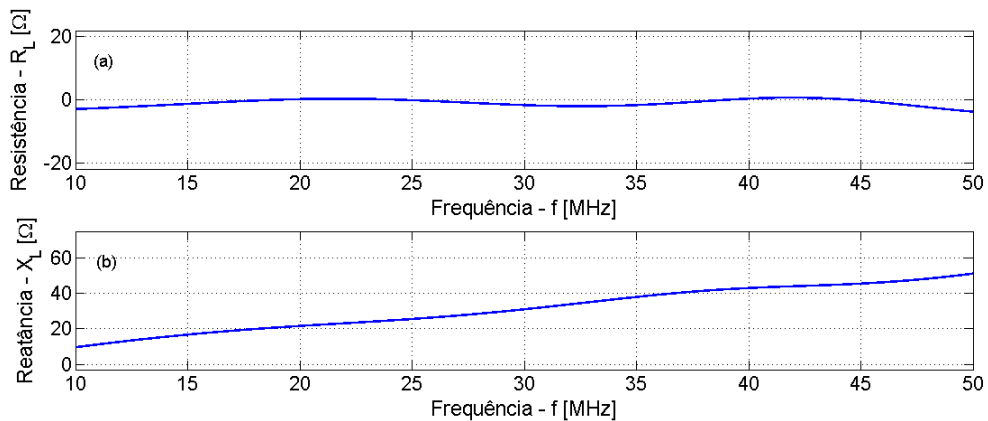


Figura 3.18: Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo método TDR, na faixa de frequência de 10 MHz a 50 MHz.

A reatância teve um aumento na mesma proporção em ambos os métodos de medida, como pode ser observado na Figura 3.17(b) e na Figura 3.16(b). Para a faixa de frequência considerada, ou seja, entre 10 MHz e 50 MHz, a relação entre eles se torna ainda mais evidente, conforme as Figuras 3.19(b) e 3.18(b), onde em toda a faixa de frequência apresentada, o erro percentual, calculado pela Equação 3.4, não ultrapassa 20%, não só

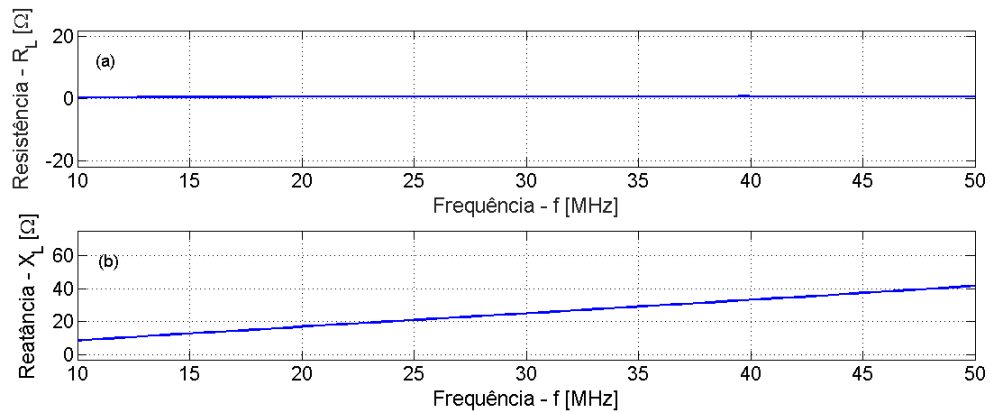


Figura 3.19: Valor Real (a) e Imaginário (b) da bobina sem núcleo utilizada nas medições da Fita Magnética, medida pelo Analisador de Redes, na faixa de frequência de 10 MHz a 50 MHz.

corroborando para validação do método apresentado, como salientando as características esperadas para um indutor sem núcleo.

O erro experimental do aparato proposto pode ser atribuído a diversos fatores, dentre eles, um pequeno descasamento de impedância entre o cabo coaxial e o gerador de pulsos, bem como o valor exato da impedância do cabo coaxial (que pode variar entre 48Ω e 52Ω de acordo com dados de fabricantes), bem como conexões.

3.3 Sistema para Temperaturas Criogênicas

Criostato (do grego *cryo*, que significa frio, e *stat*, que significa estático) é um dispositivo que serve para manter amostras ou dispositivos no seu interior à baixas temperaturas criogênicas (temperaturas criogênicas são consideradas aquelas abaixo de -150°C , ou 123 K). O LAMMI possui um criostato de ciclo fechado, que pode ser visto na Figura 3.20, cuja representação do sistema pode ser vista na Figura 3.21. A refrigeração do Dedo Frio Modelo DE202A

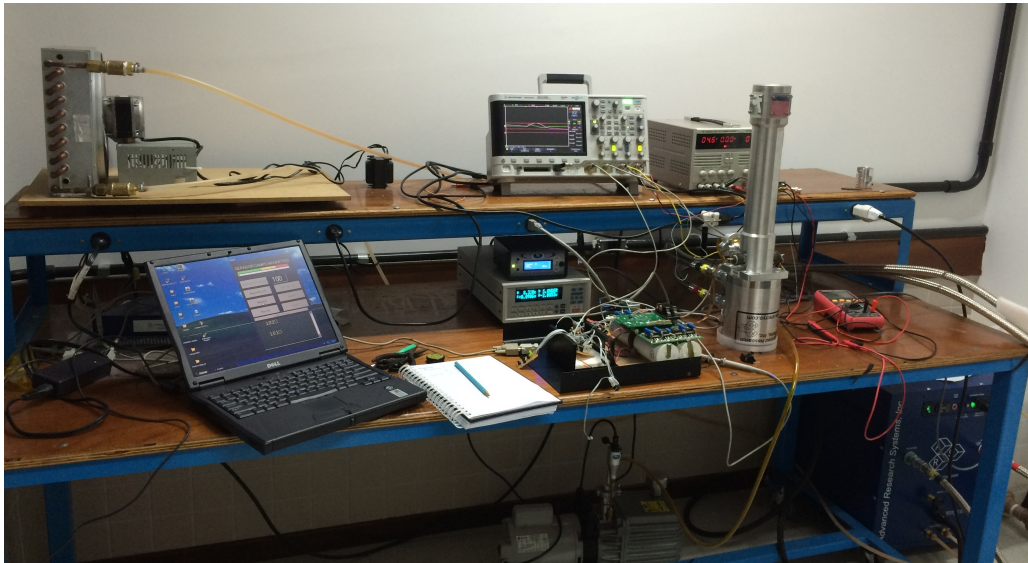


Figura 3.20: Criostato do laboratório LAMMI. A torre de resfriamento, onde fica a amostra sob temperatura criogênica pode ser observada sobre a mesa, ao lado direito da figura.

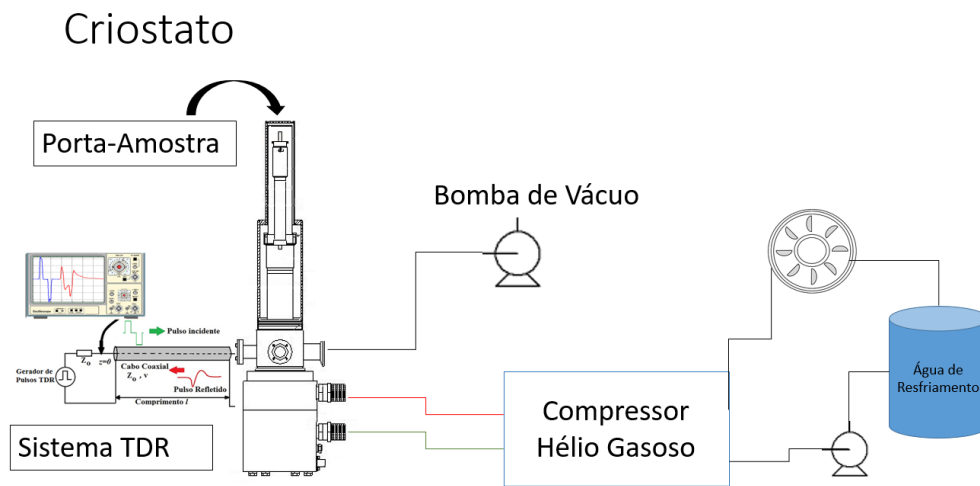


Figura 3.21: Representação do Sistema de Criogenia implementado no Laboratório LAMMI da UFPR.

é feita através do compressor de Hélio gasoso, ARS-2HW 14-HC1200S, com resfriamento a água, o que permite excursionar a temperatura de amostras

entre 9 K e 373 K. O controle de temperatura é feito através do controlador Modelo LS335, que tem resolução de duas casas decimais. Para atingir temperaturas baixas também é necessário um sistema de alto vácuo, na escala de 10^{-2} mbar, o que é obtido através da Bomba de Vácuo Symbol modelo A12. O nível do vácuo é medido através do Medidor Symbol, Modelo SYP-DIGI-II baseado no sensor Pirani P20.

Ainda como forma de validação, realizada uma verificação da influência da temperatura do criostato na medida da resistência elétrica de um fio metálico. Comprovou-se que a resistência cresce com o aumento de temperatura, o que é previsto para um composto metálico.

Capítulo 4

Resultados

Dentre as amostras de materiais submetidos ao experimento, seguem os resultados mais relevantes para esta análise. Os resultados aqui apresentados são oriundos de amostras de material magnético, inserido no interior de uma bobina de fio de cobre esmaltado. As amostras são submetidas à temperaturas criogênicas e campo magnetostático.

4.1 Heusler

Materiais Heusler são compostos no formato X_2YZ , com efeito de memória de forma quando sofrem a ação de um campo magnético [41], [42] e [43]. Uma amostra do material Heusler composta por Ni_2MnGa - Níquel (2), Manganês (1) e Gálio (1) - de dimensões de 2 mm de largura por 4,6 mm de comprimento, foi inserida em um porta amostra indutivo, construído com fio de cobre esmaltado de diâmetro 28 AWG (0,3211 mm), com 12 espiras, em formato de elipsóide, conforme Figura 4.1.

Essa amostra foi submetida ao experimento TDR, conforme já descrito. A Figura 4.2 apresenta o pulso incidente e o pulso refletido para a

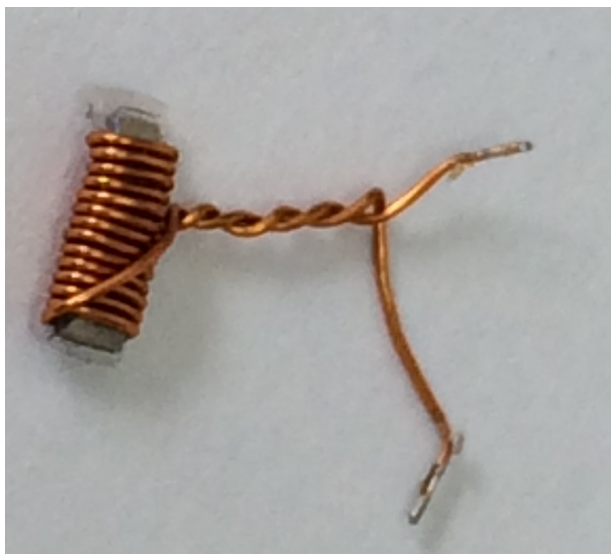


Figura 4.1: Amostra de material Heusler, inserida em um porta amostra indutivo com 12 espiras.

amostra de material Heusler. Visualmente o pulso refletido tem o aspecto de uma carga indutiva, ou seja, a forma de onda refletida esta atrasada em relação ao pulso incidente, corroborando com o esperado, uma vez que o porta amostra é um indutor com pouca resistência, onde seu núcleo é o material a ser analisado.

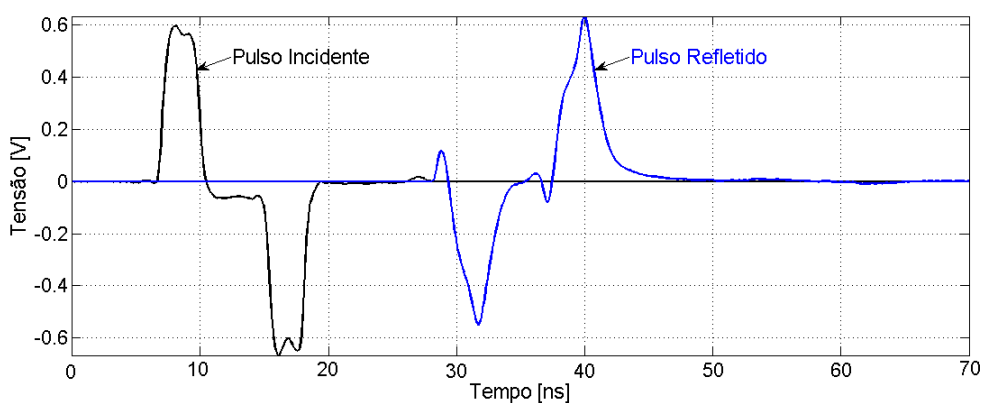


Figura 4.2: Pulso Incidente $V_{inc}(0, t)$ e Pulso Refletido $V_{refl}(0, t)$ em função do tempo, observados no osciloscópio em $z = 0$ para uma amostra de material Heusler.

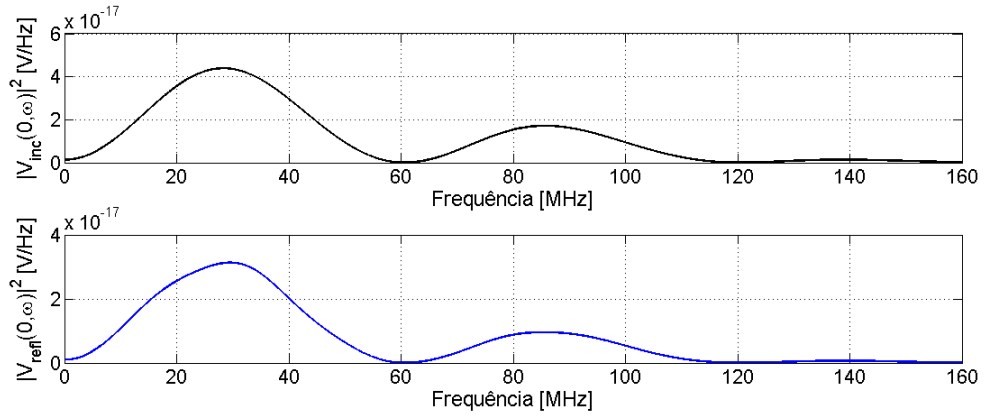


Figura 4.3: Intensidade espectral do (a) pulso incidente e (b) pulso refletido, por uma carga indutiva com material Heusler, calculadas a partir da medida em $z = 0$.

Temos na Figura 4.3 a intensidade espectral dos pulsos incidente e refletido, $|V_{inc}(0, \omega)|^2$ e $|V_{refl}(0, \omega)|^2$, respectivamente. Como pode ser observado, o espectro do pulso refletido assemelha-se bastante ao do pulso incidente, com pequeno desvio no máximo da primeira harmônica para o pulso refletido, em relação ao pulso incidente. O primeiro máximo ocorre em aproximadamente 30 MHz e há uma repetição espectral centrada no harmônico ímpar seguinte, 85 MHz. O valor de intensidade espectral torna-se praticamente nulo em aproximadamente 61 MHz, depois em 120 MHz e a partir daí o conteúdo espectral torna-se desprezível. A largura de banda do pulso na primeira região de interesse, que se estende de 0 a 61 MHz, vale aproximadamente 30 MHz. Valores calculados muito próximos dos valores de nulos do espectro do pulso incidente não são confiáveis, e pode-se considerar que a faixa de boa resolução das medidas encontra-se entre 10 e 50 MHz.

A análise da impedância de carga, através da Equação (2.24) permite obter a Figura 4.4. Pode-se observar que a impedância de carga R_L está próxima de zero no intervalo entre 10 MHz e 50 MHz, o que infere a baixa resistência da carga, assim como pela visualização pelo MatLab, X_L está en-

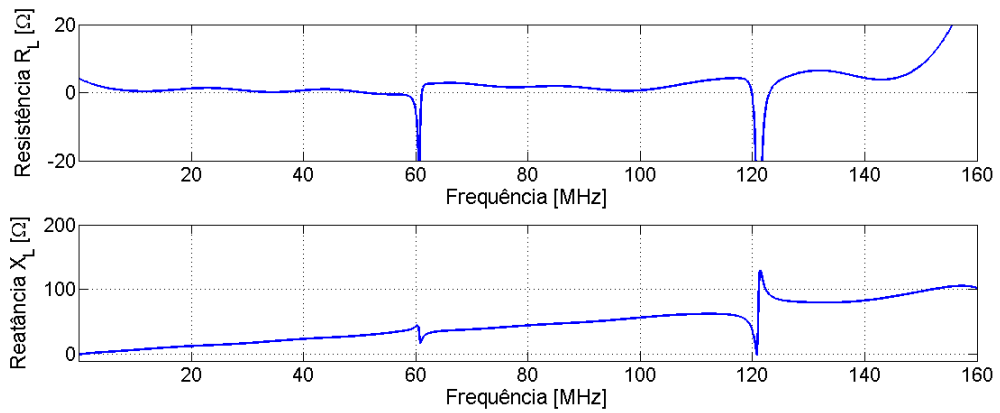


Figura 4.4: Resultado da Resistência de Carga indutiva com material Heusler em função da Frequência, extraído experimentalmente pelo processo de TDR. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.

tre 10 e 30 Ω e portanto $X_L > R_L$, corroborando também para o esperado de um porta amostra indutivo. É possível observar, ainda, descontinuidades no valor calculado para as frequências próximas a 61 MHz, 120 MHz e múltiplos desses, que pode ser diretamente relacionada à indeterminação causada pelo valor nulo no espectro do pulso incidente nesses pontos.

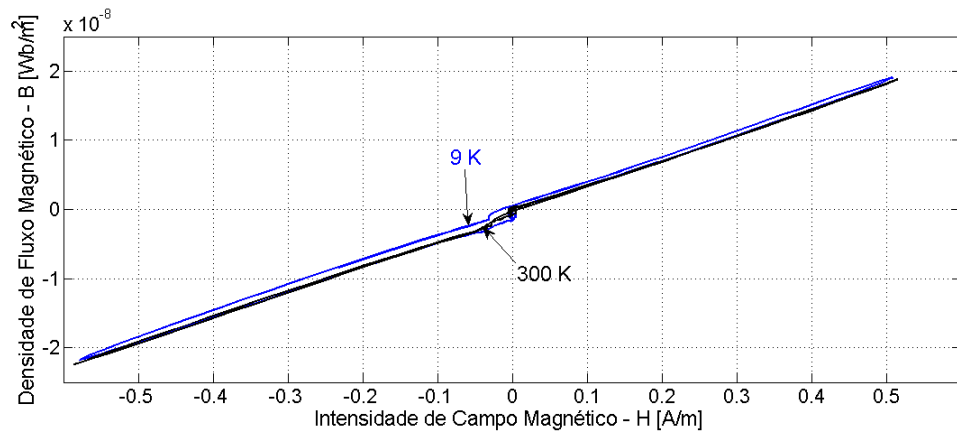


Figura 4.5: Comparação entre a curva do material à 10 K de temperatura com o mesmo material em temperatura ambiente.

Na Figura 4.5 temos a curva de histerese do material, comparando

o resultado da temperatura ambiente à temperatura de 10 K. Devido à amostra ser de escala milimétrica e o pulso de investigação com pouca energia, o resultado para as duas temperaturas parecem, à olho nu, muito próximos. Porém, ao aumentar a imagem pode-se verificar que a resposta muda significativamente em função da temperatura. Isso ocorre porque a resistência do material diminui com a redução da temperatura, aumentando assim a susceptibilidade magnética do material.

Na figura 4.6 temos o mesmo material, submetido à temperatura criogênica de 10 K, comparando três resultados para a amostra: sem campo magnético, submetida a campo magnético de aproximadamente 70 mT e submetida a campo magnético inverso de aproximadamente -70 mT. A magnetização foi realizada através de uma bobina com núcleo de ferrite, apresentada na figura 3.6. Fica evidente na imagem ampliada a influência no campo magnético nessa amostra.

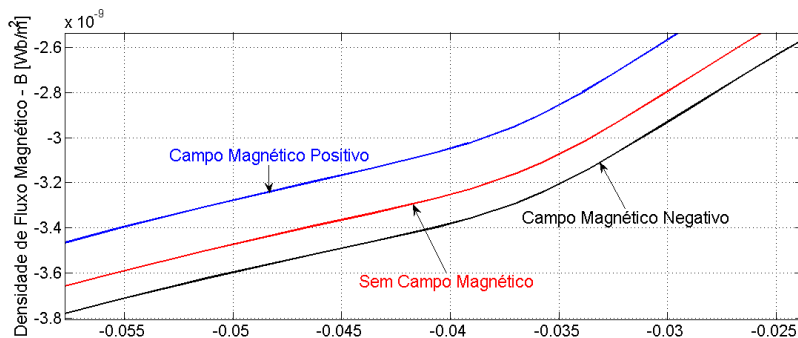


Figura 4.6: Comparação entre a curva de histerese do material à 10 K: sem campo magnético, com campo magnético (positivo) e com campo magnético invertido (negativo).

4.2 Fita Magnética

Uma amostra da fita magnética, utilizada em etiquetas de segurança foi analisada neste experimento. Essas fitas, geralmente são compostas por ligas metálicas com 70 a 90 por cento de Ni (Níquel) e o restante principalmente de Fe (Ferro), podendo conter pequenos teores de outros elementos como Cu (Cobre), Cr (Cromo) e Mo (Molibdênio) devido à isso, apresentam permeabilidade magnética elevada. Como são vários fabricantes destas fitas e cada fabricante pode alterar um pouco a composição, não há como precisar todos os compostos dessa liga, precisando de métodos mais sofisticados para isso [44], [45]. Nesse momento, será discutido apenas os resultados da técnica TDR, que é o objetivo principal.

O Porta Amostra construído com fio de cobre esmaltado de diâmetro 28 AWG apresenta 6 mm de largura com 4 mm de comprimento, com uma fita magnética inserida no seu interior com dimensões de 6,1 mm de largura por 13 mm de comprimento. Esse porta amostra possui 11 espiras e pode ser observado na Figura 4.7. Para esta amostra, foi realizado ensaio sem campo magnético aplicado, com campo magnético aplicado ao eixo duro e com campo magnético aplicado ao eixo fácil. Houve somente aplicação de campo contínuo de 100 mT, com ímãs de Neodímio e variação de temperatura de 9 K a 300 K.

O pulso incidente e o pulso refletido para a amostra da Fita Magnética estão apresentados na Figura 4.8. Neste caso o pulso refletido carrega traços de resistência e reatância indutiva. Diferentemente dos resultados apresentados na Figura 4.2 da amostra de material Heusler, este caso apresenta maior resistividade em conjunto com a carga indutiva, devido às características construtivas do porta amostra indutivo, o tamanho do conjunto de amostra (amostra e porta amostra) e ao fato da fita magnética apresentar maior

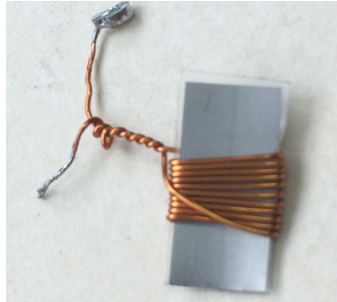


Figura 4.7: Porta amostra indutivo com 11 espiras, com núcleo de Fita Magnética.

magnetização em relação à amostra Heusler.

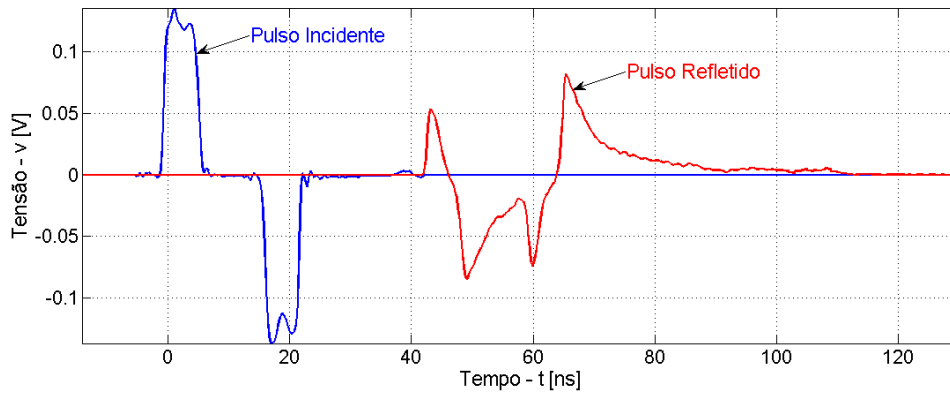


Figura 4.8: Pulso Incidente $V_{inc}(0, t)$ e Pulso Refletido $V_{refl}(0, t)$ em função do tempo, observados no osciloscópio em $z = 0$ para a carga de Bobina com núcleo de Fita Magnética.

A análise da impedância de carga, através da expressão (2.24) permite obter a Figura 4.9. Pode-se observar que a resistência de carga R_L está próxima de zero no intervalo entre 10 MHz e 50 MHz, que é a região de interesse, o que infere a baixa reatância, assim como pela visualização pelo MatLab, X_L está entre 10 e 50 Ω e portanto $X_L > R_L$, corroborando também para o esperado de um porta amostra indutivo.

Salientando a diferença que ocorre ao alterar a temperatura da amostra, a Figura 4.10 apresenta a reatância da Fita Magnética à tempe-

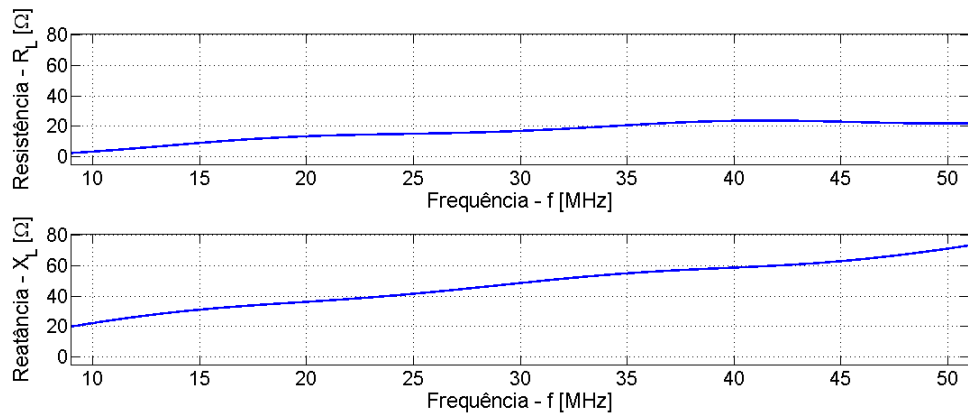


Figura 4.9: Resultado da Impedância de Carga indutiva com Fita Magnética em função da Frequência, extraído experimentalmente pelo processo de TDR. São mostradas em (a) a parte real e em (b) a parte imaginária.

ratura de 9 K, 77 K e 300 K, com o mesmo campo magnético de 100 mT aplicado ao eixo fácil. Nesta figura percebe-se que a variação de temperatura afeta diretamente nos resultados da reatância e em consequência na susceptibilidade magnética, que será melhor explanada posteriormente.

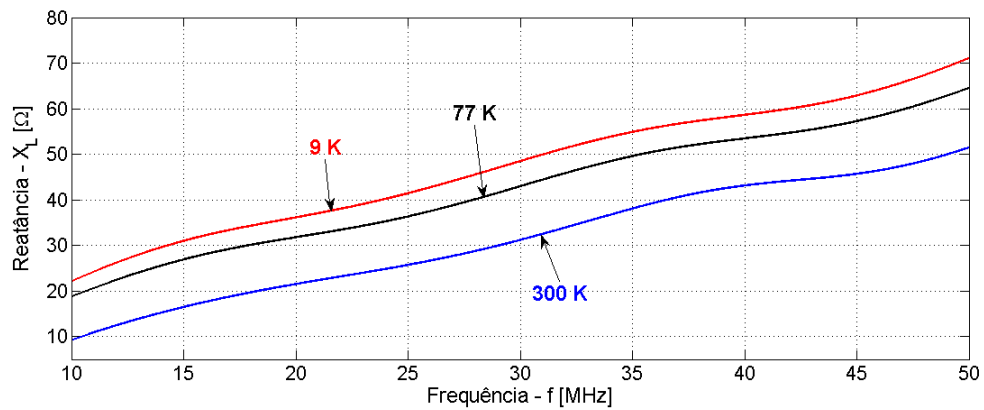


Figura 4.10: Valores de reatância com a variação de temperatura, na faixa de frequência de 10 a 50 MHz.

A curva de histerese desse material, determinada pela Equação 2.26, pode ser vista na Figura 4.11. Pode-se perceber que quando se aplica

um campo magnetostático para saturar a amostra, observa-se que a histerese se torna menor e a susceptibilidade magnética aumenta. Como a amostra está à uma temperatura criogênica de 9 K, esse resultado fica ainda mais pronunciado.

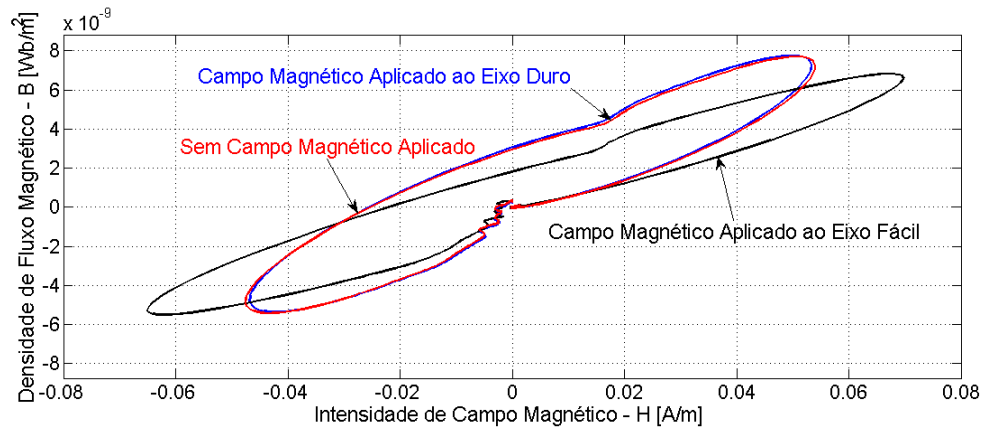


Figura 4.11: Comparação entre a curva de histerese da Fita Magnética à 9 K: com aplicação de campo magnético ao eixo duro, ao eixo fácil e sem campo magnético.

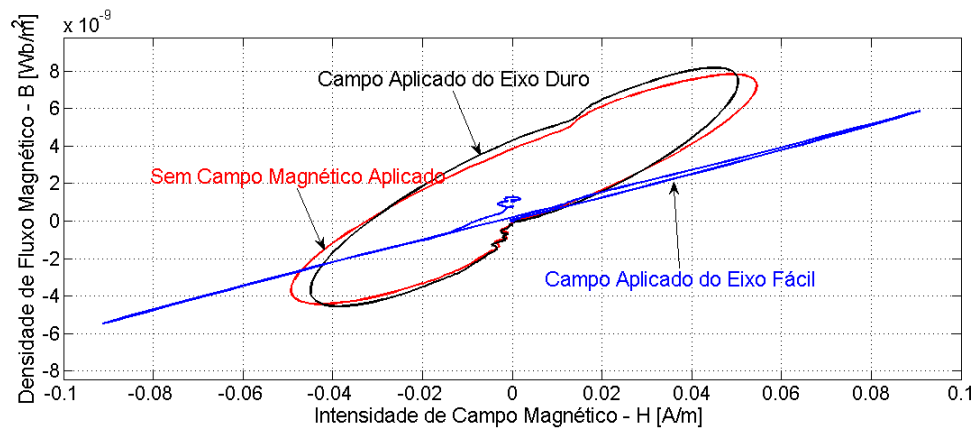


Figura 4.12: Comparação entre a curva de histerese da Fita Magnética à Temperatura ambiente: com campo magnético aplicado ao eixo fácil, ao eixo duro e sem campo magnético.

Para a curva de histerese, comparando-se a temperatura ambiente com a temperatura criogênica de 9 K (Figura 4.13), observa-se que a

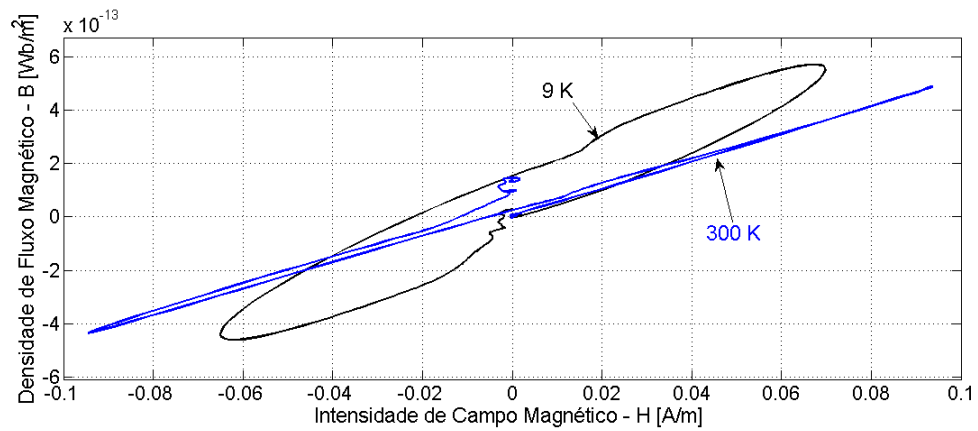


Figura 4.13: Comparação da curva de histerese da Fita Magnética com campo no eixo fácil, à temperatura de 9 K com 300 K.

inclinação média da curva à 300 K é menor do que daquela a 9 K, pode-se observar que nesse caso a componente do tensor de susceptibilidade magnética que é transversa, se torna maior, o que aumenta a indutância do sistema. Da mesma forma que a aplicação de campo magnético no eixo duro não tem tanta influência nos resultados como àquele que recebe o campo no eixo fácil.

Para finalizar, foi realizada uma análise da permeabilidade aparente em relação à temperatura, onde para material magnético deve ser maior que 1, obtido pela relação entre o material no vácuo e o material sob influência do campo magnético aplicado ao eixo fácil. Nota-se que, o valor de μ_a vai com o aumento da temperatura, devido à saturação magnética do material. Para o mesmo material sem campo magnético aplicado ou com campo magnético aplicado ao eixo duro, a variação da permeabilidade aparente tem pouca alteração com a alteração da corrente e/ou temperatura.

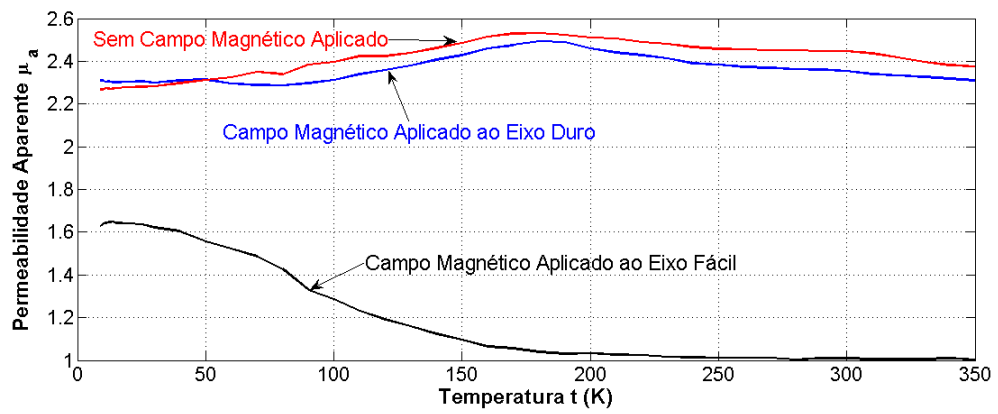


Figura 4.14: Permeabilidade Aparente em função da Temperatura, para a amostra Sem Campo aplicado, com Campo Magnético aplicado ao Eixo Duro e com o Campo Magnético aplicado ao Eixo Fácil.

Capítulo 5

Conclusão

Dentre os inúmeros motivos que levaram ao estudo de materiais com propriedades magnéticas através da técnica de refletometria no domínio do tempo, é incontestável, tanto na Engenharia Elétrica como nas demais áreas de ciências, a importância da caracterização magnética desses materiais através de técnicas simples e fáceis de serem implementadas. Isso torna essencial realizar estudos para aprofundar os conhecimentos de suas características, tal como a susceptibilidade magnética. Visto que todo o aparato de medida apresenta algumas restrições, foram realizadas medições com cargas resistivas conhecidas a fim de realizar a validação do método, comparando os resultados com medições realizadas via Analisador de Redes, pois este já é um método consagrado. Isso conferiu maior credibilidade e veracidade aos dados coletados e tratados. A carga resistiva de 68Ω apresentou erro experimental máximo de apenas 2,79%, para o intervalo entre 10 MHz e 50 MHz, faixa de frequência considerada neste estudo. Para as demais cargas conhecidas, o erro entre as medidas realizadas via Analisador de Redes, comparando com o método TDR, o erro da resistência (parte real) ficou abaixo de 10%. Para o valor da reatância (parte imaginária), os erros estão mais pronunciados prin-

principalmente devido ao efeito indutivo de conexões e do próprio componente que não é próprio para trabalhar em alta frequência. É possível observar ainda, descontinuidades no valor calculado para as frequências próximas a 62 MHz, 124 MHz e assim por diante, que estão diretamente relacionadas à indeterminação causada pelo valor nulo no espectro do pulso incidente nesses pontos. Para as amostras de material Heusler e Fita Magnética, pode-se perceber a influência de campo magnetostático e da temperatura nas medições realizadas. Pode-se perceber que quando se aplica um campo magnetostático para saturar a amostra, observa-se que a histerese se torna menor, e a susceptibilidade magnética aumenta com a diminuição da temperatura. Observa-se que a inclinação média da curva em temperatura elevada é menor do que daquela a 9 K, uma vez que a magnetização é maior com menor temperatura e pode-se observar que nesse caso a componente do tensor de susceptibilidade magnética que é transversa, se torna maior, o que aumenta a indutância do sistema, como ocorre para a Fita Magnética e para a amostra do material Heusler. Comparando os resultados apresentados na Figura 4.2, para a amostra de material Heusler e na Figura 4.8, para amostra fita magnética, o segundo caso apresenta maior resistividade em conjunto com a carga indutiva, devido às características construtivas do porta amostra indutivo e pelo fato de que a fita magnética apresenta maior susceptibilidade magnética. Ambas amostras apresentaram resultados satisfatórios, em relação ao método TDR, porém com erros experimentais do aparato proposto, que pode ser atribuído a diversos fatores, dentre eles, um pequeno descasamento de impedância de difícil detecção entre o cabo coaxial e o gerador de pulsos, bem como o valor exato da impedância do cabo coaxial (que pode variar entre 48Ω e 52Ω de acordo com dados de fabricantes), bem como conexões. Algumas amostras não foram passíveis de resultados, devido à fatores como: falta de recursos

de metalurgia para confecção mecânica de materiais de suporte, tecnologia que não permite inserir pontas de prova não-evasivas em amostras.

5.1 Perspectivas

Como perspectivas futuras vislumbra-se:

- Gerador de pulsos de maior intensidade e energia, que permita aplicação de campos a fim de saturar o material;
- Melhoria das características mecânicas do porta amostras indutivo, podendo ser com tecnologia de microlitografia, confeccionando indutores planares na escala de micrometros;
- Criostato com temperaturas menores, próximo à 300mK, pois alguns materiais magnéticos apresentam transição de fase somente nesta faixa de temperatura;
- Campo magnetostático na escala de Teslas.

Referências Bibliográficas

- [1] Subramanian,V. et al; Progress toward development of all-printed RFID tags: Materials, processes, devices; Proc. IEEE, vol. 93, no. 7, pp. 1330–1338, Jul. 2005.
- [2] Hirota,E.; Sakakima,H.; Inomata, K.; Giant Magneto-Resistance Devices; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Vol. 40, 2002.
- [3] Novoselov, K.S. et al; Two-dimensional atomic crystals, PNAS 102 (2005), 10451;
- [4] Evans, M.E.; Heller,F.; Environmental Magnetism 1 Ed, Academic Press San Diego, 2003.
- [5] Guimarães, A.P.; Introdução ao Nanomagnetismo; Monografia CBPF MO-002/06, 2006.
- [6] Lascu, I. ; Feinberg, J. M.; Speleothem magnetism; Quaternary Science Reviews, 2011, Vol.30(23), pp.3306-3320.
- [7] Sladkov, M.; Electronic detection study of magnetization dynamics in ferromagnetic/nonmagnetic systems; Rug.Nl, 2005.
- [8] Mattis, D. C.; The Theory of Magnetism; Harper and Row Publishers; New York, 1965.

- [9] Craik, D.; Magnetism: Principles and Applications; J. Wiley; 1995.
- [10] Wolf, S.A. et al; Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future; Science 294, 1488-1495 (2001).
- [11] Millsa, D.L.; Arias, R.; The damping of spin motions in ultrathin films: Is the Landau–Lifschitz–Gilbert phenomenology applicable?; Physica B 384 (2006) 147–151.
- [12] Hammann, B. A. et al; Structural study by solid-state ^{71}Ga NMR of thin film transistor precursors; Dalton Trans. 2015, Vol 44, 17652-17659.
- [13] Bittoun, J. ; Taquin, J.; Sauzade, M.; A computer algorithm for the simulation of any nuclear magnetic resonance (NMR) imaging method; Magnetic Resonance Imaging, vol. 3, pp. 363-376, 1984.
- [14] Kwan,R. K. S.; Evans, A. C.; Pike,G. B.; MRI simulation-based evaluation of image-processing and classification methods; IEEE Trans. Medical Imaging, vol. 18, n 11, pp. 1085-1097, 1999.
- [15] Carneiro, A. A.; Touso, A. T.; Baffa, O.; Avaliação da susceptibilidade magnética usando uma balança analítica; Quim. Nova, Vol. 26, No. 6, 952-956, 2003.
- [16] Kranz, J.; Schrodter, Ch.; Measuring the Magneto optic Kerr Effect by Diffraction; Applied Physics A 31, 59-63 (1983).
- [17] Wilkes, J A; The Experimental Ultrafast Magneto-Optical Kerr Effect, Bsc, 2000.
- [18] Huard, S.; Polarization of Light; John Wiley and Sons, 1997.

- [19] Segkhoonthod, K., Thin Film Detector for Internal MRI; Thesis of Doctor of Philosophy; 2014
- [20] Marcham, M. K. ; et al; Phase-resolved x-ray ferromagnetic resonance measurements in fluorescence yield; Journal of Applied Physics, 2010, Vol.109(7).
- [21] Ghasemi, A.; et al; Mössbauer spectroscopy and magnetic susceptibility studies of Cr–Al substituted strontium ferrite particles; Journal of Applied Physics, 01 May 2010, Vol.107(9).
- [22] Cole, R. H.; Time Domain Reflectometry; Annual Review of Physical Chemistry; Vol. 28: 283-300 (1977).
- [23] Artacho, J.M. ; Fornies-Marquina, J.M. et al; Direct deconvolution signal in time domain reflectometry; IEEE Transactions on Magnetics, May 1995, Vol.31(3), pp.1610-1613.
- [24] Cataldo, A. et al; TDR Moisture Estimation for Granular Materials: An Application in Agro-Food Industrial Monitoring; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Aug. 2009, Vol.58(8), pp.2597-2605.
- [25] Gomes Landgraf, F.J.; Fonseca Barreto, L.M.; Medida de propriedades magnéticas em liga Fe-42-Ni; Metalurgia - ABM, 331(56), pp.303–306, 1985.
- [26] Sadiku, M. N.O.; Elementos de Eletromagnetismo; Bookman Editora; Porto Alegre, 2012, 5a ed.
- [27] Kittel, C.; Introducao a Física do Estado Sólido - 8 Ed; Ltc - Livros Tecnicos e Cientificos, 2006.

- [28] Bertotti, G.; Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers; Gulf Professional Publishing, 1998.
- [29] Guimarães, A.P.; Introdução ao Nanomagnetismo; Monografia CBPF MO-002/06, 2006.
- [30] Skomski, R.; Nanomagnetism; Journal of Physics: Condensed Matter, Volume 15, Number 20; (2003), R841-R896.
- [31] Evans, M.E.; Heller, F.; Environmental Magnetism; Academic Press San Diego, 2003.
- [32] Wiltschko, R.; Wiltschko, W.; Magnetic Orientation in Animals; Springer, New York, 2005.
- [33] RIBEIRO, E.P.; Tomografia de Susceptibilidade Magnética com Magnetômetro Supercondutor Squid; Tese de Doutorado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, Dezembro, 1996
- [34] Dartora, C.A.; Cabrera, G.G.; Quantum transport in a ferromagnetic nanowire: conductance and MR effect. Physics Letters A **334**, 46-54 (2005).
- [35] Novak, M.A.; Introdução ao Magnetismo; IV Escola Brasileira de Magnetismo, vol 1700, 2003
- [36] Dartora, C.A. et al.; Caracterização experimental da permissividade dielétrica de materiais através da técnica de refletometria no domínio do tempo; Revista Brasileira de Ensino de Física, 37(1315), pp.1-5, 2014.
- [37] Dartora, C.A.; Cabrera, G.G.; Quantum transport properties of a two-channel atomic-sized magnetic contact; Phys. Rev. B **72**, 064456 (2005).

- [38] Chung, C.; Lin, C.; High concentration suspended sediment measurements using time domain reflectometry; *Journal of Hydrology*, 2011, Vol.401(1), pp.134-144.
- [39] Sim, S.T.V. et al; Monitoring of colloidal fouling and its associated metastability using Ultrasonic Time Domain Reflectometry, *Journal of Membrane Science*, 15 May 2012, Vol.401-402, pp.241-253.
- [40] Daeil Kwon, M H ; Azarian, M ; Pecht, M; Nondestructive Sensing of Interconnect Failure Mechanisms Using Time-Domain Reflectometry, *IEEE Sensors Journal*, May 2011, Vol.11(5), pp.1236-1241.
- [41] Graf, T., Felser, C., Parkin, S. S. P.; Simple rules for the understanding of Heusler compounds; *Progress in Solid State Chemistry* Vol. 39, Issue 1, 2011, pp.1–50.
- [42] Fowley, C. et al; Direct measurement of the magnetic anisotropy field in Mn–Ga and Mn–Co–Ga Heusler films; *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 16, p. 164006, 2015.
- [43] Galanakis, I.; Sasioglu, E.; Structural-induced antiferromagnetism in Mn-based full Heusler alloys: The case of Ni_2MnGa ; *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 10, p. 102514, 2011.
- [44] Fiddes, L. K. ; Chang, J. ; Yan, Ning; Electrochemical detection of biogenic amines during food spoilage using an integrated sensing RFID tag; *Sensors Actuators: B. Chemical*, 31 October 2014, Vol.202, pp.1298-1304.
- [45] Paz, J. F. I. et al; RFID transponder integration in metal surgical instruments produced by additive manufacturing; *Powder Metallurgy*, December 2014, Vol.57(5), pp.365-372