Rafael Luiz Bruginski Stonoga

Caracterização de materiais magnéticos utilizando identificação de sistemas

Curitiba

22 de novembro de 2019

Rafael Luiz Bruginski Stonoga

Caracterização de materiais magnéticos utilizando identificação de sistemas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Área de Concentração Eletrônica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito necessário à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Marlio J. C. Bonfim
Coorientador: Prof Dr. Gideon V. Leandro

Universidade Federal do Paraná

Setor de Tecnologia

Curso de Engenharia Elétrica

Curitiba

22 de novembro de 2019

Agradecimentos

É simplesmente incrível a quantidade de pessoas que colaboram para a execução de um trabalho como esse. Os resultados se constroem pouco a pouco, dia após dia, e são nos pequenos momentos diários que sentimos as maiores diferenças. Seja por uma companhia serena, por um momento de riso ou por um singelo "bom dia", externo minha mais sincera gratidão a todos que, de alguma maneira, estiveram comigo durante esta caminhada que se iniciou não 6 meses atrás, mas sim há 6 anos.

Em se tratando da conclusão do curso, é natural que o discurso se torne um pouco emotivo, de modo que tentarei (o que não significa que conseguirei) ser sucinto nos agradecimentos nominais.

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida, por sempre se fazer presente e por me permitir conhecer pessoas tão espetaculares ao longo desses 6 anos.

Agradeço especialmente a papai e mamãe, respectivamente donos do melhor abraço e do melhor colo do mundo. À mãe Claudia, por seu amor incondicional e por sempre me ajudar a me tornar um ser humano melhor. Ao pai Pedro, por ser meu espelho de caráter profissional, meu amigão e por nunca desistir de tentar me convencer a dormir mais cedo.

Meus agradecimentos também aos meus mentores nesse trabalho. Ao professor Marlio, pela confiança e pelos ensinamentos desde os tempos de iniciação científica. E ao professor Gideon, pela paciência e pelas horas de conversa sem as quais os modelos deste trabalho sequer sairiam do papel.

À minha família como um todo, minha gratidão por todo o apoio, suporte e, especialmente, pela compreensão da minha ausência quando os trabalhos da faculdade exigiam mais tempo que o esperado.

Deixo minha gratidão de modo especial à memória de três entes muito queridos. Ao vô Paulo, por ser minha inspiração mais antiga para cursar engenharia elétrica. Ao vô Zezo, por ser minha inspiração de respeito ao próximo e de gosto pelo conhecimento. E ao tio Gilmar, por sempre motivar meu amor pela matemática e por ser minha principal inspiração para ser professor.

Àqueles amigos mais antigos que a entrada na universidade deixo minha gratidão e felicidade por nossa amizade ter sobrevivido mais 6 anos. Agradeço em especial aos meus amigos: Ewerson, por nunca recusar uma boa conversa; Tassinari, pelo seu senso de humor incansável; e Hoffmann, pela companhia e parceria, especialmente no início do curso.

Aos meus primeiros mentores acadêmicos também deixo minha gratidão por auxiliarem na minha evolução dentro da jornada acadêmica. Ao professor Carlos Henrique, por sua sabedoria e paciência e por seu exemplo genuíno de humildade. À professora Florinda, por sempre me acolher dentro do departamento de matemática. E ao professor Ivan, pelos anos de longas conversas sob o disfarce de monitorias de eletromag e por ter sido meu maior exemplo dentro da engenharia de professor que verdadeiramente ama lecionar.

Se tem algo pelo qual sou grato dentro do curso de engenharia elétrica da Universidade Federal do Paraná é as amizades que fiz. A graduação exige que passemos várias horas por dia na universidade, o que faz com que convivamos muito tempo com nossos colegas e acabemos compartilhando algumas de nossas loucuras, o que se converte em amizade em alguns casos. Esses foram os que mais compartilharam da minha loucura nos últimos 6 anos: Aphek, Carol, Roberto, Yosef, Paulo, Predebon, Nati, Suco, Jean, Daniel, Bárbara, Daniele, Yuri, Rodolpho, Ruvi, Tinker, Peter, Fuchs, Rodrigo, Mauro, Wagner e Ishma. Minha gratidão por todo o tempo que passamos juntos. Vocês deixaram essa jornada muito mais única!

Agradeço também aos amigos e colegas do LACTEC, empresa onde comecei meu primeiro estágio, onde trabalho até hoje e onde também tive o prazer de conhecer pessoas sensacionais. Minha gratidão vai especialmente para Mayra, Vinicius Sowek, Lucero, Bruna, Paulo, Matheus, Raphael, Émeli, Vinicius Salvon, Kristie, Géssica, Felipe, Daniel, José, Gamboa, Gabriel, Rodolfo, Guilherme, Wesley, Luciane, Otávio, Tui, Fabi, João, Carol, Perez, Silvio, Lucio, Pablo, Kiane, Georgya, Alynne, Leonardo, Evelyn, Ana, Natalie, Paulo.

Deixo todos os nomes aqui registrados como forma de perpetuar a gratidão a todas essas pessoas que, de alguma forma, marcaram positivamente meu período na graduação.

Para encerrar, deixo minha gratidão a você, leitor(a), que conviveu comigo durante esse tempo, dentro ou fora da universidade, seja conversando pelos corredores ou ouvindo meus assovios musicais nada discretos. Saiba que você ajudou a tornar esse período melhor, mesmo que não tenha noção disso. Por isso lhe deixo o meu muito obrigado e espero que a leitura deste trabalho lhe seja leve e proveitosa.

A você, um forte abraço gaussiano

Rafael L. B. Stonoga

"Encontrar a analogia certa
É tão difícil como...
Difícil como..."
Kvothe, O nome do Vento

Resumo

Dada a vasta aplicação de materiais magnéticos, em especial na área de engenharia, conhecer suas propriedades passa a ser algo fundamental em termos de projeto. Diversos métodos já foram propostos na literatura, inclusive o de Nicolson-Ross-Wier que propõe o cálculo da permeabilidade por meio de medidas de parâmetros de espalhamento em linhas de transmissão. Os trabalhos que utilizam esse método normalmente fazem uso de linhas de transmissão de difícil confeccção ou que limitam rigorosamente o tamanho de amostras permitidas dadas suas dimensões diminutas (comuns para caracterizações acima da faixa de GHz). Nesse sentido, este trabalho propõe o uso de uma linha de transmissão de fácil confecção (do tipo *microstrip*) e que não limite o tamanho das amostras. Para compensar a falta de um modelo matemático simplificado para tal sistema de medida, a proposta também inclui o uso de técnicas de identificação de sistemas para avaliar e propor modelos caixa preta. Este trabalho apresenta uma revisão de literatura sobre trabalhos que realizam caracterizações similares, uma fundamentação teórica acerca dos principais conceitos de caracterização de materiais e identificação de sistemas e um capítulo sobre materiais e métodos que trata das amostras utilizadas e dos procedimentos para aquisição tanto de dados de parâmetros de espalhamento quanto de dados de permeabilidade complexa. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos tanto para modelos individuais quanto para modelos mais gerais.

Palavras-chaves: caracterização de materiais, permeabilidade complexa, parâmetros de espalhamento, identificação de sistemas

Lista de ilustrações

Lista de tabelas

Lista de abreviaturas e siglas

NWR	Nicolson-Ross-Wier
LT	Linha de Transmissão
MUT	*Material Under Test*
VNA	*Vector Network Analyzer*
SOLT	*Short Open Load Thru*
DE	*Differential Evolution*
RMSE	*Root Mean Square Error*
FT	Função de Transferência

Lista de símbolos

j	Unidade imaginária
$\vec{B}$	Indução magnética
$\vec{H}$	Intensidade de campo magnético
$\vec{M}$	Magnetização
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
χ_m	Susceptibilidade magnética
B_m	Indução máxima observada na curva de histerese
B_r	Remanência observada na curva de histerese
H_c	Campo coercitivo observado na curva de histerese
$\vec{E}$	Campo elétrico
$\vec{D}$	Densidade de fluxo elétrico
ϵ	Permissividade elétrica
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ_c	Permissividade elétrica complexa
ϵ'	Parte real da permissividade elétrica complexa
ϵ''	Parte imaginária da permissividade elétrica complexa
σ	Condutividade elétrica
ω	Frequência angular
μ_c	Permeabilidade magnética complexa
μ'	Parte real da permeabilidade magnética complexa
μ''	Parte imaginária da permeabilidade magnética complexa

a_n	Onda de potência normalizada incidente na porta n
b_n	Onda de potência normalizada refletida na porta n
S_{mn}	Parâmetro de espalhamento referente a uma onda incidente na porta n e transmitida para a porta m
L	Indutância
t	Comprimento longitudinal de um toroide
r_e	Raio externo de um toroide
r_i	Raio interno de um toroide
Z	Impedância
Z_{re}	Parte real da impedância Z
Z_{im}	Parte imaginária da impedância Z
Z_0	Impedância de saída de um medidor
Z_{in}	Impedância conectada a uma única porta de um equipamento de medida
$X(s)$	Sinal de entrada para um modelo na frequência
$Y(s)$	Sinal de saída para um modelo na frequência
$H(s)$	Modelo caixa preta na frequência
s	Frequência complexa no domínio de Laplace, equivalente a $j\omega$

Sumário

1 Introdução

O estudo das propriedades dos materiais é um campo importante da ciência e assume particular relevância quando se trata de engenharia. Para realização de um projeto que retrate realidade com precisão, desde construções civis, máquinas rotativas até dispositivos eletrônicos, é necessário conhecer um conjunto de propriedades relevantes dos materiais envolvidos, propriedades estas que são fundamentais para a correta operação do dispositivo ou produto final. Em termos de materiais magnéticos, ter conhecimento do comportamento da permeabilidade magnética em função da frequência é de extrema importância, como por exemplo em aplicações em projetos de equipamentos médicos ou de circuitos de radiofrequência. Para suprir essa necessidade foram desenvolvidas ao longo do tempo algumas técnicas de caracterização de materiais magnéticos em função da frequência, dentre as quais vale citar a de Nicolson-Ross-Wier (NWR).

A técnica NWR consiste, em linhas gerais, em medir os parâmetros S de uma linha de transmissão (LT), também chamada de "porta-amostra", que estará em contato com um material sob teste (*material under test* – MUT) e, a partir de equações analíticas dependentes principalmente da topologia da LT e das dimensões do MUT, é possível deduzir os valores não só da permeabilidade magnética mas também da permissividade elétrica do MUT. Diversos trabalhos já foram desenvolvidos utilizando a técnica NWR para diferentes topologias de LT, mas duas limitações são comuns à maioria deles: a utilização de porta-amostras de difícil confecção; e a restrição das dimensões físicas dos MUTs.

Ambas as limitações têm relação direta com a necessidade de se utilizar equações analíticas no método NRW para obtenção das propriedades do MUT, o que corresponde na área de Identificação de Sistemas a uma abordagem "caixa branca", que depende fundamentalmente do conhecimento das leis físicas que regem o sistema. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a caracterização de materiais magnéticos utilizando um modelo de LT de fácil confecção, a *microstrip*, associada a uma abordagem "caixa-preta", que depende, por sua vez, apenas dos dados utilizados como entrada e dos esperados como saída (respectivamente nesse caso os parâmetros S e a permeabilidade complexa). Essa abordagem permite a utilização de amostras de materiais sem limitação de dimensão, além de propor um sistema de caracterização de materiais de simples construção.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho consiste em obter a permeabilidade magnética complexa em função da frequência para amostras de materiais magnéticos utilizando técnicas e conceitos de Identificação de Sistemas.

Listam-se a seguir os requisitos intermediários, denominados aqui de objetivos específicos, para que o objetivo geral supracitado possa ser atingido:

- Levantar dados de permeabilidade complexa de amostras de materiais magnéticos
- Realizar medidas de parâmetros de espalhamento para amostras de materiais magnéticos em um porta-amostra do tipo LT *microstrip*
- Escolher um modelo matemático para representar a relação entre os parâmetros S e a permeabilidade complexa
- Escolher e implementar um método de estimação de parâmetros para o modelo escolhido
- Realizar a avaliação do modelo com os parâmetros estimados

1.2 Justificativa

Tendo em vista a importância do conhecimento do comportamento da permeabilidade magnética dos materiais em função da frequência (especialmente na faixa das micro-ondas), é interessante dispor de um sistema capaz de realizar tal caracterização para amostras de materiais de tamanho e geometria variados. Afinal, no cotidiano do engenheiro os materiais que se deseja caracterizar nem sempre são encontrados nos formatos propostos por trabalhos na literatura. Adequar amostras de tais materiais a geometrias específicas implica alterações físicas (como corte e lapidação) que podem não apenas danificar permanentemente a amostra como também exigir equipamentos de precisão que não são encontrados em laboratórios de eletrônica convencionais.

Um diferencial desse trabalho consiste justamente na utilização de um sistema de caracterização que não imponha limitações de formato às amostras. Outro diferencial é a utilização de uma abordagem caixa-preta, pois esse tipo de caracterização encontra na literatura apenas abordagens do tipo caixa-branca. A proposta de utilização dessa abordagem encontra motivação no trabalho de Pês (2019), que realiza uma abordagem análoga, mas para encontrar um modelo matemático de transistor mono-elétron.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 6 capítulos, incluindo este de introdução, cujos conteúdos serão descritos brevemente a seguir.

O capítulo 2 apresenta uma breve introdução sobre a caracterização de materiais magnéticos, apresentando dois métodos utilizados para tal fim. Nesse capítulo também são apresentados alguns trabalhos na literatura que realizam a caracterização de materiais magnéticos em função da frequência e busca-se, para cada um, apontar complexidades associadas à confecção dos porta-amostras ou à limitação das dimensões das amostras.

O capítulo 3 realiza uma abordagem sucinta a respeito de Identificação de Sistemas, dando enfoque nas etapas clássicas de um problema desse tipo e nas respectivas escolhas tomadas para este trabalho.

No capítulo 4 são apresentados desde o equipamento de medida e as amostras magnéticas utilizadas até os métodos utilizados para coleta de dados de parâmetros de espalhamento e de permeabilidade complexa, que servirão de base para o problema proposto de identificação de sistemas.

O capítulo 5 apresenta a discussão e a análise dos resultados obtidos, além das escolhas tomadas ao longo do projeto, necessárias para guiar a busca pelos melhores modelos. Os resultados são divididos em resultados individuais, correspondentes aos modelos cujos parâmetros foram estimados com base na resposta de apenas um material, e em resultados gerais, que correspondem aos modelos cujos parâmetros foram estimados utilizando um conjunto maior de dados de entrada e saída.

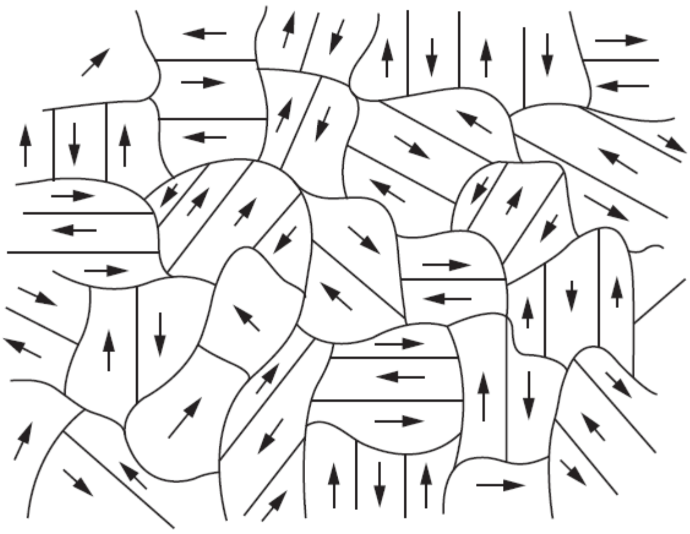
O capítulo 6, por fim, trata das principais considerações acerca deste trabalho, especialmente em termos de feitos realizados e resultados obtidos. Neste capítulo também são apresentadas propostas de alguns possíveis trabalhos futuros cujos temas estão ligados à continuação e aprimoramento deste trabalho.

2 Caracterização de Materiais Magnéticos

Materiais magnéticos encontram aplicações nos mais variados campos da ciência, desde dispositivos de armazenamento de dados, filtros de alta frequência até tratamentos de câncer por meio de nanopartículas (TIWARI et al., 2017). Entretanto, definir formalmente o que são materiais magnéticos não é trivial, pois o foco da maioria dos autores é classificar os materiais de acordo com seu comportamento magnético, e não definir explicitamente o termo "material magnético".

Em termos qualitativos, todos os materiais são constituídos do que se chama de domínios magnéticos, como mostra a figura 1. Essa figura ilustra um material hipotético não magnetizado, ou seja, um material cujos domínios não possuem uma direção preferencial na ausência de um campo magnético externo.

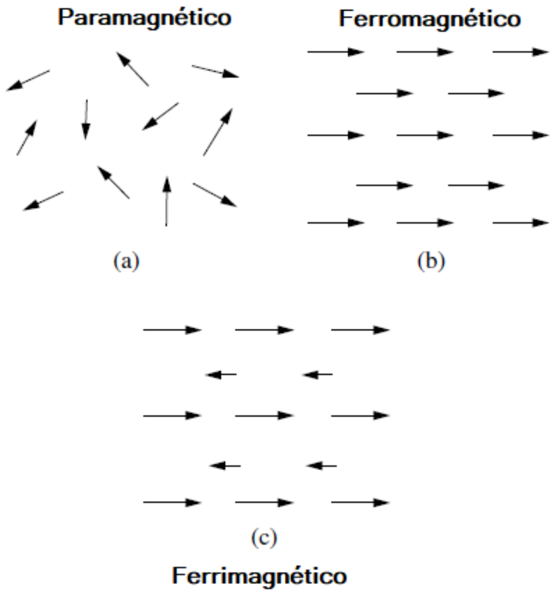
Figura 1 – Domínios magnéticos em um material hipotético sem a ação de campo magnético externo



Fonte: (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2010)

A classificação dos materiais se dá de acordo com o comportamento de seus domínios magnéticos quando submetidos à ação de um campo magnético externo. A figura 2 mostra o exemplo de três classes distintas de materiais. O material indicado por (a) se denomina paramagnético pois seus momentos magnéticos não sofrem alteração significativa de orientação quando submetidos a um campo magnético externo. Já os domínios do material (b) se orientam de acordo com a direção e sentido do campo externo, sendo classificados como ferromagnéticos. Por fim, os domínios do material (c) também se alinham na direção do campo externo, porém uma parcela deles assume o sentido oposto ao do campo, o que é um comportamento típico de materiais ferrimagnéticos. Além desses, existem também outros tipos de materiais, como os diamagnéticos e os antiferromagnéticos, que não serão ilustrados aqui.

Figura 2 – Comportamento dos domínios magnéticos de diferentes classes de materiais quando submetidos a um campo magnético externo



Fonte: Adaptado de (CHEN et al., 2004)

Uma vez definidas as classes de materiais, é possível ter um melhor entendimento das definições encontradas na literatura para "materiais magnéticos". Por exemplo, segundo Heck (1974), "Estritamente falando, todos as substâncias são magnéticas, mas apenas as ferromagnéticas e as ferrimagnéticas, denominadas 'materiais magnéticos' [...], são capazes de serem magnetizadas por campos relativamente fracos". [1] Para Heck, portanto, materiais magnéticos são aqueles cujos domínios magnéticos são fortemente influenciados por campos externos.

Heck também utiliza o termo "magnetizar", cujo significado é mais facilmente compreendido quando se utiliza uma abordagem quantitativa. Sabe-se que em qualquer material é válida a relação apresentada na equação (2.1)

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right) \tag{2.1}$$

onde $\vec{B}$ é a indução magnética, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, $\vec{H}$ é a intensidade de campo magnético e $\vec{M}$ é a magnetização (FITZPATRICK, 2008).

[1] Citação original: *Strictly speaking all substances are magnetic, but only ferromagnetic and ferrimagnetic substances, the so-called "magnetic materials"of technology, are capable of being magnetised by relatively weak fields.*

A magnetização é quem representa a susceptibilidade dos domínios magnéticos de determinado material à influência de um campo externo. Para materiais isotrópicos é comum utilizar a aproximação linear entre $\vec{M}$ e $\vec{H}$ mostrada na equação (2.2)

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \tag{2.2}$$

onde χ_m recebe justamente o nome de susceptibilidade magnética.

Portanto, mensurar o quão facilmente um material se magnetiza equivale a quantificar sua susceptibilidade magnética. É comum também utilizar a equivalência mostrada na equação (2.3)

$$\mu_r = 1 + \chi_m \tag{2.3}$$

onde μ_r é chamada de permeabilidade relativa. Substituindo (2.3) e (2.2) em (2.1), obtém-se a equação (2.4)

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \tag{2.4}$$

que é a equação que relaciona diretamente o campo externo ($\vec{H}$) à indução magnética em um material ($\vec{B}$). Nessa equação, é μ_r quem carrega a característica do material propriamente dito, o que leva à seguinte conclusão: caracterizar um material magnético corresponde a encontrar o valor da sua permeabilidade relativa.

Existem diversos métodos que permitem encontrar o valor de μ_r para diferentes amostras de materiais. Nesse trabalho abordaremos duas de modo sucinto: a curva de histerese e o método de Nicolson-Ross-Wier.

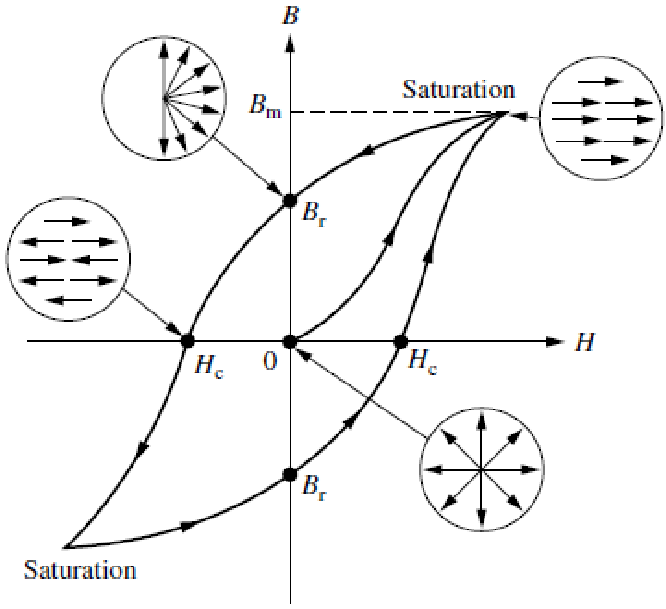
2.1 Curvas de Histerese

As curvas de histerese são provavelmente um dos métodos mais conhecidos para obtenção da permeabilidade relativa dos materiais. Ela consiste na representação gráfica da relação entre um campo aplicado $\vec{H}$ e a correspondente indução $\vec{B}$ no material. A figura 3 ilustra um exemplo de curva de histerese para um material hipotético.

Além da permeabilidade relativa, as curvas de histerese permitem encontrar outros parâmetros característicos dos materiais. Esses parâmetros possuem relação direta com comportamentos específicos dos domínios magnéticos do material, representados no gráfico para alguns pontos notáveis que serão descritos a seguir.

A curva tem início na origem, quando o material se encontra desmagnetizado (indução nula) e não há campo externo. Conforme se aumenta o valor de $\vec{H}$ ocorre um

Figura 3 – Exemplo de curva de histerese com indicações do alinhamento dos domínios magnéticos do material em posições distintas da curva



Fonte: (CHEN et al., 2004)

aumento correspondente em $\vec{B}$, indicando que os domínios magnéticos do material estão se alinhando de acordo com a orientação do campo externo. O material atinge um estado chamado de saturação no momento em que a indução permanece praticamente constante (cujo valor é indicado no gráfico por B_m) a despeito do aumento do campo externo. Nessa situação a maioria dos domínios magnéticos se encontram alinhados com o campo externo.

Mesmo que se diminua o campo $\vec{H}$ até zero, o material não retornará ao seu estado desmagnetizado. Como a saturação foi atingida, uma parcela dos domínios magnéticos ainda permanecerá alinhada ao campo externo inicial. Isso se traduz em uma indução remanescente denominada remanência (indicada no gráfico por B_r). Caso se aplique um campo $\vec{H}$ de direção contrária ao inicial, a tendência é que os domínios magnéticos se realinhem de modo a reduzir a indução. O campo externo necessário para que a indução se torne nula novamente recebe o nome de campo coercitivo (indicado no gráfico por H_c).

Caso o campo $\vec{H}$ continue aumentando no sentido contrário, o material irá reagir aumentando a indução no mesmo sentido. A partir daí as situações se repetem, com a saturação do material, seguida pela permanência de uma indução remanescente caso o campo $\vec{H}$ se torne nulo, a necessidade de um campo coercitivo na direção contrária para se anular a indução, seguida novamente pela saturação do material na mesma situação inicial. Como se trata de um processo cíclico, é comum também nomear o gráfico de ciclo de histerese, do inglês *hysteresis loop* (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2010).

Esse tipo de caracterização permite observar que a permeabilidade relativa dos materiais depende do campo externo aplicado. Afinal, da equação (2.4) é possível concluir que μ_r pode ser obtido pela derivada da indução em função da intensidade de campo magnético, equivalente à inclinação da reta tangente à curva de histerese. Como essa reta possui inclinação bastante variável ao longo do gráfico, é possível estipular regiões de operação tais que o campo $\vec{H}$ assuma valores correspondentes a valores desejáveis de μ_r.

Como também se trata de um processo cíclico, é possível aplicar campos de diferentes frequências, obtendo assim diferentes curvas de histerese. Ainda assim, esse tipo de caracterização é mais interessante quando se deseja encontrar uma relação entre $\vec{H}$ e μ_r. Para estimar o comportamento de μ_r em função da frequência existem outros métodos mais utilizados, como é o caso do método de Nicolson-Ross-Wier, a ser descrito no tópico 2.2.

2.2 Método de Nicolson-Ross-Wier

Em se tratando de caracterização de materiais em função da frequência, é necessário complementar a definição de permeabilidade magnética. Para isso é comum autores utilizarem uma analogia com a permissividade elétrica (MACHAC, 2005; HAYT; BUCK, 2013).

A permissividade elétrica (ϵ), para fins de definição, estabelece uma relação de proporcionalidade entre o campo elétrico $\vec{E}$ e a densidade de fluxo elétrico $\vec{D}$, como mostra a equação (2.5). Chama-se permissividade elétrica o produto entre a permissividade elétrica do vácuo (ϵ_0) e a permissividade elétrica relativa (ϵ_r), sendo esta última análoga à permeabilidade magnética relativa.

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} = \epsilon_0\epsilon_r\vec{E} \tag{2.5}$$

O conceito de permissividade complexa (ϵ_c) passou a ser utilizado com a finalidade de representar numa única grandeza a permissividade elétrica relativa e um fator associado às perdas. A permissividade elétrica complexa é definida de acordo com a equação (2.6)

$$\epsilon_c = \epsilon_r - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon'' \tag{2.6}$$

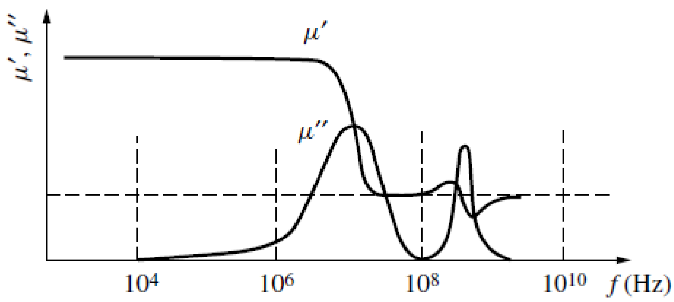
onde σ é a condutividade elétrica do material e ω, a frequência angular. É comum representar a parte real da permissividade complexa por ϵ', que corresponde diretamente a ϵ_r, e a parte imaginária por ϵ'', que contém o significado não apenas de perdas condutivas, mas de outros tipos de perda associadas ao campo elétrico (MACHAC, 2005).

A partir da mesma lógica se define o conceito de permeabilidade magnética complexa (μ_c), como mostra a equação (2.7) , sendo a parte real equivalente à permeabilidade relativa enquanto a parte imaginária representa as perdas magnéticas de natureza diversa. Um fato interessante é que, ao contrário do que ocorre com a permissividade complexa, não existe uma equação que define μ'' em função de outras propriedades dos materiais. A consideração que se encontra na literatura é justamente a de que a parte imaginária de μ_c é utilizada como representação das perdas associadas ao campo magnético (MACHAC, 2005; HAYT; BUCK, 2013).

$$\mu_c = \mu' - j\mu'' \tag{2.7}$$

Essa definição de permissividade e permeabilidade complexas está intimamente relacionada com o fato de que ambas variam com a frequência. No caso da permeabilidade, a figura 22 mostra um exemplo do seu comportamento em função da frequência para um material hipotético.

Figura 4 – Exemplo de comportamento da permeabilidade complexa para um material hipotético



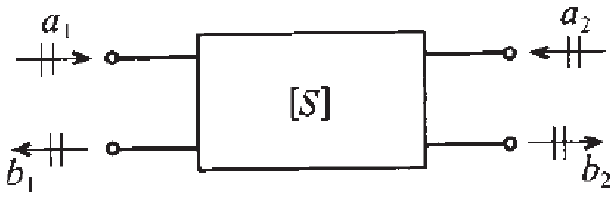
Fonte: (CHEN et al., 2004)

Nota-se que para frequências da ordem de kHz tanto a parte real quanto a parte imaginária da permeabilidade permanecem constantes, sendo esta última nula. Isso justifica o uso apenas da parte real para frequências baixas, já que nesses casos $\mu_c \approx \mu_r$. Conforme a frequência aumenta, a parte imaginária da permeabilidade passa a não ser desprezível, ao passo que o valor da parte real diminui, não chegando a retornar a seu valor inicial nem para frequências mais altas.

Para obter esses valores de permeabilidade em função da frequência já foram propostos uma série de métodos distintos (CHEN et al., 2004). Um deles é o algoritmo de Nicolson-Ross-Wier (NWR), que permite obter a permeabilidade complexa e a permissividade complexa a partir de medidas de parâmetros de espalhamento em linhas de transmissão (LT) parcialmente preenchidas por amostras de materiais. Como o método NWR serviu apenas de inspiração para este trabalho (não foi implementado na prática), suas equações não serão descritas aqui. A análise será apenas qualitativa, precedida de uma explanação sobre parâmetros de espalhamento.

Os parâmetros de espalhamento, segundo Ludwig e Bretchko (2000), são descritores de ondas de potência que permitem estabelecer relações de entrada e saída em sistemas em termos de ondas de potência incidentes e refletidas. Um sistema de 2 portas, por exemplo, está representado na figura 5. Nessa imagem as ondas a_n e b_n são, respectivamente, as ondas de potência normalizadas incidentes e refletidas em cada uma das portas, sendo n o índice da porta (1 ou 2 nesse exemplo).

Figura 5 – Exemplo de sistema de duas portas com a representação das ondas de potência incidentes e refletidas



Fonte: (LUDWIG; BRETCHKO, 2000)

É possível representar as ondas refletidas em termos das ondas incidentes e dos chamados parâmetros de espalhamento, como mostra a equação (2.8).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Os parâmetros de espalhamento, ou parâmetros S, podem ser definidos por equações simplificadas quando ondas específicas assumem potência nula. Os parâmetros utilizados no algoritmo NWR são o S_{11} e o S_{21}, definidos respectivamente nas equações (2.9) e (2.10) quando a onda incidente na porta 2 (a_2) é nula.

$$S_{11} = \left[\frac{b_1}{a_1}\right]_{a_2=0} \tag{2.9}$$

$$S_{21} = \left[\frac{b_2}{a_1}\right]_{a_2=0} \tag{2.10}$$

De acordo com o método NRW, ambos esses parâmetros são medidos ou no domínio do tempo (NICOLSON; ROSS, 1970), ou diretamente no domínio da frequência (WEIR, 1974), a partir de uma LT parcialmente preenchida por uma amostra de material. Utilizando de equações dependentes da geometria da LT e do tamanho da amostra é possível encontrar diretamente expressões tanto para a permissividade quanto para a permeabilidade da amostra.

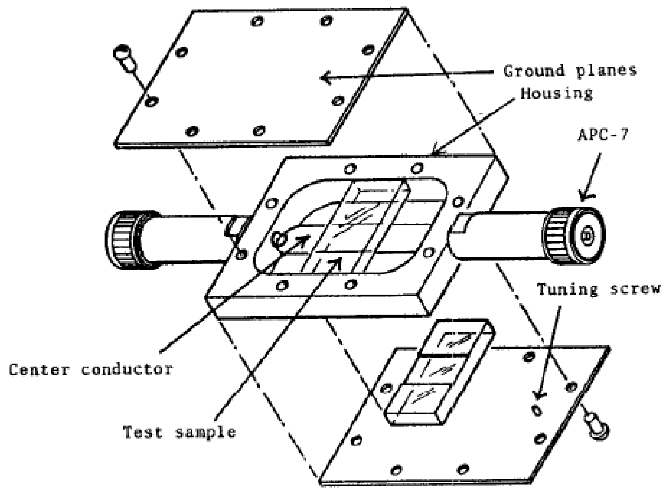
A dificuldade desse método reside principalmente na construção de LTs, pois geralmente suas dimensões são reduzidas para possibilitar caracterizações na faixa de frequências da ordem de GHz e na consequente limitação de tamanho das amostras. No tópico 2.3 serão apresentados alguns trabalhos presentes na literatura que utilizam o método NRW e serão enfatizadas as respectivas limitações, sejam elas associadas às dimensões do porta-amostra, sejam pelo tamanho ou pela geometria da amostras.

2.3 Revisão de Literatura

O trabalho de Barry (1986) apresenta um porta-amostras para obtenção da permissividade e da permeabilidade de amostras de material. Esse trabalho trata desde a concepção da topologia escolhida, apresentando o equacionamento matemático correspondente, até a apresentação de resultados utilizando materiais conhecidos, como teflon. Um esboço ilustrativo da LT do tipo *stripline* proposta para utilização como porta-amostra consta na figura 6.

Apesar de a imagem indicar que a material sob teste (MUT) precise possuir uma reentrância de modo a circundar por completo o condutor central, o autor comenta que foi constatado que isso não implicava medidas de melhor qualidade em comparação com materiais planos, sem curvatura. Ainda assim, as amostras precisavam passar por um processo de preparação para assumir dimensões específicas a fim de encaixarem perfeitamente no porta-amostras.

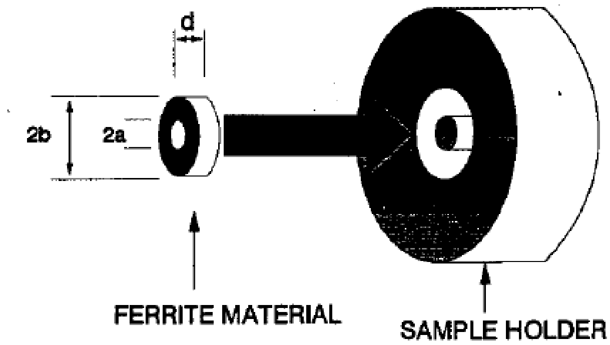
Figura 6 – Linha de transmissão do tipo *stripline* utilizada como porta amostra no trabalho de Barry (1986)



Fonte: (BARRY, 1986)

Riahi-Kashani e Elshabini-Riad (1992) apresentam em seu trabalho duas metodologias para determinação da permeabilidade de materiais: uma para baixas frequências (da ordem de kHz) e outra para média-alta frequência (entre MHz e GHz). A segunda utiliza um cabo coaxial como linha de transmissão e exige que as amostras possam ser inseridas em seu interior. Para contornar essa dificuldade, os autores propõem a utilização de amostras na forma de pasta ou de pó, que possuem mais flexibilidade quanto à geometria. A figura 7 representa o cabo coaxial utilizado bem como a geometria necessária para a amostra.

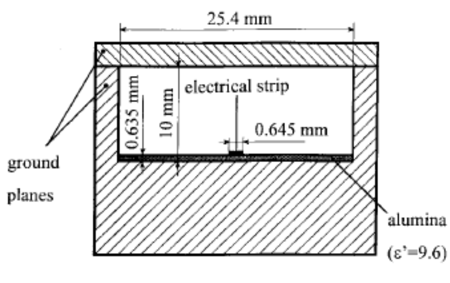
Figura 7 – Linha de transmissão do tipo cabo coaxial utilizada como porta amostra no trabalho de Riahi-Kashani e Elshabini-Riad (1992)



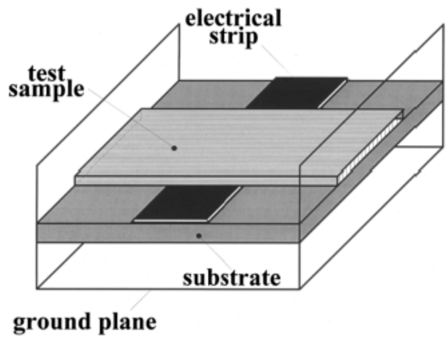
Fonte: (RIAHI-KASHANI; ELSHABINI-RIAD, 1992)

No trabalho de Quéffélec, Le Floc'h e Gelin (1998) é apresentado um porta-amostra utilizando uma LT do tipo *microstrip*. Apesar de ser uma LT de construção mais simples, o sistema como um todo não o é, pois a LT é envolvida por uma estrutura de metal, servindo como plano terra, como mostra a figura 8a. Além disso, foram caracterizadas apenas amostras finas, com espessura da ordem de µm, e com largura exatamente igual à da LT, como ilustra a figura 8b.

Figura 8 – Detalhes do porta-amostra utilizado por Quéffélec, Le Floc'h e Gelin (1998)



(a) Posicionamento da amostra na LT

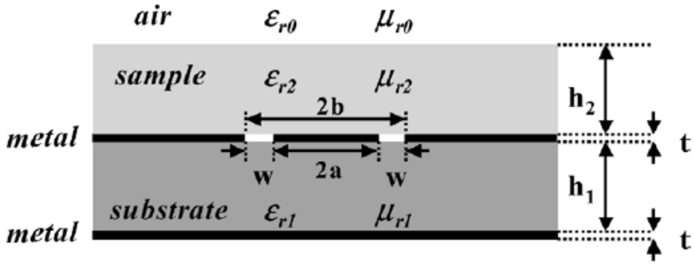


(b) Dimensões da *microstrip*

Fonte: (QUÉFFÉLEC; Le Floc'h; GELIN, 1998)

O uso de uma LT do tipo guia de onda coplanar é o foco do trabalho de Kang et al. (2005). A proposta desse trabalho é não limitar o tamanho das amostras, utilizando, para tanto, uma LT que não possui um plano terra superior ao condutor central, como mostra a vista lateral na figura 9. São apresentadas equações analíticas para obtenção da permeabilidade e da permissividade tanto do substrato quanto do material sob teste. A desvantagem dessa abordagem é a construção da LT, pois suas dimensões exigem precisão da ordem de µm.

Figura 9 – Linha de transmissão do tipo guia de onda coplanar utilizada como porta amostra no trabalho de Kang et al. (2005)

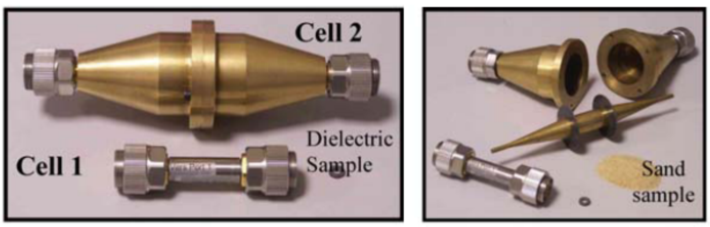


Fonte: (KANG et al., 2005)

O trabalho de Ba e Sabouroux (2010) apresenta um kit composto do que os autores chamam de "célula coaxial", correspondente a um porta-amostras, e de um software a ser integrado no equipamento de medida de modo a obter diretamente as propriedades dos MUTs após as devidas calibrações. O conjunto recebe o nome de *EpsiMu*, fazendo alusão à sua capacidade de determinar tanto a permissividade quanto a permeabilidade dos MUTs. Como a faixa de frequência de medição vai até 18 GHz, o sistema assume certa complexidade de construção, além de implicar a necessidade de amostras com dimensões específicas.

Para compensar a limitação da geometria das amostras sólidas, os autores propõem um segundo porta-amostras, destinado à caracterização de materiais na forma de pasta ou em grãos, mas que possui frequência máxima limitada em 4 GHz. A figura 10 mostra imagens das duas células propostas pelos autores, sendo a célula 1 destinada a amostras de materiais sólidos e a célula 2, a amostras de materiais chamados de semi-sólidos. A figura mostra também uma amostra utilizada em cada célula: um anel de poliacetal, como amostra sólida, e uma mistura de areia e argila, como amostra semi-sólida.

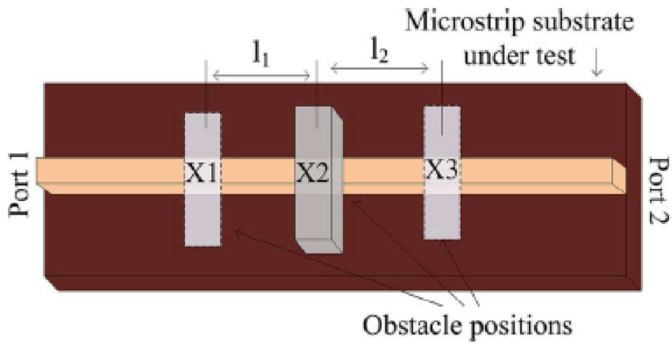
Figura 10 – Células coaxiais utilizadas como porta amostra no trabalho de Ba e Sabouroux (2010)



Fonte: (BA; SABOUROUX, 2010)

O trabalho de (NARAYANAN, 2014) faz uso de uma LT do tipo *microstrip* para caracterização de amostras de materiais. A diferença dessa abordagem reside no fato de que o material a ser caracterizado é o substrato da LT, enquanto o processo de medição consiste em posicionar obstáculos feitos de materiais conhecidos sobre a linha, mas em diferentes posições. A figura 11 ilustra a LT utilizada, bem como diferentes posições utilizadas para o obstáculo.

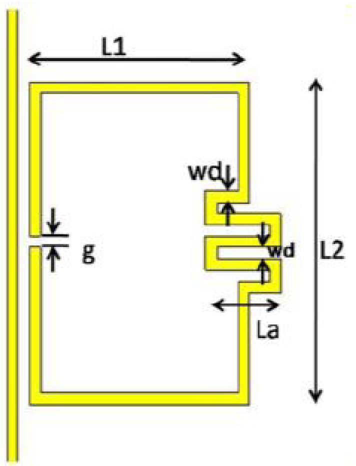
Figura 11 – Linha de transmissão do tipo *microstrip* utilizada como sistema de medição no trabalho de Narayanan (2014)



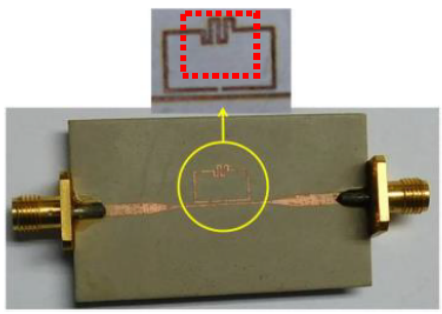
Fonte: (NARAYANAN, 2014)

A principal limitação dessa abordagem é o uso do substrato como MUT, porque isso exige a confecção de uma nova LT com um diferente substrato para cada caracterização a ser realizada. Além disso, esse método não foi utilizado para determinação da permeabilidade, apenas da permissividade.

Figura 12 – Detalhes do porta-amostra utilizado por Shafi, Jha e Akhtar (2017)



(a) Esquemático do porta-amostra



(b) Porta-amostra depois de confeccionado

Fonte: (SHAFI; JHA; AKHTAR, 2017)

Por fim, o trabalho de Shafi, Jha e Akhtar (2017) utiliza duas LT do tipo *microstrip*, uma para obtenção da permissividade elétrica e outra para obtenção de permeabilidade magnética. Esta última tem seu esquemático representado na figura 12a e sua imagem real, na 12b. Os autores descrevem todas as etapas de projeto da LT e apresentam resultados bastante satisfatórios para um variado conjunto de materiais.

A dificuldade associada ao porta-amostra proposto é, assim como a maioria dos trabalhos citados anteriormente, a dificuldade de construção. A LT utilizada corresponde a um ressonador do tipo linha sinuosa, o que exige precisão de confecção da ordem de µm. E como as amostras devem ser posicionadas apenas sobre o ressonador, evitando sobrepor os demais trechos de *microstrip*, as mesmas devem possuir a geometria de um cubo com 5 mm de lado segundo os autores, o que exige um preparo dos MUTs antes do processo de caracterização.

2.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos teóricos associados à caracterização de materiais magnéticos. Foram apresentadas qualitativamente duas técnicas, uma que apresenta a relação entre o campo $\vec{H}$ e a indução $\vec{B}$, chamada de curva ou ciclo de histerese, e outra que extrai diretamente o valor da permeabilidade magnética em função da frequência, chamada de algoritmo de Nicolson-Ross-Wier (NRW). Foram apresentados também alguns trabalhos presentes na literatura que utilizam a técnica NWR, dando ênfase para a presença de pelo menos uma das características a seguir: complexidade construtiva do porta-amostra ou limitação das dimensões das amostras. Essa seção embasa a justificativa deste trabalho, que propõe o uso de um porta-amostra de simples confecção e que não imponha limites para as dimensões das amostras.

3 Identificação de Sistemas

Existem diversas abordagens possíveis para um problema de identificação de sistemas. Sobre a escolha das técnicas de modelagem, contudo, é comum dividi-las em três grandes grupos (PÊS, 2019):

- Modelagem Caixa Branca: utiliza como base os conceitos e leis da física que regem o sistema a ser modelado;
- Modelagem Caixa Preta: utiliza como base apenas os dados de entrada e de saída;
- Modelagem Caixa Cinza: utiliza uma abordagem mista, levando em conta tanto os dados de entrada e de saída quanto algum conhecimento prévio sobre o sistema (como estrutura ou leis físicas)

A abordagem caixa branca é interessante quando se tem um elevado conhecimento acerca do funcionamento do sistema a ser modelado. Do contrário, o modelo será incompleto e impreciso caso algum fenômeno relevante não seja levado em consideração. Para o problema de caracterização de materiais, a seção 2.3 apresenta alguns trabalhos que fazem uso da abordagem caixa branca.

Quando não se dispõe de informações suficientes acerca do sistema, a caixa preta passa a ser uma escolha mais promissora. Apesar de os trabalhos citados na seção 2.3 limitarem, de modo geral, as dimensões das amostras utilizadas, isso é feito com o intuito de aproximar ao máximo o sistema de uma caixa branca. Como a proposta desse projeto envolve o uso de amostras sem limitação de dimensão, escolheu-se utilizar uma abordagem caixa preta como forma de compensação.

É importante ressaltar que os parâmetros estimados para um modelo caixa preta não necessariamente encontram significado físico correspondente (AGUIRRE, 2007), já que representam apenas alguma relação de causa e efeito entre os dados de entrada e os de saída.

3.1 Etapas de um problema de identificação

Quando se trata de uma modelagem caixa preta é possível, segundo Aguirre (2007), elencar 5 etapas a serem seguidas:

1. *Testes dinâmicos e coleta de dados*: É a etapa correspondente à coleta de dados de entrada e de saída nas situações de operação desejadas. Caso se deseje avaliar o

comportamento dinâmico do sistema, é também nessa etapa que se definem os sinais de excitação a serem usados;

2. *Escolha da representação matemática a ser utilizada*: É a etapa em que se escolhe o tipo de modelo matemático a ser utilizado entre os vários lineares e não-lineares existentes na literatura;

3. *Determinação da estrutura do modelo*: É a etapa em que se definem as combinações de termos a serem utilizadas, no caso de modelos não lineares, ou a ordem, no caso de modelos lineares;

4. *Estimação de parâmetros*: É a etapa na qual se escolhe um algoritmo que será responsável por encontrar um conjunto de coeficientes do modelo definido.

5. *Validação do modelo*: É a etapa em que se avalia o quão bom é um determinado conjunto de coeficientes estimados. O critério para estabelecer o melhor dos candidatos é subjetivo e depende do tipo de uso que o autor dará para o modelo.

Como o presente trabalho trata justamente de um problema de identificação de sistemas, já era esperado que o conjunto de objetivos específicos envolvesse, mesmo que indiretamente, as etapas citadas acima.

Como esse trabalho não envolve o estudo do comportamento dinâmico do sistema, a etapa 1 se constitui apenas da coleta de dados, que está descrita nas seções 4.3 e 4.4.

A representação matemática escolhida será descrita na seção 3.2.

A estrutura do modelo foi variada ao longo do trabalho e constitui parte dos resultados, portanto será abordada no capítulo 5, bem como a etapa referente à validação do modelo.

O algoritmo utilizado para realizar a estimação de parâmetros foi o algoritmo da evolução diferencial (do inglês, Differential Evolution - DE), que será descrito na seção 3.3.

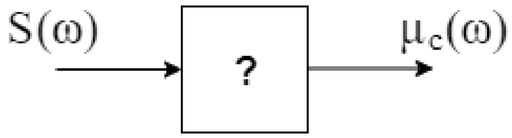
3.2 Representação matemática escolhida

A figura 13 apresenta uma representação esquemática do tipo de modelagem caixa preta que se deseja realizar. Um detalhe importante é que tanto os dados de entrada quanto os de saída são funções da frequência.

Inclusive, esses dados são coletados diretamente como função da frequência. Isso leva à escolha de um modelo equivalente na frequência, do tipo representado na (3.1)

$$Y(s) = H(s)X(s) \tag{3.1}$$

Figura 13 – Diagrama representativo do problema de Identificação de Sistemas analisado neste trabalho



Fonte: O autor (2019)

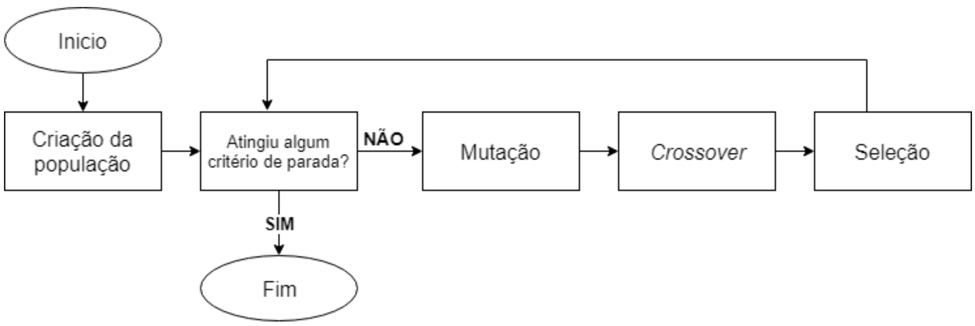
onde $X(s)$ é o dado de entrada, $Y(s)$ é o dado de saída, $H(s)$ é o modelo e s é a frequência no domínio de Laplace (equivalente a $j\omega$). A partir disso, o modelo escolhido foi a função de transferência (FT) polinomial, descrita pela equação (3.2), onde a_i e b_i são os i-ésimos coeficientes do numerador e denominador, respectivamente.

$$H(s) = \frac{a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} \cdots a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1}s^{n-1} \cdots b_1 s + b_0} \tag{3.2}$$

3.3 Estimação de parâmetros

O algoritmo escolhido para realizar a estimação de parâmetros foi o algoritmo da evolução diferencial (DE). Ele faz parte de um conjunto de algoritmos que recebem o nome genérico de algoritmos evolucionários (AMARI et al., 2005) e que seguem uma rotina que pode ser generalizada pelo diagrama de blocos da figura 14.

Figura 14 – Diagrama representativo de um algoritmo evolucionário genérico



Fonte: O autor (2019)

Como o algoritmo DE não é o alvo do estudo deste trabalho, mas sim uma ferramenta para obtenção de resultados, ele não será descrito minuciosamente. Ao invés disso, será realizada uma descrição qualitativa acerca das etapas que o compõe.

O algoritmo DE foi implementado diversas vezes e, para cada aplicação distinta, alguma modificação foi proposta a fim de melhorar sua eficiência de modo geral. Neste trabalho, contudo, foi implementada a versão clássica do algoritmo DE, descrita a seguir de acordo com as etapas da figura 14.

O primeiro passo para o algoritmo DE é a criação de uma população (P) de indivíduos. Um indivíduo nada mais é do que um conjunto de coeficientes, enquanto a população é um conjunto de indivíduos. Como se trata da criação da primeira população, cada indivíduo é criado aleatoriamente. Como os algoritmos evolucionários fazem muito uso de aleatoriedade, é interessante verificar os critérios de parada logo após a criação da população, porque existe uma chance de um dos primeiros indivíduos ser bom o suficiente para evitar que o algoritmos prossiga rodando.

Os critérios de parada podem ser vários. O mais tradicional é a avaliação de uma função custo, que normalmente é algum cálculo de erro entre os dados de saída reais e os dados estimados pelo modelo. Caso essa função custo assuma um valor abaixo de dado limite imposto pelo usuário para algum indivíduo, o algoritmo para de rodar e o melhor indivíduo é o que possui melhor função custo. Outros critérios de parada incluem: número máximo de iterações, tempo de execução e convergência.

Caso nenhum critério de parada seja atingido, inicia-se a etapa de mutação. Nessa etapa são escolhidos três indivíduos distintos da população P (p_1, p_2, p_3) e, a partir deles, cria-se um indivíduo v de uma nova população temporária V a partir da equação (3.3), onde F é um parâmetro definido pelo usuário e assume qualquer valor não negativo.

$$v = p_1 + F(p_2 - p_3) \tag{3.3}$$

Esse processo se repete até que se obtenha uma população V de mesmo tamanho de P. Aí se inicia o processo do cruzamento (ou *crossover*, do inglês). Esse processo ocorre com a criação de uma terceira população U, sendo que cada parâmetro $u_{i,x}$ do indivíduo u_i recebe um valor da seguinte forma: sorteia-se um número α entre 0 e 1, caso α seja maior do que C_r (número também entre 0 e 1, mas informado pelo usuário), $u_{i,x}$ recebe valor igual ao parâmetro correspondente de v_i, caso contrário, $u_{i,x}$ recebe valor igual ao parâmetro correspondente de p_i. Esse processo é representado pela equação (3.4)

$$u_{i,x} = \begin{cases} v_{i,x}, & \text{se } \alpha < C_r \\ p_{i,x}, & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{3.4}$$

Por fim, chega-se à etapa da seleção. O algoritmo DE realiza a seleção na forma de torneio, ou seja, cada indivíduo de P tem sua função custo avaliada e comparada com a função custo do indivíduo correspondente de U. O indivíduo que possuir o melhor valor de função custo será mantido para a próxima iteração (ou geração, que é o termo mais comum), enquanto o outro será eliminado.

Encerrada a seleção, o algoritmo retorna à avaliação dos critérios de parada e o ciclo passa a se repetir indefinidamente até que um dos critérios de parada seja atingido.

3.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos de identificação de sistemas, em especial as etapas a serem seguidas para buscar uma solução para um problema nessa área. Foram apresentados tanto a representação matemática escolhida, que foi do tipo função de transferência polinomial, quando o algoritmo utilizado para realizar a estimação dos parâmetros. Como o uso desse algoritmo não é o enfoque principal deste trabalho, a abordagem sobre seu funcionamento tornou-se sucinta e mais qualitativa do que quantitativa.

4 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados o equipamento utilizado para realização das medições bem como os materiais utilizados como amostras. Serão apresentadas também as metodologias para coleta de dados tanto de parâmetros de espalhamento quanto de permeabilidade complexa.

4.1 Analisador de redes vetorial

O equipamento utilizado para realização foi o analisador de redes vetorial, do inglês *Vector Network Analizer* (VNA), da Keysight modelo E5063A, cuja ilustração consta na figura 15.

Figura 15 – VNA da Keysight utilizado como instrumento de medição

Fonte: (KEYSIGHT,)

Esse VNA foi utilizado especialmente por conta da sua abrangente faixa de frequências, que vai de 50 kHz a 18 GHz. Outras especificações relevantes são a potência máxima comportada nas portas (26 dBm) e o uso de conectores de 50 Ω tipo N para as portas.

4.2 Amostras utilizadas

Os materiais utilizados como amostras fazem parte de um kit de ferrites da Würth Elektronik. Esse kit é composto por um conjunto de 33 núcleos toroidais de ferrite, sendo que 13 possuem uma face plana o suficiente para serem colocados sobre o porta-amostra de *microstrip*. A figura 16 mostra a caixa de ferrites com todos os exemplares em seu interior.

Cada ferrite possui um invólucro removível de plástico, como mostra a figura 17a. Uma vez removido o invólucro, é possível observar a geometria e as dimensões de cada

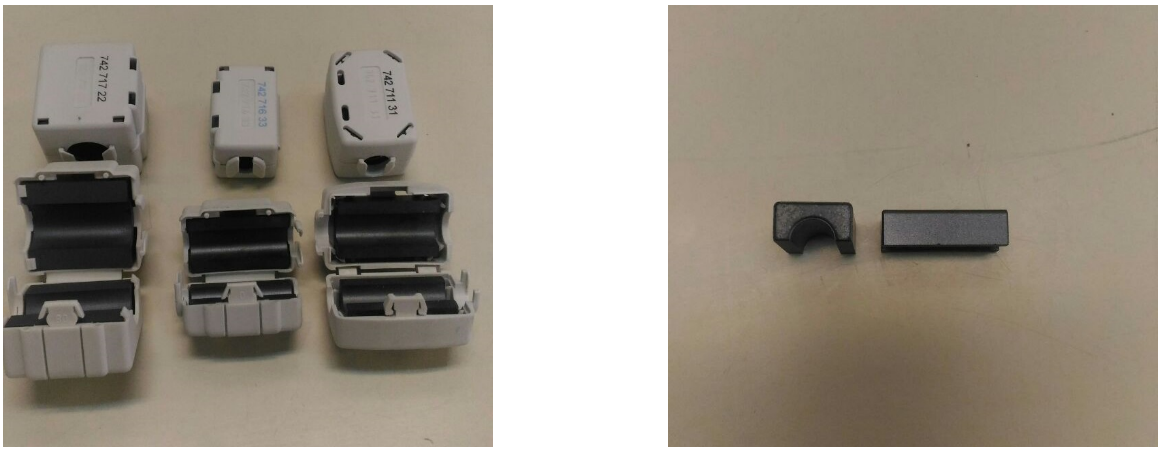
Figura 16 – Kit de ferrites da Würth Elektronik

Fonte: O autor (2019)

amostra, bem como sua face plana utilizada como base no momento da caracterização, como mostra a figura 17b.

Cada núcleo de ferrite é representado por um código identificador de três números, que será utilizado para diferenciar as amostras e suas respectivas medidas ao longo deste trabalho. A tabela 1 apresenta o código identificador de cada núcleo, bem como as respectivas dimensões necessárias para obtenção dos dados de permeabilidade complexa (conforme descrito no Apêndice A): t representa o comprimento longitudinal do toroide; r_e, seu raio externo; e r_i, seu raio interno, como mostra a figura 38.

Figura 17 – Exemplos das amostras de ferrites utilizadas neste trabalho



(a) Seis núcleos de ferrite distintos, três com o invólucro de plástico aberto

(b) Duas metades de uma amostra de ferrite fora do invólucro de plástico

Fonte: O autor (2019)

Tabela 1 – Código identificador e dimensões para as amostras utilizadas

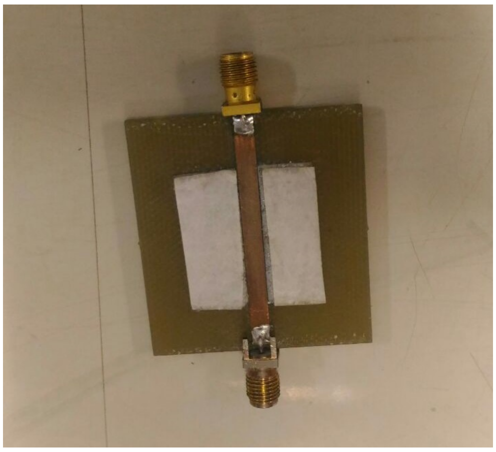
Código identficador	$\boldsymbol{t}$ (cm)	$\boldsymbol{r_e}$ (cm)	$\boldsymbol{r_i}$ (cm)
742 727 33	2.280	0.800	0.440
742 727 22	2.810	1.255	0.645
742 711 42	1.990	0.495	0.265
742 711 11	2.865	0.760	0.320
742 711 12	2.840	0.750	0.330
742 711 31	2,800	0.805	0.445
742 711 32	2.805	0.805	0.440
742 712 21	2.780	1.255	0.650
742 712 22	2.810	1.255	0.635
742 717 33	2.810	0.805	0.440
742 717 22	2.805	1.255	0.645
742 716 33	2.830	0.795	0.435
742 716 22	2.810	1.235	0.630

4.3 Coleta de dados: Parâmetros de Espalhamento

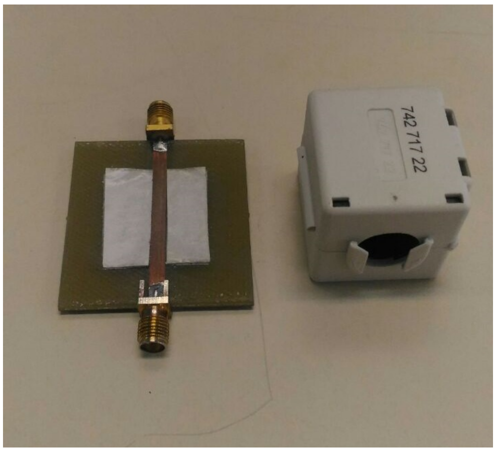
Para realização das medidas de parâmetros de espalhamento, foi utilizada como porta-amostra a LT do tipo *microstrip* mostrada na figura 18a. Essa LT foi confeccionada a partir de uma placa de circuito impresso dupla face com substrato de fenolite. A face inferior serve como plano terra, enquanto a superior foi confeccionada como uma linha retilínea, com conectores SMA nas bordas. Na figura 18a é possível também observar no trecho central da LT dois pedaços de fita dupla-face, utilizada para fixação das amostras.

Como o objetivo desse trabalho é permitir a caracterização de materiais de forma mais simples possível, optou-se por não realizar uma calibração tradicional do tipo SOLT (*Short Open Load Thru*), que demanda certo tempo já que para cada porta seria necessário

Figura 18 – *Microstrip* utilizada como porta-amostra neste trabalho



(a) Porta-amostra de *microstrip* com fita dupla-face para fixação das amostras



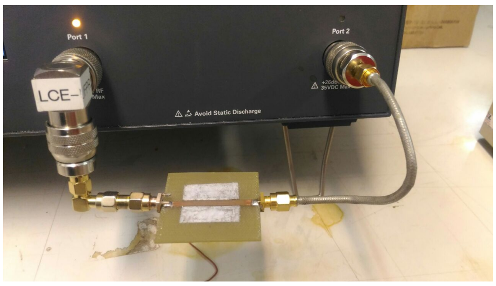
(b) Comparação de tamanho entre o porta-amostra e uma das amostras

Fonte: O autor (2019)

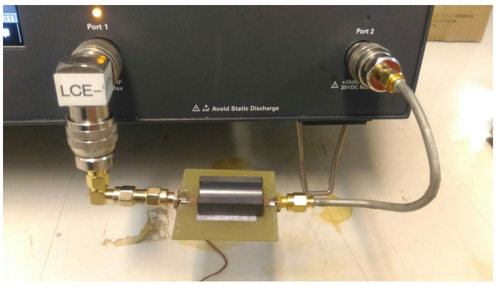
conectar uma carga do tipo circuito aberto, uma do tipo curto cirtuito e outra de 50 Ω.

Ao invés disso, propôs-se o uso apenas da calibração do tipo *Thru*, que calibra apenas a medida do parâmetro S_{21} utilizando a LT já conectada, como ilustra a figura 19a. Nessa configuração, isso equivale a desconsiderar a influência da LT, já que após a calibração o equipamento mede um S_{21} unitário e real na ausência de amostras, o que equivale ao comportamento de um curto circuito entre as portas. Dessa forma, na presença de um material magnético sobre a LT, como mostra a figura 19b, o VNA mede apenas a influência do mesmo sobre o S_{21}, como se apenas o material estivesse entre as portas 1 e 2. Isso permite associar, em teoria, os dados medidos apenas ao material e elimina a necessidade de se confeccionar uma LT de dimensões rigidamente calculadas, posto que sua influência é eliminada na etapa de calibração.

Figura 19 – *Microstrip* conectada ao VNA para etapas de calibração e medição



(a) Porta-amostra conectado ao VNA para etapa de calibração (sem a presença de material)



(b) Porta-amostra conectado ao VNA para etapa de medição (com a presença de material)

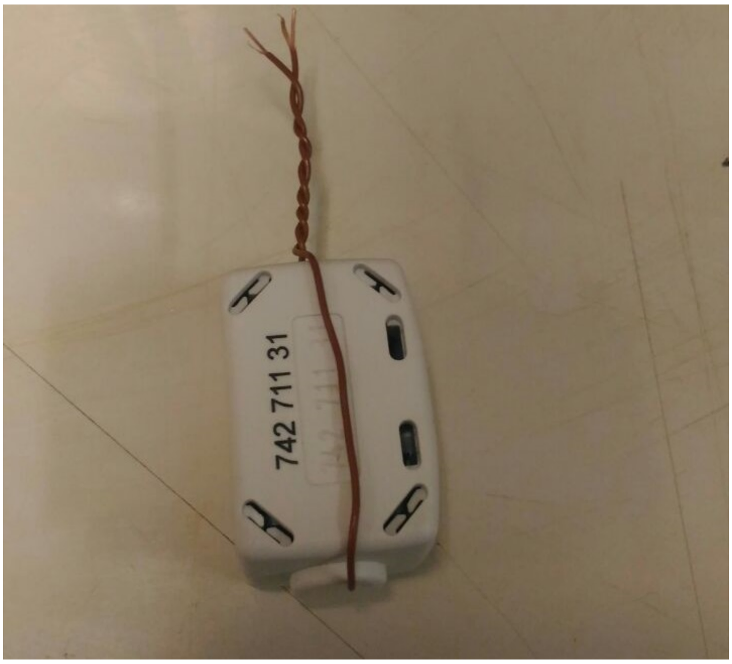
Fonte: O autor (2019)

4.4 Coleta de dados: Permeabilidade Complexa

Como a proposta desse trabalho é utilizar um modelo caixa preta para obter a permeabilidade complexa de materiais, é de fundamental importância a obtenção de dados de permeabilidade em função da frequência para os materiais utilizados como testes, porque eles alimentarão o algoritmo de estimação de parâmetros juntamente com as respectivas medidas de parâmetro S.

Contudo, dados de permeabilidade não são encontrados facilmente com fabricantes, de modo que foi necessário buscar uma forma alternativa de obtê-los. O método proposto foi o uso da impedância dos núcleos toroidais atuando como indutores de uma única espira. Para tanto, foi enrolada uma espira de fio de cobre em cada amostra, como mostra a figura 20, e em seguida foi medida sua impedância.

Figura 20 – Núcleo de ferrite com uma espira de cobre



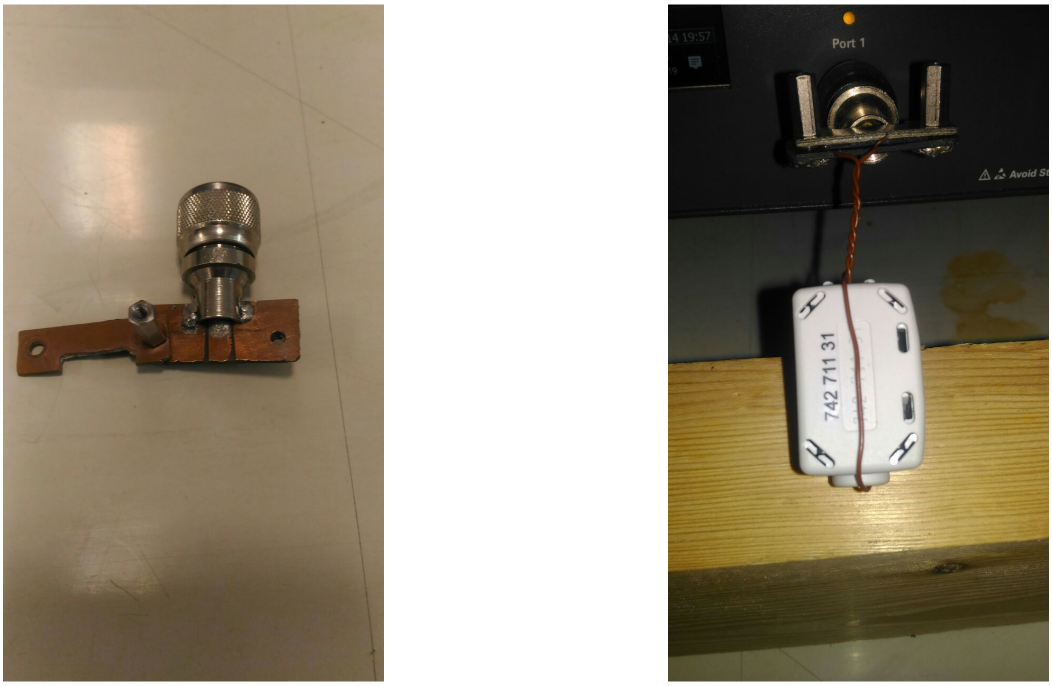
Fonte: O autor (2019)

É possível obter dados de impedância a partir dos parâmetros de espalhamento de uma única porta (LUDWIG; BRETCHKO, 2000) segundo a equação (4.1)

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \tag{4.1}$$

onde Z_{in} é a impedância conectada na porta 1 e Z_0 é a impedância de saída da porta 1 do equipamento de medida. Para obtenção desses dados foi utilizado o conector de encaixe para os terminais das espiras mostrado na figura 21a. O condutor central desse conector é o único não aterrado, de modo que para realizar as medições um dos terminais da bobina foi conectado nele, enquanto o outro foi conectado em uma das laterais, ambas aterradas. A figura 21b mostra o arranjo completo para a realização dessas medições, com a espira ao redor do núcleo de ferrite conectada ao VNA pelo conector de encaixa.

Figura 21 – Aquisição de dados de impedância dos núcleos de ferrite



(a) Conector de encaixe para os terminais da espira do núcleo toroidal

(b) Arranjo final com a espira conectada ao VNA pelo conector de encaixe

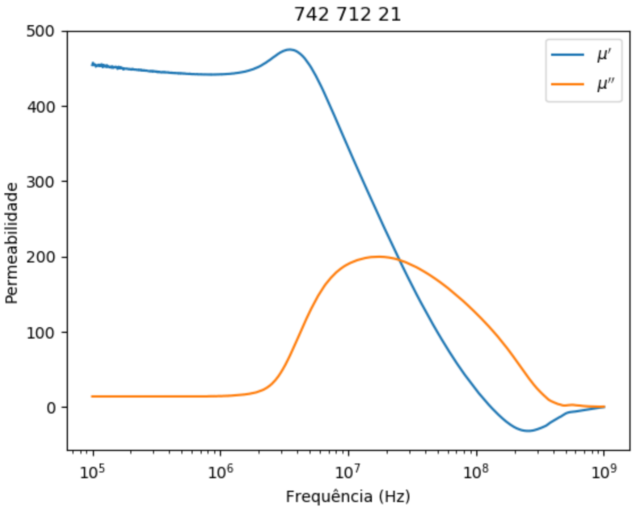
Fonte: O autor (2019)

A partir de manipulações matemáticas, é possível obter diretamente os valores de permeabilidade complexa em função da frequência a partir das medidas de impedância. A dedução das fórmulas, bem como a expressão final que relaciona a permeabilidade complexa com a impedância medida, podem ser conferidas no Apêndice A.

Essa estratégia não é muito precisa, pois desconsidera elementos parasitas que, dependendo da faixa de frequência das medidas, podem não ser desprezíveis. Ainda assim, uma vez que não se dispõe de outros dados para avaliar a precisão desse método, as medidas obtidas por ele não serão usadas para fim de precisão, mas sim para permitir a aplicação da abordagem caixa preta.

A figura 22 mostra um exemplo de dados extraídos para a amostra 742 12 21: em amarelo está indicada a parte imaginária da permeabilidade e em azul, a parte real. Uma vez que não é possível avaliar os dados de modo quantitativo, ao menos qualitativamente é possível compará-lo ao gráfico da figura 22 e afirmar que o comportamento tanto da parte real quanto da parte imaginária são coerentes com o exemplo da literatura.

Figura 22 – Dados de permeabilidade obtidos para a amostra 742 12 21



Fonte: O autor (2019)

4.5 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foram apresentados o equipamento de medida bem como as amostras de materiais que serão utilizadas como base para estimação dos modelos. Foram apresentados também o sistema utilizado para realizar aquisição de dados de parâmetro S e o sistema utilizado para obtenção de dados de permeabilidade complexa.

5 Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados, bem como as principais decisões tomadas ao longo do trabalho.

5.1 Configurações gerais

As medidas tanto de entrada quanto de saída foram obtidas nas seguintes condições:

- Faixa de frequência: 100 kHz a 1 GHz
- Escala: Logarítmica
- Número de pontos: 1001

Ao longo do desenvolvimento do projeto também foi definido o conjunto de parâmetros da DE que apresentavam resultados mais satisfatórios em termos de rapidez de convergência e valor final da função custo. Os valores escolhidos para os parâmetros foram:

- $F = 10$
- $C_r = 0{,}5$
- Número de indivíduos por população: 10 vezes o número de parâmetros por indivíduo, ou seja, se determinada população possuir indivíduos com 10 parâmetros cada um, a população terá 100 indivíduos no total

A função custo utilizada foi a raiz do erro médio quadrático, do inglês *Root Mean Square Error* (RMSE), cuja fórmula consta na equação (5.1)

$$RMSE = \sum^{N} \sqrt{\frac{(x_{real} - x_{calc})^2}{N}} \tag{5.1}$$

onde x_{real} é o valor real, x_{calc} é o valor calculado pelo modelo e N é o número de pontos ou amostras.

Por fim, para poder gerar os indivíduos da população com parâmetros numa faixa de valores conhecida, foi realizada uma normalização. Tomou-se o maior valor presente nos dados de permeabilidade (já que os parâmetros de espalhamento assumem apenas valores entre 1 e -1 para circuitos passivos, como é o caso, enquanto a permeabilidade pode assumir valores de algumas centenas para algumas frequências) e dividiu-se tanto os dados de parâmetro S quanto os de permeabilidade por esse valor, de modo que todas as medições passassem a apresentar apenas valores entre 1 e -1. Em termos algébricos, considerando γ como o maior valor de permeabilidade, o que foi feito foi dividir ambos os lados da equação (3.1) por γ, resultando na equação (5.2).

$$\frac{Y(s)}{\gamma} = H(s)\frac{X(s)}{\gamma} \tag{5.2}$$

Isso é útil quando não se tem um bom palpite inicial sobre a faixa de valores dentro da qual os parâmetros dos indivíduos serão gerados. Ao realizar a normalização, é possível gerar indivíduos com parâmetros dentro do intervalo de 0 a 1, pois assim se garante que os valores sorteados inicialmente produzirão dados de saída relativamente próximos dos dados reais.

5.2 Dados de entrada e função de transferência

Dispunha-se, inicialmente, de medidas do parâmetro S_{21} e da permeabilidade complexa. Como ambas as grandezas possuem parte real e parte imaginária, havia, portanto, dois conjuntos de dados de entrada e de dois conjunto de dados de saída. E já que em modelos caixa preta os coeficientes não possuem necessariamente uma representação física, é possível trabalhar separadamente com a parte real e com a parte imaginária de cada grandeza como se fossem dados independentes.

Com isso, sabe-se também que cada conjunto de dados de entrada (parte real e parte imaginária de S_{21}) era composto apenas por números reais, assim como cada conjunto de dados de saída (partes real e imaginária da permeabilidade). Contudo, o modelo matemático escolhido como estrutura do modelo caixa preta, a FT polinomial, confere à saída um caráter complexo. Em outras palavras, retomando a equação (3.1)

$$Y(s) = H(s)X(s)$$

é possível afirmar que, por mais que os dados de entrada $X(s)$ sejam sempre reais, a FT $H(s)$ não o será, o que implica que a saída $Y(s)$ também não será real, mas sim complexa. Portanto, para poder comparar os dados de saída da FT com os dados de saída efetivamente medidos, é necessário tomar apenas uma parcela da saída da FT: ou apenas a parte real (equação 5.3), ou apenas a parte imaginária (equação 5.4), ou apenas o módulo (equação 5.3).

$$Y(s) = \mathrm{Re}\{H(s)X(s)\} \tag{5.3}$$

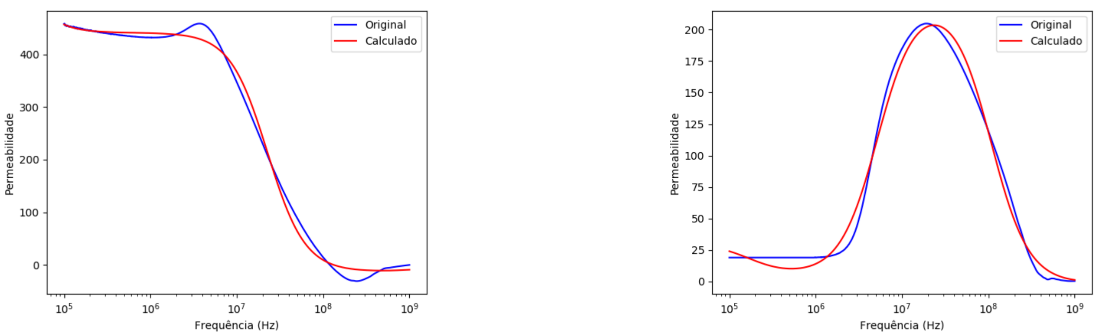
$$Y(s) = \mathrm{Im}\{H(s)X(s)\} \tag{5.4}$$

$$Y(s) = |H(s)X(s)| \tag{5.5}$$

Com três possibilidades para a FT, dois dados possíveis de entrada e dois dados possíveis de saída, havia um grande número de combinações. Portanto, decidiu-se fazer um teste utilizando uma FT de terceira ordem e tomando apenas a parte real na saída para a amostra 742 12 22. A intenção era avaliar se haveria alguma diferença entre a utilização da parte real ou da parte imaginária de S_{21} como entrada.

As figuras 23a e 23b mostram os resultados considerando apenas a parte real de S_{21} como entrada e as partes real e imaginária da permeabilidade como saída, respectivamente, enquanto as figuras 24a e 24b mostram os resultados considerando apenas a parte imaginária de S_{21} com entrada e as partes real e imaginária da permeabilidade como saída, respectivamente. Em todas as quatro figuras a curva azul representa os dados reais e curva vermelha, os dados obtidos pelo modelo.

Figura 23 – Modelo de terceira ordem avaliando apenas a parte real da FT para a amostra 742 12 22 considerando apenas a parte real de S_{21} como entrada



(a) Resultado para a parte real da permeabilidade

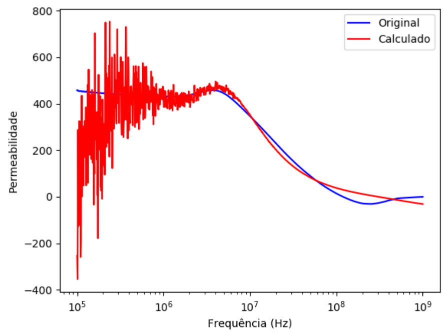
(b) Resultado para a parte imaginária da permeabilidade

Fonte: O autor (2019)

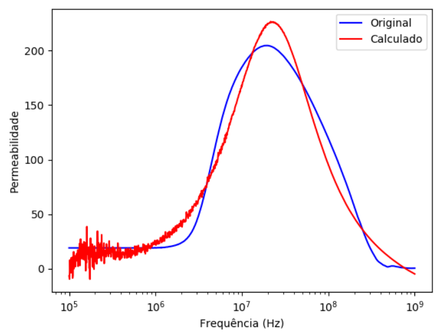
Observa-se que os resultados que utilizaram a parte imaginária de S_{21} como entrada apresentaram trechos bastante ruidosos, especialmente para frequências menores, ao passo que os resultados da parte real de S_{21} permaneceram próximos da curva real de saída sem a presença de ruído.

Isso se deve à natureza dos próprios dados de entrada. A figura 25 mostra as partes real e imaginária de S_{21} para a mesma amostra de ferrite. O que se observa é que a parte imaginária é muito próxima de zero para frequências baixas, enquanto a parte

Figura 24 – Modelo de terceira ordem avaliando apenas a parte real da FT para a amostra 742 12 22 considerando apenas a parte imaginária de S_{21} como entrada



(a) Resultado para a parte real da permeabilidade

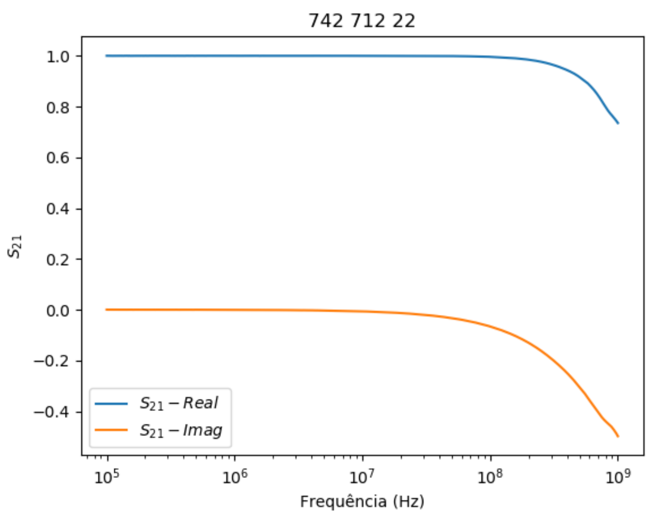


(b) Resultado para a parte imaginária da permeabilidade

Fonte: O autor (2019)

real é muito próxima de 1. Como a estrutura de modelo utilizada nesse trabalho é a FT polinomial, a saída depende de um produto direto entre o modelo e a entrada. Quando a entrada é praticamente nula, o modelo não consegue assumir valores que compensem isso de forma precisa, daí a presença do ruído. Ainda que a representação da parte imaginária da permeabilidade tenha ficado razoável, optou-se por utilizar no restante do trabalho apenas a parte real de S_{21} como dado de entrada dos modelos.

Figura 25 – Medidas de parâmetro S_{21} para a amostra 742 12 22



Fonte: O autor (2019)

5.3 Modelos individuais

Utilizando, portanto, apenas a parte real de S_{21} como dado de entrada, foram encontrados modelos de FT de diferentes ordens para obter tanto μ' quanto μ'' para cada amostra de forma individual. Utilizando a amostra 742 12 22 como exemplo, as figuras de 26a até a 26h mostram resultados de modelos de ordem 1 a 8 para μ'' utilizando a parte real da saída do modelo obtido pela FT: em azul estão as curvas obtidas pelos modelos e em amarelo, a curva dos dados reais. Vale comentar que o eixo das ordenadas de todos os gráficos apresenta valores normalizados para μ''.

É possível observar que, para modelos de ordem acima de 4 há pouca alteração dos resultados, de modo que o incremento da ordem, e o consequente aumento do custo computacional para estimação de mais parâmetros, não gera melhorias significativas via inspeção visual.

Tabela 2 – Estatísticas dos modelos para μ'' da amostra 742 12 22 considerando apenas a parte real da saída da FT

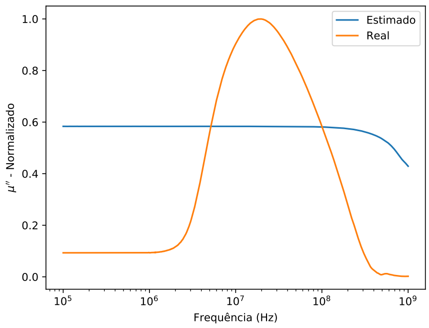
Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
1	2.73525e-1	2.73525e-1	2.73525e-1	5.08416e-13
2	2.73525e-1	5.14835e-2	3.97971e-2	5.09398e-2
3	3.97976e-2	3.75703e-2	3.32436e-2	1.78706e-3
4	8.11153e-2	3.28559e-2	1.85616e-2	9.77228e-3
5	4.52303e-2	2.95669e-2	1.94276e-2	6.45794e-3
6	1.28124e-1	2.97443e-2	1.76325e-2	1.69223e-2
7	3.66094e-2	2.45331e-2	1.94457e-2	4.93388e-3
8	3.98171e-2	2.48668e-2	1.70177e-2	6.91325e-3

Fonte: O autor (2019)

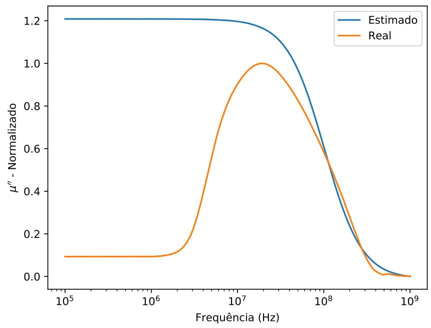
Para mensurar quantitativamente a influência da ordem do modelo sobre os resultados, os parâmetros foram estimados 40 vezes desde os modelos de ordem 1 até os de ordem 8. A tabela 2 mostra as estatísticas desse conjunto de resultados, incluindo o maior, o menor, o valor médio e o desvio padrão (σ) do RMSE para cada ordem.

Os resultados da tabela 2 confirmam o que foi observado nos gráficos individuais sobre não haver alterações significativas entre resultados de modelos de ordem maior. Um detalhe interessante é o fato de que, apesar de o modelo de menor RMSE ter sido de ordem 8, o modelo que apresentou menor RMSE médio não foi o de maior ordem, mas sim o de ordem 7. O modelo que apresentou o segundo menor RMSE médio foi o de ordem 4, o que indica que provavelmente aumentar a ordem do modelo não seja a abordagem mais indicada para melhorar sua precisão.

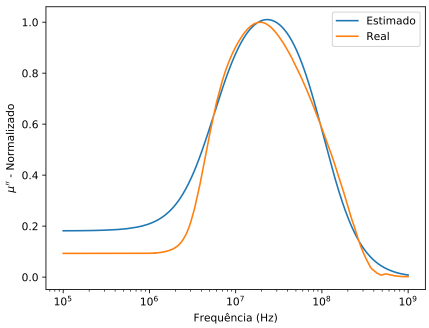
Figura 26 – Modelos de diferentes ordens para μ'' da amostra 742 12 22 tomando a parte real da saída do modelo da FT e utilizando a parte real de S_{21} como entrada



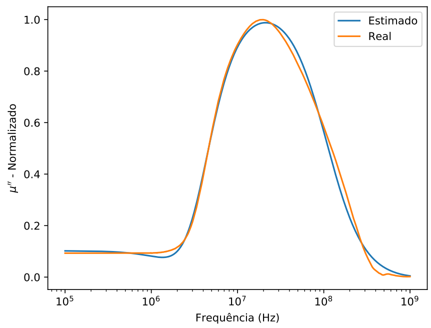
(a) Modelo de ordem 1



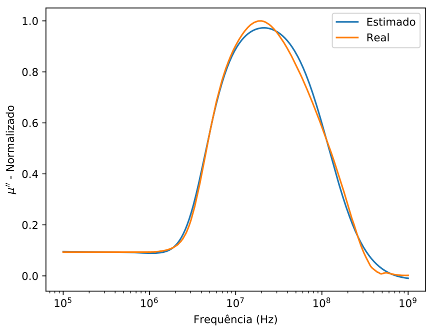
(b) Modelo de ordem 2



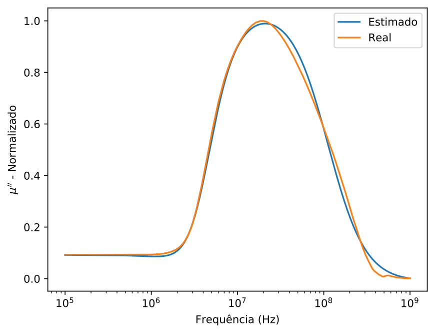
(c) Modelo de ordem 3



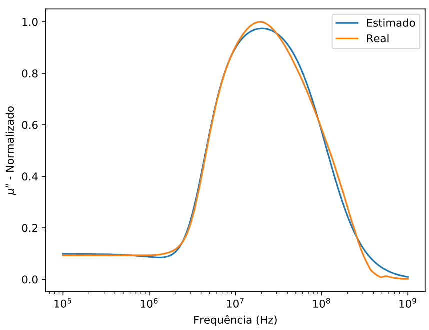
(d) Modelo de ordem 4



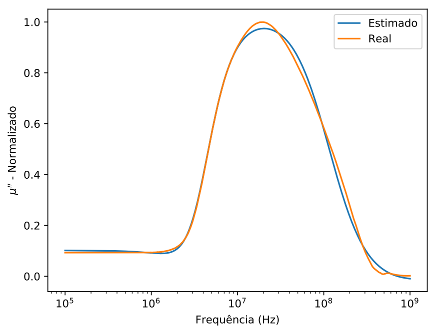
(e) Modelo de ordem 5



(f) Modelo de ordem 6



(g) Modelo de ordem 7



(h) Modelo de ordem 8

Fonte: O autor (2019)

Para permitir uma comparação direta com o caso anterior foram plotados os resultados para a mesma amostra e para os mesmos dados de entrada e saída, com a diferença de considerar agora o módulo da saída da FT, e não a parte real. As figuras de 27a a 27h mostram os resultados dos melhores modelos encontrados desde ordem 1 até ordem 8, enquanto a tabela 3 mostra as estatísticas para cada ordem.

Pelas figuras é possível observar novamente há pouca ou nenhuma alteração perceptível nos resultados obtidos entre os modelos de ordem acima de 5. Vale constatar também que esses modelos não conseguiram representar tão bem o comportamento de μ'' no final da faixa de frequências, região em que μ'' assume valores muito próximos de zero. Essa é uma observação relevante, posto que algumas amostras apresentam valores negativos de permeabilidade tanto na parte real quanto na parte imaginária. Como o módulo de um número complexo não pode assumir valores negativos por definição, isso leva à conclusão de que provavelmente será mais interessante considerar ou a parte real ou a parte imaginária da saída da FT(já que ambas podem assumir valores negativos).

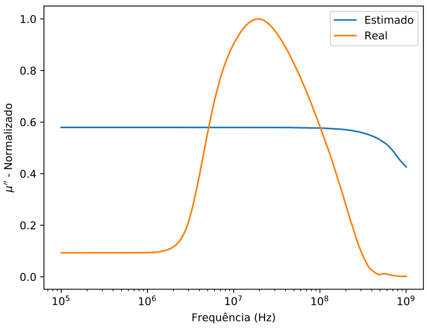
Quanto à análise estatística, é possível observar que os modelos desta abordagem apresentam erros maiores do que os que consideraram a parte real da FT. Isso é reflexo direto do que foi comentado no parágrafo anterior sobre os comportamentos distintos da parte real, ou imaginária, e do módulo de um número complexo. Vale ressaltar que para essa amostra novamente o modelo que apresentou menor RMSE médio foi o modelo de ordem 7, seguido pelo modelo de ordem 4.

Tabela 3 – Estatísticas dos modelos para μ'' da amostra 742 12 22 considerando apenas o módulo da saída da FT

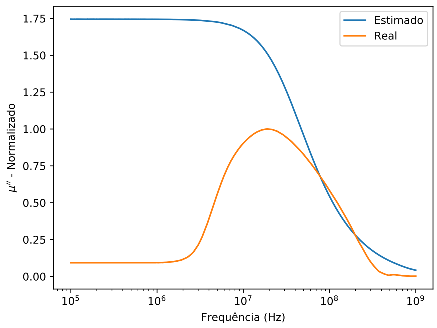
Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
1	2.75561e-1	2.75561e-1	2.75561e-1	3.11547e-12
2	6.06085e-2	6.06085e-2	6.06085e-2	1.19800e-10
3	4.16960e-2	3.94274e-2	3.88613e-2	6.66758e-4
4	4.26402e-2	3.89248e-2	3.87788e-2	5.95545e-4
5	4.23360e-2	3.92302e-2	3.87697e-2	1.10724e-3
6	4.22264e-2	3.90469e-2	3.87762e-2	8.79726e-4
7	4.07341e-2	3.88440e-2	3.87710e-2	3.03062e-4
8	4.20767e-2	3.91027e-2	3.87682e-2	9.29266e-4

Fonte: O autor (2019)

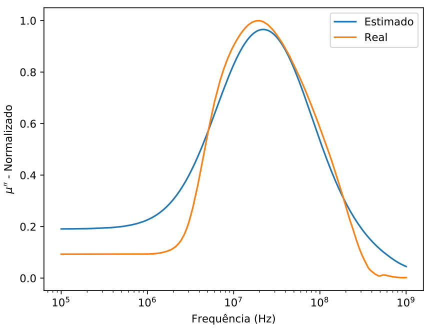
Figura 27 – Modelos de diferentes ordens para μ'' da amostra 742 12 22 tomando o módulo da saída do modelo da FT e utilizando a parte real de S_{21} como entrada



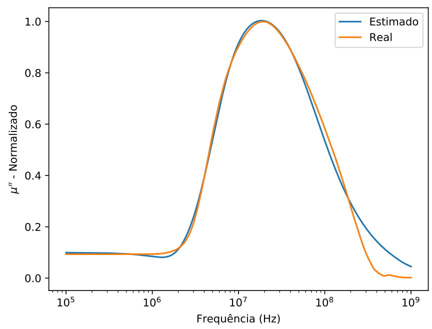
(a) Modelo de ordem 1



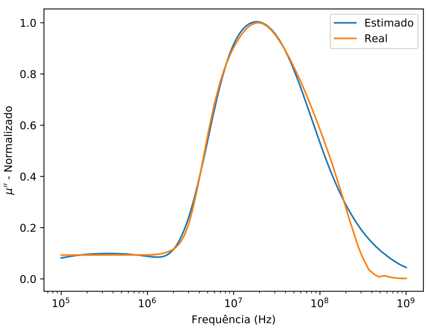
(b) Modelo de ordem 2



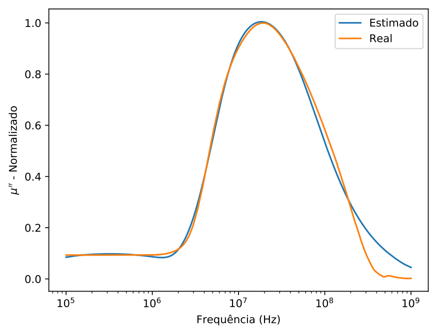
(c) Modelo de ordem 3



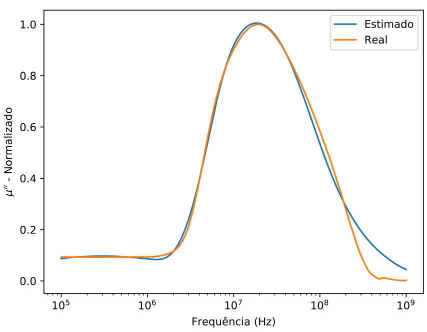
(d) Modelo de ordem 4



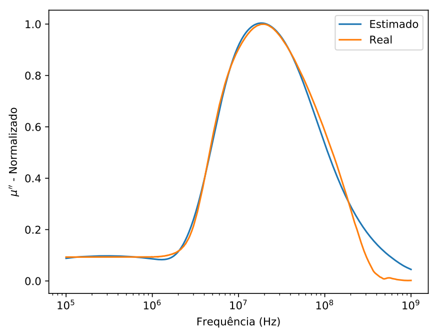
(e) Modelo de ordem 5



(f) Modelo de ordem 6



(g) Modelo de ordem 7



(h) Modelo de ordem 8

Fonte: O autor (2019)

Por fim, para completar a comparação entre os modelos possíveis, foram plotados os resultados para a mesma amostra e para os mesmos dados de entrada e saída, mas utilizando agora a parte imaginária da saída da FT. As figuras de 28a a 28h mostram os resultados para os modelos de ordem 1 a 8, enquanto a 4 apresenta as respectivas estatísticas.

Nota-se que dentre as três abordagens, esta foi a que apresentou os piores resultados. Pelas figuras é possível perceber que os modelos não foram capazes de representar de modo razoável o comportamento de μ''. Percebe-se também que há certa diferença perceptível entre os modelos de ordem acima de 5, o que não ocorreu nas outras duas abordagens. Além disso, uma análise da tabela 4 permite observar que o modelo que apresentou menor RMSE médio foi o de maior ordem, diferente do que foi apresentado nas abordagens anteriores.

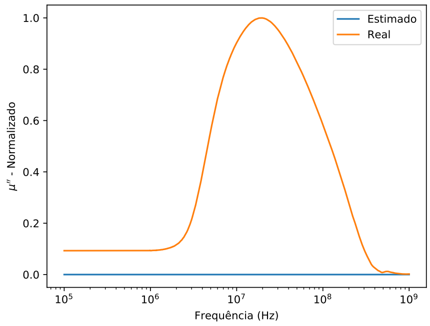
Isso pode indicar que para utilizar a parte imaginária da FT como modelo pode ser necessário utilizar modelos de ordem mais alta. Contudo, como é sempre mais desejável utilizar modelos mais simples que sejam suficientemente precisos, passa a ser mais interessante utilizar, pelo menos para essa amostra, a parte real da FT para estimar um modelo para μ''.

Tabela 4 – Estatísticas dos modelos para μ'' da amostra 742 12 22 considerando apenas a parte imaginária da saída da FT

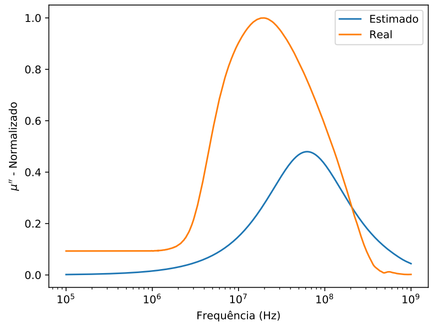
Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
1	7.41314e-1	7.41314e-1	7.41314e-1	2.31495e-15
2	6.88755e-2	6.86740e-2	6.28294e-2	1.08530e-3
3	6.88427e-2	6.86674e-2	6.50425e-2	6.90942e-4
4	6.88390e-2	6.83739e-2	6.55215e-2	8.26857e-4
5	6.88390e-2	6.81080e-2	5.77969e-2	2.02930e-3
6	6.88389e-2	6.80635e-2	5.77975e-2	2.03935e-3
7	6.88385e-2	6.83843e-2	6.19836e-2	1.29003e-3
8	6.88384e-2	6.73510e-2	5.50864e-2	3.06204e-3

Fonte: O autor (2019)

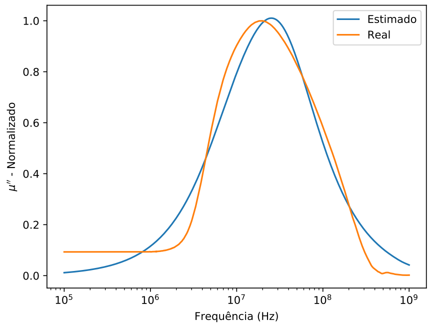
Figura 28 – Modelos de diferentes ordens para μ'' da amostra 742 12 22 tomando a parte imaginária da saída do modelo da FT e utilizando a parte real de S_{21} como entrada



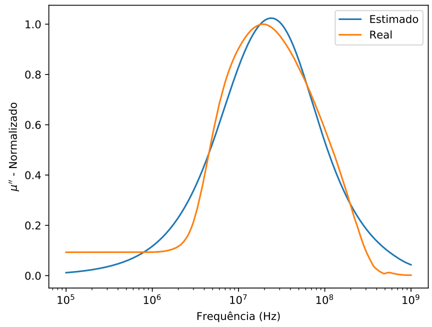
(a) Modelo de ordem 1



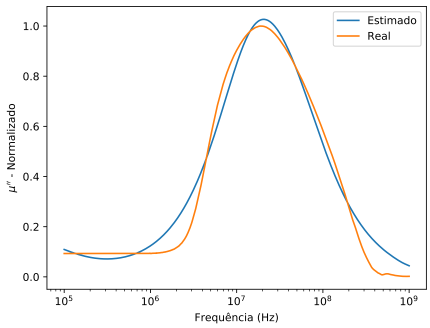
(b) Modelo de ordem 2



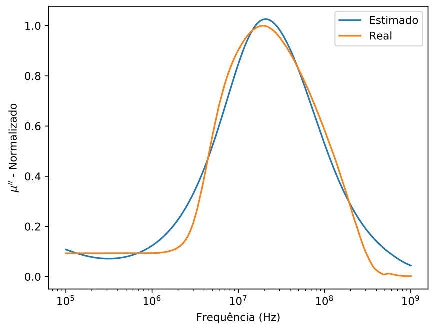
(c) Modelo de ordem 3



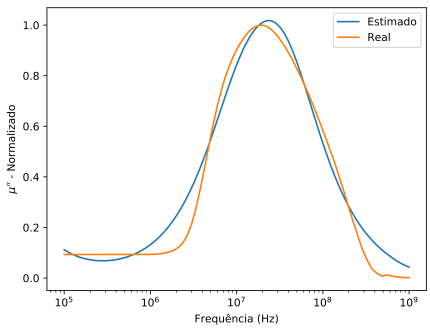
(d) Modelo de ordem 4



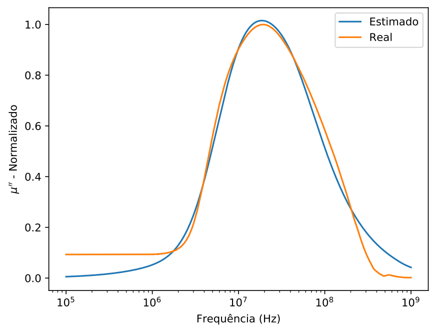
(e) Modelo de ordem 5



(f) Modelo de ordem 6



(g) Modelo de ordem 7



(h) Modelo de ordem 8

Fonte: O autor (2019)

Para analisar os resultados obtidos para os modelos de μ' serão utilizados como exemplo os dados da amostra 742 27 33. Os resultados serão apresentados na mesma ordem que os anteriores, ou seja, primeiramente foram plotados os resultados para os modelos que consideraram apenas a parte real da saída da FT. As figuras de 29a a 29h mostram os resultados para os melhores modelos de ordem 1 a 8, enquanto a tabela 5 apresenta as estatísticas correspondentes.

É possível observar nessas figuras que os modelos conseguem representar o comportamento de μ' com razoável precisão, inclusive para valores negativos. Isso se deve justamente ao que foi discutido anteriormente sobre a capacidade da parte real de um número complexo de assumir valores negativo. Quando se analisa as estatísticas da tabela 5 constata-se que, assim como ocorreu para o modelo equivalente para μ'', o modelo que apresentou menor RMSE médio não foi o de maior ordem, mas dessa vez foi o de ordem 6.

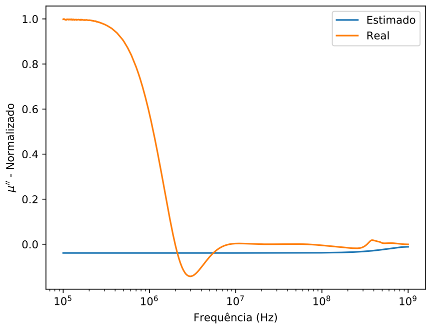
Algo que não foi comentado anteriormente foi os resultados dos modelos de ordem baixa, especialmente o de ordem 1. O algoritmo de estimação de parâmetros não conseguiu, de modo geral, encontrar parâmetros que fizessem o modelo se aproximar dos dados reais, posto que nesse caso o modelo é simples demais. E como os parâmetros não são numerosos, a diversidade de candidatos a modelo pe bastante limitada, o que resulta num conjunto de candidatos bastante similares e com RMSE superior aos dos modelos de orde maior. Esse é o motivo para o desvio padrão ser bastante pequeno e, consequentemente, para os valores máximo, médio e mínimo de RMSE para os modelos de ordem 1 serem praticamente idênticos.

Tabela 5 – Estatísticas dos modelos para μ' da amostra 742 27 33 considerando apenas a parte real da saída da FT

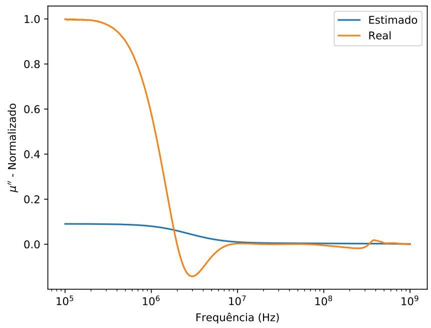
Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
1	7.14845e-2	7.14845e-2	7.14845e-2	1.38778e-17
2	5.50938e-2	2.83455e-2	1.24941e-2	1.48656e-2
3	2.49502e-2	1.36735e-2	1.24113e-2	3.75890e-3
4	2.54573e-2	1.37233e-2	1.24088e-2	3.91135e-3
5	2.45530e-2	1.48006e-2	1.24106e-2	4.76676e-3
6	1.24255e-2	1.24144e-2	1.24046e-2	7.73144e-6
7	2.51853e-2	1.36889e-2	1.24016e-2	3.83213e-3
8	2.38715e-2	1.31764e-2	1.24025e-2	2.84725e-3

Fonte: O autor (2019)

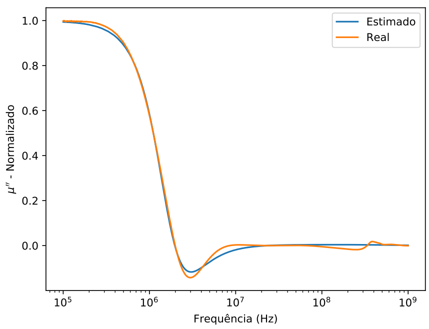
Figura 29 – Modelos de diferentes ordens para μ' da amostra 742 27 33 tomando a parte real da saída do modelo da FT e utilizando a parte real de S_{21} como entrada



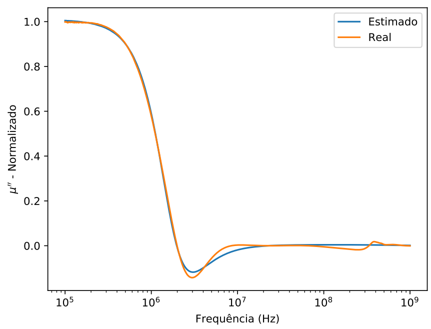
(a) Modelo de ordem 1



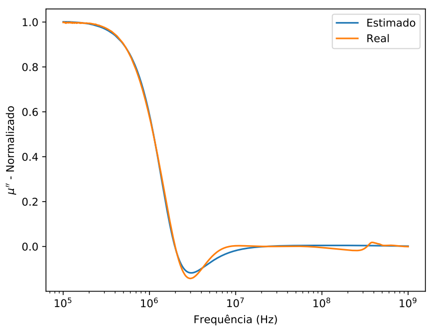
(b) Modelo de ordem 2



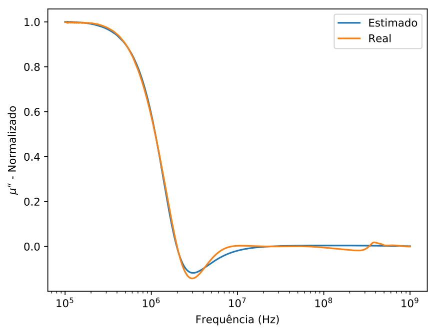
(c) Modelo de ordem 3



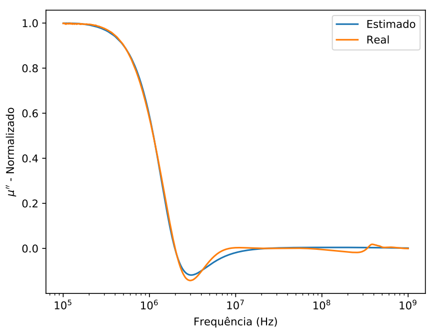
(d) Modelo de ordem 4



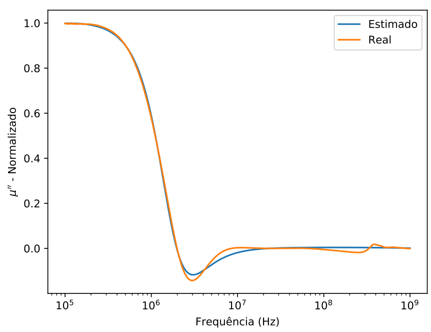
(e) Modelo de ordem 5



(f) Modelo de ordem 6



(g) Modelo de ordem 7



(h) Modelo de ordem 8

Fonte: O autor (2019)

Em seguida foram plotados os resultados para os modelos que consideraram o módulo da saída da FT. As figuras de 30a a 30h mostram os resultados para os melhores modelos de ordem 1 a 8, enquanto a tabela 6 apresenta as estatísticas correspondentes.

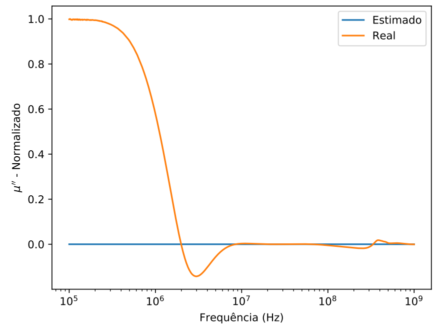
Como já era esperado, esses modelos não são capazes de representar os valores negativos de μ', de modo que não são adequados para representar essa amostra. Para amostras sem valores negativos de μ', por exemplo, o módulo da FT pode ser uma escolha mais interessante. Observando os valores na tabela 6 é possível observar que os valores de RMSE médio, e mesmo os valores mínimos de RMSE, são maiores que os observados na abordagem anterior. Ainda assim, é possível notar que o modelo que apresenta melhor RMSE médio também é o de ordem 6.

Tabela 6 – Estatísticas dos modelos para μ' da amostra 742 27 33 considerando apenas o módulo da saída da FT

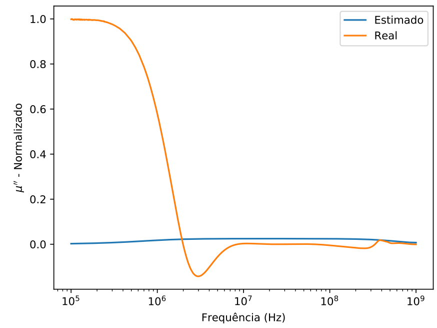
Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
1	1.10962e-1	1.10962e-1	1.10962e-1	1.65898e-14
2	5.55529e-2	5.55529e-2	5.55529e-2	3.70542e-13
3	5.48595e-2	5.48367e-2	5.48185e-2	1.07941e-05
4	5.48294e-2	5.48155e-2	5.47874e-2	1.42328e-05
5	1.05729e-1	8.01325e-2	5.46165e-2	2.42696e-02
6	5.48291e-2	5.47573e-2	5.39169e-2	1.90199e-04
7	5.48258e-2	5.47838e-2	5.46841e-2	4.27439e-05
8	5.48280e-2	5.47717e-2	5.43697e-2	1.09802e-04

Fonte: O autor (2019)

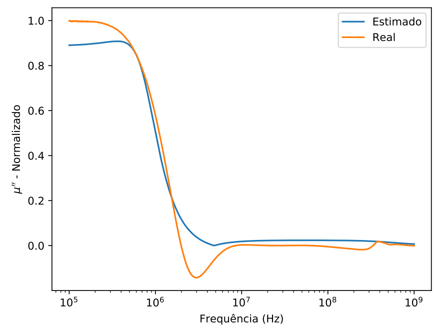
Figura 30 – Modelos de diferentes ordens para μ' da amostra 742 27 33 tomando o módulo da saída do modelo da FT e utilizando a parte real de S_{21} como entrada



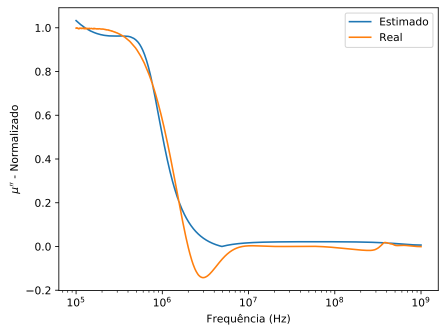
(a) Modelo de ordem 1



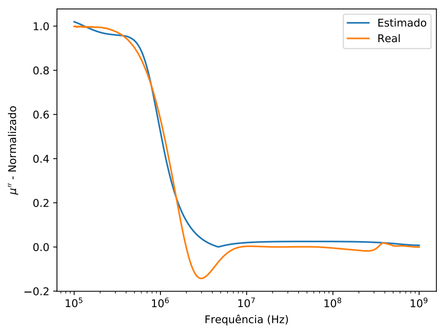
(b) Modelo de ordem 2



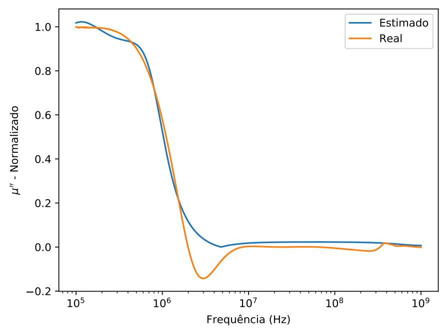
(c) Modelo de ordem 3



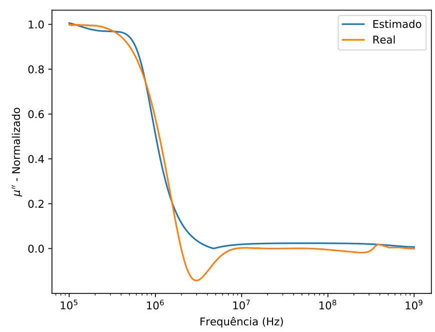
(d) Modelo de ordem 4



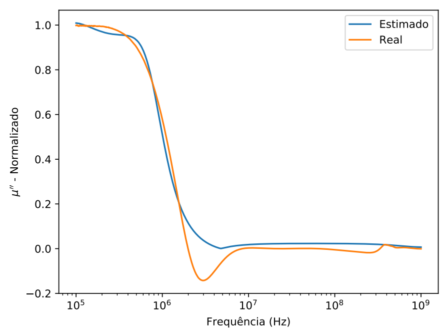
(e) Modelo de ordem 5



(f) Modelo de ordem 6



(g) Modelo de ordem 7



(h) Modelo de ordem 8

Fonte: O autor (2019)

Por fim, para finalizar a comparação entre os modelos possíveis para μ', foram plotados os resultados para a mesma amostra e para os mesmos dados de entrada e saída, mas utilizando agora a parte imaginária da saída da FT. As figuras de 31a a 31h mostram os resultados para os modelos de ordem 1 a 8, enquanto a 7 apresenta as respectivas estatísticas.

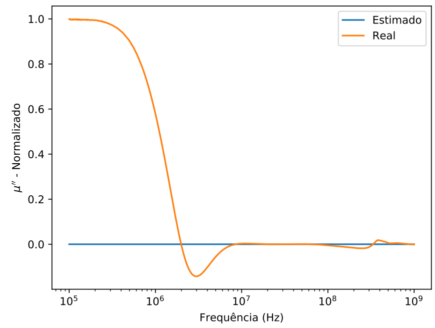
É possível observar que, apesar de essa abordagem levar em conta a parte imaginária da saída da FT, que pode assumir valores negativos, a parte negativa de μ' não foi bem representada, de modo que os resultados apresentados ficaram muito similares aos obtidos pelos modelos que consideraram o módulo da FT. Analisando as estatísticas da tabela 7, constata-se ainda que os resultados dessa abordagem são os piores dentre os três apresentados, de modo similar ao que ocorreu com os modelos de μ''. Ainda assim, novamente o modelo que apresentou o menor RMSE médio foi o de ordem 6.

Tabela 7 – Estatísticas dos modelos para μ' da amostra 742 27 33 considerando apenas a parte imaginária da saída da FT

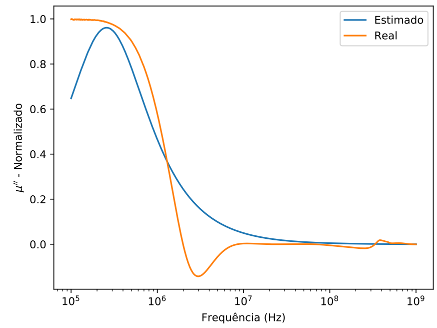
Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
1	1.06444e-1	1.06444e-1	1.06444e-1	4.64374e-16
2	1.04452e-1	1.04444e-1	1.04443e-1	3.27197e-06
3	1.04176e-1	9.79841e-2	5.74822e-2	1.40532e-2
4	1.04129e-1	9.76887e-2	7.77802e-2	8.7651e-3
5	1.04004e-1	8.65192e-2	6.17940e-2	1.61006e-2
6	1.04011e-1	8.50150e-2	6.50481e-2	1.68833e-2
7	1.04036e-1	1.01455e-1	9.23706e-2	5.3898e-3
8	1.04006e-1	9.42671e-2	7.49411e-2	9.9842e-3

Fonte: O autor (2019)

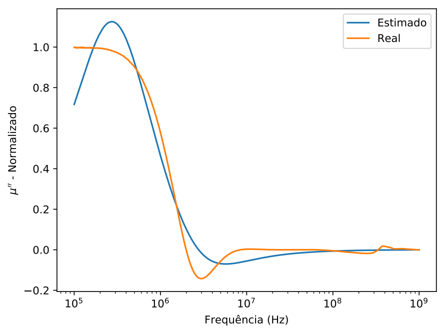
Figura 31 – Modelos de diferentes ordens para μ da amostra 742 27 33 tomando a parte real da saída do modelo da FT e utilizando a parte real de S_{21} como entrada



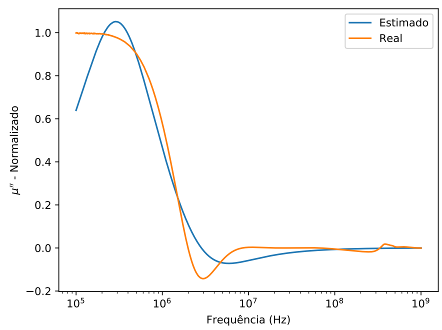
(a) Modelo de ordem 1



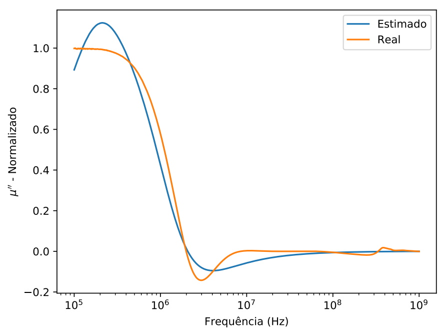
(b) Modelo de ordem 2



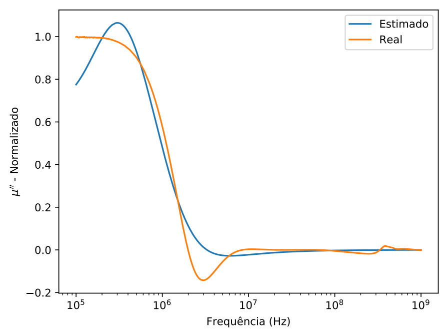
(c) Modelo de ordem 3



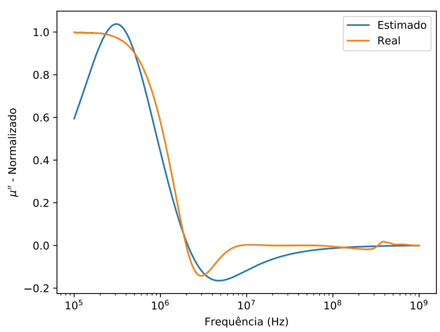
(d) Modelo de ordem 4



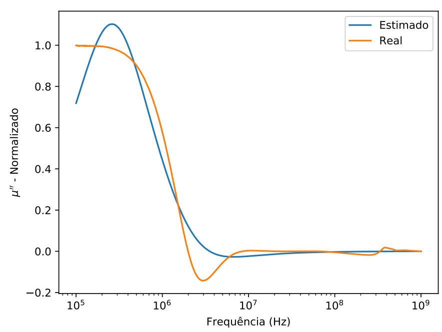
(e) Modelo de ordem 5



(f) Modelo de ordem 6



(g) Modelo de ordem 7



(h) Modelo de ordem 8

Fonte: O autor (2019)

Para concluir essa parte da análise, são apresentadas as estatísticas levando em consideração os modelos de todo o conjunto de amostras. Como é inviável apresentar gráficos para todas elas, optou-se por apresentar apenas um resumo geral em forma de tabela, de modo similar ao que foi apresentado nos exemplos das amostras individuais.

Em se tratando de modelos para μ'', as tabelas 8, 9 e 10 apresentam os resultados gerais para modelos que utilizaram a parte real, o módulo e a parte imaginária da saída da FT, respectivamente. Como os modelos de ordem 1, 2 e 3 não apresentaram resultados significativos, seus dados foram omitidos como forma de simplificar as tabelas.

Tabela 8 – Estatísticas dos modelos para μ'' para todas as amostras considerando apenas a parte real da saída da FT

Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
4	1.901312e-1	4.20631e-2	4.51682e-3	3.78836e-2
5	1.901312e-1	4.23757e-2	4.01695e-3	4.34178e-2
6	1.901312e-1	4.11659e-2	4.11565e-3	4.18414e-2
7	1.901312e-1	3.74216e-2	4.13227e-3	3.88048e-2
8	1.901312e-1	3.99454e-2	4.16546e-3	4.30168e-2

Fonte: O autor (2019)

Tabela 9 – Estatísticas dos modelos para μ'' para todas as amostras considerando apenas o módulo da saída da FT

Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
4	8.25391e-2	4.51299e-2	5.81339e-3	2.28617e-2
5	2.21483e-1	4.86252e-2	5.75245e-3	2.75142e-2
6	9.21137e-2	4.87678e-2	5.76992e-3	2.35644e-2
7	1.14849e-1	4.95352e-2	5.73752e-3	2.51809e-2
8	8.25391e-2	4.92635e-2	5.76091e-3	2.33293e-2

Fonte: O autor (2019)

Tabela 10 – Estatísticas dos modelos para μ'' para todas as amostras considerando apenas a parte imaginária da saída da FT

Ordem	**Maior RMSE**	**RMSE Médio**	**Menor RMSE**	$\boldsymbol{\sigma}$
4	6.8839e-2	6.83739e-2	6.55215e-2	8.26857e-4
5	6.8839e-2	6.8108e-2	5.77969e-2	2.0293e-3
6	6.88389e-2	6.80635e-2	5.77975e-2	2.03935e-3
7	6.88385e-2	6.83843e-2	6.19836e-2	1.29003e-3
8	6.88384e-2	6.7351e-2	5.50864e-2	3.06204e-3

Fonte: O autor (2019)

Nessa análise das amostras como um todo, é mais conservativo analisar o RMSE médio, posto que cada modelo foi estimado com base num único material. Afinal, certa ordem de um modelo que resulte num resultado muito bom para um material não necessariamente corresponderá a um bom modelo para outro material. Portanto, avaliar o RMSE médio constitui uma análise mais consistente com os resultados de modo geral.

O que se observa nos resultados para μ'' é a confirmação do que havia sido indicado nos resultados das amostras individuais. Constata-se que dentre as três abordagens a que apresenta os melhores resultados é a que utiliza a parte real da FT, enquanto os piores resultados são obtidos pela abordagem que utiliza a parte imaginária da FT.

Analisando então apenas os modelos que utilizaram a parte real da saída da FT, nota-se que o modelo que apresentou menor RMSE médio foi ainda o de ordem 7, ao passo que o modelo que presentou o menor RMSE dentre todos foi um de ordem 5.

Tabela 11 – Estatísticas dos modelos para μ' para todas as amostras considerando apenas a parte real da saída da FT

Ordem	Maior RMSE	RMSE Médio	Menor RMSE	σ
4	1.39822e-1	4.28453e-2	1.24088e-2	3.02808e-2
5	1.39822e-1	4.35761e-2	1.16986e-2	3.30623e-2
6	1.39822e-1	4.30188e-2	1.23242e-2	3.27779e-2
7	1.39822e-1	4.28300e-2	1.02853e-2	3.25907e-2
8	1.39822e-1	4.20958e-2	9.85495e-3	3.27994e-2

Fonte: O autor (2019)

Tabela 12 – Estatísticas dos modelos para μ' para todas as amostras considerando apenas o módulo da saída da FT

Ordem	Maior RMSE	RMSE Médio	Menor RMSE	σ
4	1.71446e-1	7.38787e-2	1.49477e-2	4.70894e-2
5	6.01861e-1	8.82481e-2	1.49252e-2	6.59627e-2
6	1.71446e-1	6.84388e-2	1.49232e-2	4.37758e-2
7	1.71446e-1	7.43322e-2	1.49089e-2	4.68172e-2
8	1.71446e-1	7.12766e-2	1.48857e-2	4.70966e-2

Fonte: O autor (2019)

Tabela 13 – Estatísticas dos modelos para μ' para todas as amostras considerando apenas a parte imaginária da saída da FT

Ordem	Maior RMSE	RMSE Médio	Menor RMSE	σ
4	8.254010e-2	7.17887e-2	3.31180e-3	7.514030e-3
5	1.170650e-1	6.40512e-2	5.39335e-3	2.804760e-2
6	1.175090e-1	6.21864e-2	5.37887e-3	2.930840e-2
7	1.137220e-1	6.44400e-2	5.20762e-3	2.626030e-2
8	8.253980e-2	6.28327e-2	4.97903e-3	2.412790e-2

Fonte: O autor (2019)

Já para modelos de μ', as tabelas 11, 12 e 13 apresentam os resultados gerais para modelos que utilizaram a parte real, o módulo e a parte imaginária da saída da FT, respectivamente.

Novamente a abordagem que apresenta os melhores valores médios de RMSE é a que utiliza a parte real da saída de FT, enquanto a que apresenta os piores é a que utiliza o módulo da FT. Analisando apenas o conjunto de modelos que usa a parte real da FT, o modelo que apresenta o menor RMSE médio é o de ordem 8, que é o mesmo que apresenta o menor RMSE dentre todos.

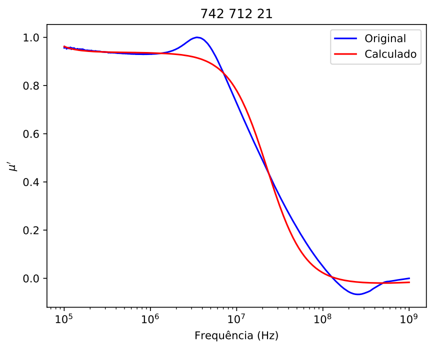
Nesse contexto, portanto, os resultados das tabelas equivalem a afirmar que, considerando modelos de FT de ordem 1 a 8, é mais provável o melhor modelo para μ'' seja um de ordem 7, enquanto que para μ' é mais provável que o melhor modelo seja de ordem 8, ambos considerando como saída apenas a parte real da saída da FT. Vale ressaltar que isso só pode ser afirmado considerando o conjunto de amostras utilizados nos testes.

5.4 Modelo Geral

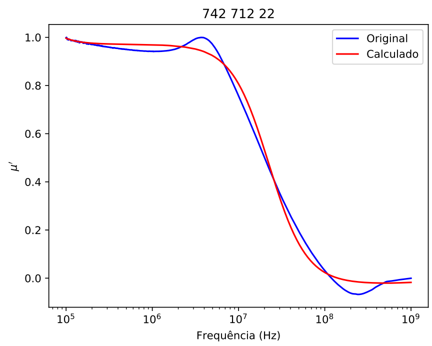
Os resultados da seção anterior correspondem a modelos estimados para apenas um material de cada vez, ou seja, os modelos foram calculados com base em um conjunto de dados de entrada e um conjunto de dados de saída. O ideal seria encontrar um modelo que fosse capaz de representar qualquer material colocado sobre o porta-amostras. Daí a necessidade de utilizar mais de um material como fonte de dados de entrada e de saída.

Primeiramente foram consideradas as amostras 742 712 21 e 742 712 22. Os passos para estimar o modelo são o mesmo, com a diferença de que agora a função custo passa o RMSE médio entre os dados esperados de saída para cada amostra e os dados obtidos pelo modelo para com os respectivos dados de entrada.

Figura 32 – Resultados do modelo de ordem 8 para estimar μ' utilizando a parte real de S_{21}, a parte real da FT e as amostras 742 12 21 e 742 12 22 como treino



(a) Resultado para a amostra 742 712 21



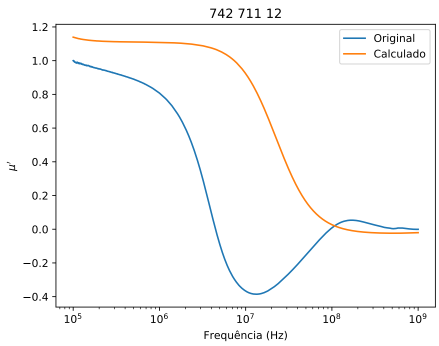
(b) Resultado para a amostra 742 712 22

Fonte: O autor (2019)

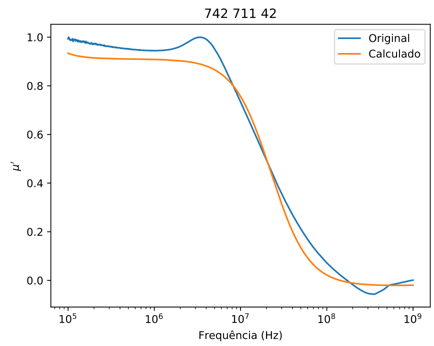
Como ponto de partida foram utilizados os resultados dos modelos individuais. Portanto, para estimar um modelo para μ' considerou-se um modelo de ordem 8, utilizando a parte real de S_{21} como entrada e tomando apenas a parte real da saída da FT. A figura 32a apresenta o resultado obtido para a mostra 742 712 21, enquanto a figura 32b mostra o da amostra 742 712 22.

É possível notar que o modelo parece razoável para ambas as amostras. Contudo, ele é tendencioso já que ambas as apresentam dados muito similares. Para testar o modelo é possível utilizar dados de outras amostras. As figuras 33a, 33b, 33c e 33d mostram os resultados para as amostras 742 711 12, 742 711 42, 742 717 22 e 742 727 33, respectivamente.

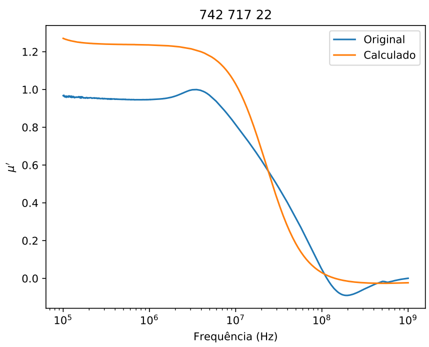
Figura 33 – Resultados dos testes do modelo de ordem 8 para estimar μ' utilizando a parte real de S_{21}, a parte real da FT e as amostras 742 12 21 e 742 12 22 como treino



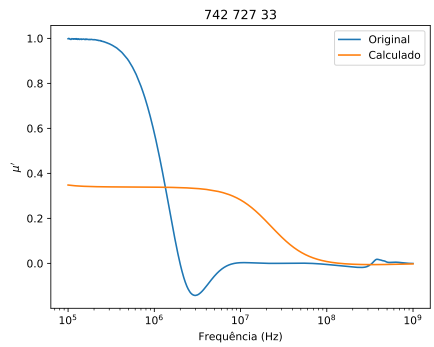
(a) Resultado para a amostra 742 711 12



(b) Resultado para a amostra 742 711 42



(c) Resultado para a amostra 742 717 22



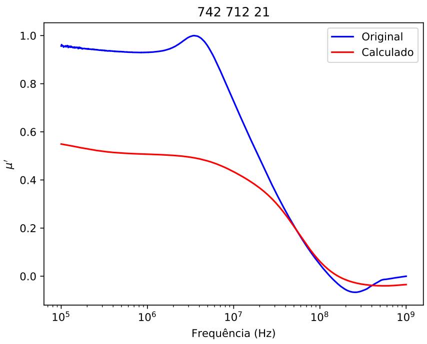
(d) Resultado para a amostra 742 727 33

Fonte: O autor (2019)

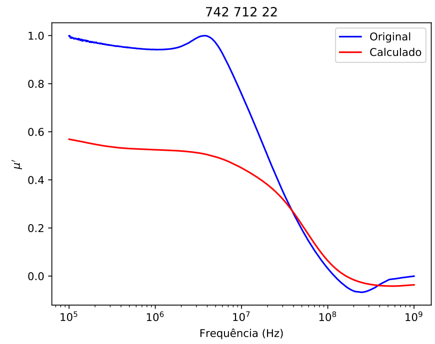
Nota-se que o modelo não mostra sinais de acompanhar os distintos dados de saída, exceto pelo gráfico da amostra 742 11 42, que é similar aos utilizados no treinamento. Isso pode ser reflexo do treinamento tendencioso, ou pode indicar que o sistema a ser modeloado é não linear, o que torna o modelo por FT polinomial incapaz de representá-lo com precisão.

Para avaliar essa possibilidade, outro modelo foi gerado utilizando os mesmos parâmetros do anterior, mas agora levando em consideração 4 amostras no treino, a saber: 742 712 21, 742 12 22, 742 727 33 e 742 711 11. As imagens dos respectivos resultados após a estimação dos parâmetros contam nas figuras de 34a a 34d.

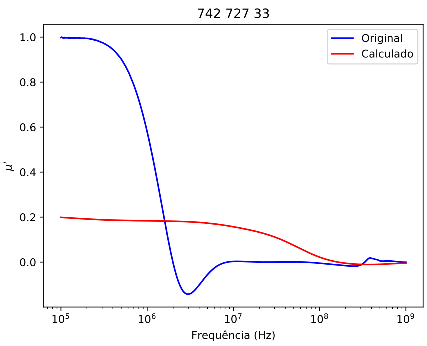
Figura 34 – Resultados dos testes do modelo de ordem 8 para estimar μ' utilizando a parte real de S_{21}, a parte real da FT e as amostras 742 712 21, 742 712 22, 742 727 33 e 742 711 11 como treino



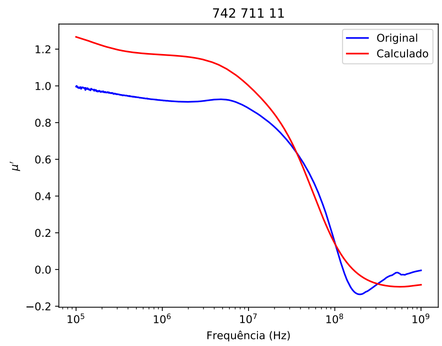
(a) Resultado para a amostra 742 712 21



(b) Resultado para a amostra 742 712 22



(c) Resultado para a amostra 742 727 33



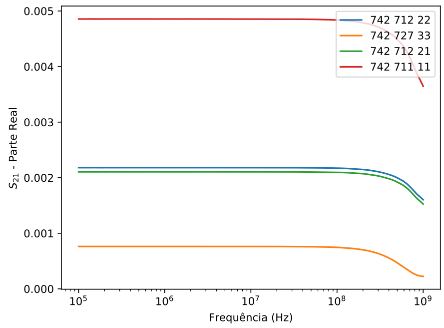
(d) Resultado para a amostra 742 711 11

Fonte: O autor (2019)

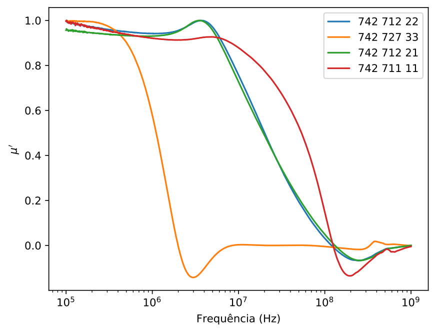
Nesse caso não é necessário realizar testes de validação para perceber que esse modelo não acompanha os dados de saída como deveria. O formato da curva obtida pelo modelo é basicamente a mesma nas quatro figuras, havendo pouca alteração para os diferentes dados de entrada. Isso pode ser explicado com uma análise dos dados de entrada e de saída. A figura 35a mostra os dados da parte real de S_{21} correspondentes às quatro amostras, enquanto a figura 35b mostra os respectivos dados de μ'.

Esses gráficos mostram fortes indícios de que o sistema a ser modelado é não linear. É possível notar que, apesar de os dados de entrada serem praticamente constantes ao longo de boa parte da faixa de frequência, os dados de saída não o são. Ao mesmo tempo, enquanto os dados de saída são bastantes distintos entre si, os dados de entrada são muito similares entre as amostras, sendo a amplidute a principal diferença entre eles.

Figura 35 – Dados de entrada e de saída das amostras 742 712 21, 742 712 22, 742 727 33 e 742 711 11



(a) Parte real de S_{21} para as quatro amostras



(b) Dados de μ' para as quatro amostras

Fonte: O autor (2019)

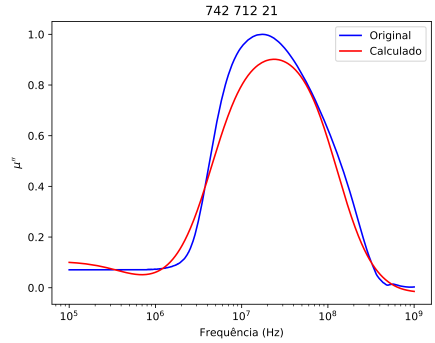
Uma análise estatística nesse caso não seria significativa, posto que seria analisado o menor erro dentre um conjunto de modelos que não representaria com qualidade o sistema em questão. Desse modo, optou-se apenas por repetir a mesma análise utilizando os dados de μ'' como saída para verificar se a situação se repete.

Repetiu-se, portanto, o procedimento para obtenção de um modelo a partir de quatro amostras, mas dessa vez considerando μ'' como saída. Foi utilizado um modelo de ordem 7 que considerava apenas a parte real da saída da FT. As amostras utilizadas na estimação de parâmetros foram as seguintes: 742 712 21, 742 712 22, 742 711 11 e 742 711 12.

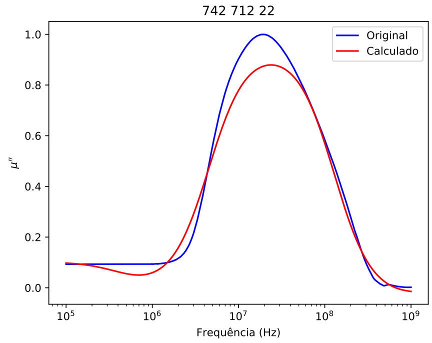
O mesmo tipo de comportamento é notado nesse caso. Apesar de os dados de saída reais serem distintos entre si, o modelo apresenta curvas de formato bastante similar, sendo praticamente indiferente ao conjunto de dados de entrada. Isso se deve novamente ao fato de os dados de entrada serem praticamente constantes ao longo de boa parte da faixa de frequências, além não haver grandes variações entre os dados de entrada para as diferentes amostras. Para garantir a confirmação visual dessas afirmações, foram plotados os conjuntos de dados de entrada (figura 37a) e de saída (figura 37b) utilizados na estimação dos parâmetros.

Portanto, conclui-se que a estrutura do modelo utilizada não é capaz de representar de forma suficiente o sistema de caracterização por *microstrip* para um conjunto de materiais. Contudo, como foram obtidos resultados razoáveis para os modelos individuais, uma abordagem interessante seria expandi-los utilizando a incorporação de algum bloco não linear. Outra possibilidade também seria realizar medidas do parâmetro S_{11} e tentar utilizá-las no modelo, já a parte real de S_{21} não apresentou variação significativa entre as amostras.

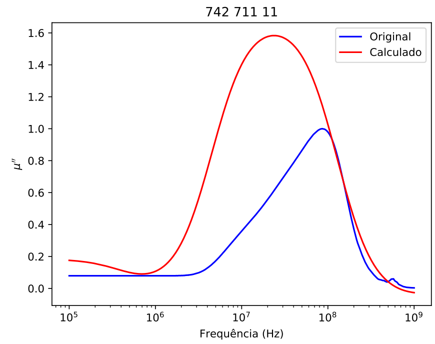
Figura 36 – Resultados dos testes do modelo de ordem 7 para estimar μ'' utilizando a parte real de S_{21}, a parte real da FT e as amostras 742 712 21, 742 712 22, 742 711 11 e 742 711 12 como treino



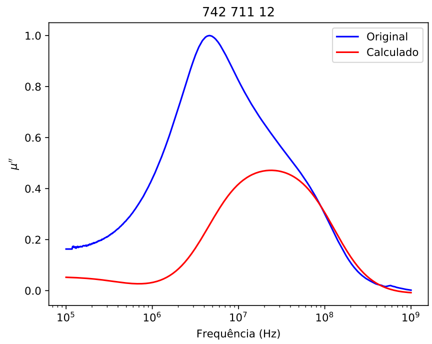
(a) Resultado para a amostra 742 712 21



(b) Resultado para a amostra 742 712 22



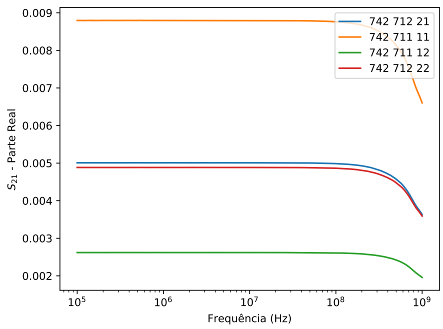
(c) Resultado para a amostra 742 711 11



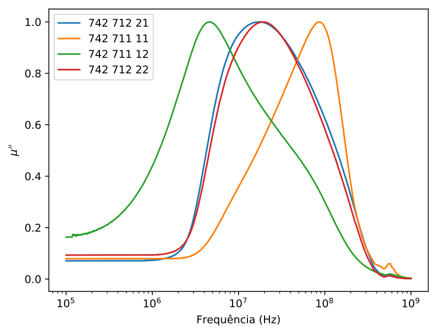
(d) Resultado para a amostra 742 711 12

Fonte: O autor (2019)

Figura 37 – Dados de entrada e de saída das amostras 742 712 21, 742 712 22, 742 711 11 e 742 711 12



(a) Parte real de S_{21} para as quatro amostras



(b) Dados de μ'' para as quatro amostras

Fonte: O autor (2019)

6 Considerações Finais

Neste capítulo serão, em especial, os principais resultados obtidos neste trabalho, bem como as principais dificuldades associadas aos resultados não satisfatórios. Por fim, algumas propostas de tema para trabalhos futuros serão indicadas como forma de dar continuidade à proposta apresentada.

6.1 Conclusões

Neste trabalho foram implementados métodos de caracterização de materiais magnéticos em função da frequência associados a técnicas de identificação de sistemas como forma de obter valores de permeabilidade relativa de materiais a partir de medidas de parâmetros de espalhamento.

Foi implementado um algoritmo genético chamado de Evolução Diferencial, que foi responsável pela estimação dos parâmetros do modelo proposto: função de transferência polinomial. A implementação do algoritmo passou por diversos ajustes subjetivos de seus parâmetros, que demandaram seu tempo para experimentação.

Foram realizadas medições para 13 amostras distintas tanto de parâmetros de espalhamento quanto de permeabilidade complexa. Para as medidas dessa última foi necessário fazer um conjunto de suposições que simplificaram o problema, mas que não garantiram precisão às medidas. Já sobre os parâmetros de espalhamento, por questão de simplicidade optou-se por medir apenas o parâmetro S_{21}.

Em se tratando da escolha do modelo, foram analisadas três abordagens possíveis para a função de transferência, com base em três formas de utilizar seus resultados: extraindo a parte real, a parte imaginária ou o módulo de sua saída. Chegou-se à conclusão de que para modelar a permeabilidade seria mais indicado utilizar a parte real da saída da FT, posto que pode assumir valores negativos, ao contrário do módulo, e que apresentou resultados melhores que os obtidos pelo uso da parte imaginária.

Utilizando uma FT com uma única variável de entrada, foi possível comstatar que a parte real de S_{21} era mais adequada que a parte imaginária, posto que essa segunda apresentava diversos valores nulos ao longo da faixa de frequências em que se realizaram as medições, o que gerava resultados bastante ruidosos.

Em termos de proposição de modelos, cada amostra serviu de base para modelos de ordem 1 a 8 para as três abordagens possíveis da FT. Cada modelo foi estimado 40 vezes para que fosse possível realizar uma análise estatística em termos de RMSE. O que se concluiu foi que, para o conjunto de amostras em questão, um modelo de FT de ordem

7 seria o mais indicado para modelar μ'', enquanto um de ordem 8 seria o mais adequado para modelar μ', ambos considerando apenas a parte real da saída da FT.

Por fim, a mesma metodologia foi aplicada para desenvolver modelos mais gerais, que utilizavam mais de um conjunto de dados na etapa de estimação de parâmetros. Os resultados para esse caso não foram satisfatórios, posto que o sistema se provou não linear.

Como proposta de correção e melhoria do modelo, seria possível adicionar algum bloco com caráter não linear em sua estrutura, ou ainda realizar medidas do parâmetro S_{11} e tentar incorporá-lo no modelo.

6.2 Trabalhos Futuros

Por tratar de assuntos distintos, este trabalho gera inspiração para diversos outros trabalhos.

Em primeiro lugar, seria interessante testar a abordagem de identificação de sistemas em linhas de transmissão mais utilizadas na literatura. Isso seria uma forma de comparar a metodologia clássica, que equivale a modelos caixa branca, ao uso de modelos caixa preta. Como há uma série de geometrias distintas de LT utilizadas na literatura, um trabalho dessa natureza teria bastante material para comparação.

Outro trabalho possível seria repetir essa metodologia, porém utilizando alguma variação na topologia da *microstrip*, incorporando curvas ou mesmo utilizando uma LT coplanar. Uma das possíveis causas dos problemas com os modelos gerais é a provável interação fraca entre a LT e as amostras, de modo que não ocorre variação significativa entre amostras para medidas de S_{21}. A ideia de utilizar topologias distintas de *microstrip* seria tentar aumentar a interação das ondas guiadas com os amteriais magnéticos.

Por fim, outra proposta de trabalho associado seria a o teste de outras estruturas de modelo. Utilizar não apenas um dado de entrada, mas pelo menos dois, além de realizar medidas de S_{11} e tentar incorporá-las no modelo, como forma de auxiliar na representação do comportamento distinto entre as amostras. Outra sugestão possível de alteração no modelo seria levar em conta a geometria das amostras. Nesse trabalho, a geometria foi utilizada apenas para o cálculo da permeabilidade complexa a partir da impedância indutiva dos núcloes, mas na literatura é comum considerar o comprimento das amostras nos modelos, de alguma forma.

Bibliografia

AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. third. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

AMARI, S. et al. *Natural Computing Series Differential Evolution A Practical Approach to Global Optimization*. Vacalle: Springer, 2005. 13–978 p. ISBN 9783540209508.

BA, D.; SABOUROUX, P. EpsiMu, A Toolkit for Permittivity and Permeability Measurement in Microwave Domain at Real Time of all Materials: Applications to Solid and Semisolid Materials. *Microwave And Optical Technology Letters*, v. 52, n. 12, p. 2643–2648, 2010. ISSN 0895-2477.

BARRY, W. A Broad-Band, Automated, Stripline Technique for the Simultaneous Measurement of Complex Permittivity and Permeability. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 34, n. 1, p. 80–84, 1986.

CHEN, L. F. et al. *Microwave Electronics - Measurements and Materials Characterization*. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2004. 531 p. ISBN 0470844922.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman - Lectures on Physics: Mainly Electromagnetism and Matter*. 6. ed. USA: Basic Books, 2010. ISBN 2010938208.

FITZPATRICK, R. *Maxwell's Equations and the Principles of Electromagnetism*. Hingham, MA: Infinity Science Press LLC, 2008. 450 p. ISBN 9781934015209.

HAYT, W. H.; BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. 8. ed. [S.l.]: AMGH, 2013. 597 p.

HECK, C. *Magnetic Materials and Their Applications*. [S.l.]: Lodon Butterworths, 1974. 784 p.

KANG, B. et al. Nondestructive measurement of complex permittivity and permeability using multilayered coplanar waveguide structures. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 15, n. 5, p. 381–383, 2005. ISSN 15311309.

KEYSIGHT. *E5063A - ENA Vector Network Analyzer*. Keysight Technologies. Disponível em: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-3615EN.pdf?id=2425434>.

LUDWIG, R.; BRETCHKO, P. *RF Circuit Design — Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 653 p. ISSN 0-13-095323-7.

MACHAC, J. *Waves and Transmission Lines*. Prague: ČVUT v Praze - Fakulta elektrotechnická, 2005. 192 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796.

NARAYANAN, P. M. Microstrip transmission line method for broadband permittivity measurement of dielectric substrates. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 62, n. 11, p. 2784–2790, 2014. ISSN 00189480.

NICOLSON, A. M.; ROSS, G. F. Measurement of the Intrinsic Properties Of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 19, n. 4, p. 377–382, 1970. ISSN 15579662.

PAUL, C. R. *Inductance: Loop and Partial*. Lexington: John Wiley & Sons, 2010. 395 p. ISBN 9780470461884.

PÊS, B. d. S. *Modelo de Transistor Mono-elétron Utilizando Identificação de Sistemas*. 190 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2019.

QUÉFFÉLEC, P.; Le Floc'h, M.; GELIN, P. Broad-band characterization of magnetic and dielectric thin films using a microstrip line. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 47, n. 4, p. 956–963, 1998. ISSN 00189456.

RIAHI-KASHANI, M. M.; ELSHABINI-RIAD, A. Permeability evaluation of ferrite pastes, epoxies, and substrates over a wide range of frequencies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 41, n. 6, p. 1036–1040, 1992. ISSN 15579662.

SHAFI, K. T. M.; JHA, A. K.; AKHTAR, M. J. Improved Planar Resonant RF Sensor for Retrieval of Permittivity and Permeability of Materials. *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 17, p. 5479–5486, 2017. ISSN 1530437X.

TIWARI, A. et al. *Advanced Magnetic and Optical Materials*. Beverly: Scrivener Publishing, 2017. 527 p. ISBN 9781119241911.

WEIR, W. B. Comments on "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies". *Proceedings of the IEEE*, v. 62, n. 1, p. 33–36, 1974. ISSN 15582256.

Apêndices

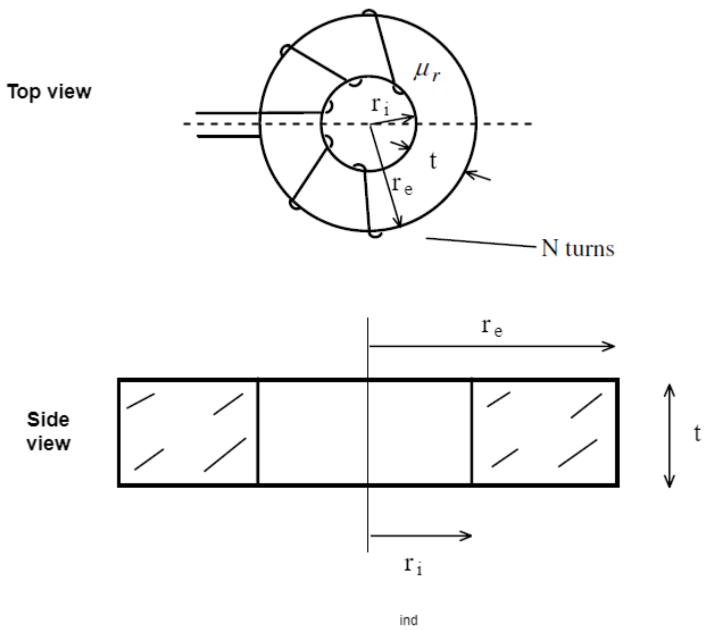
APÊNDICE A – Permeabilidade complexa a partir da impedância de um indutor toroidal

Segundo Paul (2010), a indutância L de um indutor toroidal pode ser dada pela equação (A.1)

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \mu_r t}{2\pi} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \tag{A.1}$$

onde N é o número de espiras, t é o comprimento longitudinal do núcleo, r_e e r_i são os raios externo e interno, respectivamente. Essas dimensões podem ser visualizadas na figura 38, onde a linha tracejada na vista superior corresponde ao corte transversal (vista lateral).

Figura 38 – Dimensões de um toroide



Fonte: Adaptado de (PAUL, 2010)

Sabendo que a permeabilidade dos materiais passa a possuir um caráter complexo com o aumento da frequência, com parte real e imaginária não desprezíveis, a equação (A.1) passa a ser substituída pela equação (A.2).

$$L = \frac{N^2 \mu_0 t}{2\pi} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)(\mu' - j\mu'') \tag{A.2}$$

Isso indica que a indutância passa a assumir valores tanto reais quanto imaginários. Portanto, ao aferir a impedância de um indutor toroidal em função da frequência, desconsiderando a presença de elementos parasitas bem como a resistência do fio, é possível afirmar que a impedância medida (Z) é a própria impedância do indutor, ou seja:

$$Z = j\omega L \tag{A.3}$$

Quando não se leva em consideração a permeabilidade complexa, a impedância Z assumiria, nessas condições, apenas valores imaginários. Para o caso de indutância complexa, considera-se que Z possui parte real e imaginária:

$$\begin{aligned} Z_{re} + jZ_{im} &= j\omega \left[\frac{N^2\mu_0 t}{2\pi} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)(\mu' - j\mu'') \right] \\ &= \left[\omega\frac{N^2\mu_0 t}{2\pi} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)\mu'' \right] + j\left[\omega\frac{N^2\mu_0 t}{2\pi} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)\mu' \right] \end{aligned} \tag{A.4}$$

Para que dois números complexos sejam iguais é necessário que suas partes reais sejam iguais entre si, assim como suas partes imaginárias. Assim, de (A.4) conclui-se que

$$Z_{re} = \omega\frac{N^2\mu_0 t}{2\pi} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)\mu'' \tag{A.5}$$

$$Z_{im} = \omega\frac{N^2\mu_0 t}{2\pi} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)\mu' \tag{A.6}$$

Portanto, isolando a permeabilidade em ambas as equações obtém-se

$$\mu' = \frac{Z_{im}}{\omega}\frac{2\pi}{N^2\mu_0 t}\frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \tag{A.7}$$

$$\mu'' = \frac{Z_{re}}{\omega}\frac{2\pi}{N^2\mu_0 t}\frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \tag{A.8}$$

Essas equações representam uma situação oriunda de várias simplificações, pois é sabido que para altas frequências é necessário utilizar modelos equivalentes levando em conta elementos parasitas para modelar corretamente elementos passivos, como indutores (LUDWIG; BRETCHKO, 2000). Ainda assim, considerando que encontrar um bom modelo equivalente para altas frequências pode ser uma tarefa árdua, as equações (A.7) e (A.8) permitem um cálculo direto das componentes da permeabilidade complexa que podem ser úteis como primeira aproximação.