



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.12.19.49-PUD

**PROGRAMA EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO
PYTHON PARA EXTRAÇÃO DA PERMISSIVIDADE E
PERMEABILIDADE ATRAVÉS DOS PARÂMETROS-S
UTILIZANDO O MÉTODO DE NICOLSON-ROSS-WEIR**

Miguel Angelo do Amaral Junior
Pedro José de Castro
Joaquim José Barroso de Castro
Maurício Ribeiro Baldan

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9BEA8>](http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9BEA8)

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.12.19.49-PUD

**PROGRAMA EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO
PYTHON PARA EXTRAÇÃO DA PERMISSIVIDADE E
PERMEABILIDADE ATRAVÉS DOS PARÂMETROS-S
UTILIZANDO O MÉTODO DE NICOLSON-ROSS-WEIR**

Miguel Angelo do Amaral Junior
Pedro José de Castro
Joaquim José Barroso de Castro
Maurício Ribeiro Baldan

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9BEA8>](http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9BEA8)

INPE
São José dos Campos
2017



Esta obra foi licenciada sob uma [Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

RESUMO

Este trabalho utiliza-se do método de Nicolson-Ross-Weir para obter as propriedades constitutivas de corpos de prova ajustados as dimensões do guia de onda, neste caso, o guia utilizado foi o da banda-X com faixa de frequência de 8.2-12.4GHz. O método utiliza os parâmetros-S obtidos das amostras para calcular os coeficientes de reflexão e transmissão, os quais são utilizados para encontrar a permissividade e permeabilidade real e imaginária de materiais dielétricos. Neste trabalho, utilizou o analisador de redes vetorial da Agilente, modelo N5232A para extração dos parâmetros-S da amostra.

Palavras-chave: Permissividade. Permeabilidade. Analisador de redes vetorial. Parâmetros-S.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Campo elétrico aplicado no vácuo (ϵ_o) onde se encontra um material com propriedades elétricas (a) $\epsilon = \epsilon_o$, (b) $\epsilon > \epsilon_o$ e (c) $\epsilon < 0$	2
1.2 Resposta de um material dielétrico a diferentes frequências	8
1.3 Diagramação (a) dos componentes dos circuitos com as propriedades elétricas e (b) da relação material e circuito elétrico	9
1.4 Onda propagando-se em direção perpendicular às componentes do campo elétrico (E) e magnético (B).	11
1.5 Representação esquemática das componentes da onda incidente, refletida e espalhada ao passar por meios distintos	13
1.6 Diagrama esquemático das reflexões e transmissões da onda eletromagnético incidente em um material	15
1.7 Representação de um dispositivo com uma porta	15
1.8 Representação de um dispositivo com duas portas	16
1.9 Representação do dispositivo casado com (a) duas portas durante medida da porta 1 para porta 2 (b) com duas portas durante a medida da porta 2 para porta 1.	17
1.10 Representação esquemática do (a) Cabo coaxial com (b) modo de propagação TEM da onda e (c) Guia de onda com (d) modo de propagação TE_{10} da onda	19
1.11 Representação esquemática do modo de propagação TE_{10} da onda em um guia de onda retangular	21
1.12 Fluxograma Resumido do Método NRW	22
1.13 Uma amostra em uma linha de transmissão interagindo com um campo elétrico incidente	23
2.1 Foto do VNA da Agilente modelo N5232A	27
2.2 Representação esquemática dos conjuntos de guias do kit WR-90	29
2.3 Representação esquemática da calibração por nove passos utilizando o Kit WR-90. (a) Porta 1 (e Porta 2) e Curto (b) Porta 1 (e Porta 2), Offset e Curto (c) Porta 1 (e Porta 2) e Carga (d) Porta 1 (e Porta 2), Offset e Carga e (e) Porta 1, Seção Padrão e Porta 2	30
2.4 Kit wr-90 utilizado para medir (a) Refletividade e (b) Parâmetro S.	31
4.1 Representação esquemática da medida da refletividade para a amostra de Teflon	53

4.2	Parâmetros-S medidos e calculados da amostras de Teflon com espessura de 5mm	54
4.3	Absorbância, Refletância e Transmitância da amostras de Teflon com espessura de 5mm	55
4.4	Impedância e Índice de Refração do Teflon	56
4.5	Coefficiente de Reflexão e Transmissão	56
4.6	Permeabilidade real e imaginária	57
4.7	Permissividade real e imaginária	58
4.8	Refletividade	59

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Frequência de corte para guias de onda retangulares	20
2.1 Dimensões e frequência de trabalho para guias de onda retangulares. . .	28
2.2 Cabos coaxiais para conectar VNA ao guia de onda	28

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Conceitos Fundamentais de Electromagnetismo Aplicados à MARE	1
1.1 Permissividade e Permeabilidade no Espaço Livre	1
1.1.1 Equações de Maxwell	3
1.1.2 Relações Constitutivas e Características do meio	4
1.2 Conceitos Fundamentais para Caracterização dos Parâmetros Constitu- tivos do Material	10
1.2.1 Coeficiente de Transmissão e Reflexão	10
1.2.2 Parametro-S	14
1.2.3 Linha de Transmissão	18
1.2.4 Obtenção dos Parâmetros Constitutivos Através do Método de Nicol- son Ross Weir - NRW	21
2 Equipamento e métodos de extração dos parâmetros-S	27
2.1 Analisador de Rede Vetorial - VNA	27
2.1.1 Calibração do VNA - Kit WR-90 X11644A	28
2.1.2 Medidas da Reflexão, Permissividade e Permeabilidade	31
3 Programa - NRW	33
3.1 Pré-Requisitos	33
3.2 Script	34
4 NRW Aplicado ao Teflon	53
4.1 Rotina de Cálculo	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1 Conceitos Fundamentais de Electromagnetismo Aplicados à MARE

Nesta seção, serão introduzidas as equações de Maxwell em suas diferentes formas, que serão necessárias para a compreensão do programa. Essas equações são a base para entender como a onda eletromagnética se propaga em diferentes meios. Os meios estudados para a propagação da onda serão os casos mais comuns, como: espaço livre (*free space*), meio homogêneo e não homogêneo.

A propagação da onda através de um meio material é governada pelas propriedades intrínsecas do meio: permissividade, permeabilidade e condutividade. Essas propriedades intrínsecas são determinante na classificação de um material MARE dielétrico e magnético, que possibilita explicar as várias propriedades do meio em termos desses parâmetros (isotropia, linearidade, reciprocidade etc).

1.1 Permissividade e Permeabilidade no Espaço Livre

A permissividade ¹ (ϵ) é definida como a resistência de um meio a um campo elétrico externo aplicado. Em outras palavras, permissividade é uma medida de como um campo elétrico afeta, e é afetado por um meio dielétrico (ALLEN, 2009; GRIFFITHS, 2014). A permissividade de um meio é descrita como a quantidade de fluxo que é gerada por unidade de carga neste meio, a qual no sistema internacional de unidades, a permissividade é medida em faraday por metro $\frac{F}{m}$. Uma maior quantidade de fluxo elétrico irá existir em um meio com baixa permissividade devido ao efeito de polarização. No vácuo, a permissividade (ϵ_0) apresenta um valor de:

$$\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \quad (1.1)$$

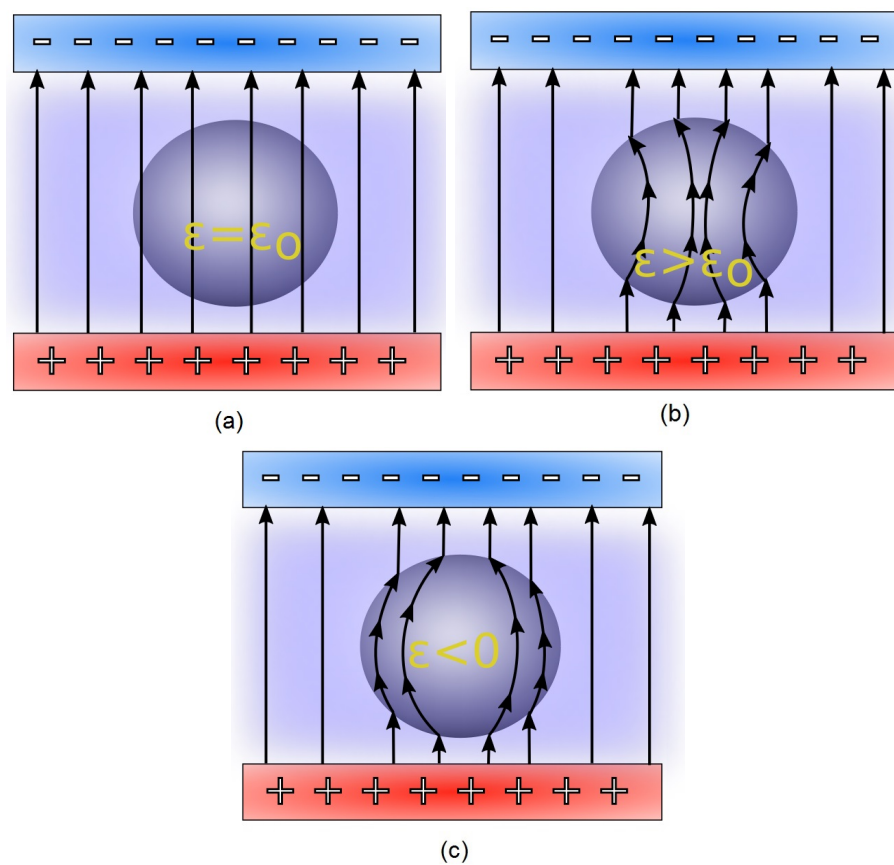
Pode-se dizer que a permeabilidade μ é uma versão magnética da permissividade, diferenciando apenas por ser uma resistência de um meio a um campo magnético externo. Assim o grau de magnetização de um material é obtido em resposta a um campo magnético aplicado. De acordo com o sistema internacional de unidades, sua unidade de medida é henry por metro ($\frac{H}{m}$), ou equivalente a newton por amperes ao quadrado ($\frac{N}{A^2}$). A permeabilidade no vácuo (μ_0) apresenta um valor de:

$$\mu_0 \approx 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{H}{m} \quad (1.2)$$

¹A permissividade também é chamada de constante dielétrica

Ao contrário da permissividade e permeabilidade no vácuo, a resposta dos materiais a um campo externo geralmente depende da frequência, temperatura, pressão, umidade, estrutura molecular do material e entre outros fatores (NOHARA, 2003; HIEBEL, 2007). Logo, essas dependências refletem no fato de que a polarização de um material não responde instantaneamente a um campo aplicado. Isso geralmente implica que o material tem uma frequência de ressonância diferente da onda incidente, causando uma diferença de fase. Por esta razão, essas propriedades são muitas vezes tratadas como uma função complexa da frequência (angular) ω do campo aplicado.

Figura 1.1 - Campo elétrico aplicado no vácuo (ϵ_o) onde se encontra um material com propriedades elétricas (a) $\epsilon = \epsilon_o$, (b) $\epsilon > \epsilon_o$ e (c) $\epsilon < 0$



Fonte: (Autor)

Por exemplo, na Figura 1.1, é aplicado um campo elétrico num material (ϵ_o), o material apresenta três propriedades dielétricas diferentes; (a) $\epsilon = \epsilon_o$, (b) $\epsilon > \epsilon_o$

e (c) $\epsilon < 0$. Quando a permissividade do material for igual do meio, as linhas de campo elétrico não irão sofrer interação com o material. No entanto, quando a permissividade do material for maior do que a do meio em que as linhas de campo incidem, as linhas de campo elétrico sofrem uma interação com o material. Já no ultimo caso, quando o material apresentar uma permissividade negativa, as linhas de campo tende a contornar o objeto, fazendo com que não haja interação (SUN et al., 2012; GIOVAMPAOLA; ENGHETA, 2014). Esse último caso, é conhecido como metamaterial ², que ao ter permissividade e permeabilidade negativas é possível, por exemplo, que a onda eletromagnética não interaja com o material, sendo assim, fazendo com que ele se torne invisível ao detector de um radar, conhecido também como *Stealth materials* (FELBACQ; ANTEZZA, 2012).

1.1.1 Equações de Maxwell

As famosas equações de Maxwell são compostas por quatro equações fundamentais do electromagnetismo, as quais juntas foram utilizadas por Maxwell para prever o comportamento de uma onda eletromagnética antes mesmo da descoberta experimental de sua existência. Essa equação é composta pelas leis de Gauss da eletricidade (Equação 1.3) e do magnetismo (Equação 1.4), lei de Faraday (Equação 1.5) e lei de Amperes-Maxwell (Equação 1.6).

$$\oint_a \vec{D} \cdot \hat{n} da = \int_v \rho dv \quad (1.3)$$

$$\oint_s \vec{B} \cdot \hat{n} da = 0 \quad (1.4)$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot \hat{n} dl = - \int_a \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} da \quad (1.5)$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot \hat{n} dl = \int_a \vec{J} \cdot \hat{n} da + \int_a \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \hat{n} da \quad (1.6)$$

²Os metamaterial são materiais artificiais, que foram modificados de tal modo que adquiram propriedades desejadas que não existem de forma natural. Eles são conjuntos de vários elementos individuais formados a partir de materiais convencionais, tais como metais ou plásticos, mas os materiais, geralmente construídos em padrões repetitivos, são muitas vezes, estruturas microscópicas. Metamateriais derivam suas propriedades, não a partir das propriedades da composição dos materiais que a formam, mas a partir de suas estruturas pré desenhada. A sua forma exata, a geometria, tamanho, a orientação e disposição, pode afetar as ondas de luz (WIKIPÉDIA, 2017)

Nas equações acima, $\vec{E}$ e $\vec{H}$ são os *Campos Elétrico* $[V/m]$ e *Magnético* $[A/m]$, $\vec{D}$ e $\vec{B}$ são conhecidos como *Densidade de Fluxo Elétrico* $[C/m^2]$ e *Densidade de Fluxo Magnético* $[T]$, ρ é conhecido como *Densidade de Carga Elétrica* $[C/m^3]$, $\vec{J}$ é a *Densidade Superficial de Corrente Elétrica*, da é unidade de área infinitesimal e $\hat{n}$ vetor unitário de da .

As Equações 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6 estão na forma integral, sendo possível ainda serem transformadas numa forma mais compactada, a chamada forma diferencial. Para isso, é necessário aplicar o *Teorema do Divergente* nas Equações 1.3 e 1.4 e o *Teorema de Stokes* nas Equações 1.5 e 1.6. As equações de Maxwell na forma integral são mostradas abaixo:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.8)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.9)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.10)$$

As equações de Maxwell, tanto na forma diferencial quanto integral, são imprescindíveis para as análises da propagação da onda eletromagnética em um meio. Por exemplo, a forma diferencial é o ponto de partida para as análises da diferenças finitas no domínio do tempo (do inglês, *Finite Difference Time Domain-FDTD*), propagação da onda eletromagnética no espaço livre e outros meios contínuos (VINOY; JHA, 1996). Por outro lado, a forma integral é utilizada para derivar as condições de contorno na interface entre dois meios distintos (VINOY; JHA, 1996).

1.1.2 Relações Constitutivas e Características do meio

Como visto anteriormente, as equações de Maxwell descrevem quatro vetores aplicados ao electromagnetismo, $\vec{E}$, $\vec{D}$, $\vec{H}$ e $\vec{B}$. Mas normalmente a onda eletromagnética que se propaga no espaço livre ou num meio material é expressada em termos do campo elétrico ($\vec{E}$) e magnético ($\vec{H}$). Isso só se torna possível recorrendo às *relações*

constitutivas do meio, que relacionam a densidade de fluxo elétrico $\vec{D}$ e densidade de corrente $\vec{J}$ com o campo elétrico $\vec{E}$ e o fluxo magnético $\vec{B}$ com o campo magnético $\vec{H}$. No caso do espaço livre, $\vec{D}$ é colinear com $\vec{E}$ e $\vec{B}$ com $\vec{H}$. Assim, as relações constitutivas podem ser expressadas como (VINOY; JHA, 1996):

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.11)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1.12)$$

$$\vec{J} = 0 \quad (1.13)$$

As equações descritas acima são utilizadas apenas para o espaço livre. Porém existem uma ampla classe de materiais que se encaixam nas relações de colinearidade dos vetores de $\vec{D}$ e $\vec{J}$ com $\vec{E}$ e $\vec{B}$ com $\vec{H}$ (VINOY; JHA, 1996). Como a propagação da onda eletromagnética pode ser classificada de acordo com as características elétricas e magnéticas do material em que se propaga. Essas características elétricas e magnéticas são caracterizadas pelos parâmetros da ϵ e μ . Porém, um terceiro parâmetro fundamental é também necessário, a condutividade do material σ , a qual é medida por siemens por metro $\frac{S}{m}$. A condutividade caracteriza-se como a facilidade com que as cargas (elétrons) possam se movimentar livremente no material. Se $\sigma = 0$, as cargas não podem se mover mais do que a distância atômica e o material é chamado de dielétrico perfeito. Contudo, se $\sigma = \infty$ as cargas poderão se mover livremente através do material, o qual será chamado de condutor perfeito. Portanto os parâmetros ϵ , μ e σ são frequentemente referenciados como *parâmetros constitutivos* do material, fazendo com que as Equações 1.11, 1.12 e 1.13 sejam escritas de outra forma:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.14)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.15)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.16)$$

Onde a ϵ e μ do material são expressados em termos da ϵ_o e μ_o do espaço livre.

$$\epsilon = \epsilon_o \epsilon_r \quad (1.17)$$

$$\mu = \mu_o \mu_r \quad (1.18)$$

Os termos ϵ_r e μ_r são definidos como permissividade e permeabilidade relativa do meio.

Assim a nível macroscópico, a ϵ e μ do material são diferentes do espaço livre, porque o meio material é formado por átomos/moléculas carregadas elétrica e magneticamente. Desse modo, quando um campo elétrico ou magnético é aplicado no meio material, as moléculas/átomos tendem a se alinhar ao longo do campo externo. Isso leva ao conceito de polarização elétrica ($\vec{P}$) e magnética ($\vec{M}$) do material (VINOY; JHA, 1996). A polarização $\vec{P}$ e $\vec{M}$ são definidos como:

$$\vec{P} = \epsilon_o \chi_e \vec{E} \quad (1.19)$$

$$\vec{M} = \mu_o \chi_m \vec{H} \quad (1.20)$$

Onde os termos χ_e e χ_m são chamados de suscetibilidade elétrica e magnética do meio, os quais são definidos como quão fácil o sistema se polariza em resposta a um campo elétrico e magnético.

A polarização elétrica (ou magnética) altera a densidade de fluxo elétrico (ou magnético) dentro do meio, devido ao campo elétrico (ou magnético) influenciar no alinhamento das cargas dos átomos/moléculas (VINOY; JHA, 1996). Assim, a densidade de fluxo elétrico dentro de um meio dielétrico pode ser expressado como a sobreposição da polarização elétrica no campo do espaço livre:

$$\vec{D} = \epsilon_o \vec{E} + \vec{P} \quad (1.21)$$

Utilizando as Equações 1.19 e 1.17 é possível definir o termo ϵ_r como:

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e \quad (1.22)$$

De maneira análoga é possível obter que:

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (1.23)$$

Onde ϵ_r , μ_r , χ_e e χ_m são adimensionais.

Portanto, um meio é chamado de *homogêneo* se seus *parâmetros constitutivos* são constantes em função da coordenada espacial do material. Desse modo, as Equações 1.22 e 1.23 são válidas para meios homogêneos, resultando valores reais para a permissividade e a permeabilidade do meio. Contudo, quando os parâmetros constitutivos não são constantes, o meio é chamada de *não homogêneo*. Logo, as polarizações elétrica ($\vec{P}$) e magnética ($\vec{M}$) dos campos elétrico e magnético tendem a atrasar, o que ocasionam perdas da onda no meio em que se propaga (VINOY; JHA, 1996). Assim, os parâmetros constitutivos ϵ_r e μ_r assumem valores complexos, como apresentado nas Equações 1.24 e 1.25, sendo a componente j , a unidade imaginária das equações (ULABY et al., 2010; YOUNG, 2008).

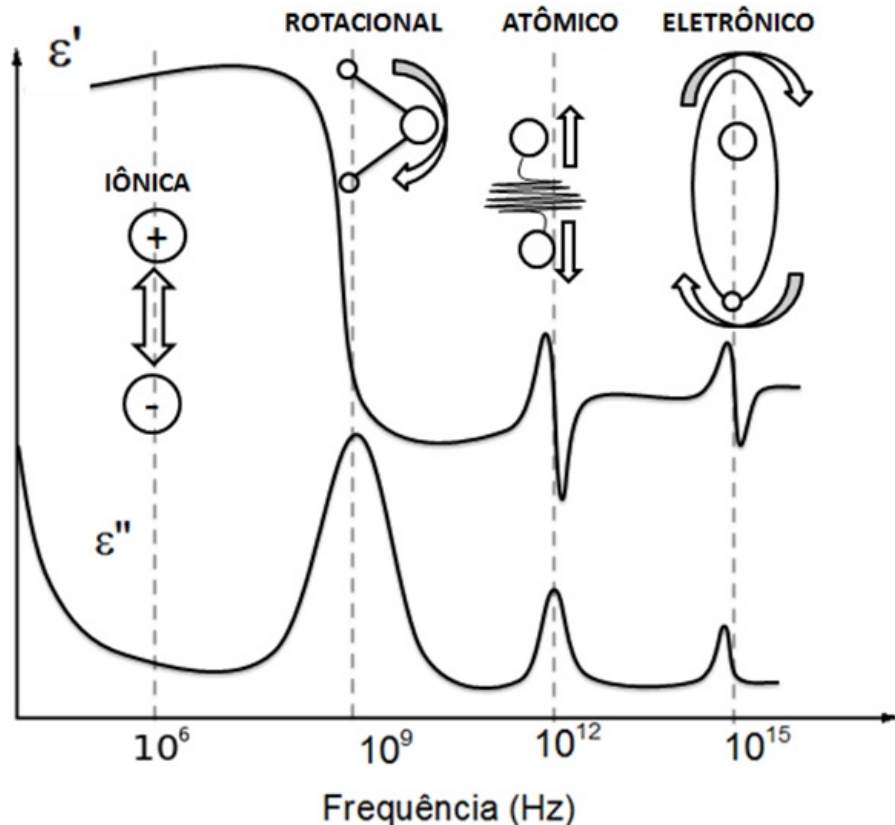
$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1.24)$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (1.25)$$

A Equação 1.24 apresenta a permissividade elétrica do material, que apresenta uma componente real (ϵ_r') e imaginária (ϵ_r''). Esta perda elétrica ocorre para materiais dielétricos, que pode ser por perda iônica, rotacional, atômica ou eletrônica (Figura 1.2 baseado em (AGILENT, 2006)). Esses mecanismos de perdas elétricas são dependentes da frequência da onda incidente no material. Já a Equação 1.25 apresenta a permeabilidade magnética do material, que também possui uma componente real

(μ') e uma imaginário (μ''). A μ'' representa as perdas magnéticas do meio, que estão relacionadas com o alinhamento e a rotação do spin de magnetização dos materiais baseados em aditivos magnéticos. Por exemplo, materiais como as ferritas possuem alta permeabilidade magnética, por serem ferromagnéticos (ALLEN, 2009).

Figura 1.2 - Resposta de um material dielétrico a diferentes frequências

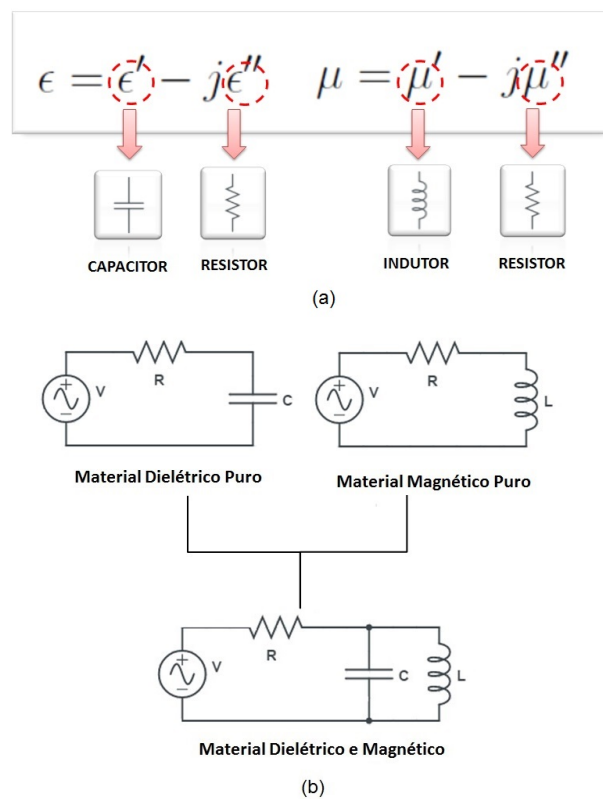


Fonte: (Autor)

Também é importante mencionar que as propriedades eletromagnéticas dos materiais podem ser relacionadas com circuitos elétricos. De uma forma geral os materiais dielétricos com perdas são capacitores colocados em paralelo com um resistor. Portanto, materiais dielétricos podem ser comparados a um circuito elétrico, onde a componente ϵ' equivale a um capacitor (armazenamento de energia) e ϵ'' um resistor (dissipação de energia). A mesma relação pode ser feita para um material magnético com perdas, onde μ' é um indutor e μ'' resistor (NALWA, 1997; OLMEDO et al., 1995). A Figura 1.3 (a) esclarece esta relação da propriedade do material com circuito elé-

trico. Logo, um material dito totalmente dielétrico pode ser representado por um circuito resistor e capacitor em paralelos, já um material puramente magnético é equivalente a um circuito resistor e indutor em paralelo. Deste modo, um material que apresente tanto propriedades elétricas quanto propriedades magnéticas pode ser expressado por um circuito resistor, capacitor e indutor em paralelo (Figura 1.3 (b)).

Figura 1.3 - Diagramação (a) dos componentes dos circuitos com as propriedades elétricas e (b) da relação material e circuito elétrico



Fonte: (Autor)

Como visto anteriormente, um material é capaz de estocar energia eletromagnética e não dissipar-la caso seu valor de ϵ' (ou μ') seja alto e seu valor de ϵ'' (ou μ'') nulo. Contudo, um material com alta ϵ'' (ou μ'') e baixa ϵ' (ou μ'), não é capaz de estocar energia, transformando assim toda a energia em energia da onda eletromagnética em energia térmica. Para obter esse tipo de informação, um dos métodos utilizados para calcular essa relação de quanto é dissipado é chamado de tangente de perda

$\tan\delta$ elétrica ou magnética. No caso da tangente de perda elétrica, essa é a razão da parte imaginária da permissividade pela parte real da permissividade, como pode ser visto na Equação 1.26. A expressão para a parte magnética é muito semelhante (Equação 1.27).

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1.26)$$

$$\tan\delta = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1.27)$$

1.2 Conceitos Fundamentais para Caracterização dos Parâmetros Constitutivos do Material

Empresas como a americana Keysight Technologies ³, a alemã Rohde e Schwarzs, fabricantes de analisadores de rede vetorial, comercializam um software (85071E) que a partir dos parâmetros S, medidos pelo equipamento, informa os valores de permissividade e permeabilidade na forma complexa. Um dos métodos de caracterização da permissividade e permeabilidade utilizados por este programa é o método de Nicolson-Ross-Weir (NRW). Isso não signifique que o método utilizado para obter a propriedades dielétricas do material seja exclusivamente somente o NRW, talvez possa existir algum fator de correção. Com relação a essa informação, não é possível saber, como se trata de um software de código fechado, o que dificulta o acesso do usuário às variáveis, às etapas de cálculo e à inclusão de novas variáveis.

1.2.1 Coeficiente de Transmissão e Reflexão

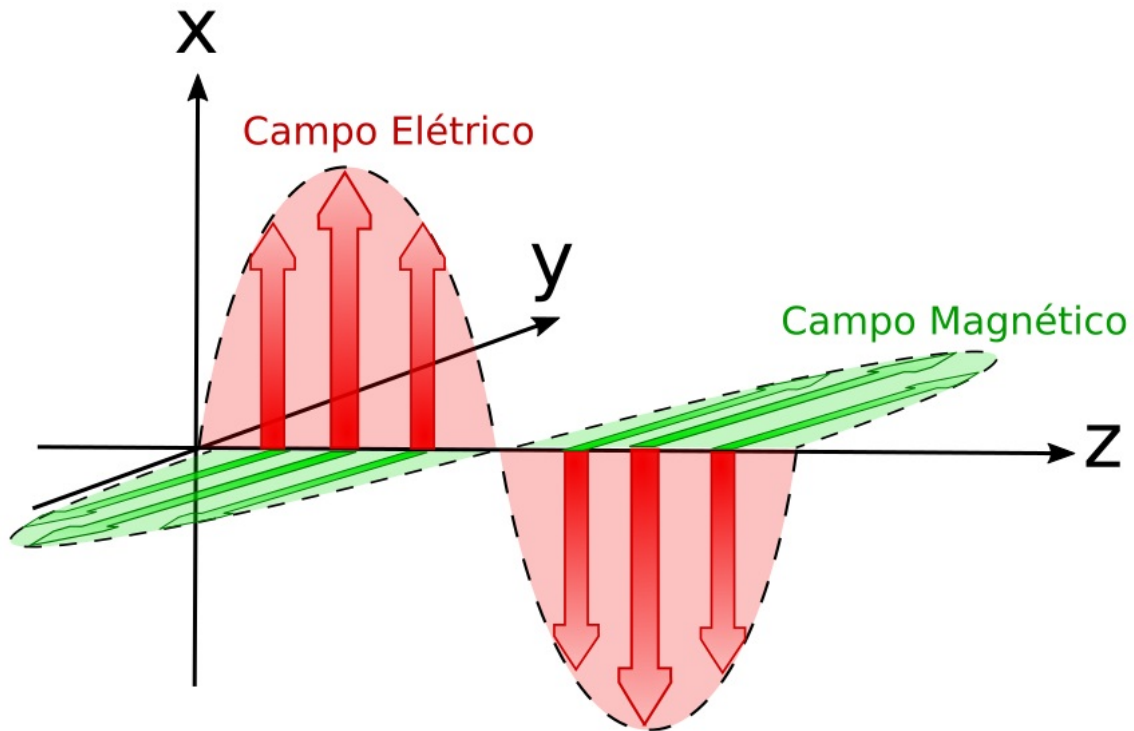
Quando uma onda eletromagnética interage com dois meios distintos, fenômenos como a reflexão e a transmissão podem ocorrer. Esses fenômenos estão diretamente ligados a variação da impedância do meio (η), que dependendo da situação poderá ocorrer apenas reflexão, transmissão ou ambas simultaneamente. O fenômeno da reflexão consiste na mudança da direção de propagação da onda. Consiste no retorno da energia incidente em direção à região de onde ela é oriunda, após entrar em contato com uma superfície refletora. Já a transmissão consiste na passagem da energia ou parte dela para outro meio. Uma transmissão perfeita só é possível quando ambos os meios possuem um casamento de impedância, ou seja impedâncias equivalente (KEYSIGHT, 2015). No mundo do electromagnetismo esses processos são

³Keysight é a antiga empresa chamada Agilent Technologies

denominados de coeficientes de reflexão (Γ) e transmissão (T).

Primeiramente, para entender o que são os chamados coeficiente de transmissão e reflexão é necessário considerar uma onda eletromagnética propagando-se em uma direção perpendicular às componentes do campo elétrico e magnético, neste caso propagando-se na direção positiva do eixo z, com $\vec{E}$ na direção x e $\vec{H}$ na direção y (Figura 1.4).

Figura 1.4 - Onda propagando-se em direção perpendicular às componentes do campo elétrico (E) e magnético (B).



Fonte: (Autor)

Lembrando que nesse caso a forma matemática é dada através das Equações 1.28 e 1.29.

$$\vec{E} = E_x \tilde{x} \quad (1.28)$$

$$\vec{H} = H_y \tilde{y} \quad (1.29)$$

Sabendo ainda que as componentes E_x e H_y são grandezas complexas, as equações podem ser escritas como:

$$\vec{E} = E_o e^{-jkz} \tilde{x} \quad (1.30)$$

$$\vec{H} = H_o e^{-jkz} \tilde{y} \quad (1.31)$$

Onde E_o e H_o são componentes contínuas dos campos elétrico e magnético, k é o número de onda da região em que a onda se propaga. Ainda é possível relacionar E_o e H_o como:

$$H_o = \frac{E_o}{\eta} \quad (1.32)$$

Onde η é chamada de impedância intrínseca do meio.

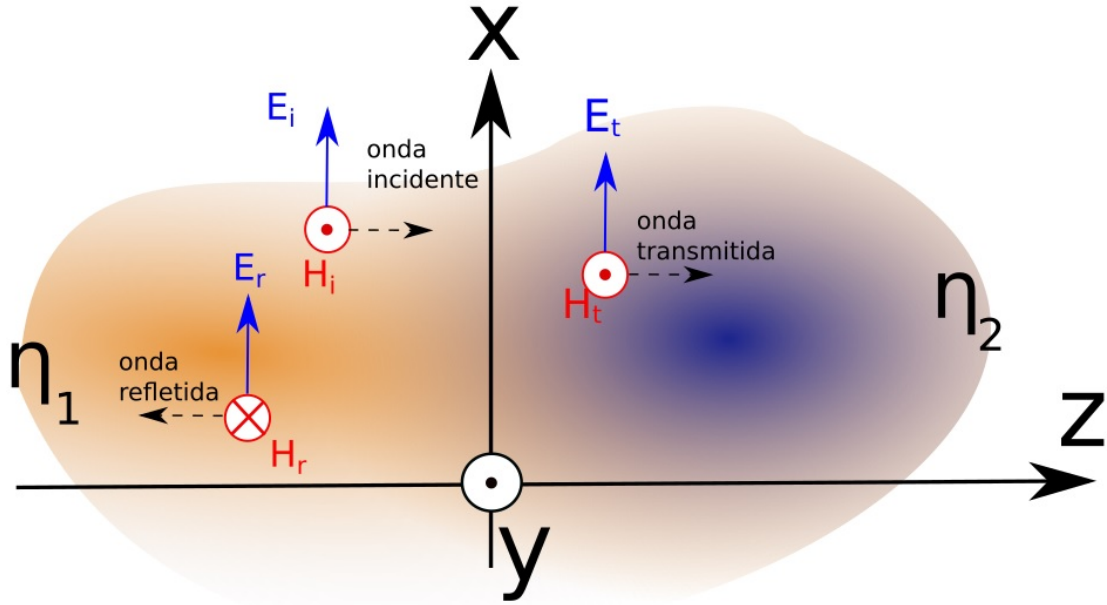
Caso considere que exista uma superfície plana, normal à direção de propagação da onda, localizada em $z=0$, que divida dois meios com impedância intrínseca η_1 e η_2 , como mostrado na Figura 1.5 (adaptado de (SADIKU, 2004)). No momento em que a onda atravessar a interface entre os dois meios, dependendo das impedâncias η_1 e η_2 , uma parte da onda poderá ser refletida e outra transmitida (GONÇALVES, 2012; ULABY, 2004). Vetorial mente pode ser expressada através das Equações 1.33 e 1.34.

$$\vec{E}_t = \vec{E}_i - \vec{E}_r \quad (1.33)$$

$$\vec{H}_t = \vec{H}_i - \vec{H}_r \quad (1.34)$$

Onde $\vec{E}_t$ e $\vec{H}_t$ corresponde aos campos elétrico e magnético, $\vec{E}_r$ e $\vec{H}_r$ aos campos refletidos e $\vec{E}_i$ e $\vec{H}_i$ aos campos incidentes.

Figura 1.5 - Representação esquemática das componentes da onda incidente, refletida e espalhada ao passar por meios distintos



Fonte: (Autor)

Correlacionando as Equações 1.32 e 1.33 e aplicando às nas razões $\frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i}$ e $\frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i}$ é possível mensurar o tanto que a propagação da onda eletromagnética foi afetada pela variação da impedância do meio, essas relações são chamadas de *coeficiente de transmissão* (T) e *coeficiente de reflexão* (Γ), como mostrado abaixo:

$$T = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{\vec{E}_i - \vec{E}_r}{\vec{E}_t + \vec{E}_r} = \frac{2\eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (1.35)$$

$$\Gamma = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\vec{E}_i - \vec{E}_t}{\vec{E}_t + \vec{E}_r} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (1.36)$$

A fim de facilitar, as Equações 1.35 e 1.36 podem ser representadas com sub-índices, indicando o meio de incidência (η_1) e destino (η_2):

$$T_{12} = \frac{2\eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (1.37)$$

$$\Gamma_{12} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (1.38)$$

As equações acima foram desenvolvidas para um sistema mais simples, onde se tem apenas dois meios e uma fronteira que os divide. Contudo, o interesse principal é na aplicação da onda eletromagnética interagindo com uma placa feita de um material qualquer. Considere a Figura 1.6, onde a onda incidente vem do ar (η_1) e encontra uma amostra (η_2) com espessura d e novamente ao ser transmitida encontra o ar (η_1). Nesse caso, quando a onda penetrar no material existirão múltiplas reflexões (Γ_{21}) e transmissões (T_{21}) internas, que ocasionaram em uma diminuição gradativa do sinal, logo os termos dos coeficientes de transmissão e reflexão ficam da seguinte forma (GONÇALVES, 2012; AMIET, 2003):

$$T_{21} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} e^{-jkd} \quad (1.39)$$

$$\Gamma_{21} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} e^{-jkd} \quad (1.40)$$

Onde o termo d é a espessura da amostra.

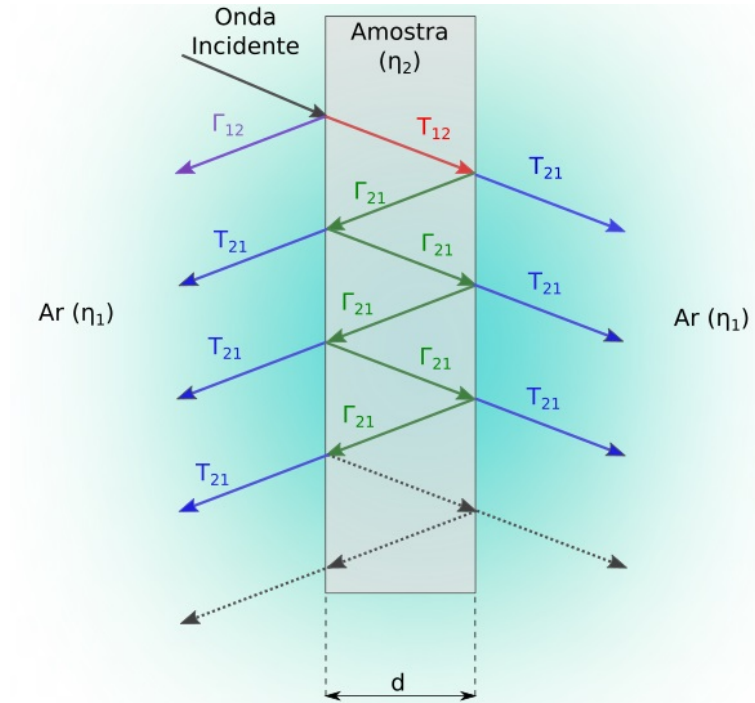
1.2.2 Parametro-S

A famosa quantidade de onda é utilizada na caracterização de circuitos rádio-frequência. As ondas são distinguidas como onda incidente (a) e onda refletida (b). A Figura 1.7 mostra o funcionamento de um dispositivo com uma porta e suas respectivas quantidades de ondas (HIEBEL, 2007). Nesse caso, a onda incidente propaga-se do analisador de redes para o dispositivo sob teste⁴ (do inglês, *Device Under Test* - *DUT*) e a refletida viaja de volta do DUT para o analisador.

A energia real que viaja da porta 1 do dispositivo para o DUT é dada por $|a|^2$, já energia real que é refletida por $|b|^2$. Também é possível calcular o coeficiente de reflexão (Γ) que neste caso é dado pela Equação 1.41. Vale salientar que no caso de um dispositivo com apenas uma porta, não é possível existir transmissão, logo a

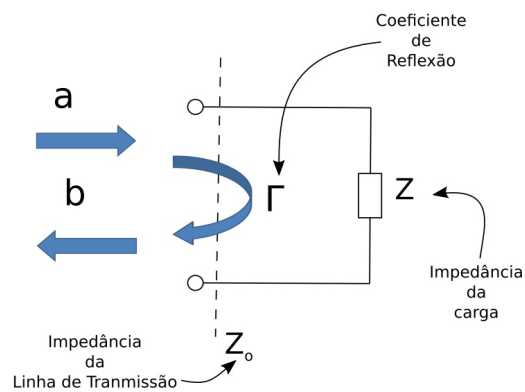
⁴O termo DUT também é utilizado como MUT, que significa Material substitui Device

Figura 1.6 - Diagrama esquemático das reflexões e transmissões da onda eletromagnético incidente em um material



Fonte: (Autor)

Figura 1.7 - Representação de um dispositivo com uma porta



Fonte: (Autor)

onda incidente só poderá ser atenuada ou refletida.

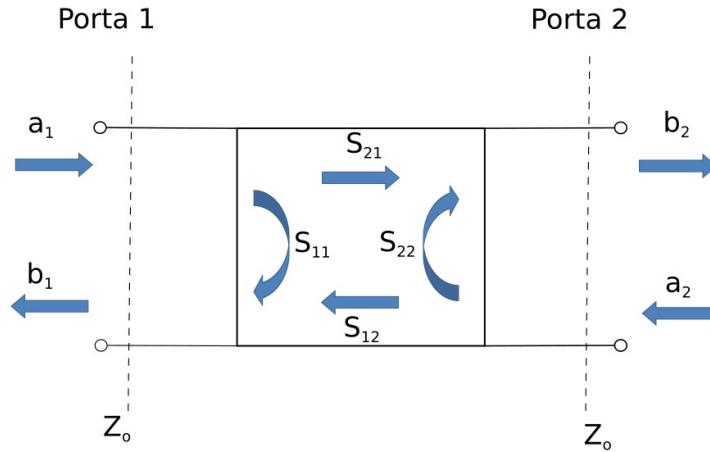
$$\Gamma = \frac{b}{a} \quad (1.41)$$

Geralmente o coeficiente de reflexão é colocado em função da impedância (Z) ⁵ quando se trabalha com linha de transmissão, que normalmente é uma grandeza complexa, veja a Equação 1.42. A impedância da linha de transmissão (Z_o), entenda-se cabo, tem como valor de referência 50Ω , normalmente.

$$\Gamma = \frac{Z - Z_o}{Z + Z_o} \quad (1.42)$$

Analizando agora um dispositivo com 2 portas, além da reflexão, existe também a possibilidade de ter transmissão, que resulta no aparecimento do coeficiente de reflexão (T). A Figura 1.8 mostra uma representação das possíveis reflexões e transmissões para um dispositivo com 2 portas.

Figura 1.8 - Representação de um dispositivo com duas portas



Fonte: (Autor)

Em comparação com o coeficiente de reflexão, os parâmetros de espalhamento (S_{11} ,

⁵No subtópico anterior a impedância do meio era denominada como η , contudo nos estudo de linha de transmissão a impedância da carga é representada pela letra Z , e a impedância da linha de transmissão por Z_o .

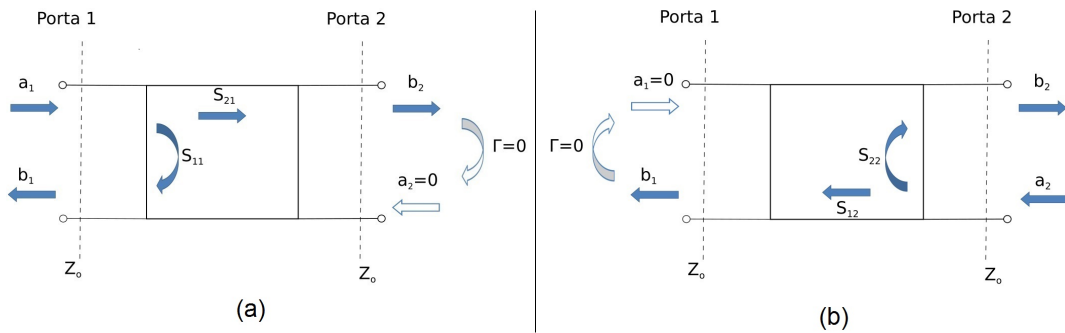
S_{12} , S_{21} e S_{22}), também conhecido como parâmetros-S, são definidos como a razão das respectivas quantidades de ondas. Para entender o que são os parâmetros-S considere um caso simples, onde se tem uma onda incidente da porta 1 para porta 2 e que não apresente DUT. Logo nessas condições, significa dizer que não há onda incidente proveniente da porta 2 para porta 1, portanto $a_2 = 0$. Assim, a onda da porta 1 apresenta uma onda incidente $a_1 \neq 0$. A Figura 1.9 (a) mostra o processo descrito. Logo, sob essas condições operacionais, é possível calcular o coeficiente de reflexão S_{11} na porta 1 e o coeficiente de transmissão S_{21} da porta 1 para (Equação 1.43) porta 2 (HIEBEL, 2007).

$$\begin{aligned} S_{11} &= \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \\ S_{21} &= \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \end{aligned} \quad (1.43)$$

Analisando da mesma maneira, só que agora uma onda proveniente da porta 2 para a porta 1, ou seja $a_1 = 0$ e $a_2 \neq 0$, os parâmetros-S são dados pela Equação 1.44.

$$\begin{aligned} S_{12} &= \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \\ S_{22} &= \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \end{aligned} \quad (1.44)$$

Figura 1.9 - Representação do dispositivo casado com (a) duas portas durante medida da porta 1 para porta 2 (b) com duas portas durante a medida da porta 2 para porta 1.



Fonte: (Autor)

Portanto, ao analisar a condição em que ambas as portas trabalhando simultaneamente é possível obter um sistema matemático para as ondas refletidas b_1 e b_2 (Equação 1.45). Onde a onda refletida b_1 equivale à soma dos produtos da onda incidente a_1 com o coeficiente de reflexão S_{11} e da onda incidente a_2 com o coeficiente de transmissão S_{12} . Do mesmo modo que a onda refletida b_2 equivale à soma dos produtos da onda incidente a_1 com o coeficiente de transmissão S_{21} e da onda incidente a_2 com o coeficiente de reflexão S_{22} .

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \tag{1.45}$$

Uma outra forma de representar os parâmetros-S e suas respectivas ondas é a forma matrixial, que resulta em uma notação mais compactada.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{1.46}$$

1.2.3 Linha de Transmissão

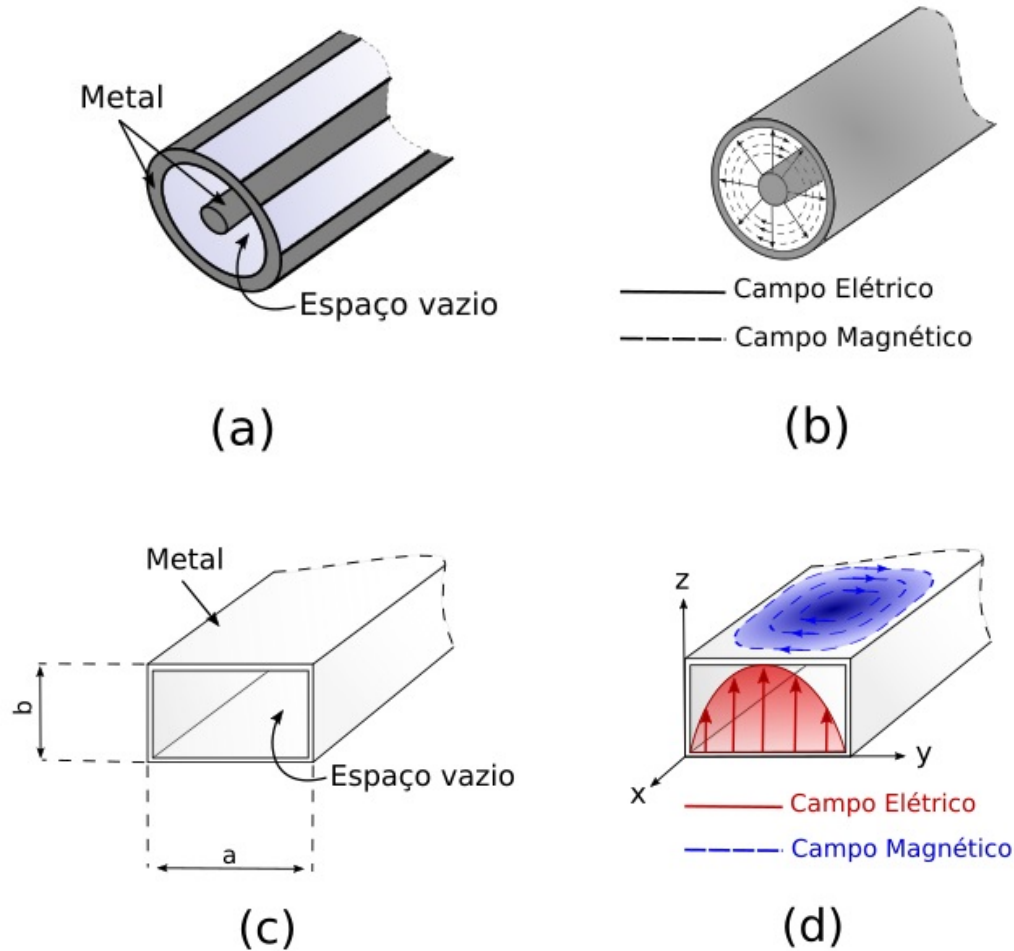
A linha de transmissão é utilizada para fazer com que uma onda eletromagnética propague-se em um ambiente confinado, surgindo então a necessidade de uma teoria para entender tal propagação. Sendo assim, nasce a teoria da linha de transmissão, a qual é a junção da teoria do electromagnetismo e da teoria de circuitos elétricos, sendo a ponte entre as duas teorias a linha de transmissão. Desse modo, a linha de transmissão pode ser modelada na forma de circuitos elétricos equivalentes, podendo-se aplicar a lei de Kirchhoff para desenvolver uma equação de propagação de onda eletromagnética (ULABY et al., 2010).

De forma geral, uma linha de transmissão é um meio condutor que pode ligar duas portas de um analisador de rede vetorial (do inglês, Network analyzer - VNA), onde cada porta contém um terminal. As linhas de transmissões mais famosas são as linhas de guia de onda retangular ou cabo coaxial. Os cabos coaxiais são classificados como linhas de transmissões eletromagnéticas transversais os quais possuem modo de propagação TEM ⁶, já os guias de ondas retangulares são classificados como linhas de transmissão de ordem superior e apresentam modo de propagação TE ⁷

⁶TEM - São as ondas não guiadas, apresentam campos elétrico e magnético perpendiculares à direção de propagação da onda

⁷TE - Apresenta campo elétrico perpendicular a propagação e campo magnético na direção de

Figura 1.10 - Representação esquemática do (a) Cabo coaxial com (b) modo de propagação TEM da onda e (c) Guia de onda com (d) modo de propagação TE_{10} da onda



Fonte: (Autor)

ou TM^8 (ULABY et al., 2010). Na Figura 1.10 é apresentado uma comparação do modo de propagação da onda em guia de onda retangular e cabo coaxial. Nesta tese, a caracterização eletromagnética foi adotada por guia de onda.

Os guias de onda podem ser usados apenas em uma faixa de frequência, logo o guia selecionado depende da frequência de trabalho desejada (BAKER-JARVIS, 1990). A

propagação da onda

⁸TM - Apresenta campo magnético perpendicular a propagação e campo elétrico na direção de propagação da onda

Tabela 1.1 - Frequência de corte para guias de onda retangulares

WR - ()	Banda	f_c (GHz)
650	L	0,908
430	W	1,372
284	S	2,078
187	C	3,152
90	X	6,557
42	K	14,047
22	Q	26,342

chamada frequência de corte (f_c) (do inglês, *cutoff frequency*) é definida como uma estreita faixa de frequência em que a onda pode ser transmitida no guia com apenas um modo de propagação, evitando a presença de modos de propagação simultâneos. A Tabela 1.1 lista várias frequências de corte para vários guias de onda retangulares (ULABY et al., 2010). A frequência de corte para guias retangulares com modo de propagação TE e TM podem ser calculadas de acordo com a Equação 1.47.

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu'\epsilon'}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1.47)$$

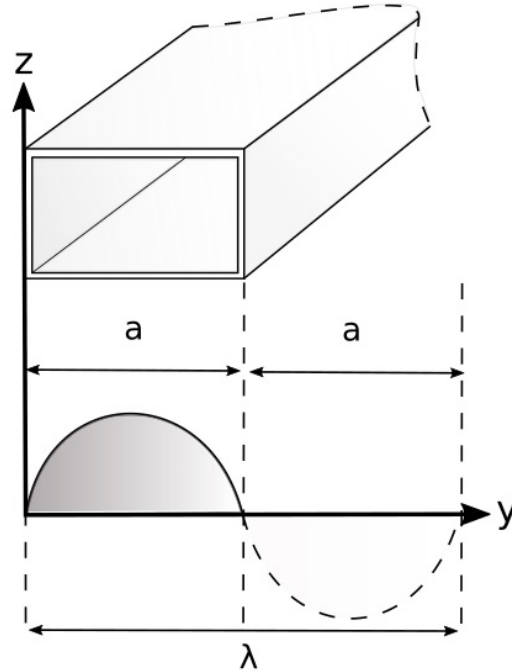
Onde a é a dimensão maior do guia de onda, b é a dimensão menor do guia e m e n assumem valores inteiros (0,1,2...). Nesta tese, o modo de propagação trabalho foi o TE_{10} , que através da Equação 1.47 pode ser resumida como:

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (1.48)$$

O modo de propagação da onda TE_{10} da Equação 1.48 está representado na Figura 1.11.

As equações de onda utilizadas para definir a teoria de linha de transmissão são definidas a partir da corrente e voltagem do aparelho fonte, no caso, o VNA. Contudo, uma vasta quantidade de equação são necessárias para obter expressões importantes como *impedância da linha*, *equação da propagação de onda dentro do guia*, *impedância da onda* e *coeficiente de reflexão guiado*. Por esse razão, as explicações, deduções e equações foram introduzidas no *Apêndice A* desta tese.

Figura 1.11 - Representação esquemática do modo de propagação TE_{10} da onda em um guia de onda retangular



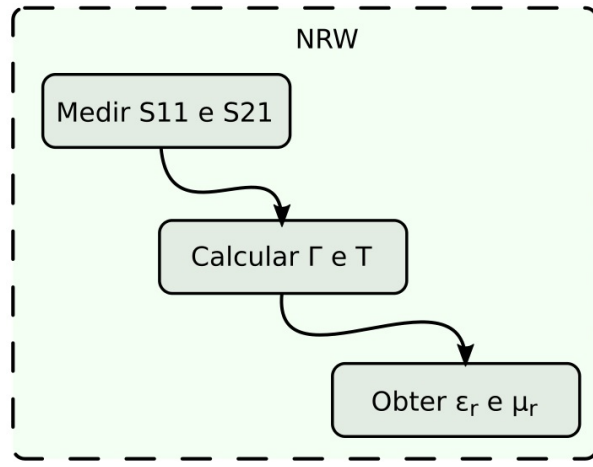
Fonte: (Autor)

1.2.4 Obtenção dos Parâmetros Constitutivos Através do Método de Nicolson Ross Weir - NRW

Através das medidas dos parâmetros-S é possível obter a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética dos materiais. O método utilizado para obter tais parâmetros constitutivos é o *Nicolson Ross Weir* (NRW), que também é chamado de *Método de Transmissão e Reflexão*. Basicamente, calcula-se o coeficiente de transmissão e reflexão através dos parâmetros-S medidos, então se extrai as permissividades e permeabilidades do material através dos coeficientes adquiridos (Figura 1.12).

Assim, o método consiste em utilizar uma amostra inserida dentro do guia de onda (ou cabo coaxial), o qual está conectado à duas portas, e fazê-la interagir com uma onda eletromagnética incidente originada da porta 1, colendo o sinal refletido e transmitido pelas porta 1 e 2 respectivamente, veja Figura 1.13 (BAKER-JARVIS, 1990). Através das regiões 1, 2 e 3 (Figura 1.13), é possível obter três equações de dispersão para o campo elétrico. Assumindo que o campo elétrico E_1 , E_2 e E_3

Figura 1.12 - Fluxograma Resumido do Método NRW



Fonte: (Autor)

dentro do guia de onda tenha modo de propagação TE_{10} a distribuição espacial para o campo elétrico por uma onda incidente fica:

$$E_1 = e^{-\gamma_0 x} + C_1 e^{\gamma_0 x} \quad (1.49)$$

$$E_2 = C_2 e^{-\gamma x} + C_3 e^{\gamma x} \quad (1.50)$$

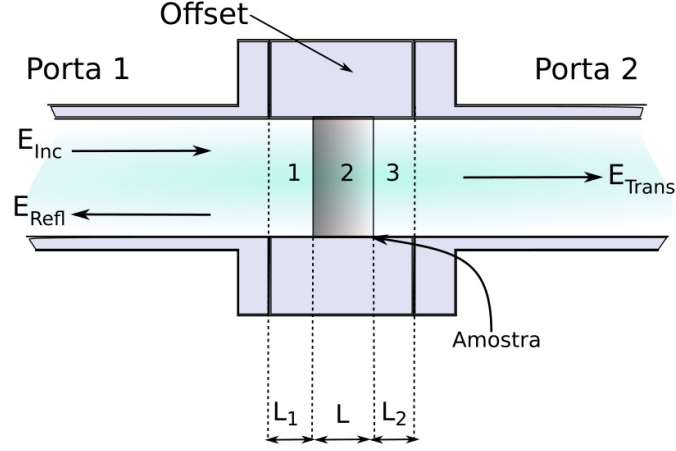
$$E_3 = C_4 e^{-\gamma_0 x} \quad (1.51)$$

Onde:

$$\gamma_0 = 2\pi j \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} \quad (1.52)$$

$$\gamma = \frac{2\pi j}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2}} \quad (1.53)$$

Figura 1.13 - Uma amostra em uma linha de transmissão interagindo com um campo elétrico incidente



Fonte: (Autor)

As constantes C_i são determinadas pelas condições de contorno. Já γ e γ_0 representam as constantes de propagação da onda no vácuo e no material, $j = \sqrt{-1}$, λ é o comprimento de onda e λ_c comprimento de onda de corte do guia ($\lambda_c = \frac{c}{f_c}$, onde f_c está representado na Tabela 1.1), ϵ_r e μ_r são as permissividade e permeabilidade relativa do vácuo (BAKER-JARVIS, 1990).

Para um dispositivo de duas portas, a expressão do parâmetros de espalhamento medidos podem ser obtidos resolvendo as Equações 1.49 - 1.51. A expressão explícita é dado por:

$$S_{11} = R_1^2 \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (1.54)$$

$$S_{21} = R_1 R_2 \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (1.55)$$

$$R1 = e^{-\gamma_0 L1} \quad (1.56)$$

$$R2 = e^{-\gamma_0 L2} \quad (1.57)$$

$$\Gamma = \frac{\frac{\gamma_o}{\mu_o} - \frac{\gamma}{\mu}}{\frac{\gamma_o}{\mu_o} + \frac{\gamma}{\mu}} \quad (1.58)$$

$$T = e^{-\gamma L} \quad (1.59)$$

Onde L1 e L2 são as distâncias dos planos de calibração com referência à amostra (Figura 1.13), R1 e R2 são as expressões utilizadas para ajustar o plano de referência de S11 e S21, Γ e T são os coeficientes de reflexão e transmissão analíticos (BAKER-JARVIS, 1990).

O método de NRW combina as equações de S_{11} e S_{21} para descobrir a permissividade e permeabilidade do material. Esse processo funciona muito bem em frequências onde a espessura da amostra não é múltiplo de um quarto do comprimento de onda. O método inicia-se calculando o coeficiente de reflexão pelos parâmetros-S obtidos. Contudo, o coeficiente de reflexão expressado pelo método NRW é definido em função dos parâmetros-S:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (1.60)$$

Onde K é expressado em termo dos parâmetros-S:

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (1.61)$$

O sinal correto para se utilizar na Equação 1.60 é aquele em que a raiz dê $|\Gamma| \leq 1$. O coeficiente de transmissão é dado pelo método de NRW é:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (1.62)$$

Assim, a permeabilidade do material é representada como:

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda_o^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (1.63)$$

Onde o termo Λ equivale a:

$$\Lambda = j \frac{L}{2\pi L n(T^{-1})} \quad (1.64)$$

Por fim, a permissividade é dada como:

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_o}{\mu_r} \left[\frac{1}{\lambda_c^2} \left[\frac{1}{2\pi L} L n(T^{-1}) \right]^2 \right] \quad (1.65)$$

Deste modo, se o objetivo for calcular tanto a permissividade e permeabilidade de um material, o método de NRW (ou método da transmissão e reflexão) deve ser utilizado. Contudo, este método é utilizado para materiais homogêneos, isotrópicos e dielétricos.

É de grande importância saber que o método NRW pode gerar instabilidades nos valores da permissividade em função da frequência quando um dos parâmetros S (S_{11} e S_{21}) apresentarem valores próximos de zero. Para esse tipo de problema dois métodos podem ser utilizados, o método da reflexão e da transmissão (GONÇALVES, 2012). O método de reflexão deverá ser utilizado quando a amostra apresentar valores de S_{21} próximos de zero, ou seja, um material que reflete a onda incidente. Já o método de transmissão é utilizado quando os valores de S_{11} são próximos de zero, ou seja, um material transparente a onda incidente.

No Apêndice C desta Tese é mostrado a rotina de cálculos utilizando o método de NRW através dos parâmetros- S . Os cálculos foram realizados através dos parâmetros- S obtidos de uma amostra de teflon. O teflon foi escolhido por ser um material isotrópico, sendo assim, os valores teóricos e os experimentais apresentam grande aproximação.

2 Equipamento e métodos de extração dos parâmetros-S

2.1 Analisador de Rede Vetorial - VNA

Uma das medidas mais importantes na engenharia de rádio-frequência envolve as análises de circuitos, que com algumas adaptações teóricas, explicadas no Capítulo 2, também podem ser obtidas informações dos parâmetros constitutivos dos materiais. Um analisador de rede vetorial (do inglês, *vectorial network analyzer* - *VNA*) é um instrumento que é designado para lidar com esse tipo de trabalho com grande precisão e eficiência (HIEBEL, 2007).

Sendo assim, os parâmetros constitutivos dos corpos de provas foram estudados na faixa de frequência de 8,2 - 12,4 GHz (banda-x) através da conexão VNA / Cabo / Guia de onda Retangular, como mostrado na Figura 2.1. O guia de onda retangular usado para essa finalidade foi o WR-90 (X11644A Agilent ¹) com o seu respectivo cabo coaxial flexível 7mm (85132F - Agilent) de 50Ω com conexão APC-7 na extremidade. Nas Tabelas 2.1 e 2.2 são mostrados outros guias de onda retangulares com outros cabos coaxiais.

¹A empresa Agilent Technologies atualmente é conhecida como Keysight Technologies

Figura 2.1 - Foto do VNA da Agilente modelo N5232A



Fonte: (Autor)

Tabela 2.1 - Dimensões e frequência de trabalho para guias de onda retangulares.

WR - ()	Banda	a (cm)	b (cm)	Faixa de Frequência (GHz) TE_{10}
650	L	16,51	8,25	1,12-1,7
430	W	10,92	5,461	1,7-2,6
284	S	7,71	3,40	2,6-3,95
187	C	4,75	2,214	3,95-5,85
90	X	2,28	1,01	8,2-12,4
42	K	1,067	0,432	18-26,5
22	Q	0,569	0,284	33,50

Tabela 2.2 - Cabos coaxiais para conectar VNA ao guia de onda

Dimensão Cabo Coaxial (mm)	Faixa de Frequência (GHz)
3,5	0 - 34,5
7,0	0-18,2
14,0	0-8,6

2.1.1 Calibração do VNA - Kit WR-90 X11644A

A calibração do VNA deve ser sempre realizada a fim de se obter bons parâmetros-S. Apesar do VNA ser um receptor altamente linear e com pureza espectral suficiente em suas fontes para fazer medições, existe uma série de imperfeições que limitam as medições, como, casamento de impedância (match), diretividade, frequência e conexões físicas (KEYSIGHT, 2012). De todas essas imperfeições, a conexão física, que envolve cabo, VNA e guia de onda, é a mais sentida pelo aparelho. Assim, quando uma dessas conexões estiverem mal conectadas, o aparelho poderá apresentar falhas nas medições dos parâmetros-S. Desse modo, após ajustar as conexões uma nova calibração deverá ser realizada. Uma maneira fácil de verificar se um VNA está calibrado com o respectivo kit é através da Carta de Smith ².

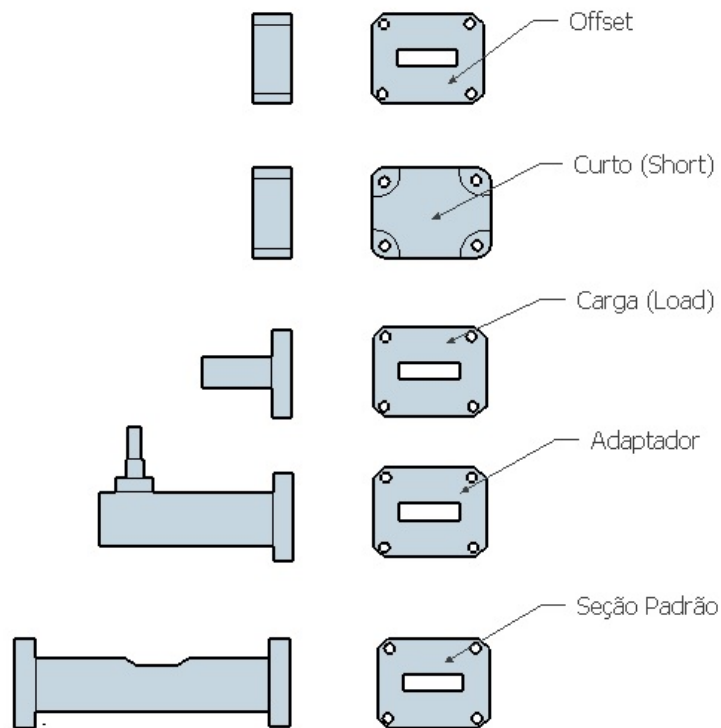
No caso desta Tese foi utilizado um kit WR-90 X11644A (Banda-X) para realizar as medidas. Na Figura 2.2 são mostrados os componentes necessários para realizar a calibração e as medições dos parâmetros-S. Os componentes do Kit Wr-90 são: Offset (ou $\lambda/4$), Carga (do inglês *Load*), Curto (do inglês *Short*), Seção Padrão e Adaptador:

- a) Curto - Reflete toda onda incidente numa das portas.

²Carta de Smith é um tipo de gráfico criado no tempo em que começaram a ser utilizados os Radares em larga escala e que serve para calcular características de Linhas de transmissão tais como Impedância, Transmissão e Reflexão de ondas, entre outros parâmetros. (WIKIPEDIA, 2013)

- b) Carga - Atenua toda onda incidente numa das portas.
- c) Seção Padrão - É utilizada para checar o funcionamento do sistema após a calibração. Também tem a função de alinhar os cabos.
- d) Offset - Seção que é introduzida a amostra.

Figura 2.2 - Representação esquemática dos conjuntos de guias do kit WR-90



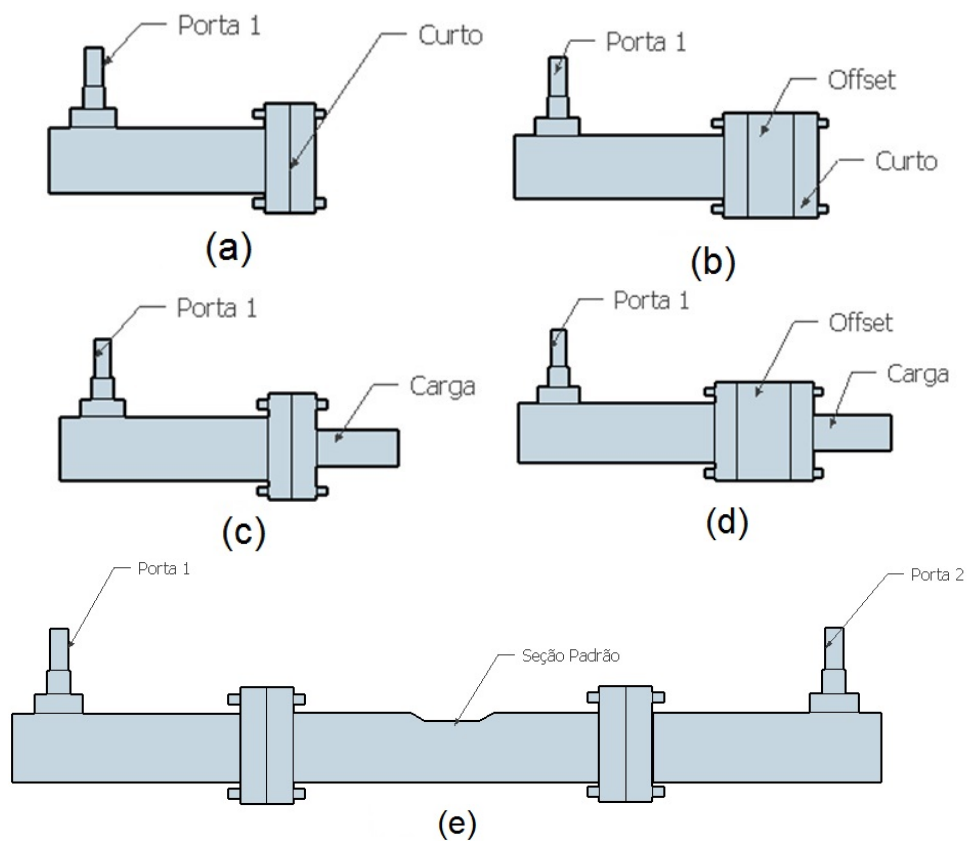
Fonte: (Autor)

Para se obter uma boa calibração o método dos nove passos é de grande importância. O método dos nove passos é mostrado na Figura 2.3. A sequência da calibração é mostrado abaixo:

- a) Passo 1 - Porta 1 e Curto
- b) Passo 1 - Porta 2 e Curto
- c) Passo 1 - Porta 1 com Offset e Curto

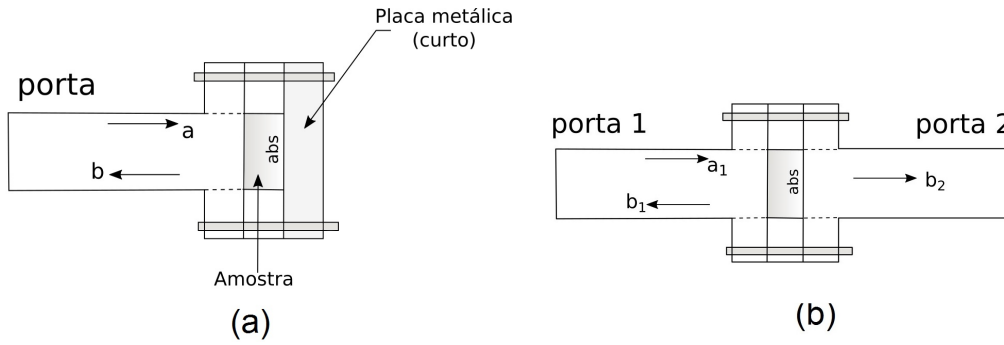
- d) Passo 1 - Porta 2 com Offset e Curto
- e) Passo 1 - Porta 1 e Carga
- f) Passo 1 - Porta 2 e Carga
- g) Passo 1 - Porta 1 com Offset e Carga
- h) Passo 1 - Porta 2 com Offset e Carga
- i) Passo 1 - Porta 1 com Seção Padrão e Porta 2

Figura 2.3 - Representação esquemática da calibração por nove passos utilizando o Kit WR-90. (a) Porta 1 (e Porta 2) e Curto (b) Porta 1 (e Porta 2), Offset e Curto (c) Porta 1 (e Porta 2) e Carga (d) Porta 1 (e Porta 2), Offset e Carga e (e) Porta 1, Seção Padrão e Porta 2



Fonte: (Autor)

Figura 2.4 - Kit wr-90 utilizado para medir (a) Refletividade e (b) Parâmetro S.



Fonte: (Autor)

2.1.2 Medidas da Reflexão, Permissividade e Permeabilidade

Para realizar a medida da reflexão é necessário utilizar apenas uma porta e introduzir atrás da amostra uma placa metálica (curto), veja Figura 2.4 (a). Através dessa medida foi possível obter a atenuação da onda durante a interação com a amostra³. Na Figura 2.4 (a), o termo a representa a onda incidente, b a onda refletida e abs representa a parcela atenuada. Desse modo é possível calcular a porcentagem da onda atenuada pela amostra durante a interação. A onda incidente equivale a soma da onda refletida mais a parcela que foi atenuada, logo:

$$a = b + abs \quad (2.1)$$

Ainda é possível definir o coeficiente de atenuação da amostra ($A = abs/a$), fazendo a divisão dos termos pela onda incidente e utilizando a Equação 1.41:

$$1 = \frac{b}{a} + \frac{abs}{a} \rightarrow A = 1 - |\Gamma| \quad (2.2)$$

Já na Figura 2.4 (b) é utilizada uma configuração com duas portas (porta 1 e 2), que possibilita ter também transmissão da onda incidente. Nessa medida são

³Na Figura 2.4 (a) a atenuação sempre será maior por não existir possibilidade de transmissão da onda, diferente da Figura 2.4 (b) por esse motivo a medida com curta atrás da amostra é necessária. Esse ganho na atenuação é devido a onda ser totalmente refletida para o material absorvedor, maximizando o efeito sob a onda, além de representar melhor uma possível aplicação, como por exemplo: um avião revestido pelo material produzido

obtidos os parâmetros-S (veja Figura 1.9 (a)), os quais utilizando os coeficiente de reflexão (S_{11}) e transmissão (S_{21}) aplicados ao método de Nicolson Ross Weir(NWR) possibilitam a obtenção dos valores ϵ e μ .

Portanto, através dos parâmetros-S, foi utilizado um software específico (85071E - Agilent) baseado no método de NRW. Com a aplicação do método de NRW nas medidas do parâmetro-S, obtêm-se as componentes reais e imaginárias do ϵ e μ . Estes valores são imprescindíveis para saber como o material reage aos campos da onda eletromagnética, pois possuem informações a respeito da capacidade de armazenar e dissipação de energia. A parte real (ϵ' e μ') estão ligadas ao armazenamento, já a parte imaginária (ϵ'' e μ'') a dissipação da energia (FOLGUERAS et al., 2010).

3 Programa - NRW

3.1 Pré-Requisitos

Para executar a rotina é necessário ter disponível um computador com sistema operacional Linux, Windows ou OS instalado. A linguagem de programação utilizada para criar o programa foi o Python versão 2.7. Também foi necessário utilizar bibliotecas complementares como: numpy versão 1.3.0, scipy versão 0.10 e matplotlib.pyplot versão 1.2.0.

3.2 Script

```
# coding: utf-8

from __future__ import division
import os
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

x = 6
y = 6

fonte = 14

skip_point = 30

#-----LER ARQUIVO TXT NA PASTA-----
TXT = []

for arquivo in os.listdir('.'):
    if arquivo[len(arquivo)-4:] == '.txt':
        TXT.append(arquivo)

print '\nArquivo: ',TXT[0]

arq = open(TXT[0],'r')
ler = arq.readlines()
arq.close()
#-----

#-----Ajuste da Referencia de L1 e L2-----
#Offset = 9.76mm
#L1, L2 e L = d....importante ser bem denifido

d = 5.1e-3 #[m] #Espessura da amostra (Livro chama de L)

L1 = 0e-3 #[m] #Plano de referencia porta 1
L2 = 9.76e-3 - d #[m] #Plano de referencia porta 2

a = 22.86e-3 #[m] #Dimensao maior do guia de onda
(Banda-X)
#-----

#-----Permissividade e Permeabilidade (Chute)-----

e_a = 2.04 - 0.0j #Analitico teflon
u_a = 1.0 - 0.0j #Analitico teflon
```

```

#-----

#----- CONSTANTES-----
c = 2.998e8 #[m/s] #velocidade da Luz no vacuo

u0=4*np.pi*1e-7 # permeabilidade do vacuo

freq_corte = 6.56e9 # [Hz]

onda_cut= c/freq_corte #[m] #lambda de corte
#-----

#-----VETORES-1-----
F=[] #frequencia [Hz] DE CALCULO
F_grafic=[] #FREQUENCIA PARA PLOTAR EM [GHz]

s11r=[] #real
s11i=[] #imag
s21r=[] #real

s21i=[] #imag

s11=[] # real + j imag
s21=[] # real + j imag

s11c=[] # real + j imag (Corrigido)
s21c=[] # real + j imag (Corrigido)

s11c_teorico=[] # real + j imag (Corrigido)
s21c_teorico=[] # real + j imag (Corrigido)

#-----

#-----ORGANIZAR PARAMETROS-S em VETOR-----

ler1_col=1 #S11r
ler2_col=2 #S11i
ler3_col=5 #S21r
ler4_col=6 #S21i

```

```

'''
#Caso eu queira usar o S12 e S22 tenho que alterar o:
#s11c_colocar = R2*R2*s11_colocar
#s21c_colocar = R2*R1*s21_colocar

ler1_col=7 #S22r
ler2_col=8 #S22i
ler3_col=3 #S12r
ler4_col=4 #S12i
'''

for i in range(0,len(ler)):

    dados = ler[i].split(',')

    #Ler frequencia
    f_colocar = float(dados[0]) #Hz

    F.append(f_colocar)

    #-----Organizar os PAR-S-----
    s11r.append(float(dados[ler1_col]))#real

    s11i.append(float(dados[ler2_col]))#imag
    s21r.append(float(dados[ler3_col]))#real
    s21i.append(float(dados[ler4_col]))#imag

    s11_colocar = s11r[i]+1j*s11i[i] # real + j imag
    s21_colocar = s21r[i]+1j*s21i[i] # real + j imag

    s11.append(s11_colocar) #add vetor s11
    s21.append(s21_colocar) #add vetor s21
    #-----

    #-----AJUSTAR PARAMETROS - S
    EXPERIMENTAIS-----
    #lambda zero = comprimento de onda no vacuo
    onda = c/F[i] # [m]

    #Constante de propagacao da onda no espaco livre
    gama0 = (2j*np.pi)*np.sqrt((1.0)/(onda**(2.0))-(1.0)/
(onda_cut**(2.0)))

    #Coeficiene para Ajustar os Planos de Referencia da
    porta 1 e 2
    R1 = np.exp(1*gama0*L1) #constantes
    R2 = np.exp(1*gama0*L2) #constantes

    #Ajustar S11 e S21

```



```

s11c_colocar = R1*R1*s11_colocar
s21c_colocar = R2*R1*s21_colocar

...
# LEMBRE-SE DE ALTERAR QUANDO FOR USAR s12 e
S22
#s11c_colocar = R2*R2*s11_colocar #S22
#s21c_colocar = R2*R1*s21_colocar #S12
...

#Add S11 e S21 Corrigido
s11c.append(s11c_colocar) #s11 novo
s21c.append(s21c_colocar) #s21 novo
#-----

#-----Calcular Par-S Teorico-----
#Constante de propagacao da onda no material
gamaX = (2j*np.pi/onda)*np.sqrt(e_a*u_a-(onda**2.0)/
(onda_cut**2.0))

#Impedancia Analitica do Vacuo
z_a0= (1j*u0**2*np.pi*f_colocar)/(gama0)

#Impedancia Analitica do MATERIAL (Normalizada)

...

z_ma = ((1j**2*np.pi*f_colocar*u_a*u0)/(gamaX))/(z_a0)
#z_a0 normliza

#Coeiciente de Reflexao Analitico
Ca = (z_ma-1)/(z_ma+1)

#Coeficiente de transmissao Analitico
ta = np.exp(-gamaX*d)

#Calcular S11 e S21 Teorico e Corrigir
s11c_colocar_teorico = R1*R1*((Ca*(1-ta**2))/(1-
(Ca**2)*(ta**2)))
s21c_colocar_teorico = R2*R1*((ta*(1-Ca**2))/(1-
(Ca**2)*(ta**2)))

...
# LEMBRE-SE DE ALTERAR QUANDO FOR USAR s12 e
S22
#s11c_colocar_teorico = R2*R2*((Ca*(1-ta**2))/(1-
(Ca**2)*(ta**2))) #S22
#s21c_colocar_teorico = R2*R1*((ta*(1-Ca**2))/(1-
(Ca**2)*(ta**2))) #S12
...

#Add S11 e S21 Teorico Corrigido
s11c_teorico.append(s11c_colocar_teorico)

```

```

s21c_teorico.append(s21c_colocar_teorico)

F_grafic.append(f_colocar/1e9)
#-----

#----- Modulo de S11 e S21 (Prova real) -----

S11_mod_c=[] #Experimental Corrigido
S21_mod_c=[] #Experimental Corrigido

S11_mod=[] # Experimental sem corrigir
S21_mod=[] # Experimental sem corrigir

S11_mod_c_teorico =[] #Teorico Corrigido
S21_mod_c_teorico =[] #Teorico Corrigido

for i in range(0,len(s11)):

    S11_mod_c.append(abs(s11c[i]))# Exp Corrigido
    S21_mod_c.append(abs(s21c[i]))# Exp Corrigido


    S11_mod.append(abs(s11[i])) #Exp sem corrigir
    S21_mod.append(abs(s21[i])) #Exp sem corrigir

    S11_mod_c_teorico.append(abs(s11c_teorico[i]))
    #Teorico Corrigido
    S21_mod_c_teorico.append(abs(s21c_teorico[i]))
    #Teorico Corrigido

#-----PLOTE LINEAR MAG: TEORICO X EXP (AMBOS
AJUSTADOS)-----
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,S11_mod_c,'go',label
="s11_linear_Exp",alpha=0.5,markevery=skip_point)
plt.plot(F_grafic,S21_mod_c,'bo',label="s21_linear_Exp",alp
ha=0.5,markevery=skip_point)

plt.plot(F_grafic,S11_mod_c_teorico,'c-', linewidth=2,label
="s11_Theoric")
plt.plot(F_grafic,S21_mod_c_teorico,'r-',
linewidth=2,label="s21_Theoric")

plt.xlim(8.2,12.4)
plt.ylim(0,1.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)

```

```

plt.ylabel("S11,S21 Linear(a.u)",fontsize = fonte)

#plt.legend(loc ='center
right').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.legend(loc =1).get_frame().set_facecolor('0.95')
#plt.title("LINEAR MAG")
plt.savefig(u'Grafico_1.jpg')
plt.show()

#-----

#-----VETORES-2-----

s11_ph =[] #EXP Fase CORRIGIDA
s21_ph =[] #EXP Fase CORRIGIDA

s11_ph_t =[] #TEO Fase CORRIGIDA
s21_ph_t =[] #TEO Fase CORRIGIDA

s11_db =[] #S11 EXP em dB CORRIGIDO
s21_db =[] #S21 EXP em dB CORRIGIDO

s11_db_t =[] #S11 TEO em dB CORRIGIDO
s21_db_t=[] #S21 TEO em dB CORRIGIDO

s11_db_t =[] #S11 TEO em dB CORRIGIDO
s21_db_t =[] #S21 TEO em dB CORRIGIDO

sum = [] # somatorio -> sum = |s11|**2 + |s21|**2
A =[] #absorvance
R = [] #reflectance
TRANS = [] #Transmtance

Z_a0 =[] #impedancia analitica vacuo
Z_ma = [] #impedancia analitica do material
Z_m = [] #impedancia calculada do material
Z_nrw =[] #impedancia NRW

T =[] #coeficiente de transmissao dos Par-S
T_a =[] #coef de Transmissao analitico

Cvetor =[] #coeficiente de reflexao dos Par-S
Cvetor_a = [] #coeficiente de reflexao analitico

er_r = [] #permissividade real
er_i = [] #'''''''''''''''' imag

```



```

s11_db.append(s11_db_calc)
s21_db.append(s21_db_calc)
#-----

#----- dB TEO-----
#Transformar S11 S21 para dB
s11_db_calc = 20*np.log10(abs(s11c_teorico[n]))
s21_db_calc = 20*np.log10(abs(s21c_teorico[n]))

#add no vetor DB
s11_db_t.append(s11_db_calc)
s21_db_t.append(s21_db_calc)
#-----

#-----FASE EXP-----
#Calcular fase em radianos (conta basica de vetor)

#Essa Funcao e usada em numeros reais imaginarios
contínuos.... (DICA BARROSO)
s11_ph_calc = np.arctan2(s11c[n].imag,s11c[n].real) #
Para numeros complexos usar a sintaxe np.tan2(imag,real)

s21_ph_calc = np.arctan2(s21c[n].imag,s21c[n].real) #
Para numeros complexos usar a sintaxe np.tan2(imag,real)

# Essa funcao e usada para numeros REAIS
(ISOLADAS)
s11_ph_calc = np.arctan(s11c[n].imag/s11c[n].real)
s21_ph_calc = np.arctan(s21c[n].imag/s21c[n].real)

#Converter rad para graus
s11_ph_calc_grau = 360.0*s11_ph_calc/(2.0*np.pi)
s21_ph_calc_grau = 360.0*s21_ph_calc/(2.0*np.pi)

#add no vetor da phase
s11_ph.append(s11_ph_calc_grau)
s21_ph.append(s21_ph_calc_grau)
#-----

'''
#NAO BATE...
#-----FASE TEO-----
#Calcular fase em radianos (conta basica de vetor)

#Essa Funcao e usada em numeros reais imaginarios
contínuos.... (DICA BARROSO)
s11_ph_calc_t =
np.arctan2(s11c_teorico[n].imag,s11c_teorico[n].real) #
Para numeros complexos usar a sintaxe np.tan2(imag,real)

```

```

s21_ph_calc_t =
np.arctan2(s21c_teorico[n].imag,s21c_teorico[n].real) #
Para numeros complexos usar a sintaxe np.tan2(imag,real)

# Essa funcao e usada para numeros REAIS
(ISOLADAS)
# s11_ph_calc = np.arctan(s11c[n].imag/s11c[n].real)
#s21_ph_calc = np.arctan(s21c[n].imag/s21c[n].real)

#Converter rad para graus
s11_ph_calc_grau_t = 360.0*s11_ph_calc_t/(2.0*np.pi)
s21_ph_calc_grau_t = 360.0*s21_ph_calc_t/(2.0*np.pi)

#add no vetor da phase
s11_ph_t.append(s11_ph_calc_grau_t)
s21_ph_t.append(s21_ph_calc_grau_t)
#-----
'''

#----- ABSORBANCE =1 - TRANSMITTANCE -
REFLECTANCE---
reflectance = abs(s11c[n])**2
transmittance = abs(s21c[n])**2
absorvance = 1.0 - reflectance - transmittance


#add vetor A,TRANS and R
A.append(absorvance)
TRANS.append(transmittance)
R.append(reflectance)
#-----

#-----SUM-----
# Isso mostra as perdas
soma = reflectance + transmittance

#add vetor sum
sum.append(soma)
#-----

#-----NRW PAR-S-----
#OBS: SE EU USAR O s11c[n] e s21c[n] daqui pra
baixo da problema!!!!

#frequencia
f = F[n]

```

```

#lambda zero = comprimento de onda no vacuo
onda = c/(f) # [m]

#Constante de propagacao da onda no espaco livre
gama0 = (2j*np.pi)*np.sqrt((1.0)/(onda**(2.0))-(1.0)/(onda_cut**(2.0)))

#Constante de propagacao da onda no
material(analitico)
gamaX = (2j*np.pi/onda)*np.sqrt(e_a*u_a-(onda**(2.0)/(onda_cut**(2.0)))

#impedancia Analitica do Vacuo(za0)
z_a0= (1j*u0*2*np.pi*f)/(gama0)

Z_a0.append(z_a0)

#impedancia analitica do material (zma)
z_ma = ((1j*2*np.pi*f*u_a*u0)/(gamaX))/(z_a0) #z_a0
normliza

Z_ma.append(z_ma.real)

#impedancia do material calculada com par-S (zm)
#IGUAL DO NRW
z_m = np.sqrt(((1+s11c[n])**2-s21c[n]**2)/((1-s11c[n])**2-s21c[n]**2)))

Z_m.append(z_m.real)

#coeficiente de transmissao Calculado
t = s21c[n]/(1-s11c[n]*((z_m-1)/(z_m+1)))

T.append(abs(t))

#Coeficiente de transmissao Analitico
ta = np.exp(-gamaX*d)

T_a.append(abs(ta))

#Valor K
K = ((s11c[n]**(2.0)-(s21c[n]**(2.0)+1)/(2*s11c[n]))

#Coeficiente de reflexao Par-S

```

```

#positivo
C_p = K + np.sqrt(K**2-1)
#negativo
C_n = K - np.sqrt(K**2-1)
#condicao para valor do sinal do coeficiente de
reflexao
if C_p < 1:
    sinal = 1
elif C_n <= 1:
    sinal = -1
#coeficiente de reflexao com sinal ok
C = K+sinal*(np.sqrt(K**2-1))

Cvetor.append(abs(C))

#velocidade da luz no guia
c_lab = f/onda_cut

#Coeficiente de reflexao Analitico
#C_analitico = ((gama0)/(u0)-(gamaX)/(u_a))/
((gama0)/(u0)+(gamaX)/(u_a))
#C_analitico = (((c)/(c_lab))*np.sqrt((u_a)/(e_a))-1)/
(((c)/(c_lab))*np.sqrt((u_a)/(e_a))+1)
C_analitico = (z_ma-1)/(z_ma+1)

Cvetor_a.append(abs(C_analitico))

#constante P
P2=-((1.0)/(2*np.pi*d)*np.log(1.0/t))**2
P=1.0/np.sqrt(P2)

#constante Lamb
lamb = np.sqrt((1.0)/(onda)**(2)-(1.0)/(onda_cut)**(2))

#impedancia NRW (z_nrw) #IGUAL AO Z CALCULADO
COM PAR-S (z_m)
z_nrw = (1+C)/(1-C)
Z_nrw.append(z_nrw.real) #somente real

#Permeabilidade NRW
#ux = ux = z_nrw/(P*lamb)
ux = ux = z_m/(P*lamb) #poco melhor com z_m

ur_r.append(ux.real)
ur_i.append(ux.imag)
ur_abs.append(abs(ux))

```



```

#Permissividade NRW
ex = ((onda)**(2)/ux)*((1.0)/(onda_cut)**2-((1)/(
(2*np.pi*d)*np.log(1.0/t))**2)

#ex = ((onda)**(2)/abs(ux))*((1.0)/(onda_cut)**2-((1)/(
(2*np.pi*d)*np.log(1.0/t))**2) #abs(ux)

er_r.append(ex.real)
er_i.append(-1*ex.imag)
er_abs.append(abs(ex))
#-----

#-----NRW - Analitico-----

#constante P (ANALITICO)
P2_a=-((1.0)/(2*np.pi*d)*np.log(1.0/ta))**2
P_a=1.0/np.sqrt(P2_a)

#Permeabilidade NRW sem par-S
ux_a = z_ma/(P_a*lamb)

ur_ra.append(ux_a.real)
ur_ia.append(-1*ux_a.imag)
ur_absa.append(abs(ux_a))

#Permissividade NRW sem par-S

ex_a = ((onda)**(2)/ux_a)*((1.0)/(onda_cut)**2-((1)/(
(2*np.pi*d)*np.log(1.0/ta))**2)
er_ra.append(ex_a.real)
er_ia.append(-1*ex_a.imag)
er_absa.append(abs(ex_a))

#-----Calculo do Coeficiente de Reflexao com Curto
- TEORICO-----

np.seterr(divide='ignore', invalid='ignore')
# Zin teorico com curto
#zin_a =
(1j*(u_a/e_a)**(1.0/2.0))*np.tan((2*np.pi*f*d)*((u_a*e_a)**(1
.0/2.0))) #CERTO,mas buga a escala
zin_a =
(1j*(u_a/e_a)**(1.0/2.0))*np.tanh((2*np.pi*d/onda)*((u_a*e_
a)**(1.0/2.0)))

Zin_a.append(abs(zin_a))

#Coeficiente de Reflexao com curto
C_curto_a = (zin_a-1)/(zin_a+1)

Cvetor_curto_a.append(abs(C_curto_a))

```

```

#-----Calculo do Coeficiente de Reflexao com Curto
- EXPERIMENTAL (S11 e S21)-----
#Precisa calcular o NRW e obter o e and mu
experimental
# Zin teorico com curto
zin =
(1j*(ux/ex)**(1.0/2.0))*np.tan((2*np.pi*d/onda)*((ux*ex)**(1
.0/2.0)))

Zin.append(abs(zin))

#Coeficiente de Reflexao com curto
C_curto = (zin-1)/(zin+1)

Cvetor_curto.append(abs(C_curto))

#----- Indice de Refracao calculado-----
inv_onda = ((1j)/(2*np.pi*d))*np.log(t)

n_calc = inv_onda * onda

N.append(n_calc.real)

#-----Indice de Refecao Analitico

#na = np.sqrt(ex*ux) #Para vacuo
na = np.sqrt(e_a*u_a-((onda)/(onda_cut))**2) #guiado

Na.append(na.real)

#-----PLOTES-----

#Plot Modulo em DB
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,s11_db,'ob',label
='s11_experimental',alpha=0.5,markevery=skip_point)
plt.plot(F_grafic,s21_db,"or",label =
's21_experimental',alpha=0.5,markevery=skip_point)

plt.plot(F_grafic,s11_db_t,'c-', linewidth=2,label
='s11_Theoric')

```

```

plt.plot(F_grafic,s21_db_t,'r-',
linewidth=2,label="s21_Theoric")

plt.ylim(-30,2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel("S11,S21 (dB)",fontsize = fonte)
#plt.title("S11 e S21 em dB")
#plt.legend().get_frame().set_facecolor('0.95')
#"upper left"
plt.legend(loc = 'best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_2.jpg')
plt.show()

#Plot Phase em Grau
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,s11_ph,'g-',label = 's11_phase')
plt.plot(F_grafic,s21_ph,'b-',label='s21_phase')

#plt.plot(F_grafic,s11_ph_t,'c-', linewidth=2,label
="s11_Phase_Teorico")

#plt.plot(F_grafic,s21_ph_t,'r-',
linewidth=2,label="s21_Phase_Teorico")

plt.xlim(8.2,12.4)
plt.ylim(-200,200)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel("Fase(Graus)",fontsize = fonte)
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
#plt.title("FASE")
plt.savefig(u'Grafico_3.jpg')
plt.show()

#Plot aborbance, refletance and transmittance
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,A,'-b',label = 'Absorbance')
plt.plot(F_grafic,TRANS,'-r',label = 'Transmittance')
plt.plot(F_grafic,R,'-g',label = 'Reflectance')
plt.ylim(-0.1,1.2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel("A,R,T(a.u)",fontsize = fonte)

```

```

#plt.title("Absorbance, Reflectance and Transmittance")
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_4.jpg')
plt.show()

'''

#Plot Sum
plt.plot(F_grafic,sum,'-b',label ='SOMA DE S11 e S21')
plt.ylim(0,1.2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)")
plt.ylabel("(a.u)")
plt.legend().get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_5.jpg')
plt.show()
'''

#Plot Impedancia
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

#plt.plot(F_grafic,Z_a0,'-b',label ='z_vacuo')
plt.plot(F_grafic,Z_m,'ro',label
='Z_Calc',alpha=0.5,markevery=skip_point) #Iguar (MAS E
MELHOR)
plt.plot(F_grafic,Z_ma,'-g',label ='Z_Teo',linewidth=2)

#plt.plot(F_grafic,Z_nrw,'-y',label ='z_nrw') #igual
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel("Z(a.u)",fontsize = fonte)
#plt.title("Impedance")
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_6.jpg')
plt.show()

#Plot Indice de Refecao
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,N,'ro',label
='$\eta$ _Calc',alpha=0.5,markevery=skip_point)
plt.plot(F_grafic,Na,'-g',label ='$\eta$ _Teo',linewidth=2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel("$\eta$ (a.u)",fontsize = fonte)
#plt.title("Refraction Indice")
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_7.jpg')
plt.show()

```

```

#Plot Coeficiente de Transmissao
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,T,'ro',label
='T_Calc',alpha=0.5,markevery=skip_point)
plt.plot(F_grafic,T_a,'-g',label ='T_Teo',linewidth=2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.ylim(0,1.2)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel("T(a.u)",fontsize = fonte)
#plt.title("Transmission Coeficiente")
plt.legend().get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_8.jpg')
plt.show()

#Plot Coeficiente de Reflexao
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,Cvetor,'ro',label
='$\Gamma$ _Calc',alpha=0.5,markevery=skip_point)

plt.plot(F_grafic,Cvetor_a,'-g',label
='$\Gamma$ _Teo',linewidth=2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.ylim(0,1.2)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel("$\Gamma$(a.u)",fontsize = fonte)
#plt.title("Refletion Coeficiente")
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_9.jpg')
plt.show()

#plot e
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,er_r,'o',label="$\epsilon_{r}$
$_Calc",alpha=0.5,markevery=skip_point)
plt.plot(F_grafic,er_i,'o',label='$\epsilon_{r}$
$_Calc',alpha=0.5,markevery=skip_point)
plt.plot(F_grafic,er_ra,'-',label="$\epsilon_{r}$
$_Teo",linewidth=2)
plt.plot(F_grafic,er_ia,'-',label='$\epsilon_{r}$
$_Teo',linewidth=2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)

```

```

plt.ylabel('$\epsilon_{r}$'+"'",'$\epsilon_{r}$' (a.u)",fontsize
= fonte)
#plt.title("Permissivity")
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_10.jpg')
plt.show()

#plot u
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

plt.plot(F_grafic,ur_r,'o',label = "$\mu_{r}$
$_{Calc}",alpha=0.5,markevery=skip_point )
plt.plot(F_grafic,ur_i,'o',label = '$\mu_{r}$
$_{Calc}',alpha=0.5,markevery=skip_point)
plt.plot(F_grafic,ur_ra,'-',label = "$\mu_{r}$
$_{Teo}",linewidth=2)
plt.plot(F_grafic,ur_ia,'-',label = '$\mu_{r}$
$_{Teo}',linewidth=2)
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.ylabel('$\mu_{r}$'+"'",'$\mu_{r}$' (a.u)",fontsize =
fonte)
#plt.title("Permeability")
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_11.jpg')
plt.show()

'''
#plot e and u modulo
plt.plot(F_grafic,ur_abs,'-',label="ur_abs")
plt.plot(F_grafic,er_abs,'-',label='er_abs')
plt.plot(F_grafic,ur_absa,'-',label="ur_abs_TEORICO")
plt.plot(F_grafic,er_absa,'-',label='er_abs_TEORICO')
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)")

plt.legend().get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_12.jpg')
plt.show()

#plot Zin Teorico Curto
plt.plot(F_grafic,Zin_a,'-',label="Zin_curto_TEORICO")
plt.plot(F_grafic,Zin,'-',label="Zin_curto_EXPERIMENTAL")
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.xlabel("Freq(GHz)")
plt.legend().get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_13.jpg')
plt.show()
'''

```

```

#plot Coeficiente de Reflexao Teorico Curto
fig=plt.figure(num=1,figsize=(x,y))

#plt.plot(F_grafic,Cvetor_curto_a,'-',label="Reflexao_curto_T
EORICO")
plt.plot(F_grafic,Cvetor_curto,'-',label="Refletividade_Calc",li
newwidth=2)
#plt.plot(F_grafic,Cvetor_c,'-',label="Reflexao_curto_EXPERI
MENTAL S11")
plt.xlim(8.2,12.4)
plt.ylim(0,1.2)
plt.ylabel("Refletividade(a.u)",fontsize = fonte)
#plt.title("Refletivity")
plt.xlabel("Freq(GHz)",fontsize = fonte)
plt.legend(loc='best').get_frame().set_facecolor('0.95')
plt.savefig(u'Grafico_14.jpg')
plt.show()

#-----

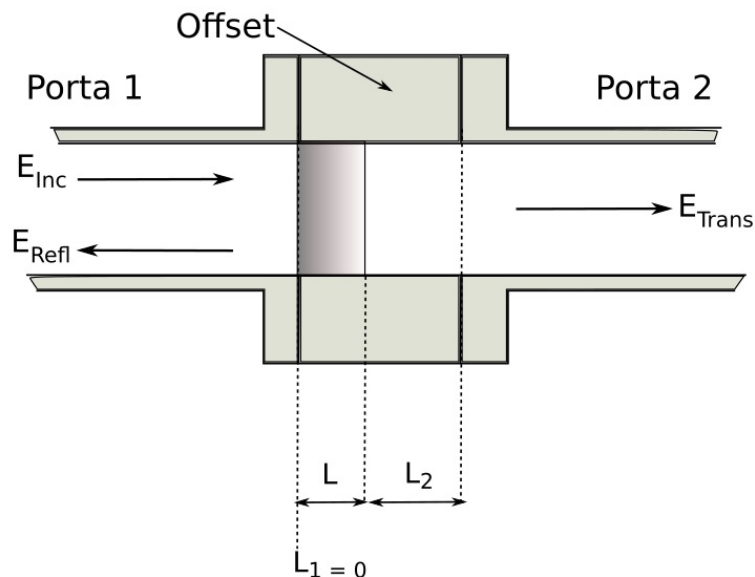
```


4 NRW Aplicado ao Teflon

4.1 Rotina de Cálculo

Nesta seção será introduzida a rotina de cálculo utilizada para testar o método de NRW. O material escolhido foi o teflon, por ser um material dielétrico, isotrópico e homogêneo, sendo assim possui permissividade e permeabilidade constantes em função da frequência.

Figura 4.1 - Representação esquemática da medida da refletividade para a amostra de Teflon

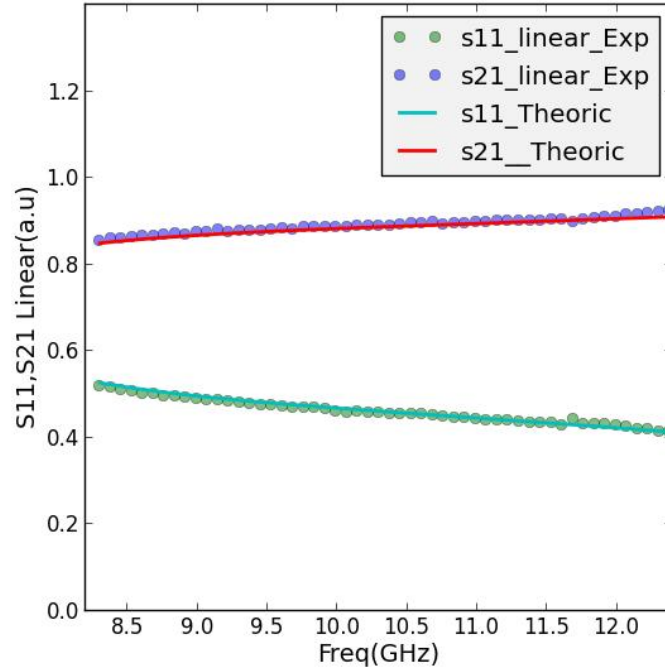


Fonte: (Autor)

A amostra estudada apresentava 5mm de espessura, e foi colocada no offset de maneira que ficasse rente a porta 1 do VNA, fazendo com que o valor de L_1 fosse igual a zero (Figura 4.1).

O valor teórico dos parâmetros-S foram obtidos através das Equações 1.54, 1.55, 1.56 e 1.57. Deste modo, os parâmetros S teóricos foram comparados com os medidos pelo VNA, veja Figura 4.2. Vale ressaltar, que a medida experimental apresentou um modo aprisionado aproximadamente em 11,5GHz, não é consequência da atenuação do material, mas sim por alguma perda no encaixe das portas 1 e 2 com o offset.

Figura 4.2 - Parâmetros-S medidos e calculados da amostras de Teflon com espessura de 5mm



Fonte: (Autor)

A absorvância, refletância e transmitância foram calculados através dos parâmetros S_{11} e S_{21} utilizando a expressão a seguir:

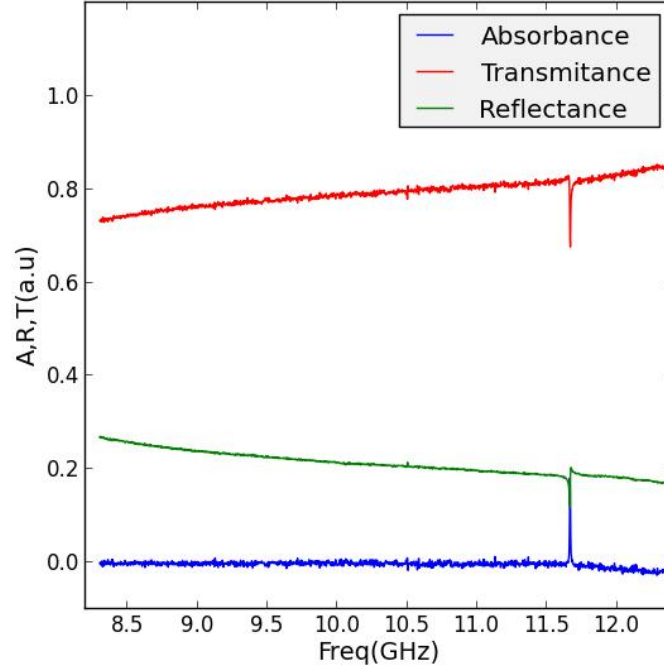
$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (4.1)$$

Onde, o termo A é a absorvância, $|S_{11}|^2$ é a refletância e $|S_{21}|^2$ a transmitância.

A impedância e o índice de refração do material testado também foram medidos através das Equações 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, veja as Figuras 4.5 (a) e (b).

$$Z_{teórico} = \frac{j2\pi f \mu_r \epsilon_r}{\gamma Z_o} \quad (4.2)$$

Figura 4.3 - Absorbância, Refletância e Transmitância da amostras de Teflon com espessura de 5mm



Fonte: (Autor)

$$Z_{NRW} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}}} \quad (4.3)$$

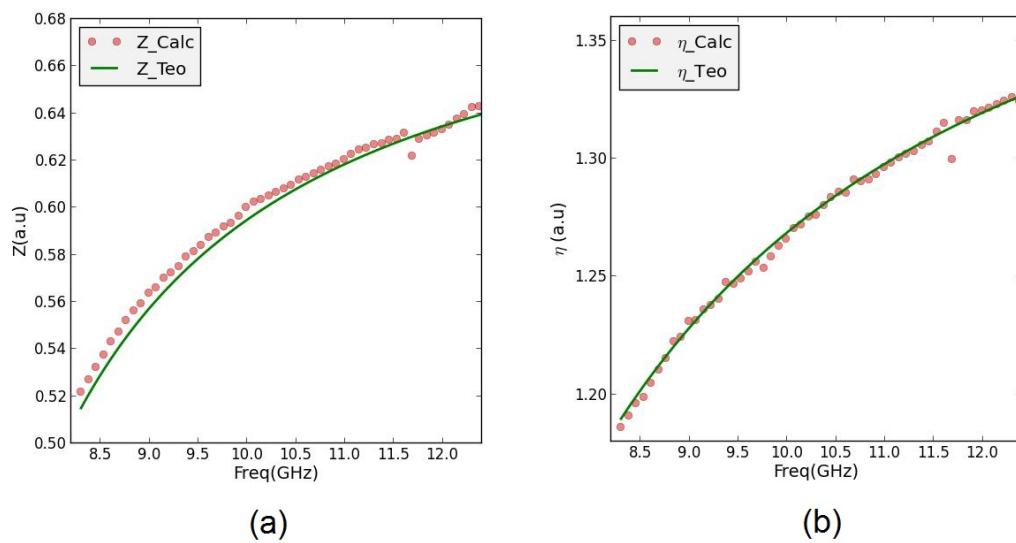
$$\eta_{teórico} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_g}\right)^2} \quad (4.4)$$

$$\eta_{NRW} = \frac{\lambda_o j \ln(T)}{2\pi d} \quad (4.5)$$

Os coeficientes de Transmissão (Figura 4.5 (a)) e Reflexão (Figura 4.5 (a)) foram calculados a partir das Equações 1.58 e 1.59.

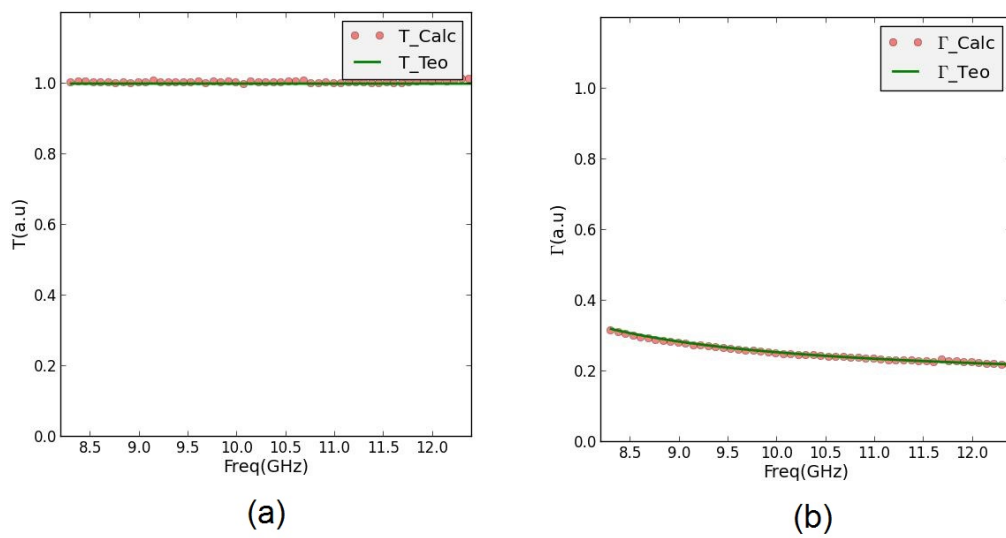
A permissividade e permeabilidade real e imaginárias foram obtidas através das Equações 1.63 e 1.65.

Figura 4.4 - Impedância e Índice de Refração do Teflon



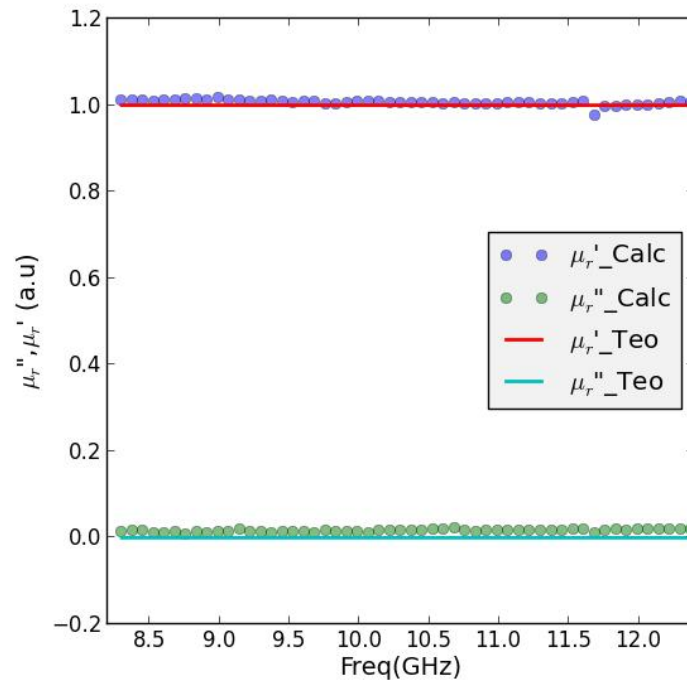
Fonte: (Autor)

Figura 4.5 - Coeficiente de Reflexão e Transmissão



Fonte: (Autor)

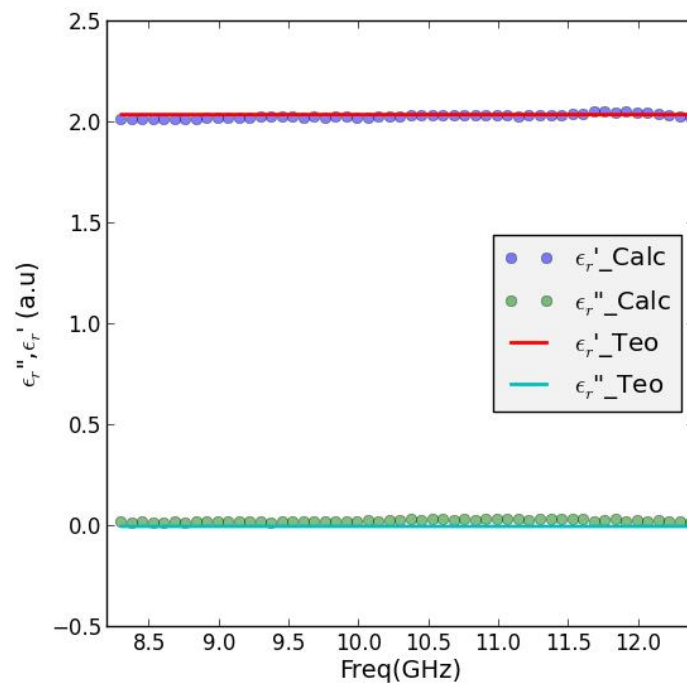
Figura 4.6 - Permeabilidade real e imaginária



Fonte: (Autor)

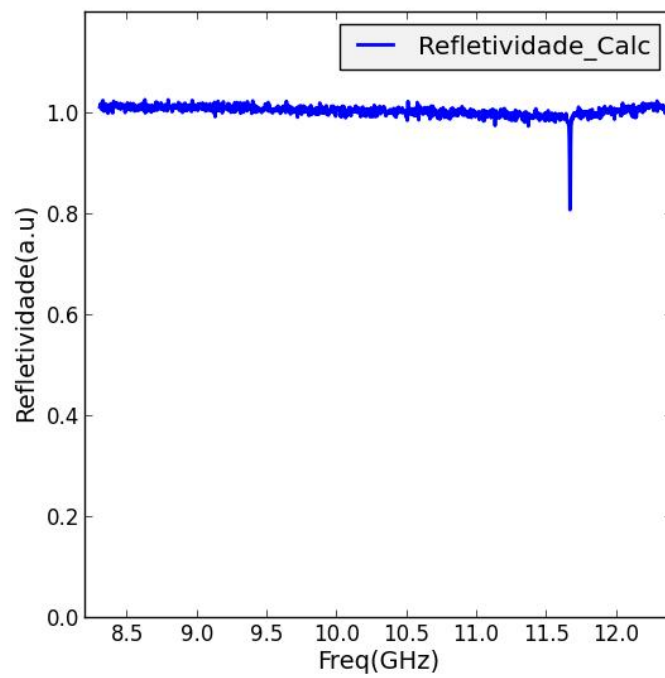
Por fim, foi obtida a refletividade teórica das amostras através das medidas dos parâmetros-S pelas duas portas.

Figura 4.7 - Permissividade real e imaginária



Fonte: (Autor)

Figura 4.8 - Refletividade



Fonte: (Autor)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGILENT. **Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials**. 2006. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-2589EN.pdf>>. Acesso em: 12 de dezembro 2014. 7
- ALLEN, T. P. **Física moderna (Spanish Edition)**. [S.l.]: Reverté, 2009. ISBN 8429141863. 1, 8
- AMIET, A. 189 p. PhD thesis — Free Space Permittivity and Permeability Measurements at Microwave Frequencies, Australia, 2003. 14
- BAKER-JARVIS, J. **Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements**. [S.l.]: National Institute of Standards and Technology Colorado, 1990. 19, 21, 23, 24
- FELBACQ, D.; ANTEZZA, M. Quantum metamaterials: a brave new world. **SPIE Newsroom**, SPIE-Intl Soc Optical Eng, jun 2012. 3
- FOLGUERAS, L. de C.; ALVES, M. A.; REZENDE, M. C. Dielectric properties of microwave absorbing sheets produced with silicone and polyaniline. **Materials Research**, v. 13, p. 197–201, mar 2010. 32
- GIOVAMPAOLA, C. D.; ENGHETA, N. Digital metamaterials. **Nature Materials**, Springer Nature, v. 13, n. 12, p. 1115–1121, sep 2014. 3
- GONÇALVES, F. **Medição das Propriedades Constitutivas Eletromagnéticas de Materiais na Faixa de 1 a 6 GHz pelo Método do Espaço Livre**. 160 p. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. 12, 14, 25
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics**. [S.l.]: Pearson, 2014. 1
- HIEBEL, M. **Fundamentals of vector network analysis**. [S.l.]: Rohde & Schwarz, 2007. 2, 14, 17, 27
- KEYSIGHT. **Understanding VNA Calibration**. 2012. Disponível em: <http://anlage.umd.edu/Anritsu_understanding-vna-calibration.pdf>. Acesso em: 19 de março 2016. 28

_____. **Reflection Measurements**. 2015. Disponível em: <http://na.support.keysight.com/pxi/help/latest/Tutorials/Reflection_Measurements.htm>. Acesso em: 05 de abril 2016. 10

NALWA, H. S. Handbook of organic conductive molecules and polymers, volume 4, conductive polymers: Transport, photophysics and applications. 1997. 8

NOHARA, L. E. **Materiais Absorvedores de Radiação Magnética (8-12GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos**. 220 p. Tese (Doutorado em MARE) — Instituto Tecnológico Aeroespacial (ITA), São José dos Campos, 2003. 2

OLMEDO, L.; HOURQUEBIE, P.; JOUSSE, F. Microwave properties of conductive polymers. **Synthetic metals**, Elsevier, v. 69, n. 1, p. 205–208, 1995. 8

SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo, traduzido por Liane Ludwing e Jorge Amoretti Lisboa**. [S.l.]: Porto Alegre, Bookman, 2004. 12

SUN, Y.; EDWARDS, B.; ALÛ, A.; ENGHETA, N. Experimental realization of optical lumped nanocircuits at infrared wavelengths. **Nature Materials**, Springer Nature, v. 11, n. 3, p. 208–212, jan 2012. 3

ULABY, F. T. **Electromagnetics for Engineers**. [S.l.]: Pearson, 2004. 12

ULABY, F. T.; MICHIELSEN, E.; RAVAIOLI, U. **Fundamentals of Applied Electromagnetics (6th Edition)**. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. ISBN 0132139316. 7, 18, 19, 20

VINOY, K. J.; JHA, R. M. Radar absorbing materials- from theory to design and characterization(book). **Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1996.**, 1996. 4, 5, 6, 7

WIKIPEDIA. **Carta de Smith**. 2013. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Carta_de_Smith>. Acesso em: 22 de março 2016. 28

WIKIPÉDIA. **Metamaterial**. 2017. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>>. Acesso em: 25 de fevereiro 2017. 3

YOUNG, H. D. **Física III. Eletromagnetismo (Em Português do Brasil)**. [S.l.]: Pearson, 2008. ISBN 8588639343. 7

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.