

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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.12.19.52-PUD

PROGRAMA EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON PARA AJUSTE DA PERMISSIVIDADE REAL E IMAGINÁRIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA UTILIZANDO O MODELO DE LORENTZ

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

Norma Técnica

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9BEGS>

> 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) **BIBLIO**-**TECA 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/2017/07.12.19.52-PUD

PROGRAMA EM LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON PARA AJUSTE DA PERMISSIVIDADE REAL E IMAGINÁRIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA UTILIZANDO O MODELO DE LORENTZ

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

Norma Técnica

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9BEGS>

> 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

A combinação da particulados de fibra de carbono embutidos em resina epóxi origina picos de ressonância na permissividade real e imaginária. Esse picos de ressonância foram estudados por Lorentz, que ficou conhecido como o modelo de Lorentz. Este trabalho utiliza-se do modelo de Lorentz em sua forma clássica para obter o melhor ajuste da permissividade real e imaginária dos compósitos com fibra de carbono e resina epóxi, sendo possível obter informações como o tempo de relaxação e frequência de ressonância das amostras. Para obter a permissividade real e imaginária foi utilizado um analisador de redes vetorial da Agilente, modelo N5232A, para extração dos parâmetros-S e por fim aplicado o método de Nicolson-Ross-Weir.

Palavras-chave: Permissividade. Analisador de redes vetorial. Modelo de Lorentz.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1	Esquema ilustrativo do modelo de Lorentz	2
1.2	Variação do tempo de relaxação γ para (a) tempo baixo e (b) tempos	
	algo, todos com frequência de ressonância em $\omega_{\circ} = 10 GHz$	8
1.3	Diferentes valores de γ para condições iguais. Valores de γ (a) 0,2 (b) 1	
	e (c) 10 segundos	10
3.1	Exemplo do ajuste do modelo de Lorentz para a amostra com particula-	
	dos de < 25 μ e concentração de 50% de FC	19
3.2	Fluxograma resumido da influência matemática e física de cada variável	
	do modelo de Lorentz	20

LISTA DE TABELAS

Pág.

SUMÁRIO

Pág.

1 O Modelo de Lorentz	1
1.1 Fatores Históricos	1
1.2 Estudos Prelimináres do Modelo de Lorentz	1
1.2.1 A Velocidade da Luz na Matéria	1
1.2.2 Susceptibilidade Elétrica - χ_e	2
1.2.3 O Modelo de Lorentz - Sem Amortecimento	3
1.2.4 O Modelo de Lorentz - Com Amortecimento	5
1.3 Frequência de Plasma ω_p	0
2 Programa - Modelo de Lorentz	3
2.1 Script	3
3 Ajuste - Modelo de Lorentz	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1

1 O Modelo de Lorentz

1.1 Fatores Históricos

Em 1900, Max Planck apresentou sua "suposição" formal de que a energia eletromagnética deveria ser um múltiplo de alguma únidade elementar, portanto poderia ser descrito como pequenos pacotes de energia, chamados de *Quantus*. O termo *Quantus* vem do latim, que significa quantia, e utilizado por Planck neste contexto para representar essa contagens elementares de unidade. Essa ideia foi explorada por Albert Einstein em 1905 e mostrou que as ondas eletromagnéticas poderiam ser tratadas como corpúsculos, denominados posteriormente de *fótons*, com energia discreta que dependeria da frequência da onda eletromagnética (GRIFFITHS, 2014; ULABY, 2004; YOUNG, 2008).

Antes do advento da mecânica quântica na década de 1900, a tentativa mais bem conhecida por um físico clássico para descrever a interação da luz com a matéria em termos da equação de Maxwell foi levada a cabo por Hendrik Lorentz. Apesar de ser uma descrição puramente clássica, o modelo do Oscilador de Lorentz foi adaptado á mecânica quântica na década de 1900 e ainda é de uso considerável hoje.

Hendrik Antoon Lorentz foi um físico holandês no final do século 19, responsável pela famosa transformada de Lorentz, usada mais tarde por Albert Einstein no desenvolvimento da Relatividade Especial. Lorentz também propôs descrever a interação entre átomos e campos elétricos em termos clássicos. Seu modelo consistia de um elétron (esfera de massa muito pequena) ligado a um núcleo atômico (esfera de massa muito pequena) ligado a um núcleo atômico (esfera de massa muito maior) por uma força que se comportava de acordo com a Lei de Hooke -ou seja, um sistema massa mola- (Figura 1.1). Desse modo, um campo elétrico aplicado interagiria com as cargas elétricas, causando uma oscilação (GRIFFITHS, 2014; ULABY, 2004; YOUNG, 2008).

1.2 Estudos Prelimináres do Modelo de Lorentz

1.2.1 A Velocidade da Luz na Matéria

O indice de refração de um meio material isotrópico e homogênio é conhecido como:

$$\eta = \frac{c}{v} \tag{1.1}$$

Onde η é o índice de refração, c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade





Fonte: (Autor)

da luz dentro do material.

A teoria de Maxwell permite calcular o η a partir das propriedades elétricas e magnéticas do meio.

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_{\circ}\epsilon_{\circ}}} \tag{1.2}$$

Onde μ_\circ e ϵ_\circ são permeabilidade e permiss
vidade no vácuo.

Em um material homogênio e isotrópico ainda podemos usar as equações de Maxwell:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}} \tag{1.3}$$

Onde $\mu \in \epsilon$ são a permeabilidade e permissividade do material.

Logo nosso índice de refração pode ser escrito da seguinte forma:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_{\circ}\epsilon_{\circ}}} \tag{1.4}$$

1.2.2 Susceptibilidade Elétrica - χ_e

Antes de prosseguir para o modelo de Lorentz, é de grande utilidade o conceito de susceptibilidade elétrica (χ_e). Essa é a medida de quão facilmente o sistema se polariza em resposta a um campo elétrico. Com isso podemos relacionar o momento

de dipolo (ρ) e também a permissividade elétrica (ϵ) do material da seguinte forma:

$$\rho = \epsilon_{\circ} \chi_e E \to \chi_e = \frac{\rho}{\epsilon_{\circ} E} \tag{1.5}$$

Outro caso interessante de se aplicar a susceptibilidade elétrica é que a permissividade total do material pode ser escrita da seguinte forma:

$$\epsilon = \epsilon_{\circ} + \epsilon_{\circ} \chi_e \tag{1.6}$$

1.2.3 O Modelo de Lorentz - Sem Amortecimento

O modelo de Lorentz é utilizado para estudar a forma clássica da interação da radiação com a matéria. Para isto ele supõe que os elétrons estão conectados ao núcleo por molas. Vale lembrar que tanto a ϵ quanto a μ dependem da frequência da luz. Isso implica que η também depende da frequência. Logo podemos escrever $\epsilon(\omega)$, $\mu(\omega) \in \eta(\omega)$. Outra observação importante é que este modelo não utiliza a parte magnética será desprezada nos cálculos, devido a força elétrica sobre as cargas internas dos átomos muito maiores que as magnéticas. Assim, quando uma onda eletromagnética de frequência ω incide sobre o átomo, a força produzida pelo campo elétrico sob um elétron é dada por:

$$F_e = q_e E(t) = q_e [E_\circ \cos(\omega t)] \tag{1.7}$$

A força do campo elétrico irá produzir uma força contrária na mola, dada por:

$$F_{mola} = -Kx \tag{1.8}$$

Onde K é o coeficiente de elasticidade e x é a distância do elétron do ponto de equilíbrio (x_{\circ}) .

Logo o somatório das forças será dado por:

$$\sum F = m_e a \to m_e a = F_{mola} + F_e \to m_e \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -Kx + q_e E_{\circ} \cos(\omega t) \qquad (1.9)$$

Fazendo $\omega_{\circ} = \sqrt{\frac{K}{m_e}}$, temos:

$$m_e \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -\omega_o^2 m_e x(t) + q_e E_o \cos(\omega t)$$
(1.10)

Utilizando a solução $x(t) = x_{\circ} cos(\omega t)$

$$-m_e\omega^2 x_\circ \cos(\omega t) = q_e E_\circ \cos(\omega t) - m_e \omega_\circ^2 x_\circ \cos(\omega t) \to x_\circ = \frac{q_e E_\circ}{m_e(\omega_\circ^2 - \omega^2)} \quad (1.11)$$

Portanto, o movimento do elétron pode ser escrito do seguinte modo:

$$x(t) = \frac{q_e E_\circ \cos(\omega t)}{m_e(\omega_\circ^2 - \omega^2)}$$
(1.12)

No caso do dipolo, o momento de dipolo (ρ) do átomo será a soma das contribuições de seus Z elétrons:

$$\rho = Zq_e x \to \rho = \frac{Zq_e^2 E_\circ cos(\omega t)}{m_e(\omega_\circ^2 - \omega^2)}$$
(1.13)

Agora aplicando para N átomos de um material:

$$\varrho = Np \to \varrho = \frac{NZq_e^2 E_\circ cos(\omega t)}{m_e(\omega_\circ^2 - \omega^2)}$$
(1.14)

Onde ϱ é o momento de dipolo dos N átomos com Z elétrons.

Utilizando a Equação 1.5 e substituindo o momento de dipolo (ρ) pela Equação 1.13, tem-se a susceptibilidade elétrica do material escrita da seguinte forma:

$$\chi_e = \frac{NZq_e^2}{m_e\epsilon_\circ(\omega_\circ^2 - \omega^2)} \tag{1.15}$$

Substituindo a Equação 1.14 na Equação 1.6 se obtêm a permissividade elétrica escrita na forma proposta pelo modelo de Lorentz:

$$\epsilon = \epsilon_{\circ} + \frac{NZq_e^2}{m_e(\omega_{\circ}^2 - \omega^2)}$$
(1.16)

A Equação 1.16 pode ser escrita de outra forma utilizando a chamada frequência de plasma (ω_p) , que equivale a:

$$\omega_p^2 = \frac{NZq_e^2}{m_e\epsilon_\circ} \tag{1.17}$$

Substituindo a Equação 1.17 na Equação 1.16 se obtêm:

$$\epsilon = \epsilon_{\circ} \left(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_{\circ}^2 - \omega^2}\right) \tag{1.18}$$

No entanto, de acordo com Equação 1.18, quando a radiação incidente possui uma frequência (ω) muito próxima da frequência de ressonância (ω_{\circ}) do meio, o valor da permissividade tende ao infinito. Mas está singularidade pode ser evitada se levar em consideração que o átomo deve perder parte da energia que absorve da onde. Como formas de dissipação de energia podem ser citados por exemplo interações da radiação eletromagnética com as nuvens eletrônicas dos átomos (ligação covalente), íons (ligações iônicas), estruturas moleculares e etc.

1.2.4 O Modelo de Lorentz - Com Amortecimento

Com finalidade de remover a singularidade para valores em que ω tende a valores próximos de ω_p , será introduzido uma força de dissipação no sistema que age em cada elétron.

$$F_{dissipaçao} = \frac{-bdx}{dt} \tag{1.19}$$

Onde b é uma constante de amortecimento.

Logo, a somatória das forças ficará:

$$\sum F = m_e a \to m_e a = F_e + F_{mola} + F_{dissipação} \to \frac{m_e d^2 x}{dt^2} = -\omega_\circ^2 m_e x + q E_\circ \cos(\omega t) - \frac{b dx}{dt}$$
(1.20)

Fazendo agora $cos(\omega t) = Re\{e^{-j\omega t}\}$ e substituindo na Equação 1.19 a possível solução $x(t) = x_{\circ}e^{-j\omega t}$, pode-se escrever a Equação 1.20 da seguinte forma:

$$-\omega^2 x_\circ = -\omega_\circ^2 x_\circ + \frac{q_e E_\circ}{m_e} + \frac{bj x_\circ \omega}{m_e}$$
(1.21)

Introduzindo agora a constante $\gamma=\frac{b}{m_e},$ que será o tempo de relaxação da molécula, a Equação 1.21 fica

$$-\omega^2 x_{\circ} = -\omega_{\circ}^2 x_{\circ} + \frac{q_e E_{\circ}}{m_e} + \gamma j x_{\circ} \omega$$
(1.22)

Isolando x_{\circ} da Equação 1.22, temos:

$$x_{\circ} = \frac{q_e E_{\circ}}{m_e(\omega_{\circ}^2 - \omega^2 - j\omega\gamma)}$$
(1.23)

Substituindo a Equação 1.23 na solução $x(t) = x_{\circ}e^{-j\omega t}$:

$$x(t) = \frac{q_e E_o e^{-j\omega t}}{m_e(\omega_o^2 - \omega^2 - j\omega\gamma)}$$
(1.24)

Agora substituindo a Equação 1.24 na equação do momento de dipolo para Z elétron e N dipolos (Equação 1.14):

$$\varrho = \frac{NZq_e^2 E_{\circ}e^{-j\omega t}}{m_e(\omega_{\circ}^2 - \omega^2 - j\omega\gamma)}$$
(1.25)

Aplicando a Equação 1.25 na Equação 1.5 e isolando a susceptibilidade elétrica da equação:

$$\chi_e = \frac{NZq_e^2}{\epsilon_\circ m_e(\omega_\circ^2 - \omega^2 - j\omega\gamma)}$$
(1.26)

Utilizando a Equação 1.17 na Equação 1.26, temos:

$$\chi_e = \frac{\omega_p^2}{(\omega_o^2 - \omega^2 - j\omega\gamma)} \tag{1.27}$$

Chegamos a um ponto importante da dedução do modelo de Lorentz, é necessário agora aplicar a Equação 1.27 na Equação 1.6, para obter agora a permissividade elétrica do meio.

$$\epsilon = \epsilon_{\circ} + \epsilon_{\circ} \left(\frac{\omega_p^2}{(\omega_o^2 - \omega^2 - j\omega\gamma)} \right) \to \frac{\epsilon}{\epsilon_{\circ}} = 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_o^2 - \omega^2 - j\omega\gamma)}$$
(1.28)

A ultima etapa consiste em separar a parte real (ϵ') da imaginária (ϵ''), fica então:

$$\frac{\epsilon'(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = 1 + \frac{\omega_p^2(\omega_{\circ}^2 - \omega^2)}{(\omega_{\circ}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2}$$
(1.29)

$$\frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = \frac{\omega_p^2 \omega \gamma}{(\omega_{\circ}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2}$$
(1.30)

Nas Equações 1.29 e 1.30 todos os elétrons do átomo tem a mesma frequência de ressonância (ω_{\circ}) e tempo de relaxação (γ). Contudo, pode ser escrito uma expressão mais completa do modelo, admitindo *n* como o número de elétrons que oscilam com a mesma frequência de forma independente, fazendo com que sejam admitidos outros valores para a frequência de ressonância e tempo de relaxação (Equação 1.31).

$$\frac{\epsilon'(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = 1 + \sum_{n} \frac{\omega_p^2(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)}{(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_n^2}$$
(1.31)

$$\frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = \sum_{n} \frac{\omega_p^2 \omega \gamma_n}{(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_n^2}$$
(1.32)

Portanto, assumindo que o núcleo atômico é muito mais maciço do que o elétron, pode-se tratar o problema como um sistema elétron-mola, isso é, somente o elétron poderá vibrar. Além disso, a suposição de que a força de ligação se comporta como uma mola é uma aproximação justificada para qualquer tipo de ligação, dado que o deslocamento é suficientemente pequeno (o que significa que apenas os termos constantes e lineares na expansão de Taylor são relevantes). O termo de amortecimento vem de colisões internas no sólido e radiação emitida pelos elétrons¹.

Exitem várias formas de representar o modelo de Lorentz, a representação utilizada

 $^{^1 \}rm Qualquer$ carga acelerada emite radiação



Figura 1.2 - Variação do tempo de relaxação γ para (a) tempo baixo e (b) tempos algo, todos com frequência de ressonância em $\omega_\circ=10GHz$

Fonte: (Autor)

neste trabalho para interações dos elétrons com o campo elétrico são mostrada abaixo (Equações 1.33 e 1.34) (SANTOS, 2011):

$$\frac{\epsilon'(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = 1 + \sum_{n} \frac{\omega_p^2(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)}{(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_n^2}$$
(1.33)

$$\frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = \sum_{n} \frac{\omega_p^2 \omega \gamma_n}{(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_n^2}$$
(1.34)

Onde $\epsilon'(\omega)$ e $\epsilon''(\omega)$ são as permissividade real e imaginária em função da frequência, ω_p é a chamada frequência de plasma, ω_o é a frequência de ressonância, γ é o tempo de relaxação da ressonância e *n* representa o número de elétrons que oscilam com a mesma frequência de forma independente.

Além disso, o modelo pode se estender a uma outra forma utilizando as Equações 1.31 e 1.32. Assim, é possível ainda admitir que existam números j de portadores. Está expressão torna-se válida nos estudos com diferentes misturas de materiais (compósitos), fazendo com que a frequência de plasma (ω_p) possa ter outros valores. Está forma não foi introduzida no programa pela dificuldade de calcular diferentes possibilidades de j elementos.

$$\frac{\epsilon'(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = 1 + \sum_{j} \sum_{n} \frac{\omega_{pj}^2(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)}{(\omega_{\circ n}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_n^2}$$
(1.35)

$$\frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon_{\circ}} = \sum_{j} \sum_{n} \frac{\omega_{pj}^{2} \omega \gamma_{n}}{(\omega_{\circ n}^{2} - \omega^{2})^{2} + \omega^{2} \gamma_{n}^{2}}$$
(1.36)

Utilizando as Equações 1.33 e 1.34 é possível entender a importância do tempo γ no processo de ressonância, por exemplo variando apenas os valores do tempo de relaxação (γ). Através das Figura 1.3 (a), (b) e (c) é observado como diferentes valores para γ influenciam no modo que ressonam. Tempos de relaxações menores influenciam na intensidade da ressonância, no entanto uma material com essas propriedades poderá contribuir para atenuar uma onda em uma faixa de frequência menor do que um material com tempo de relaxação maior. Contudo, tempos maiores também terão a desvantagem de possuírem uma possível perda em menor intensidade.



Figura 1.3 - Diferentes valores de γ para condições iguais. Valores de γ (a) 0,2 (b) 1 e (c) 10 segundos

Fonte: (Autor)

1.3 Frequência de Plasma ω_p

De forma resumida, o plasma é um gás ionizado, eletricamente carregado por partículas condutoras, que ocorre geralmente sob condições de temperaturas muito altas e/ou densidade de partícula muito baixa. Em equilíbrio, os campos elétricos dos elétrons e dos núcleos ionizados se anulam mutuamente, mas esse equilíbrio é dificilmente mantido. Para facilitar o entendimento, em vez de lidar com movimento individual dos elétrons e núcleos, considere os centro de massa dos núcleos e dos elétrons. Em equilíbrio, eles coincidem. No entanto, quando se deslocam uns em relação aos outros, uma força Coulomb surge tentando restaurar sua posição, iniciando um comportamento oscilatório. Essa oscilações são encontradas em meios condutores, como plasmas e metais. A frequência com que essas oscilações ressoam é chamada de frequência plasmática, descrita abaixo na Equação 1.37.

$$\omega_p = \frac{NZq_e^2}{m_e\epsilon_\circ} \tag{1.37}$$

Onde N é o número de átomos, Z é o número atômico, m_e é a massa do elétron e q_e é a carga do elétron.

2 Programa - Modelo de Lorentz

Neste trabalho foi desenvolvido um programa com interface gráfica para realizar os ajustes dos dados experimentais da permissividade real e imaginária com o modelo de Lorentz. 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. Para ajustar o modelo, foi utilizada as funções das Equações 1.33 e 1.34. A Figura 3.1 mostra o programa na sua versão final.

2.1 Script

A seguir é mostrado o script em python do programa desenvolvido.

from __future__ import division import matplotlib.pyplot as plt import numpy as np import scipy.integrate as si from matplotlib.widgets import Slider, Button, RadioButtons #from matplotlib.ticker import MultipleLocator import os

#import matplotlib.ticker as mtick #colocar exp o eixo x
#ax1.xaxis.set_major_formatter(mtick.FormatStrFormatter('%02.1e'))
#ax.yaxis.set_major_formatter(mtick.FormatStrFormatter('%02.1e'))

def e1(wo,wp,gama,w):

return ((wp**(2.0))*((wo**(2.0))-(w**(2.0))))/(((wo**(2.0))-(w**(2.0)))**(2.0)+(gama**(2.0))*(w**(2.0)))

def e2(wo,wp,gama,w): $return\;((wp^{**}(2.0))^{*}(gama^{*}w))/(((wo^{**}(2.0))^{-}(w^{**}(2.0)))^{**}(2.0) + (gama^{*}w)^{**}(2.0))$

diretorio_principal = os.getcwd() os.chdir('dados')

#------ ENCONTRAR ARQUIVO TXT NO DIRETORIO------

lista = os.listdir('.')

txts = []

ini =8.2e9 fim = 12.4e9 inter = 0.01e9

w = np.arange(ini,fim,inter)

eo= 8.85e-12 #wo = 10e9 #variar FREQUENCIA ESTA EM 1e9 (GHZ) wp = 10e9 #variar gama = 0.5#variar

A=8.85e-12 e1_offset = 0 e2_offset = 0

e1_sv=[] e2_sv=[]

for W in w:

e1_s = e1(9,10,3,W)+ e1(11,10,3,W) + e1_offset

 $e2_s = e2(9,10,3,W) + e2(11,10,3,W) + e2_offset$

e1_sv.append(e1_s) e2_sv.append(e2_s)

for arquivo in range(0,len(txts)):

arq_entrada=open(txts[arquivo],'r') arq_dados=arq_entrada.readlines() arq_entrada.close()

f_v=[] e1_v=[] e2_v=[]

wol=float(raw_input("digite wol: "))*1e9
wo2=float(raw_input("digite wo2: "))*1e9
wo3=float(raw_input("digite wo3: "))*1e9
wo4=float(raw_input("digite wo4: "))*1e9

el_int = float(raw_input("Offset e1: "))

e2_int = float(raw_input("Offset e2: "))

for i in range(8,len(arq_dados)): dados = arq_dados[i].split(',')

f_v.append(float(dados[0]))#/1e9
e1_v.append(float(dados[1]))
e2_v.append(float(dados[2]))

#-----GRAFICO1 - V -----ax1=plt.subplot(121)

plt.subplots_adjust(left=0.1, bottom=0.3)

k, =plt.plot(w,e1_sv,'r-',linewidth=4,label="Theoretical \$\epsilon\$'")

 $\label{eq:k1} k1, = plt.plot(f_v, e1_v, 'bo', alpha = 0.4, label = "Experimental ϵ'")$

#copy;;;;

plt.xlabel('Frequency(GHz)') plt.ylabel("Relative \$\epsilon\$''') plt.ylim(-10,30) plt.xlim(7e9,14e9)

plt.title(str(txts[arquivo][:len(txts[arquivo])-4]))

plt.legend() plt.grid(True) #;;;;;

16

gamabar2= Slider(gama_2, 'Gama2', 0, 1e10, valinit=gama, valfmt='%.2e') #wpbar2 = Slider(wp_2, 'wp2', 8.2e6, 12.4e8, valinit= wp, valfmt='%.2e') wpbar2 = Slider(wp_2, 'wp2', 8.2e7, 12.4e9, valinit= wp, valfmt='%.2e')

e2bar = Slider(e2_, 'e2', e2_int-1, e2_int+1, valinit=e2_int) wobar2= Slider(wo_2, 'wo2', wo2-0.25*1e9, wo2+0.25*1e9, valinit=wo2, valfmt='%.2e')

e1_ = plt.axes([0.05, 0.05, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor) wp_1 = plt.axes([0.05, 0.15, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor)

#programa interacao*******************************)))))))

gama_1 = plt.axes([0.05, 0.20, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor) $wo_1 = plt.axes([0.05, 0.1, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor) \#(pos(x \ da \ barra), pos(y \ da \ barra), comprimento, largura)$

gamabar1= Slider(gama_1, 'Gama1', 0, 1e10, valinit=gama, valfmt='%.2e')

#-----GRAFICO2 - V ----ax2=plt.subplot(122)

plt.xlabel('Frequency(GHz)') plt.ylabel('Relative \$\epsilon\$"')

plt.vlim(-1,3) plt.xlim(7e9,14e9)

plt.legend() plt.grid(True)

axcolor = (0.5, 0.7, 0.7)

FUNCAO 1-----

#-

#-----

FUNCAO 2 -----

u, =plt.plot(w,e2_sv,'r-',linewidth=4,label='Theoretical \$\epsilon\$''') u1,=plt.plot(f_v,e2_v,'bo',alpha=0.3,label='Experimental \$\epsilon\$"')

gama_2 = plt.axes([0.25, 0.20, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor) #wo_ = plt.axes([0.1, 0.05, 0.3, 0.03], axisbg=axcolor)#(pos(x da barra),pos(y da barra),comprimento,largura) e2_ = plt.axes([0.25, 0.05, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor) wp_2 = plt.axes([0.25, 0.15, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor) wo_2 = plt.axes([0.25, 0.1, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor)

wobar1= Slider(wo_1, 'wo1', wo1-0.25*1e9, wo1+0.25*1e9, valinit=wo1, valfmt='%.2e') elbar = Slider(el_, 'el', el_int-2, el_int+2, valinit=el_int)

wpbar1 = Slider(wp_1, 'wp1', 8.2e7, 12.4e9, valinit= wp, valfmt='%.2e')

#wpbar1 = Slider(wp_1, 'wp1', 8.2e6, 12.4e8, valinit= wp, valfmt='%.2e')

#-----

#wo_ = pit.axes([0.1, 0.05, 0.3, 0.03], axisbg=axcolor)#(pos(x da barra),pos(y da barra).comprimento,largura) wp_3 = pit.axes([0.45, 0.15, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor) wo_3 = pit.axes([0.45, 0.1, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor)

gamabar3= Slider(gama_3, 'Gama3', 0, 1e10, valinit=gama,valfmt='%.2e')

#wpbar3 = Slider(wp_3, 'wp3', 8.2e6, 12.4e8, valinit= wp,valfmt='%.2e')

wpbar3 = Slider(wp_3, 'wp3', 8.2e7, 12.4e9, valinit= wp,valfmt='%.2e')

#-----

wobar3= Slider(wo_3, 'wo3', wo3-0.25*1e9, wo3+0.25*1e9, valinit=wo3, valfmt='%.2e')

wo_4 = plt.axes([0.7, 0.1, 0.1, 0.03], axisbg=axcolor)

gamabar4= Slider(gama_4, 'Gama4', 0, 1e10, valinit=gama,valfmt='%.2e')

#wpbar3 = Slider(wp_3, 'wp3', 8.2e6, 12.4e8, valinit= wp,valfmt='%.2e')

wpbar4 = Slider(wp_4, 'wp4', 8.2e7, 12.4e9, valinit= wp,valfmt='%.2e')

wobar4= Slider(wo_4, 'wo4', wo4-0.25*1e9, wo4+0.25*1e9, valinit=wo4, valfmt='%.2e')

#-----

def update1(val):

w = np.arange(ini,fim,inter)

gamal = gamabarl.val
wol = wobarl.val
wpl = wpbarl.val

gama2 = gamabar2.val wo2 = wobar2.val wp2 = wpbar2.val

gama3 = gamabar3.val wo3 = wobar3.val wp3 = wpbar3.val

gama4 = gamabar4.val wo4 = wobar4.val wp4 = wpbar4.val el_offset=elbar.val e2_offset=e2bar.val

e1_sv=[] e2_sv=[]

for W in w:

 $el_s = e1(wo1,wp1,gama1,W) + e1(wo2,wp2,gama2,W) \\ + e1(wo3,wp3,gama3,W) + e1(wo4,wp4,gama4,W) + e1_offset$

 $\begin{array}{l} e2_s = e2(wo1,wp1,gama1,W) + e2(wo2,wp2,gama2,W) \\ + e2(wo3,wp3,gama3,W) + e2(wo4,wp4,gama4,W) + e2_offset \end{array}$

e1_sv.append(e1_s) e2_sv.append(e2_s)

k.set_ydata(e1_sv) u.set_ydata(e2_sv)

plt.draw()

gamabarl.on_changed(updatel) wobarl.on_changed(updatel)

wpbar1.on_changed(update1)

gamabar2.on_changed(update1) wobar2.on_changed(update1) wpbar2.on_changed(update1)

gamabar3.on_changed(update1) wobar3.on_changed(update1) wpbar3.on_changed(update1)

gamabar4.on_changed(update1)
wobar4.on_changed(update1)
wpbar4.on_changed(update1)

elbar.on_changed(updatel) e2bar.on_changed(updatel)

plt.show()

3 Ajuste - Modelo de Lorentz

Na Figura 3.1 é mostrado o ajuste teórico do modelo de lorentz em função da permissividade real e imaginária de uma amostra com particulados de carbono embutidos em resina epóxi.

Figura 3.1 - Exemplo do ajuste do modelo de Lorentz para a amostra com particulados de < 25 μ e concentração de 50% de FC.



Fonte: (Autor)

Até aqui, as variáveis do modelo de Lorentz foram estudadas com relação ao seu valor físico. No entanto, com o desenvolvimento do programa é mais fácil observar as variáveis também com relação a influência delas na função gráfica. Desse modo, a Figura 3.2 mostra ambas perspectivas de acordo com as variáveis γ , ω_p de ω_{\circ} .



Figura 3.2 - Fluxograma resumido da influência matemática e física de cada variável do modelo de Lorentz

Fonte: (Autor)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GRIFFITHS, D. J. Introduction to Electrodynamics. [S.l.]: Pearson, 2014. 1

SANTOS, W. d. S. **Refração, as velocidades da luz e metamateriais**. 119 p. Dissertação de Mestrado — Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. 8

ULABY, F. T. Electromagnetics for Engineers. [S.l.]: Pearson, 2004. 1

YOUNG, H. D. Física III. Eletromagnetismo (Em Portuguese do Brasil). [S.l.]: Pearson, 2008. ISBN 8588639343. 1

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

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.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnicocientíficos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

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.

Pré-publicações (PRE)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

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.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

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.