



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Jefferson Henrique Silva
Kathleen Noemi Duarte Rego

PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E ONDAS

Natal-RN
Dezembro/2018

Jefferson Henrique Silva
Kathleen Noemi Duarte Rego

PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E ONDAS

Projeto de 3 programas de computador elaborados por solicitação do professor José Patrocínio como pontuação para a disciplina de *Linhas de Transmissão e Ondas*.

Professor:
José Patrocínio da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE

Natal-RN
Dezembro/2018

1. OBJETIVOS

O presente relatório objetiva descrever a implementação de 3 projetos solicitados pelo professor José Patrocínio para a disciplina de Linhas de Transmissão e Ondas. O primeiro projeto é utilizado para o cálculo de projeto de uma Linha de Microfita. O segundo utiliza a Carta de Smith para análise de linhas de transmissão e realização de casamentos de impedância. O terceiro realiza a plotagem dos campos elétrico e magnético em um guia de onda retangular vazio, para os modos Transversal Elétrico e Transversal Magnético.

Para tanto, utilizou-se a poderosa ferramenta de cálculo MATLAB®, por proporcionar uma série de comandos e aparatos que auxiliariam na implementação dos projetos.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. MICROFITA

A linha de microfita é uma tecnologia de construção de linhas de transmissão que, basicamente, consiste em uma fita condutora e um plano de terra, também condutor, separados por um substrato dielétrico, conforme a Figura 1, tecnologia utilizada na construção de PCIs (Placa de Circuito Impresso). Uma linha de microfita é caracterizada pela espessura das partes condutoras, pela largura da fita, pelo substrato (espessura e tangente de perdas) e a atenuação na linha. Todavia, normalmente, a espessura das partes metálicas é desprezada nos cálculos.

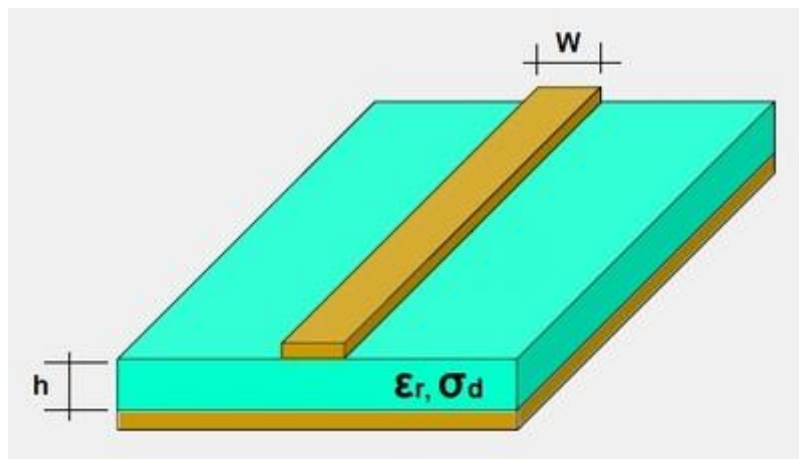


Figura 1. Modelo de Linha de Microfita.

2.2. CARTA DE SMITH

A Carta de Smith é um plano gráfico, mostrado na Figura 2, utilizado para a análise de linhas de transmissão sem perdas, isto é, com impedância característica real, grande parte dos casos na realidade. A partir da Carta de Smith, a análise de linhas de

transmissão é facilitada para a realização de cálculos de coeficiente de reflexão, impedância de entrada, casamentos de impedância, dentre outros, realizando algoritmos geométricos simples, traçando retas e círculos na carta.

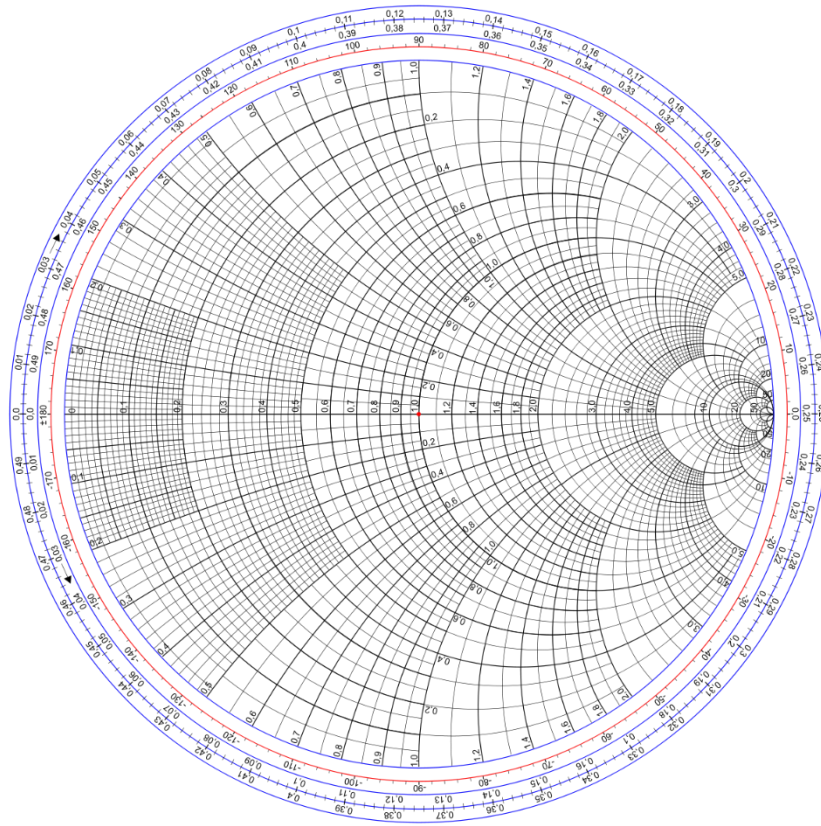


Figura 2. Carta de Smith padrão.

2.3. GUIAS DE ONDA

Um guia de ondas consiste basicamente em uma estrutura com grande desenvolvimento longitudinal e seção transversal uniforme. Pode ser na forma de um fio, feito de material condutor, cheio de ar ou vazio, como é o caso de um guia de ondas retangular ou um guia de ondas circular; ou pode consistir em duas regiões cilíndricas concêntricas feitas de materiais dielétricos com diferentes índices de refração, como no caso da fibra ótica; ou um par de condutores cilíndricos formando o que é conhecido como uma linha bifilar. Existem outras estruturas de orientação, como cabo coaxial, microstrip, etc.

Em um guia de ondas arbitrário, todos os campos de propagação resultam da combinação linear de 3 possíveis tipos de onda. A saber:

Ondas Transversais Eletromagnéticas TEM: Os campos elétrico e magnético são ambos transversais à direção da propagação.

TE ou H: Modos Elétricos Transversais: O campo elétrico é transversal à direção da projeção.

TM ou E: Modos Magnéticos Transversais: O campo magnético é transversal à direção da propagação.

As expressões dos campos elétrico e magnético para um determinado modo de propagação, viajando através de um guia de ondas retangulares de dimensões específicas, são obtidas por meio da resolução das equações de Helmholtz que descrevem os dois tipos de ondas e levam em conta as condições de contorno deduzidas das equações de Maxwell. Considerando o caráter sucinto do presente relatório, o desenvolvimento matemático de tais expressões é ignorado; no entanto, podem ser consultados nos anexos. A Tabela 1 mostra as expressões matemáticas dos vetores de propagação (Elétricos e Magnéticos) para os modos de propagação TE_{mn} e TM_{mn} eles foram normalizados e expressos no domínio do tempo, a fim de facilitar o seu mapeamento através das ferramentas do MATLAB®, bem como a sua animação.

3. DESCRIÇÃO DO PROJETO

2.4. MICROFITA

Com o intuito de se obter os parâmetros de um projeto de linha de microfita, foi implementado um aplicativo de simples visualização e usabilidade. Para a utilização do projeto, basicamente, o usuário deve entrar com os parâmetros de projeto requeridos (impedância característica e frequência de operação da linha), bem como, os parâmetros do substrato utilizado (espessura do substrato 'h', permissividade relativa 'Er' e a tangente de perdas), dispostos no painel 'Inputs'. A partir disso, basta clicar no botão 'Calcular', então, será retornado a largura da trilha (W) necessária em mm, o comprimento da onda guiada em m e a atenuação devido ao dielétrico em dB/cm. Vale ressaltar que todos os cálculos realizados consideram a espessura das partes condutoras desprezível. Além disso, é disponibilizado ao usuário um botão 'Limpar', para zerar todos os campos da janela do aplicativo, mostrada na Figura 3.

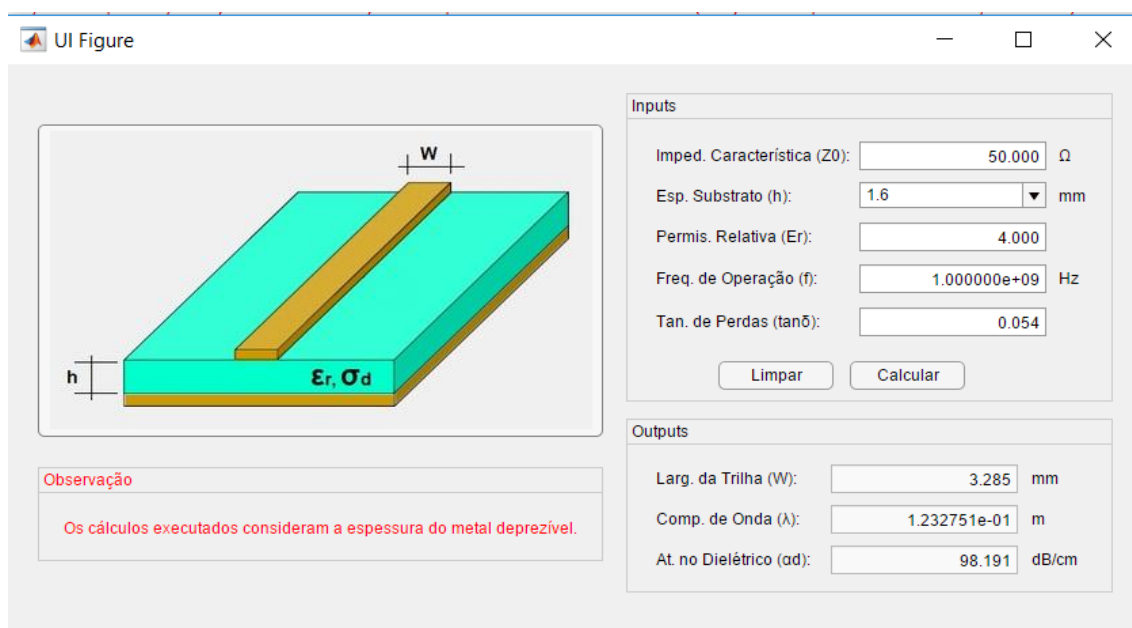


Figura 3. Janela do aplicativo sobre linha de microfita.

2.5. CARTA DE SMITH

O aplicativo da Carta de Smith foi implementado de modo a facilitar o entendimento e análise de linhas de transmissão através do artifício da carta de Smith. Nele, foi implementado o princípio de multi janelas. Na primeira janela, ilustrada na Figura 4, tem-se a possibilidade de entrar com os parâmetros distribuídos e a frequência de operação para se determinar a Impedância Característica da linha (Z_0) e a Constante de Propagação (γ). Para setar o valor de um parâmetro distribuído, o usuário pode ajustar na régua ou digitar o valor na caixinha ao lado, em notação científica, e adicionar a potência de 10. Vale ressaltar que a carta de Smith só pode ser utilizada para linhas de transmissão sem perdas, ou seja, $R = G = 0$.

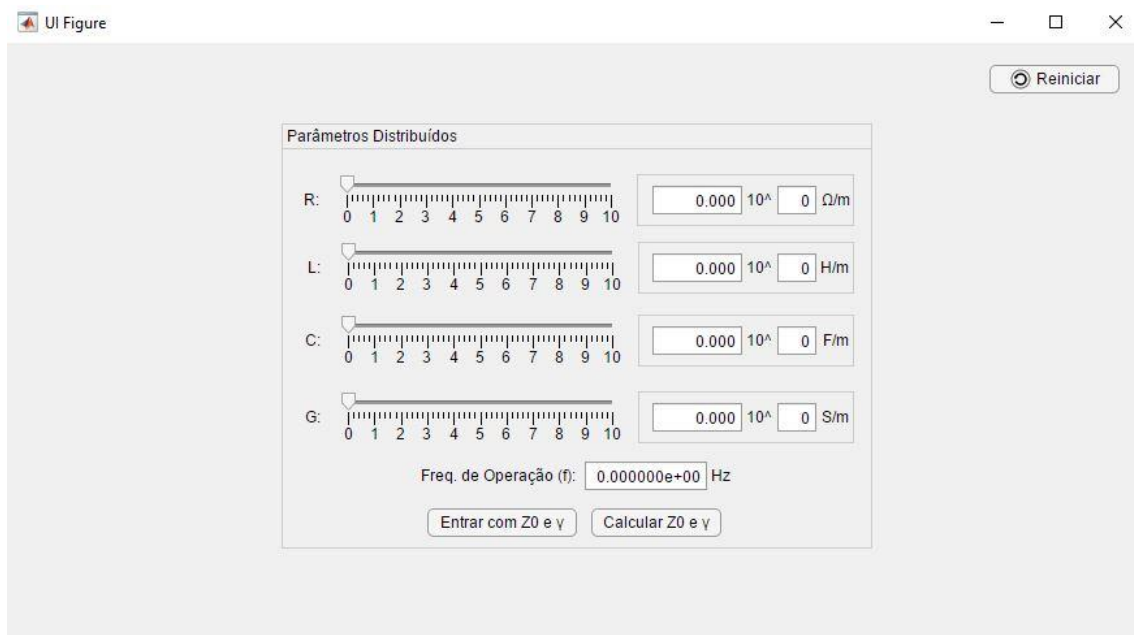


Figura 4. Janela inicial do aplicativo de Carta de Smith.

Entretanto, caso o usuário deseje entrar diretamente com o valor de Z_0 e γ , basta clicar no botão '*Entrar com Z_0 e γ* ' e será aberta a janela mostrada na Figura 5. Nela, o usuário tem a opção de entrar com Z_0 , γ e a frequência de operação e prosseguir para a tela principal do programa mostrada na Figura 6.



Figura 5. Janela para entrar diretamente com Z_0 e γ .

Na janela principal do aplicativo, Figura 6, o usuário tem a possibilidade de inserir a carga (Z_L) e ter o coeficiente de reflexão na carga (Γ_L). A partir deste ponto, o usuário pode se valer de duas funcionalidades principais do programa: a obtenção da impedância de entrada em algum ponto da linha, bem como o coeficiente de reflexão neste ponto, inserindo apenas a distância da carga desejada em função do comprimento de onda; e a realização do casamento de impedância da carga com a linha. Ambos os processos são ilustrados no gráfico disponível à esquerda da janela.

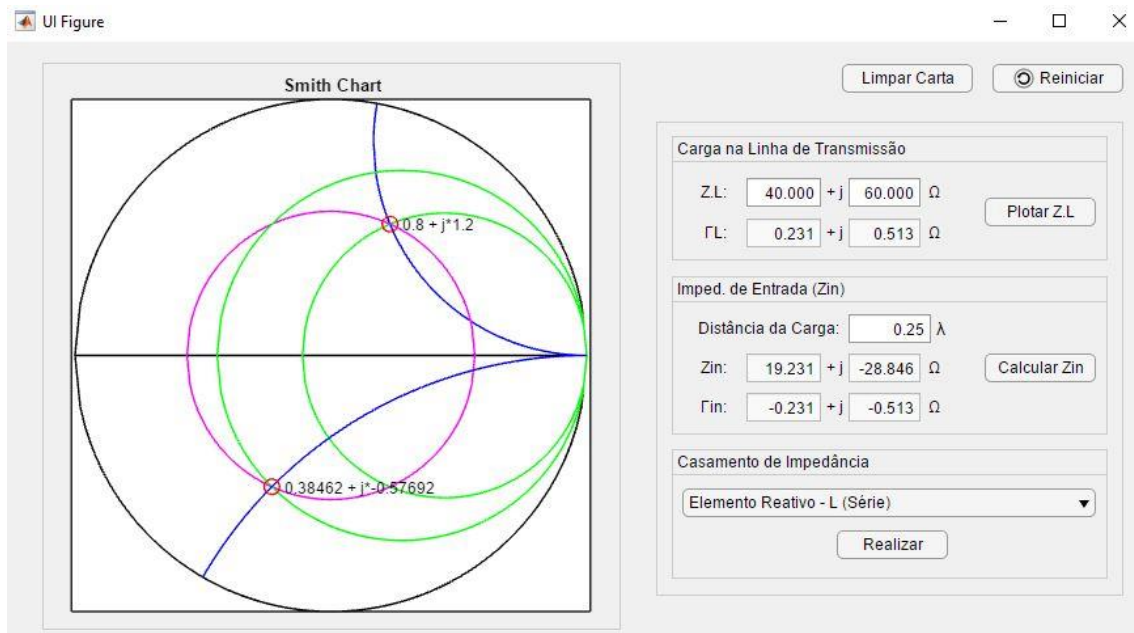


Figura 6. Janela principal do programa.

No projeto atual, 6 tipos de casamentos podem ser realizados, são eles: com indutor em série e em paralelo, com capacitor em série e em paralelo, transformador de

$\frac{1}{4}$ de λ e toco simples, faltando apenas o casamento com toco duplo. Nos casamentos com elemento reativo, capacitor ou indutor, o programa retorna o valor do elemento e a que distância da carga o elemento deve ser colocado.

No casamento por toco simples, o programa irá apresentar uma nova janela, mostrada na Figura 7, para a configuração do toco. Um casamento com toco pode ser realizado de 4 formas, pois o toco pode estar em série ou em paralelo com a linha e pode estar em curto ou em circuito aberto. Diante disto, todas estas possibilidades estão acessíveis ao usuário na janela de configuração do toco. Após configurar o toco, basta clicar no botão 'OK' e o programa retornará o tamanho do toco e a que distância da carga este deve ser inserido. Vale ressaltar que o casamento com toco simples, em todos os casos, é otimizado para diminuir o tamanho do toco.

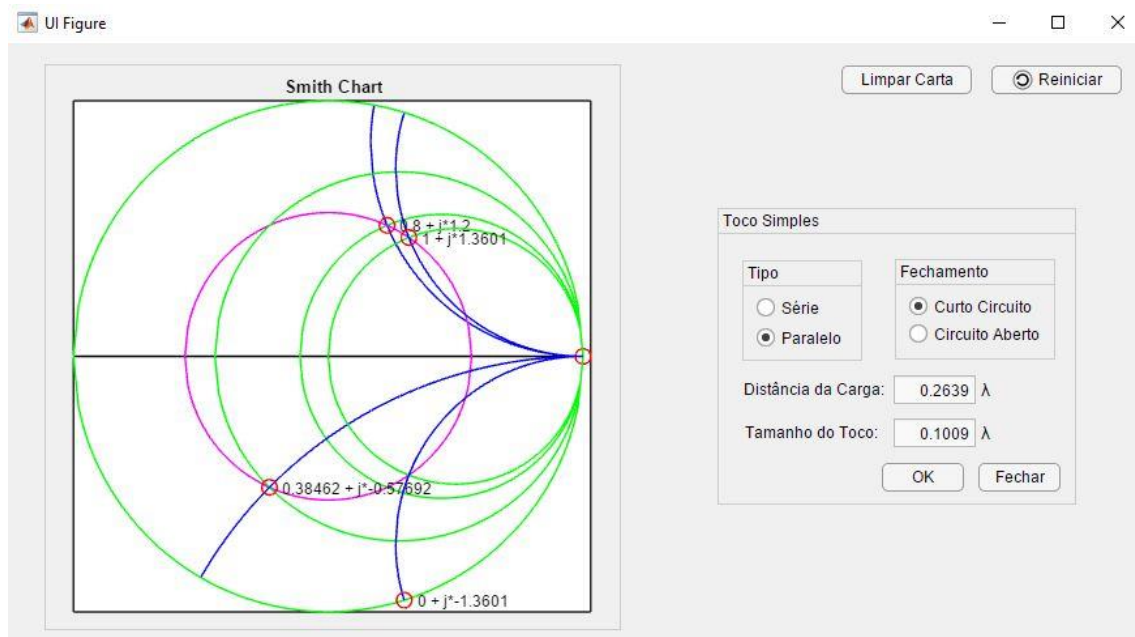


Figura 7. Janela para configuração do toco simples.

2.6. GUIAS DE ONDA

A fim de analisar o comportamento de campos elétricos e magnéticos para guias de diferentes tamanhos em diferentes frequências e para possíveis modos de propagação (TE e TM), o usuário é permitido inserir as duas dimensões do guia e as frequências do sinal a ser transmitido, o tipo de propagação e os modos de propagação. Como o processo de animação dos campos de vetores no MATLAB® está sujeito aos valores de frequência e duração própria, decidiu-se permitir que o usuário decida ambos os parâmetros.

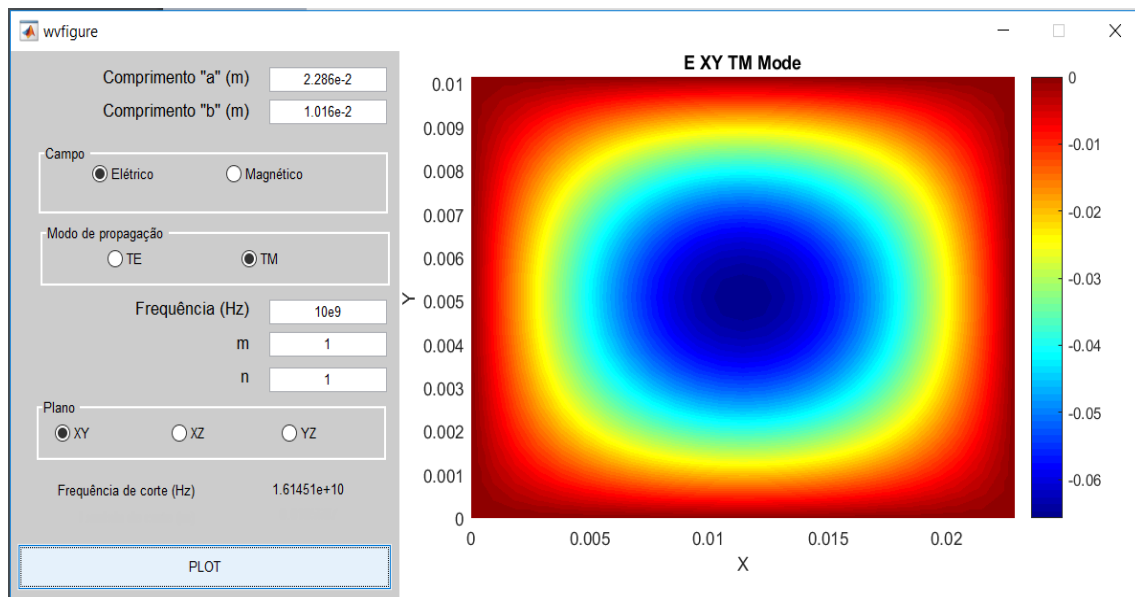


Figura 8. Janela do programa de guias de onda.

Começando com o primeiro elemento de cima para baixo, o significado dos campos editáveis são:

- **Comprimento do guia de onda a (m):** É o comprimento horizontal do guia de ondas, neste campo o usuário deve inserir o valor numérico correspondente a essa dimensão em metros.
- **Comprimento do guia de onda b (m):** Comprimento vertical do guia de ondas, o valor que deve ser inserido neste campo deve ser do tipo numérico, correspondente a esse tamanho em metros.
- **Campo:** Um painel com os botões de rádio Elétrico e Magnético aparece e, nessa seção, o usuário deve indicar se deseja plotar um campo elétrico ou magnético.
- **Frequência (Hz):** Nesta parte, você deve inserir propagação em Hertz, deve ser levado em conta que esta frequência deve estar de acordo com a condição de propagação, definida pela equação.
- **m n Parâmetro:** Em cada um desses campos, o usuário deve inserir um número inteiro que, em conjunto, defina o modo de propagação do guia de ondas retangular.
- **Plano:** Neste painel de botões de rádio, o usuário escolhe o plano do guia de ondas que deseja representar graficamente (XY, XZ, YZ).
- **Frequência de corte (Hz):** Uma vez terminada a animação, aparece o valor da frequência de corte do guia de ondas para os parâmetros especificados. Este valor é calculado através das fórmulas a seguir:

$$f_{c,TM} = f_{c,TE} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

$$f_{c,TE_{10}} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}}$$

- **PLOT:** Depois de ter inserido todos os parâmetros necessários, clicar neste botão exibe o campo de vetor desejado, animado no tempo, durante o tempo definido. Se algum parâmetro for alterado e esse botão for clicado antes que a animação do primeiro campo seja concluída, os novos gráficos aparecerão um após o outro. Recomenda-se evitar o acúmulo de ordens gráficas para não causar saturação no equipamento de processamento médio.

4. CONCLUSÃO

Desenvolveu-se um algoritmo completo, abrangendo praticamente todo o conteúdo dado na disciplina de linhas de transmissões, faltando apenas toco duplo na etapa de carta de Smith. Além disso, implementou-se de maneira satisfatória uma visualização gráfica condizente com a necessidade de compreensão dos resultados de cada questão. Portanto, como o algoritmo foi implementado em classes com métodos bem definidos, ele pode ser reutilizado em vários trabalhos futuros, como no desenvolvimento de um software para meios didáticos.

ANEXOS

Tabela 1. Expressões Matemáticas dos Campos Vetoriais no Modo $TE_{m,n}$ e $TM_{m,n}$

Componente	Modo TE	Modo TM
H_Z	$\cos(\alpha X) * \cos(\beta Y) * \cos(\omega t - Kl_{m,n}Z)$	0
E_Z	0	$\sin(\alpha X) * \sin(\beta Y) * \cos(\omega t - Kl_{m,n}Z)$
E_X	$\cos(\alpha X) * \sin(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$	$\cos(\alpha X) * \sin(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$
E_Y	$\sin(\alpha X) * \cos(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$	$\sin(\alpha X) * \cos(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$
H_X	$\sin(\alpha X) * \cos(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$	$\sin(\alpha X) * \cos(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$
H_Y	$\cos(\alpha X) * \sin(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$	$\cos(\alpha X) * \sin(\beta Y) * \sin(\omega t - Kl_{m,n}Z)$

Tabela 2. Relação entre os planos gráficos cartesianos e as expressões utilizadas.

Plano Cartesiano	Campo Vetorial	Componentes
XY	E	E_X y E_Y
XZ	E	E_X y E_Z
YZ	E	E_Y y E_Z
XY	H	H_X y H_Y
XZ	H	H_X y H_Z
YZ	H	H_Y y H_Z