



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WALLISSON FREITAS DE SOUZA

**FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DOS CAMPOS
ELÉTRICO E MAGNÉTICO NOS GUIAS DE
ONDAS RETANGULAR E CIRCULAR.**

Palmas/TO

2021

WALLISSON FREITAS DE SOUZA

**FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DOS CAMPOS
ELÉTRICO E MAGNÉTICO NOS GUIAS DE
ONDAS RETANGULAR E CIRCULAR.**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini.

Palmas/TO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S729f Souza, Wallisson Freitas de.
FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO NOS GUIAS DE ONDAS RETANGULAR E CIRCULAR.. / Wallisson Freitas de Souza. – Palmas, TO, 2021.
60 f.
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – CâmpusUniversitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.
Orientadora : Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini
1. Guias de Ondas. 2. Simulação. 3. Eletromagnetismo Aplicado. 4. Ensino em Engenharia. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

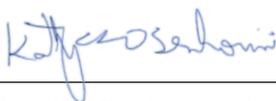
WALLISSON FREITAS DE SOUZA

FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO NOS GUIAS DE ONDAS RETANGULAR E CIRCULAR.

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 12 / 04 / 2021

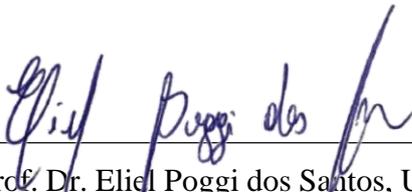
Banca Examinadora



Prof^a. Dra. Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, UFT



Prof. Dr. Humberto Xavier de Araujo, UFT



Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos, UFT

*À minha sábia e exemplar avó e segunda mãe
Maria Bonfim, à minha mãe Maria Raimunda,
aos meus familiares e amigos que
me apoiaram.*

AGRADECIMENTOS

Não há palavras que possam expressar toda minha gratidão por aqueles que me apoiaram e me deram forças de seguir em frente e lutar pelos meus sonhos. À minha avó Maria Bonfim de Freitas Gomes, pelo apoio, ensinamentos e sabedoria de vida compartilhados. À minha mãe Maria Raimunda Gomes de Freitas, por fazer o possível na contribuição deste processo de aprendizagem.

Aos demais familiares, pelo apoio, amizade e pelas palavras de motivação. Aos amigos e irmãos em Cristo que o Senhor Deus tem colocado no meu caminho, pelo companheirismo. Aos colegas de curso que enfrentaram comigo neste processo de formação acadêmica.

À minha orientadora e tutora do PET Engenharia Elétrica Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini, pelo tempo investido, conselhos e conhecimentos compartilhados durante a minha jornada acadêmica. Ao grupo PET Engenharia Elétrica, que contribuiu no meu processo de enriquecimento pessoal e intelectual. À Professora Marilene Mantovani e aos demais professores e técnicos, pela amizade, suporte e auxílio nos estudos.

A todos vocês, que contribuíram imensamente no meu processo de amadurecimento como acadêmico e pessoa, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Diante da necessidade de meios alternativos que auxiliem os estudos de guias de ondas, este projeto busca o desenvolvimento de uma ferramenta que simule os campos elétrico e magnético nos guias de ondas retangular e circular. Possibilitando que o estudante possa obter gráficos de intensidade do campo e de diagrama de vetores, no qual se pode visualizar as linhas de fluxo dos campos elétrico e magnético no interior do guia. O usuário pode também fazer simulações de guias padronizados existentes no mercado ou projetar e simular seu próprio guia. A ferramenta simula nos modos de propagação TE e TM, e podem ser utilizados diferentes frequências e materiais dielétricos. A mesma foi desenvolvida por meio do *software* GNU OCTAVE, que possui uma linguagem computacional de fácil compreensão, além de ser disponibilizado gratuitamente. A interação com a ferramenta é simples e se dá por meio de menus interativos, caixas de inserção de dados e caixas de mensagens. Foram feitas também simulações de alguns dos guias de ondas pré-configurados na ferramenta e discutidos os resultados.

Palavras-chaves: Guias de Ondas, Simulação, Eletromagnetismo Aplicado, Ensino em Engenharia.

ABSTRACT

In view of the need for alternative means to assist the studies of waveguides, this project seeks to develop a tool that simulates the electric and magnetic fields in the rectangular and circular waveguides. Allowing the student to obtain field intensity and vector diagram graphs, in which the flow lines of the electric and magnetic fields can be visualized inside the guide. The user can also make simulations of standardized guides on the market or design and simulate his own guide. The tool simulates in the TE and TM propagation modes, and different frequencies and dielectric materials can be used. It was developed using the GNU OCTAVE software, which has a computer language that is easy to understand, in addition to being freely available. The interaction with the tool is simple and takes place through interactive menus, data entry boxes and message boxes. Simulations were also made of some of the waveguides pre-configured in the tool and the results were discussed.

Key-words: Waveguides, Simulation, Applied Electromagnetism, Engineering Teaching.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Demonstração da lei de Faraday	19
Figura 2 – Demonstração da lei de Ampère/Maxwell.....	20
Figura 3 – Demonstração da lei de Gauss da Magnetostática	21
Figura 4 – Guia metálico de pratos paralelos	24
Figura 5 – Guia Metálico retangular	27
Figura 6 – Guia Metálico circular	30
Figura 7 – Funções de Bessel de primeira espécie	31
Figura 8 – Funções de Bessel de segunda espécie	31
Figura 9 – Telas do menu inicial	37
Figura 10 – Telas do menu dos guias retangulares	38
Figura 11 – Telas do menu dos guias circulares	39
Figura 12 – Telas do menu final	40
Figura 13 – Mensagem de inicialização	41
Figura 14 – Aviso de constante de propagação complexa	41
Figura 15 – Aviso de índices do modo incorretos	42
Figura 16 – Guia retangular, campo elétrico E_y no modo TE_{10} , 12 GHz com ar.....	44
Figura 17 – Guia retangular, campo magnético H_x no modo TE_{10} , 12 GHz com ar.....	44
Figura 18 – Guia retangular, Campo magnético H_z no modo TE_{10} , 12 GHz com ar.....	44
Figura 19 – Guia retangular plano XY, campo elétrico no modo TE_{10} , 12 GHz com ar	45
Figura 20 – Guia retangular plano XY, campo magnético no modo TE_{10} , 12 GHz com ar ...	46
Figura 21 – Guia retangular plano ZX, campo magnético no modo TE_{10} , 12 GHz com ar	46
Figura 22 – Guia retangular plano ZY, campo elétrico no modo TE_{10} , 12 GHz com ar.....	47
Figura 23 – Guia retangular plano ZY, campo magnético no modo TE_{10} , 12 GHz com ar	47
Figura 24 – Guia retangular plano XY, campo elétrico no modo TM_{11} , 17 GHz com ar	48
Figura 25 – Guia retangular CST plano XY, campo elétrico no modo TM_{10} , 12 GHz	49
Figura 26 – Relatório de dados do guia retangular no modo TE_{10}	49
Figura 27 – Relatório de dados do guia retangular no modo TM_{11}	50
Figura 28 – Relatório de dados do guia retangular no modo TE_{10} com teflon.....	51
Figura 29 – Guia retangular plano ZX, campo magnético modo TE_{10} , 12 GHz com teflon....	51
Figura 30 – Guia circular plano XY, campo elétrico no modo TE_{11} , 15 GHz com ar	52
Figura 31 – Guia circular plano XY, campo magnético no modo TE_{11} , 15 GHz com ar	53

Figura 32 – Guia circular plano XY, campo elétrico modo TM_{11} , 15 GHz com ar	53
Figura 33 – Guia circular plano XY, campo magnético modo TM_{11} , 15 GHz com ar	53
Figura 34 – Guia circular CST plano XY, campo elétrico no modo TE_{10} , 15 GHz com ar.....	54
Figura 35 – Relatório de dados do guia circular no modo TE_{11}	55
Figura 36 – Relatório de dados do guia circular no modo TM_{11}	55
Figura 37 – Relatório de dados do guia circular no modo TE_{11} com teflon	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de P'_{nm} para o modo TE.....	32
Tabela 2 – Valores de P_{nm} para o modo TM.....	33
Tabela 3 – Dielétricos pré-configurados	36
Tabela 4 – Guias retangulares pré-configurados	36
Tabela 5 – Guias circulares pré-configurados	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET	Programa de educação tutorial
UFT	Universidade Federal do Tocantins
TEM	Ondas transversais eletromagnéticas
TE	Ondas transversas elétricas
TM	Ondas transversas magnéticas
EIA	<i>Electronic Industries Alliance</i> ou Aliança das Indústrias de Eletrônicos
WR	<i>Waveguide rectangular</i> ou guia de onda retangular

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{E}	Campo elétrico
\vec{H}	Campo magnético
\vec{D}	Densidade de fluxo elétrico
\vec{B}	Densidade de fluxo magnético
\vec{M}	Densidade de corrente magnética
\vec{J}	Densidade de corrente elétrica
ρ	Densidade de carga elétrica
μ_0	Permeabilidade do vácuo
ϵ_0	Permissividade vácuo
μ_r	Permeabilidade relativa do meio
ϵ_r	Permissividade relativa do meio
k_c	Número de onda de corte
k	Número de onda
α	Constante de atenuação
β	Constante de fase
γ	Constante de propagação complexa
η	Impedância intrínseca do meio
ω	Frequência angular
i	Corrente elétrica
Φ	Potencial Eletrostático
J_n	Funções de Bessel de primeira espécie
Y_n	Funções de Bessel de segunda espécie
P_{nm}	m-ésima raiz de J_n

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	Metodologia	17
2	FUNDAMENTOS DO ELETROMAGNETISMO	18
2.1	Equações De Maxwell	18
2.1.1	Significado físico das equações de Maxwell.....	19
2.2	Propagação de Ondas	21
3	GUIAS METÁLICOS	23
3.1	Guia de Placas Paralelas	24
3.1.1	Modo TEM	24
3.1.2	Modo TE	25
3.1.3	Modo TM	26
3.2	Guia Retangular	27
3.2.1	Modo TE_{mn}	27
3.2.1	Modo TM_{mn}	28
3.3	Guia Circular	29
3.3.1	Modo TE_{mn}	30
3.3.2	Modo TM_{mn}	33
4	FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO	35
4.1	Dados Pré-definidos	35

4.2	Telas da Ferramenta e Funcionamento	37
4.3	Caixas de Mensagens	41
5	SIMULAÇÕES	43
5.1	Guia Retangular	43
5.1.1	Gráficos de intensidade	43
5.1.2	Gráficos de Diagrama Vetorial	45
5.1.3	Discussões	48
5.2	Guia Circular	52
5.2.1	Gráficos de Diagrama Vetorial	52
5.2.2	Discussões	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS.....	58
	APÊNDICE – EQUAÇÕES E CÁLCULOS DA FERRAMENTA	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A cada ano que passa surgem novas tecnologias que revolucionam a forma de viver e interagir com o mundo. Mediante isto, o surgimento das ferramentas computacionais e o desenvolvimento de teorias de aprendizagem vem contribuindo para viabilizar algumas mudanças na educação (FIOLHAIS; TRINDADE, 2003). Há inúmeros desafios atrelados ao processo de ensino-aprendizagem de conceitos físicos pelos métodos tradicionais nos cursos de engenharia. Pois assim como os docentes precisam encontrar formas simplificadas de demonstrar fenômenos complexos, os discentes por outro lado, encontram dificuldades de visualização desses fenômenos (LOPES *et al.*, 2012).

Há muitos conceitos abstratos que estão relacionados às situações de observação que invariavelmente requerem equipamentos sofisticados, os quais geralmente estão presentes apenas nos laboratórios (Pietrocola, 2002). Diante disso, muitos estudantes de engenharia elétrica e eletrônica encontram dificuldades para o estudo e compreensão de problemas relacionados às áreas do eletromagnetismo. De forma que o estudo dos campos elétricos e magnéticos, aplicados nos guias de ondas, mostra-se ainda mais desafiador, uma vez que se trata de fenômenos que além de serem invisíveis a olho nu, requerem uma fundamentação teórica aprofundada para compreendê-los.

Segundo Ferreira *et al.* (2017), nas disciplinas de áreas do eletromagnetismo são discutidos diversos tópicos com forte dependência matemática e mesmo se os alunos estiverem preparados e tiverem todos os pré-requisitos necessários para frequentar tais disciplinas, a visualização espacial precisa fazer parte do processo de aprendizagem. Nesse contexto, a falta de ferramentas adequadas, sejam elas computacionais ou laboratoriais, pode desestimular ou atrasar o aprendizado dos estudantes desses temas.

O uso de ferramentas computacionais tornou-se essencial para os estudos de diversos temas dentro da engenharia elétrica, onde vários *softwares* e linguagens de programação ganharam destaques por sua fácil usabilidade, legibilidade e recursos disponibilizados. De acordo com Nogueira *et al.* (2019), a necessidade de uma base de conhecimentos em programação, é o único aspecto negativo do uso da mesma para a escrita de programas que simulam conceitos físicos. O GNU OCTAVE, por exemplo, foi o *software* escolhido para o desenvolvimento desse projeto, que assim como MATLAB, “tornou-se um aliado importante

para o aprendizado, pois sua versatilidade permite boa interface com o usuário, quer pela facilidade dos componentes pré-existentes, quer pela criação de elementos por meio da linguagem de programação” (BARROS, 2007).

1.2 Justificativa

Segundo Dori e Belcher (2014), a visualização, por meio de gráficos 2D e 3D, permite que os estudantes construam uma visão mais profunda da natureza de vários fenômenos do eletromagnetismo, tornando-os mais concretos e compreensíveis. Portanto mediante a dificuldade encontrada por alguns estudantes de Engenharia Elétrica nos estudos de temas relacionados ao eletromagnetismo, especialmente em estudos voltados aos guias de ondas e ondas guiadas, surge a necessidade de novas alternativas que possam ser utilizadas como forma de complementação do aprendizado. Segundo Echeverri (2010), com o advento dos computadores vários problemas que antes demandavam muito esforço e tempo, passaram a ser solucionados através das ferramentas computacionais.

Nesse contexto, este trabalho busca o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação dos campos elétrico e magnético nos guias de ondas retangulares e circulares, quer sejam eles os comerciais, quer sejam os projetados pelo usuário. Para isso se fez uso do *software* GNU OCTAVE, que se caracteriza por ser uma linguagem computacional com foco em resolução de problemas numéricos matemáticos lineares e não-lineares. O GNU OCTAVE é também conhecido por sua alta compatibilidade com o *software* MATLAB, que é outro *software* muito utilizado para resolução de problemas matemáticos. Contudo o GNU OCTAVE se torna uma alternativa mais viável, pelo fato de ser disponibilizado gratuitamente, possuindo também uma interface interativa (GNU OCTAVE, 2020).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta que realize simulações dos campos elétrico e magnético nos guias de ondas retangulares e circulares, utilizando o *software* GNU OCTAVE, que possa ser utilizado como uma alternativa no processo de ensino-aprendizagem dos temas relacionados.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Implementar na ferramenta de simulação opções que permitam ao usuário realizar simulações com guias padronizados existentes no mercado ou projetar seu próprio guia.
2. Proporcionar ao usuário da ferramenta opções variadas de dielétricos comumente utilizados nos guias comerciais ou realizar simulações com materiais quaisquer.
3. Proporcionar ao usuário da ferramenta a possibilidade de gerar relatórios e gráficos de intensidade (retangular) e/ou diagrama de vetores (retangular e circular) das linhas de fluxo dos campos elétrico e magnético do guia simulado.

1.4 Metodologia

Esse trabalho foi desenvolvido de acordo com as seguintes etapas:

- Inicialmente foi definido o tema, bem como os objetivos geral e específicos e a justificativa do projeto.
- Na segunda etapa foi realizado um levantamento de soluções similares gratuitas e bibliográfico, onde foram abordados os conceitos fundamentais do eletromagnetismo, propagação de ondas eletromagnéticas nos guias de ondas e um levantamento dos principais guias e materiais dielétricos disponíveis no mercado.
- A terceira etapa do trabalho consiste no desenvolvimento da ferramenta de simulação de guias de ondas, por meio da linguagem de programação do *software* GNU OCTAVE.
- Na quarta etapa do trabalho foi explanado as funcionalidades e funcionamento da ferramenta.
- A quinta etapa é composta pelas simulações dos guias comerciais padronizados e com diferentes materiais dielétricos. Nessa etapa também foi feito análises dos resultados das simulações realizadas.
- Na última parte do trabalho foram feitas as considerações finais deste trabalho proposto de acordo com os resultados obtidos pelas simulações realizadas.

2 FUNDAMENTOS DO ELETROMAGNETISMO

A teoria eletromagnética se consolidou pelo trabalho publicado pelo físico matemático escocês James Clerk Maxwell em 1873 (POZAR, 2011), que é a base dos estudos dos fenômenos elétrico e magnético, os quais descreveu em seu trabalho pelas então conhecidas equações de Maxwell. Estas equações são essenciais para a consolidação das teorias de ondas guiadas, propagação de ondas eletromagnéticas dentre outros (OBERZINER, 2008).

2.1 Equações de Maxwell

A forma geral das equações de Maxwell, escritas na forma diferencial no domínio da frequência são (POZAR, 2011):

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Segundo Pozar (2011), utilizando o sistema internacional de medidas, tem-se:

\vec{E} - Campo elétrico em volts por metro (V/m).

\vec{H} - Campo magnético em amperes por metro (A/m).

\vec{D} - Densidade de fluxo elétrico em coulombs por metro quadrado (Coul/m²).

\vec{B} - Densidade de fluxo magnético em webers por metro quadrado (Wb/m²).

\vec{M} - Densidade de corrente magnética em volts por metro quadrado (V/m²).

\vec{J} - Densidade de corrente elétrica em amperes por metro quadrado (A/m²).

ρ - Densidade de carga elétrica em coulombs por metro cúbico (Coul/m³).

A densidade de corrente magnética é fictícia, utilizada apenas para fins matemáticos. Pois como a corrente elétrica é o fluxo de carga, a densidade de carga ρ é a fonte final do campo eletromagnético (POZAR, 2011). Essas equações na forma diferencial são mais adequadas para realizar operações matemáticas (OBERZINER, 2008). Já para realizar a análise das condições de contorno, por exemplo, usa-se a forma integral (BARROS, 2007).

As relações entre as intensidades dos campos elétrico e magnético e as densidades dos seus respectivos fluxos elétrico e magnético, são definidas como (POZAR, 2011):

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

Onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade do vácuo, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m é a permissividade vácuo, μ_r é a permeabilidade relativa do meio e ϵ_r é a permissividade relativa do meio.

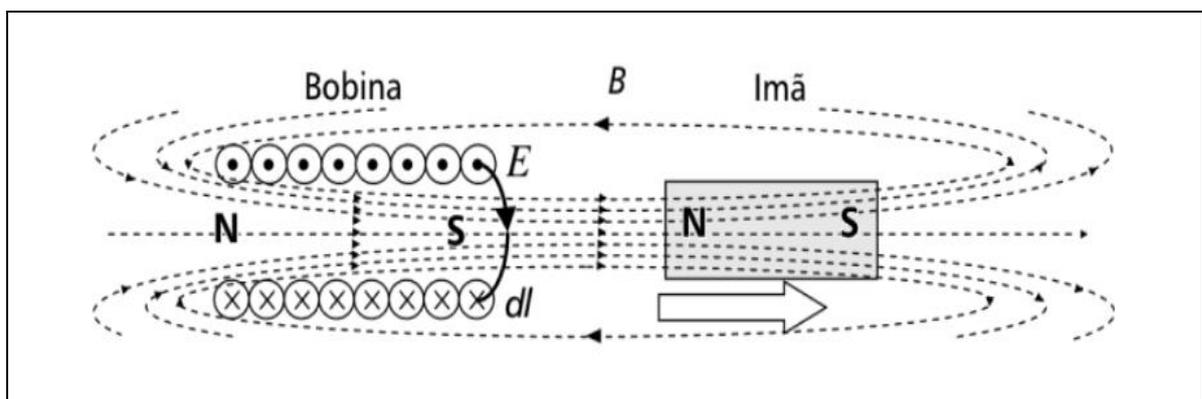
2.1.1 Significado físico das equações de Maxwell

Apesar de serem apenas 4, as equações de Maxwell incorporam um significado físico riquíssimo, descrevendo os fenômenos eletromagnéticos em um nível macroscópico. Contudo para uma melhor análise física dos fenômenos descritos se pode utilizar alguns teoremas integrais de vetores, convertendo-as para a então conhecida forma integral das equações de Maxwell (POZAR, 2011).

Conhecida como a lei da indução magnética ou lei de Faraday, a equação (7) implica que a variação do fluxo magnético em uma região limitada por um caminho fechado L, induz uma força eletromotriz que se opõe a esta variação, ou seja, campos magnéticos variantes no tempo geram campos elétricos. Além disso, esses campos são do tipo rotacionais, diferente do campo gerado por cargas elétricas que são divergentes. Na Figura 1 é explanado que a variação do campo magnético (ímã) induz uma corrente na bobina, gerando um campo magnético que se opõe ao afastamento do ímã (ROCHOL, 2018).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Leftrightarrow \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

Figura 1 – Demonstração da lei de Faraday

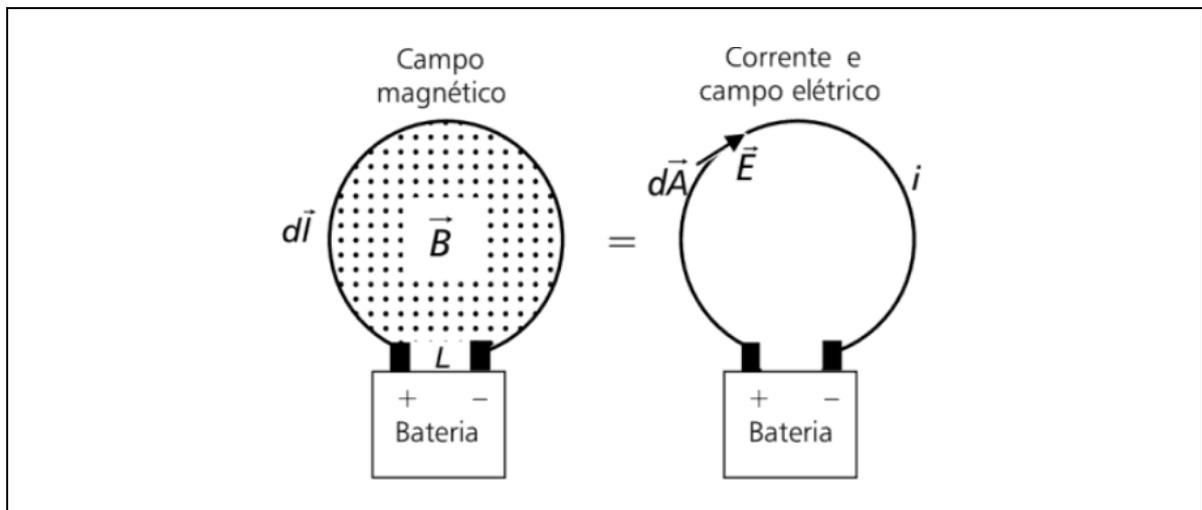


Fonte: Adaptado de Rochol (2018).

A equação (8), que caracteriza a então conhecida lei de Ampère/Maxwell, assim como a equação (7), explica a indissociabilidade entre os campos elétricos e magnéticos quando estes variam no tempo, já que campos elétricos variantes no tempo também geram campos magnéticos. Mostra também que um campo magnético \vec{B} surge quando há a circulação de uma corrente constante i por um laço fechado l , como é visto na Figura 2 (ROCHOL, 2018).

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \Leftrightarrow \oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \cdot i + \mu\epsilon \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

Figura 2 – Demonstração da lei de Ampère/Maxwell



Fonte: Adaptado de Rochol (2018).

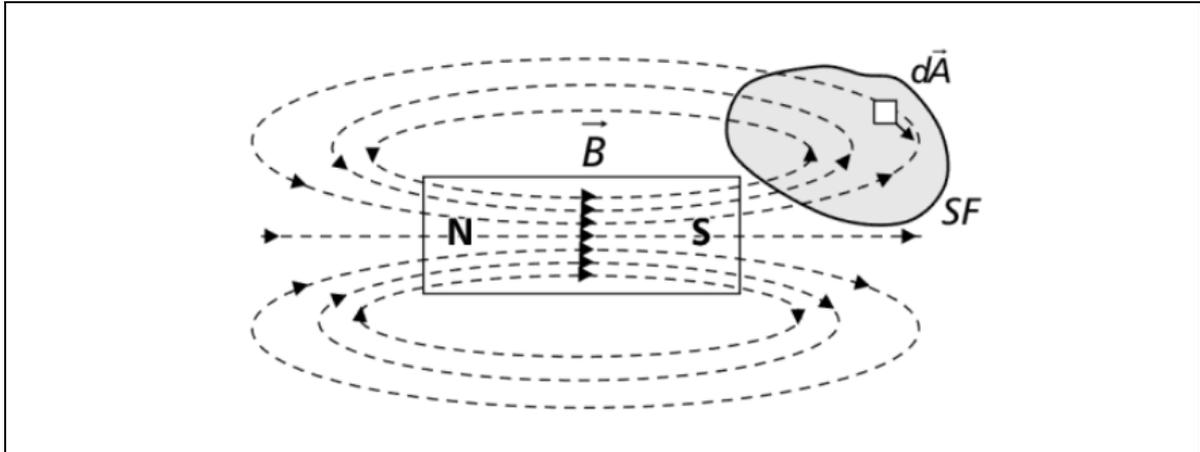
Na equação (9) é definido a lei de Gauss da eletrostática na forma integral (ROCHOL, 2018). A mesma está associada a uma integral de superfície fechada, em que o fluxo do campo elétrico que atravessa uma superfície fechada é igual a razão entre a carga envolvida e a permissividade elétrica do meio. Dessa forma deve existir campo elétrico em regiões onde a carga resultante é não nula.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \Leftrightarrow \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon} \quad (9)$$

Já a equação (10) explica a lei de Gauss da Magnetostática, e como é visto na figura 3, essa equação expressa que o fluxo magnético que atravessa uma superfície fechada S sempre é nulo, o que implica na não existência de cargas magnéticas, ou seja, não há monopolos magnéticos. (ROCHOL, 2018).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Leftrightarrow \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (10)$$

Figura 3 – Demonstração da lei de Gauss da magnetostática



Fonte: Adaptado de Rochol (2018).

2.2 Propagação de Ondas

Desenvolvendo as equações (1) e (2) de Maxwell, presumindo um meio sem fontes ($\rho = 0$ e $\vec{J} = \vec{0}$), linear, isotrópico e homogêneo. Chega-se nas equações da onda de Helmholtz (POZAR, 2011):

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0 \quad (11)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = 0 \quad (12)$$

Onde ω é a frequência angular da onda, e $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ é definido como a constante de propagação.

Segundo Pozar (2011), a solução básica de uma onda plana pode ser encontrada considerando o campo elétrico somente com componente \hat{x} sem variação, e o campo magnético somente com componente \hat{y} . Logo as soluções se reduzem a:

$$E_x = E^+ e^{-jkz} + E^- e^{jkz} \quad (13)$$

$$H_y = \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-jkz} - E^- e^{jkz}) \quad (14)$$

Onde $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ é a impedância intrínseca do meio.

As ondas eletromagnéticas são classificadas verificando as componentes dos campos elétrico e magnético na direção de propagação, as quais podem ser classificadas de três formas, tais como:

Ondas TEM

São ondas eletromagnéticas transversais, ou seja, quando ambos os campos estão perpendiculares à direção de propagação da onda (WENTWORTH, 2006), de forma que $E_z = H_z = 0$. Essas ondas necessitam de no mínimo dois condutores para se propagarem, e podem existir em todo o espectro, pois não possuem frequência de corte (POZAR, 2011).

Ondas TE

São as ondas transversas elétricas, quando somente o campo elétrico é perpendicular a direção de propagação (WENTWORTH, 2006), ou seja, $E_z = 0$ e $H_z \neq 0$. As mesmas necessitam de no mínimo um condutor e um dielétrico homogêneo para se propagarem (POZAR, 2011).

Ondas TM

São as ondas transversas magnéticas, quando somente o campo magnético é perpendicular à direção de propagação (WENTWORTH, 2006), ou seja, $E_z \neq 0$ e $H_z = 0$. E assim como as ondas TE, necessitam de no mínimo um condutor e um dielétrico homogêneo para se propagarem (POZAR, 2011).

3 GUIAS METÁLICOS

Os guias de ondas são estruturas que confinam os campos, através de reflexões no seu interior, que possibilita a transmissão de ondas eletromagnéticas, guiando-as de um ponto ao outro (BARROS, 2007). Para os guias metálicos explanados neste capítulo, assume-se que os mesmos são delimitados por superfícies condutoras ideais (condutividade infinita) e preenchido por um material dielétrico sem perdas de parâmetros ϵ, μ .

Logo considerando uma onda propagando na direção \hat{z} e assumindo uma dependência $e^{j\omega t}$, os campos elétrico e magnético podem ser explanados como (POZAR, 2011):

$$\vec{E}(x, y, z) = [\vec{e}(x, y) + \hat{z}e_z(x, y)]e^{-j\beta z} \quad (15)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = [\vec{h}(x, y) + \hat{z}h_z(x, y)]e^{-j\beta z} \quad (16)$$

Nos casos em que há perdas no condutor ou no dielétrico, a constante de propagação será complexa, e definida por:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (17)$$

Considerando essas características, as soluções gerais das equações de Maxwell para as linhas de transmissão ou guias de ondas, das componentes transversas em função das componentes longitudinais E_z e H_z , podem ser definidas por (POZAR, 2011):

$$H_x = \frac{j}{k_c^2} \left(\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (18)$$

$$H_y = \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (19)$$

$$E_x = \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$E_y = \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (21)$$

Onde:

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2 \quad (22)$$

Sendo que:

k_c – É o número de onda de corte, que depende da frequência de corte e da geometria do guia.

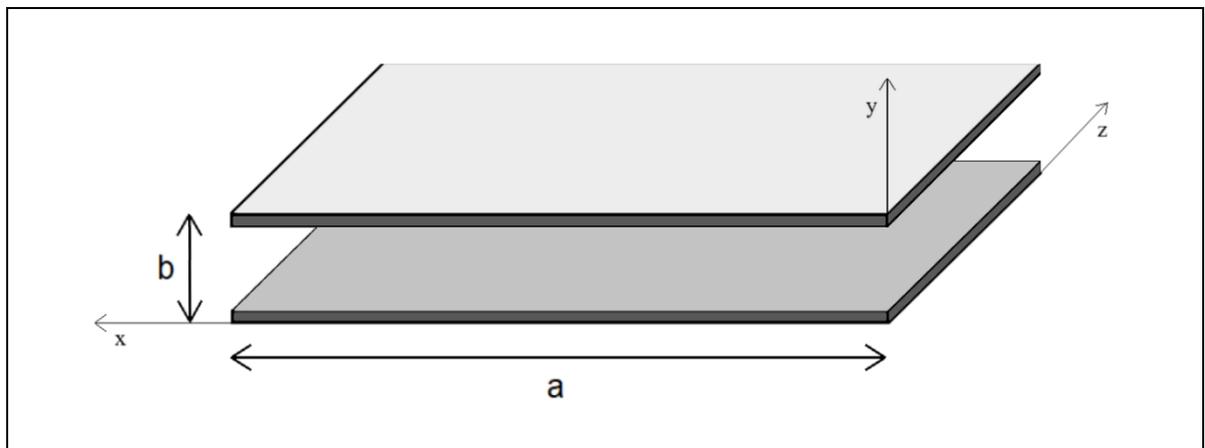
k – Número de onda.

β – Constante de fase.

3.1 Guia de Placas Paralelas

Este é o tipo de linha de transmissão mais simples, composto de duas placas condutoras de largura “a” sobrepostas com altura “b”, como é explanado na Figura 4. Para a sua análise, considera-se a largura das placas muito maior que a distância entre as mesmas, ou seja, $a > b$, com comprimento infinito, de modo que se pode desprezar os efeitos dos campos nas bordas e a variação dos campos na direção da largura ($\partial/\partial x = 0$) (POZAR, 2011).

Figura 4 – Guia metálico de pratos paralelos



Fonte: Autor.

Para analisar as condições de contorno, considera-se que nos guias metálicos a componente tangencial do campo elétrico e a normal do campo magnético se anulam na superfície do condutor, logo:

$$\vec{E}_{Tan} = \vec{H}_{Nor} = \vec{0}. \quad (23)$$

3.1.1 Modo TEM

Neste modo, sabe-se que $E_z = H_z = 0$. Além disso, pelas condições de contorno $\vec{E}_{Tan} = \vec{H}_{Nor} = \vec{0}$ aplicadas nas superfícies situadas em $y = 0$ e $y = b$ do guia, tem-se que $\vec{E}_x = \vec{H}_y = \vec{0}$ (POZAR, 2011). Portanto os campos resultantes são:

$$\vec{E} = E_0 \hat{y} \quad (24)$$

$$\vec{H} = -\frac{E_0}{\eta} \hat{x} \quad (25)$$

As equações (24) e (25) são soluções genéricas, que explicam a relação entre os dois campos. Uma solução mais completa pode ser obtida aplicando a equação de Laplace para o potencial eletrostático existente entre as duas placas $\Phi(x, y)$, de forma que (POZAR, 2011):

$$\Phi(x, 0) = 0 \quad (26)$$

$$\Phi(x, b) = V_0 \quad (27)$$

Assim segundo Pozar (2011), os campos resultantes no guia de pratos paralelos no modo TEM podem ser expressos por:

$$\vec{E} = -\nabla_t \Phi(x, y)e^{-jkz} = -\hat{y} \frac{V_0}{b} e^{-jkz} \quad (28)$$

$$\vec{H} = -\hat{x} \frac{V_0}{\eta b} e^{-jkz} \quad (29)$$

3.1.2 Modos TM

Sabendo que nesse modo a componente de campo $H_z = 0$ e $E_z \neq 0$. Considerando que não há variação na direção de \hat{x} , a equação da onda reduzida é (POZAR, 2011):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) e_z(x, y) = 0 \quad (30)$$

Esta equação diferencial (30), possui uma solução geral que pode ser explicada por (POZAR, 2011):

$$e_z(x, y) = A \text{sen}(k_c y) + B \text{cos}(k_c y) \quad (31)$$

Pelas condições de contorno se sabe que $e_z(x, 0) = 0$ e $e_z(x, b) = 0$, logo $B = 0$ e k_c pode ser definido por:

$$k_c = n\pi/b, \text{ para } n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (32)$$

Onde b é a largura entre as placas do guia.

Para o modo TM se deve levar em conta o número de onda de corte ao calcular-se a constante de propagação, sendo β agora definido por:

$$\beta = \sqrt{k^2 - (n\pi/b)^2} \quad (33)$$

Portanto o campo resultante E_z é:

$$E_z = A_n \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (34)$$

Através desse resultado, considerando as relações estabelecidas pelas equações (18-21), pode-se encontrar as componentes transversais dos campos elétrico e magnético, as quais são:

$$H_x = j \frac{\omega \varepsilon b}{n\pi} A_n \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (35)$$

$$E_y = -j \frac{\beta b}{n\pi} A_n \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (36)$$

$$E_x = H_y = 0 \quad (37)$$

3.1.3 Modos TE

Para esses modos a componente de campo $E_z = 0$ e $H_z \neq 0$. Considerando que não há variação na direção de \hat{x} , a equação da onda reduzida é (POZAR, 2011):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2\right) h_z(x, y) = 0 \quad (38)$$

Semelhante aos modos TM, a equação diferencial (38) possui uma solução geral dada por (POZAR, 2011):

$$h_z(x, y) = A \operatorname{sen}(k_c y) + B \operatorname{cos}(k_c y) \quad (39)$$

Considerando que $e_x(x, 0) = 0$ e $e_x(x, b) = 0$, e levando em conta a relação estabelecida na equação (18), conclui-se que $A = 0$. Sendo o número de onda de corte k_c idêntico ao dos modos TM (equação 32), assim como a constante de propagação β (equação 33). Portanto o campo resultante H_z é:

$$H_z = B_n \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (40)$$

Através desse resultado, considerando as relações estabelecidas pelas equações (18-21), pode-se encontrar as componentes transversais dos campos elétrico e magnético, os quais podem ser definidos por:

$$E_x = j \frac{\omega \mu b}{n\pi} B_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (41)$$

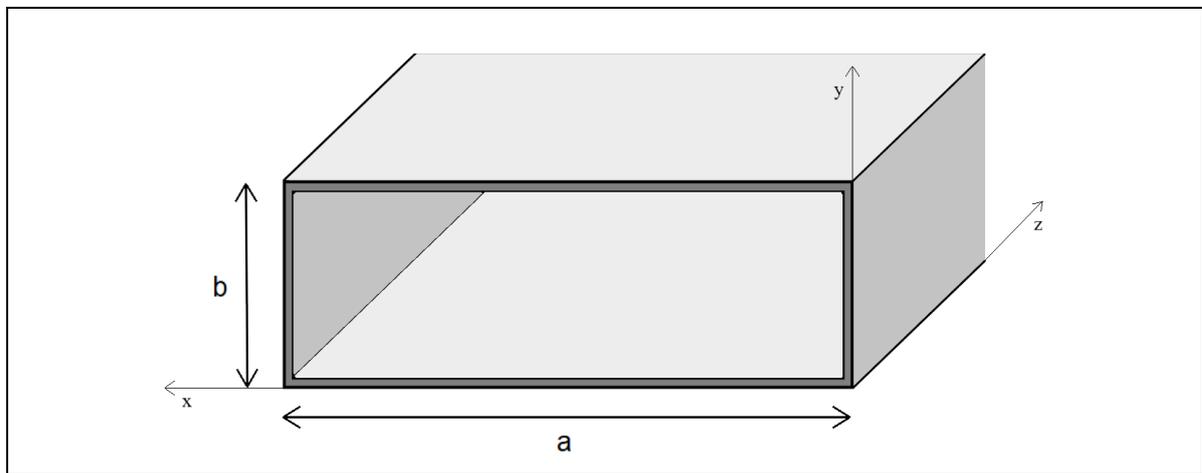
$$H_y = j \frac{\beta b}{n\pi} B_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (42)$$

$$E_y = H_x = 0 \quad (43)$$

3.2 Guia Retangular

Para a análise do guia retangular, como pode ser visto na Figura 5, considera-se um guia de largura “a” e altura “b”, com $a > b$ e com comprimento infinito. Por convenção, adota-se “a” como o lado mais longo (cerca de 2 vezes a altura), para evitar uma antecipação do próximo modo, o que causaria uma diminuição da faixa de frequência útil. Difere-se do guia de pratos paralelos por ter a largura limitada por duas placas condutoras, o que não permite desprezar os efeitos de bordas, além de não suporta o modo TEM, pois este modo não se propaga num guia de onda oco (WENTWORTH, 2006).

Figura 5 – Guia metálico retangular



Fonte: Autor

3.2.1 Modos TE_{mn}

Nesses modos se sabe que a componente de campo $E_z = 0$ e $H_z \neq 0$, sendo H_z definido pela equação da onda reduzida (POZAR, 2011):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2\right) h_z(x, y) = 0 \quad (44)$$

A solução geral da equação (44) pode ser encontrada pelo método de separação de variáveis, em que h_z pode ser definido por (POZAR, 2011):

$$h_z(x, y) = [A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x)][C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y)] \quad (45)$$

Onde:

$$k_c^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (46)$$

Na equação (44) se nota que diferentemente do guia de placas paralelas, no guia retangular é preciso considerar que há variação dos campos na largura, $(\partial/\partial x) \neq 0$. Logo as primeiras diferenças já surgem nas condições de contorno, sabendo que na interface das placas $\vec{E}_{Tan} = \vec{H}_{Nor} = 0$. Portanto para solucionar a equação (45), pode-se usar os resultados conhecidos para as componentes tangenciais do campo elétrico nas paredes do guia, de forma que (POZAR, 2011):

$$e_x(x, y) = 0, \text{ para } y = 0 \text{ e } y = b \quad (47)$$

$$e_y(x, y) = 0, \text{ para } x = 0 \text{ e } x = a \quad (48)$$

Assim ao resolver a equação (45) considerando as condições explanadas nas equações (47-48), e por meio das relações estabelecidas pelas equações (18-21), é possível determinar as componentes transversais e longitudinal dos campos elétrico e magnético, as quais são:

$$H_z(x, y, z) = A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (49)$$

$$H_x(x, y, z) = \frac{j\beta m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (50)$$

$$H_y(x, y, z) = \frac{j\beta n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (51)$$

$$E_x(x, y, z) = \frac{j\omega\mu n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (52)$$

$$E_y(x, y, z) = -\frac{j\omega\mu m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad (53)$$

A_{mn} é uma constante arbitrária, $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$.

3.2.2 Modos TM_{mn}

Esses modos possuem componente $H_z = 0$. E de forma similar a equação (44), a componente E_z é determinada pela equação da onda reduzida:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2\right) e_z(x, y) = 0 \quad (54)$$

A equação (54), de forma análoga aos modos TE_{mn} , possui solução determinada pelo método de separação de variáveis, onde a solução geral é:

$$e_z(x, y) = [A \cos(k_x x) + B \text{sen}(k_x x)][C \cos(k_y y) + D \text{sen}(k_y y)] \quad (55)$$

Pelas condições de contorno aplicadas em e_z (POZAR, 2011):

$$e_z(x, y) = 0, \text{ para } x = 0 \text{ e } x = a \quad (56)$$

$$e_z(x, y) = 0, \text{ para } y = 0 \text{ e } y = b \quad (57)$$

Logo ao resolver a equação (55) considerando as condições explanadas nas equações (56-57) e seguindo as relações estabelecidas pelas equações (18-21), é possível determinar as componentes transversais e longitudinal dos campos elétrico e magnético, as quais são:

$$E_z(x, y, z) = B_{mn} \operatorname{sen} \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi y}{b} \right) e^{-j\beta z} \quad (58)$$

$$H_x(x, y, z) = \frac{j\omega\varepsilon n\pi}{bk_c^2} B_{mn} \operatorname{sen} \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left(\frac{n\pi y}{b} \right) e^{-j\beta z} \quad (59)$$

$$H_y(x, y, z) = -\frac{j\omega\varepsilon m\pi}{ak_c^2} B_{mn} \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi y}{b} \right) e^{-j\beta z} \quad (60)$$

$$E_x(x, y, z) = -\frac{j\beta m\pi}{ak_c^2} B_{mn} \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi y}{b} \right) e^{-j\beta z} \quad (61)$$

$$E_y(x, y, z) = -\frac{j\beta n\pi}{bk_c^2} B_{mn} \operatorname{sen} \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left(\frac{n\pi y}{b} \right) e^{-j\beta z} \quad (62)$$

B_{mn} é uma constante arbitrária, $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$ e a frequência de corte: $f_{c_{mn}} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}$.

3.3 Guia Circular

Diferente dos guias de placas paralelas e retangular, devido a sua geometria, no guia circular é utilizado o sistema de coordenadas cilíndricas (ρ, ϕ, z) (Figura 6). Sendo os campos elétrico e magnético definidos por:

$$E = E_\rho \hat{r} + E_\phi \hat{\phi} + E_z \hat{z} \quad (63)$$

$$H = H_\rho \hat{r} + H_\phi \hat{\phi} + H_z \hat{z} \quad (64)$$

Os campos transversos podem ser expressos em função das componentes longitudinais E_z e H_z , onde adequando as equações (18-21) para as coordenadas cilíndricas se encontra:

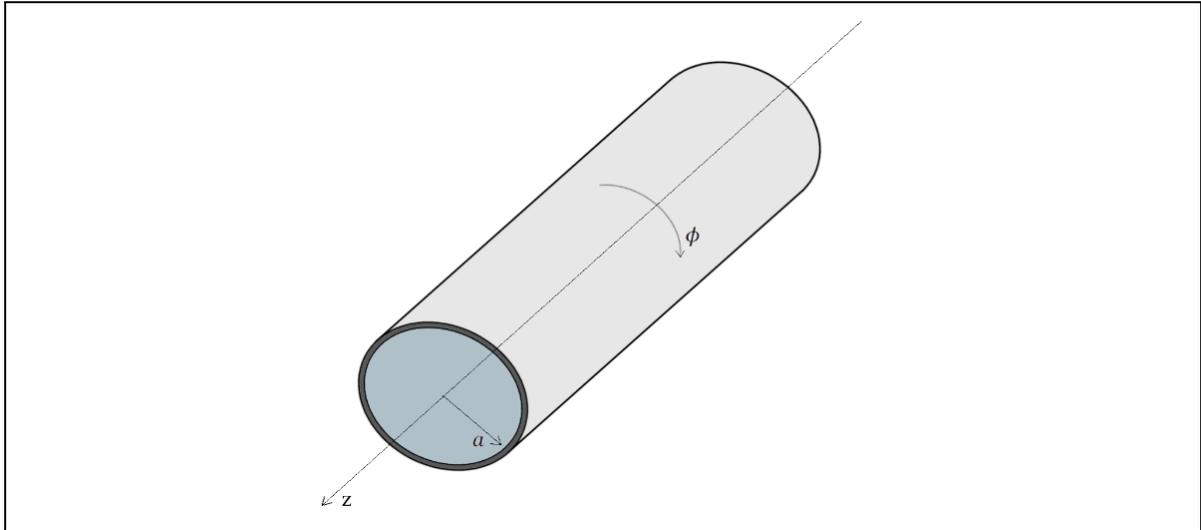
$$E_\rho = \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{\omega\mu}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (65)$$

$$E_\phi = \frac{-j}{k_c^2} \left(-\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \quad (66)$$

$$H_\rho = \frac{j}{k_c^2} \left(\frac{\omega\varepsilon}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \quad (67)$$

$$H_\phi = \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (68)$$

Figura 6 – Guia metálico circular



Fonte: Autor.

3.3.1 Modos TE_{nm}

Nos modos TE_{nm} sabe-se que $E_z = 0$. Portanto, a solução da equação onda reduzida, em coordenadas cilíndricas, para a componente de campo magnética H_z pode ser expressa por (POZAR, 2011):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + k_c^2 \right) h_z(\rho, \phi) = 0 \quad (69)$$

A equação diferencial (69), assim como é visto na solução da equação da onda no guia retangular, pode ser solucionada por meio do método da separação de variáveis, desta vez com funções dependentes de ρ e ϕ :

$$h_z(\rho, \phi) = R(\rho)P(\phi) \quad (70)$$

Substituindo (70) em (69) e simplificando-a se obtém (POZAR, 2011):

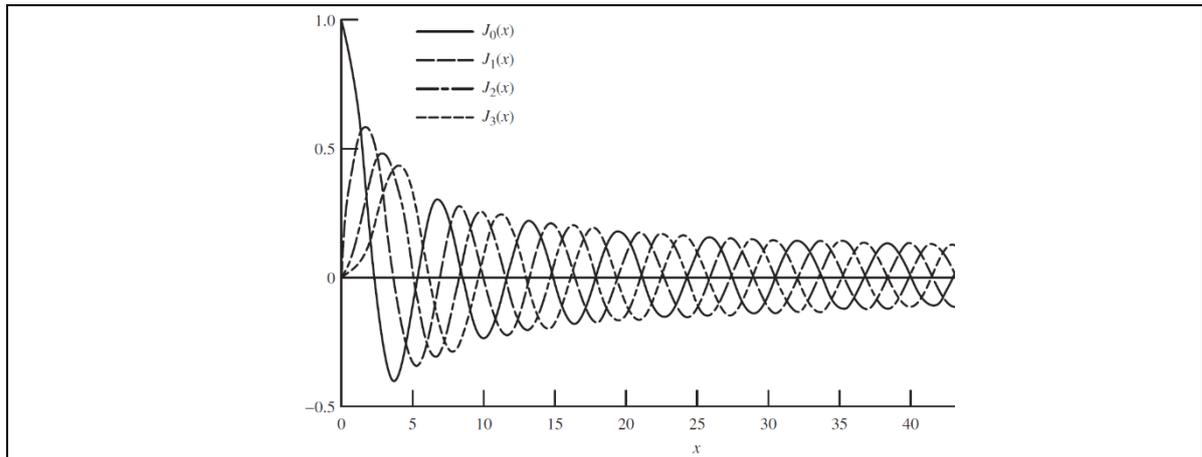
$$\rho^2 \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \rho \frac{dR}{d\rho} + (\rho^2 k_c^2 - n^2)R = 0 \quad (71)$$

A equação (71) é conhecida como equação diferencial de Bessel e possui solução conhecida (POZAR, 2011):

$$R(\rho) = CJ_n(k_c \rho) + DY_n(k_c \rho) \quad (72)$$

A função J_n é conhecida como função de Bessel de primeira espécie e a função Y_n , de segunda espécie. Conforme é visto na Figura (7), as funções de Bessel de primeira espécie (J_n) possuem caráter ondulatório com amplitude decrescente.

Figura 7 – Funções de Bessel de primeira espécie



Fonte: Adaptado de Balanis (2012).

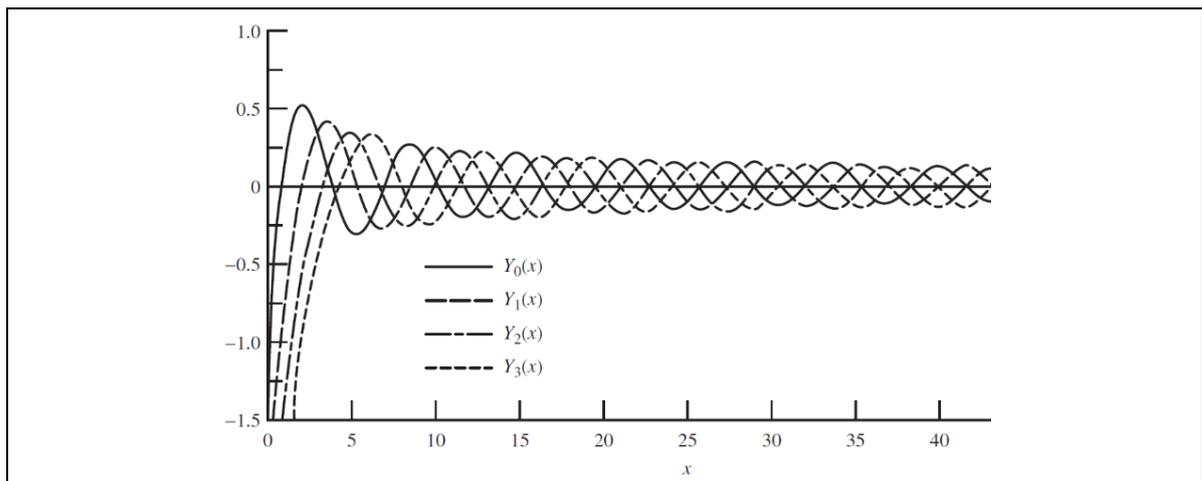
Essas funções possuem algumas propriedades que as caracterizam, de modo que para:

$$n \neq 0 \Rightarrow J_n(0) = 0 \quad (73)$$

$$n = 0 \Rightarrow J_n(0) = 1 \quad (74)$$

As funções de Bessel de segunda espécie (Y_n) também possuem caráter ondulatório com amplitude decrescente (Figura 8), contudo essas funções tendem ao infinito à medida que se aproximam de $x = 0$.

Figura 8 – Funções de Bessel de segunda espécie



Fonte: Adaptado de Balanis (2012).

Segundo Pozar (2011), as funções de Bessel de segunda espécie são fisicamente inaceitáveis para os guias de onda circular, pois $Y_n(k_c \rho)$ é infinito para $\rho = 0$. Logo para que a equação (72) não dependa destas funções, $D = 0$, e h_z é reduzido à:

$$h_z(\rho, \phi) = [A \cos(n\phi) + B \sin(n\phi)]J_n(k_c\rho) \quad (75)$$

Portanto a partir das relações explanadas nas equações (65-68) é possível determinar as componentes transversais dos campos elétrico e magnético:

$$E_\rho(\rho, \phi, z) = \frac{-j\omega\mu}{k_c^2\rho} [A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)]J_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \quad (76)$$

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c} [A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)]J'_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \quad (77)$$

$$H_\rho(\rho, \phi, z) = \frac{-j\beta}{k_c} [A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)]J'_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \quad (78)$$

$$H_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{-j\beta n}{k_c^2\rho} [A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)]J_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \quad (79)$$

Sabendo que $E_\phi = 0$ em $\rho = a$, tem-se que $J'_n(k_c\rho) = 0$. Assim k_c está relacionado diretamente com a raiz de J'_n , de forma que $J'_n(P'_{nm}) = 0$, sendo P'_{nm} a m-ésima raiz de J'_n . Desse modo (POZAR, 2011):

$$k_c = \frac{P'_{nm}}{a} \quad (80)$$

Onde “a” é o raio do guia, de modo que se pode definir a frequência de corte para esse modo como:

$$f_{c_{nm}} = \frac{P'_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (81)$$

Portanto a constante de propagação, em função de P'_{nm} , pode ser definida por:

$$\beta_{nm} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{P'_{nm}}{a}\right)^2} \quad (82)$$

Os primeiros valores de P'_{nm} correspondem aos primeiros modos propagantes TE_{nm} , e estão listados na Tabela 1:

Tabela 1 – Valores de P'_{nm} para os modos TE

n	P'_{n1}	P'_{n2}	P'_{n3}
0	3,832	7,016	10,174
1	1,841	5,331	8,536
2	3,054	6,706	9,970

Fonte: Adaptado de Pozar (2011).

3.3.2 Modos TM_{nm}

Para os modos TM_{nm} $H_z = 0$. Portanto segundo Pozar (2011), a solução da equação onda reduzida, em coordenadas cilíndricas, da componente de campo elétrico E_z para esse modo é:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + k_c^2\right) e_z(\rho, \phi) = 0 \quad (83)$$

Devido a semelhança com a equação diferencial (69), a solução geral da equação (83) é equivalente a solução encontrada para a equação (69), de forma que:

$$e_z(\rho, \phi) = [A \cos(n\phi) + B \sin(n\phi)] J_n(K_c \rho) \quad (84)$$

Portanto a partir das relações explanadas nas equações (65-68) é possível determinar as componentes transversais dos campos elétrico e magnético:

$$E_\rho(\rho, \phi, z) = \frac{-j\beta}{k_c} [A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)] J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \quad (85)$$

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{-j\beta n}{k_c^2 \rho} [A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)] J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \quad (86)$$

$$H_\rho(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c^2 \rho} [A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)] J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \quad (87)$$

$$H_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{-j\omega\mu}{k_c} [A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)] J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \quad (88)$$

Sabendo que $E_z(\rho, \phi) = 0$ em $\rho = a$, tem-se que $J_n(K_c \rho) = 0$. Logo k_c está relacionado diretamente com P_{nm} , sendo P_{nm} a m -ésima raiz de J_n . Assim:

$$k_c = \frac{P_{nm}}{a} \quad (89)$$

Portanto a frequência de corte para esse modo, em função das raízes P_{nm} , pode ser definida por:

$$f_{c_{nm}} = \frac{P_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (90)$$

Os valores de P_{nm} , correspondentes aos modos TM_{nm} , estão listados na Tabela 2:

Tabela 2 – Valores de P_{nm} para os modos TM

n	P_{n1}	P_{n2}	P_{n3}
0	2,405	5,520	8,654

1	3,832	7,016	10,174
2	5,135	8,417	11,620

Fonte: Adaptado de Pozar (2011).

Com base na fundamentação teórica e equações desenvolvidas neste capítulo, foi possível desenvolver a ferramenta de simulação dos campos elétrico e magnético nos guias de ondas retangular e circular, sendo seu funcionamento e recursos explanados no Capítulo 4.

4 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

Há alguns softwares conhecidos no meio acadêmico, que podem ser usados para realizar simulações de guias de ondas, antenas e afins. Apesar de alguns possuírem versões estudantis, como o CST Studio Suite e o Ansys HFSS, ainda se requer que o usuário modele o guia e determine as condições de contorno, exigindo também maior conhecimento e domínio das ferramentas desses *softwares* (DASSAULT SYSTÈMES, 2021) (ANSYS, 2021). Não foi encontrado nenhum software gratuito que simula os campos elétrico e magnético, nos guias retangulares e circulares, de forma simples e intuitiva.

Nesse contexto, a ferramenta desenvolvida neste trabalho, foi elaborada por meio da linguagem de programação do *software* GNU OCTAVE 6.2. Sendo a mesma desenhada para funcionar como um ambiente de simulação e estudo dos guias de ondas retangulares e circulares. Para isso, ela possibilita a plotagem dos campos elétrico e magnético, para os modos TE e TM, dos guias de ondas circular e retangular.

Para oferecer uma interação fácil e simples, foi adotado o uso de menus com opções de seleção única, caixas de diálogo para a inserção de dados e caixas de diálogos com mensagens. A mesma também permite que o usuário salve as figuras geradas em arquivos .png e gere relatórios com as principais informações do guia e da simulação. A usabilidade e tempo de resposta da ferramenta podem variar de acordo com o sistema operacional, versão do *software* GNU OCTAVE instalada e hardware do computador.

4.1 Dados Pré-definidos

Para aumentar as possibilidades da simulação, foram pré-configurados diferentes tipos de materiais dielétricos, explanados na Tabela 3, e guias com diferentes dimensões, explanados nas Tabelas 4 e 5. Pode-se também optar por realizar simulações com quaisquer materiais dielétricos e/ou dimensões do guia, inserindo os referidos dados durante a simulação.

Os guias retangulares pré-configurados são padronizados e seguem as especificações da EIA (*Electronic Industries Alliance* ou Aliança das Indústrias de Eletrônicos), também conhecida como padrão americano. Os guias são nomeados com as siglas WR (*waveguide rectangular* ou guia de onda retangular), seguido pelos números indicadores da maior dimensão “a” do guia em polegadas. Desse modo foram selecionados 5 guias, sendo que cada um atua em uma das bandas de frequências: C, W, X, Ku e K, e possuem diferentes faixas de frequências de operação. Tais dados estão explanados na Tabela 4.

Tabela 3 – Dielétricos pré-configurados

Material	Permissividade Relativa	Permeabilidade Relativa
Ar	1,0	1
PTFE - Politetrafluoroetileno	2,25	1
Teflon	2,08	1
Porcelana	5,04	1
Nylon	2,28	1

Fonte: Adaptado de Pozar (2011).

Tabela 4 – Guias retangulares pré-configurados

Nomenclatura	Banda de Frequência	Faixa de Frequência (GHz)	Largura (mm)	Altura (mm)
WR-42	K	18,0 – 26,5	10,70	4,30
WR-62	Ku	12,4 – 18,0	15,80	7,90
WR-90	X	8,20 – 12,4	22,86	10,16
WR-112	W	7,05 – 10,0	28,50	12,62
WR-137	C	5,85 – 8,20	34,85	15,80

Fonte: Adaptado de Pozar (2011).

Os dados dos guias circulares pré-configurados (Tabela 5), foram obtidos com base no catálogo disponibilizado pela PHASE 2 MICROWAVE, empresa fornecedora de filtros, diplexers, componentes de micro-ondas e subsistemas, atuando principalmente na europa e regiões próximas. Assim, foram selecionados 5, sendo que cada um atua em uma das bandas de frequências: X, Ku, K, Ka ou Q (PHASE 2 MICROWAVE, 2021).

Tabela 5 – Guias circulares pré-configurados

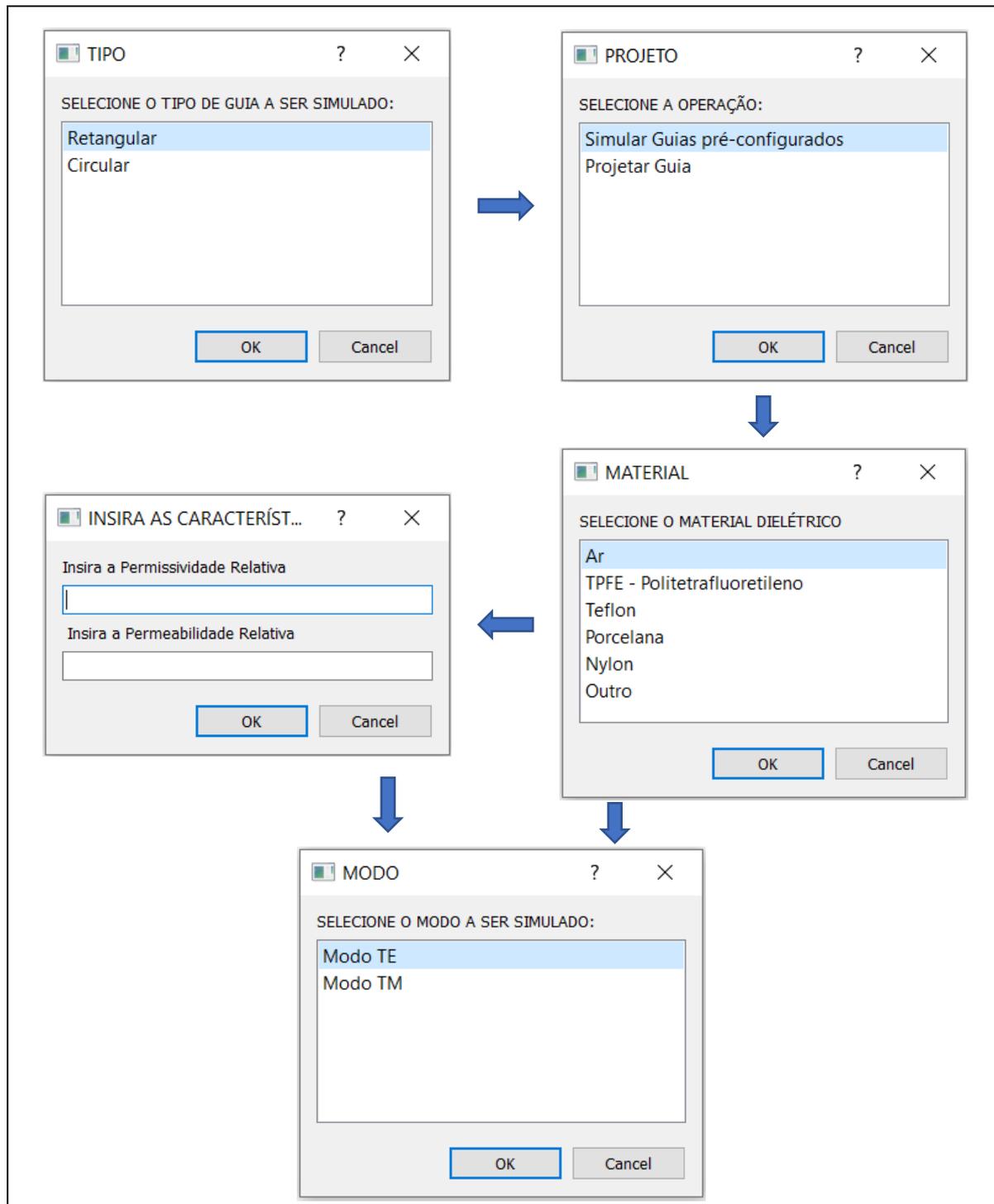
Guia	Banda de Frequência	Faixa de Frequência (GHz)	Raio (mm)
1	X	8,5 – 11,6	23,83
2	Ku	13,4 – 18,0	15,08
3	K	20,0 – 24,5	10,06
4	Ka	33,0 – 38,5	6,35
5	Q	38,5 – 43,0	5,56

Fonte: Adaptado de Phase 2 Microwave (2021).

4.2 Telas da Ferramenta e Funcionamento

O código da ferramenta é dividido em quatro partes principais: o menu inicial (Figura 9), o menu do guia retangular (Figura 10), o menu do guia circular (Figura 11) e o menu final (Figura 12).

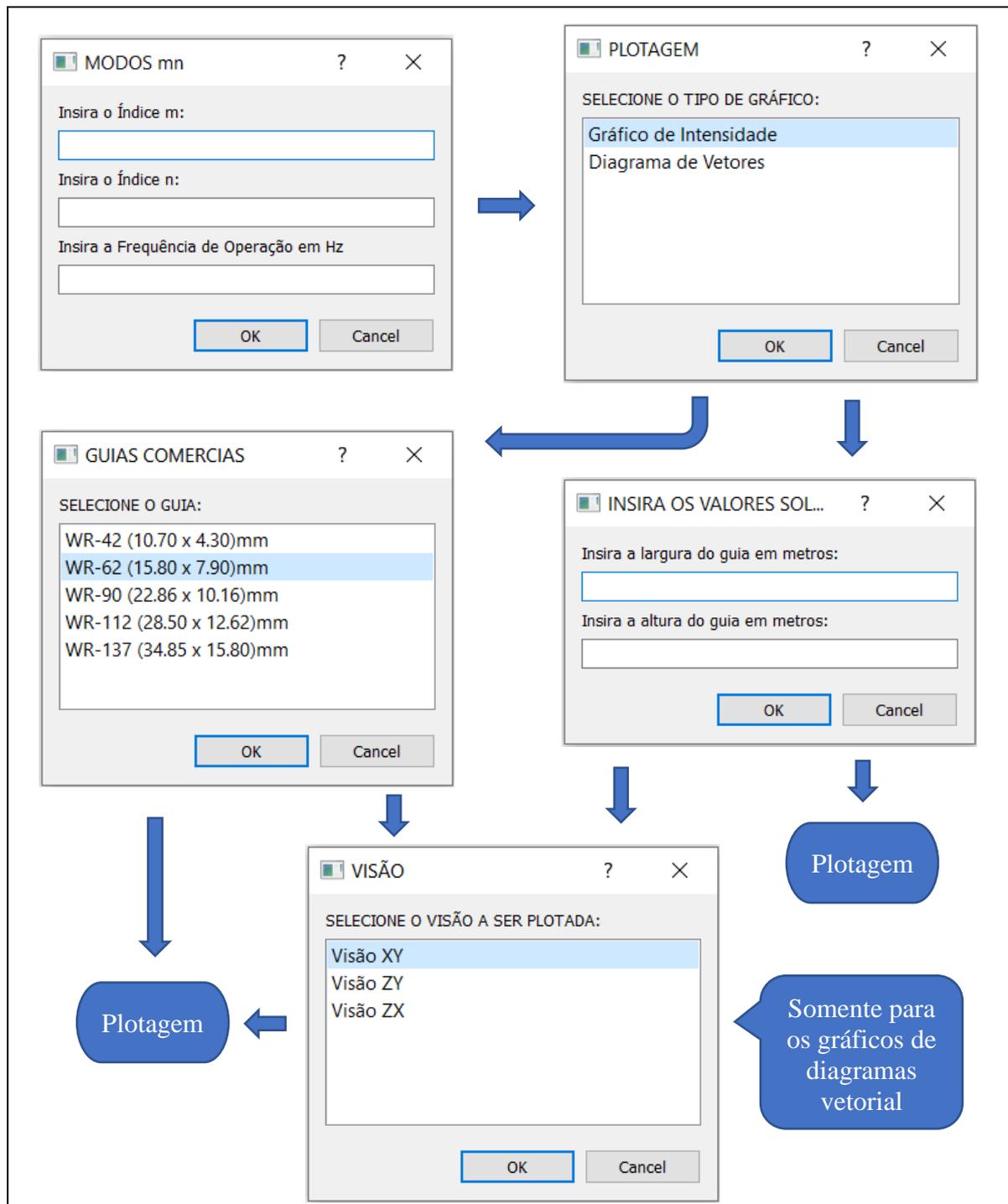
Figura 9 – Telas do menu inicial



Fonte: Autor.

No menu inicial, explanado na Figura 9, o usuário determina as principais informações da simulação tal qual: o tipo de guia (retangular ou circular), se simulará um guia pré-configurado ou de dimensões quaisquer, determina-se também o material dielétrico (ou se insere as características de um material qualquer em uma caixa de diálogo dedicada) e por fim, o modo de propagação da simulação (TE ou TM).

Figura 10 – Telas do menu dos guias retangulares

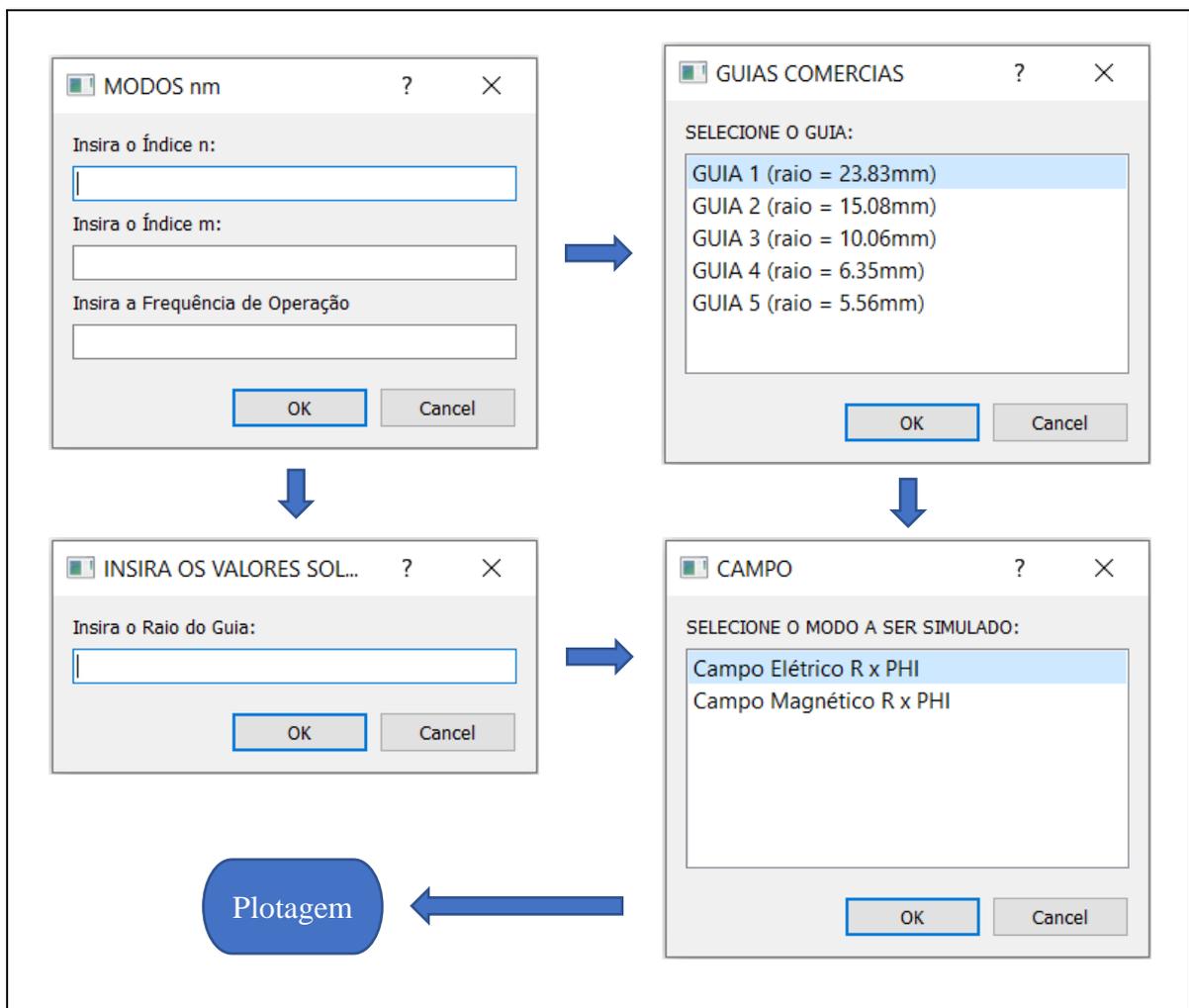


Fonte: Autor.

Ao optar por simular um guia retangular, deve-se definir as características da plotagem, tais como: os índices “m” e “n” do modo de propagação, o tipo de gráfico a ser plotado (intensidade ou diagrama de vetores), e as dimensões do guia. Se o usuário optar anteriormente por projetar um guia, uma caixa de diálogo abre-se para definição da altura e largura. Caso opte por simular um guia pré-configurado, deve-se escolher um dos guias visto na Figura 10.

Similarmente ao menu dos guias retangulares, no menu dos guias circulares se define as características da plotagem, tais como: os índices “n” e “m” do modo de propagação (neste caso pode-se simular até os modos TE_{33} e TM_{33}) e as dimensões do guia. Para estes guias, foi implementado a plotagem para gerar gráficos de diagrama vetorial do plano XY. Caso o usuário opte anteriormente por projetar um guia, abre-se uma caixa de diálogo, possibilitando a definição do raio. Caso opte por simular um guia pré-configurado, deve-se escolher um dos 5 guias explanados na Figura 11.

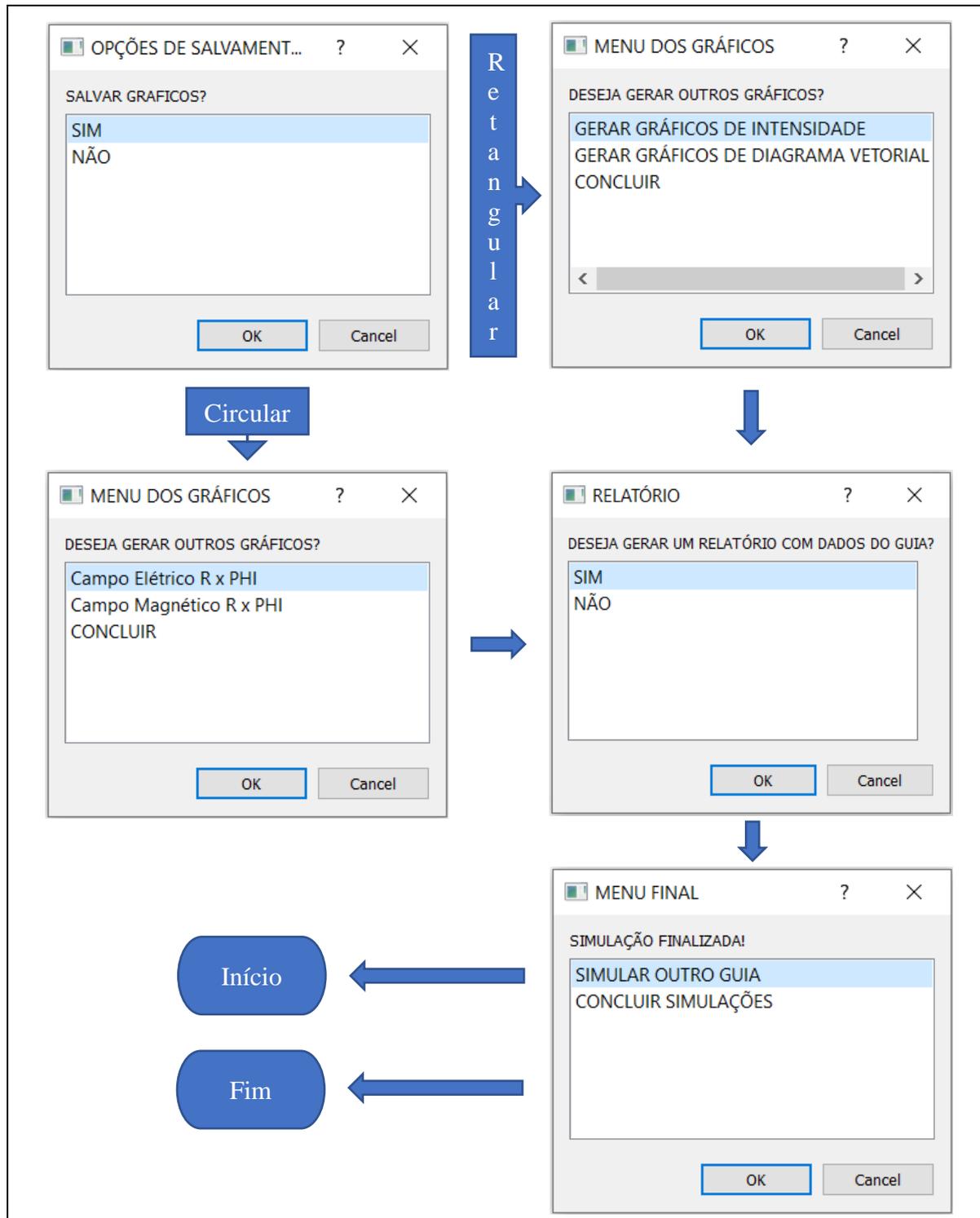
Figura 11 – Telas do menu dos guias circulares



Fonte: Autor.

Como se pode ver nas telas do menu final (Figura 12), após a plotagem é possível salvar as figuras geradas em formato .png, de forma que há um *loop* que permite ao usuário gerar e salvar vários gráficos diferentes do mesmo guia.

Figura 12 – Telas do menu final



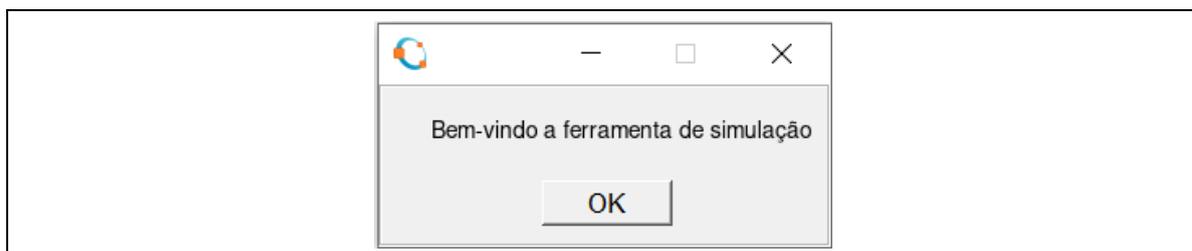
Fonte: Autor.

Por fim, no final da simulação se pode gerar um relatório que lista os principais dados, tais como: largura e altura do guia (retangular), raio (circular), permissividade relativa, permissividade do meio, permeabilidade relativa, permeabilidade do meio, impedância característica do meio, frequência angular, frequência de operação, frequência de corte, constante de propagação do guia, constante de corte, constante de propagação, modo m, modo n, comprimento de onda do guia e velocidade de fase.

4.3 Caixas de Mensagens

Para uma melhor usabilidade da ferramenta de simulação, foram implementadas algumas caixas de mensagens com informações. A primeira (Figura 13) é apresentada ao iniciar a ferramenta e prossegue para o menu inicial (Figura 9), e assim como as demais caixas de mensagens, permanece na tela por 3,5 segundos.

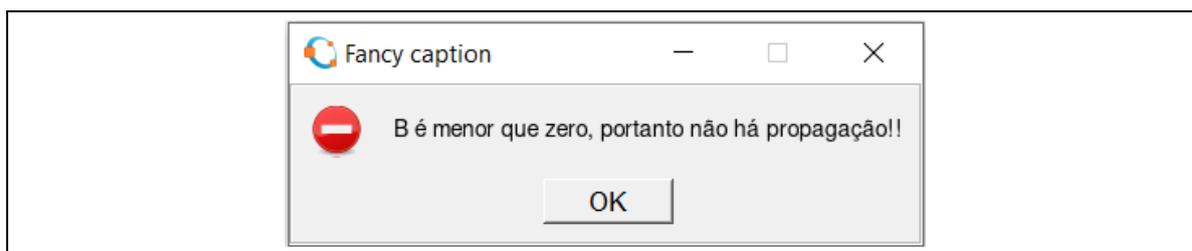
Figura 13 – Mensagem de inicialização



Fonte: Autor.

A segunda mensagem (Figura 14) é apresentada caso, durante a simulação de um guia retangular, os dados inseridos induzam uma constante de propagação com valor complexo. Nesse caso não há propagação e, portanto, não é possível se gerar os gráficos, cabendo ao usuário redefinir os dados da plotagem.

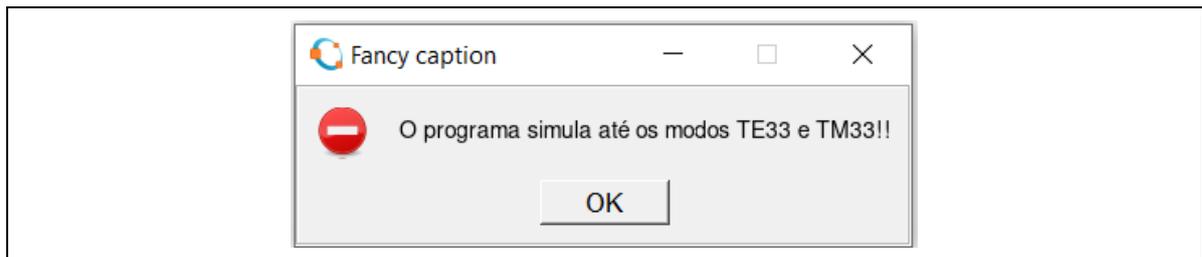
Figura 14 – Aviso de constante de propagação complexa



Fonte: Autor.

Por fim, a terceira mensagem é apresentada caso, durante a simulação de um guia circular, o usuário defina o valor de um dos índices “n” e “m” superior a 3. Isso se dá porque a tabela dos valores de P'_{nm} e P_{nm} , dos respectivos modos TE_{nm} e TM_{nm} , foi configurada até os índices $n = 3$ e $m = 3$, o que possibilita ao usuário realizar simulações com até 24 modos de propagação diferentes.

Figura 15 – Aviso de índices do modo incorretos



Fonte: Autor.

Seguindo as orientações apresentados nesse capítulo e fazendo-se uso dos recursos da ferramenta também já explanados, realizou-se algumas simulações com diferentes guias e materiais dielétricos. Os resultados destas simulações foram discutidos e são mostrados no Capítulo 5 desse trabalho.

5 SIMULAÇÕES

Para a execução das simulações, foram escolhidos um guia retangular e um guia circular pré-configurados, de modo que ao definir a frequência de operação, atentou-se às especificações de cada guia (Tabelas 4 e 5). Vale ressaltar que esses guias foram modelados de acordo com os padrões dos guias disponíveis no mercado.

As figuras dos gráficos visualizadas, foram obtidas por meio de uma função implementada no código, que as salva em formato .png. Aconselha-se ao usuário salvá-las, pois tais imagens possuem melhor qualidade gráfica que as figuras mostradas nas janelas do *software* GNU OCTAVE. As imagens podem apresentar algumas distorções devido à configuração da plotagem.

5.1 Guia Retangular

O guia WR-90 ($a = 22,86$ cm e $b = 10,16$ cm) foi escolhido para realizar esta simulação. Plotou-se os gráficos no modo dominante do guia (TE_{10}) e no modo TM_{11} , utilizando o ar como material dielétrico ($\epsilon_r = 1$ e $\mu_r = 1$) (Tabela 3) e. A frequência de operação escolhida foi de 12 GHz, que se encontra dentro da faixa de operação indicada para este guia (Tabela 4). Os limites dos gráficos são definidos automaticamente de acordo com as dimensões do guia simulado.

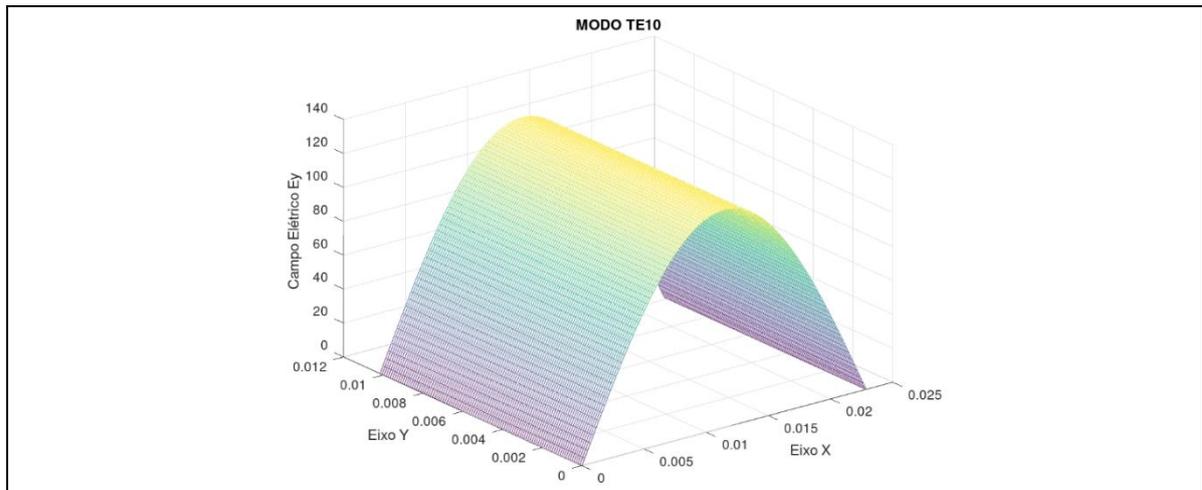
5.1.1 Gráficos de Intensidade

Nas Figuras 16, 17 e 18, estão explanados os gráficos de intensidade das componentes não nulas dos campos elétrico e magnético para este guia. A região amarelada evidencia a área de maior intensidade do campo, que no caso da componente de campo elétrico E_y (Figura 16), está exatamente no meio da largura do guia ($a/2$).

Na Figura 17, percebe-se que a componente de campo magnético H_x possui formato semelhante ao da componente de campo elétrico E_y , onde se verifica a intensidade mínima no meio da largura do guia ($a/2$) e aumentando em direção às laterais. está de acordo com a teoria de propagação de ondas, visto o caráter de perpendicularidade existente entre os campos.

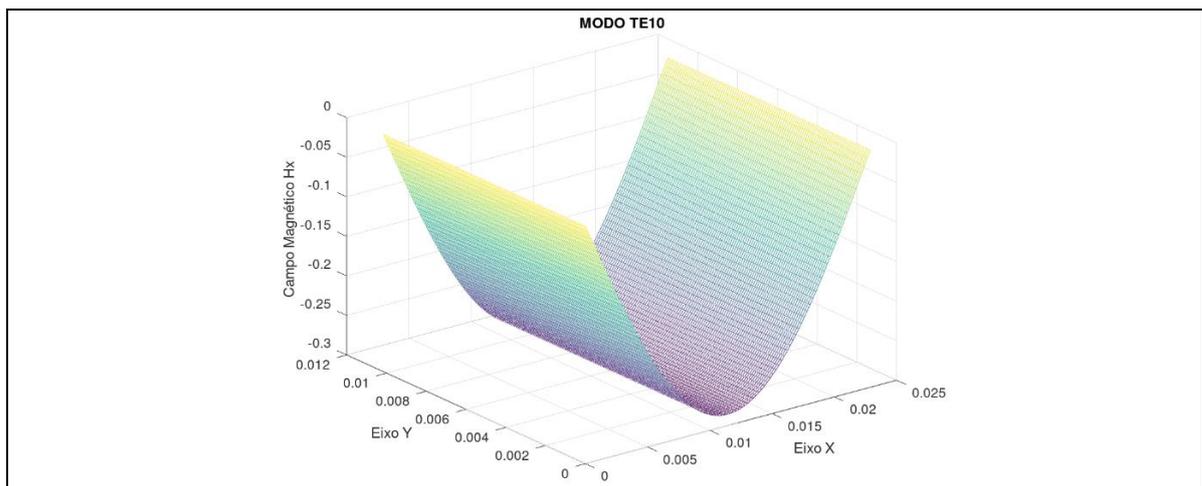
Já na Figura 18, pode-se verificar o gráfico de intensidade da componente de campo magnético na direção de propagação, onde se vê máxima intensidade no fim da largura.

Figura 16 – Guia retangular, campo elétrico E_y no modo TE_{10} , 12 GHz com ar



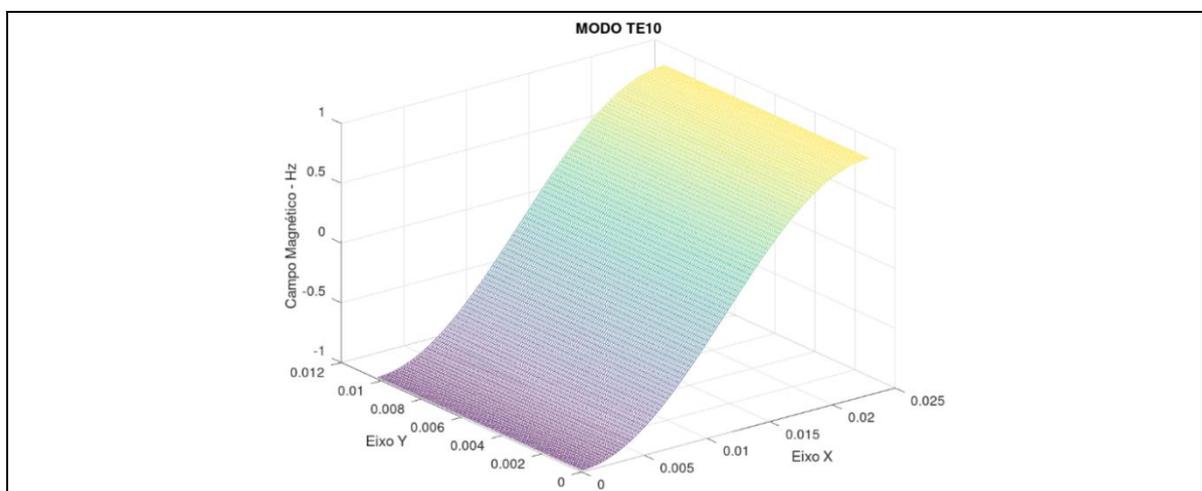
Fonte: Autor

Figura 17 – Guia retangular, campo magnético H_x no modo TE_{10} , 12 GHz com ar



Fonte: Autor

Figura 18 – Guia retangular, Campo magnético H_z no modo TE_{10} , 12 GHz com ar



Fonte: Autor

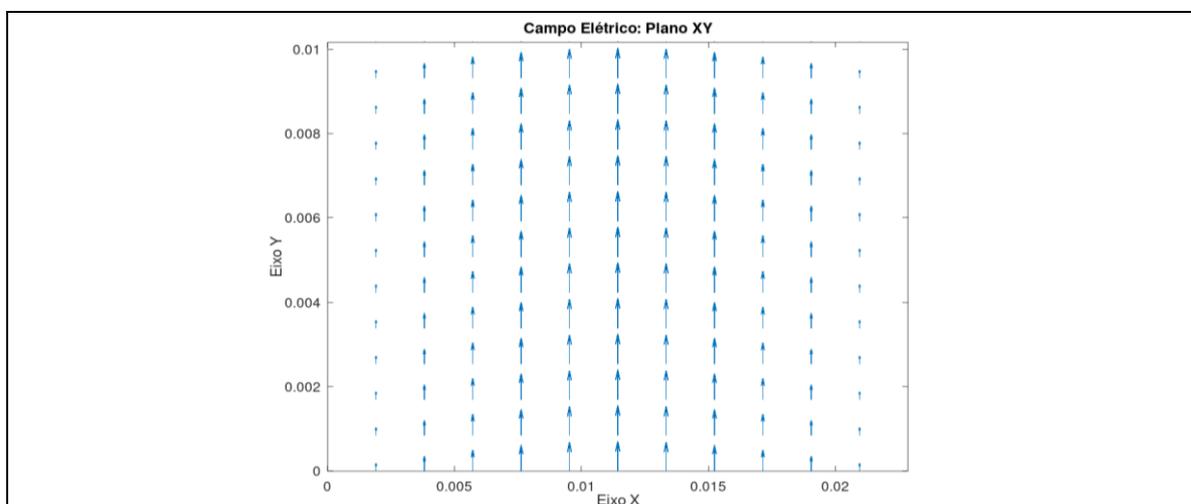
5.1.2 Gráficos de Diagrama Vetorial

Nas Figuras 19, 20, 21, 22, e 23, verifica-se o comportamento dos campos elétrico e magnético por meio de um diagrama de vetores. Tais vetores indicam a direção de fluxo dos mesmos dentro do guia, sendo a intensidade evidenciada pelo tamanho dos vetores, ou seja, áreas de maior intensidade do campo possuem vetores maiores. No guia retangular, a ferramenta gera esses diagramas nos três planos: XY (visão frontal do guia), ZY (visão lateral do guia) e ZX (visão superior do guia).

Nos diagramas vetoriais das Figuras 19 e 20, é visto o comportamento dos campos no plano XY (frontal), os quais evidenciam o caráter de perpendicularidade existente entre os campos elétrico e magnético. Visto que o campo elétrico possui fluxo na vertical e o campo magnético na horizontal. Nestas Figuras (19 e 20), verifica-se também que o ponto de maior intensidade dos campos, para o guia WR-90, no seu modo dominante TE_{10} , é exatamente do meio da largura do guia ($a/2$), como também fora visto anteriormente nos gráficos de intensidade (Figuras 16 e 17).

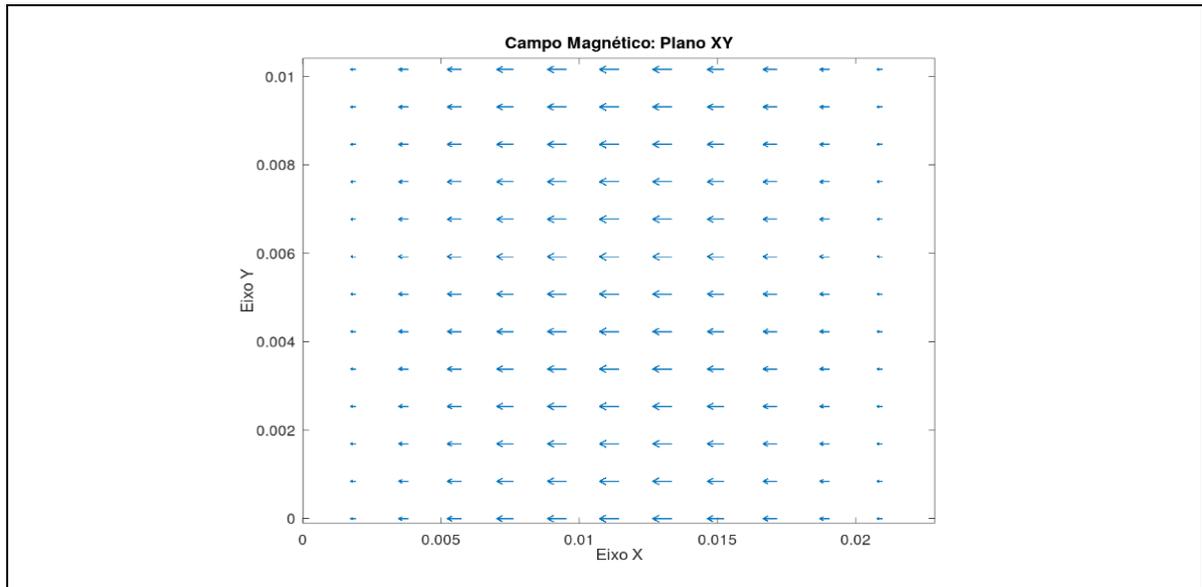
Na visão superior (Figura 21), verifica-se que as linhas de fluxo magnético circundam as linhas do campo elétrico, podendo estas serem consideradas como fonte (corrente de deslocamento) para o campo magnético. Na visão frontal (Figuras 19 e 20), verifica-se que as linhas de campo elétrico terminam em uma distribuição de carga elétrica na superfície interna das paredes superior e inferior do guia de ondas. Esta carga então, oscila para frente e para trás nas direções axial e transversal, constituindo assim uma corrente de condução axial e transversal que permitem a continuação da corrente de deslocamento (COLLIN, 2000).

Figura 19 – Guia retangular plano XY, campo elétrico no modo TE_{10} , 12 GHz com ar



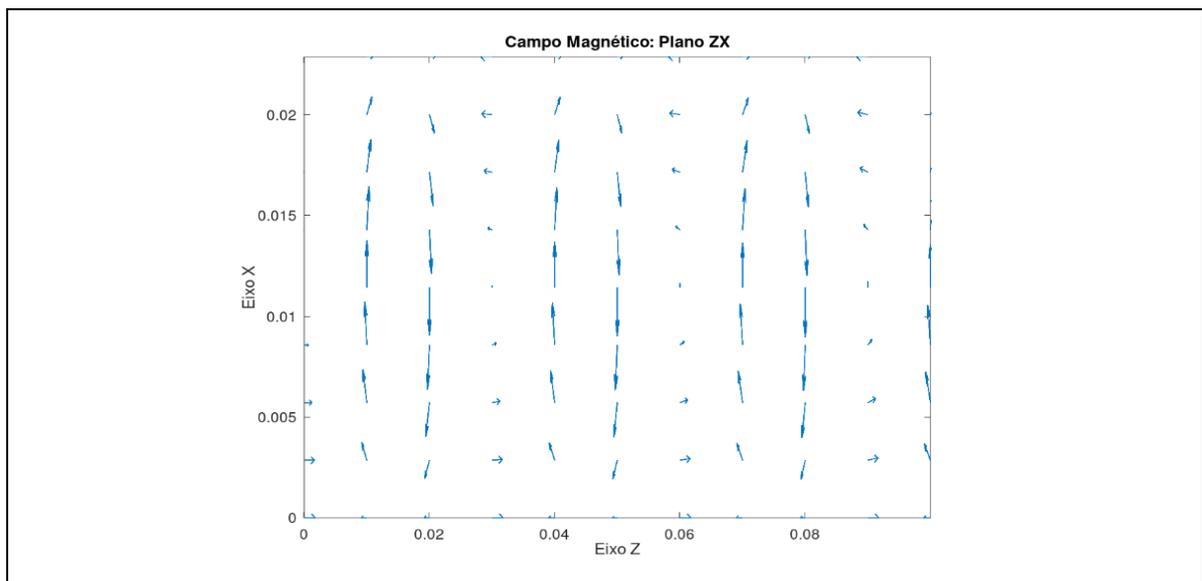
Fonte: Autor

Figura 20 – Guia retangular plano XY, campo magnético no modo TE₁₀, 12 GHz com ar



Fonte: Autor

Figura 21 – Guia retangular plano ZX, campo magnético no modo TE₁₀, 12 GHz com ar



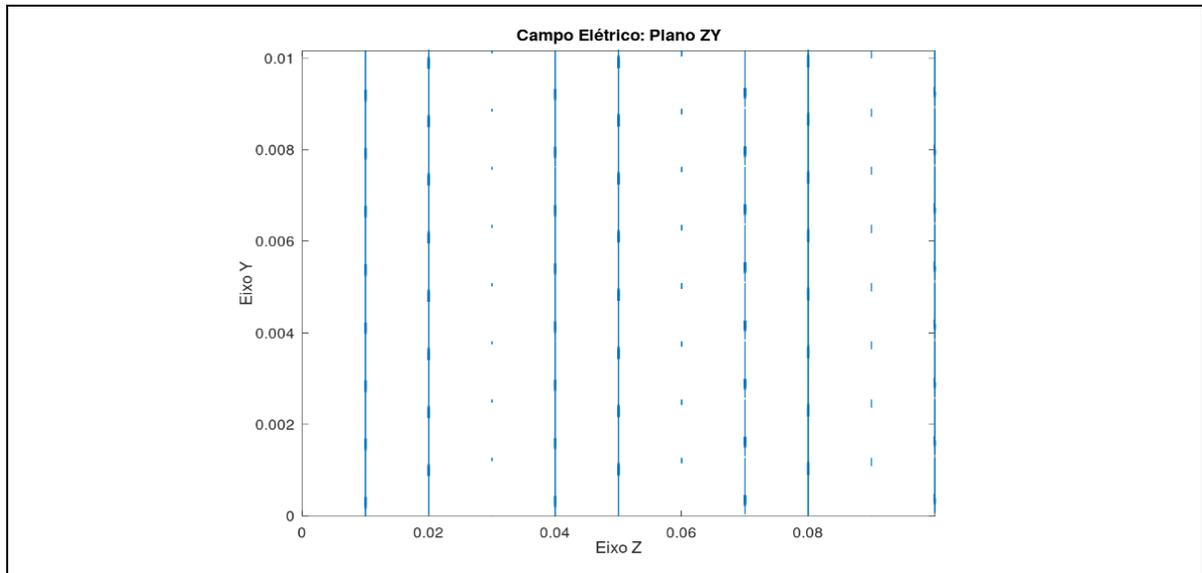
Fonte: Autor

Ainda de acordo com Collin (2000), a corrente total, composta da corrente de deslocamento mais a de condução, apresenta um enlace fechado para as linhas de campo magnético, podendo considerá-la como sendo gerada pelo fluxo magnético variável que ela envolve. Isso completa a ação de mútua interação necessária entre os campos elétrico e magnético para a propagação da onda.

O caráter de perpendicularidade entre os campos, também é evidenciado na visão lateral (plano ZY) do guia (Figuras 22 e 23), visto que as linhas de fluxo existentes entre os campos

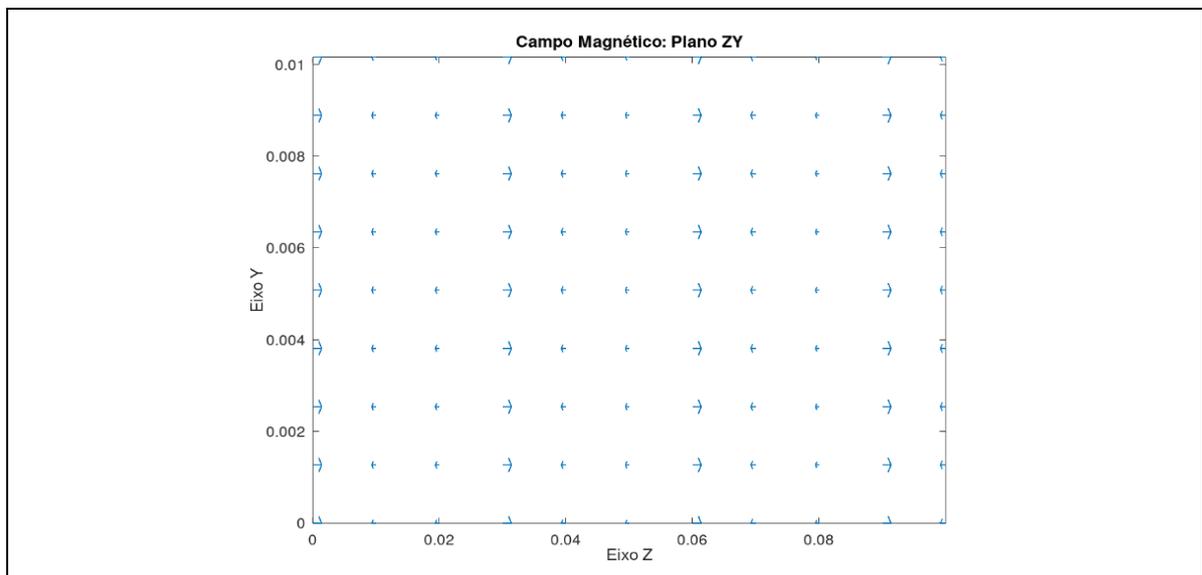
elétrico e magnético estão sempre dispostas a 90° entre si. Verifica-se também a alternância do sentido do fluxo dos campos ao longo do comprimento do guia. De modo que o campo elétrico se alterna verticalmente e o campo magnético horizontalmente.

Figura 22 – Guia retangular plano ZY, campo elétrico no modo TE_{10} , 12 GHz com ar



Fonte: Autor

Figura 23 – Guia retangular plano ZY, campo magnético no modo TE_{10} , 12 GHz com ar

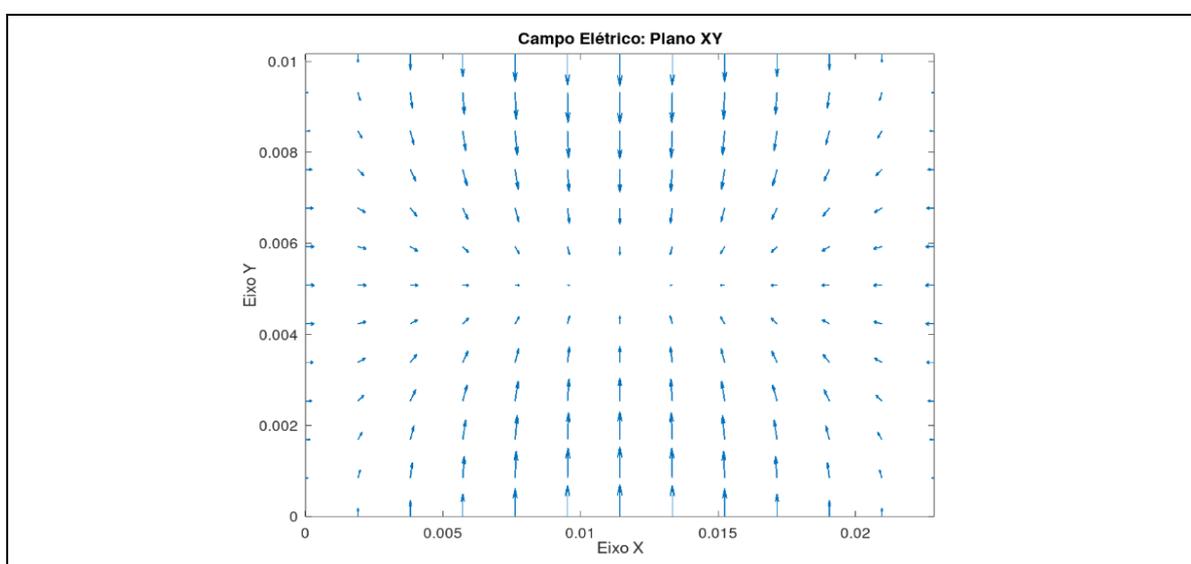


Fonte: Autor

5.1.3 Discussões

Não há gráfico de diagrama de vetores do campo elétrico no plano ZX, visto que, no modo dominante (TE_{10}) não há componentes de campo elétrico E_x e E_z . Portanto para fins comparativos foi gerado um gráfico de diagramas de vetores, do mesmo guia (WR-90), para o modo TM_{11} (terceiro modo propagante do guia retangular) na frequência de operação de 17 GHz. Desse modo, na Figura 24 é possível ver a notória diferença do arranjo das linhas de fluxo do campo elétrico, quando comparado às linhas do diagrama no modo dominante (Figura 19). Sendo possível notar a existência das componentes E_x , E_y e E_z .

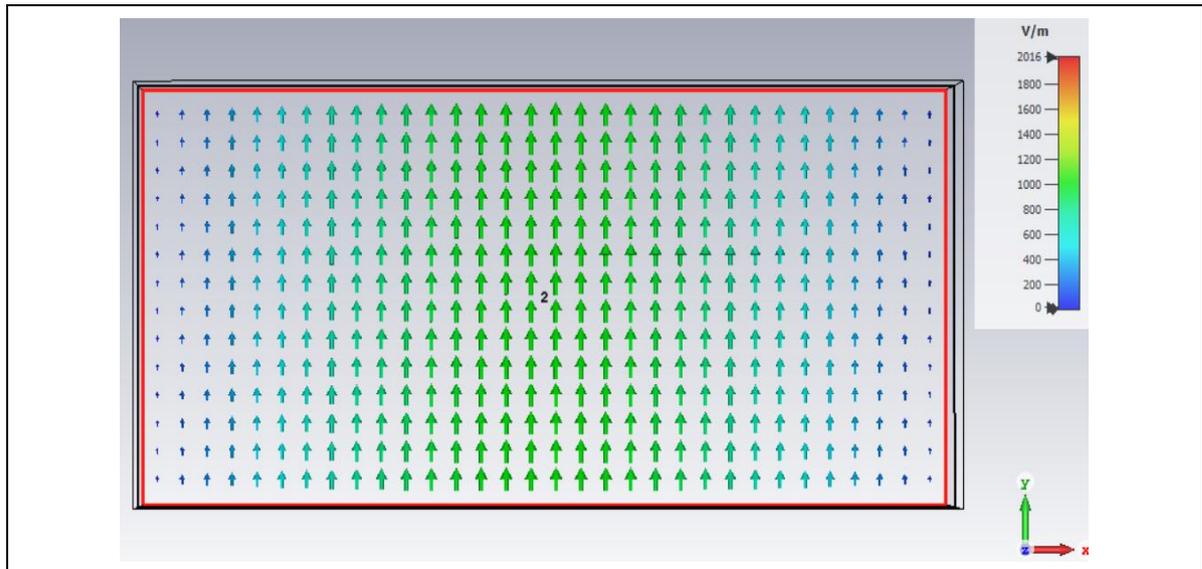
Figura 24 – Guia retangular plano XY, campo elétrico no modo TM_{11} , 17 GHz com ar



Fonte: Autor

Para constatação da precisão dos gráficos gerados pela ferramenta de simulação, foi modelado o guia WR-90 ($a = 22,86$ cm e $b = 10,16$ cm) no *software* CST Studio Suite (edição estudantil) e simulado os campos elétrico e magnético no modo dominante TE_{10} , usando o ar como dielétrico ($\epsilon_r = 1$ e $\mu_r = 1$) (Tabela 3), e frequência de 12 GHz. Desse modo, na Figura 25 é mostrado o resultado dessa simulação, na qual é possível ver um diagrama de vetores do campo elétrico no plano XY. Ao compará-la com a Figura 19 (gerada pela ferramenta de simulação), percebe-se grande semelhança da disposição dos vetores, sendo também evidenciado a máxima intensidade de campo no meio da largura do guia ($a/2$), destacada pela região esverdeada.

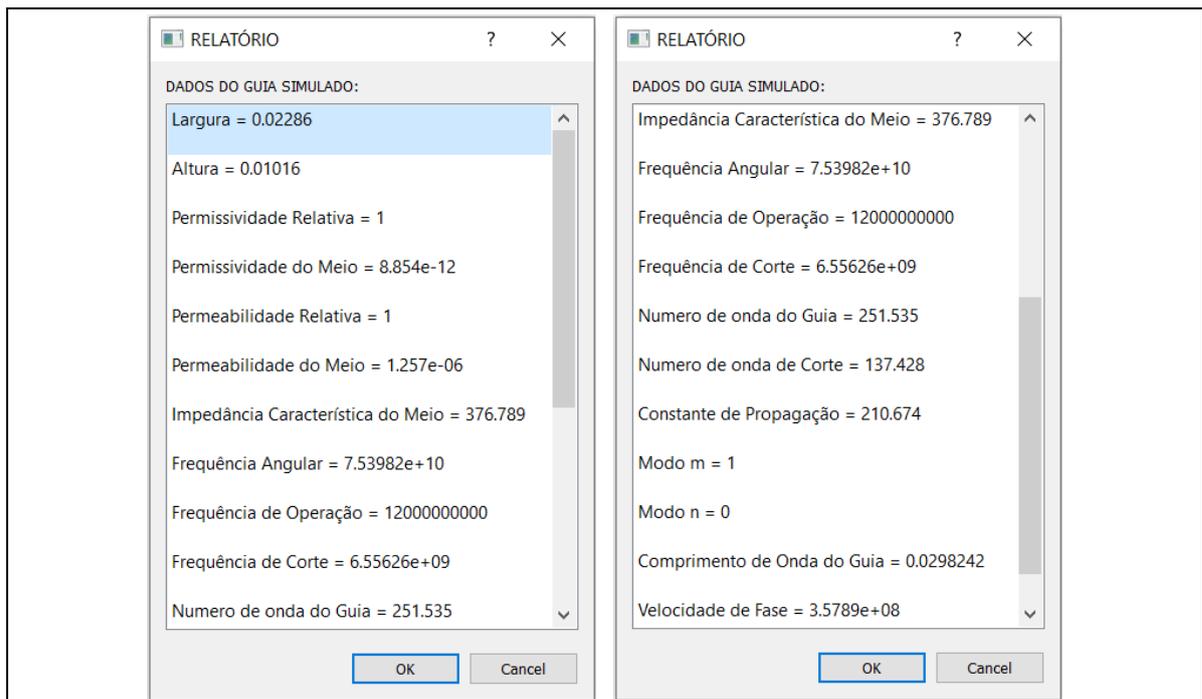
Figura 25 – Guia retangular CST plano XY, campo elétrico no modo TM_{10} , 12 GHz com ar



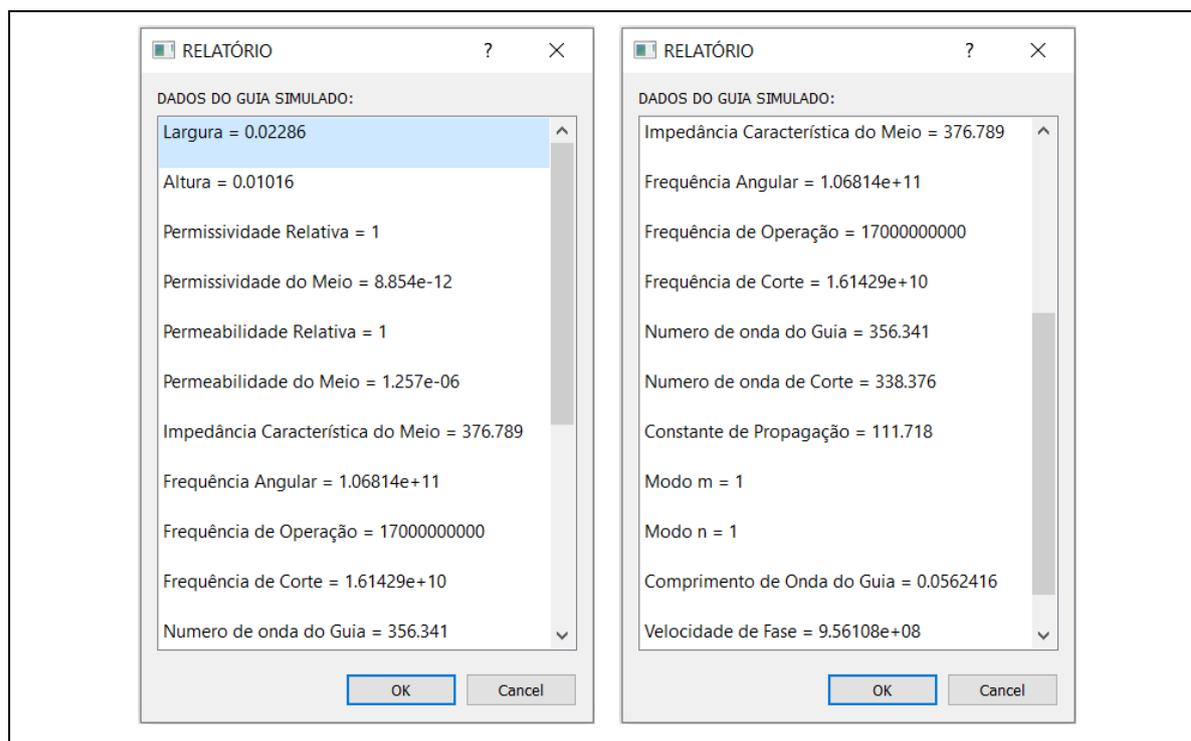
Fonte: Autor

Sabe-se que o modo dominante de um guia possui a menor frequência de corte, fator esse verificado nos relatórios de dados das simulações dos modos TE_{10} e TM_{11} (Figuras 26 e 27), gerados pela ferramenta. Sendo a frequência de corte do modo TE_{10} igual a 6,55 GHz, e do modo TM_{11} igual a 16,14 GHz. Por causa disto, a frequência de operação utilizada no modo TE_{11} foi de 12 GHz, e no modo TM_{11} foi de 17 GHz.

Figura 26 – Relatório de dados do guia retangular no modo TE_{10}



Fonte: Autor

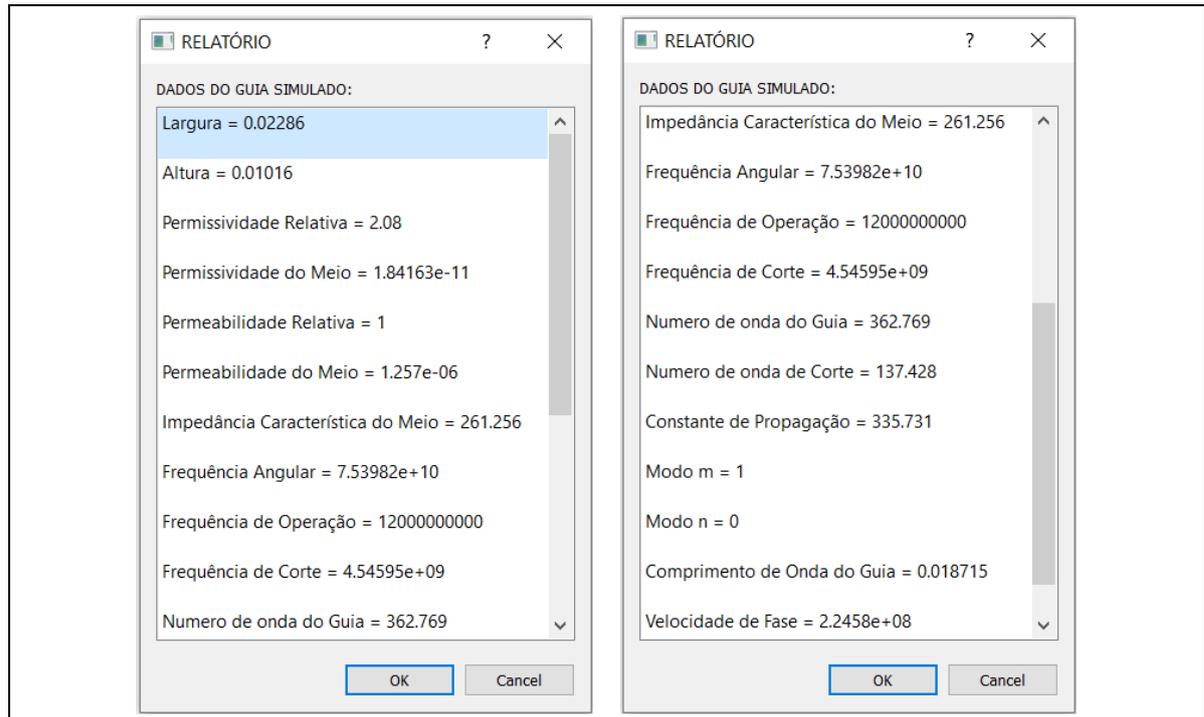
Figura 27 – Relatório de dados do guia retangular no modo TM_{11} 

Fonte: Autor

Outro fator a ser analisado, é a influência do material dielétrico utilizado no guia retangular. Para isso, simulou-se desta vez utilizando o teflon ($\epsilon_r = 2,08$ e $\mu_r = 1$) como dielétrico (Figura 28), comparando com a primeira simulação do modo TE_{10} , que usara o ar (Figura 26). Verificou-se que ao utilizá-lo a frequência de corte do guia diminuiu para 4,54 GHz, o comprimento de onda do guia diminuiu de 29,824 mm para 18,715 mm e a velocidade de fase diminuiu de 357,89 Mm/s para 224,58 Mm/s. Esses fatores indicam que as alterações destas especificações no guia retangular, podem ser feitas não somente por alterações geométricas (altura e largura), mas também modificando o dielétrico utilizado.

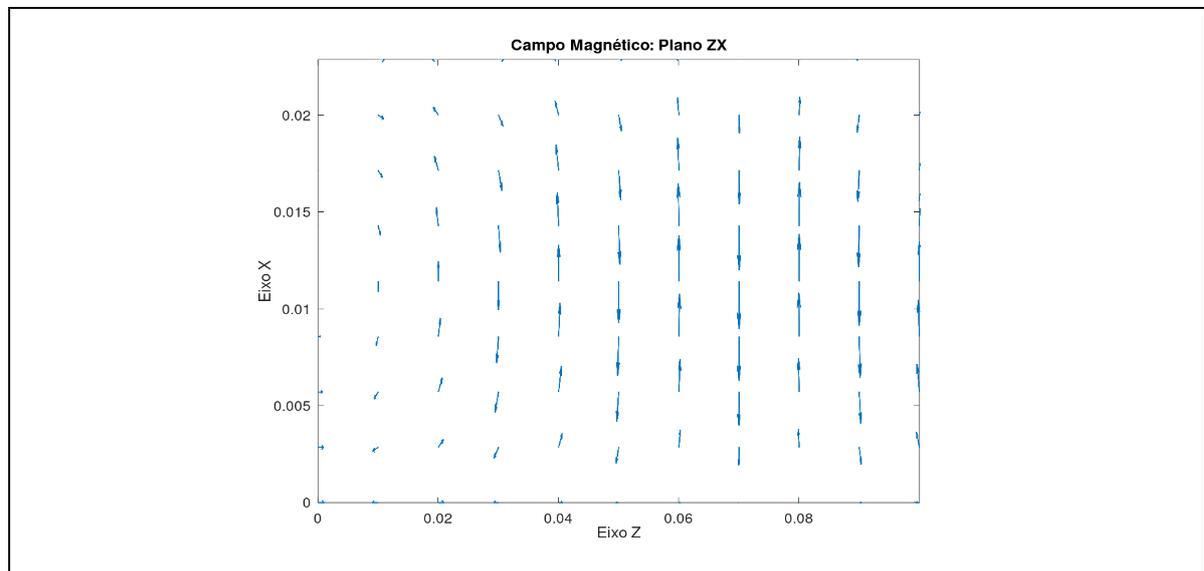
As alterações ocasionadas pelo uso de diferentes materiais dielétricos também é evidenciada nas linhas de fluxo dos campos no interior do guia. Na Figura 29 é explanado o campo magnético no modo TE_{10} , utilizando o teflon como dielétrico e frequência de operação de 12 GHz. Ao compará-la com a Figura 23, que explana as linhas do mesmo campo para o modo TE_{10} com ar, percebe-se que as linhas de campo, nesse novo cenário, estão dispostas com maior espaçamento.

Figura 28 – Relatório de dados do guia retangular no modo TE₁₀ com teflon



Fonte: Autor

Figura 29 – Guia retangular plano ZX, campo magnético modo TE₁₀, 12 GHz com teflon



Fonte: Autor

Os dados numéricos foram calculados, pela ferramenta de simulação, de acordo com as equações explanadas na teoria eletromagnética dos guias de ondas (Capítulo 3). Essas equações, escritas de acordo com a linguagem de programação do GNU OCTAVE, estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho.

5.2 Guia Circular

O guia nº 2 (raio = 15,08mm) da Tabela 5, foi escolhido para realizar esta simulação. Desse modo, utilizou-se o ar como material dielétrico ($\epsilon_r = 1$ e $\mu_r = 1$) (Tabela 3), plotando os gráficos no modo dominante do guia (TE_{11}), e no modo TM_{11} . Assim como na simulação realizada pela ferramenta de simulação, a frequência de operação escolhida foi de 15 GHz, que se encontra dentro da faixa de operação indicada para este guia (Tabela 5).

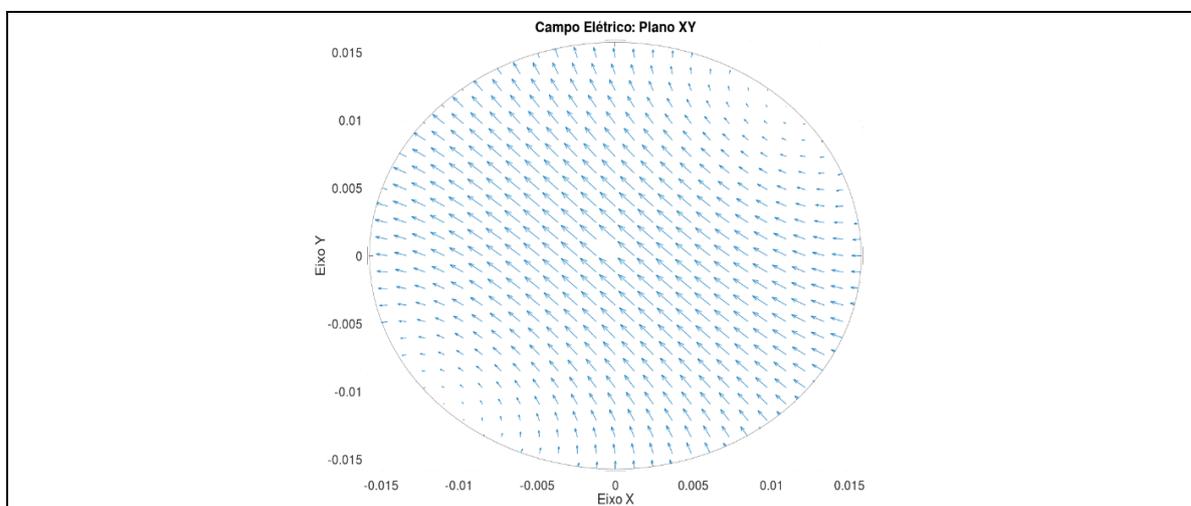
5.2.1 Gráficos de Diagrama Vetorial

Nas Figuras 30, 31, 32, e 33, verifica-se o comportamento dos campos elétrico e magnético por meio de um diagrama de vetores. Tais vetores indicam a direção de fluxo dos mesmos dentro do guia, sendo que a intensidade é evidenciada pelo tamanho dos vetores, ou seja, áreas de maior intensidade do campo possuem vetores maiores.

Os limites dos gráficos são definidos automaticamente de acordo com as dimensões de guia simulado, sendo que os gráficos estão configurados de modo a plotar um círculo de raio igual ao do guia simulado, delimitando o diagrama para obter-se uma melhor representação dos campos do guia. No guia circular, a ferramenta gera os diagramas vetoriais dos campos no plano XY (visão frontal do guia).

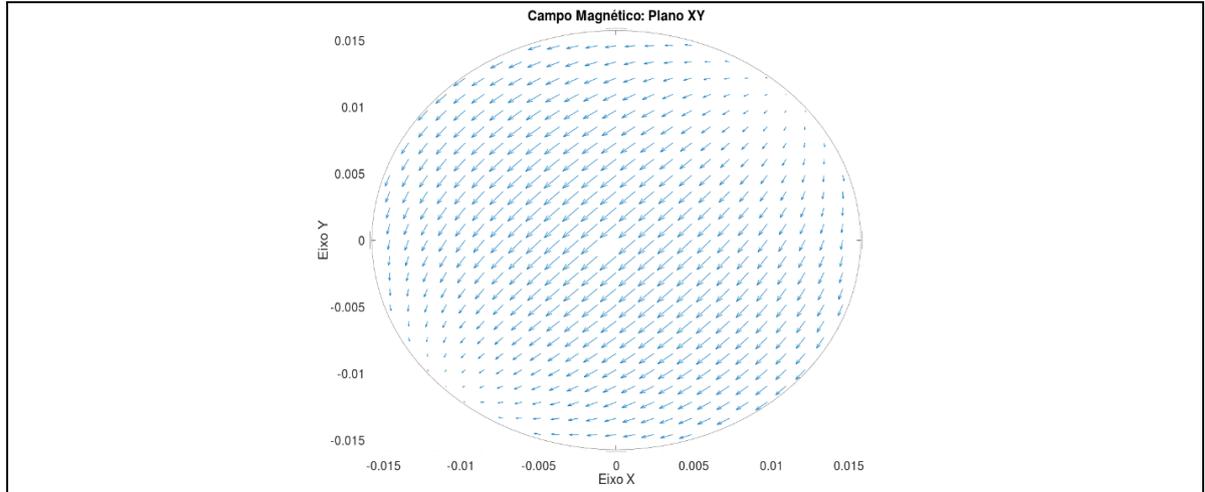
O caráter de perpendicularidade existente entre os campos elétrico e magnético, também é notado nesses diagramas do guia circular, em ambos os modos TE_{11} (Figuras 30 e 31) e TM_{11} (Figuras 32 e 33), visto que as linhas de fluxo dos campos estão dispostas a 90° entre si.

Figura 30 – Guia circular plano XY, campo elétrico no modo TE_{11} , 15 GHz com ar



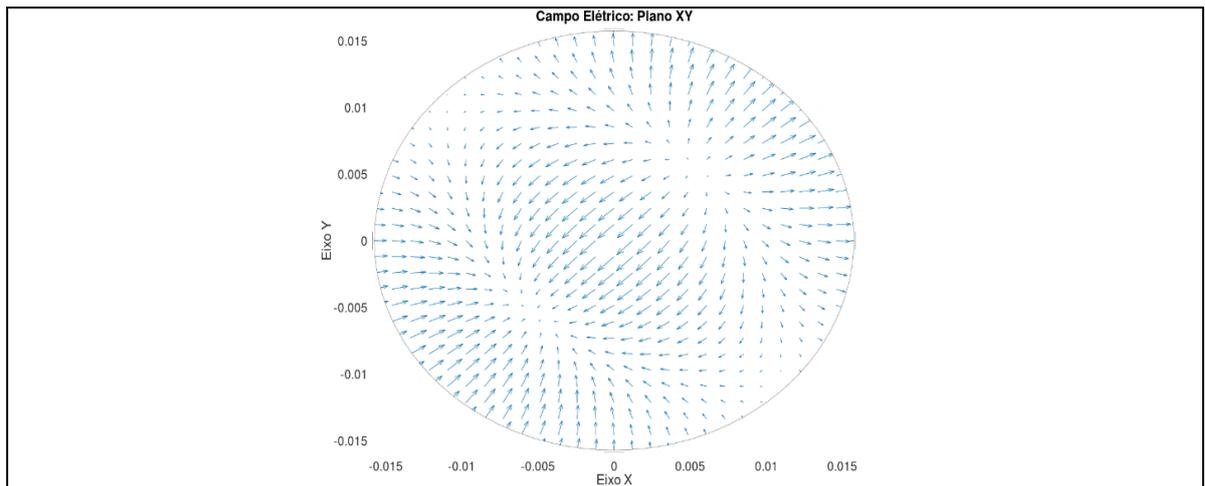
Fonte: Autor

Figura 31 – Guia circular plano XY, campo magnético no modo TE_{11} , 15 GHz com ar



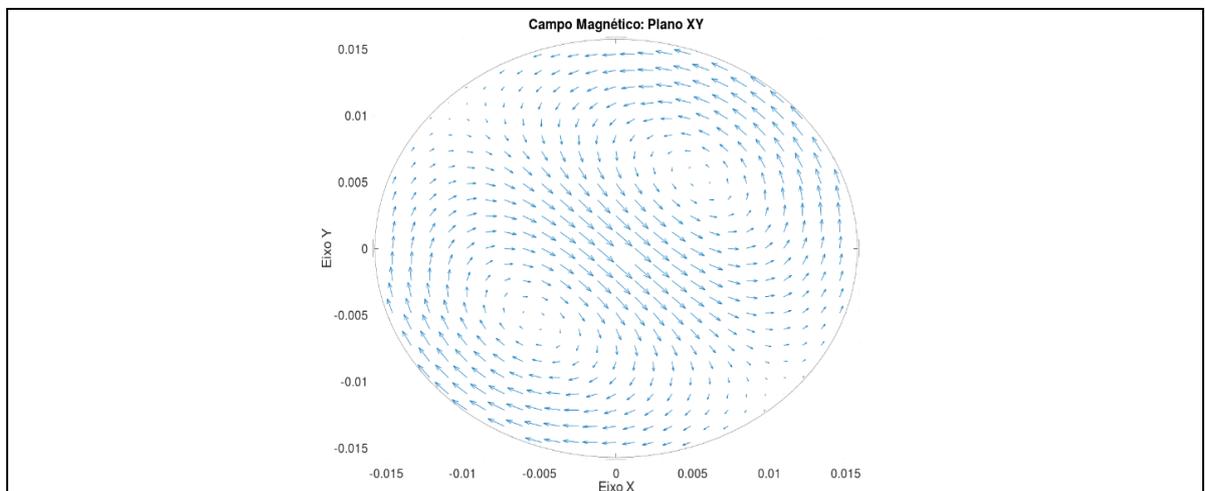
Fonte: Autor

Figura 32 – Guia circular plano XY, campo elétrico modo TM_{11} , 15 GHz com ar



Fonte: Autor

Figura 33 – Guia circular plano XY, campo magnético modo TM_{11} , 15 GHz com ar



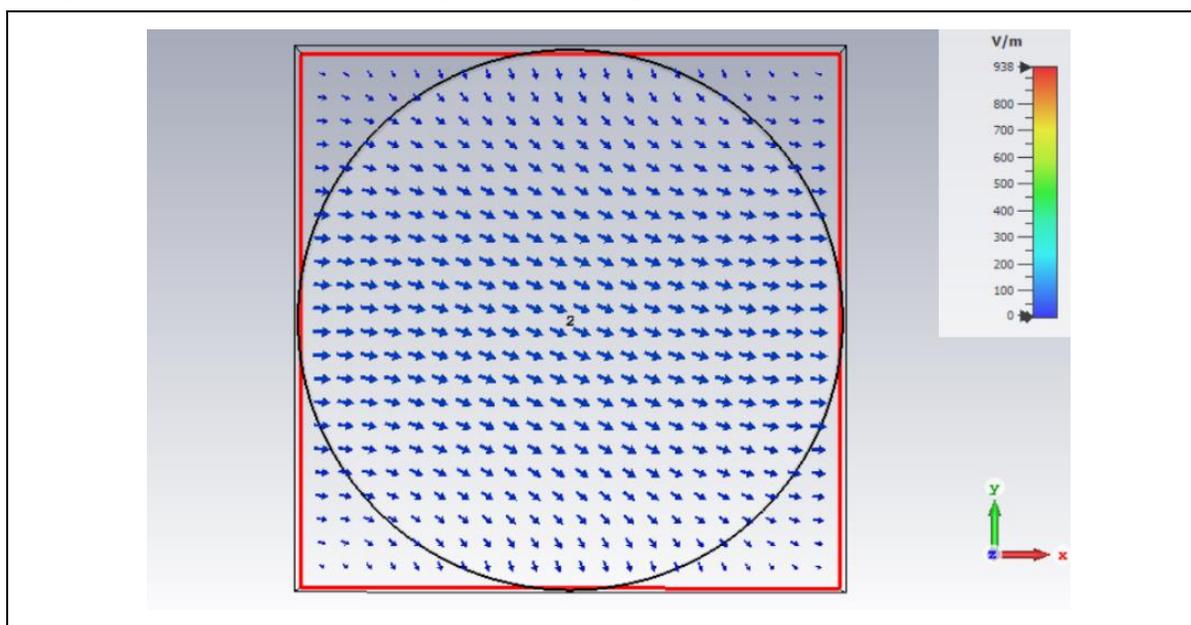
Fonte: Autor

5.2.2 Discussões

Para constatação da precisão dos gráficos gerados pela ferramenta de simulação, para um guia circular, foi modelado um guia de raio igual a 15,08 mm no *software* CST Studio Suite (edição estudantil), utilizando as condições de contorno de um condutor perfeito para a borda e simulado os campos elétrico e magnético. Utilizou-se o ar como material dielétrico ($\epsilon_r = 1$ e $\mu_r = 1$) (Tabela 3), plotou-se os gráficos no modo TE_{11} com frequência de 12 GHz.

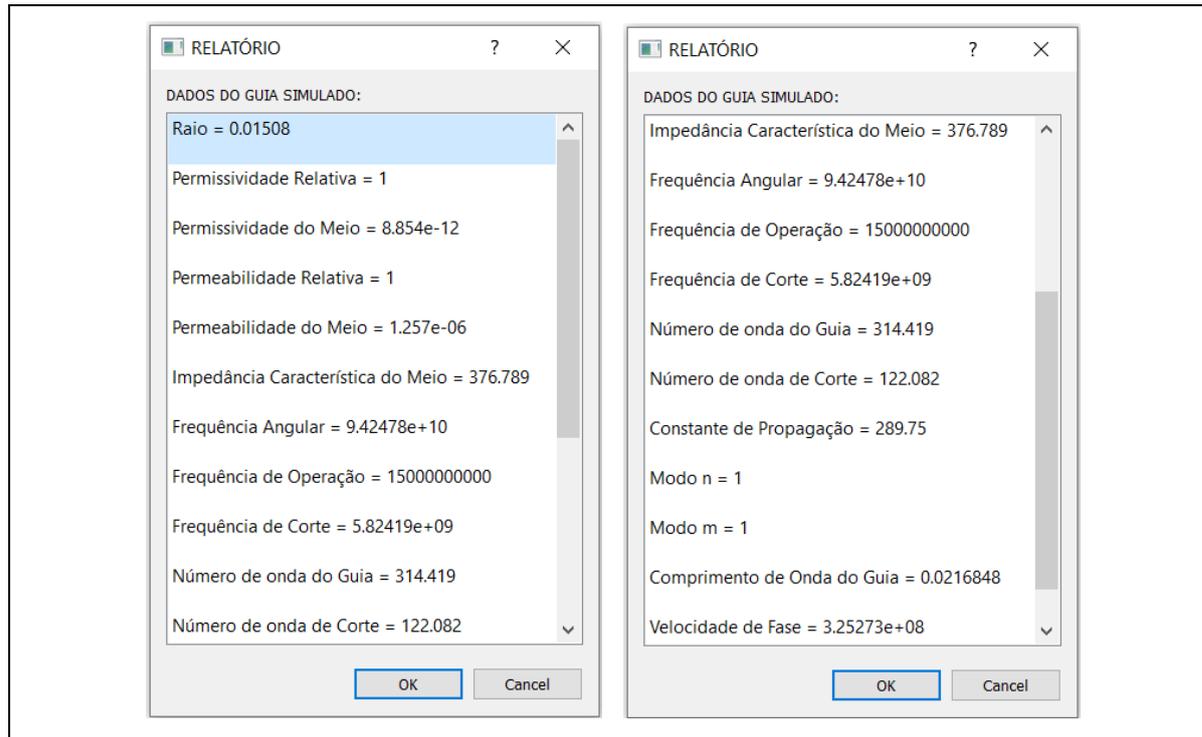
A Figura 34 mostra o resultado dessa simulação, onde se vê um diagrama de vetores do campo elétrico no plano XY. Ao compará-la com a Figura 30, que explana o diagrama de vetores do campo elétrico gerado pela ferramenta de simulação, percebe-se grande semelhança na disposição dos vetores e suas intensidades. Desconsidera-se os vetores expostos fora da circunferência do guia.

Figura 34 – Guia circular CST plano XY, campo elétrico no modo TE_{10} , 15 GHz com ar

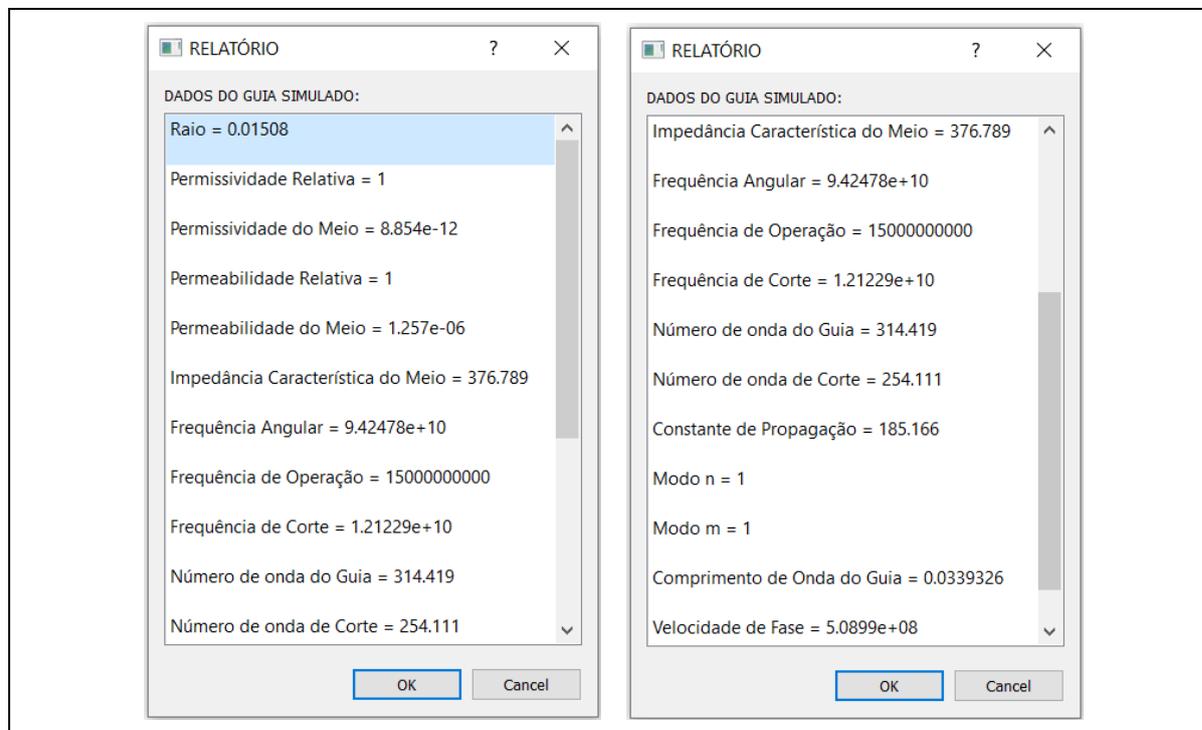


Fonte: Autor

Similarmente ao verificado nas simulações do guia retangular, constatou-se que em um guia circular o modo dominante, que no caso dos guias circulares é o TE_{11} , também possui a menor frequência de corte. Fator esse verificado nos relatórios de dados das simulações dos modos TE_{11} e TM_{11} (Figuras 35 e 36). Sendo a frequência de corte do modo TE_{11} igual a 5,82 GHz, e do modo TM_{11} igual a 12,12 GHz.

Figura 35 – Relatório de dados do guia circular no modo TE₁₁

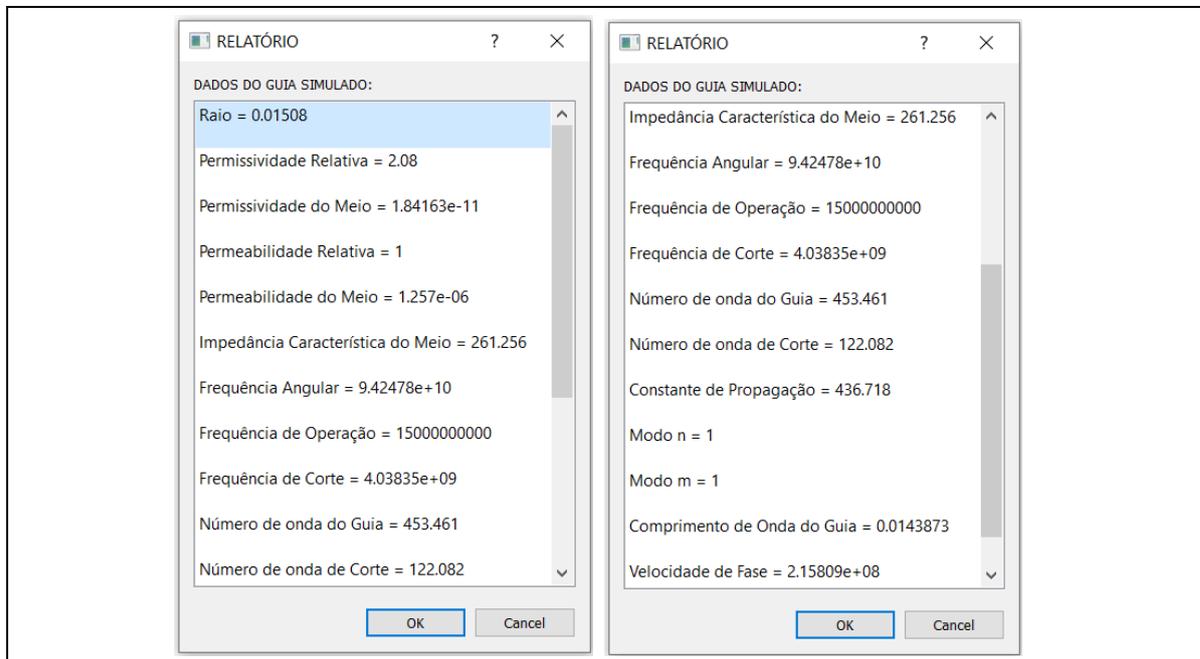
Fonte: Autor

Figura 36 – Relatório de dados do guia circular no modo TM₁₁

Fonte: Autor

Outro fator a ser analisado, é a influência do material dielétrico utilizado no guia circular. Para isso, simulou-se desta vez o modo TE_{11} utilizando o teflon ($\epsilon_r = 2,08$ e $\mu_r = 1$) como dielétrico (Figura 37), e comparando com a primeira simulação do modo TE_{11} , que usara o ar (Figura 35). Verificou-se que ao utilizá-lo a frequência de corte do guia diminuiu para 4,03 GHz, o comprimento de onda do guia diminuiu de 21,684 mm para 14,387 mm e a velocidade de fase diminuiu de 325,27 Mm/s para 215,81 Mm/s. E assim como no guia retangular, esses fatores indicam que as alterações destas especificações no guia circular, podem ser feitas não somente por alteração geométrica (raio), mas também modificando o dielétrico utilizado.

Figura 37 – Relatório de dados do guia circular no modo TE_{11} com teflon



Fonte: Autor

Os dados numéricos foram calculados, pela ferramenta de simulação, de acordo com as equações explanadas na teoria eletromagnética dos guias de ondas (Capítulo 3). Essas equações, escritas de acordo com a linguagem de programação do GNU OCTAVE, estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta de simulação desenvolvida neste projeto, foi alicerçada na teoria eletromagnética desenvolvida nos primeiros capítulos deste trabalho. Onde foi mostrado e explicado as leis que formulam as equações de Maxwell, as quais são a base para a fundamentação e definição das equações que expressam os campos elétrico e magnético nos guias de onda retangular e circular.

Através dessa fundamentação foi possível o desenvolvimento dessa ferramenta, por meio da linguagem de programação do *software* GNU OCTAVE. A mesma possibilita ao usuário realizar simulações, gerando relatórios e gráficos dos campos de diferentes tipos de guias e materiais dielétricos. Para tal, buscou-se a utilização de uma interface intuitiva e de fácil usabilidade, fazendo-se uso de menus interativos e caixas de diálogos.

Essa ferramenta foi desenvolvida para servir de complemento nos estudos dos guias de ondas e teoria de ondas guias, principalmente para aqueles que não possuem acesso a outros meios de auxílio na aprendizagem dos temas relacionados, fora de um laboratório. Sendo uma alternativa gratuita e simples de efetuar simulações dos campos nesses guias.

Desse modo foi possível realizar as simulações apresentadas no capítulo anterior. Onde as análises e discussões levantadas servem de constatação de diversos aspectos relacionados à teoria eletromagnética para os guias de ondas. Os gráficos gerados, conseguem expressar de forma fiel o comportamento dos campos, podendo apresentar pequenas distorções no layout da figura. Os relatórios oferecem um suporte extra para o usuário, exibindo informações básicas da simulação e do guia.

Por fim, em trabalhos futuros é possível desenvolver uma ferramenta que gere gráficos da visão lateral para os guias circulares e gráficos de intensidade. É possível também desenvolver uma ferramenta de simulação que gere gráficos dos campos elétrico e magnético para os guias *microstrip* e *stripline*.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **Ansys for Students**. Disponível em: < <https://www.ansys.com/academic/students>>. Acesso em: 06 de maio de 2021.
- BALANIS, Constantine A. **Advanced Engineering Electromagnetic**, 2ª ed. USA: John Wiley & Sons 2012.
- BARROS, Tadeu da S. **Simulação dos modos propagantes nos guias retangular e cilíndrico**, Relatório de projeto final de graduação, UNB, 2007.
- COLLIN, Robert E. **Foundations for microwave engineering**, 2ª. Ed. USA: John Wiley & Sons, 2000.
- DASSAULT SYSTEMES. **CST Studio Suite Student Edition**. Disponível em: <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/student-edition/>>. Acesso em: 06 de maio de 2021.
- DORI, Yehudit Judy; BELCHER, John. **Learning electromagnetism with visualizations and active learning**. 2014. DOI: 10.1007/1-4020-3613-2_11 Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/226407140_Learning_Electromagnetism_with_Visualizations_and_Active_Learning>. Acesso em: 22 de abril de 2021.
- ECHEVERRI, Edwan A. A. **Estudo sobre a utilização de ferramentas computacionais no ensino e aprendizagem do método dos elementos finitos**. USP, 2010.
- FERREIRA, Golberi; CARDOSO, Gisele; LIMA, Charles; VUKOVIC, Ana. Teaching electromagnetics in na electrical/electronic engineering undergraduate course: the hybrid option, In: EDUNINE, 2017, Santos, Brazil. **I IEEE world engineering education conference**. p. 41-45.
- FIOLHAIS, Carlos; TRINDADE, Jorge. Física no Computador: o Computador como uma Ferramenta no Ensino e na Aprendizagem das Ciências Físicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, vol. 25, no. 3, p. 261, set. 2003.
- GNU OCTAVE, GNU.org. Disponível em: <<https://www.gnu.org/software/octave/>>. Acesso em: 11 de novembro de 2020.
- LOPES, Murilo P.; SILVA, Rodrigo B; ALMEIDA, Adriana O. **A importância do uso das ferramentas computacionais no Ensino da disciplina fenômenos de transportes nos cursos de Engenharia**, Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, v. XL, p. 103781, FACIT, 2012.
- NOGUEIRA, J. Robert; ALVES, Ricardo; MARQUES, P. Carmona. Computational programming as a tool in the teaching of electromagnetism in engineering courses: improving the notion of field. **Education sciences**. 2019. DOI:10.3390/educsci9010064.

OBERZINER, Ana Paula B. **As Equações de Maxwell e Aplicações**, monografia, Departamento de matemática, UFSC, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/119376/Ana_Paula%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 novembro de 2020.

PHASE2 MICROWAVE Ltd, United Kingdom, 2021. Disponível em: <<https://www.phase2mw.co.uk/>>. Acesso em: 17 de março de 2021.

PIETROCOLA, Maurício. **A matemática como estruturante do conhecimento físico**, Departamento de Física – UFSC, v.19, n.1: p.89-109, 2002.

POZAR, David M., **Microwave engineering**, 4ª ed. USA: John Wiley & Sons, 2012.

ROCHOL, Juergen L. **Sistemas de Comunicação sem Fio: Conceitos e Aplicações**, Porto Alegre: Bookman, 2018.

WENTWORTH, Stuart M. **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em engenharia**. Tradução: Abelardo Podcameni, Gláucio Lima Siqueira. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

APÊNDICE A – EQUAÇÕES E CÁLCULOS DA FERRAMENTA

Todos os cálculos são realizados pela ferramenta a partir dos dados definidos durante a simulação.

% CÁLCULOS NO GUIA RETANGULAR

```

e = e_o * e_r; % Permissividade do meio
u = u_o * u_r; % Permeabilidade do meio
w = 2* pi * f; % Frequência angular
k = w * sqrt(u * e); % Número de onda do guia
eta = sqrt(u / e); % Impedância característica do meio
kc = sqrt((m*pi/a)^2 + (n*pi/b)^2); % Número de onda de corte
beta = sqrt((k^2) - (kc^2)); % Constante de propagação
fc = (1/(2* pi * sqrt(u * e))) * (sqrt((m * pi/a)^2 + (n * pi / b)^2)); % Frequência de corte
kg = 2*pi/beta % Comprimento de onda do guia
vp = w/beta % Velocidade de fase

```

% CÁLCULOS NO GUIA CIRCULAR

```

e = e_o * e_r; % Permissividade do meio
u = u_o * u_r; % Permeabilidade do meio
fc = kc/(2*pi*sqrt(u*e)) % Frequência de corte
w = 2* pi * f; % Frequência angular
k = w * sqrt(u * e); % Número de onda do guia
eta = sqrt(u / e); % Impedância característica do meio
beta = sqrt((k^2) - (kc^2)); % Constante de propagação
kg = 2*pi/beta % Comprimento de onda do guia
vp = w/beta % Velocidade de fase

```