

EFEITOS DA INSERÇÃO DE ANTEPAROS EM GUIA DE ONDA RETANGULAR PARA A FREQUÊNCIA DE 5,85 GHz

Arthur Mendes da Silva¹, Humberto Dionísio de Andrade², Jakson dos Santos Silva³, Raphael Victor Barros Campos⁴, Lwzardy Antônio Freitas de Azevedo⁵, Antônio Sergio Bezerra Sombra⁶.

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil
(arthur.silva54405@alunos.ufersa.edu.br)

²Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil

³Instituto Estadual de Educação Profissional, Tecnologia e Inovação do Rio Grande do Norte (IERN), Campo Grande, Brasil

^{4,5,6}Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise das perdas de propagação no interior de um guia de onda retangular a partir da inserção da mudança do meio de propagação e de anteparos inseridos no seu interior. Para este propósito foram realizadas inicialmente simulações de um guia de onda com variações na constante dielétrica com os seguintes valores $\epsilon_r=1$ e $\epsilon_r=4,4$. Também foram colocadas paredes metálicas dentro do guia com a finalidade de prever os efeitos destes anteparos nas perdas de propagação. As simulações foram realizadas utilizando no software Ansys HFSS® para obtenção dos resultados numéricos da constante de propagação e dos campos elétricos e magnéticos. Os resultados obtidos mostram uma dependência direta na frequência de corte, em relação ao meio dielétrico no interior do guia, já com relação à inserção dos anteparos não há alteração na frequência de corte, nem nas constantes de propagação. Contudo, há uma atenuação considerável dos campos elétricos com a introdução das paredes metálicas.

Palavras-chave: Guia de Onda; Propagação; Campos Elétricos; Campos Magnéticos

INTRODUÇÃO

A área engenharia de microondas tem sido frequentemente considerada um campo de estudo sólida, pois os conceitos fundamentais da eletromagnética vem sendo desenvolvidos e consolidados há mais de 100 anos, e provavelmente, porque o radar foi a primeira grande aplicação da tecnologia de microondas e sua utilização foi intensificada durante a Segunda Guerra Mundial. Além disso, mesmo tendo surgido a mais de um século, ainda estão sendo desenvolvidos dispositivos significativos em alta frequência, circuitos integrados de microondas (POZAR, 1997).

O desenvolvimento do guia de onda e diversos outros tipos de linhas de transmissão, é um dos primeiros marcos da engenharia de microondas para transmissão de energia de microondas com baixa perda. Lord Rayleigh (John William Strutt), provou matematicamente que a propagação de onda em guias de onda era possível, tanto para seção retangular, como circular e notou a infinidade de possibilidades para os modos do tipo transversal elétrico (TE) e transversal magnético (TM), além da frequência de corte (POZAR, 1997).

O guia de ondas, assim como a linha de transmissão é utilizado para transmitir energia de um ponto a outro. Ele se aplica a sistemas que operam na faixa de microondas (~3–300 GHz), quando a linha de transmissão se torna ineficiente devido ao efeito pelicular e às perdas no dielétrico (SADIKU, 2012). O guia de ondas apresenta as seguintes características:

- É utilizado na faixa de microondas visando obter maior largura de banda e menor atenuação do sinal;
- Suporta muitas configurações de campos diferentes;
- Opera a partir de uma determinada frequência, chamada frequência de corte, e, portanto, atua como filtro passa-alta;
- Não pode transmitir corrente contínua e em frequências abaixo das frequências de microondas tornam-se excessivamente grandes.

Os guias de onda se distinguem podem ser classificados em dois tipos, os tubos de metal de qualquer seção transversal, e hastes dielétricas. Nos tubos de metal, a onda se propaga no interior do tubo e não há vazamento para o exterior. Nas hastes

dielétricas, a onda se propaga sobre a superfície externa da haste com uma presença de campo no meio que o circunda (DUNLOP, 1995).

Os guias de onda do tipo tubular devem ser produzidos a partir de material condutor e de baixa perda. Se os guias forem curtos, será usado alumínio ou latão, devido ao custo. No entanto, um guia de onda eficiente e com baixa atenuação são produzidos com cobre, para algumas aplicações onde é necessária uma baixa perda, além disso pode ser banhado com prata ou ouro. A superfície interna deve ser lisa e o guia deve possuir seção transversal uniforme (DUNLOP, 1995).

Em decorrência de sua grande aplicabilidade prática diversos setores, os guias de onda longitudinais são objeto de extensas pesquisas de Zaginaylov, *et al.*. Nesse sentido a teoria de guia de onda não homogêneo com a introdução de anteparos pode ser útil para demonstrar em guias de onda irregulares.

Este artigo tem o intuito de efetuar uma análise da propagação em um guia de onda de referência com paredes condutoras e o ar como dielétrico. Logo após, fez-se a substituição do dielétrico no interior do guia, com a finalidade de verificar a influência do dielétrico no meio de propagação guiado.

Outro ponto de estudo foi a questão da atenuação da propagação em decorrência da inserção de obstáculos à propagação dentro de um meio guiado, os chamados anteparos.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo foi dividida em três etapas principais. A primeira consistiu na escolha do dispositivo para estudo e a realização do cálculo dos parâmetros dimensionais do guia de onda, considerando os efeitos eletromagnéticos e construtivos necessários para sua operação dentro da faixa de operação. Em seguida, procedeu-se à modelagem do guia no software ANSYS HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), incluindo a inclusão dos anteparos e adaptação da mudança do meio para as permissividades propostas.

Por fim, foram realizadas simulações eletromagnéticas para cada configuração de curvatura, a fim de avaliar o desempenho da antena em diferentes cenários de aplicação.

A. Guia de Onda Retangular

Dentre os vários tipos de linhas de transmissão, a estrutura de guia de onda retangular foi um dos primeiros tipos e ainda é comumente usado em muitas aplicações atuais.

Suas aplicações envolvem componentes como isoladores, detectores, atenuadores, acopladores e linhas com fendas que estão disponíveis para uso em

várias faixas do guia de onda padrão entre 1 GHz e acima de 220 GHz (POZAR, 1997).

Neste tipo de guia há basicamente dois tipos de perdas, as relativas as paredes condutoras por efeito joule e as perdas do dielétrico. Idealmente quanto menor for a constante dielétrica menor serão as perdas associadas ao guia (COLLIN, 1979).

A Figura 1 mostra um guia de onda retangular com dimensões internas a e b . A dimensão b é ilustrada no sistema de coordenadas cartesianas, sendo usada para analisar a propagação da onda dentro do guia de onda. Para fins de análise, o guia possui seção transversal uniforme, paredes perfeitamente condutoras e na direção z (propagação da onda), comprimento infinito (EROL, *et al.*, 2008)

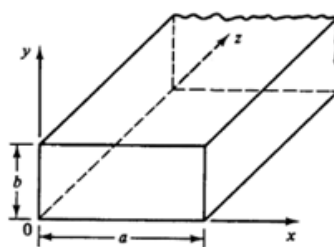


Figura 1. Estrutura do guia de onda retangular e suas dimensões. Fonte: COLLIN, 1979.

Estas estruturas ocas de guia retangular suportam os modos TE e TM, mas não o modo transversal eletromagnético (TEM), pois há apenas um condutor e não há condutores centrais que permitam uma corrente de condução [4]. No modo TM, o campo magnético não há o componente longitudinal, ou seja, $H_z=0$ e $E_z \neq 0$. Já no modo TE $E_z=0$ e $H_z \neq 0$. Estes dois tipos de modos podem ser representados por dois índices inteiros n e m , que se referem as variações de campo de acordo com as coordenadas transversais do guia.

Cada um desses modos há uma frequência de corte associada, que dependerá da configuração do guia. A frequência de corte é um parâmetro que delimita a propagação do guia, estabelecendo os limites inferior e superior no qual o modo se propaga (COLLIN, 1979).

Efetivamente a maioria dos guias de onda se restringem a operações nas faixas de frequências mais baixas, se propagando apenas no modo dominante. Para o guia retangular, o modo dominante é o TE_{10} . Na Figura 2, pode-se observar as linhas de campo elétrico e magnético para o modo TE_{10} do guia de onda retangular. Nas figuras 2(a) e 2(b) os campos magnéticos estão representados pela cor vermelha pontilhada e os campos elétricos pelos vetores em azul.

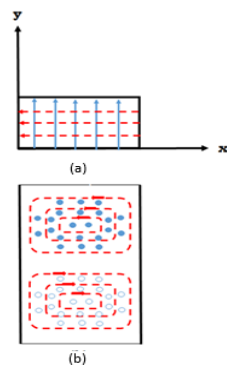


Figura 2: Representação esquemática das linhas de campo elétrico e magnético. a) Plano transversal b) vista superior.

Pode-se perceber que no guia retangular as linhas de campo magnético estão circundando as de campo elétrico. Em contrapartida as linhas de campo elétrico oscilam na direção de y e $-y$.

Os campos no modo TE_{10} podem ser decompostos como a soma de duas ondas planas TEM que se superpõe para formar a onda TE_{10} propagando-se em ziguezague, conforme mostra a Figura 3.

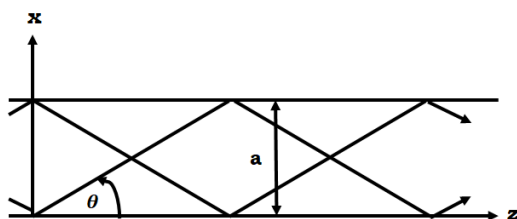


Figura 3: Vista lateral do guia no plano xz da decomposição do modo TE_{10} .

B. Projeto do guia de onda retangular

Para cada modo dentro do guia de onda retangular há uma frequência corte f_c associada, que depende da largura a e da altura b . O guia de onda retangular foi projetado para o modo dominante TE_{mn} , que tem a menor frequência de corte, de acordo com a Equação 1.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Considerando que o modo dominante no guia retangular é o TE_{10} , esta pode ser reescrita de acordo com a Equação 2.

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

Dessa forma, conhecendo a frequência de corte, pode-se determinar a largura do guia (a), que é a maior dimensão da seção transversal. A menor dimensão da seção transversal (b) é aproximadamente metade de (a). A Tabela 1 mostra as dimensões calculadas do guia de onda e suas respectivas direções.

Tabela 1. Dimensões do guia de onda retangular.

Largura	Altura	Comprimento
$a = 25,62 \text{ mm}$	$b = 12,81 \text{ mm}$	$L = 100 \text{ mm}$

Foi realizada a variação do material interno da estrutura do guia de onda. As variações ocorreram alterando as constantes dielétricas para $\epsilon_r=1$ e $\epsilon_r=4,4$. Outra variação, foi a inserção de três paredes metálicas dentro do guia retangular com constante dielétrica $\epsilon_r=1$. Os anteparos foram colocados simetricamente no início, no meio e no final do guia de onda. As dimensões dos obstáculos inseridos podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Dimensões do guia de onda retangular.

Largura	Altura	Comprimento
$a' = 12,81 \text{ mm}$	$b' = 6,40 \text{ mm}$	$L' = 50 \text{ mm}$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta primeira avaliação dos resultados os guias estão sem os anteparos, ou seja, os resultados obtidos pelo software ANSYS HFSS, para o guia de onda retangular, sem perdas no qual o condutor é considerado ideal e o meio dielétrico é o ar com $\epsilon_r=1$, pode ser analisado nas figuras 2 e 3. No qual pode-se perceber que o mesmo está ressoando na frequência de projeto que foi de 5,85 GHz para modo fundamental, que é a menor frequência de operação dentre todas. Na Figura 4 é possível observar o gráfico da constante de propagação em função da frequência para um guia de onda retangular com constante dielétrica no seu interior de $\epsilon_r=1$.

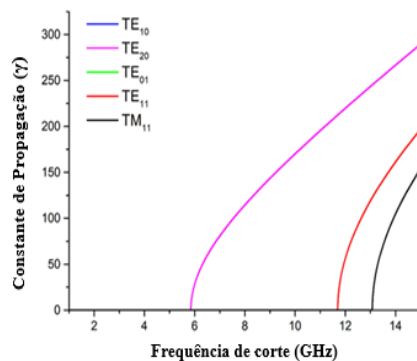


Figura 4: Constante de propagação versus Frequência para constante dielétrica no interior de $\epsilon_r=1$.

A Figura 5, mostra as frequências de corte para os quatro primeiros modos de operação TE_{10} , TE_{20} , TE_{01} e TE_{11} , que são respectivamente 5,85 GHz, 11,70 GHz, 11,70 GHz e 13,08 GHz.

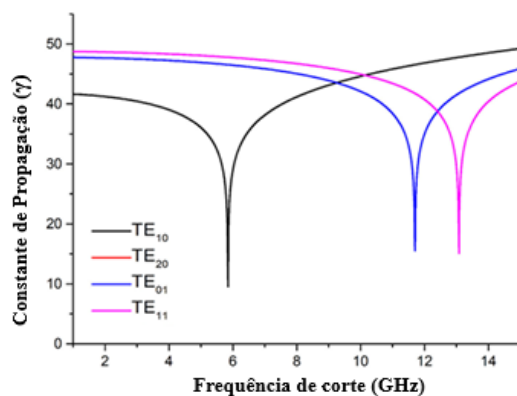


Figura 5: Curva de gama (dB) versus a frequência para guia de onda com $\epsilon_r=1$.

Para o guia de onda com constante dielétrica de $\epsilon_r=4,4$, é possível observar na Figura 6 a mudança de comportamento da constante de propagação, que diminui consideravelmente a frequência para todos os modos de operação quando comparado ao guia quando o meio de propagação era o ar.

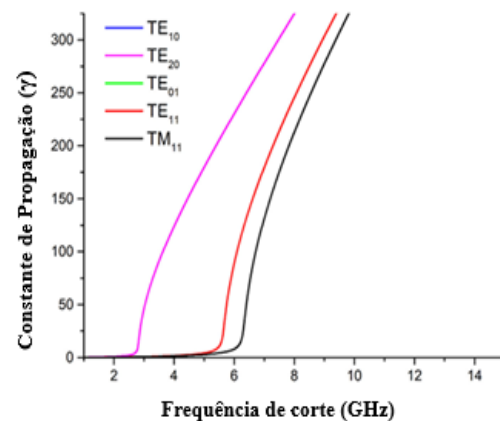


Figura 6: Constante de propagação versus Frequência para constante dielétrica no interior de $\epsilon_r=4,4$.

A Figura 7, é possível verificar que ocorreu uma diminuição nas frequências de corte para os quatro primeiros modos de operação TE_{10} , TE_{20} , TE_{01} e TE_{11} , que passaram a ressoar respectivamente em 2,81 GHz, 5,66 GHz, 5,65 GHz e 6,32 GHz.

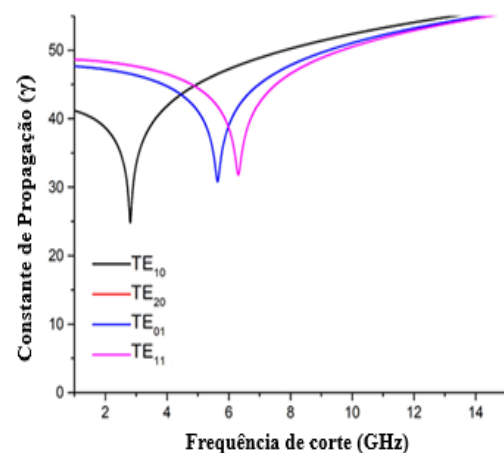


Figura 7: Curva de gama (dB) versus a frequência para guia de onda com $\epsilon_r=4,4$.

A partir da análise dos gráficos da constante de propagação e da curva do valor de gama em dB é possível verificar que o meio e propagação altera a frequência de corte do guia retangular, como também a faixa de operação para o qual é projetada, indicando uma relação direta entre o material dielétrico no interior do guia e a frequência de corte.

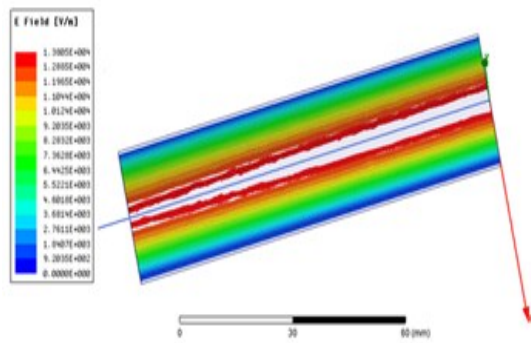


Figura 8: Magnitude do campo elétrico (V/m) para guia de onda com interior constante dielétrica em seu interior de $\epsilon_r=1$

Na figura 9, a distribuição de campo elétrico dentro do guia com $\epsilon_r = 1$ se concentra na região central do guia, indicada pela cor vermelha, e se mantém praticamente uniforme no decorrer de toda a sua dimensão da estrutura.

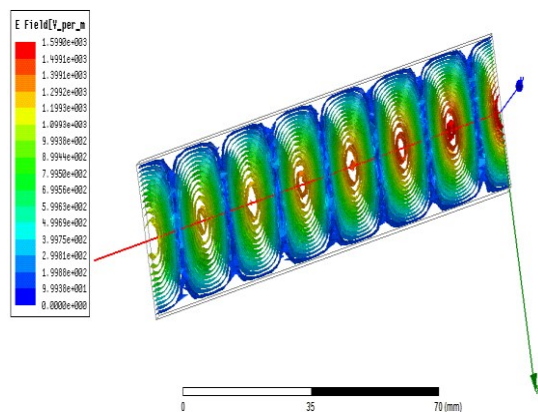


Figura 9: Magnitude do campo elétrico (V/m) para guia de onda com interior com valor de constante dielétrica $\epsilon_r=4,4$.

Na figura 10, a distribuição de campo elétrico dentro do guia com $\epsilon_r = 1$ se concentra na região central do guia, indicada pela cor vermelha, e se mantém praticamente uniforme no decorrer de toda a sua dimensão da estrutura. Contudo, com o aumento da constante dielétrica, é possível observar na Figura 8 um aumento das perdas na propagação no meio guiado.

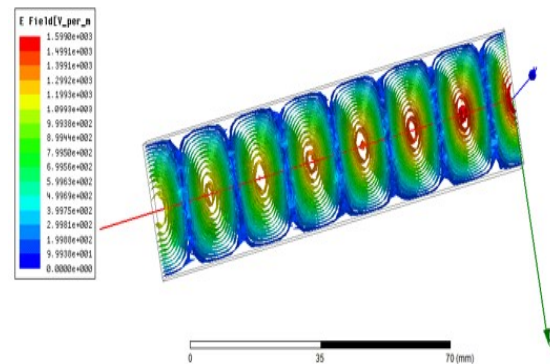


Figura 10: Magnitude do campo elétrico (V/m) para guia de onda com interior com valor de constante dielétrica $\epsilon_r=4,4$.

A inserção de anteparos causa obstáculos a propagação da onda, fazendo com que esta seja refletida e consequentemente atenuada. Contudo para o modo transversal elétrico da constante e propagação do guia com e sem anteparos não há mudanças nos valores das frequências como pode ser constatado pelo gráfico da Figura 11.

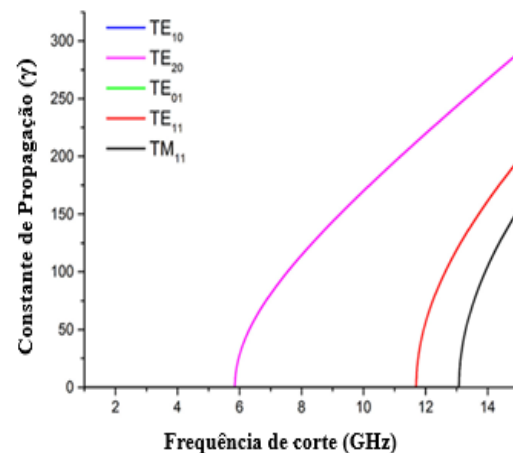


Figura 11: Constante de propagação versus Frequência para constante dielétrica no interior de $\epsilon_r=1$ para guia de onda retangular com anteparos ao longo da estrutura.

Na Figura 12, pode-se observar que para o modo TE_{10} , assim como para os demais modos não há alteração nas frequências, como já havia sido demonstrado no gráfico da parte real da constante de propagação Figura 9.

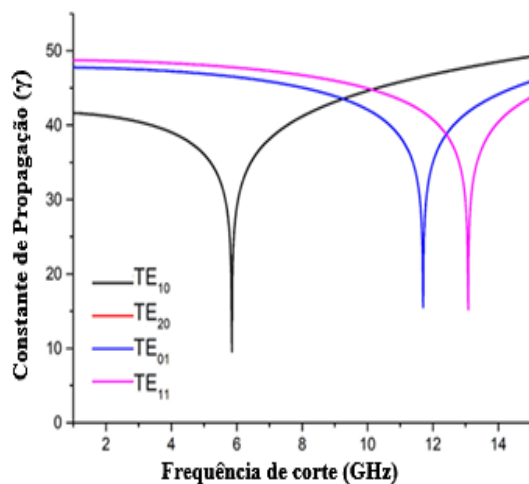


Figura 12: Curva de gama (dB) versus a frequência para guia de onda com anteparos no interior da sua estrutura e constante dielétrica $\epsilon_r=1$.

Na Figura 13, a propagação no guia de onda com a introdução de anteparos é atenuada, principalmente na segunda parede, onde somente uma parcela muito pequena do campo elétrico consegue ultrapassar a barreira do anteparo, sendo uma parte refletida.

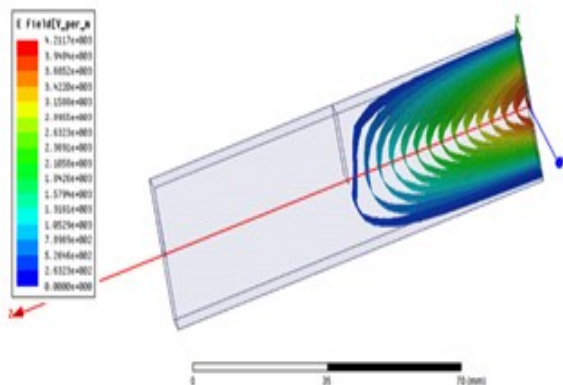


Figura 13: Magnitude do campo elétrico (V/m) para guia de onda com interior constante dielétrica em seu interior de $\epsilon_r=1$ e anteparos ao longo da sua estrutura.

CONCLUSÃO

A realização deste estudo permitiu uma melhor compreensão acerca dos conceitos do guia de onda retangular e como os campos se comportam com a variação do seu meio interno. Percebe-se que guias de onda possuem muitas aplicações, visto que alterações simples em seu dimensionamento geram diferenças relevantes no produto final.

A inserção de anteparos no interior de guias de onda pode ser utilizada com o objetivo de obter uma distribuição de campo elétrico mais uniforme, assim

como a mudança do material que implica na mudança da permissividade relativa do meio, influencia nas dimensões do guia. Deste modo, variando-se o material, pode-se fabricar um guia mais compacto ou mais robusto para atender à demanda do projeto. O deslocamento da frequência de ressonância que ocorre com a inserção dos anteparos propostos no estudo é um quesito muito interessante, pois abre margem para a possibilidade do uso do mesmo guia para diferentes aplicações. Ressalta-se a necessidade de mais estudos relacionados a variações de guias de onda, visto que é uma área muito ampla para estudos relacionados à transmissão de energia.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. Os autores agradecem também, a CAPES, UFRS, GEPEAT, ao capítulo Estudantil MTS – UFRS e a equipe do Laboratório de Telecomunicações e Micro-ondas da UFRS.

REFERÊNCIAS

- COLLIN, Robert E. **Engenharia de microondas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.
- DUNLOP, John; SMITH, D. Geoffrey. **Telecommunications engineering**. 3. ed. London: Chapman & Hall, 1995.
- EROL, Yavuz; BALIK, Hasan H. **A new approach to analysis of rectangular waveguides**. *Journal of Science and Technology*, Beykent University, p. 177-193, 2008.
- POZAR, David M. **Microwave engineering**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- ZAGINAYLOV, Gennadiy I. et al. **Theory of irregular impedance waveguides: generalized method of separation of variables**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL METHODS IN ELECTROMAGNETIC THEORY, 2014. Piscataway: IEEE, 2014. p. 31-35.