

# Modelagem de Modos Transversais em Guias de Onda Retangulares

XIV ENCONTRO CIENTÍFICO DE FÍSICA  
APLICADA - 2024

Pires, M, B.\*; Cremasco, C. W.; Bueno, T, E, P.

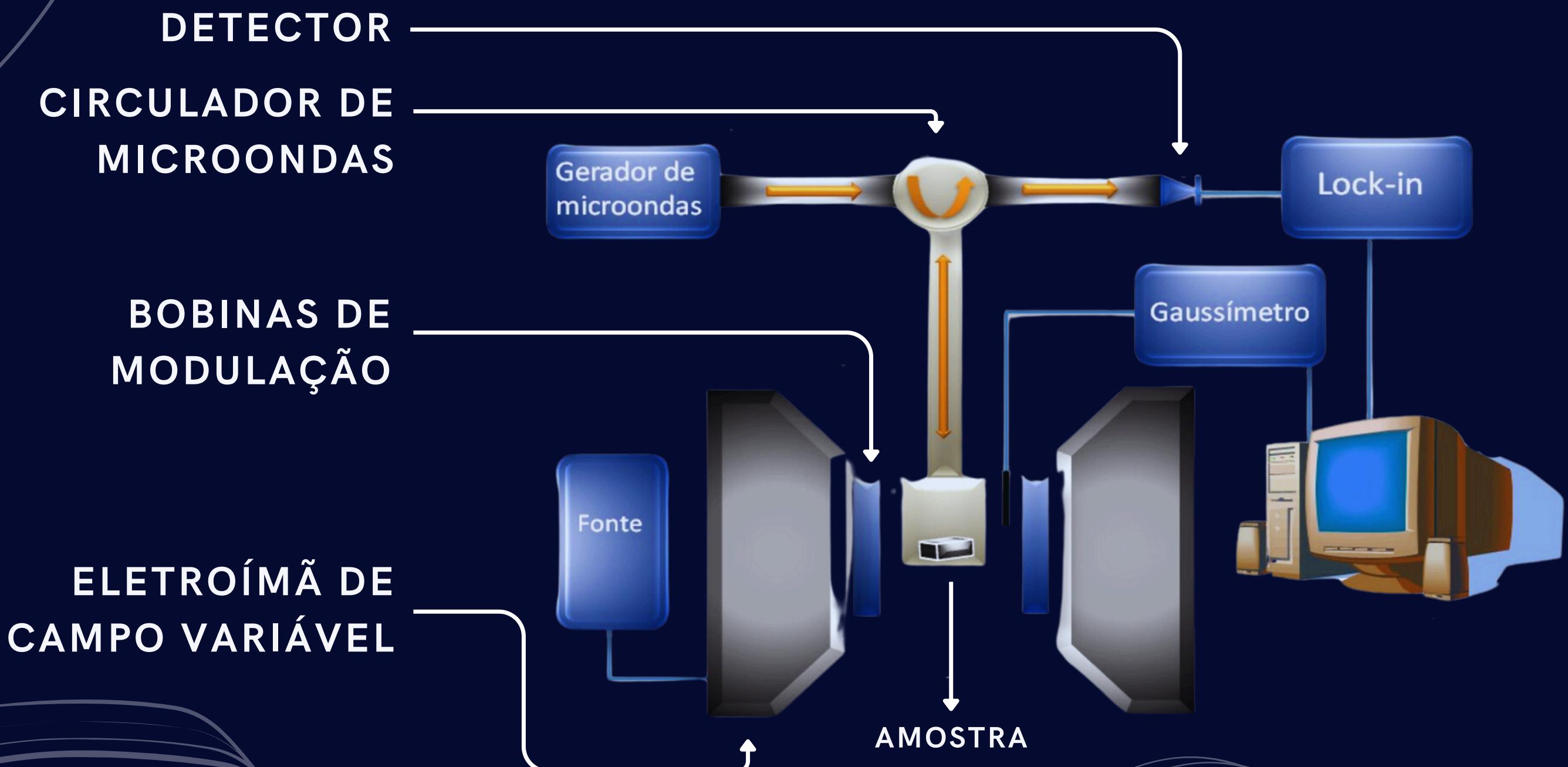
# Introdução:

As espectrocopias de ressonância eletronica paramagnética e ferromagnética baseiam-se na absorção de microondas por amostras submetidas a um campo magnético. Nos três ultimos anos foi feito um grande esforço para a criação do **primeiro Laboratório de Ressonânci Eltrônica(LRE) no Espírito Santo**

Com base no trabalho de monografia “Ferramenta de simulação dos campos elétrico e magnético nos guias de ondas retangular e circular” por Wallisson Freitas de Souza surgiu a ideia de refazer o software com código aberto em Python.



# Montagem experimental de um EPR



# Obtenção dos dados experimentais

Com o auxílio do LabView, é possível automatizar o aparato experimental e obter os dados de frequência de ressonância:

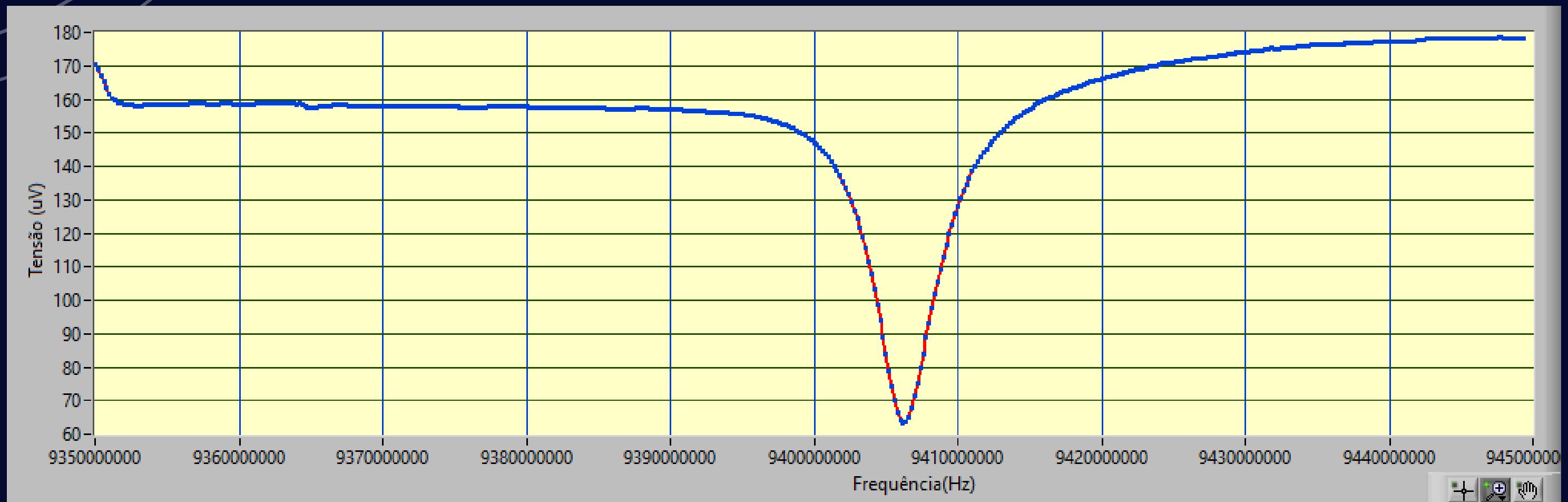


Figura 1: Gráfico de Deep. Comportamento da tensão em função da frequência

# Modos TE e TM

Modos Transversais apresentam campos transversais à direção de propagação. sem as componentes elétrica e magnética na direção de propagação

## MODOS TRANSVERSAIS ELETROMAGNÉTICO:

- $E_z = 0$
- $H_z = 0$

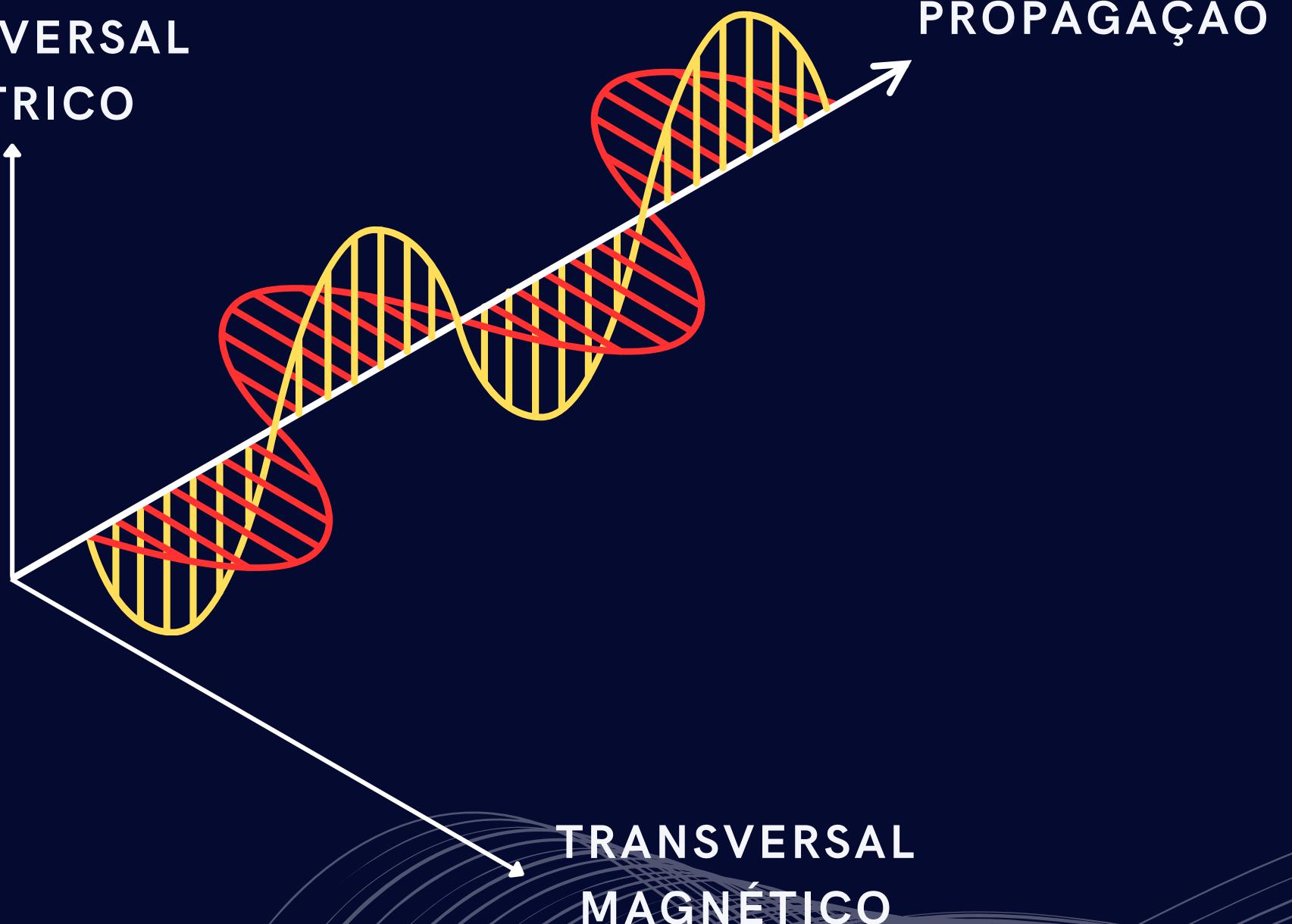
## MODOS TRANSVERSAIS ELÉTRICOS:

- $E_z = 0$
- $H_z \neq 0$

## MODOS TRANSVERSAIS MAGNÉTICOS:

- $H_z = 0$
- $E_z \neq 0$

## TRANSVERSAL ELÉTRICO



# Equações de Maxwell e a Equação de Helmholtz

Partindo das equações de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu \vec{H}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\mu \vec{E}$$

É possível chegar na Equação de Hemholtz para o campo elétrico e o campo magnético:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0$$

# Equações de Maxwell e a Equação de Helmholtz

Ao aplicarmos as condições de contorno:

- Delimitação das superfícies condutoras;
- Meio dielétrico sem perdas;
- Onda que se propaga na direção  $\hat{z}$ ;
- Dependência  $e^{j\omega t}$

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{H} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0$$



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

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

(POZAR, 2011)

# Guia de onda metálico retangular e os modos $TE_{mn}$

- $E_z = 0$
  - $H_z \neq 0$
- $$\rightarrow \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + z_c^2 \right) h_c(x, y) = 0$$

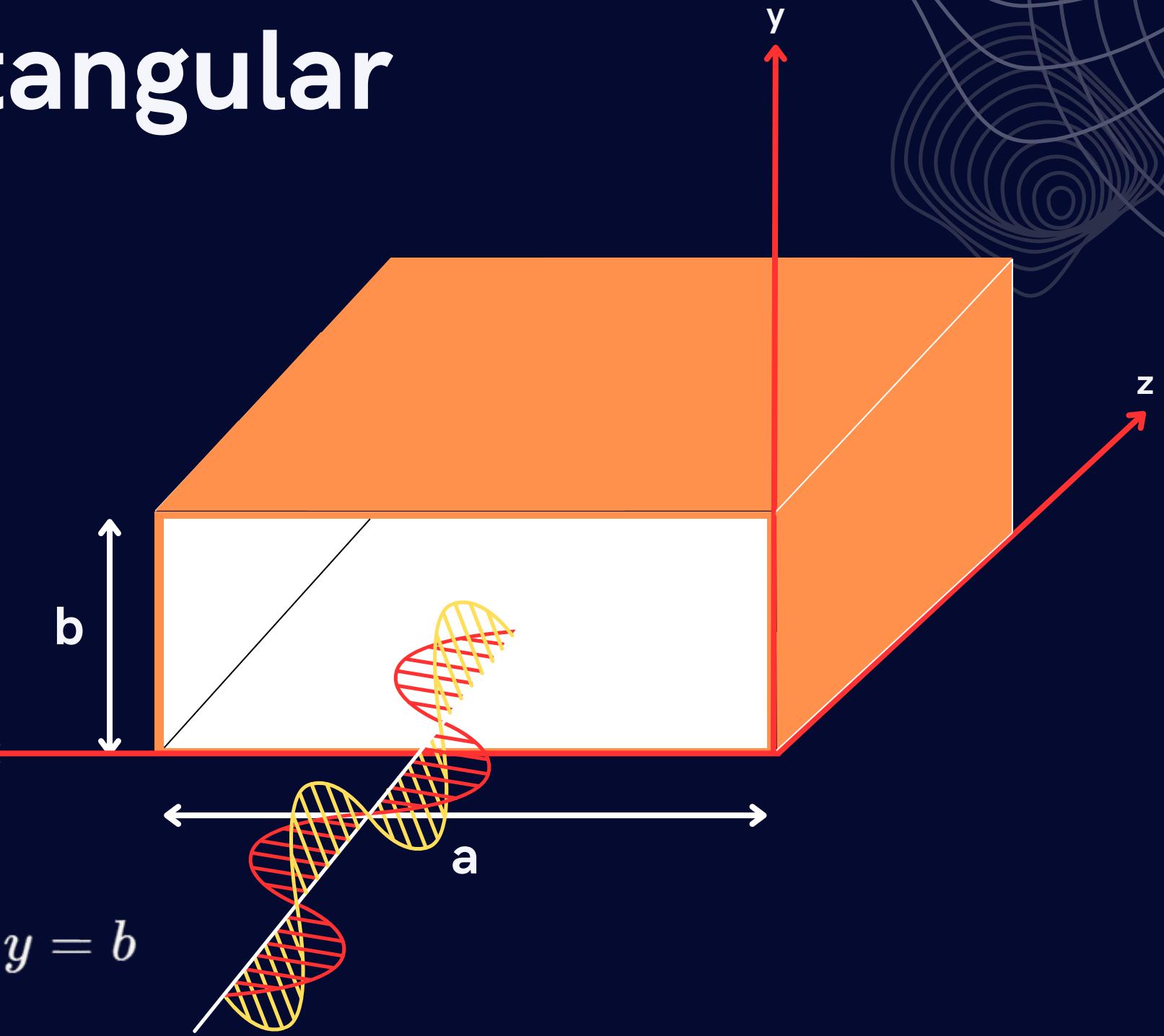
Obtemos a solução geral:

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

Na superfície do condutor:

$$\vec{E}_{\text{Tan}} = \vec{H}_{\text{Nor}} = 0 \rightarrow e_x(x, y) = 0 \quad \text{para } y = 0 \text{ e } y = b$$

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



(POZAR, 2011)

# Guia de onda metálico retangular e os modos TE<sub>mn</sub>

Componentes transversais e longitudinal dos campos elétrico e magnético:

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

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

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

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

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

Em que

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$$

# Guia de onda metálico retangular e os modos $\text{TH}_{mn}$

Analogamente:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + z_c^2 \right) e_z(x, y) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} e_z(x, y) = 0 \quad \text{para } x = 0 \text{ e } x = a \\ e_z(x, y) = 0 \quad \text{para } y = 0 \text{ e } y = b \end{array} \right.$$

**Componentes transversais e longitudinal dos campos elétrico e magnético:**

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

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

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

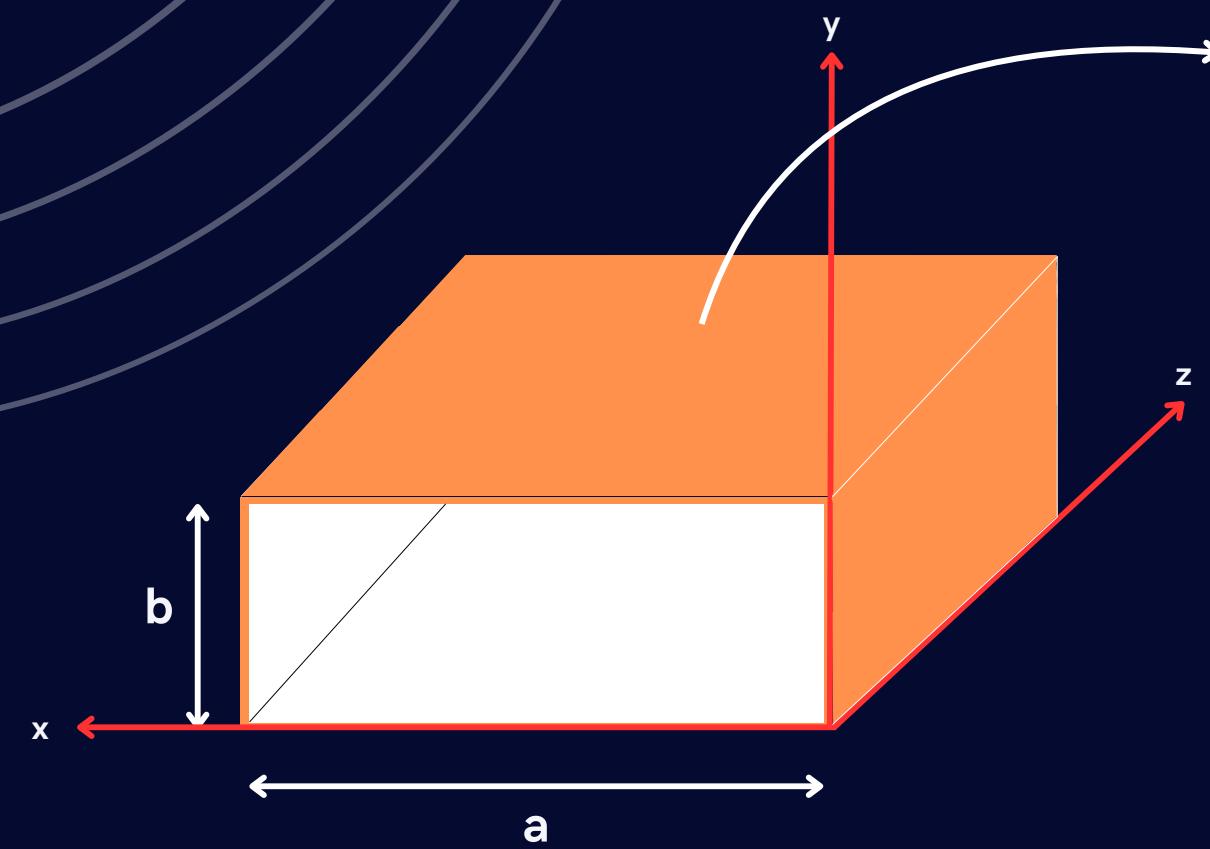
$$E_x(x, y, z) = -\frac{j\beta m\pi}{ak_c^2} B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z}$$

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

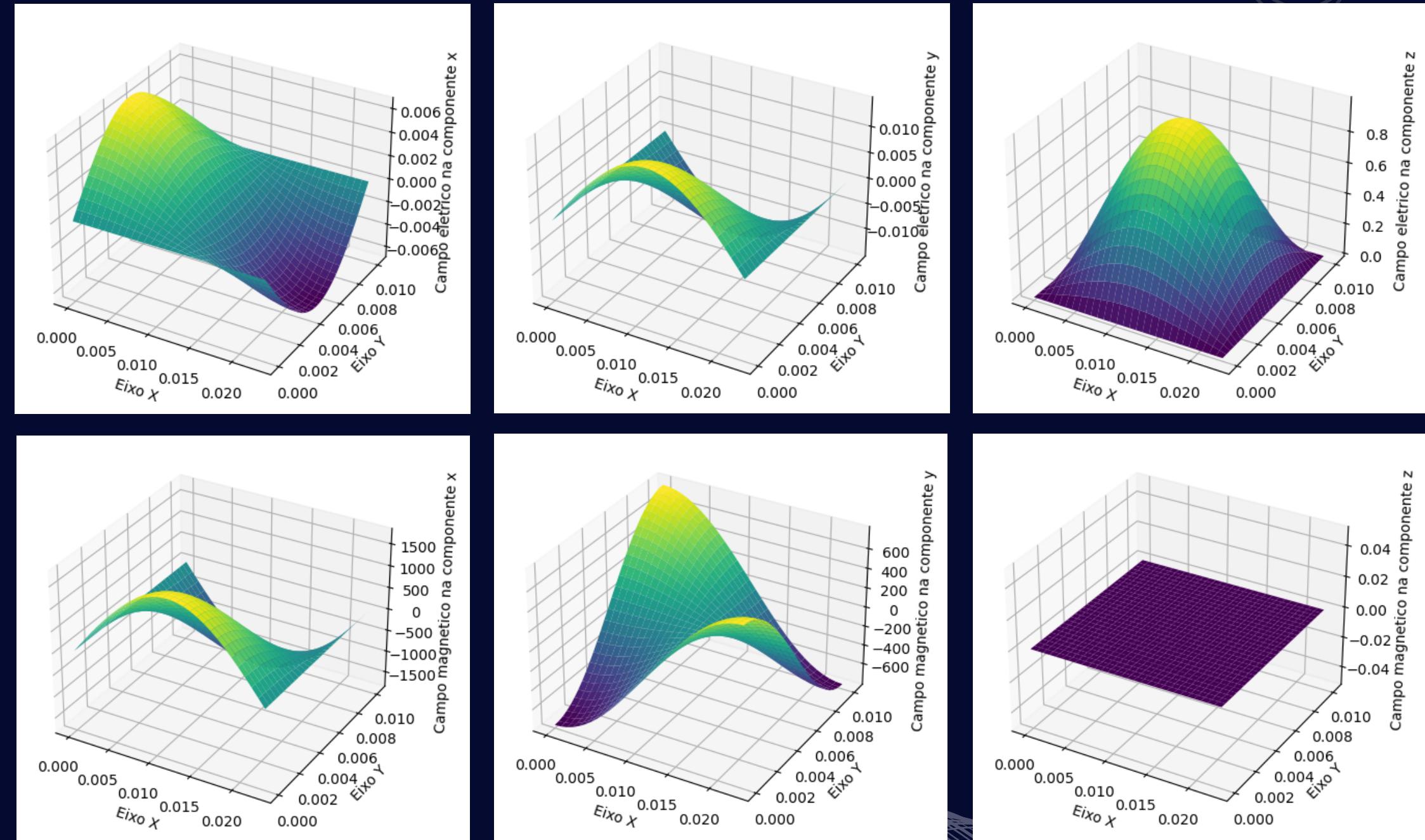
Em que

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$$

# Resultados: Intensidade do campo magnético



TE10, 12GHz com ar

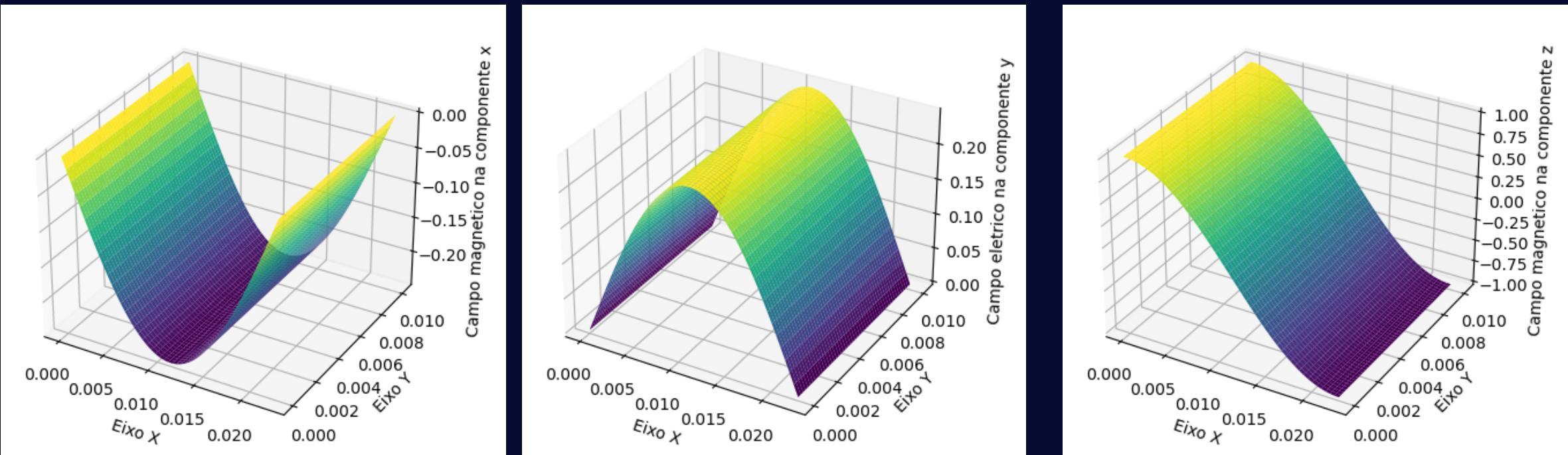
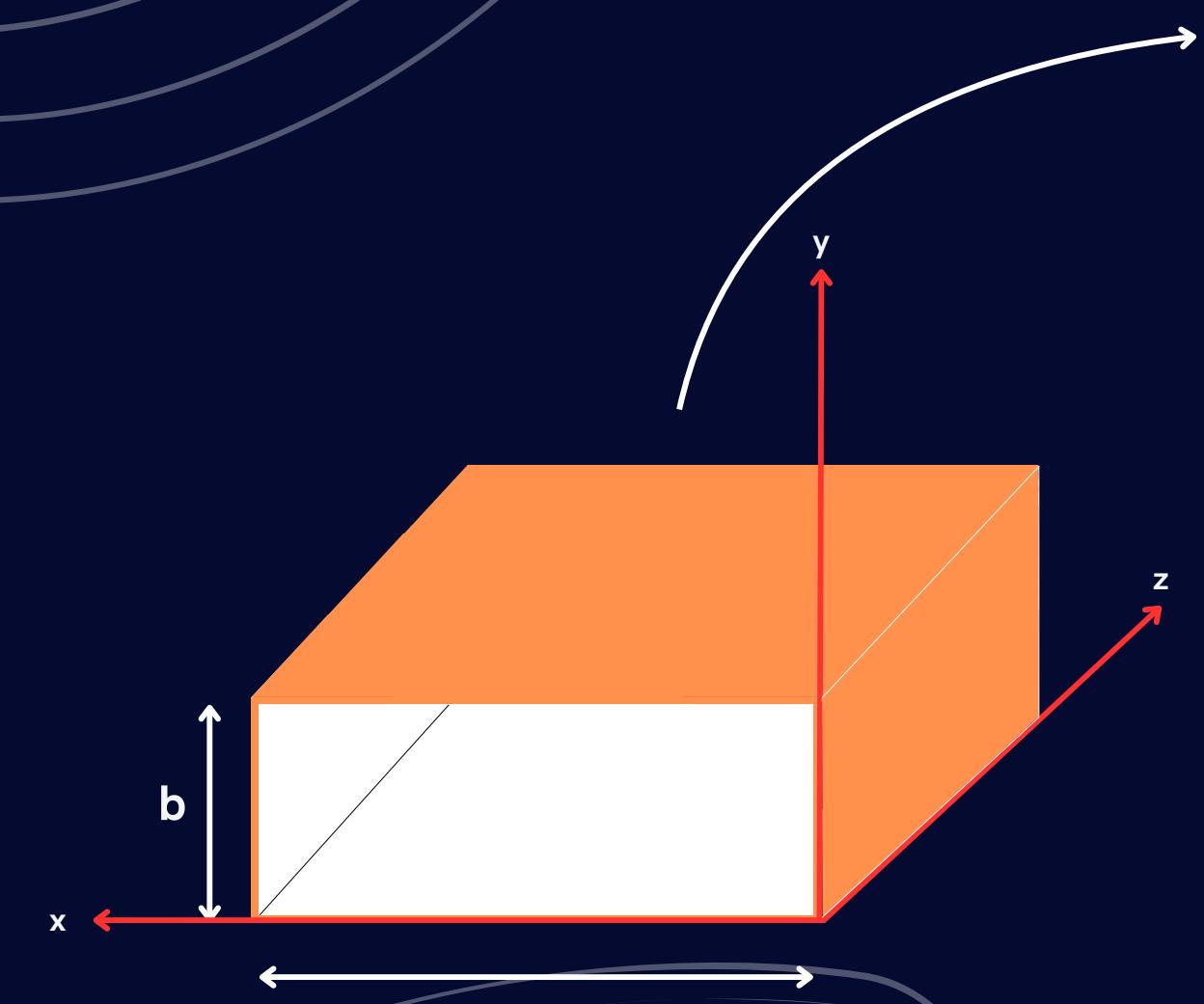


Nas seguintes configurações:

- $a = 22.86 \text{ mm}$
- $b = 10.16 \text{ mm}$
- Frequência =  $12.10^9 \text{ Hz}$
- Permissividade = 1
- Permeabilidade = 1

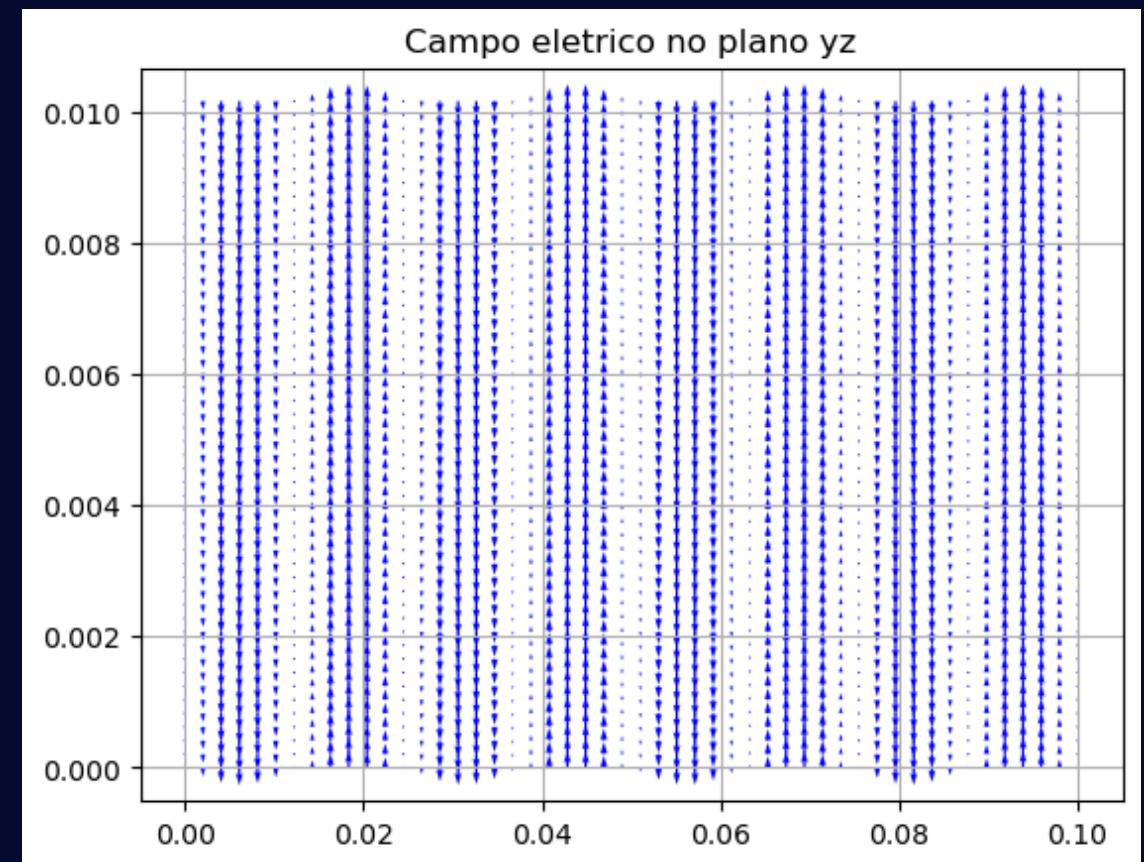
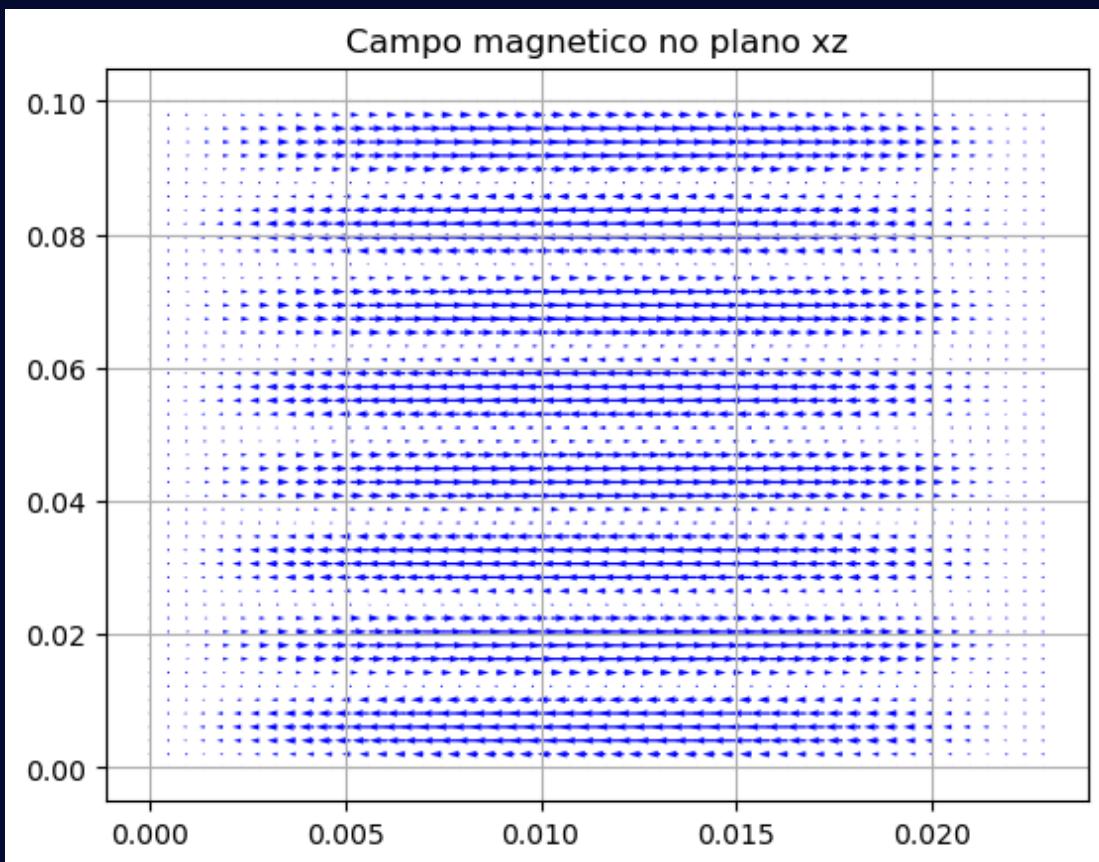
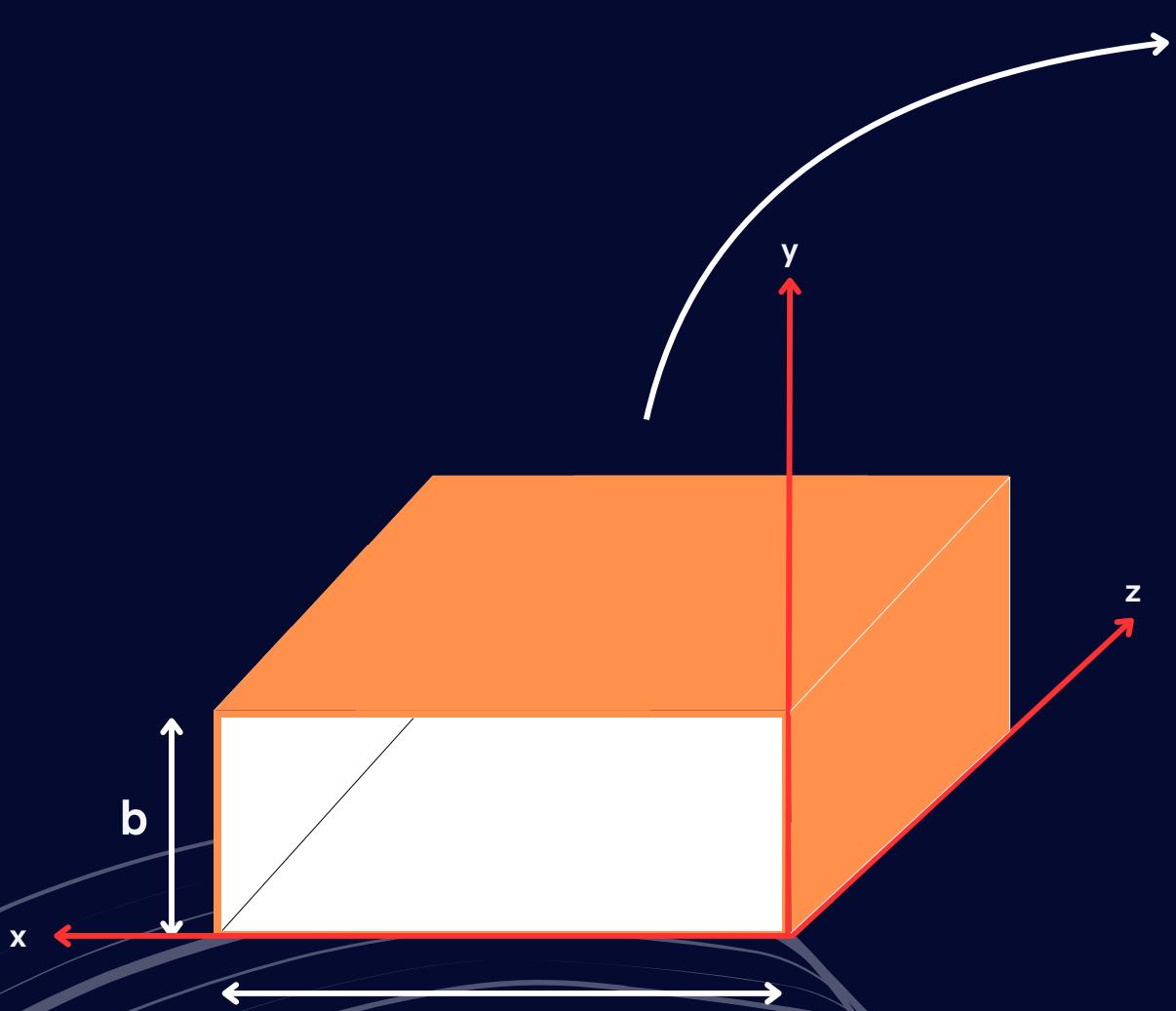
# Resultados: Intensidade do campo transversal magnético

TE10, 12GHz com ar

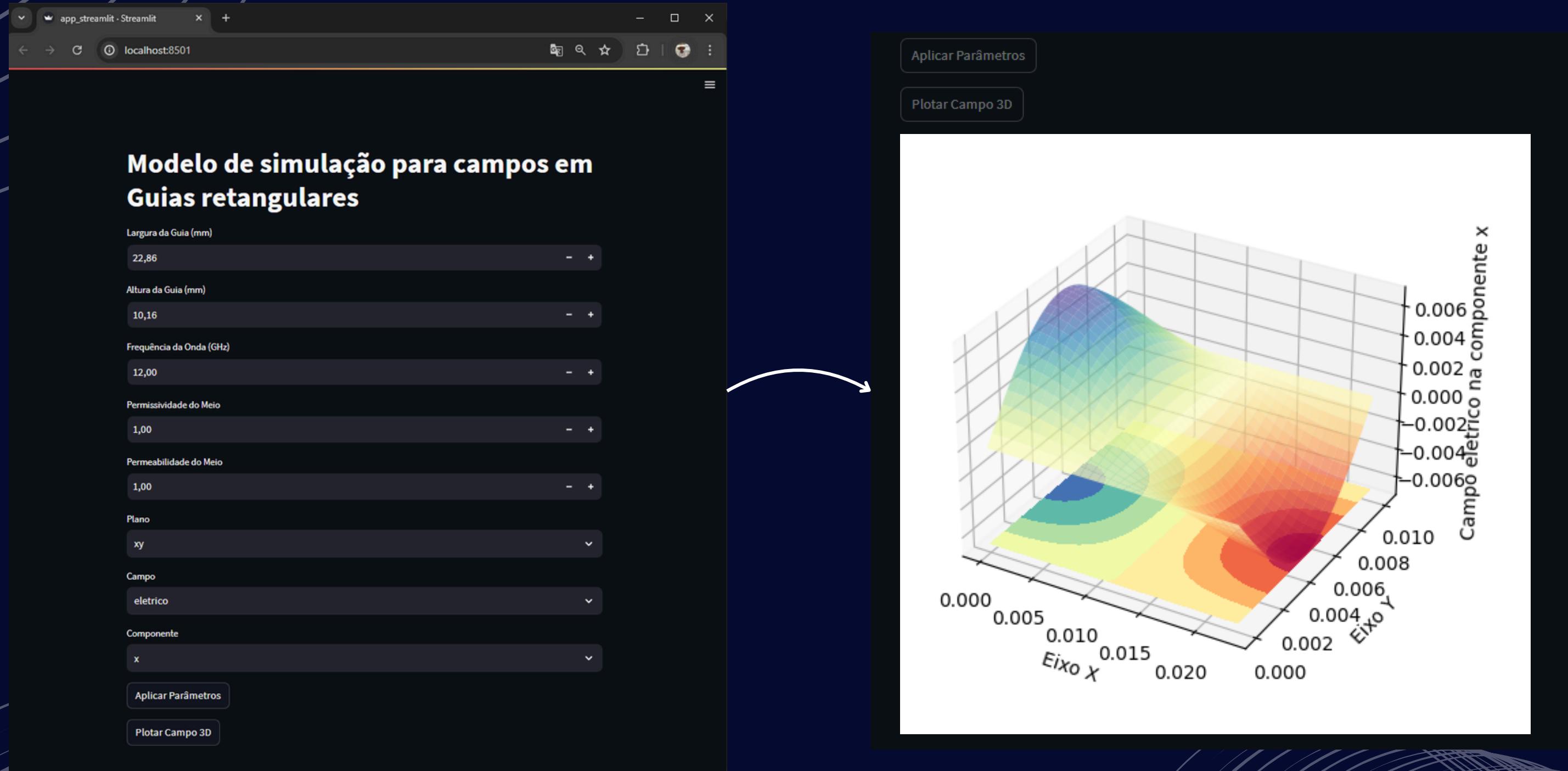


# Resultados: Comportamento do campo vetorial do modo transversal magnético

TE10, 12GHz com ar



# Interface de usuário



# Metas futuras

- Melhorias na interface de usuário
- Generalização para guias de ondas circulares;
- O que acontece com o campo na adição de uma amostra?

# Referências

- [1] M. POZAR David. **Microwave engineering** 4th ed. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2011
- [2] Wallisson Freitas de Souza. "Ferramenta de simulação dos campos elétrico e magnético nos guias de onda retangular e circular." Em: (2021)
- [3] BALANIS, Constantine A. **Advanced Engineering Electromagnetic**, 2<sup>a</sup> ed. USA: John Wiley & Sons 2012.

Obrigado!

Abraços e céus limpos!