

ANEXO 1

TUTORIAL DE SIMULAÇÃO

Neste documento é apresentada instruções para projetar o modulador de eletro-absorção em estudo. A modelagem do dispositivo foi feita em modelo 2D no Software *MULTIPHYSICS COMSOL*, versão 5.5. As figuras apresentadas são relativas às simulações feitas com PMMA depositado sobre o capacitor. Para realizar as simulações deve-se atentar aos seguintes passos:

1. Passo – Definição de Interface Física

Para selecionar a interface física, clica-se sequencialmente em *Model Wizard- 2D- Optics- Wave Optics- Electromagnetic Waves, Frequency Domain (ewfd)*. Em seguida, a estudo a ser selecionado é *Mode Analysis*.

As interfaces que compõe *Optics* podem ser usadas para modelagem eletromagnética de dispositivos nano-ópticos e plasmônicos, guias de ondas e fibras, fenômenos de espalhamento óptico e óptica não linear.

As interfaces em *Wave Optics* são usadas para calcular campos elétricos e magnéticos para sistemas onde o comprimento de onda é comparável ou muito menor do que o dispositivo ou sistema estudado. No caso da interface *Electromagnetic Waves, Frequency Domain*, o intuito é resolver distribuições de campo eletromagnético de tempo harmônico.

Para a interface *ewfd* o tamanho máximo do elemento de malha deve ser limitado a uma fração do comprimento de onda. O tamanho do domínio que pode ser simulado, portanto, é dimensionado com a quantidade de memória do computador disponível e o comprimento de onda. E dentre as opções de estudo desta interface, neste trabalho foi adotado o *Mode Analysis*, que é usado para calcular as constantes de propagação ou números de onda, bem como formas de modo de propagação, para uma determinada frequência.

2. Passo – Declaração de Variáveis e Parâmetros

Em *Global Definitions-Parameters* foram declaradas aquelas variáveis, como largura do capacitor e espessura do dielétrico, as quais servirão de parâmetro em *Parametric Sweep*.

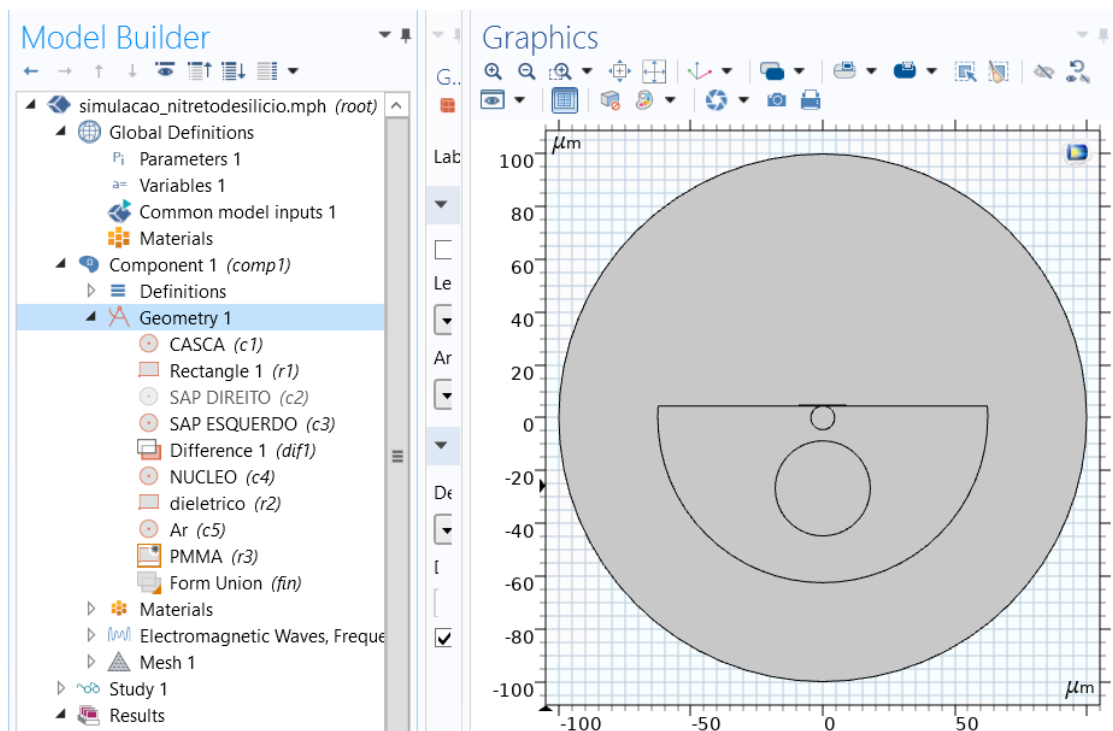
Em *Global Definitions-Variables* foram inseridas as variáveis pré-definidas, como: os raios do SAP, núcleo e casca, além das variáveis que determinam as propriedades ópticas e elétricas dos dielétricos e da fibra.

3. Passo – Modelagem do Dispositivo

Em *Component-Geometry* foram feitas as definições das unidades geométricas. Ao clicar com o botão direito do *mouse* é aberto um menu de opções geométricas, na qual foram adotados neste trabalho círculos e retângulos, para dar forma ao dispositivo 2D, como pode ser visto canto esquerdo da Figura 1. E ainda foram utilizadas funções booleanas da diferença como polimento da face da fibra e a função união para unir os componentes.

Dentro de cada geometria que compõe o componente (núcleo, casca, SAP, dielétrico) há lacunas que foram preenchidas com as variáveis definidas em *Variables* e *Parameters*, para o raio dos círculos, posição no eixo x e y, altura etc. Neste ponto é importante que as localizações dos componentes tenham sido bem definidas para que, ao clicar em *build all*, o núcleo, os SAPs, a casca, o dielétrico estejam em suas corretas posições.

Figura 1 – Modelagem da fibra com seu eixo lento na vertical.



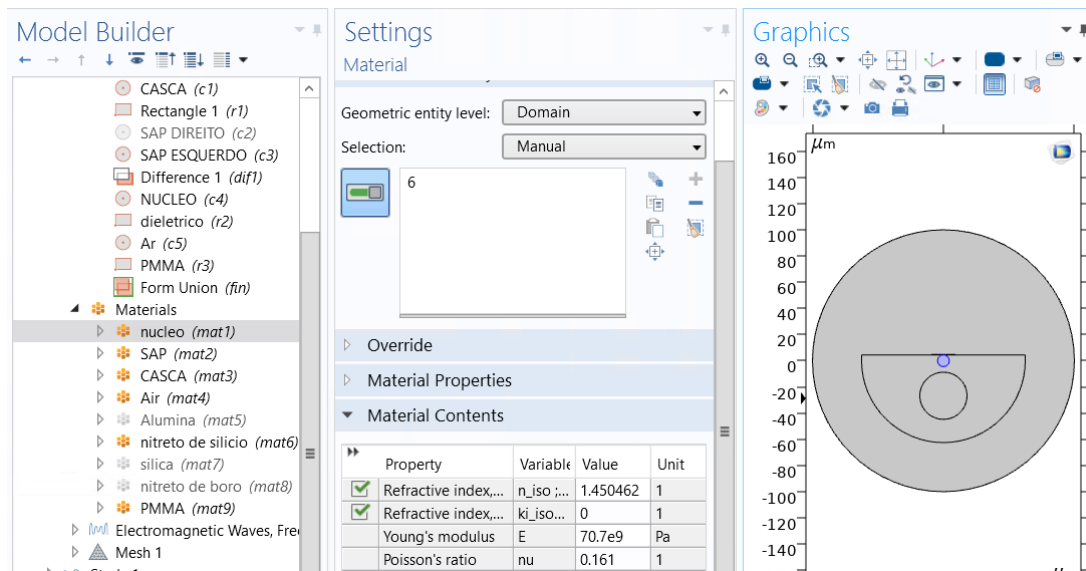
Fonte: Elaborado pelo autor.

4. Passo – Declaração de Materiais

Em *materials*, com o menu aberto pelo botão direito do *mouse* foram criados múltiplos *blank materials* para inserir somente as propriedades necessárias de cada material em estudo como: índice de refração, módulo de Young, razão de Poisson e constante dielétrica.

Como nesse trabalho foram estudados moduladores para diferentes dielétricos, a comutação de troca entre os dielétricos foi feita manualmente estabelecendo *enable* para o elemento em estudo e *disable* para os demais, Figura 2.

Figura 2 – Definindo as propriedades do material para o núcleo da fibra.



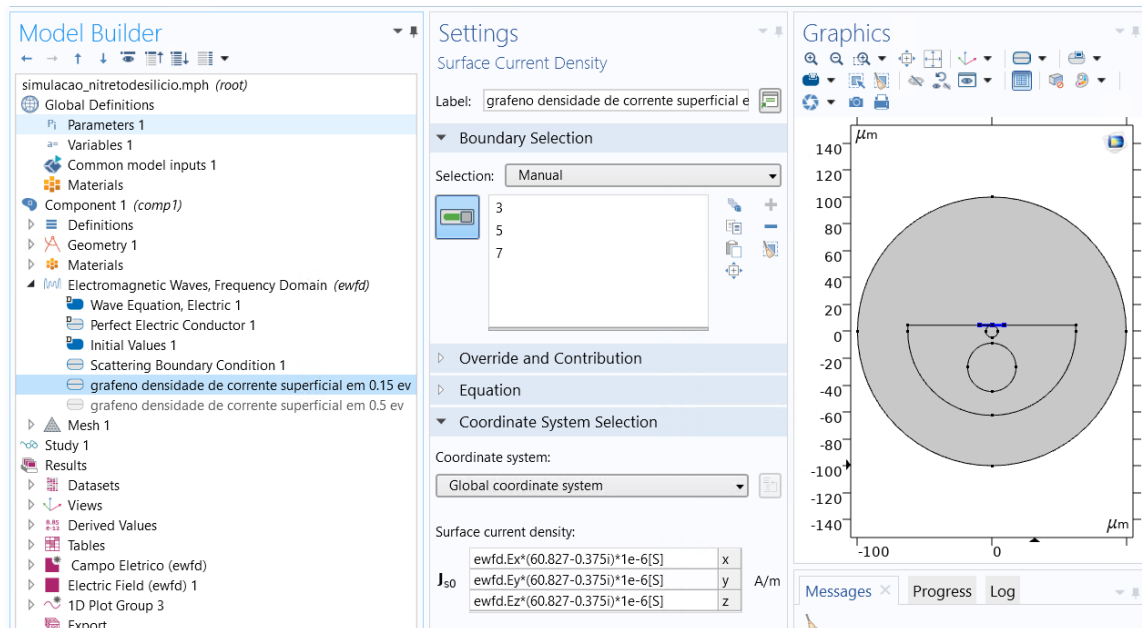
Fonte: Elaborado pelo autor.

5. Deposição do Grafeno

Em *Electromagnetic Waves, Frequency Domain (ewfd)*, além de *Wave Equation*, *Perfect Electric Conductor* e *Initial Values* gerados automaticamente, foram adicionadas as interfaces *Scattering Boundary Condition* e *Surface Current Density* duas vezes.

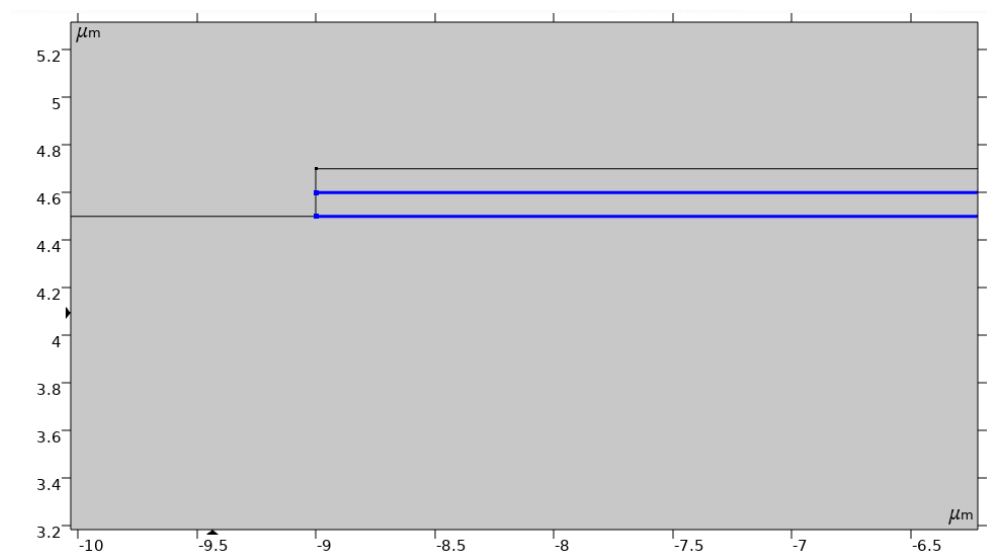
Em *Surface Current Density* foram inseridas as equações de densidade de corrente superficial pré-determinadas, a quais representam as folhas de grafeno, em níveis de Fermi em 150 meV e 500 meV, para as direções do campo eletromagnético x, y e z, de acordo com a Figura 3. Essas densidades de corrente são depositadas nas superfícies horizontais do dielétrico formando então um capacitor, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 3 – Incluindo as densidades de corrente para as folhas de grafeno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 – Deposição das folhas de grafeno nas superfícies horizontais do dielétrico.

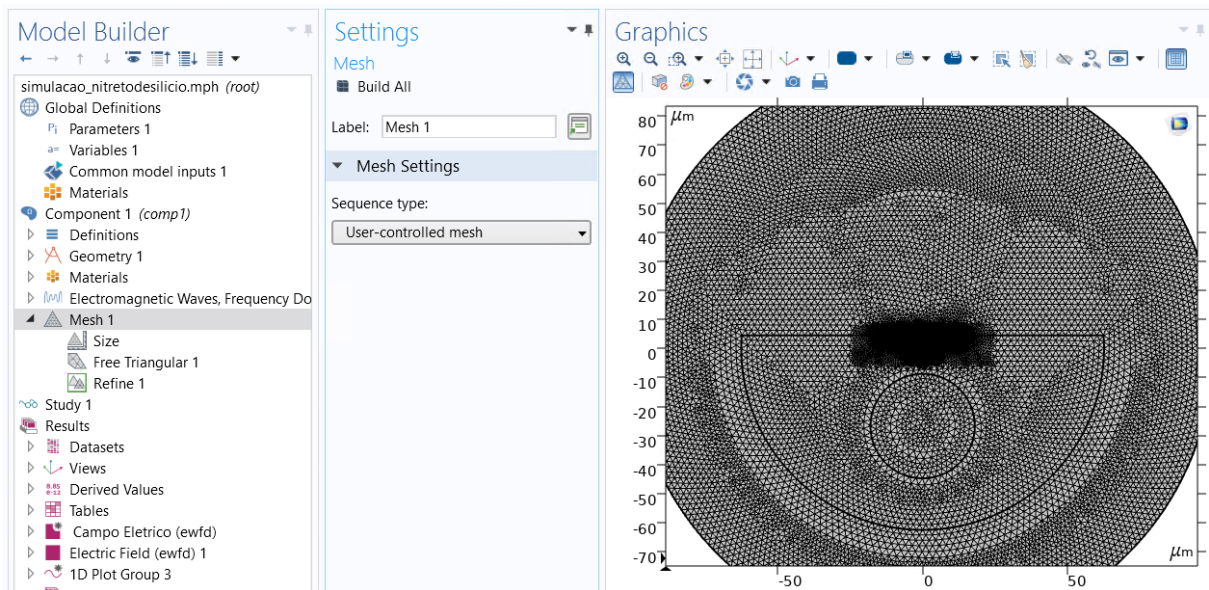


Fonte: Elaborado pelo autor.

6. Passo – Geração da Malha

Em *Mesh*, ao clicar em *build all* é gerada a malha se todos os componentes e propriedades estiverem definidas corretamente, Figura 5.

Figura 5 – Gerando a malha.

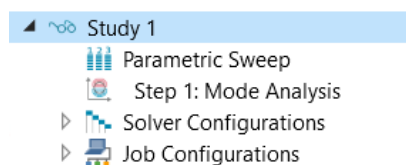


Fonte: Elaborado pelo autor.

7. Passo – Definição do Tipo de Estudo

Em *Study*, Figura 6, deve-se ter atenção somente aos itens *Parametric Sweep* e *Step 1: Mode Analysis*, onde o primeiro deve ser adicionado pelo menu de opções gerado com o botão direito do *mouse* e o segundo é obtido direto da definição de interface discutida no 1. Passo.

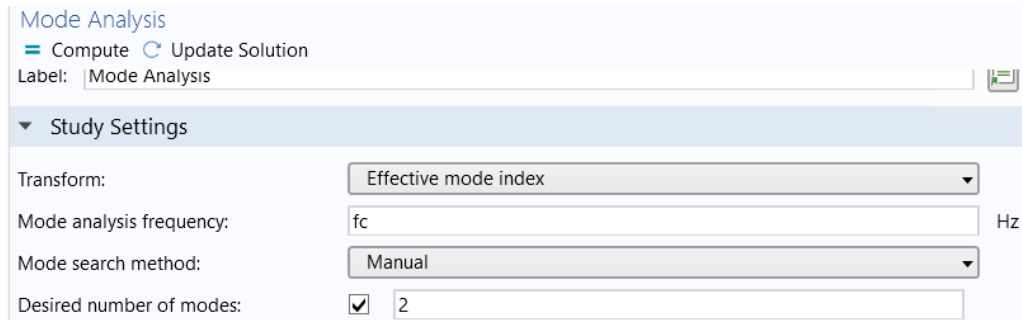
Figura 6 – Parâmetros de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

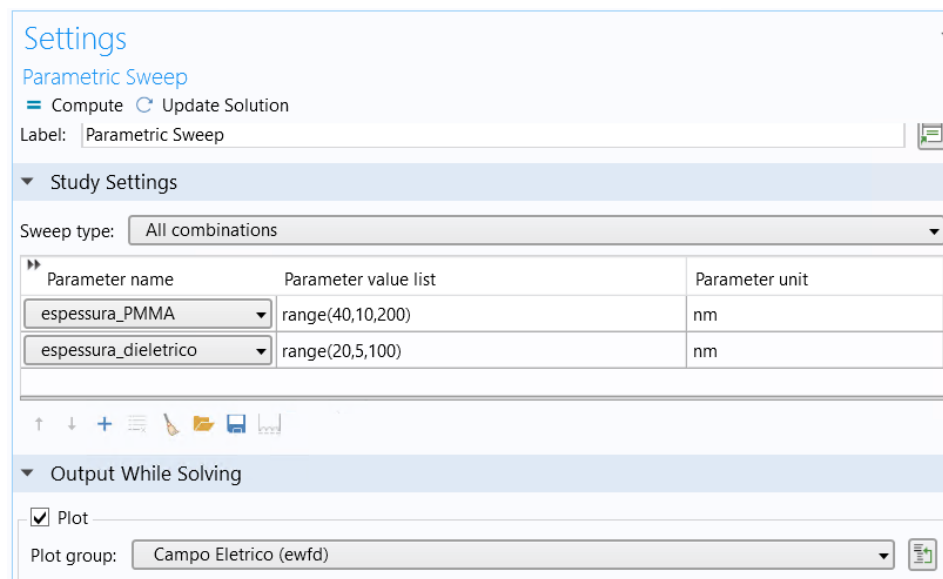
Em *Mode Analysis* foi inserido a frequência de operação f_c , definida em *Variables*, de acordo com o comprimento de onda de simulação. Assim como foi indicado o valor 2 para numero de modos desejaveis (TE e TM). Após todas essas definições foram geradas as simulações.

Figura 7 – Definindo a frequência de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Varredura em espessura do PMMA e dielétrico.

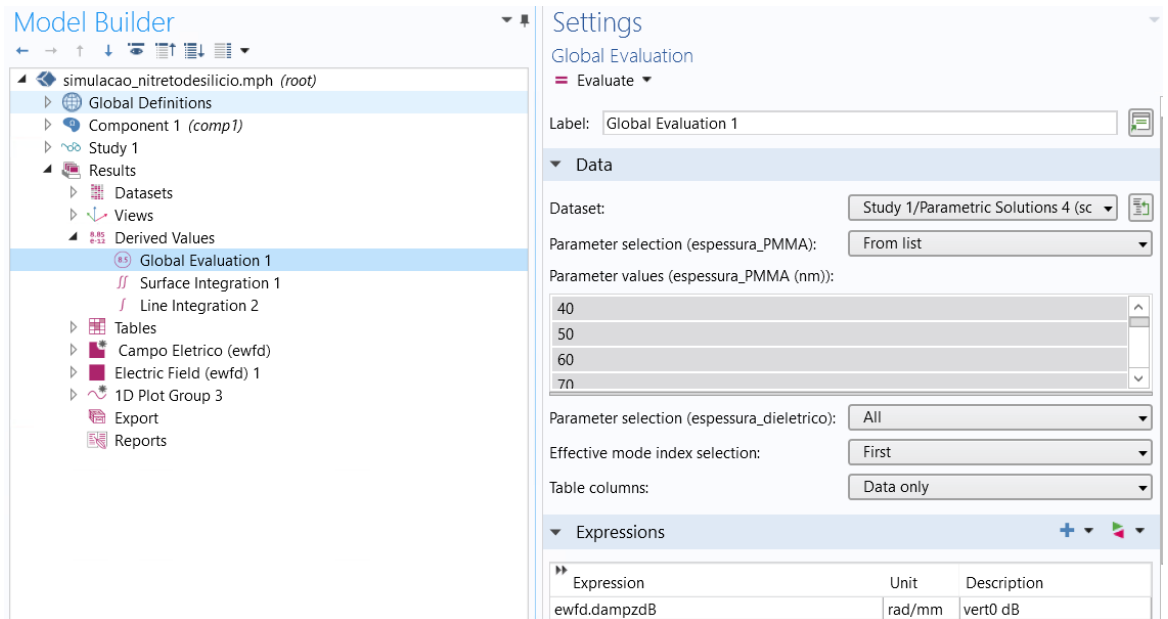


Fonte: Elaborado pelo autor.

8. Passo – Resultados

Em *Derived Values – Global Evaluation* seleciona-se o *dataset* e define-se a expressão *ewdf.dampzdB* para obter os resultados de atenuação para cada simulação gerada pelo *Parametric Sweep*, Figura 9. Para gerar a planilha corresponde aos resultados do conjunto de simulações basta clicar em *Evaluate*.

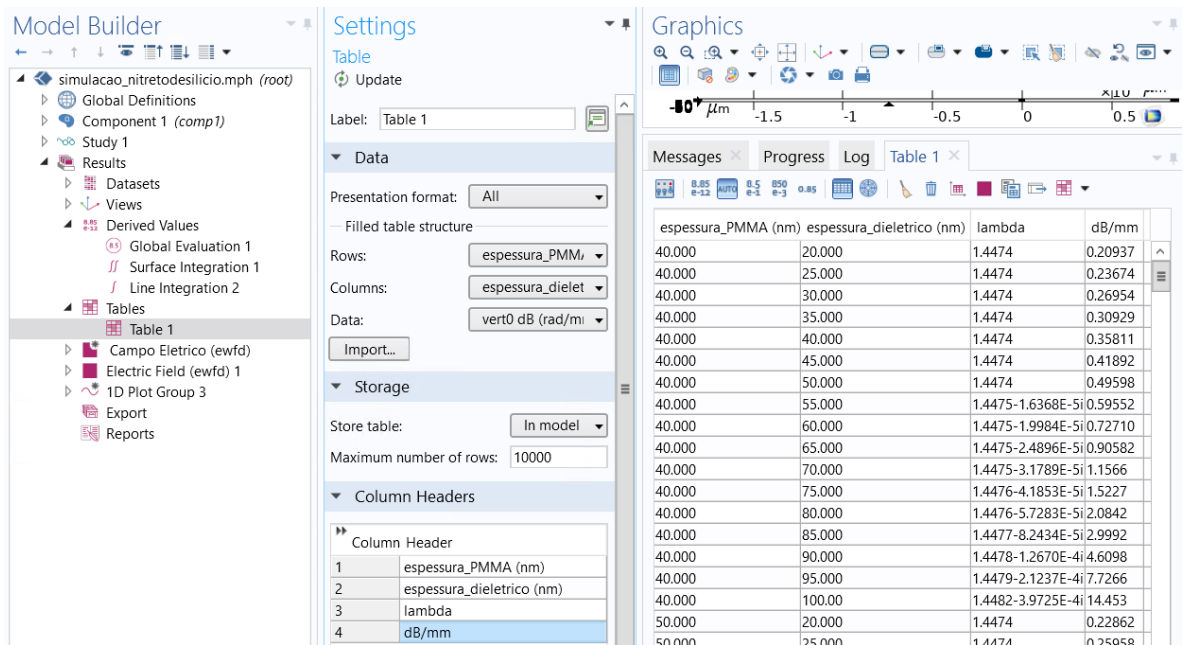
Figura 9 – Definindo função para gerar planilha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A planilha resultante é apresentada na figura 10 onde as colunas foram definidas em *Column Headers*.

Figura 10 – Geração de Planilha.



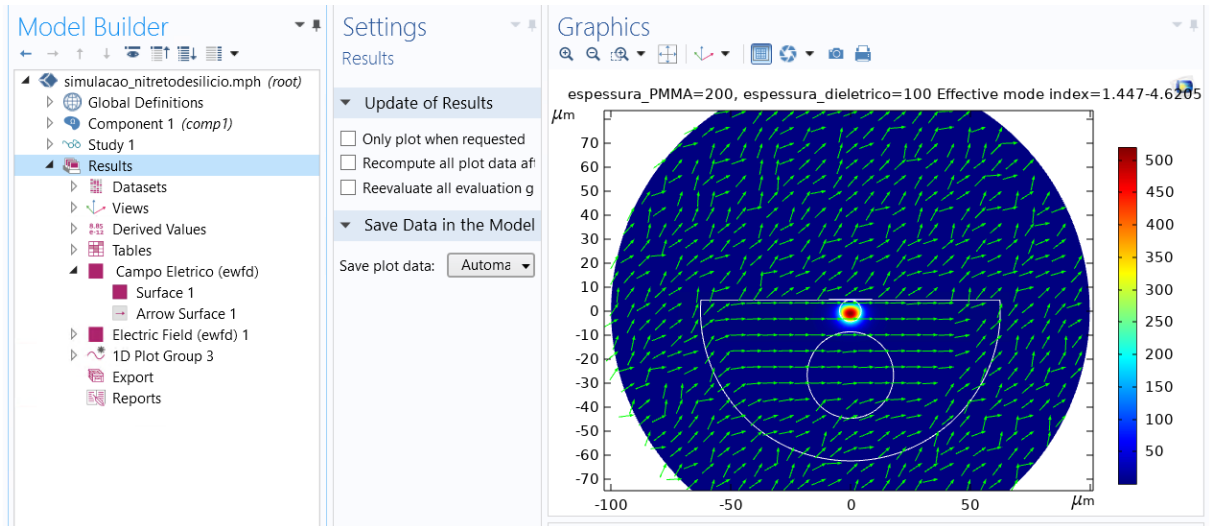
Fonte: Elaborado pelo autor.

A planilha resultante é apresentada na figura 10 onde as colunas foram definidas em *Column Headers*.

Como pode ser visto na Figura 1, por meio da interface *Electric Field* é possível visualizar a propagação da luz, e no caso da amostra desta figura, os vetores representam

a propagação do modo TE, uma vez que as setas estão paralelas ao plano do grafeno. Os vetores foram obtidos pela inclusão de *Arrow Surface*.

Figura 11 – Representação de campo eletromagnético com setas direcionadas pelo modo TE.



Fonte: Elaborado pelo autor.