

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE COMPARATIVA DE NANOANTENAS PLASMÔNICAS NO MODO
DE RECEPÇÃO PARA A APLICAÇÃO EM NANOCIRCUITO ÓPTICO

PATRIK COELHO LOPES

DM : 04/2020

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PATRIK COELHO LOPES

ANÁLISE COMPARATIVA DE NANOANTENAS PLASMÔNICAS NO MODO
DE RECEPÇÃO PARA A APLICAÇÃO EM NANOCIRCUITO ÓPTICO

DM : 04/2020

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PATRIK COELHO LOPES

ANÁLISE COMPARATIVA DE NANOANTENAS PLASMÔNICAS NO MODO
DE RECEPÇÃO PARA A APLICAÇÃO EM NANOCIRCUITO ÓPTICO

Dissertação submetida à Banca Examinadora
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica da UFPA para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na
Área de Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

L864a Lopes, Patrik Coelho
Análise Comparativa de Nanoantenas Plasmônicas no Modo de
Recepção para a aplicação em Nanocircuito Óptico / Patrik Coelho
Lopes. — 2020.
67 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Tecnologia, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Nanoantena. 2. Nanocircuito óptico. 3. Potência recebida.
4. Método dos elementos finitos.. I. Título.

CDD 620.43

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

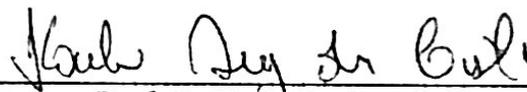
**“ANÁLISE COMPARATIVA DE NANOANTENAS PLASMÔNICAS NO
MODO DE RECEPÇÃO PARA A APLICAÇÃO EM NANOCIRCUITO
ÓPTICO”**

AUTOR: PATRIK COELHO LOPES

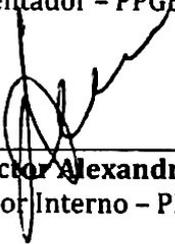
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 30/01/2020

BANCA EXAMINADORA:

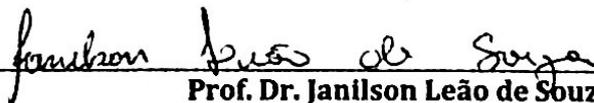


Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa
(Orientador - PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Victor Alexandrovich Dmitriev
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Janilson Leão de Souza
(Avaliador Externo - IFPA)

VISTO:

Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos alcançadas, e em especial aos meus pais, José Antônio dos Prazeres Lopes e Ronise Viana de Sousa Coelho, que nunca mediram esforços para me ajudar de todas as formas possíveis e a confiança que depositaram em mim, fazendo com que eu nunca desistisse dos meus sonhos.

À minha família que foram de total importância, pois acredito que sem o apoio deles esse desafio seria quase impossível de ser vencido, em especial minha querida e amada Tia, Maria de Fátima dos Prazeres Lopes, pelos ensinamentos e lições, e pelo acolhimento em sua casa com todo amor e carinho de uma segunda mãe.

Aos meus amigos da graduação elétrica 2012 e da pós graduação do nosso querido anexo, que no decorrer desses anos se tornarão irmãos, e que pretendo levar para o resto da vida.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, por proverem o conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

Ao meu professor e orientador Dr. Karlo Q. da Costa, por toda paciência e grande auxílio durante a minha jornada acadêmica.

À minha namorada e meu amor Kéttelen Mayara Tavares Brito, que no decorrer de todo esse projeto, me apoiando em todas minhas decisões, serei eternamente grato.

À CAPES, pelo apoio financeiro em forma de bolsa.

Aos pesquisadores e professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas nesse estudo.

Certamente esses parágrafos não irão atender todas as pessoas, que fizeram parte dessa importante fase da minha vida. Mas elas podem estar certas que fazem parte dos meus pensamentos e minha gratidão.

*"Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável,
eles são a abertura para achar as que estão certas."
(Carl Sagan)*

Resumo

Neste trabalho, é feito um estudo teórico para diferentes casos de nanoantenas ópticas. As análises numérica são realizadas pelo Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*). A primeira parte da análise será feita com as nanoantenas isoladas consideradas: dipolo, dipolo-espira, espira e bastão-espira. Inicialmente é feita para o modo de transmissão para a obtenção de parâmetros importantes para o estudo das nanoantenas, como impedância de entrada, coeficiente de reflexão, eficiência de radiação e diagrama de ganho. Posteriormente no modo de recepção, excitadas por uma onda plana linearmente polarizada, variando a direção de polarização. Onde a potência recebida pela carga versus frequência e o campo elétrico próximo são investigados para antenas. Os resultados mostram que o caso da nanoantena dipolo-espira é o mais eficiente (atingindo até $e_r = 81.25\%$) além de uma melhor banda de recepção. Já a segunda parte, é apresentado a aplicação de um nanocircuito óptico, composto pela espira de recepção conectado a uma linha de transmissão óptica bifilar (OTL – *Optical Transmission Line*) com um dipolo no terminal da linha. São investigados também, o campo próximo e a potência recebida para os nanocircuitos analisados separadamente, com uma carga no terminal da linha de transmissão. Por fim, a excitação do nanocircuito é feita através de uma sonda de abertura modelado por um feixe gaussiano, focalizado na espira receptora, transferindo energia para o dipolo emissor, com um padrão de onda estacionária, o acoplamento eletromagnético do nanocircuito espira com o feixe gaussiano, mostrou melhores resultados (com valor máximo atingido de $P_{Z_C} = -103$ dBm) em comparação com a onda plana (com valor máximo de $P_{Z_C} = -125$ dBm), com a potencia recebida na carga de $Z_C = 50\Omega$.

Palavras-chave: Nanoantena, nanocircuito óptico, potência recebida, método dos elementos finitos.

Abstract

In this work, a theoretical study is made for different cases of optical nanoantennas. Numerical analyzes are performed using the Finite Element Method (FEM). The first part of the analysis will be done with the isolated nanoantennas considered: dipole, dipole-loop, loop and rod-loop. Initially it is made for the transmission mode to obtain important parameters for the study of nanoantennas, such as input impedance, reflection coefficient, radiation efficiency and gain diagram. Later in reception mode, excited by a plane wave linearly polarized, varying the direction of polarization. Where the power received by charge versus frequency and the near-field electric are investigated for antennas. The results show that the case of the dipole-loop nanoantenna is the most efficient (reaching up to and $e_r = 81.25\%$) in addition to a better reception band. The second part is presented the application of an optical nanocircuit, composed of the receiving loop connected to a bifilar Optical Transmission Line (OTL) with a dipole at the line end. Also investigated are the near-field and the received power for the nanocircuits analyzed separately, with a load at the terminal of the streaming. Finally, the excitation of the nanocircuit is done through an opening probe modeled by a gaussian beam, focused on the receiving loop, transferring energy to the emitting dipole, with a standing wave pattern, the electromagnetic coupling of the nanocircuit turns with the Gaussian beam, showed better results (with a maximum reached of $P_{Z_C} = -103$ dBm) compared to the plane wave (with value maximum of $P_{Z_C} = -125$ dBm), with the power received at the load of $Z_C = 50\Omega$.

Keywords: Nanoantena, optical nanocircuit, received power, finite element method.

Lista de Ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Diferentes tipos de geometrias de nanoantenas construídas | 24 |
| Figura 2.2 – Princípio de operação de nanoantenas | 25 |
| Figura 2.3 – Esquemática dos feixes ópticos gerados pelas nanoantenas cúbicas . . . | 26 |
| Figura 2.4 – Aplicação de célula fotovoltaica de filme fino utilizando nanopartículas metálicas | 27 |
| Figura 2.5 – Esquema do dispositivo: (a) Vista superior do dipolo orientado na direção y e duas linhas eletrodos na direção x . (b) seção transversal do germânio nanofio (através da linha 1 no painel). (c) Seção transversal (correspondente à linha 2 no painel | 27 |
| Figura 2.6 – Imagem ilustrativa das principais etapas do EBL e FIB padrão da fabricação das nanoestruturas de nanoantenas | 29 |
| Figura 3.1 – Exemplo de tipos de elementos possíveis dependendo da geometria e do contorno do problema | 33 |
| Figura 3.2 – Nós e elementos presentes em uma malha | 33 |
| Figura 3.3 – Logotipo do <i>software</i> Comsol Multiphysics. | 34 |
| Figura 3.4 – Interface do software Comsol: Definição dos parâmetros. | 35 |
| Figura 3.5 – Aplicação de uma lumped port (no centro) no nanodipolo, onde temos em azul a borda da estrutura que foi aplicada a condição de condutor perfeito. | 37 |
| Figura 3.6 – Condição do condutor eletricamente perfeito aplicado na superfície requerida. | 38 |
| Figura 3.7 – Aplicação de uma Camada Perfeitamente Absorvedora (PML) a uma esfera. É possível observar a presença de diversas "fatias"na camada externa. | 38 |
| Figura 4.1 – Geometria das Nanoantenas: (a) caso 1, dipolo isolado; (b) caso 2, dipolo-espira; (c) caso 3, espira isolada; (d) case 4, bastão-espira. . . . | 39 |
| Figura 4.2 – Malha da Nanoantena para o Caso 2. (a) Visão da malha completa e seu entorno. (b) Vista de forma expandida a nanoantena. | 40 |
| Figura 4.3 – Parte real da impedância de entrada. Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelha);: Caso 3 (linhas contínuas verde); Caso 4 (linhas pontilhadas preta). | 41 |
| Figura 4.4 – Parte imaginária da impedância de entrada. Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelha);: Caso 3 (linhas contínuas verde); Caso 4 (linhas pontilhadas preta). | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.5 – Caso 1: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 190$ THz). | 43 |
| Figura 4.6 – Caso 2: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 190$ THz). | 43 |
| Figura 4.7 – Caso 3: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 130$ THz). | 44 |
| Figura 4.8 – Caso 4: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 110$ THz). | 44 |
| Figura 4.9 – Ilustração da onda plana linearmente polarizada, incidida no dipolo receptor, propagando na direção $+x$. (a) $\phi = 0$ rad; (b) $\phi = \pi/6$ rad; (c) $\phi = \pi/3$ rad; (d) $\phi = \pi/2$ rad. | 46 |
| Figura 4.10 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = 0$ rad. | 47 |
| Figura 4.11 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = \pi/6$ rad. | 47 |
| Figura 4.12 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = \pi/3$ rad. | 48 |
| Figura 4.13 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = \pi/2$ rad. | 48 |
| Figura 4.14 – Campo Elétrico Próximo normalizado (V/m) no plano $x = 30$ nm para a $F = 190$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3 (d) Polarização 4. | 49 |
| Figura 4.15 – Campo elétrico próximo normalizado, no plano $x = 30$ nm para a frequência para a $F = 190$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3; (d) Polarização 4. | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.16–Campo elétrico próximo normalizado, no plano $x = 30$ nm para a frequência para a $F = 130$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3; (d) Polarização 4. | 50 |
| Figura 4.17–Campo elétrico próximo normalizado, no plano $x = 30$ nm para a frequência para a $F = 120$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3; (d) Polarização 4. | 51 |
| Figura 5.1 – Geometria do Nanocircuito nanocircuito composto por duas OTL, conectadas a uma espira no centro do plano yz , com um dipolo no terminal da linha. | 52 |
| Figura 5.2 – Malha do Nanocircuito: (a) Mostra à visão da malha completa e seu entorno. (b) Mostra à vista de forma expandida a nanoantena. | 53 |
| Figura 5.3 – Distribuição do campo elétrico normalizado próximo, no plano $x = 30$ nm: (a) 100 THz; (b) 150THz; (c) 200 THz. | 54 |
| Figura 5.4 – Geometria dos nanocircuitos com OTL conectadas à uma carga $Z_C = 50\Omega$: (a) Nanocircuito dipolo. (b) Nanocircuito espira. | 55 |
| Figura 5.5 – Potência de Recebida em dBm versus frequência para os 2 casos conectados a uma OTL, aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = 0$ rad. Nanocircuito dipolo (linha contínua em azul); Nanocircuito espira (linha pontilhada em vermelho) | 55 |
| Figura 5.6 – Potência de Recebida em dBm versus frequência para os 2 casos conectados a uma OTL, aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção de $\phi = \pi/6$ rad. Nanocircuito dipolo (linha contínua em azul); Nanocircuito espira (linha pontilhada em vermelho) | 56 |
| Figura 5.7 – Potência de Recebida em dBm versus frequência para os 2 casos conectados a uma OTL, aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção de $\phi = \pi/3$ rad. Nanocircuito dipolo (linha contínua em azul); Nanocircuito espira (linha pontilhada em vermelho) | 56 |
| Figura 5.8 – Potência de Recebida em dBm versus frequência para os 2 casos conectados a uma OTL, aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção de $\phi = \pi/2$ rad. Nanocircuito dipolo (linha contínua em azul); Nanocircuito espira (linha pontilhada em vermelho) | 57 |
| Figura 5.9 – Esquematização do sensor de abertura acoplado eletromagneticamente a um nanocircuito óptico. | 58 |
| Figura 5.10–Distribuição do campo elétrico normalizado próximo, no plano $x = 30$ nm: (a) 100 THz; (b) 150 THz; (c) 200 THz. | 59 |
| Figura 5.11–Potência de Recebida em dBm versus frequência, para o caso da espira, conectados a uma OTL, aplicada à carga: $Z_C = 50\Omega$ (linha contínua em azul), $Z_C = 550\Omega$ (linha contínua em vermelho) e $Z_C = 1050\Omega$ (linha contínua em verde). | 60 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Parâmetros Geométricos das Nanoantenas | 40 |
| Tabela 2 – Configuração da malha gerada com características da simulação. | 40 |
| Tabela 3 – Frequências de ressonância das antenas plasmônicas simuladas no Comsol. | 42 |
| Tabela 4 – Valores da impedância de linha e largura de banda percentual. | 45 |
| Tabela 5 – Parâmetros Geométricos do Nanocircuito Óptico. | 52 |
| Tabela 6 – Configuração da malha gerada com características da simulação. | 53 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|------|--------------------------------------|
| ABC | Absorbing Boundary Condition |
| BEM | Boundary Element Method |
| EBL | Electron-Beam Lithography |
| FDTD | Finite-Difference Time-Domain Method |
| FEM | Finite Element Method |
| FIB | Focused-Ion Beam |
| ITO | Indium-Tin Oxide |
| LSPs | Localized Surface Plasmons |
| MoM | Method of Moments |
| MSM | Metal-semi condutor-metal |
| NIL | Nanoimprinting Lithografy |
| OTL | Optical Transmission Line |
| PEC | Perfect Electric Conductor |
| PMMA | PolyMethyl MethAcrylate |
| SPPs | Surface Plasmon Polaritons |

Lista de Símbolos

| | |
|-------------|---|
| a_d | Raio dipolo |
| a_e | Raio do condutor da espira |
| a_B | Raio do bastão |
| a_L | Raio da Linha de Transmissão |
| \hat{a}_y | Versor y |
| \hat{a}_z | Versor z |
| B | Comprimento do bastão |
| $B(\%)$ | Largura de banda percentual |
| c | Velocidade da luz no vácuo |
| d | Comprimento do gap |
| d_y | Distância do dipolo/bastão da espira em relação ao eixo y |
| d_z | Distância do dipolo/bastão da espira em relação ao eixo z |
| d_L | Distância entre os eixos da linha de transmissão |
| D | Distância entre as superfícies das linhas de transmissão |
| e_r | Eficiência de radiação |
| \vec{E} | Campo elétrico |
| E_{0y} | Campo elétrico na componente y |
| E_{0z} | Campo elétrico na componente z |
| F_s | Frequência superior |
| F_i | Frequência inferior |
| h | Comprimento braço do dipolo |
| I_C | Corrente na carga |
| L | Comprimento da Linha de Transmissão Óptica |

| | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| k | Constante de Propagação |
| k_x | Direção de propagação em x |
| P_{in} | Potência de entrada |
| P_{rad} | Potência radiada |
| P_{dis} | Potência dissipada |
| P_{Z_C} | Potência na carga |
| P_f | Potência do feixe gaussiano |
| R_e | Raio da espira |
| R_{in} | Resistência de entrada |
| $R(x)$ | Raio de curvatura de frente de onda |
| s | Parâmetro confocal |
| t | Tempo |
| u | Função de variação lenta |
| V_0 | Fonte de tensão |
| w | Raio do feixe |
| w_0 | Cintura do feixe |
| x, y e z | Coordenadas do sistema cartesiano |
| X_{in} | Reatância de entrada |
| Z_C | Impedância da carga |
| Z_{in} | Impedância de entrada antena |
| Z_0 | Impedância linha de transmissão |
| ϵ | Permissividade elétrica |
| ϵ_0 | Permissividade elétrica do ar |
| ϵ_{inf} | Off-set de permissividade |
| Γ | Coefficiente de reflexão |
| Γ_D e γ_L | Frequências de amortecimento |

| | |
|-------------------------------|---|
| ω | Frequência angular |
| ω_0 | Frequência angular fundamental de operação |
| ω_{p1} e ω_{p2} | Frequência de plasma |
| λ_0 | Comprimento de onda fundamental de operação |
| ϕ | Ângulo de polarização da direção da onda plana. |
| ψ | Fase de Gouy |

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 | Justificativa | 20 |
| 1.2 | Objetivos | 21 |
| 1.2.1 | Objetivos Específicos | 21 |
| 1.3 | Contribuição do Trabalho | 21 |
| 1.4 | Estrutura do Trabalho | 22 |
| 2 | BASES TEÓRICAS E APLICAÇÕES DE NANOANTENAS ÓPTICAS | 23 |
| 2.1 | Nanofotônica | 23 |
| 2.2 | Nanoantenas Ópticas | 24 |
| 2.3 | Aplicações Promissoras | 25 |
| 2.3.1 | Nanomáquinas | 25 |
| 2.3.2 | Células fotovoltaicas | 26 |
| 2.3.3 | Fotodetectores | 27 |
| 2.4 | Métodos de Fabricação das Nanoestruturas | 28 |
| 2.5 | Métodos Numéricos | 29 |
| 3 | MODELAGEM DE NANOANTENAS PLASMÔNICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 31 |
| 3.1 | Modelo de Lorentz-Drude | 31 |
| 3.2 | Método dos Elementos Finitos | 32 |
| 3.3 | Software Comsol Multiphysics | 34 |
| 3.3.1 | Definições Globais | 34 |
| 3.3.2 | Componente | 35 |
| 3.3.3 | Geometria | 35 |
| 3.3.4 | Materiais | 35 |
| 3.3.5 | Física do Problema | 36 |
| 3.3.6 | Malha | 36 |
| 3.3.7 | Estudo | 37 |
| 3.3.8 | Lumped de Port | 37 |
| 3.3.9 | Condutor eletricamente perfeito (PEC) | 37 |
| 3.3.10 | Camada Perfeitamente Casada (PML) | 38 |
| 3.3.11 | Resultados | 38 |
| 4 | NANOANTENAS ISOLADAS | 39 |
| 4.1 | Análise das Nanoantenas Isoladas: Modo de Transmissão | 41 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.2 | Análise das Nanoantenas Isoladas: Modo de Recepção | 45 |
| 5 | NANOCIRCUITO ÓPTICO | 52 |
| 5.1 | Análise do Nanocircuito Óptico: Excitado por uma Onda Plana . . . | 53 |
| 5.2 | Análise do Nanocircuito Óptico: Excitado por um Feixe Gaussiano . | 57 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 61 |
| 6.1 | Trabalhos Futuros | 62 |
| 6.2 | Trabalhos Publicados | 62 |
| | Referências | 63 |

1 Introdução

1.1 Justificativa

Uma antena é definida como elemento pertencente a sistema de transmissão ou recepção de sinais que tem como função radiar e/ou captar ondas eletromagnéticas adaptando a energia a um meio confinado (linha de transmissão) e um meio não confinado (espaço livre ou dielétrico), ou melhor é um transdutor de ondas eletromagnéticas entre meios com propriedades distintas de propagação de energia [1]. O conceito de antena tem sido historicamente empregado em diversas aplicações envolvendo, por exemplo, comunicação, identificação de objetos e etc. Em geral, operando em rádio frequência ou micro-ondas [2]. A partir do advento da nanotecnologia juntamente com o desenvolvimento da plasmônica, surge o conceito de nanoantenas, que são estruturas metálicas extremamente pequenas, na ordem de nanômetros, que podem transmitir, receber, confinar e amplificar a luz [3].

As nanoantenas ópticas vêm ganhando cada vez mais destaque devido à sua capacidade de melhorar e confinar os campos ópticos além do limite de difração. Uma variedade de antenas têm sido investigados como dispersores para redirecionar a luz incidente [4] [5], ou como em dispositivos para controlar emissão de fontes pontuais como quantum dots [6] e emissores biológicos [7]. Além disso, as nanoantenas ópticas tem proposta de aumentar a eficiência da fotodecação [8], utilizada como demultiplexador de polarização [9], nanoacoplador [10], transferência de calor [11], nanosondas utilizadas para o desenvolvimento espectroscopia magnética [12] e espectroscopia não linear.

Em vista disso, para estas e outras aplicações podem ser utilizados diversos modelos de antenas ópticas como em [13] onde é proposta uma nanoantena monopolo de banda larga, para a qual o aumento da largura de banda é obtido através da variação das dimensões da antena. Para a [14] o nanocircuito é alimentado por uma sonda de abertura, sendo que o acoplamento entre a sonda de abertura e a antena de recepção é modelado como uma fonte de tensão equivalente, o casamento de impedância pode ser feito fazendo o carregamento, como em [15] onde o carregamento e a combinação adequadamente pares de nanoantenas com circuitos ópticos, é possível resultados bastantes efetivos e uma diminuição expressivas nas perdas. Em [16] é apresentado um nanocircuito plasmônico integrado, com quatro tipos de nanoantenas eficientes, com capacidade de manipular, dividir e direcionar sinais ópticos. Já em [17] para reduzir as perda por reflexão, é desenvolvido um modelo de linha de transmissão para projetar uma seção de correspondência de impedância que leva a 99,75% de transmissão de energia para a nanoantena. Pesquisas recentes com nanoantenas vêm mostrando grandes descobertas, e a possibilidade de criação e implementação. Tais

estudos envolvem a análise do comportamento das antenas ópticas, de modo que facilite a realização de projetos e construção de estruturas específicas, sendo necessárias técnicas modernas de fabricação. Além disso, vários desafios são encontrados no desenvolvimento de nanoantenas como sua modelagem matemática e suas técnicas de projeto.

Pelo exposto justifica-se, a importância de analisar nanoantenas plasmônicas para o modo de recepção, e o estudo de nanocircuito ópticos e sua viabilidade para a implementação de nanoantenas plasmônicas na prática.

1.2 Objetivos

Analisar numericamente diferentes casos de nanoantenas plasmônicas para aplicação em nanocircuito óptico no modo de recepção.

1.2.1 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar os conceitos de nanofotônica aplicadas a nanoantenas ópticas, além de pesquisas em diversas biografias de antenas
- Fazer um estudo do método dos elementos finitos utilizando o *software* Comsol e do modelo de Lorentz – Drude especificamente para o ouro, para realizar a modelagem matemática da geometria e seus efeitos dispersivos.
- Fazer a análise das nanoantenas plasmônicas para o modo de transmissão, afim de aferir alguns parâmetros importantes como: impedância de entrada, coeficiente de reflexão, eficiência de radiação e diagrama de ganho.

1.3 Contribuição do Trabalho

Esta dissertação é uma contribuição na literatura de um estudo de nanoantenas ópticas plasmônica no modo de recepção para aplicação em nanocircuito óptico. Esta contribuição foi realizada com a publicação de dois trabalhos científicos, um em uma conferência nacional e o outro em uma conferência internacional. Os artigos, são listados a seguir:

1. P. C. Lopes and K. Q. Costa, "Análise Comparativa de Diferentes Casos de Nanoantenas Plasmônicas no Modo de Recepção", IX Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação – ENCOM 2019, Petrolina-PE, Brasil, 2019.

2. P. C. Lopes, P. R. Amaral and K. Q. Costa, "Numerical Analysis of Different Nanoantennas in Reception Mode for Application in Optical Nanocircuits", Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2019 SBMO/IEEE MTT-S International, Aveiro, Portugal, 2019.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido da seguinte forma. O capítulo 1, apresenta a justificativa e os objetivos do trabalho. O capítulo 2 mostra os conceitos importantes de fotônica, nanoantenas ópticas, aplicações, técnicas de construção e numéricas que envolvem problemas de eletromagnetismo. O capítulo 3 apresenta a modelagem matemática para as nanoantenas plasmônicas e o *software* que será utilizado no trabalho. O capítulo 4 apresenta os resultados das nanoantenas isoladas. Já o capítulo 5 analisa a aplicação das nanoantenas em um nanocircuito óptico. E por fim, o capítulo 6, com as considerações finais e trabalhos futuros.

2 Bases Teóricas e aplicações de Nanoantenas Ópticas

2.1 Nanofotônica

A Nanofotônica é uma das fronteiras da nanociência e da nanotecnologia (*N&N*), que lida com a interação da luz com a matéria em escala nanométrica, chegando a dimensões inferiores ao comprimento de onda da luz [18]. Além disso, essa interação é determinada pela natureza física, química e estrutural da matéria, sendo natural ou artificial [19]. Pode-se definir nanofotônica como a ciência e a tecnologia de ondas de luz e elétrons confinados, uma vez que o confinamento espacial de ondas de luz em meios complexos e ondas de elétrons em diversos sólidos nanoestruturados determinam vários fenômenos físicos na nanofotônica [20]. A pesquisa em nanofotônica explora confinamento da luz em pequenas escalas, e os efeitos que decorrem desse confinamento, para viabilizar dispositivos revolucionários com a função de emitir, detectar e controlar a propagação de luz [21].

A Plasmônica constitui uma parte significativa do campo da nanofotônica, que explora como o campo eletromagnético pode ser confinado através de dimensões acima ou abaixo do comprimento de onda operante, basicamente a nanoplasmônica é uma aplicação tecnológica dos fenômenos de interação entre campos eletromagnéticos e um material em escala nanométrica [21]. Observa-se na literatura que em frequências ópticas a interação dos metais com a radiação eletromagnética é largamente ditada pelos elétrons livres de condução do metal, esses elétrons livres oscilam fora de fase em relação ao campo elétrico de condução [22]. Como consequência disso a maioria dos metais têm reflexividade elevada por possuírem constante dielétrica negativa em frequências ópticas, além disso, nessas frequências, os elétrons livre no metal podem manter oscilações longitudinais coletivas na interface do metal e o dielétrico, o que caracteriza os chamados plásmons polaritons ou plásmons polaritons de superfície [23]. A existência de plásmons é característica da interação de nanoestruturas de metal com a luz.

Os Plásmons polaritons de superfície (SPPs – *Surface Plasmon Polaritons*) são ondas eletromagnéticas acopladas as excitações coletivas de carga dos elétrons de condução, propagando ao longo da interface entre um dielétrico e um condutor. Quando estas excitações acopladas ocorrem em nanoestruturas metálicas, como nanopartículas (NPs) os correspondentes não propagantes de plásmons polaritons, são geralmente conhecidos como plasmon de superfície localizada (LSPs – *Localized Surface Plasmons*) [24], conhecido também de ressonância da forma eletromagnética de superfície, plasmon de gap e etc. Estão confinados em objetos metálicos curvos, caracterizados por frequências complexas e

discretas que dependem do tamanho e forma do objeto ao qual o plasmon de superfície é confinado e de sua constante dielétrica.

2.2 Nanoantenas Ópticas

As Nanoantenas Ópticas mostraram variadas aplicações em inúmeros campos na última década, despertando grande interesse da comunidade científica, devido suas possibilidades de aplicações bastante promissoras. Além das inovações de projetos, controle de direcionalidade e estruturas para multifrequência como em [25][26][27]. As antenas ópticas assim como as antenas de Rádio Frequência (RF) e micro-ondas possuem diversas geometrias para diferentes aplicações. Recentemente têm sido trabalhadas diversas geometrias como [28] onde elas são dipolos dobrados sendo analisado o comportamento da impedância. Em [29] é apresentado nanoantenas na forma de T, onde demonstra a flexibilidade do casamento da impedância pela variação dos parâmetros geométricos da nanoestrutura. Já em [30][31] temos as nanoantenas em formato de loop, em [32] formato espiral, e metacoaxial [33], já na [34] temos leaky-wave slot, e [35] híbrida, temos também em [36] onde as nanoestruturas formam um arranjo de nanoantena, e por último com um formato cilíndrico reto [37] com um sistema de linha de transmissão óptica (OLT) e a radiação em escalas nanométricas que podem ser considerados um problema de casamento de linhas de transmissão. Na Figura 2.1 são mostrados exemplos de nanoantenas ópticas construídas com diversos tipos geometrias.

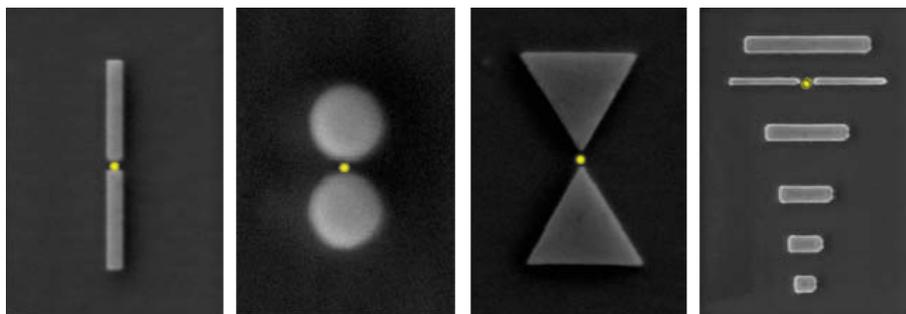


Figura 2.1 – Diferentes tipos de geometrias de nanoantenas construídas [38].

O princípio de operação de nanoantena ópticas pode ser mostrada na Figura 2.2 levando em consideração o conceito de teoria de antenas, a reciprocidade, uma antena pode funcionar tanto como transmissor quanto receptor [39]. Na Figura 2.2a nanoantena opera como transmissor, já na Figura 2.2c ela opera como receptor, para as Figura 2.2b e Figura 2.2d a antena é conectada em guia de onda plasmônico. Neste tipo de configuração, o modo de energia está concentrado na região em uma pequena parte seção transversal. Onde na Figura 2.2b temos energia sendo entregue a nanoantena e propagada no espaço livre. Na Figura 2.2d a nanoantena converte a radiação incidente para modo de guias de ondas plasmônicos.

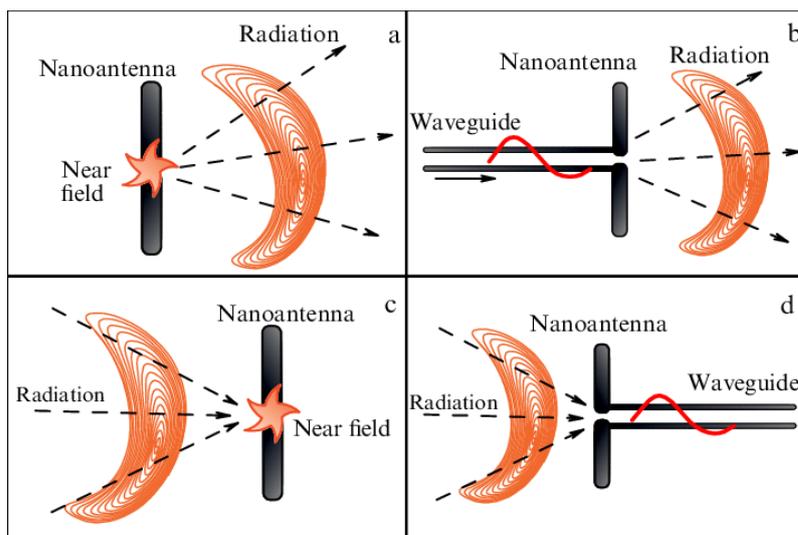


Figura 2.2 – Princípio de operação de nanoantenas [39].

2.3 Aplicações Promissoras

As nanoantenas ópticas fornecem um excelente controle sobre a luz em escalas nanométricas para fornecer um alto aprimoramento e localização de campo com seções transversais de absorção. Considerando a necessidade dessas virtudes em uma ampla gama de campos de diversas áreas, nesta secção destacamos as possíveis aplicações.

2.3.1 Nanomáquinas

Com o desenvolvimento das nanoantenas cúbicas o potencial de aplicação ficou muito mais amplo, elas são capazes de gerar feixes de luz muito estreito perfeitamente direcionados [40]. As nanopartículas cúbicas são candidatos promissores para aplicações nanofotônicas de baixa perda e ultracompactas, devido aos seus maiores coeficientes ópticos, maior densidade de empacotamento e relativa facilidade de fabricação em comparação com nanopartículas esféricas [40]. Tanto a direcionalidade como a magnitude destes padrões de dispersão unidireccional aumentam quando as respostas quadripolares elétricas e magnéticas correspondentes se sobrepõem espectralmente [40]. Na Figura 2.3 podemos observar como os nanocubos estão dispostos em uma espécie de arranjo de antenas, onde o espaçamento entre as nanoantenas pode ser ajustado para tornar o feixe de luz mais fino, conforme a separação entre os nanocubos aumenta, a largura angular do feixe se estreita e a direcionalidade melhoram [40]. Estas propriedades ópticas únicas de nanocubos dielétricos podem assim revolucionar suas aplicações em regiões visíveis e infravermelho próximo nos campos de nanoantenas, nanolasers, fotovoltaicos, e mesmo em biomedicina.

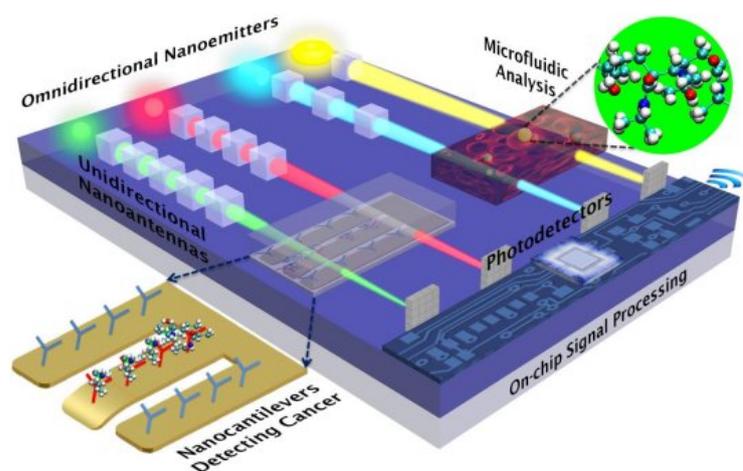


Figura 2.3 – Esquémática dos feixes ópticos gerados pelas nanoantenas cúbica [40].

2.3.2 Células fotovoltaicas

Recentemente estudos sobre a influência de antenas ópticas no processo de absorção de luz em células fotovoltaicas, resultaram no aumento da eficiência de absorção da luz. A abordagem tradicional da energia fotovoltaica é usar a luz para gerar portadores de carga em um material semiconductor. A separação espacial dos portadores de carga define uma corrente em um circuito [41]. Para máxima eficiência, é importante absorver a maior parte da radiação recebida, necessitando de uma espessura mínima do material, que é o principal determinante do custo. O aprimoramento do campo local devido à antena óptica pode focalizar a luz incidente em materiais de absorção fraca, como a energia fotovoltaica de filme fino [41].

Um exemplo de aplicação para células fotovoltaicas é mostrada na Figura 2.4. Onde as nanopartículas metálicas contidas na célula solar, tem o objetivo de prender a luz no semiconductor, ocasionando o aumento no percurso óptico efetivo na célula [42]. A Figura 2.4a mostra o aprisionamento da luz na superfície da celular fotovoltaica, onde as nanoantenas são usadas para converter luz incidente em modos de plásmons localizados, que causam o aprisionamento da luz a partir das nanoantenas de metais na superfície da célula fotovoltaica, onde as partículas espalham a luz dentro do dielétrico, aumentando o caminho de propagação da onda em um ângulo diferente da luz incidente, absorvendo uma maior intensidade de luz [42]. A Figura 2.4b apresenta as nanopartículas metálicas embutidas no semiconductor, onde o aprisionamento se dá pela interceptação da luz incidente através da excitação de plásmons de superfície localizados, aumentando a intensidade de campo próximo da partícula. Já a Figura 2.4c o aprisionamento de luz ocorre pela excitação de plásmons polártons de superfície (SPPs) na interface metal/semiconductor, havendo propagação na camada mais interna do metal, transformando a onda incidente normal em ondas guiadas, as quais são mais confinadas no guia formada pela estrutura, por consequência aumenta a absorção de energia [42].

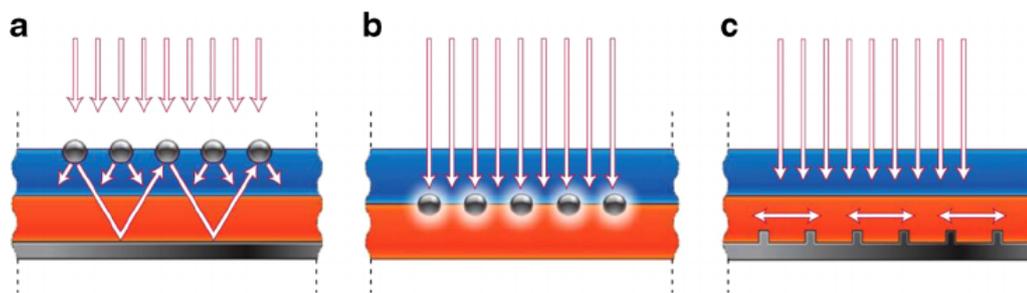


Figura 2.4 – Aplicação de célula fotovoltaica de filme fino utilizando nanopartículas metálicas [42].

2.3.3 Fotodetectores

Na conversão de fótons para elétrons por fotodetectores, o tamanho incompatível, na convergência da escala em micrômetros para a nanométrica em dispositivos ópticos modernos, é um dos maiores desafios, leva muitas vezes a perdas na potência dissipada, latência e aumento de ruído. Um fotodetector pode ser diminuído usando a região ativa de comprimento de onda menor, contudo, isso pode resultar em uma resposta muito baixa devido à difração limite da luz.

Usando o princípio de autoaprimoramento de campo por uma antena, utilizando um fotodetector MSM (metal-semiconductor-metal) com subcomprimento de onda, a redução do volume de material ativo permite uma velocidade mais rápida devido às propriedades aprimoradas de coleção de portadoras das antenas ópticas [8]. Esse fotodetector é potencialmente adequado para divisão de comprimento de onda, que pode ser utilizado para aplicações na telecomunicações de multiplexação. A Figura 2.5 mostra a forma esquemática da estrutura do dispositivo utilizado. Composto por um dipolo de ouro orientado ao longo da direção y e eletrodos de duas linhas ao longo da direção x . Onde um nanofio de germânio foi escolhido para ser o material ativo do fotodetector devido à sua alta capacidade de resposta em comprimentos de onda no infravermelho está sob os dois eletrodos de linha na região do espaço entre os dois braços dipolo [8].

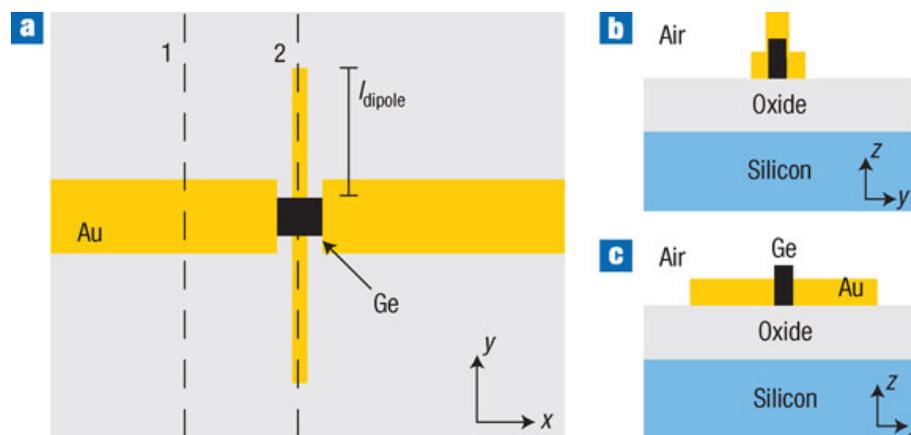


Figura 2.5 – Esquema do dispositivo: (a) Vista superior do dipolo orientado na direção y e duas linhas eletrodos na direção x . (b) seção transversal do germânio nanofio (através da linha 1 no painel da Figura 2.5a.) (c) Seção transversal (correspondente à linha 2 no painel da Figura 2.5a) [8].

2.4 Métodos de Fabricação das Nanoestruturas

Para a fabricação de nanoestruturas, diversas técnicas e métodos podem ser utilizadas. Uma das dessas técnicas empregadas na implementação de nanoestruturas é a técnica litográfica denominada de EBL (Electron-Beam Lithography) litografia por feixe de elétrons, é uma técnica que permite a transferência de um padrão aleatório sobre um filme de resiste, que cobre um substrato [43][44]. O limite da resolução da técnica ELB e a qualidade do padrão fabricado dependem de diversos fatores, como a qualidade com que se é empregada a óptica que se controla o feixe de elétrons, tipos de resiste, substrato, revelador, dose e energia do feixe e etc. [45]. Além disso, o elevado custo da técnica representa um obstáculo para produzir em grande escala, restringindo sua visibilidade na construção de nanoestruturas [46]. A implementação do processo da técnica EBL pode ser vista na Figura 2.6 onde é colocada primeiramente um filme de resiste fino por exemplo, (PMMA – *PolyMethyl MethAcrylate*) filme polimérico de polimetil-metacrilato depositada em cima do substrato, e entre eles é inserido uma fina camada de metal (ITO – *Indium-Tin Oxide*) geralmente essa camada é dióxido de índio ou estanho). Em seguida o PMMA é modelado por meio de um feixe de elétrons focado que seletivamente desenvolve o padrão desejado. Depois disso, é realizada a deposição de uma camada fina de metal (por exemplo, ouro (Au) ou prata (Ag)) com a espessura e dimensões desejada. Por fim o metal fora do do vazio é evaporado, o restante do PMMA é removido via banho de solvente com ultra-som deixando o metal que estava no vazio intacto. Esta última etapa é denominada de *lift off* [43].

Outra técnica de fabricação eficiente para a fabricação de nanoantenas ópticas é a FIB (Focused Ion-Beam) litografia por feixe de íons focalizados. Ela é uma tecnologia que oferece alta resolução de imagem e micro usinagem flexível em uma única plataforma. Esta técnica, diferentemente da litografia por feixe de elétrons, pode ser gravada diretamente sobre o substrato, ou seja, não é necessário o uso do resiste. A técnica é baseada na pulverização catódica focalizada no material utilizando geralmente íons de Gálio (Ga) [43][44]. Onde os íons são focalizados na camada do metal que está sobre um substrato condutor que produz o padrão desejado. Como pode ser observado na Figura 2.6.

Além das citadas acima as técnicas de impressão por microcontato (soft lithography) [47] e a técnica de litografia por nanoimpressão (NIL – Nanoimprint lithography) [48] são técnicas que permitem superar o elevado custo da produção da ELB. Pois, aliam a elevada precisão com as características exigidas no processo de manufatura além de serem técnicas bastante simples, onde sua resolução não é limitada pelo comprimento de onda da fonte da luz, visto que que trabalha com transferência de padrões por deformações mecânicas do resiste em vez de aplicar eletro-indução, como geralmente ocorre nos métodos litográficos [48]. Comparadas com outras técnicas o NIL possui vantagens significativas, como fácil execução, alta velocidade na transferência e baixo custo na produção de

estruturas nanométricas.

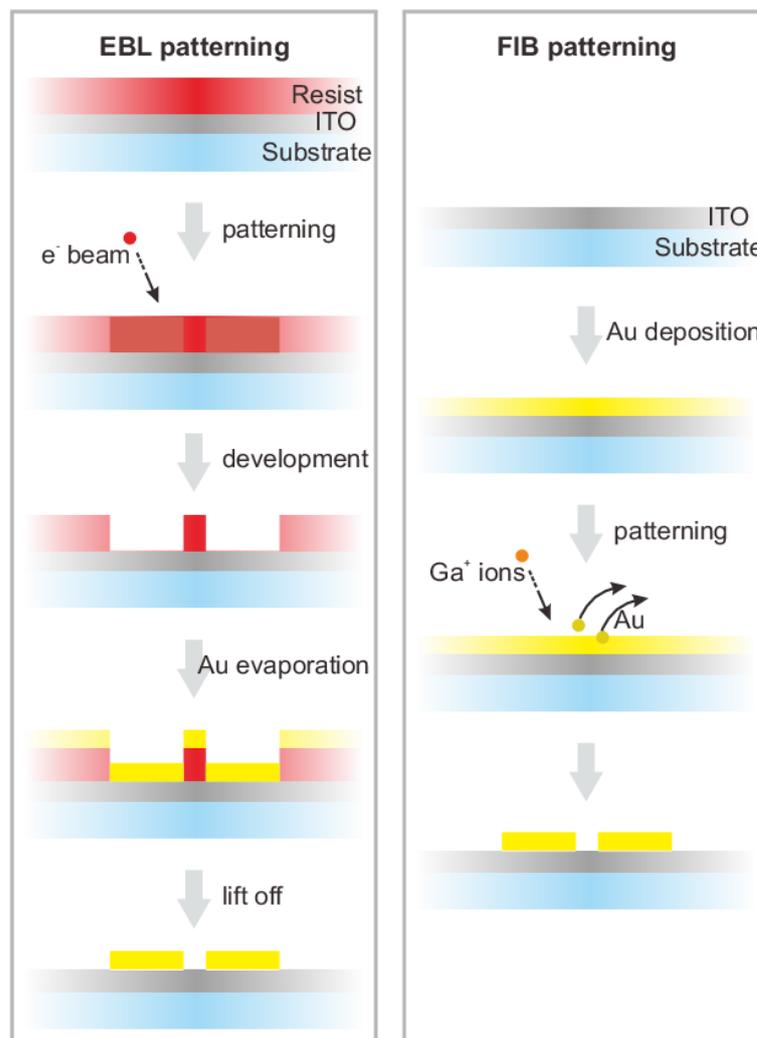


Figura 2.6 – Imagem ilustrativa das principais etapas do EBL e FIB padrão da fabricação das nanoestruturas de nanoantenas [43].

2.5 Métodos Numéricos

São várias as possibilidades usando métodos numéricos para solucionar um mesmo problema específico, para o caso de problemas que envolvam as nanoestruturas, onde métodos assintóticos não podem ser aplicados e soluções minuciosas das equações de Maxwell são necessárias. Podem ser utilizados por exemplo os métodos diferenciais, como por exemplo o método das Diferenças Finitas no domínio do Tempo (FDTD – *Finite-Difference Time-Domain*) [49][50] que resolve às equações de Maxwell no domínio do tempo de forma dinâmica e simplificada, obtendo soluções em uma ampla faixa de frequência, além de o método ser iterativo, evitando a solução de sistemas lineares e consequentemente à inversão de matrizes de alta ordem. A solução de problemas por este método consiste em discretizar as estruturas em pequenos elementos retangulares ou curvilíneos [49]. Além de ser excelente em análise de meios não homogêneos e não-lineares, embora as suas

exigências de memória do sistema sejam em níveis altos, devido à discretização fina para solução em toda estrutura e domínio [49]. No entanto, sofre de problemas de dispersão numérica, bem como a necessidade de truncar artificialmente o limite da solução. Já o Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*) [51][52]. Assim como no (FDTD) o domínio da solução deve ser truncado artificialmente, pois ambos os métodos necessitam da utilização de condições de contorno absorvente (ABC – *Absorbing Boundary Condition*) [53]. Estas paredes absorventes simulam artificialmente a propagação das ondas ao infinito. O principal objetivo é o de obter o mínimo de interferência possível nos resultados específicos na região de análise [53]. Um exemplo desse tipo especial de (ABC) é utilizado no *software* Comsol multiphysics, conhecida como PML (*Perfectly Matched Layer*).

Temos também outros métodos bastantes difundidos na análise eletromagnética que envolvam integrais. No entanto, por causa de sua complexidade de manipulação dessas equações, elas não são indicadas para solucionar problemas cujo o domínio seja composto por material linear, homogêneo e isotrópico. Os métodos mais conhecidos de solução de equações integrais são o Método dos Elementos de Contorno (BEM – *Boundary Element Method*) [54][55] e o Método dos momentos (MoM – *Method of Moments*) [56][57]. O BEM usa formulação integral das Equações de Maxwell, que permite cálculos de campo muito precisos, e é um método utilizado para aplicações que requerem a análise de espaço ao redor de um dispositivo com a modelagem exata dos limites. Já o MoM tem demonstrado ser bastante consistente para análise de nanoestruturas principalmente em frequências ópticas. Esse método não necessita de paredes absorventes para análise de campo próximo e distante [56]. O MoM é muito útil para a resolução de problemas de radiação, antenas e espalhamento em frequências ópticas por ter a capacidade de tratar tal problema com robustez e com possibilidade de baixo custo computacional, além de seus resultados serem bastante precisos [58][59][60]. De modo geral o método consiste na divisão de um objeto em partes volumétricas iguais que são excitadas pelo campo elétrico incidente e que, através da interação entre todas as partes, usando é claro da formulação numérica da equação integral de campo elétrico em cada parte, resultando na resposta completa do sistema [53].

No próximo capítulo será apresentado o modelo de Lorentz–Dude, a aplicação do método dos elementos finitos e o *software* Comsol para análise em meios eletromagnéticos.

3 Modelagem de Nanoantenas Plasmônicas pelo Método dos Elementos Finitos

Neste capítulo é apresentado o modelo de Lorentz-Drude utilizado para representar a permissividade complexa do metal. O método dos elementos finitos que será usado como ferramenta numérica para análise das nanoantenas plasmônicas. Além da apresentação do *software* Comsol, que utiliza o método dos elementos finitos para solução das equações diferenciais parciais.

3.1 Modelo de Lorentz-Drude

Nesta seção será discutido o material utilizado na modelagem das nanoestruturas, o ouro, devido suas características específicas, como de baixa perda de propagação e por apresentar a ressonância na região visível do espectro magnético dentre outras, propriedades primordiais para avanço do processo. O modelo adotado para este trabalho é o modelo de Lorentz-Drude. Onde o modelo de Drude trata de um gás de elétrons na banda de condução, enquanto que o modelo de Lorentz trata o caso de elétrons harmonicamente ligados aos seus respectivos átomos.

A aproximação de Drude, basicamente é um modelo que descreve a condução metálica em termos de um gás de elétrons livres através de uma rede de íons positivos relativamente fixos. Onde é capaz de descrever muitas propriedades dos metais. Quando submetido a frequências ópticas, os elétrons oscilam fora de fase em relação ao campo elétrico incidente, tornando a constante elétrica desses metais negativa [23]. O modelo de Drude é dado pela Equação 3.1. Sendo ω_{p1} é a frequência de plasma ou a frequência de oscilações coletiva dos elétrons, Γ_D é o termo de amortecimento das oscilações ou frequência de colisão dos elétrons livres (ou perda do material) ω é a frequência angular do campo elétrico aplicado e a parte imaginária de ε_{Drude} está relacionada à dissipação de energia.

$$\varepsilon_{Drude} = 1 - \frac{\omega_{p1}^2}{\omega^2 - j\Gamma_D\omega} \quad (3.1)$$

O modelo de Lorentz, resumidamente baseia-se na aproximação de amortecimento do oscilador harmônico, descrevendo as transições de interbanda dos elétrons. É um modelo semi-quântico, o qual considera os elétrons do material confinados no núcleo atômico iônico, e oscilando em torno dele, onde é utilizado para modelar meios dispersivos com múltiplas frequências de ressonância. Na verdade o modelo de Lorentz nada mais é que uma extensão do modelo de Drude, inserindo um termo de frequência de oscilação natural

dos elétrons ω_0 no modelo de Drude. O termo inserido no modelo de Drude vai representar justamente o processo de transição interbanda, que ocorre na região visível do espectro da luz. O modelo de Lorentz é dado pela Equação 3.2. Onde ω_{p2} é a frequência de plasma, γ_L é a frequência de amortecimento com características de ressonância do termo de interbanda dos elétrons ligados (ou perda do material), ω a frequência angular e ω_0 a frequência angular para um comprimento de onda específico.

$$\varepsilon_{Lorentz} = 1 + \frac{\omega_{p2}^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\gamma_L\omega} \quad (3.2)$$

Os modelos descritos tem contribuição direta para a constante dielétrica do material, uma relativa aos termos de Lorentz que está relacionada com os elétrons internos dos átomos que descrevem as transições de interbanda, que são os orbitais mais internos para a banda de condução. A outra contribuição está relacionada aos elétrons livres da banda de condução [61] aos termos de Drude. A combinação dos dois modelos em uma única equação para a permissividade complexa do material expande a aplicação a uma faixa de frequências ópticas. O modelo de Lorentz – Drude da permissividade complexa pode ser descrito.

$$\varepsilon_{LD} = 1 - \frac{\omega_{P1}^2}{\omega^2 - j\Gamma_D\omega} + 1 + \frac{\omega_{P2}^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\gamma_L\omega} + \varepsilon_\infty \quad (3.3)$$

Onde, o ε_∞ é um termo de *off-set* da permissividade relativa para frequência infinita, que é uma constante introduzida para responder ao efeito integrado de transições de interbanda de alta energia. Para o ouro nas regiões do infravermelho próximo e ópticos, as constantes descritas em Equação 3.3 e retiradas de [23] são: $\varepsilon_\infty = 6$, $\omega_{p1} = 13,8 \cdot 10^{15} s^{-1}$, $\omega_{p2} = 45 \cdot 10^{14} S^{-1}$, $\Gamma_D = 1,075 \cdot 10^{14} S^{-1}$, $\gamma_L = 9 \cdot 10^{14} s^{-1}$, $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, $\lambda_0 = 450$ nm e $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. O modelo de Lorentz – Drude fornece uma função dielétrica que mais se aproxima com as medidas experimentalmente por Johnson & Christy [62].

3.2 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos tem sua origem no campo da análise de estruturas, sendo aplicado no meio eletromagnético em 1968 [63]. Tal método pode ser utilizado em diversos problemas da engenharia. É aplicado na resolução de equações diferenciais parciais formadas pela solução de fenômenos físicos em meios contínuos que possuem estruturas irregulares [64] com determinadas condições de contorno.

O Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*) consiste em dividir o domínio do problema em subdivisões de geometria simples. Logo, podem ser gerados elementos triangulares, retangulares, cúbicos, hexagonais e diversos outros, dependendo

de sua dimensão do qual o problema está sendo analisado (unidimensional, bidimensional ou tridimensional). A Figura 3.1 apresenta diversos tipos de geometrias de elementos.

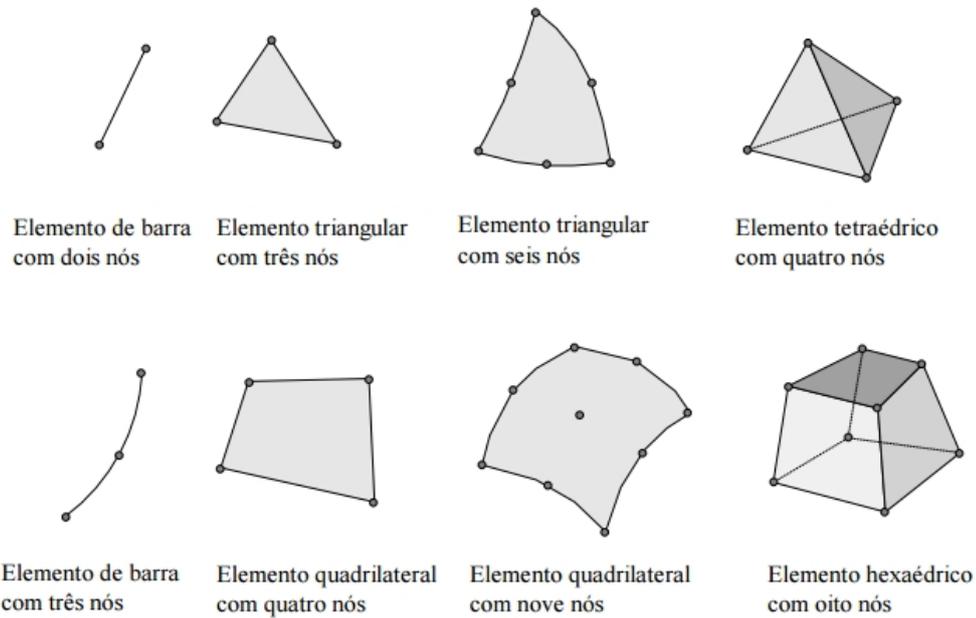


Figura 3.1 – Exemplo de tipos de elementos possíveis dependendo da geometria e do contorno do problema [64]

A forma mais simples de elemento utilizado na prática é o triângulo, ele pode aproximar domínios de formas quaisquer com boa precisão. Em cada elemento são definidos pontos característicos, nos quais a solução será determinada; a escolha das grandezas a determinar também determina parcialmente o tipo de função de aproximação que pode ser utilizado. No caso mais simples de elementos triangulares são escolhidos os três vértices dos mesmo como pontos característicos, os quais são chamados de nós [65]. Na Figura 3.2 é uma estrutura com vários elementos triangulares de tamanhos diferentes, porém nenhum se sobrepõe ao outro. Os pontos comuns entre os triângulos são denominados de nós ou pontos nodais.

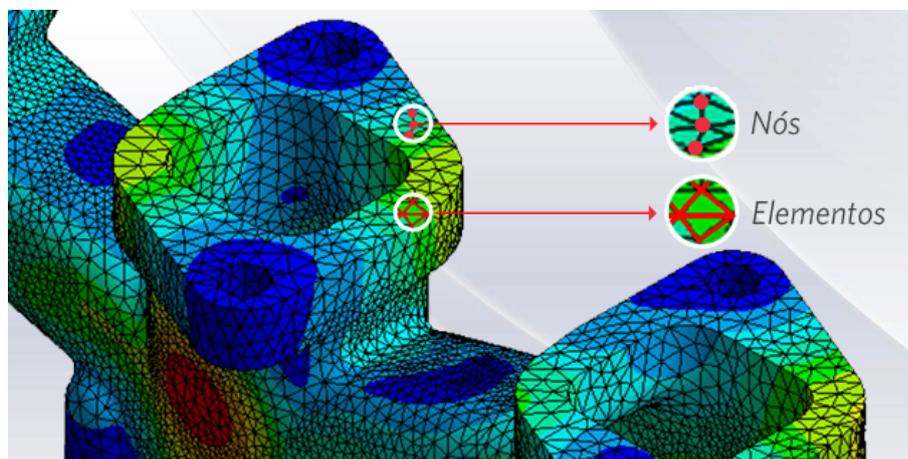


Figura 3.2 – Nós e elementos presentes em uma malha [66]

A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise. Um dos aspectos mais importantes da FEM diz respeito a sua convergência. Embora trata-se de um método aproximado, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema [64]. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise [64].

3.3 Software Comsol Multiphysics

O Comsol multiphysics [67] utiliza o método dos elementos finitos para solução das equações diferenciais parciais dos fenômenos físicos estudados. Possui uma interface intuitiva e fácil de ser utilizada, uma vez que os passos necessários para determinação do problema são seguidos de forma linear, avançando cada vez mais na solução do problema. Ele é uma ótima ferramenta para solução de vários problemas de engenharia, podendo inclusive resolver para mais de um fenômeno físico [65]. Possui uma grande compatibilidade com outros *softwares* de modelagem de estruturas como por exemplo o Matlab e Auto Cad, de modo que objetos complexos podem ser importados para serem simulados [65].

Além disso, o *software* possui diversos módulos físicos que auxiliam no desenvolvimento do problema, podendo solucionar mais de um caso ao mesmo tempo. Também é possível definir a dimensão da simulação (0D, 1D, 1D assimétrico, 2D, 2D assimétrico, 3D, 3D assimétrico) [65]. Figura 3.3 mostra o logotipo do Comsol multiphysics. Nas próximas seções são mostrados alguns pontos importantes do *software*.



Figura 3.3 – Logotipo do *software* Comsol Multiphysics.

3.3.1 Definições Globais

Para realizar uma simulação no Comsol o primeiro passo é a determinação dos parâmetros da estrutura que será analisada. Onde são declaradas todas as constantes

dos parâmetros geométrico como exemplo o raio da esfera ou tamanho de um braço de antena dipolo. É necessário definir as unidades que serão utilizadas nas constantes, pois elas entram na simulação, podendo não convergir a solução se apresentadas de maneira errada. Também é possível definir uma variável em função de outra, além de variáveis pré-definidas do próprio programa. Podemos visualizar na Figura 3.4 a definição dos parâmetros geométricos do caso em estudo.

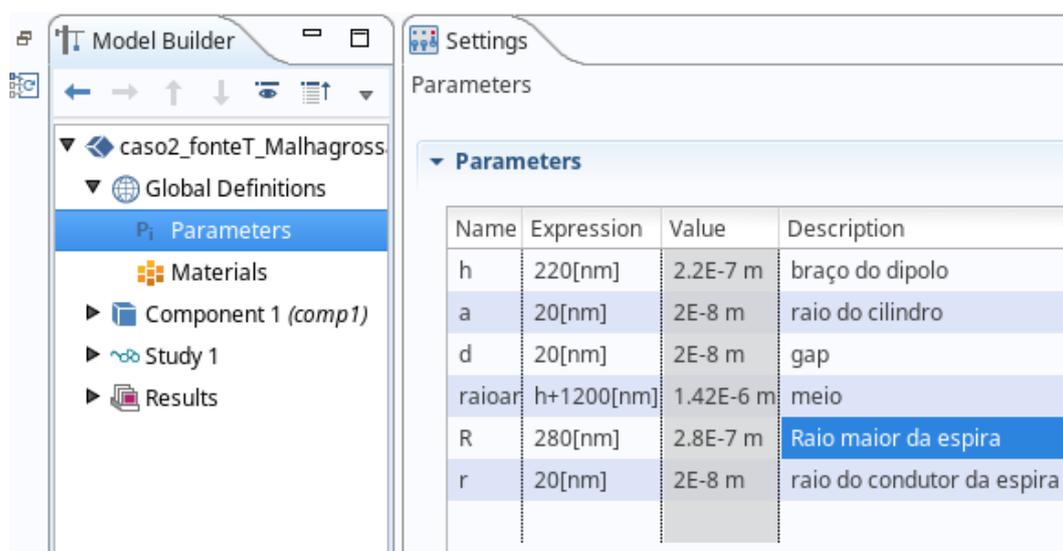


Figura 3.4 – Interface do software Comsol: Definição dos parâmetros.

3.3.2 Componente

É o processo onde é definido as configurações da estrutura que será simulada, nomeada pelo Comsol como “Componente 1”. Possibilita definir as características de simulação como a geometria da estrutura a ser trabalhada, o material que será utilizado, o processo físico de simulação e a construção da malha.

3.3.3 Geometria

É onde são construídas as estruturas que serão estudadas. Podem-se desenhar diversas formas geométricas unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais predefinidas. Pode-se também realizar operações de soma, interseção ou diferença entre geometrias, o que é bastante útil, como foi necessário na construção das nanoantenas analisadas no trabalho.

3.3.4 Materiais

O Comsol possui uma infinidade de materiais predefinidos do próprio programa. Porém, o *software* permite, também, definir um material através de valores, funções e expressões, então materiais como o grafeno e o próprio ouro, que são modelados por

equações dependente da frequência e outros parâmetros, podem ser criados dentro das simulações. Os parâmetros necessários para modelagem de um material são a permissividade relativa, condutividade elétrica e a permeabilidade relativa, como por exemplo o material utilizado nesse trabalho o ouro que é definido pela equação da permissividade complexa de Lorentz – Drude.

3.3.5 Física do Problema

É necessária definir as características físicas do problema. Dependendo do problema em questão, temos a necessidade de definir a natureza e as condições para a propagação das ondas eletromagnéticas. No módulo de Ondas Eletromagnéticas, é encontrado várias características que podem ser adicionadas, como condição de condutor elétrico perfeito ou de condutor magnético perfeito, além de condições de contorno como condição de espalhamento ou de impedância. Além disso, é definido a natureza da onda eletromagnética (onda plana, circular, etc.) e todos seus parâmetros básicos, como direção, polarização e amplitude [65].

3.3.6 Malha

A definição da malha é um importante processo para a precisão do resultado e para a velocidade da simulação (além de ditar se a capacidade computacional será suficiente para realização da simulação), uma vez que o tamanho do elemento e a quantidade são fatores decisivos quando se utiliza o método dos elementos finitos [65]. É possível definir discretizações diferentes para objetos diferentes. Isso é importante quando se quer definir uma malha mais fina para objetos mais relevantes. Temos nove discretizações pré-definidas no Comsol, porém é possível definir sua própria discretização através de cinco parâmetros [65]:

- Tamanho máximo do elemento: Especifica o tamanho máximo alcançado pelos elementos gerados;
- Tamanho mínimo do elemento: Especifica o tamanho mínimo alcançado pelos elementos. É utilizado para prevenir a geração de vários elementos ao redor de regiões da geometria com uma pequena curvatura. Sua variação modifica bastante a quantidade de elementos totais gerados.
- Taxa máxima de crescimento do elemento: Determina a taxa que os elementos podem "crescer" de uma região com elementos pequenos para outra com elementos grandes. O valor deve ser maior ou igual a 1.

- Resolução da curvatura: Esse parâmetro determina o tamanho dos elementos em curvaturas. É definido a partir do raio de curvatura da geometria, onde tal valor é multiplicado por esse parâmetro para definir o tamanho do elemento.
- Resolução de regiões estreitas: Determina a quantidade de camadas em regiões estreitas. Deve ser um escalar não negativo. Caso seja inserido um valor menor que 1, os elementos se tornarão anisotrópicos em regiões estreitas.

3.3.7 Estudo

Nessa sessão é definido o estudo que será realizado do problema a ser verificado. Pode-se escolher entre diversos estudos como em função do tempo, da frequência, auto-valor, auto-vetor, etc. Com o estudo definido, em seguida é configurado as características relevantes referentes ao estudo.

3.3.8 Lumped de Port

A Lumped de Port simula uma fonte de tensão aplicada, por exemplo, na construção de um dipolo elétrico (Figura 3.5). É possível determinar a amplitude e a fase de tensão. Neste trabalho foi utilizado o “workplane” para modelar uma fonte de tensão, para que possa estar entre as duas faces da estrutura metálica é aplicado as condições de um condutor perfeito (PEC).

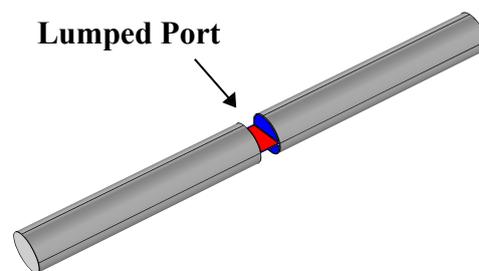


Figura 3.5 – Aplicação de uma lumped port (no centro) no nanodipolo, onde temos em azul a borda da estrutura que foi aplicada a condição de condutor perfeito.

3.3.9 Condutor eletricamente perfeito (PEC)

A condição de condutor eletricamente perfeito, do inglês, Perfectly Electric Conductor (PEC) é um caso especial na condição de contorno de campo elétrico, onde a componente tangencial do campo é levada a zero dessa forma temos um material com condutividade infinita. É usada para modelar uma superfície metálica sem nenhuma perdas, ou seja, metais com uma excelente condutividade elétrica, resultando em uma simulação bem mais rápida.

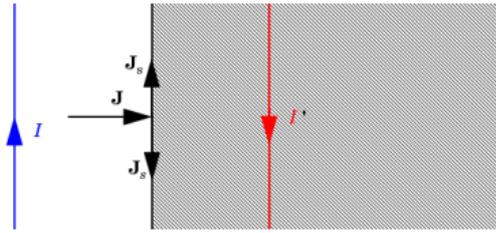


Figura 3.6 – Condição do condutor eletricamente perfeito aplicado na superfície requerida [67].

3.3.10 Camada Perfeitamente Casada (PML)

As simulações no Comsol exigem uma esfera para a determinação do meio em que está inserido. Essa esfera seria uma espécie de parede para as ondas incidentes, causando um erro em seus resultados, devido as condições de espalhamento não levarem em consideração as ondas ortogonais incidentes, onde há uma parcela de ondas oblíquas incidentes. Para evitar tal erro torna-se necessário a utilização de uma camada perfeitamente absorvedora (Figura 3.7), do inglês Perfectly Matched Layer (Camada Perfeitamente Casada). Onde sua função é absorver ondas incidentes sem produzir de maneira alguma uma reflexão, de modo a simular uma fronteira aberta.

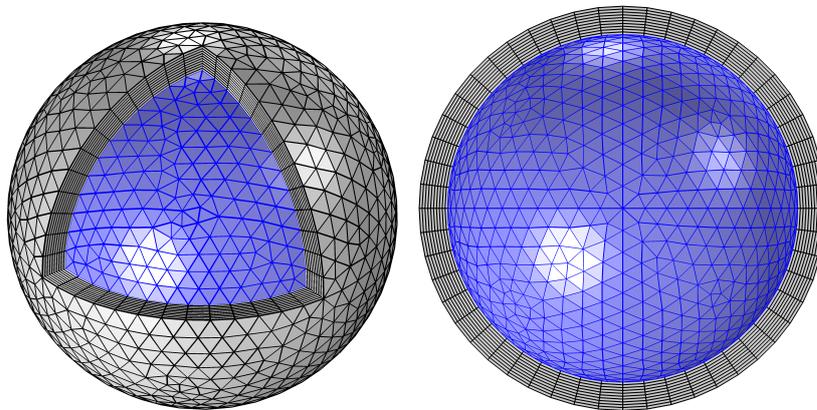


Figura 3.7 – Aplicação de uma Camada Perfeitamente Absorvedora (PML) a uma esfera. É possível observar a presença de diversas "fatias" na camada externa.

3.3.11 Resultados

Com a utilização do Comsol é possível extrair diversos fatores da simulação realizada, como análise de campo próximo e distante, o ganho da antena, impedância de entrada, diagrama de radiação, densidade de corrente e vários outros.

No próximo capítulo são mostradas as análises das nanoantenas isoladas para os 4 casos, no modo de transmissão e recepção simulados no *software* Comsol.

4 Nanoantenas Isoladas

Primeiramente a análise é feita para os 4 casos propostos de nanoantenas plasmônicas usadas para o modo de transmissão afim de investigar alguns resultados importantes como: impedância de entrada, coeficiente de reflexão, eficiência de radiação e diagrama de ganho. Para a análise que será feita a seguir para o modo de recepção, excitadas por uma onda plana, inicialmente polarizada em z , propagando na direção $+x$. As estruturas estão situadas no espaço livre, e são compostas por: Caso 1 dipolo isolado; Caso 2 combinação dipolo-espira; o Caso 3 a espira isolada; Caso 4 a combinação nanobastão-espira, com as espiras em formato circular. As análises eletromagnéticas serão feitas através do Métodos dos Elementos Finitos, utilizando o *software* Comsol. As simulações são realizadas na faixa de 100-400THz.

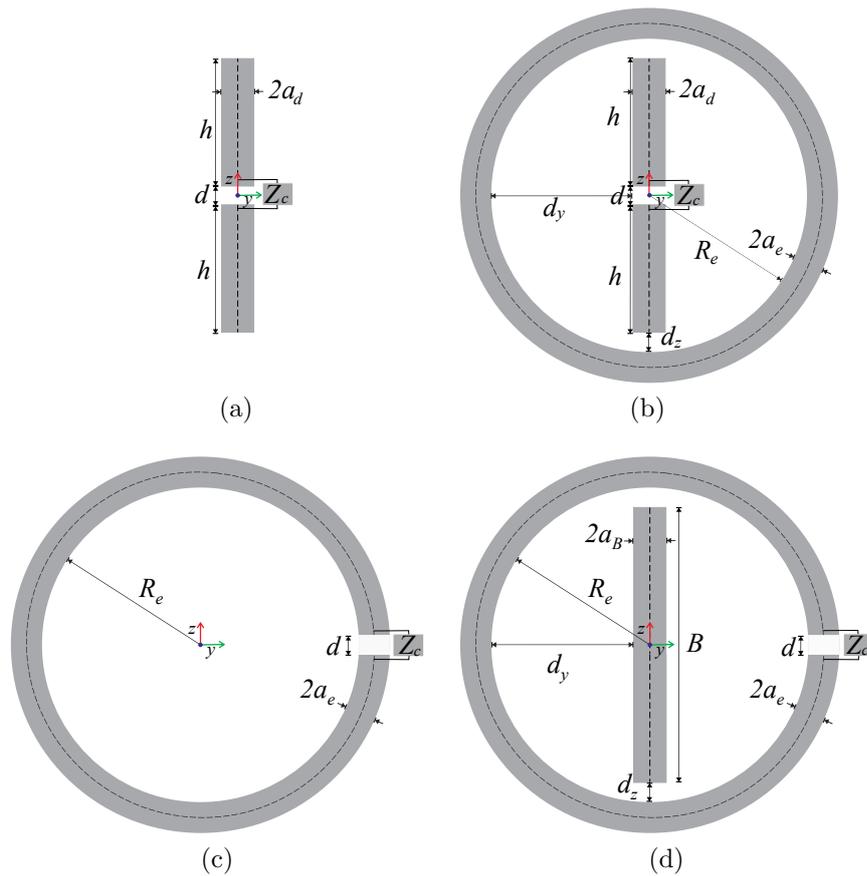


Figura 4.1 – Geometria das Nanoantenas: (a) caso 1, dipolo isolado; (b) caso 2, dipolo-espira; (c) caso 3, espira isolada; (d) case 4, bastão-espira.

Os parâmetros apresentados na figura, são h , d e a_d , comprimento do braço, gap e raio do dipolo respectivamente, os valores do comprimento do braço do dipolo e do gap mostrados na Tabela 1 são os mesmos utilizados nas referências [14][68][69]. Já a_B e $B = 2h + d$ são respectivamente o raio do cilindro e o comprimento do nanobastão. O

dipolo e o bastão estão centrados na origem do eixo z e R_e , a_e são respectivamente o raio da espira circular e o raio do condutor da espira localizada no plano yz à uma distancia $d_z = R_e - (h + d/2)$ e $d_y = R_e - a_d$ do nanodipolo/nanobastão, o gap das espiras são os mesmos do dipolo e os valores da espira foram escolhidos de modo que não os sobreponha.

Tabela 1 – Parâmetros Geométricos das Nanoantenas

| Parâmetros Geométricos | Valores (nm) |
|------------------------|--------------|
| h | 220 nm |
| d | 20 nm |
| a_d a_e a_B | 20 nm |
| R_e | 260 nm |
| B | 460 nm |
| d_z | 30 nm |
| d_y | 240 nm |

Para a simulação no Comsol foi utilizado o modelo de Lorentz-Drude da permissividade complexa, discutido no Capítulo 3, para a construção do material, que no trabalho, é o ouro, aplicada uma PML (*Perfect Matched Layer*) e customizada uma malha para otimizar as simulações, as configurações da malha são apresentadas na Tabela 2. A Figura 4.2 mostra a visão da nanoantena dipolo-espira (Caso 2) com a malha já construída. Todas as simulações foram realizadas em máquinas, cuja a configuração são: core i5 com 8Gb de RAM e core i7 com 16Gb de RAM.

Tabela 2 – Configuração da malha gerada com características da simulação.

| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Todos os casos |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| | Estrutura | Estrutura | Estrutura | Estrutura | Entorno |
| Tamanho Máx. do Elemento | 70 nm | 90 nm | 80 nm | 90 nm | 110 nm |
| Tamanho Mín. do Elemento | 3 nm | 6 nm | 5 nm | 6 nm | 8 nm |
| Taxa Máx. de Cresc. dos Elementos | 1,35 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| Resolução de Curvatura | 0,3 | 0,4 | 0,35 | 0,4 | 0,4 |
| Resolução de Regiões Estreitas | 0,85 | 0,7 | 0,75 | 0,7 | 0,7 |
| Quantidade de Camadas | - | - | - | - | 10 |
| Quantidade de Elementos | 215122 | 394001 | 357239 | 373095 | - |
| Tempo de Simulação | 1h50min | 2h55min | 2h20min | 2h32min | - |

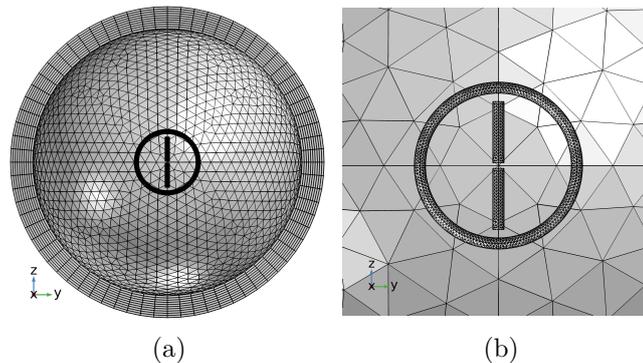


Figura 4.2 – Malha da Nanoantena para o Caso 2. (a) Visão da malha completa e seu entorno. (b) Vista de forma expandida a nanoantena.

4.1 Análise das Nanoantenas Isoladas: Modo de Transmissão

Levando em consideração a teoria das antenas de reciprocidade, onde uma antena pode funcionar tanto no modo de transmissão quanto para o modo de recepção, a análise é feita para obtenção de alguns resultados e parâmetros importantes dos casos em estudo, para as nanoantenas plasmônicas atuando como transmissoras, alimentadas por uma fonte de tensão V_0 de 1V (lumped de port no comsol) localizada no gap das antenas.

O primeiro resultado obtido nesta seção é da impedância de entrada das nanoantenas ($Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$) para os 4 casos (Figura 4.1). Na Figura 4.3 é mostrado a parte real da impedâncias de entrada calculadas pelo comsol. A Figura 4.4 mostra a parte imaginária da impedância de entrada para cada caso.

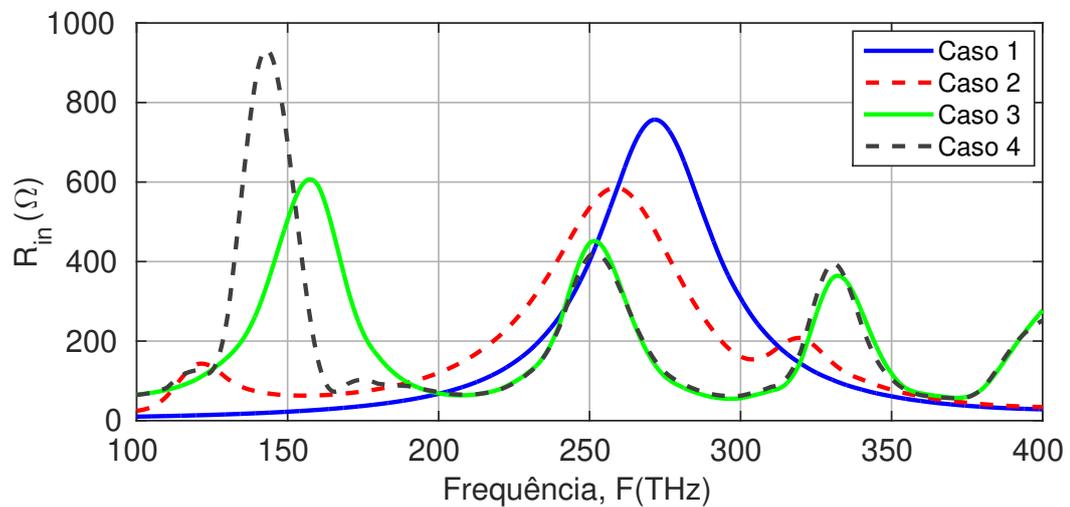


Figura 4.3 – Parte real da impedância de entrada. Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelha);: Caso 3 (linhas contínuas verde); Caso 4 (linhas pontilhadas preta).

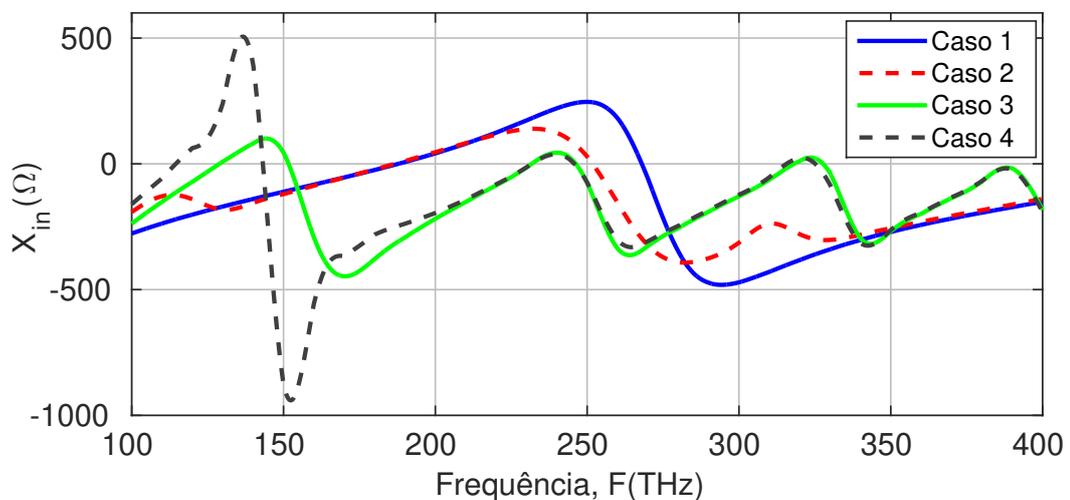


Figura 4.4 – Parte imaginária da impedância de entrada. Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelha);: Caso 3 (linhas contínuas verde); Caso 4 (linhas pontilhadas preta).

As frequências de ressonâncias de cada caso são mostradas na Tabela 3. Podemos constatar que as ressonâncias do dipolo são semelhantes às de um dipolo de micro-ondas, no entanto as ressonâncias do nanodipolo são deslocadas para frequências mais baixas, devido o comprimento de onda efetivo do material ser menor que o comprimento de onda externo [68]. É notável que a combinação do dipolo com a espira (Caso 2) modifica a impedância de entrada da antena em comparação com o nanodipolo isolado (Caso 1), com as ressonâncias bem próximas com uma leve alteração. Já os casos da espira isolada (Caso 3) e a combinação bastão-espira (Caso 4) com a fonte de tensão localizada no gap, situado na espira, fato causador de grandes modificações na faixa de frequência e o número de ressonâncias são aumentadas e as primeiras ressonâncias são em frequências bem menores que nos casos 1 e 2.

Tabela 3 – Frequências de ressonância das antenas plasmônicas simuladas no Comsol.

| Nanoantenas | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Primeira Ressonância ($F_{\lambda/2}$) | 187.77 THz | 186.6 THz | 128.88 THz | 114.5 THz |
| Segunda Ressonância (F_{λ}) | 268 THz | 251.81 THz | 151.31 THz | 143.19 THz |

Os resultados das Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 mostram o coeficiente de reflexão, a eficiência de radiação e o diagrama de radiação e ganho em 3D. Onde Γ é dado pela Equação 4.1

$$\Gamma = \frac{|(Z_{in} - Z_0)|}{|(Z_{in} + Z_0)|} \quad (4.1)$$

sendo Z_{in} é a impedância de entrada da nanoantena e Z_0 a impedância característica da linha de transmissão. Com o resultado do coeficiente de reflexão, foi calculado a largura de banda percentual da antena por:

$$B(\%) = 200 \left[\frac{F_s - F_i}{F_s + F_i} \right] \quad (4.2)$$

onde F_s é a frequência superior e F_i a frequência inferior para o nível de -10 dB do coeficiente de reflexão. Já a eficiência de radiação e_r é a relação entre a quantidade de potência que a antena irradia P_{rad} com a quantidade que é entregue a antena $P_{rad} + P_{dis}$, dada pela Equação 4.3, com isso é possível mostrar os resultados de eficiência de radiação que é dado em porcentagem. Utilizando os dados da Tabela 3 o diagrama de radiação de ganho 3D em campo distante, também é mostrado para os 4 casos, com os valores próximos as primeiras frequências de ressonâncias.

$$e_r = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{dis}} \quad (4.3)$$

A Figura 4.5 mostra o coeficiente de reflexão, onde para a nanodipolo isolado (Caso 1) utilizando Equação 4.2 a largura de banda é 10.71% utilizando $Z_{in} = Z_0 = 50\Omega$ para que haja máxima transferência de potência, valores retirados da Figura 4.3 próximas da primeira frequência de ressonância ($F_{\lambda/2}$) do nanodipolo. A eficiência de radiação máxima

do Caso 1 gira em torno de 78% nas proximidade de 280 THz. É observado também que a forma do diagrama de radiação de ganho 3D do dipolo calculado para a frequência de 190 THz é aproximadamente a mesma de um dipolo de micro-ondas.

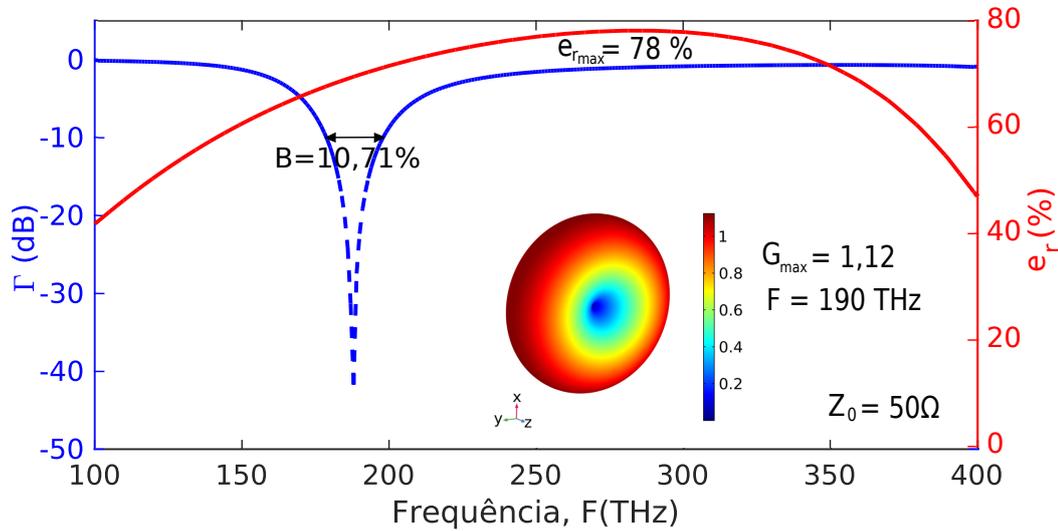


Figura 4.5 – Caso 1: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 190$ THz).

A Figura 4.6 mostra o coeficiente de reflexão, a largura de banda percentual para a combinação dipolo-espira (Caso 2), onde ocorre um pequeno aumento para 17.011% na largura de banda, com a impedância de linha no valor de $Z_0 = 90\Omega$, isso ocorre devido a energia indutiva da espira compensar a energia capacitiva do dipolo [69]. A eficiência de radiação é maior em comparação com o caso 1. Podemos observar também um aumento no ganho da antena na direção x adicionando a espira com a frequência de 190 THz.

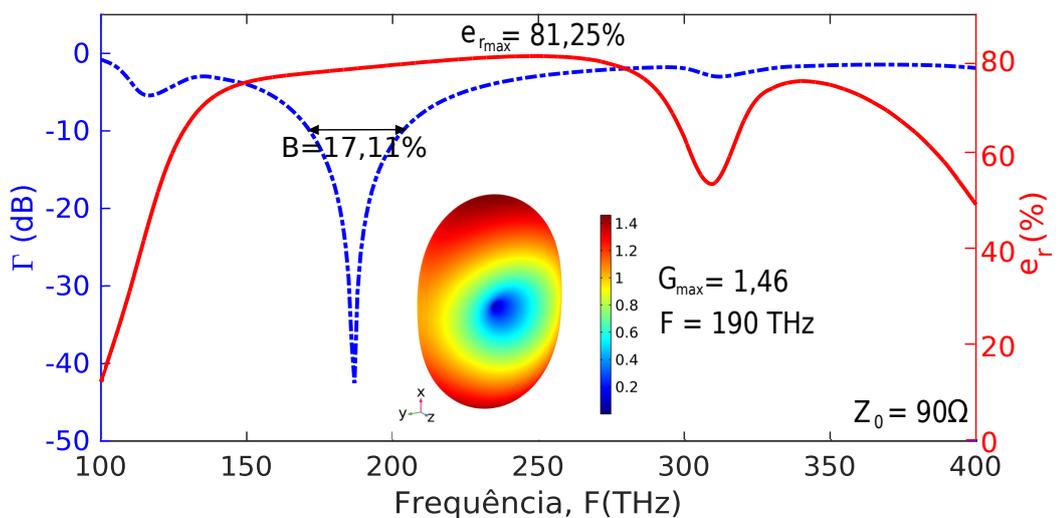


Figura 4.6 – Caso 2: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 190$ THz).

Para o caso 3 e 4 mostradas nas Figura 4.7 e Figura 4.8 respectivamente, podemos observar as várias ressonâncias, onde a fonte de tensão está conectada na estrutura da

espira. Em comparação com o nanodipolo, a espira isolada (Caso 3) aumenta a largura de banda percentual para 14.56% com o valor de $Z_0 = 150\Omega$. Por outro lado a eficiência decai quase que exponencialmente, também é notório o aumento do ganho em relação ao nanodipolo isolado para a frequência de 130 THz que é a frequência próxima da primeira ressonância. Já para o nanobastão-espira (Caso 4) o efeito negativo do bastão de ouro juntamente com a alimentação na espira diminui a largura de banda para 10.24% com valores bem próximos ao do nanodipolo. A eficiência da antena oscila bastante na faixa de frequência e o ganho da antena decai em relação aos casos 1,2 e 3.

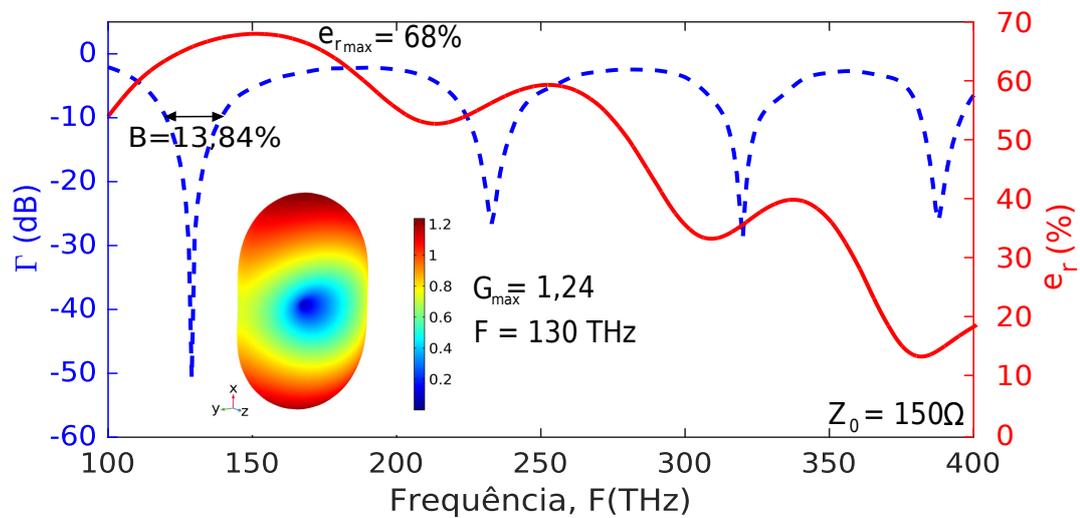


Figura 4.7 – Caso 3: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 130$ THz).

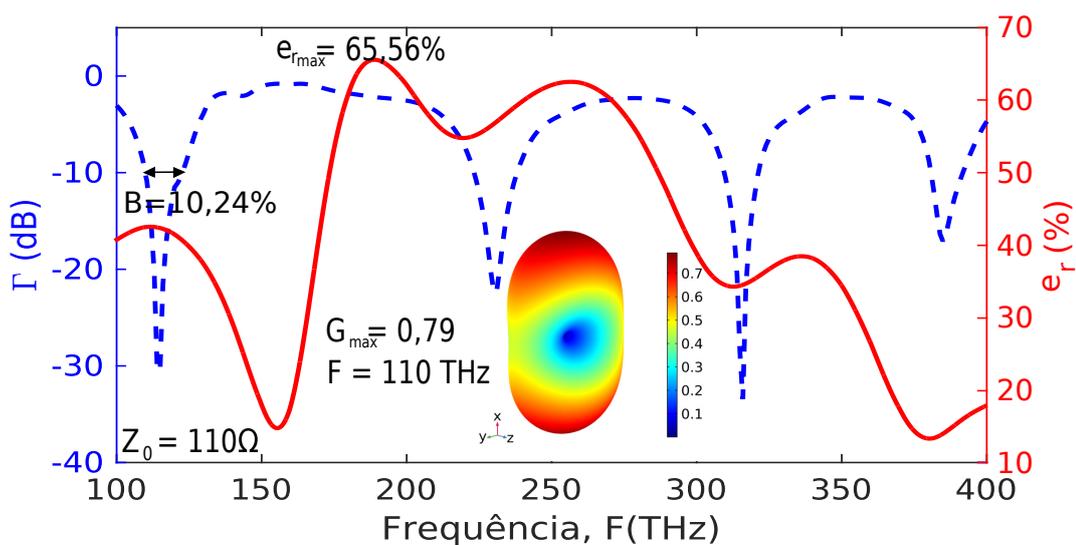


Figura 4.8 – Caso 4: Coeficiente de Reflexão (linha pontilhada em azul), eficiência de radiação (linha contínua em vermelho) e diagrama de ganho 3D ($F = 110$ THz).

Os resultados da largura de banda em um nível -10 dB do coeficiente de reflexão

foi calculada para valores de $Z_{in} = Z_0$ (máxima transferência de potência) retirados da Figura 4.3, próximos da primeira frequência de ressonância e mostrados nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8. A Tabela 4 mostra os valores das impedâncias características da linha (Z_0) utilizadas no cálculo da largura de banda percentual ($B\%$).

Tabela 4 – Valores da impedância de linha e largura de banda percentual.

| | Primeira Ressonância | | Segunda Ressonância | |
|--------|----------------------|---------|---------------------|---------|
| | $Z_0(\Omega)$ | $B(\%)$ | $Z_0(\Omega)$ | $B(\%)$ |
| Caso 1 | 49.75 Ω | 10.071% | 738.25 Ω | 11.54% |
| Caso 2 | 89.89 Ω | 17.11% | 553.1 Ω | 15.87% |
| Caso 3 | 151.2 Ω | 14.56% | 516.4 Ω | 14.45% |
| Caso 4 | 110.13 Ω | 10.24% | 931.9 Ω | 6.99% |

Na próxima seção será feita uma análise para os casos em estudo das nanoantenas isoladas para o modo de recepção, excitadas por uma onda plana, conectada a uma carga.

4.2 Análise das Nanoantenas Isoladas: Modo de Recepção

Feita a análise no modo de transmissão, agora faremos o estudo para os casos propostos das nanoantenas visto na Figura 4.1 com os valores mostrados na Tabela 1. Todos os casos são conectados por uma carga $Z_C = 50\Omega$, onde para os casos 1 e 2 a carga está conectada no gap do dipolo, e para os casos 3 e 4 está situada no gap localizado na estrutura da espira. Os resultados apresentados a seguir, são para a faixa de frequência de 100-400 THz, simulado no *software* Comsol Multiphysics.

O modo de excitação das nanoantenas será feita por uma onda plana linearmente polarizada, com direção de polarização inicial em $\phi = 0$ radianos correspondendo à polarização na direção z . E é polarizada na direção y no ângulo $\phi = \pi/2$ radianos. A Equação 4.4 mostra a equação total da onda, e a relação para determinar a direção da polarização da onda em ϕ é dada pela Equação 4.5. As componentes de campo propagando na direção $+x$ para o Caso 1 e as diferentes direções de polarização é mostrado na Figura 4.9.

$$\vec{E} = E_{0y}e^{j(\omega t - k_x x)}\hat{a}_y + E_{0z}e^{j(\omega t - k_x x)}\hat{a}_z \quad (4.4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{E_{0z}}{E_{0y}} \right) \quad (4.5)$$

onde \vec{E} é campo do campo total, E_{0y} e E_{0z} são as amplitude do campo, k_x é a constante de propagação da onda em x .

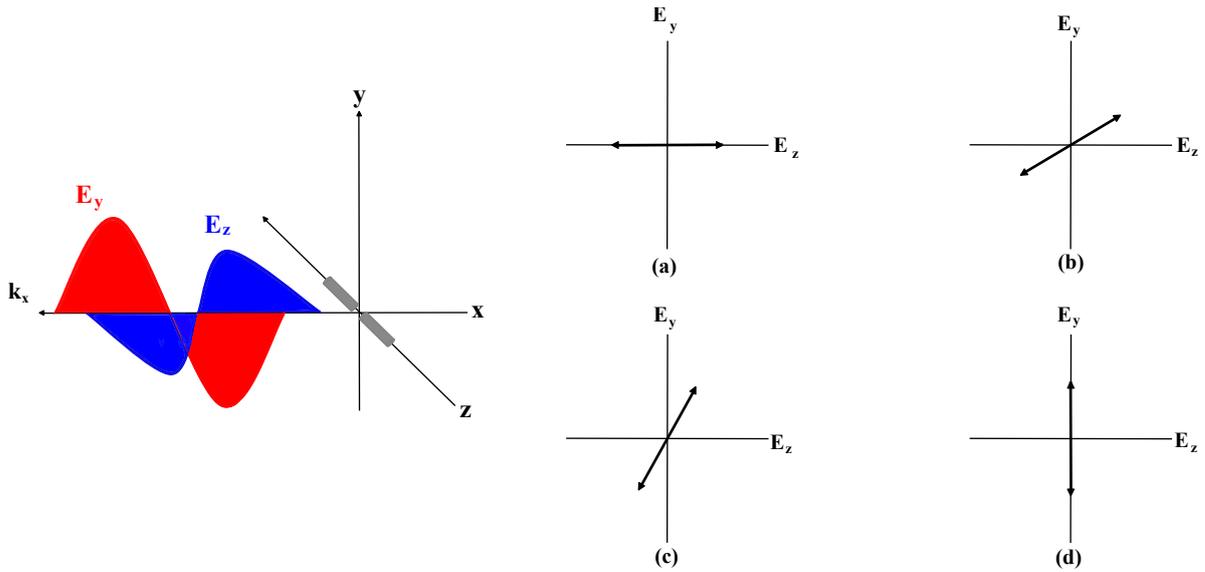


Figura 4.9 – Ilustração da onda plana linearmente polarizada, incidida no dipolo receptor, propagando na direção +x. (a) $\phi = 0$ rad; (b) $\phi = \pi/6$ rad; (c) $\phi = \pi/3$ rad; (d) $\phi = \pi/2$ rad.

Os resultados que serão mostrados a seguir são obtidos através da Equação 4.6 que calcula a potência recebida na carga transformada em dBm para as diferentes polarizações. P_{Z_C} é a potência na carga, I_C a corrente na carga ao quadrado, multiplicando a parte real da carga Z_C . Em seguida é transformado em dBm.

$$P_{Z_C} = 0.5(|I_C|^2 \text{Re}(Z_C)) \quad (4.6)$$

$$P_{Z_C}(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(1000 P_{Z_C}/1W)$$

Para a Polarização 1 temos o valor inicial de $\phi = 0$ radianos, Polarização 2 de $\phi = \pi/6$ radianos e as Polarizações 3 e 4 de $\phi = \pi/3$ e $\phi = \pi/2$ radianos respectivamente, como visto na Figura 4.9.

A Figura 4.10 mostra a potência recebida para os 4 casos aplicada à uma carga, para a Polarização 1 observamos uma variação na potência recebida em pontos da frequência em ambos os casos. Onde para o nanodipolo isolado temos máxima potência de recepção próximo a frequência de ressonância, como podemos observar na Tabela 3, para o Caso 2 é notório um pequeno aumento na potência em, toda faixa de frequência, em relação ao Caso 1 devido a influência do acoplamento eletromagnético entre o dipolo e a espira. Já para o Caso 3 da espira isolada, temos a maior potência recebida nas proximidades da frequência de ressonância em comparação com os demais casos, mas por outro lado queda decrescente para valores maiores na faixa. O resultado do Caso 4 tem um comportamento semelhante ao Caso 3, onde a influência da nanobastão devido o acoplamento eletromagnético varia a potência recebida nos pontos da frequência.

Para as Polarizações 2 e 3 mostradas pelas Figura 4.11 e Figura 4.12 respectivamente,

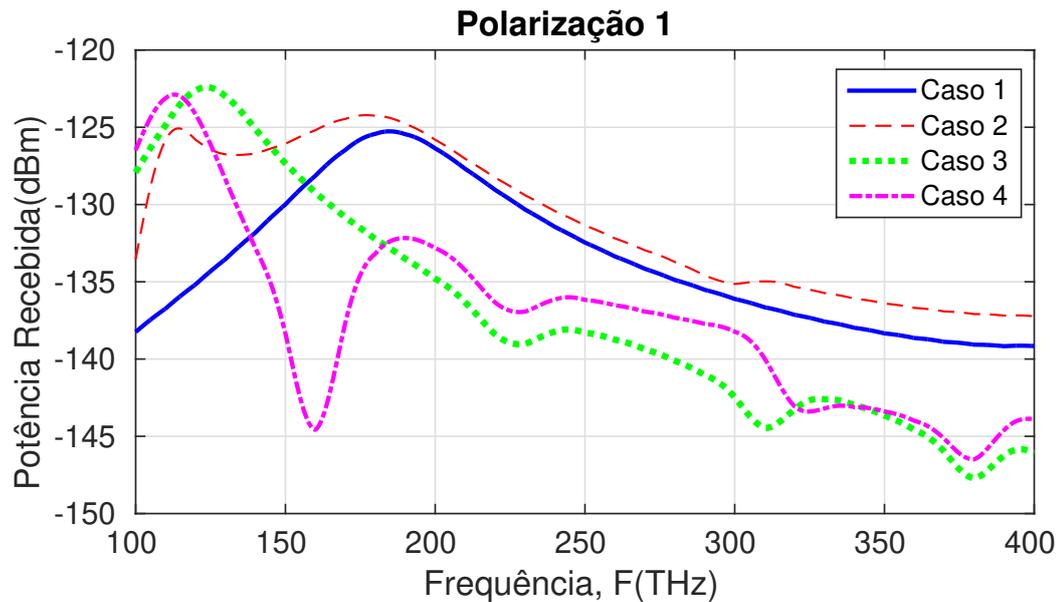


Figura 4.10 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = 0$ rad.

notamos apenas uma pequena redução na potência de recepção, mas sem mudanças na faixa de frequência para os 4 casos em relação a Polarização 1.

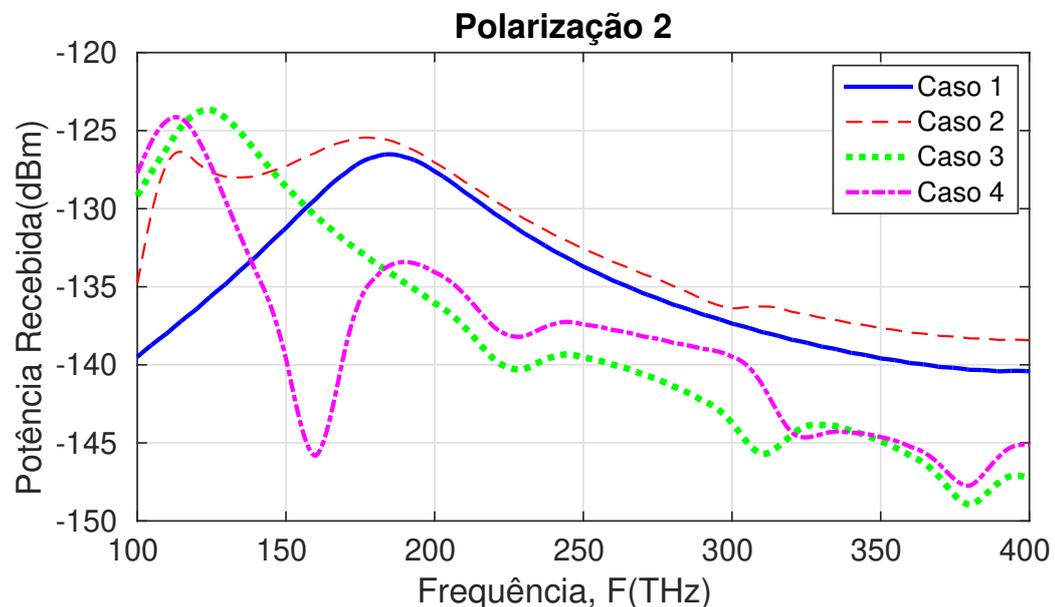


Figura 4.11 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = \pi/6$ rad.

A Figura 4.13 mostra a Polarização 4, podemos observar uma queda acentuada na potência e uma grande variação na faixa de frequência nos 4 casos, com uma melhor uma recepção para o Caso 2.

Em seguida, afim de visualizar o comportamento das nanoantenas aplicada a onda

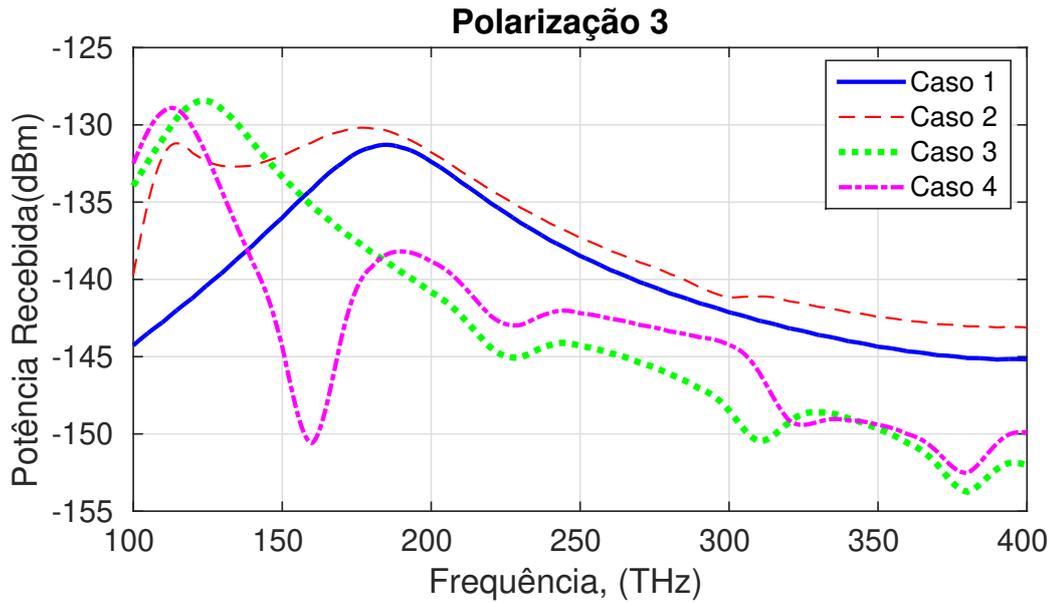


Figura 4.12 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = \pi/3$ rad.

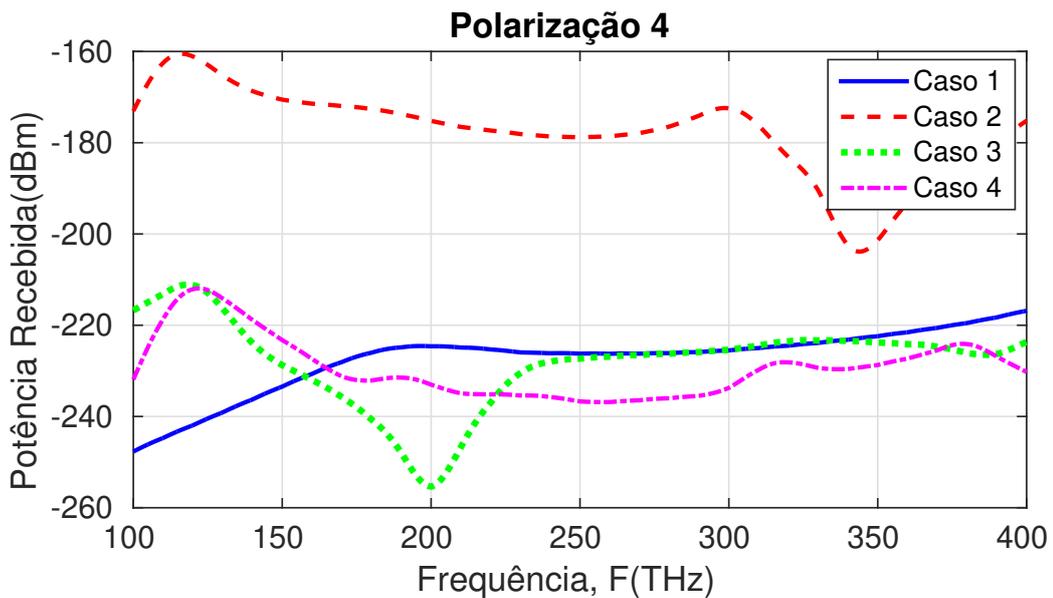


Figura 4.13 – Potência de recebida versus frequência para: Caso 1 (linha contínua em azul); Caso 2 (linha pontilhada em vermelho); Caso 3 (linha pontilhada em verde); Caso 4 (linha pontilhada em lilás). Aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção $\phi = \pi/2$ rad.

plana, variando a direção de polarização, é plotado o campo elétrico próximo normalizado para cada caso, onde retiramos de um plano $x = 30$ nm da estrutura, com valores coletado nas proximidades da primeira frequências de ressonância ($F_{\lambda/2}$) mostrados na Tabela 3. A Figura 4.14 mostra o campo próximo, para o caso do nanodipolo isolado (Caso 1). Logo, como esperado nota-se a diminuição de intensidade do campo, conforme a variação da polarização da onda.

Para o caso da combinação dipolo-espira (Caso 2) na Figura 4.15 podemos observar

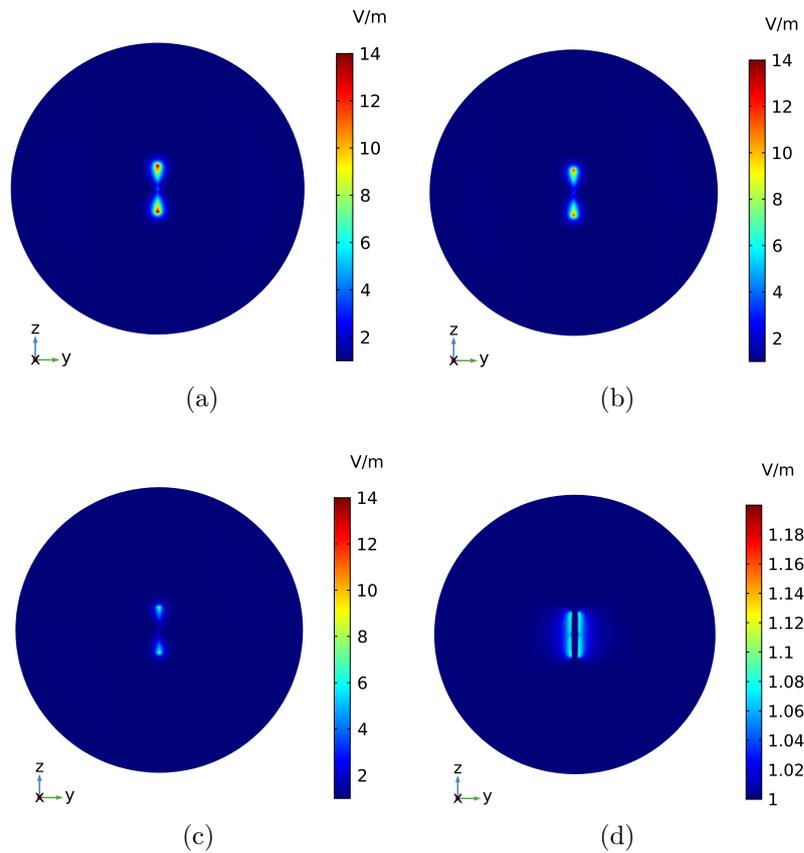


Figura 4.14 – Campo Elétrico Próximo normalizado (V/m) no plano $x = 30$ nm para a $F = 190$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3 (d) Polarização 4.

que o acoplamento do nanodipolo com a espira aumenta a intensidade de radiação de campo próximo (V/m) em relação ao caso nanodipolo isolado, e assim como no Caso 1, a intensidade decai conforme a variação da direção de polarização do campo, com o acoplamento eletromagnético do dipolo com espira quase nulo para a Polarização 4 ($\phi = \pi/2$ radianos).

Para a espira isolada (Caso 3) visto na Figura 4.16, nota-se um pequeno aumento na intensidade de campo com a variação da polarização. Já a Figura 4.17 mostra para a combinação bastão-espira (Caso 4), a intensidade de campo é maior em relação aos outros casos, com a influência nula do nanobastão na Polarização 4. Além disso, fica evidente nos casos 3 e 4, a rotação do ângulo ϕ para as diferentes direções de polarizações da onda.

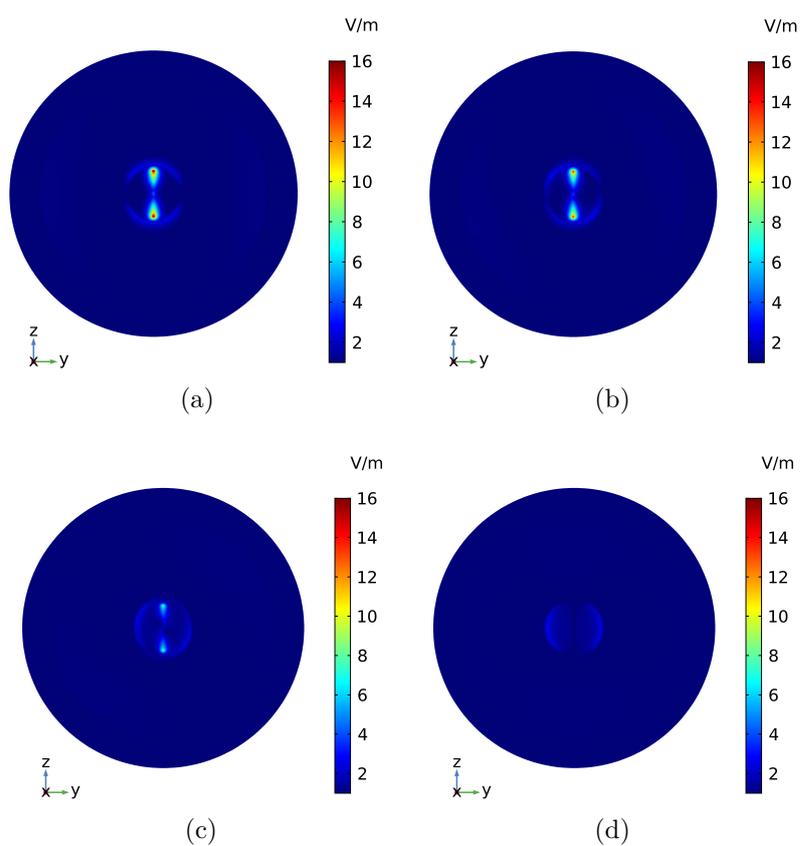


Figura 4.15 – Campo elétrico próximo normalizado, no plano $x = 30$ nm para a frequência para a $F = 190$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3; (d) Polarização 4.

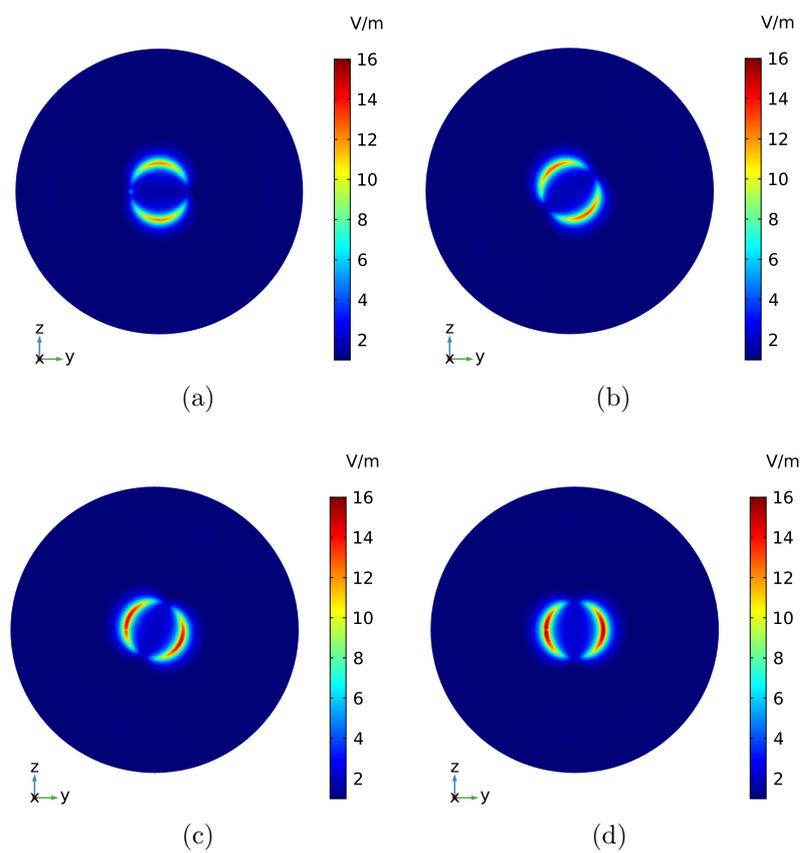


Figura 4.16 – Campo elétrico próximo normalizado, no plano $x = 30$ nm para a frequência para a $F = 130$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3; (d) Polarização 4.

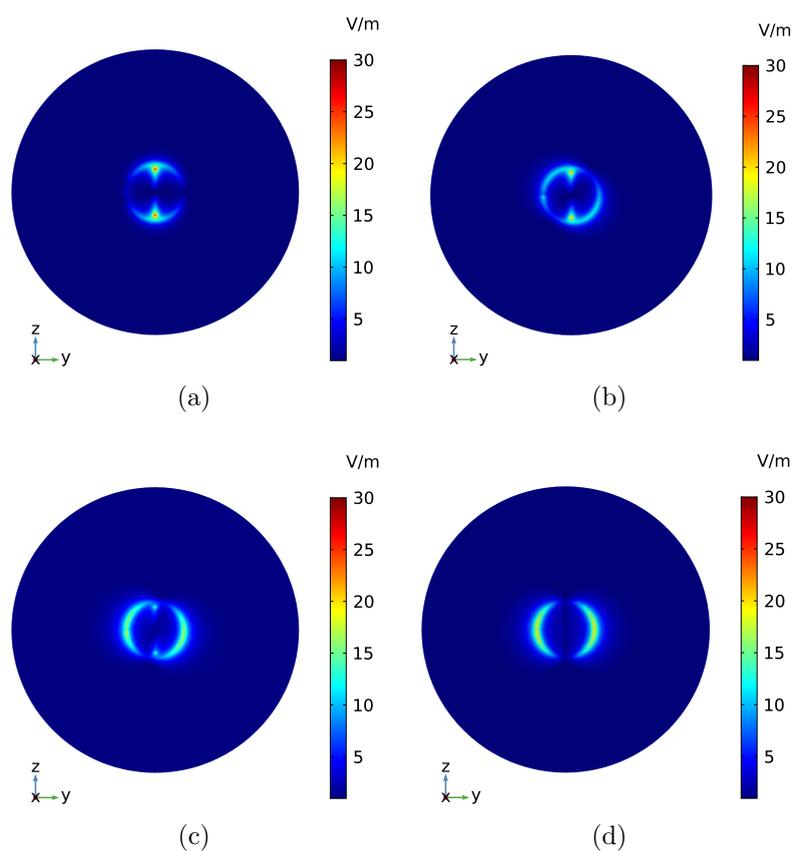


Figura 4.17 – Campo elétrico próximo normalizado, no plano $x = 30$ nm para a frequência para a $F = 120$ THz: (a) Polarização 1; (b) Polarização 2; (c) Polarização 3; (d) Polarização 4.

O capítulo a seguir irá mostrar as análises das nanoantenas isoladas, usando os casos 1 e 3, conectados a OTL.

5 Nanocircuito Óptico

A implementação de nanoantenas em aplicações práticas envolve o estudo de nanocircuitos. Neste Capítulo, a análise será feita para nanocircuito, mostrada na Figura 5.1, composto pela, espira isolada (Caso 3) conectada à OTL bifilar com um nanodipolo (Caso 1) no terminal da linha, excitado por uma onda plana linearmente polarizada, inicialmente polarizada em z , propagando em $+x$. Posteriormente o nanocircuito é alimentado por um feixe gaussiano focalizado na espira receptora. Com os seguintes parâmetros: L e a_L , são o comprimento e raio das OTL respectivamente; h e a_d , o braço e o raio do condutor cilíndrico do dipolo respectivamente; d_L é a distância entre os eixos da OTL. Já $D = d_L - 2a_L$ é a distância entre as superfícies das linhas de transmissão; R_e é o raio da espira circular em relação a origem e a_e o raio do condutor da espira localizada no plano yz , onde o centro da espira está localizada na origem dos eixos, mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros Geométricos do Nanocircuito Óptico.

| Parâmetros Geométricos | Valores (nm) |
|------------------------|--------------|
| L | 800 nm |
| R_e | 260 nm |
| a_d a_e a_L | 20 nm |
| h | 220 nm |
| d_L | 60 nm |
| D | 20 nm |

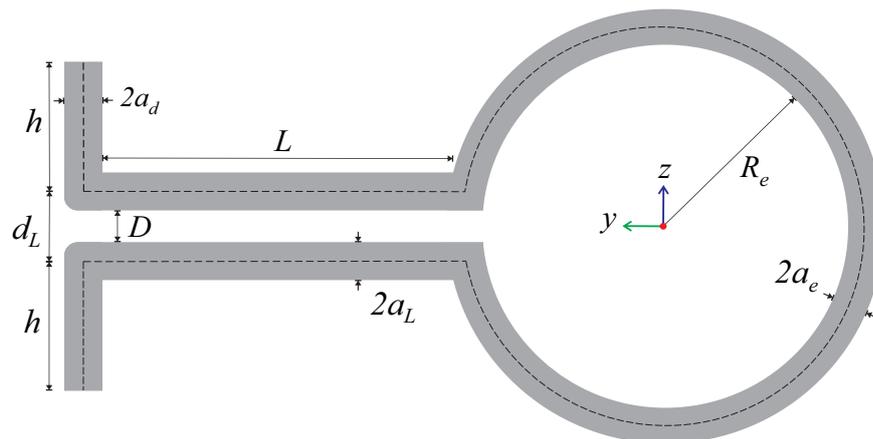


Figura 5.1 – Geometria do Nanocircuito nanocircuito composto por duas OTL, conectadas a uma espira no centro do plano yz , com um dipolo no terminal da linha.

As configurações da malha foram customizadas e apresentadas na ???. A Figura 5.2 mostra a visão da antena com a malha já construída.

Tabela 6 – Configuração da malha gerada com características da simulação.

| | Nanocircuito | |
|-------------------------------------|---------------------|---------|
| | Estrutura | Entorno |
| Tamanho Máx. do Elemento | 70 nm | 110 nm |
| Tamanho Mín. do Elemento | 10 nm | 25 nm |
| Taxa Máxima de Cresc. dos Elementos | 1,35 | 1,45 |
| Resolução de Curvatura | 0,35 | 0,5 |
| Resolução de Regiões Estreitas | 0,8 | 0,7 |
| Quantidade de Camadas | - | 10 |
| Quantidade de Elementos | 656702 | |
| Tempo de Simulação | 2 hora e 48 minutos | |

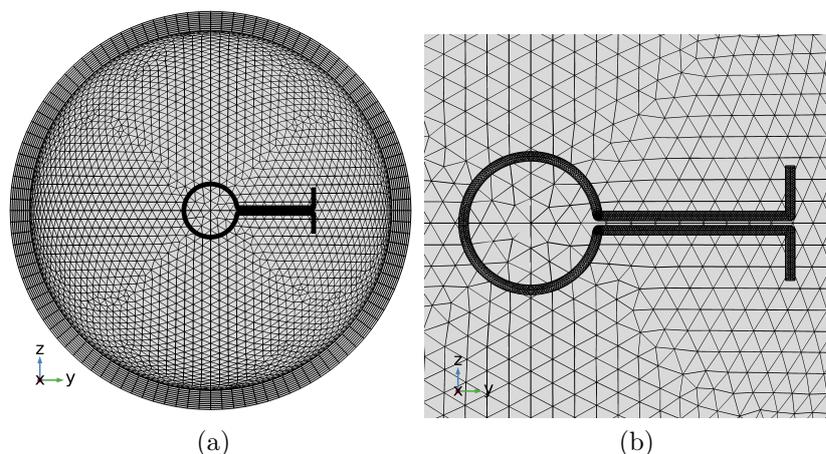


Figura 5.2 – Malha do Nanocircuito: (a) Mostra à visão da malha completa e seu entorno. (b) Mostra à vista de forma expandida a nanoantena.

5.1 Análise do Nanocircuito Óptico: Excitado por uma Onda Plana

A direção de polarização do campo é feita para capturar um maior índice de energia recebido pelo nanocircuito, com polarizada em z onde podemos observar a transferência de energia através do OTL da espira para o terminal do nanocircuito onde está localizado um dipolo e vice-versa, mas especificamente um sistema óptico com transferência de energia mútua oscilante. Foram coletadas amostras, afim de visualizar esses efeitos. Os resultados obtidos de campo próximo resultantes da excitação de uma onda plana linearmente polarizada, são mostrados na Figura 5.3, onde usamos o valor inicial de polarização, para as frequências de 100 THz, 150 THz e 200 THz.

Em seguida é feita uma análise para o nanocircuito da Figura 5.1 de forma separada para modo de comparação dos casos, como mostra a Figura 5.4a com um dipolo conectado a OTL e Figura 5.4b que é o caso da espira conectado também a uma OTL, ambos os casos aplicados à uma carga com valor fixado de $Z_C = 50\Omega$ no terminal. Para calcular a potência recebida em dBm na carga, como feito na Secção 4.2, usamos a Equação 4.6 variando a polarização da onda. A simulação para os casos foi realizada na faixa de frequência de 100-200 THz.

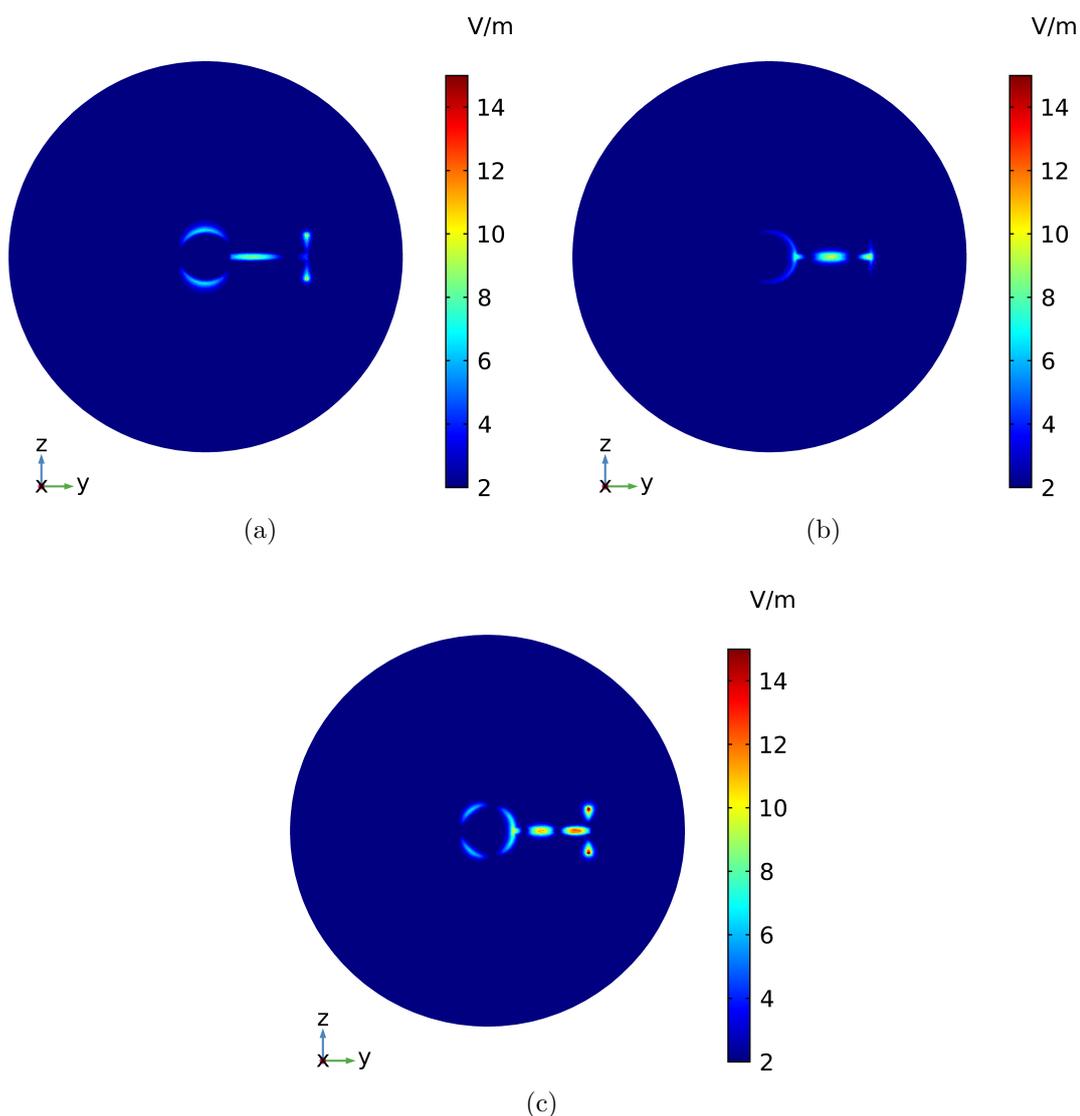


Figura 5.3 – Distribuição do campo elétrico normalizado próximo, no plano $x = 30$ nm: (a) 100 THz; (b) 150THz; (c) 200 THz.

A Figura 5.5 mostra a potência recebida para os casos do dipolo e espira isolados (Figura 5.4), que são respectivamente os casos 1 e 3 conectados por uma linha de transmissão aplicados uma carga. Para a Polarização 1 ($\phi = 0$ radianos) observamos uma variação na potência recebida nos pontos da frequência, com potência máxima recebida nas proximidades das frequências de ressonância de cada caso, para essa faixa a melhor recepção é para o caso do nanocircuito espira calculados em dBm.

nanoantenas isoladas analisadas no Capítulo 4.

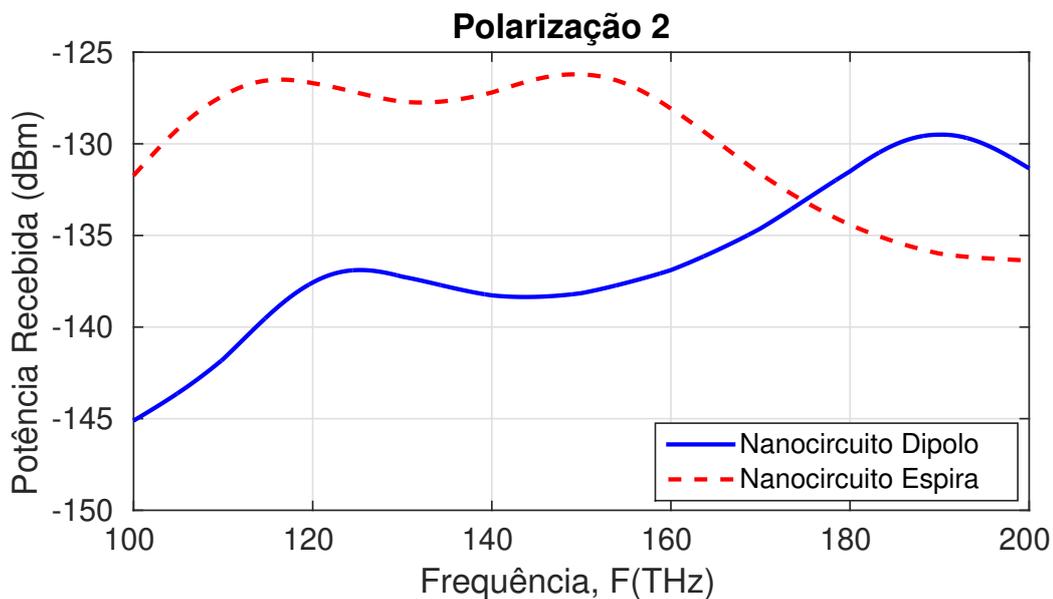


Figura 5.6 – Potência de Recebida em dBm versus frequência para os 2 casos conectados a uma OTL, aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção de $\phi = \pi/6$ rad. Nanocircuito dipolo (linha contínua em azul); Nanocircuito espira (linha pontilhada em vermelho)

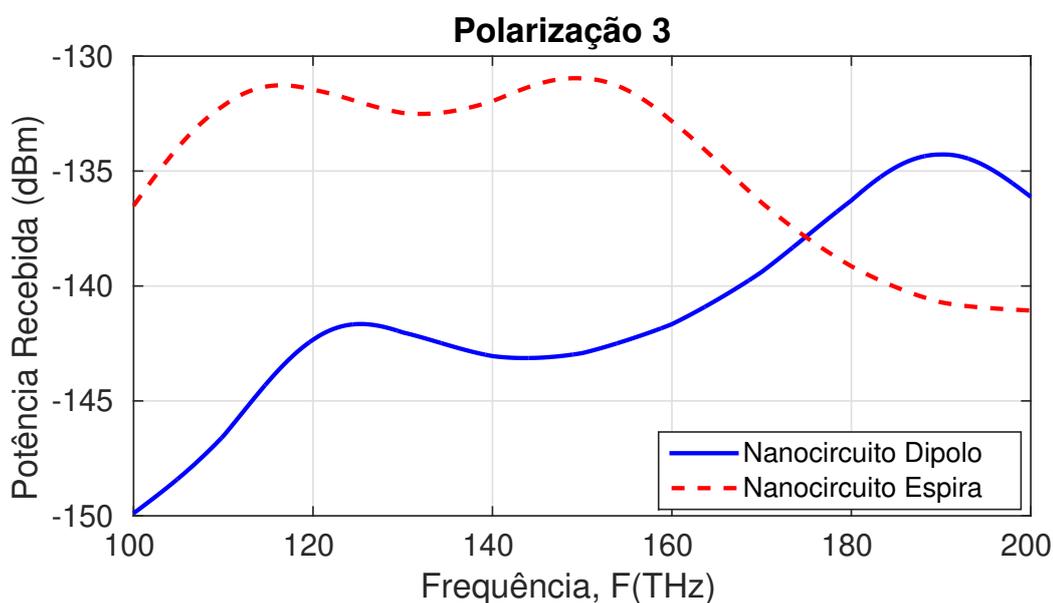


Figura 5.7 – Potência de Recebida em dBm versus frequência para os 2 casos conectados a uma OTL, aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção de $\phi = \pi/3$ rad. Nanocircuito dipolo (linha contínua em azul); Nanocircuito espira (linha pontilhada em vermelho)

E por fim a análise para a Polarização 4 ($\phi = \pi/2$ radianos) na Figura 5.8 mostrando a acentuada queda de potência recebida para ambos os casos e com uma grande variação na faixa, onde o caso do nanocircuito espira para essa polarização continua com uma melhor recepção.

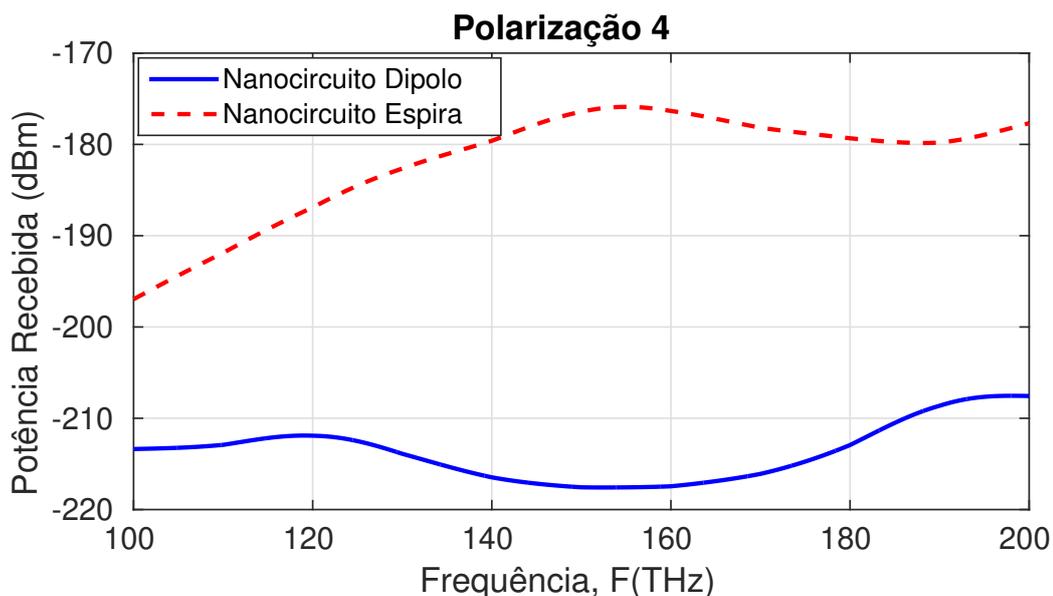


Figura 5.8 – Potência de Recebida em dBm versus frequência para os 2 casos conectados a uma OTL, aplicada a $Z_C = 50\Omega$, com a onda plana polarizada na direção de $\phi = \pi/2$ rad. Nanocircuito dipolo (linha contínua em azul); Nanocircuito espira (linha pontilhada em vermelho)

5.2 Análise do Nanocircuito Óptico: Excitado por um Feixe Gaussiano

Nessa secção, é analisada a excitação de um nanocircuito óptico alimentado por um sensor de abertura, com o objetivo de caracterizar aplicações com fontes mais reais para o nanocircuito óptico. O circuito é composto por uma nanoantena receptora e outra transmissora conectada por duas linhas de transmissão óptica (OTL). A modelagem deste sistema é equivalente a um feixe Gaussiano radiado a partir da abertura, que é focalizado na origem da espira. A energia capturada pela espira de recepção é então guiada pela linha de transmissão (OTL) e transferida para o dipolo emissor, que produz o campo radiado, mostrado na Figura 5.9.

As análises foram feitas utilizando um Feixe Gaussiano com comprimento de onda $\lambda = 830$ nm, cintura do feixe $w_0 = 340$ nm e a potência do feixe $P_f = 1$ pW respectivamente. Valores baseados no artigo [37]. O Feixe Gaussiano é focalizado na antena receptora, polarizado paralelamente ao eixo da espira (eixo z) para se obter máxima eficiência de acoplamento, a direção de propagação é $+x$, o eixo do feixe é ao longo do eixo x e a cintura mínima do feixe (w_0) está localizada em $x = 0$.

A fórmula do feixe gaussiano paraxial é uma aproximação à equação de Helmholtz derivada das equações de Maxwell. O feixe gaussiano é apresentado por soluções paraxial, aproximando a equação escalar de Helmholtz do fator de propagação e deixando a função de variação lenta. Sendo a fonte de excitação um feixe gaussiano dado pela seguinte equação

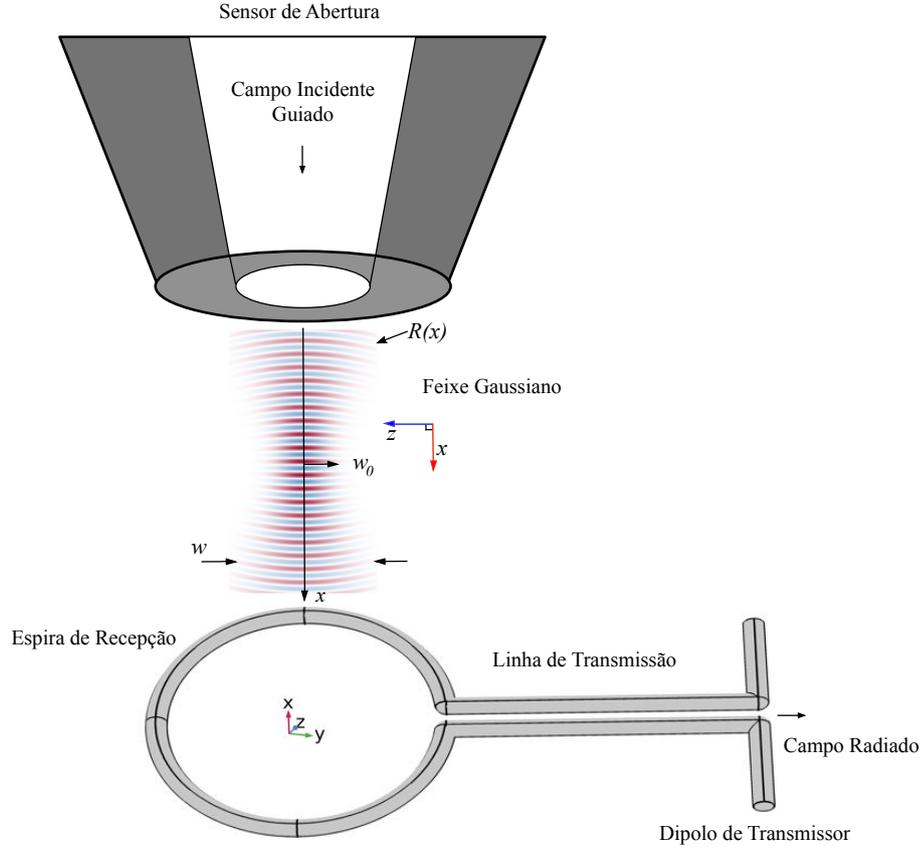


Figura 5.9 – Esquemática do sensor de abertura acoplado eletromagneticamente a um nanocircuito óptico.

[70]:

$$\vec{E} = \left(\frac{\omega}{k}\right) (A - jk) u e^{-jk_x} \hat{a}_z \quad (5.1)$$

Sendo, a A uma constante introduzida para a facilitação dos cálculos, onde a constante de propagação k_x determina a direção do feixe em $+x$ e u é a função de variação lenta de x . O w é o raio, w_0 a cintura, u_0 a amplitude do feixe respectivamente, s é referido como parâmetro confocal (também denominado de intervalo de Rayleigh), ϕ é o ângulo denominado fase de Gouy. O raio de curvatura da frente de onda $R(x)$ é dada pela relação da Equação 5.5.

$$A = -\frac{1}{x - x_0 + js} - \frac{(jky)^2}{2(x - x_0 + js)^2} \quad (5.2)$$

$$u = u_0 \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{(y^2/w^2)} e^{-j\left(\frac{ky^2}{2R} - \psi\right)} \quad (5.3)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{x - x_0}{s} \right) \quad (5.4)$$

$$R(x) = \frac{(x - x_0)^2 + s^2}{x - x_0} \quad (5.5)$$

$$w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{x - x_0}{s}\right)^2} \quad (5.6)$$

A Figura 5.10 mostra o comportamento do campo elétrico próximo para o nanocircuito, iluminado pelo feixe gaussiano na antena receptora, retirados com os valores de frequência de $F = 100$ THz, $F = 150$ THz e $F = 200$ THz, é observado a transferência de energia fluindo da espira receptora através da OTL para o dipolo emissor, sendo o mesmo coletado no plano $x = 30$ nm para cada amostra. É possível visualizar o padrão de onda estacionária, além de perdas por reflexão e condução na linha, além da redução de transferência de energia com o aumento da frequência.

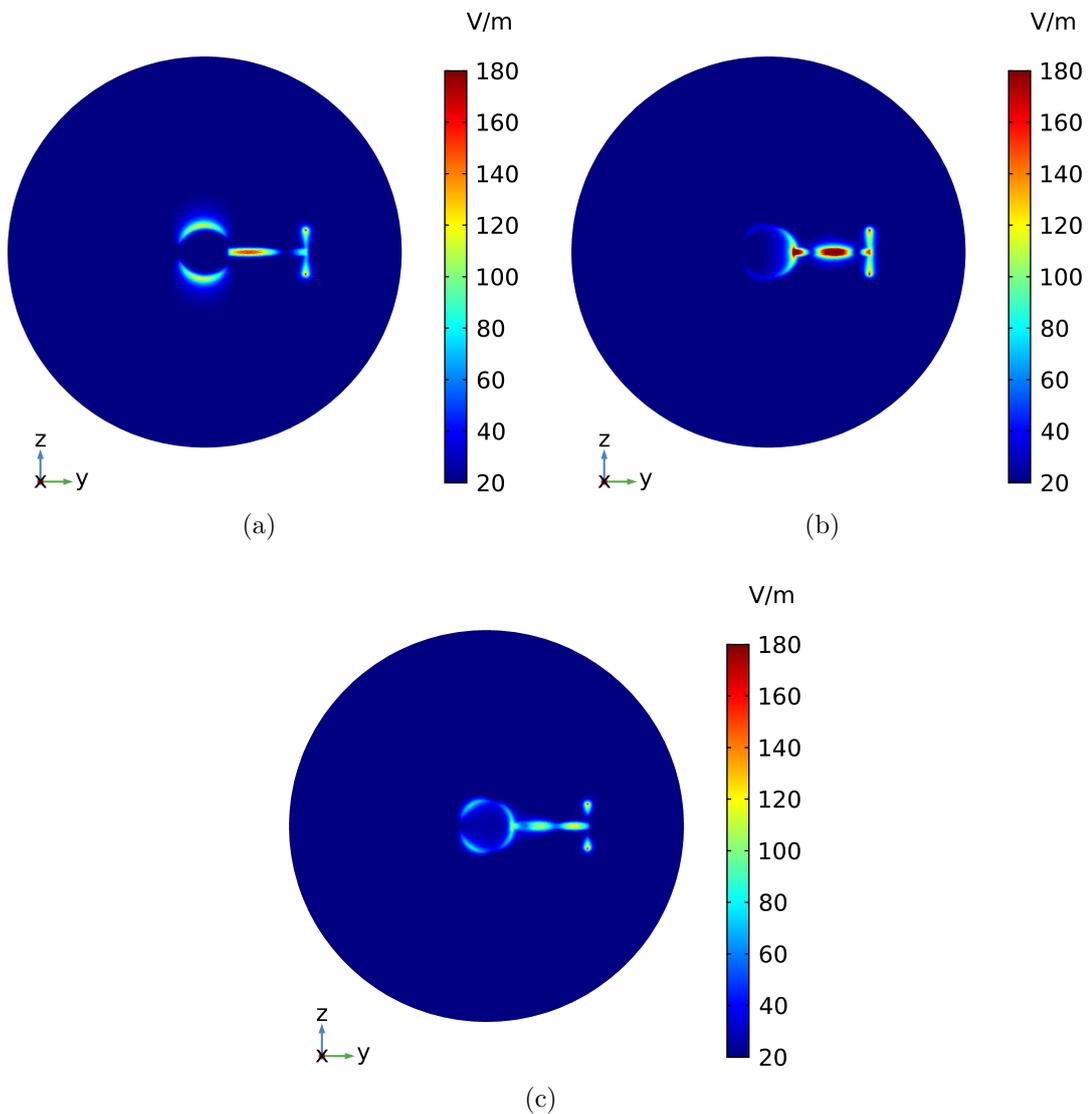


Figura 5.10 – Distribuição do campo elétrico normalizado próximo, no plano $x = 30$ nm: (a) 100 THz; (b) 150 THz; (c) 200 THz.

Além dos resultados de campo próximo obtidos do nanocircuito óptico, excitado pelo feixe gaussiano, sendo a espira, o receptor e o dipolo o emissor, é feito um estudo de carga, substituindo o emissor por uma carga Z_C , como visto na Figura 5.5b. O cálculo da potência recebida em dBm é o mesmo feito na Figura 5.11, usando a Equação 4.6 para calcular a potência recebida nas cargas: $Z_C = 50\Omega$, $Z_C = 550\Omega$ e $Z_C = 1050\Omega$.

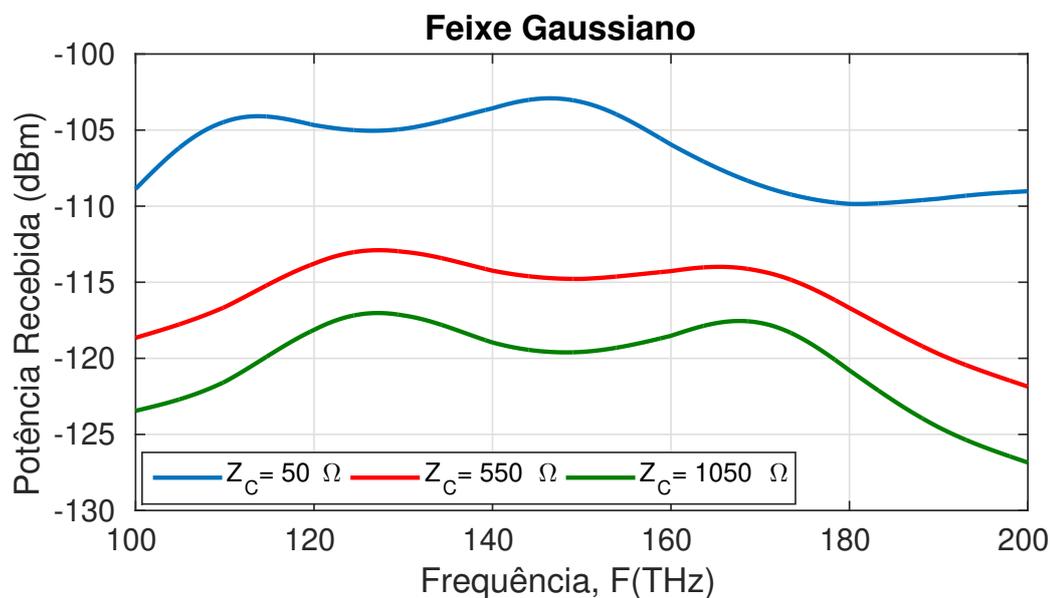


Figura 5.11 – Potência de Recebida em dBm versus frequência, para o caso da espira, conectados a uma OTL, aplicada à carga: $Z_C = 50\Omega$ (linha contínua em azul), $Z_C = 550\Omega$ (linha contínua em vermelho) e $Z_C = 1050\Omega$ (linha contínua em verde).

Em comparação com os resultados da potência recebida na carga, excitados por uma onda plana linearmente polarizada, com a carga $Z_C = 50\Omega$ notou-se uma melhor potência de recepção, devido o eficiente acoplamento da sonda de abertura com a antena. Além disso é observado que com o aumento da carga, a potência de recebida sofre um decaimento.

6 Considerações Finais

Em regimes ópticos, nanoantenas formadas por espiras circulares são usadas para controlar o armazenamento, a radiação e o foco de energia e por dualidade elas são comparadas a nanoantenas dipolares, com essa concepção foram feitas análises destas antenas, juntamente com o dipolo em regime óptico de forma isolada e de combinações. As nanoantenas consideradas foram: Dipolo (Caso 1); Dipolo-espira (Caso 2); espira isolada (Caso 3) e bastão-espira (Caso 4). As nanoantenas foram simuladas no software Comsol na faixa de frequência de 100-400 THz, sendo que nessa faixa o modelo de Lorentz-Drude da permissividade complexa do ouro se comporta de forma eficaz.

Primeiramente as análises foram feitas para o modo de transmissão, afim de aferir resultados importantes, como: impedância de entrada, coeficiente de reflexão, largura de banda percentual, eficiência de radiação e diagrama de ganho 3D. Para esses resultados foi utilizado uma fonte de tensão de 1V. Em seguida foi a análise para o modo de recepção por uma onda plana. Foi investigado a potência de recepção de todos os casos conectadas à carga de $Z_C = 50\Omega$, e foi plotado o campo elétrico normalizado próximo para cada variação de direção de polarização da onda que foram: Polarização 1 ($\phi = 0$ radianos); Polarização 2 ($\phi = \pi/6$ radianos); Polarização 3 ($\phi = \pi/3$ radianos) e Polarização 4 ($\phi = \pi/2$ radianos). Os resultados mostram que a melhor recepção de potência está próxima da frequência de ressonância de cada caso, onde a nanoantena dipolo-espira apresenta maior largura de banda de recepção do que os outros casos, e a espira isolada com o bastão-espira apresentaram uma maior potência de recepção do que os outros casos.

E por fim, sabendo da importância de analisar nanocircuitos ópticos, para a implementação de nanoantenas plasmônicas, foram mostrados alguns resultados como a distribuição de campo próximo de um nanocircuito óptico Figura 5.1 formado por uma espira conectado a uma OTL com um dipolo em seu terminal no modo de recepção aplicada a uma onda plana, o sistema formado mostra a energia sendo entregue e transmitida através da OTL, da espira para o dipolo e vice e versa oscilando mutuamente na faixa de frequência, foi calculada a potência recebida em dBm para os caso de forma separada como mostrado na Figura 5.4a e Figura 5.4b conectado no terminal das OTL uma carga de $Z_C = 50\Omega$, os resultados foram calculados próximas das primeiras ressonância na faixa de 100-200 THz e variando também a direção de polarização do campo, mostram a coerência em relação as antenas isoladas, com uma melhor recepção para o caso da espira. E para os resultados alimentado por uma sonda de abertura, onde o circuito é composto por uma espira de recepção e um dipolo de emissão. O modelo de acoplamento entre a sonda de abertura e a antena de recepção foi modelado com um feixe gaussiano focalizado a partir da abertura, observou-se que a antena receptora, neste caso espira isolada, possui uma

boa recepção correspondente ao OTL considerado, vale ressaltar também a melhoria na recepção com o nanocircuito conectado a uma carga, em relação ao excitado por uma onda plana, com uma melhor recepção em $Z_C = 50\Omega$.

6.1 Trabalhos Futuros

Nesta seção são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicar outros métodos numéricos para os casos em estudo.
- Otimizar as antenas variando as dimensões e outros parâmetros para melhorar a absorção de potência e eficiência das nanoantenas.
- Calcular outros resultados como o coeficiente de reflexão de tensão, a eficiência, o casamento de impedância e distribuição de corrente para o nanocircuito.
- Aplicação de substrato nas nanoantenas.

6.2 Trabalhos Publicados

1. P. C. Lopes and K. Q. Costa, "Análise Comparativa de Diferentes Casos de Nanoantenas Plasmônicas no Modo de Recepção", IX Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação – ENCOM 2019, Petrolina-PE, Brasil, 2019.
2. P. C. Lopes, P. R. Amaral and K. Q. Costa, "Numerical Analysis of Different Nanoantennas in Reception Mode for Application in Optical Nanocircuits", Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2019 SBMO/IEEE MTT-S International, Aveiro, Portugal, 2019.

Referências

- [1] TINOCO, I. A.; PESSANHA, T. A. Projeto de simulação de uma antena parabólica com dois graus de liberdade. Santos, Edson Simões Dos, 2016. Citado na página 20.
- [2] BALANIS, C. Antenna theory analysis and design 3rd edition, a john wiley & sons. *Inc., Publication*, 2005. Citado na página 20.
- [3] POHL, D. Near field optics seen as an antenna problem. In: *Near-Field Optics: Principles and Applications*. [S.l.]: World Scientific, 2000. p. 9–21. Citado na página 20.
- [4] SHEGAI, T. et al. A bimetallic nanoantenna for directional colour routing. *Nature communications*, Nature Publishing Group, v. 2, p. 481, 2011. Citado na página 20.
- [5] YU, N. et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *science*, American Association for the Advancement of Science, p. 1210713, 2011. Citado na página 20.
- [6] CURTO, A. G. et al. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 329, n. 5994, p. 930–933, 2010. Citado na página 20.
- [7] ANKER, J. N. et al. Biosensing with plasmonic nanosensors. In: *Nanoscience And Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*. [S.l.]: World Scientific, 2010. p. 308–319. Citado na página 20.
- [8] TANG, L. et al. Nanometre-scale germanium photodetector enhanced by a near-infrared dipole antenna. *Nature Photonics*, Nature Publishing Group, v. 2, n. 4, p. 226, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 27.
- [9] GUO, R. et al. Ultra-compact polarization demultiplexing by a plasmonic nanoantenna on a waveguide. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *CLEO: QELS_Fundamental Science*. [S.l.], 2016. p. FF1B–5. Citado na página 20.
- [10] OBELLEIRO, F. et al. Directive antenna nanocoupler to plasmonic gap waveguides. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 38, n. 10, p. 1630–1632, 2013. Citado na página 20.
- [11] SCHULLER, J. A.; TAUBNER, T.; BRONGERSMA, M. L. Optical antenna thermal emitters. *Nature Photonics*, Nature Publishing Group, v. 3, n. 11, p. 658, 2009. Citado na página 20.
- [12] GUCLU, C. et al. Optical nanoantennas as magnetic nanoprobos for enhancing light-matter interaction. In: IEEE. *2016 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS)*. [S.l.], 2016. p. 391–393. Citado na página 20.
- [13] ZHOU, R. et al. Design of a new broadband monopole optical nano-antenna. *Journal of Applied Physics*, AIP, v. 114, n. 18, p. 184305, 2013. Citado na página 20.

- [14] COSTA, K. Q. da; DMITRIEV, V. A.; SILVANO, G. L. Impedance matching analysis of an optical nanocircuit fed by an aperture probe. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, v. 12, p. 42–56, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 39.
- [15] ALÙ, A.; ENGHETA, N. Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas. *Physical review letters*, APS, v. 104, n. 21, p. 213902, 2010. Citado na página 20.
- [16] GAO, Q.; WANG, A. X. Ultra-compact plasmonic waveguides with high efficiency dipole nanoantennas. In: IEEE. *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*. [S.l.], 2016. p. 410–411. Citado na página 20.
- [17] AFRIDI, A.; KOCABAŞ, Ş. E. Beam steering and impedance matching of plasmonic horn nanoantennas. *Optics express*, Optical Society of America, v. 24, n. 22, p. 25647–25652, 2016. Citado na página 20.
- [18] INDUSTRIAL, A. B. de D. *Estudo prospectivo nanotecnologia*. Brasília: Editora, 2010. (392 p. (Série Cadernos da indústria ABDI XX)). ISBN 978-85-61323-23-3. Citado na página 23.
- [19] PRASAD, P. N. *Nanophotonics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. Citado na página 23.
- [20] GAPONENKO, S. V. *Introduction to nanophotonics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010. Citado na página 23.
- [21] MAIER, S. A. *Plasmonics: fundamentals and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. Citado na página 23.
- [22] NOVOTNY, L.; HECHT, B. *Principles of nano-optics*. [S.l.]: Cambridge university press, 2012. Citado na página 23.
- [23] NOVOTNY, L. B. *Hecht Principles of Nano-Optics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 23, 31 e 32.
- [24] GONÇALVES, P. A. D.; PERES, N. M. *An introduction to graphene plasmonics*. [S.l.]: World Scientific, 2016. Citado na página 23.
- [25] XI, Z. et al. Tailoring the directivity of both excitation and emission of dipole simultaneously with two-colored plasmonic antenna. *Optics express*, Optical Society of America, v. 21, n. 24, p. 29365–29373, 2013. Citado na página 24.
- [26] VERCRUYSSSE, D. et al. Unidirectional side scattering of light by a single-element nanoantenna. *Nano letters*, ACS Publications, v. 13, n. 8, p. 3843–3849, 2013. Citado na página 24.
- [27] JAMES, T. et al. The plasmonic j-pole antenna. *Applied Physics Letters*, AIP, v. 102, n. 3, p. 033106, 2013. Citado na página 24.
- [28] IIZUKA, H. et al. Arm-edge conditions in plasmonic folded dipole nanoantennas. *Optics express*, Optical Society of America, v. 19, n. 13, p. 12325–12335, 2011. Citado na página 24.

- [29] SACHKOU, Y.; ANDRYIEUSKI, A.; LAVRINENKO, A. V. Impedance conjugate matching of plasmonic nanoantenna in optical nanocircuits. In: IEEE. *Proceedings ELMAR-2011*. [S.l.], 2011. p. 389–391. Citado na página 24.
- [30] LOCATELLI, A. Peculiar properties of loop nanoantennas. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 3, n. 5, p. 845–853, 2011. Citado na página 24.
- [31] MCKINLEY, A. et al. The analytical basis for the resonances and anti-resonances of loop antennas and meta-material ring resonators. *Journal of Applied Physics*, AIP, v. 112, n. 9, p. 094911, 2012. Citado na página 24.
- [32] LI, Z.; HATTORI, H. T.; FRANCO, M. A. Spiral broadband plasmonic nano-antennas. In: IEEE. *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.], 2013. p. 1–5. Citado na página 24.
- [33] SMOLYANINOV, A. et al. Broadband metacoaxial nanoantenna for metasurface and sensing applications. *Optics express*, Optical Society of America, v. 22, n. 19, p. 22786–22793, 2014. Citado na página 24.
- [34] WANG, Y.; HELMY, A. S.; ELEFTHERIADES, G. V. Ultra-wideband optical leaky-wave slot antennas. *Optics express*, Optical Society of America, v. 19, n. 13, p. 12392–12401, 2011. Citado na página 24.
- [35] SAAD-BIN-ALAM, M. et al. Hybrid plasmonic waveguide fed broadband nanoantenna for nanophotonic applications. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 27, n. 10, p. 1092–1095, 2015. Citado na página 24.
- [36] CUI, Y. et al. A thin film broadband absorber based on multi-sized nanoantennas. *Applied Physics Letters*, AIP, v. 99, n. 25, p. 253101, 2011. Citado na página 24.
- [37] HUANG, J.-S. et al. Impedance matching and emission properties of nanoantennas in an optical nanocircuit. *Nano letters*, ACS Publications, v. 9, n. 5, p. 1897–1902, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 57.
- [38] NOVOTNY, L. From near-field optics to optical antennas. *Phys. Today*, v. 64, n. 7, p. 47–52, 2011. Citado na página 24.
- [39] KRASNOK, A. E. et al. Optical nanoantennas. *Physics-Uspekhi*, IOP Publishing, v. 56, n. 6, p. 539, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- [40] SIKDAR, D.; CHENG, W.; PREMARATNE, M. Optically resonant magneto-electric cubic nanoantennas for ultra-directional light scattering. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, v. 117, n. 8, p. 083101, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- [41] PUNJ, D. *Optical antennas for single molecule fluorescence detection at physiological concentration*. Tese (Doutorado), 2014. Citado na página 26.
- [42] ATWATER, H. A.; POLMAN, A. Plasmonics for improved photovoltaic devices. In: *Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group*. [S.l.]: World Scientific, 2011. p. 1–11. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

- [43] BIAGIONI, P.; HUANG, J.-S.; HECHT, B. Nanoantennas for visible and infrared radiation. *Reports on Progress in Physics*, IOP Publishing, v. 75, n. 2, p. 024402, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- [44] LINDQUIST, N. C. et al. Engineering metallic nanostructures for plasmonics and nanophotonics. *Reports on Progress in Physics*, IOP Publishing, v. 75, n. 3, p. 036501, 2012. Citado na página 28.
- [45] MOHAMMAD, M. A. et al. Fundamentals of electron beam exposure and development. In: *Nanofabrication*. [S.l.]: Springer, 2012. p. 11–41. Citado na página 28.
- [46] CLEARY, A. et al. Fabrication of double split metallic nanorings for raman sensing. *Microelectronic Engineering*, Elsevier, v. 86, n. 4-6, p. 1146–1149, 2009. Citado na página 28.
- [47] ZHAO, X.-M.; XIA, Y.; WHITESIDES, G. M. Soft lithographic methods for nano-fabrication. *Journal of Materials Chemistry*, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 7, p. 1069–1074, 1997. Citado na página 28.
- [48] SCHIFT, H. Nanoimprint lithography: 2d or not 2d? a review. *Applied Physics A*, Springer, v. 121, n. 2, p. 415–435, 2015. Citado na página 28.
- [49] YANG, Z. et al. Fdtd for plasmonics: Applications in enhanced raman spectroscopy. *Chinese Science Bulletin*, Springer, v. 55, n. 24, p. 2635–2642, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- [50] SULLIVAN, D.; LIU, J.; KUZYK, M. Three-dimensional optical pulse simulation using the fdtd method. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, IEEE, v. 48, n. 7, p. 1127–1133, 2000. Citado na página 29.
- [51] TSUKERMAN, I. Long-range interactions in free space. *Computational Methods for Nanoscale Applications: Particles, Plasmons and Waves*, Springer, p. 239–279, 2008. Citado na página 30.
- [52] SILVESTER, P. P.; FERRARI, R. L. *Finite elements for electrical engineers*. [S.l.]: Cambridge university press, 1996. Citado na página 30.
- [53] SOUZA, N. W. P. d. et al. Desenvolvimento de um algoritmo computacional mom 3d aplicado em nanoplasmônica. Universidade Federal do Pará, 2012. Citado na página 30.
- [54] CHENG, A. H.-D.; CHENG, D. T. Heritage and early history of the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 268–302, 2005. Citado na página 30.
- [55] POLJAK, D.; BREBBIA, C. A. *Boundary element methods for electrical engineers*. [S.l.]: WIT Press, 2005. v. 4. Citado na página 30.
- [56] ADAMS, T.; SMITH, S. *Communication shock: the rhetoric of new technology*. [S.l.]: Cambridge Scholars Publishing, 2015. Citado na página 30.
- [57] HARRINGTON, R. F. *Field computation by moment methods*. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 1993. Citado na página 30.

- [58] COSTA, K. Q. da; DMITRIEV, V. Numerical analysis of cylindrical nanodipoles by linear moment method. In: IEEE. *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*. [S.l.], 2011. p. 478–482. Citado na página 30.
- [59] COSTA, K. Q. da; DMITRIEV, V. Aplicação do método dos momentos linear para análise de nanoantenas cilíndricas. *XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações–SBrT’11*, 2011. Citado na página 30.
- [60] SOUZA, J. L. de; COSTA, K. Q. da. Análise da impedância de entrada de nanodipolos cilíndricos utilizando o método dos momentos. 2012. Citado na página 30.
- [61] RAKIĆ, A. D. et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Applied optics*, Optical Society of America, v. 37, n. 22, p. 5271–5283, 1998. Citado na página 32.
- [62] JOHNSON, P. B.; CHRISTY, R.-W. Optical constants of the noble metals. *Physical review B*, APS, v. 6, n. 12, p. 4370, 1972. Citado na página 32.
- [63] AFONSO, M. *Métodos híbridos na solução de problemas de espalhamento eletromagnético. 2003. 120 f.* Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)—Escola de Engenharia, Universidade . . . , 2003. Citado na página 32.
- [64] SOUZA, R. M. de. O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. *Apostila, Universidade Federal do Pará, Belém*, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 34.
- [65] SILVANO, G. L. et al. Aplicações do comsol no estudo de nanopartículas plasmônicas. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 36.
- [66] MIRLISENNA, G. *Blog ESSS: Método dos Elementos Finitos: o que é?, 22 de janeiro de 2016. Acessado em: 29 de setembro de 2019.* Citado na página 33.
- [67] MULTIPHYSICS, C. *RF Module User’s Guide*. [S.l.]: comsol 5.2 edition, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 38.
- [68] SOUZA, J. L. d. et al. Combinação de antenas dipolo e espira para aplicações em banda larga em nanocircuito óptico. Universidade Federal do Pará, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 42.
- [69] COSTA, K. Q. da; DMITRIEV, V. Radiation and absorption properties of gold nanodipoles in transmitting mode. *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley Online Library, v. 57, n. 1, p. 1–6, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 43.
- [70] ZHANG, K. et al. *Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics*. [S.l.]: Springer, 1998. Citado na página 58.