

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

ANTENA DE GRAFENO COMPOSTA DE DIPOLO-ESPIRA PARA AUMENTO DA  
LARGURA DE BANDA

RODRIGO GUIMARÃES DE AZEVEDO

DM 09/2017

UFPA/ ITEC/ PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará - Brasil  
2017



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

RODRIGO GUIMARÃES DE AZEVEDO

ANTENA DE GRAFENO COMPOSTA DE DIPOLO-ESPIRA PARA AUMENTO DA  
LARGURA DE BANDA

DM 09/2017

UFPA/ ITEC/ PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará - Brasil  
2017

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

RODRIGO GUIMARÃES DE AZEVEDO

ANTENA DE GRAFENO COMPOSTA DE DIPOLO-ESPIRA PARA AUMENTO DA  
LARGURA DE BANDA

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  
2017

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

**“ANTENA DE GRAFENO COMPOSTA DE DIPOLO-ESPIRA PARA  
AUMENTO DA LARGURA DE BANDA”**

AUTOR: **RODRIGO GUIMARÃES DE AZEVEDO**

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.

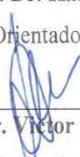
APROVADA EM: 17/02/2017

**BANCA EXAMINADORA:**



---

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



---

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



---

**Prof. Dr. Fabricio José Brito Barros**  
(Avaliador Externo ao Programa – CAMTUC/UFPA)

**VISTO:**

---

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dados Internacionais de Catalogação - na - Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da  
UFPA

---

Azevedo, Rodrigo Guimarães de, 1990 -

Antena de grafeno composta de dipolo-espira para aumento da largura de banda / Rodrigo  
Guimarães de Azevedo.- 2017.

Orientador: Karlo Queiroz da Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto  
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica , Belém, 2017.

1. Campos eletromagnéticos – modelos matemáticos. 2. Antenas de microfita. 3.  
Composto de carbono. 4. Rádio - antenasI. Título.

CDD 23. ed. 530.141

---

*A Deus porque sem ele não seria nada, a minha mãe pelo apoio, a minha família que apesar de estar longe eu posso contar com ela, e aos amigos por estarem do meu lado sempre que precisar.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças, por me amparar em momentos difíceis, por estar comigo em todos os momentos, pelo dom da vida, enfim por tudo. Sem Ele não seria nada nem ninguém.

Agradeço a minha mãe, pela força, dedicação, apoio moral e financeiro, por nunca desistir de mim, e, principalmente, pelo seu amor incondicional.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa, pela sua orientação para que este trabalho finalmente fosse concluído, bem como pela sua paciência, compreensão, ensinamento.

Agradeço ao Prof. Dr. Victor Alexandrovich Dmitriev, pela sua ajuda, orientação em momentos difíceis e pelo ensinamento.

Agradeço aos colegas do laboratório de nanofotônica e nanoeletrônica (Carlos Rafael, Daiman, Clerisson, Ewerton, Marcelino, Leno) que me ajudaram com as simulações, com dúvidas, pelos momentos de descontração e confraternização

Agradeço aos meus amigos de longas datas que sempre que podemos, nós nos encontramos para matar a saudade. Em especial a Bel e a Bruna. E aos novos, em especial ao Felipe, que me ajudou me dando forças, me incentivando e sempre me auxiliando quando necessitava.

Agradeço à CNPQ pela concessão de bolsa de mestrado e ajuda financeira.

*Nas grandes batalhas da vida, o primeiro  
passo para a vitória é o desejo de vencer.*

**Mahatma Gandhi**

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b> .....	19
1.1 Organização do Trabalho.....	21
<b>2. Propriedades do Grafeno</b> .....	22
2.1 Estrutura Cristalina do Grafeno .....	24
2.1.1 Rede Direta.....	24
2.1.2 Rede Recíproca.....	25
2.2 Estrutura Eletrônica do Grafeno .....	27
2.3 Propriedades do Grafeno .....	28
2.3.1 Propriedades Elétricas .....	28
2.3.2 Propriedades Térmicas .....	28
2.3.3 Propriedades Mecânicas .....	29
2.3.4 Propriedades Ópticas .....	29
2.4 Produções do Grafeno.....	29
2.4.1 Esfoliação Micromecânica .....	30
2.4.2 Decomposição Química da Fase Vapor .....	31
2.4.3 Crescimento Epitaxial em SiC.....	31
2.4.4 Esfoliação Química em Fase Líquida.....	31
2.5 A Energia de Fermi e o Potencial Químico ( $\mu_C$ ) .....	32
2.5.1 Método de Variação do Potencial Químico ( $\mu_C$ ).....	32
2.6 Nanofotônica.....	33
2.7 Nanoplasmonica.....	34
2.8 Considerações Finais .....	34
<b>3. Método dos Momentos para Análise de Antenas de Grafeno</b> .....	36
3.1 Método dos Momentos .....	38
3.2 Equação Integral dos Potenciais .....	39
3.3 Método dos Momentos Aplicado ao Problema da Antena de Grafeno Composta de Dipolo-Espira.....	40
3.4 Considerações Finais .....	45
<b>4. Dipolo de Grafeno Retangular</b> .....	46
4.1 Validação da Formulação Numérica Proposta.....	46
4.2 Considerações Finais .....	53
<b>5. Antena de Grafeno Dipolo-Espira: Alteração da Geometria da Espira</b> .....	54
5.1 Modificando a Geometria da Espira Circular .....	54
5.2 Considerações Finais .....	63
<b>6. Antena de Grafeno Dipolo-Espira: Alteração do Potencial Químico da Espira</b> .....	65

6.1	Modificando o Potencial Químico da Espira Circular .....	65
6.2	Considerações Finais .....	75
<b>7.</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>76</b>
7.1	Publicações Geradas .....	77
<b>8.</b>	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>78</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Grafite e sua Estrutura Molecular.....	22
Figura 2.2. Grafeno (Canto Superior) e Estruturas Relacionadas: Fulereo (Canto Inferior Esquerdo); Nanotubo de Carbono (Canto Inferior Central) e Grafite (Canto Inferior Direito).....	23
Figura 2.3. Potenciais Aplicações que o Grafeno tem a Oferecer Dependendo da sua Resistividade de Folha.....	24
Figura 2.4. Rede Direta do Grafeno. Os Átomos do Carbono Estão Representados pelos Pontos Vermelho e Azul e as Linhas que Ligam Eles Representam as Ligações Covalentes. A e B Representam os Dois Átomos Base de uma Rede de Bravais.....	25
Figura 2.5. Rede Recíproca do Grafeno. Em Azul, Temos a Primeira Zona de Brillouin.....	26
Figura 2.6. Relação da Dispersão dos Elétrons $\pi$ na Primeira Zona de Brillouin (Espaço Recíproco).....	27
Figura 2.7. Gráfico Representando os Diferentes Métodos de Síntese do Grafeno em Relação ao Número de Patentes.....	30
Figura 3.1. Malha de Discretização Uniforme da Antena de Microfita Retangular.....	41
Figura 3.2. Elemento de Corrente Genérico de Índice I da Malha de Discretização.....	42
Figura 4.1. Geometria da Antena de Microfita Retangular Usando as Mesmas Dimensões de (TAMAGNONE, 2012b). Dados: $W = 10\mu\text{m}$ , $L = 17\mu\text{m}$ , $G = 2\mu\text{m}$ e $\mu_C = 0.13 \text{ eV}$ .....	47
Figura 4.2. Distribuição da Corrente Superficial da Microfita Retangular de Grafeno da Figura 1 obtida na 1ª Frequência de Ressonância ( $F1 = 0,89\text{THz}$ ).....	48
Figura 4.3. Distribuição da Corrente Superficial da Microfita Retangular de Grafeno da Figura 1 Obtida na 2ª Frequência de Ressonância ( $F2 = 1,34\text{THz}$ ).....	48
Figura 4.4. Variação da Impedância de Entrada Rin Versus Frequência para Diferentes Valores de Potencial Químico $\mu_C$ .....	49

Figura 4.5. Variação da Reatância de Entrada $X_{in}$ Versus Frequência para Diferentes Valores de Potencial Químico $\mu_c$ .....	49
Figura 4.6. Comparação da Impedância de Entrada da Antena 1 de (TAMAGNONE, 2012b) com o MoM, o Comsol e a Referência.....	50
Figura 4.7. Comparação da Impedância de Entrada da Antena 2 de (TAMAGNONE, 2012b) com o MoM e Comsol.....	50
Figura 4.8. Coeficiente de Reflexão para a Antena 1 de (TAMAGNONE, 2012b) Comparando os Três Métodos: do MoM, do Comsol e da Referência.....	51
Figura 4.9. Coeficiente de Reflexão para a Antena 2 de (TAMAGNONE, 2012b) Comparando os Três Métodos: do MoM, do Comsol e da Referência.....	51
Figura 4.10. Eficiência de Radiação para Ambas as Antenas de (TAMAGNONE, 2012b) Comparando os Três Métodos: do MoM, do Comsol e da Referência.....	52
Figura 5.1. Geometria da Antena de Grafeno Composta de Dipolo e Espira Circular.....	55
Figura 5.2. Geometria e Malha do MoM-2D de Exemplos da Antena de Grafeno Composta com Diferentes Valores do Raio Interno. (a) $R_1 = 0,4 \times R_2$ . (b) $R_1 = 0,6 \times R_2$ . (c) $R_1 = 0,8 \times R_2$ . E com Diferentes Valores do Raio Externo $R_2$ , sendo o Raio Interno Fixo $R_1 = 0,4 \times R_2$ . (d) $R_2 = 4 \mu m$ . (e) $R_2 = 7 \mu m$ (f) $R_2 = 10 \mu m$ .....	55
Figura 5.3. Resistência de Entrada para Raios Externos entre 3 a 6 $\mu m$ .....	57
Figura 5.4. Reatância de Entrada para Raios Externos entre 3 a 6 $\mu m$ .....	57
Figura 5.5. Resistência de Entrada para Raios Externos entre 7 a 10 $\mu m$ .....	58
Figura 5.6. Reatância de Entrada para Raios Externos entre 7 a 10 $\mu m$ .....	58
Figura 5.7. Coeficiente de Reflexão para Raios Externos entre 3 a 6 $\mu m$ .....	59
Figura 5.8. Coeficiente de Reflexão para Raios Externos entre 7 a 10 $\mu m$ .....	59

Figura 5.9. Diagrama de Radiação 2D no Plano $\theta = 0$ para o caso $R2 = 7 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ para a 1ª Ressonância.....	62
Figura 5.10. Diagrama de Radiação 2D no Plano $\theta = 0$ para o caso $R2 = 7 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ para a 2ª Ressonância.....	62
Figura 5.11. Diagrama de Radiação 3D para o caso $R2 = 7 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ para a 1ª Ressonância.....	63
Figura 5.12. Diagrama de Radiação 3D para o caso $R2 = 7 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ para a 2ª Ressonância.....	63
Figura 6.1. Geometria e Malha do MoM-2D da Antena de Grafeno Composta com Espira Circular com Dimensão: $R2 = 5 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ .....	65
Figura 6.2. Resistência de Entrada da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões: $R2 = 5 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ .....	66
Figura 6.3. Reatância de Entrada da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões: $R2 = 5 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ .....	66
Figura 6.4. Coeficiente de Reflexão da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões: $R2 = 5 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ . Sem o $\mu_C = 0,03$ .....	68
Figura 6.5. Coeficiente de Reflexão da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões: $R2 = 5 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1 \mu\text{m}$ . Somente do $\mu_C = 0,03$ .....	69
Figura 6.6. Diagrama de Radiação 2D no plano $\theta = 0$ para o caso $\mu_C = 0,1$ para a 1ª Ressonância.....	70
Figura 6.7. Diagrama de Radiação 2D no plano $\theta = 0$ para o caso $\mu_C = 0,1$ para a 2ª Ressonância.....	70
Figura 6.8. Diagrama de Radiação 3D para o caso $\mu_C = 0,1$ para a 1ª Ressonância.....	71
Figura 6.9. Diagrama de Radiação 3D para o caso $\mu_C = 0,1$ para a 2ª Ressonância.....	71

- Figura 6.10. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0 eV feita no Cmsol..... 72
- Figura 6.11. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,03 eV feita no Cmsol..... 73
- Figura 6.12. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,07 eV feita no Cmsol..... 73
- Figura 6.13. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,1 eV feita no Cmsol..... 74
- Figura 6.14. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,13 eV feita no Cmsol..... 74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Comparação entre as Frequências de Ressonância Calculadas por Diferentes Métodos.....	47
Tabela 4.2. Largura de Banda Percentual para as Duas Antenas de (TAMAGNONE, 2012b).....	52
Tabela 5.1. Largura de Banda Percentual da Antena de Grafeno Composta para Diferentes Valores dos Raios R1 e R2.....	60
Tabela 5.2. Frequências de Ressonância da Antena de Grafeno Composta para o caso da Espira com Dimensões $R2 = 7 \mu\text{m}$ , $R1 = 0,4 \times R2$ e $H = 1\mu\text{m}$ .....	61
Tabela 6.1. Largura de Banda Percentual da Antena Dipolo-Espira de Grafeno para Diferentes Valores de $\mu_C$ .....	67
Tabela 6.2. Frequências de Ressonância da Antena de Grafeno Composta para o caso da Espira com $\mu_C = 0,1$ .....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

THz	Terahertz
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
HIS	High Impedance Surface
MNG-TL	Mu-Negative Transmission Line
SiGe	Silício-germânico
GaN	Nitreto de gálio
MoM-2D	Método dos Momentos 2D
MoM	Método dos Momentos
OLED	Organic Light-Emitting Diode
LCD	Liquid-Crystal Display
ZB	Zonas de Brillouin
Nm	Nanômetro
Mm	Micrometro
AFM	Atomic-Force Microscopy
CVD	Chemical Vapor Deposition
SiC	Carbeto de Silício
Si	Silício
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
FDTD	Finite-Difference Time-Domain Method
BEM	Boundary Element Method
ABC	Absorbing Boundary Condition
SPPs	Surface Plasmons Polarations

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma antena de grafeno composta por um dipolo planar e uma espira circular para aumento da largura de banda na faixa do terahertz. O dipolo é alimentado por uma fonte de tensão no seu gap e a espira circular é uma antena parasita sem alimentação via conexão física com o dipolo. É utilizado o método dos momentos bidimensional (MoM-2D) com impedância superficial para análise numérica dessa antena composta. São investigadas a influência da geometria e do potencial químico da antena parasita sobre a impedância de entrada e a largura de banda, com o objetivo de se obter operação em banda larga.

Palavras-Chaves: Antenas de Grafeno, Antenas de Banda Larga em Terahertz, Combinação Dipolo-Espira, Método dos Momentos.

## ABSTRACT

This work presents a graphene antenna composed by a planar dipole and a circular loop for increasing bandwidth in the terahertz range. The dipole is fed by a voltage source in its gap and the circular loop is a parasitic antenna without physical connection with dipole. The two-dimensional method of moments (MoM-2D) with surface impedance is used for numerical analysis of this antenna compound antenna. It is investigated the influence of geometry and the chemical potential of loop element on the input impedance and bandwidth of the dipole element, with objective to obtain broadband operation.

Keywords: Graphene Antennas, Terahertz Broadband Antennas, Dipole-Loop Antennas, Method of Moment

# 1.Introdução

Ao longo dos últimos anos, o tráfego de dados sem fio aumentou drasticamente devido a uma mudança na forma como a sociedade atual cria, compartilha e consome informação. Cada vez mais usuários estão conectados e necessitam de mais dados seja para navegar pela internet, acessar redes sociais, e-mail, fazer transações bancárias e outras coisas. Segundo Cherry (2004), a taxa de dados entre 8 a 10 meses dobrou ao longo das últimas três décadas. Esse cenário tem sido acompanhado por uma crescente demanda por maior velocidade de comunicação em qualquer lugar e a qualquer hora. Para sanar esses problemas, soluções avançadas de camada física e, mais importante, novas bandas espectrais estão sendo requeridas para suportar estas taxas de dados extremamente altas (AKYILDIZ,2014).

A comunicação na banda do terahertz (THz) é vista como uma tecnologia sem fio que pode satisfazer essa demanda, pois é uma alternativa para as limitações de capacidade dos sistemas sem fio atuais, permitindo uma infinidade de aplicações (KOCH, 2007; PIESIEWICZ, 2007; FEDERICI, 2010; HUANG, 2011; KLEINE-OSTMANN, 2011; SONG, 2011; KÜRNER, 2014). A faixa do THz é a banda espectral que compreende as frequências entre 0,1 THz e 10 THz e embora as regiões de frequência imediatamente abaixo e acima dessa faixa (as micro-ondas e o infravermelho distante, respectivamente) têm sido amplamente estudados, o terahertz ainda é uma das menos exploradas faixas de frequências para comunicação (AKYILDIZ,2014).

Isso porque existem poucos materiais capazes de trabalhar nessa faixa de frequência e consequentemente existem poucos dispositivos fabricados para essa faixa, por isso a intensa pesquisa de materiais que sejam capazes de operar no THz e, mais importante ainda, capazes de explorar a grande largura de banda disponível. Alguns materiais semicondutores como o silício-germânico (SiGe), CMOS, nitreto de gálio (GaN) têm sido considerados como materiais que podem trabalhar na faixa do THz. Outro material que pode ser usado para criação desses dispositivos é o grafeno.

O grafeno é uma monocamada de átomos de carbono arranjados em uma rede hexagonal bidimensional em forma de favo de mel (GEIM, 2007). As excepcionais propriedades do grafeno como a mobilidade dos elétrons excessivamente alta, a espessura da camada atômica, a possibilidade de miniaturizar antenas e muitas outras propriedades fazem do grafeno um dos materiais promissores em muitas áreas desde células solares (FANG, 2012) até transistores de velocidades ultrarrápidas (SCHWIERZ, 2017).

Significantes benefícios podem ser obtidos pelas antenas de grafeno em aplicações de telecomunicações como, por exemplo, a integração monolítica com nanoeletrônicos de grafeno em rádio frequência, o ajuste dinâmico eficiente através do potencial químico, as perdas relativamente baixas na banda de terahertz (THz) e a possibilidade de miniaturização de antenas devido a efeito plasmônico comum em metamateriais (PERRUISSEAU-CARRIER, 2012; TAMAGNONE, 2012a).

Antenas dipolo de grafeno baseados em modos plasmônicos têm sido recentemente propostos para frequências no terahertz e no infravermelho distante (TAMAGNONE, 2012a; PERRUISSEAU-CARRIER, 2012; FILTER, 2013; GOMEZ-DIAZ, 2013; LLATSER, 2012). (RADWAN, 2015) propôs uma antena patch retangular que, adicionando ressonadores em anel dividido em uma camada inferior do substrato, conseguiu aumentar as propriedades de largura de banda e de radiação. (WU, 2016) propôs uma antena Yagi-Uda com duas antenas parasitas de grafeno e que, alterando propriedades delas, conseguiu alterar o diagrama de radiação e aumentar a largura de banda. (CHENG, 2016) propôs uma antena circular MNG-TL (do inglês, Mu-Negative Transmission Line) com uma antena circular refletora de grafeno e metal a fim de aumentar a eficiência de radiação devido ao pequeno tamanho elétrico da antena MNG-TL. (TAMAGNONE, 2012a) propôs um arranjo de antenas planares de grafeno para aumentar a impedância de entrada pela minimização da perda de retorno quando conectadas as antenas ao photomixer<sup>1</sup>.

Porém, como já mencionado anteriormente, dispositivos que trabalhem na faixa do THz e que sejam fabricados usando o grafeno como matéria-prima são poucos (AKBARI, 2015; ASIF, 2016; SAJAL, 2015; SAJAL, 2016). Isso porque um dos grandes desafios na comercialização do grafeno é produzir material de alta qualidade, em grande escala, a um baixo custo e de forma reprodutível seja pelas características inertes do grafeno como impurezas e rugas nas folhas de grafeno, por exemplo, que podem acarretar efeitos adversos sobre suas propriedades eletrônicas e ópticas; seja na utilização de produtos químicos tóxicos para síntese do grafeno por meios convencionais; ou seja pela complexidade e alto custo do processo de produção do grafeno (NANO WERK, 2012).

Este trabalho visa contribuir apresentando uma antena de grafeno composta de uma microfita dipolo planar e uma espira circular com o intuito de aumentar a largura de banda da

---

<sup>1</sup> Dispositivo semiconductor que é excitado por um par de lasers, este produzirá uma corrente alternada da diferença de frequência dos lasers – frequência do THz – e que alimentará a antena para a emissão na faixa do THz (CARPINTERO,2015).

antena de microfita (cuja está sendo alimentada) alterando as características paramétricas (raio interno, raio externo e altura entre elas) e de potencial químico do grafeno na espira circular (cuja é uma antena parasita, sem alimentação).

É feita uma análise teórica, sendo essa análise feita pelo método dos momentos bidimensional (MoM-2D) com impedância superficial. São calculadas a impedância de entrada, coeficiente de reflexão e o diagrama de radiação para os diversos parâmetros geométricos e de potencial químico da espira circular em uma faixa de 0,5 a 2THz. Alguns resultados são calculados com o software Comsol (COMSOL,2017) com o intuito de validar nosso método.

## 1.1 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

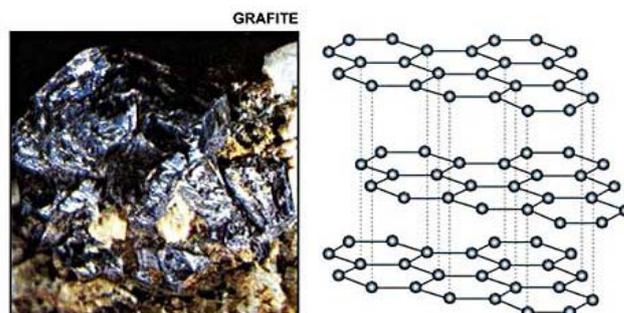
- O capítulo 2 abrange o grafeno e suas propriedades, suas formas de obtenção e as dificuldades de fabrica-lo em larga escala.
- O capítulo 3 abrange sobre os tipos de análise numéricos para antenas ópticas e o método usado neste trabalho: método dos momentos.
- O capítulo 4 abrange sobre uma análise da antena microfita dipolo retangular planar isolada e a validação do método criado neste trabalho.
- O capítulo 5 abrange sobre uma análise da antena de grafeno composta e seus efeitos.
- O capítulo 6 abrange sobre uma análise da alteração do potencial químico da espira circular e seus efeitos.
- O capítulo 7 é a conclusão do trabalho, trabalhos futuros e publicação gerada.

## 2. Propriedades do Grafeno

Grafeno é um material artificial formada por uma rede cristalina bidimensional de átomos de carbono em formato hexagonal na forma de favo de mel (GEIM, 2007). Pode ser obtido a partir do grafite (um dos alótropos do carbono<sup>2</sup>) o qual é composto por infinitas camadas de átomos de carbono e sendo cada camada chamada de folha de grafeno, ou simplesmente grafeno (ver Figura 2.1). Por ser formado por átomos de carbonos, dizemos que o grafeno é um de seus alótropos, com hibridação  $sp^2$  e ângulo de  $120^\circ$  entre seus átomos.

Idealmente, o grafeno é um material de camada única, mas amostras de grafeno com duas ou mais camadas estão sendo investigadas como o mesmo interesse. Pode-se definir três tipos diferentes de grafeno: grafeno de camada simples (do inglês, *single layer graphene*), grafeno de duas camadas (do inglês, *bilayer graphene*) e grafeno de poucas camadas (do inglês, *few-layer graphene*).

Figura 2.1 - Grafite e sua estrutura molecular



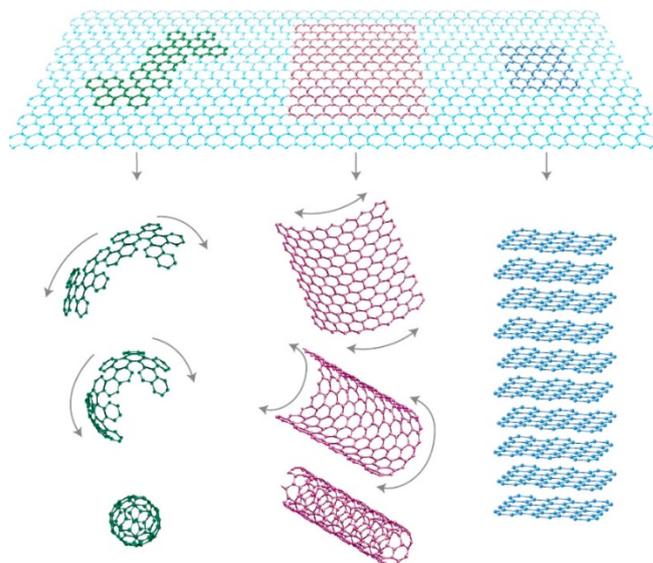
Fonte: Infopédia, 2003<sup>3</sup>.

O grafeno é descrito como a base de outros alótropos do carbono devido ser essencialmente a matriz deles, como os nanotubos de carbono (folha de grafeno enroladas em um formato cilíndrico), os fulerenos (folha de grafeno em formato esferoidal) e o próprio grafite (folhas de grafeno empilhadas mantidas unidas por uma força de Van der Waals).

<sup>2</sup> Alotropia é o processo em que um mesmo elemento químico origina substâncias simples diferentes

<sup>3</sup> Artigos de Apoio: Grafite. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/\\$grafite](https://www.infopedia.pt/$grafite)>. Acesso em: 26 fev. 2017.

Figura 2.2 - Grafeno (Canto Superior) e Estruturas Relacionadas: Fulereo (Canto Inferior Esquerdo); Nanotubo de Carbono (Canto Inferior Central) e Grafite (Canto Inferior Direito).



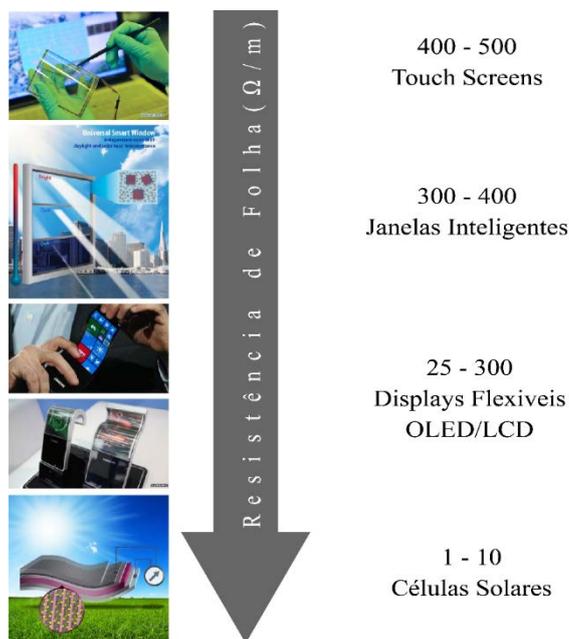
Fonte: GEIM, 2007

As propriedades mais importantes do grafeno são Efeito de Hall Quântico em temperatura ambiente (NOVOSELOV, 2005), efeito de campo elétrico ambipolar juntamente com a condução balística de portadores de carga (ZHANG, 2005), banda de gap ajustável (NOVOSELOV, 2007) e elevada elasticidade (NOVOSELOV, 2004b).

Quase uma década de pesquisa de grafeno prometeu aplicações potenciais, incluindo baterias de maior duração (ZHAO, 2011), células solares mais eficientes (WANG, 2013), prevenção de corrosão (PRASAI, 2012), placas de circuito (HYUN, 2013), painéis de exibição (RADIVOJEVIC, 2012) e tecnologias medicinais como *point-of-care*<sup>4</sup> para detecção de doenças (BONANNI, 2011).

<sup>4</sup> No Brasil são conhecidos como Testes Laboratoriais Remotos ou Testes Rápidos. São exames feitos inicialmente à beira do leito do paciente com o intuito de dar uma resposta rápida e que possa levar à confirmação ou a uma possível mudança no tratamento (CONTROL LAB, 2017)

Figura 2.3 - Potenciais Aplicações que o Grafeno tem a Oferecer Dependendo da sua Resistividade de Folha.



Fonte: RANDVIIR, 2014 (adaptado pelo autor)

## 2.1 Estrutura Cristalina do Grafeno

Para entendermos as propriedades físicas do grafeno, uma análise da sua estrutura cristalina é fundamental. Podemos fazer essa análise seja no espaço da posição (medido em metros) seja no espaço recíproco (medido em  $\text{metros}^{-1}$ ) – tendo este uma íntima ligação com a periodicidade da rede direta.

### 2.1.1 Rede Direta

Um cristal é um arranjo periódico de átomos ou moléculas em um padrão particular. Podemos descrever sua estrutura como uma célula unitária periódica, formada por um grupo de átomos agrupados formando uma rede, chamada de rede de Bravais<sup>5</sup>. A posição dos vários pontos da rede pode ser determinada por um conjunto de vetores  $\vec{a}_i$  da rede de Bravais, denominados de vetores primitivos, tendo a propriedade de preencher todo o espaço. Estes vetores são denominados a partir de combinações lineares dos vetores-base primitivos definidos pela célula unitária da rede cristalina.

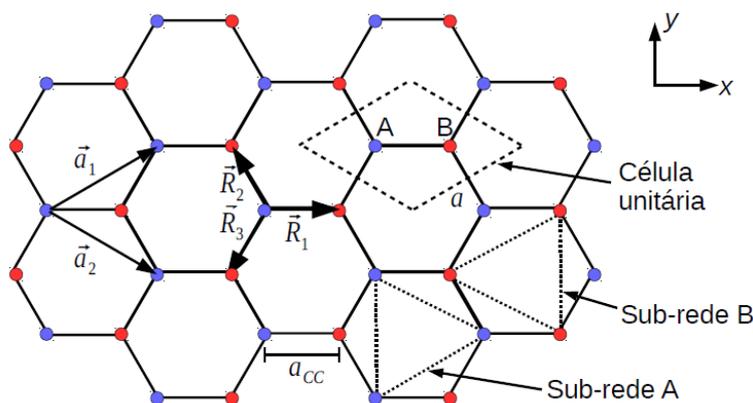
<sup>5</sup> Um conjunto de infinito de pontos discretos com um arranjo e orientação que aparece exatamente a mesma, independente dos pontos pelo qual a rede é observada (UNICAMP, 2017)

O grafeno pode ser classificado com uma rede de Bravais tomando como base dois átomos (A e B), que se distanciam em entre eles a uma distância de  $a_0 = 1,42 \text{ \AA}$  e se deslocam nas direções dos vetores-base  $\vec{a}_1$  e  $\vec{a}_2$  e são definidos por

$$\vec{a}_1 = \frac{3a_0}{2}i + \frac{a_0\sqrt{3}}{2}j \quad (2.1)$$

$$\vec{a}_2 = \frac{3a_0}{2}i - \frac{a_0\sqrt{3}}{2}j \quad (2.2)$$

Figura 2.4 - Rede Direta do Grafeno. Os Átomos do Carbono Estão Representados pelos Pontos Vermelho e Azul e as Linhas que Ligam Eles Representam as Ligações Covalentes. A e B Representam os Dois Átomos Base de uma Rede de Bravais.



Fonte: RODRIGUES, 2015, p. 9

### 2.1.2 Rede Recíproca

A rede recíproca é obtida através da rede direta em que a periodicidade do agrupamento dos átomos de um cristal estabelece condição ideal para análise de suas propriedades a partir da transformada de Fourier. A importância da análise no domínio recíproco se dá nas propriedades de materiais cristalinos, como por exemplo, análise das curvas de dispersão, análise da difração de feixes de radiação, efetuar cálculos que envolvam superfícies ou planos, análise da propagação de onda no interior do cristal, seja por elétrons seja por vibrações da rede (KITTEL, 1996; DOVE, 2002). Outro ponto importante é que “é na rede recíproca que se pode desenhar as Zonas de Brillouin (ZB), que são regiões formadas pelas sucessivas regiões vizinhas de um ponto qualquer no espaço recíproco” (COSTA, 2016a, p. 18).

Para o grafeno, podemos desenhar a rede recíproca tomando o centro da célula unitária (simbolizado por  $\Gamma$ ) como ponto de referência e ligando-o aos centros das células vizinhas,

passando pelo ponto médio da ligação entre A e B (simbolizado por M). Os vetores base, que também podem ser obtidos pelos vetores da rede direta, são:

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{3a_0}i + \frac{2\pi}{a_0\sqrt{3}}j$$

$$\vec{b}_2 = \frac{2\pi}{3a_0}i - \frac{2\pi}{a_0\sqrt{3}}j$$

Esses dois vetores,  $\vec{b}_1$  e  $\vec{b}_2$ , definem a zona de Brillouin do grafeno.

As distâncias entre o centro, o ponto médio de suas arestas e os seus vértices (simbolizado por K e K') são:

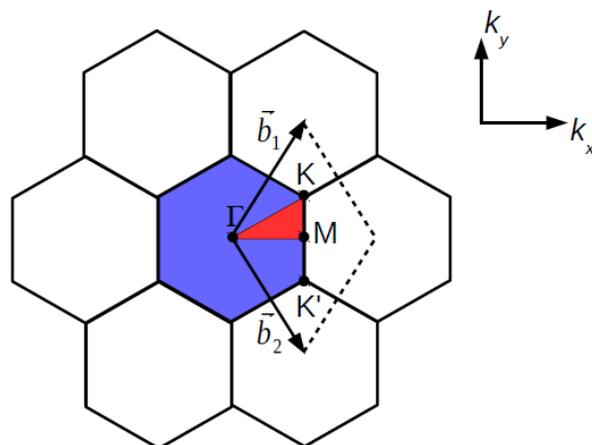
$$\vec{\Gamma M} = \frac{2\pi}{3a_0}i \quad (2.5)$$

$$\vec{\Gamma K} = \frac{2\pi}{3a_0}i + \frac{2\pi}{3a_0\sqrt{3}}j \quad (2.6)$$

$$\vec{\Gamma K'} = \frac{2\pi}{3a_0}i - \frac{2\pi}{3a_0\sqrt{3}}j \quad (2.7)$$

$$\vec{KM} = -\frac{2\pi}{3a_0\sqrt{3}}j \quad (2.8)$$

Figura 2.5 - Rede Recíproca do Grafeno. Em Azul, Temos a Primeira Zona de Brillouin.



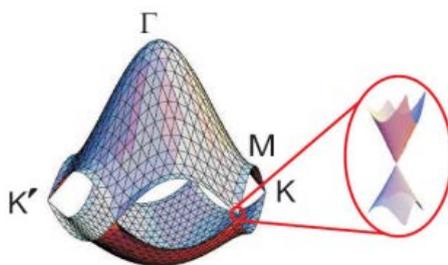
Fonte: RODRIGUES, 2015, p. 11

## 2.2 Estrutura Eletrônica do Grafeno

Como já mencionado, o grafeno possui hibridização  $sp^2$ , na qual os átomos de carbono se ligam através de ligações covalentes (do tipo  $\sigma$ ). A configuração eletrônica dos átomos de carbono é:  $1s^2 2s^2 2p^2$ . Na estrutura cristalina do grafeno, um dos elétrons do segundo número quântico azimutal<sup>6</sup> é excitado e passa para o próximo nível de maior energia (p). Assim, a configuração eletrônica de cada um dos seus átomos passa a ser:  $1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$ . Os subníveis  $2s$ ,  $2p_x$  e  $2p_y$  agora formam três ligações covalentes (do tipo  $\sigma$ ), devido a sobreposição dos orbitais  $sp^2$ , e o subnível  $2p_z$  forma uma ligação covalente (do tipo  $\pi$ ) – perpendicular ao plano do grafeno. Os elétrons deste subnível estão ligados fracamente aos átomos de carbono, possibilitando que eles possam locomover-se pela rede cristalina ou serem excitados para níveis eletrônicos mais energéticos. Este estado eletrônico, chamado de  $\pi$  delocalizado, é o responsável pela condutividade elétrica do grafeno.

Os dois elétrons livres  $\pi$  dos dois átomos de carbonos se distribuem em uma estrutura composta de uma banda de valência ( $\pi$ , estados ligantes) e uma banda de condução ( $\pi^*$ , estados anti-ligantes).

Figura 2.6 - Relação da Dispersão dos Elétrons  $\pi$  na Primeira Zona de Brillouin (Espaço Recíproco).



Fonte: NASCIMENTO, 2013, p. 5

Os pontos em que a banda de valência e a de condução no grafeno se tocam são somente nos pontos K (vértice dos hexágonos na zona de Brillouin), chamados pontos de Dirac, como mostrado na figura 2.6. Esses pontos estão exatamente no nível de Fermi, tornando o grafeno um semicondutor de gap nulo. Somente próximo a esses pontos, os elétrons podem participar do mecanismo de condução elétrica.

<sup>6</sup> Também chamado de secundário (representado pela letra  $l$ ) é responsável pelo subnível de energia e pela forma do orbital apresentado por este subnível (MAHAN, 1995)

## 2.3 Propriedades do Grafeno

### 2.3.1 Propriedades Elétricas

O grafeno tem como um dos aspectos mais importantes a natureza incomum das suas partículas portadores de carga. Elas ficam próximos aos pontos de Dirac, possuem massa efetiva nula (devido seu movimento não possuir inércia) e se movem a uma velocidade efetiva de 300 vezes menor que a velocidade da luz. Essa característica faz com que o grafeno possua uma alta condutividade elétrica.

[...]Por causa desta propriedade espetacular, o grafeno pode ser utilizado em antenas transmissoras (e receptoras) de sinais elétricos de comprimentos de onda da ordem de micrômetros, que operam em frequências de alguns THz. Por exemplo, para emitir um sinal de  $\lambda = 1\mu\text{m}$  em uma antena de grafeno, a frequência de operação da antena seria de 1 THz, pois  $f = v_f/\lambda$ . Entretanto, em uma antena convencional, a frequência deveria ser de  $f = 300\text{ THz}$ ”(RODRIGUES, 2015, p.13).

Outra característica elétrica é que se aplicarmos uma tensão de porta no grafeno, o nível de Fermi pode ser ajustado para cima ou para baixo do ponto de Dirac produzindo um campo elétrico ambipolar em temperatura ambiente. Se o ajuste for acima do ponto de Dirac, polarização da porta positiva, os elétrons são induzidos para estados localizados na banda de condução. Se o ajuste for abaixo do ponto de Dirac, polarização da porta negativa, os elétrons são induzidos para estados localizados na banda de valência.

O band gap do grafeno de duas camadas pode ser ajustado com o valor do campo elétrico quando se aplica uma tensão perpendicularmente a ele. Esse fenômeno se deve ao fato de que a dispersão dos elétrons no grafeno de duas camadas é diferente ao de camada simples.

### 2.3.2 Propriedades Térmicas

Os alótropos do carbono possuem alta condutividade térmica devido a força da ligação covalente entre seus átomos. Dentre esses alótropos, o grafeno é o que possui maior condutividade térmica devido ser puro e livre de defeitos, chegando a valores acima de 5000 W/mK.

Essa propriedade também pode ser influenciada pelo tipo de substrato na qual o grafeno está depositado, fazendo com que haja interações intermoleculares que pode ocasionar perdas ou dispersão de fônons<sup>7</sup>.

### 2.3.3 Propriedades Mecânicas

Apesar dos outros alótropos do carbono, como o diamante, o grafite e os nanotubos de carbono, apresentarem uma alta dureza. As dificuldades experimentais em medir essa propriedade mecânica no grafeno é grande, principalmente por causa de suas dimensões nanométricas. Espera-se que, assim como os demais materiais, ele possua essa rigidez.

Alguns métodos são utilizados para averiguar as propriedades mecânica do grafeno como o microscópio de força atômica (AFM – do inglês, Atomic-Force Microscopy) e simulações numéricas.

### 2.3.4 Propriedades Ópticas

A absorção da luz pelo grafeno varia linearmente com a quantidade de camadas presentes nele e é plana na faixa de 300 a 2500 nm. Possui um pico de absorção, devido à transição eletrônica de elétrons entre as bandas  $\pi$  e  $\pi^*$  desocupada, em cerca de 250 nm, porém esse comprimento de onda pode ser modificado pela mudança do nível de Fermi através de modulação elétrica. O grafeno consegue absorve 2,3% da luz incidente indo da faixa do infravermelho até a luz visível (ZHU, 2010).

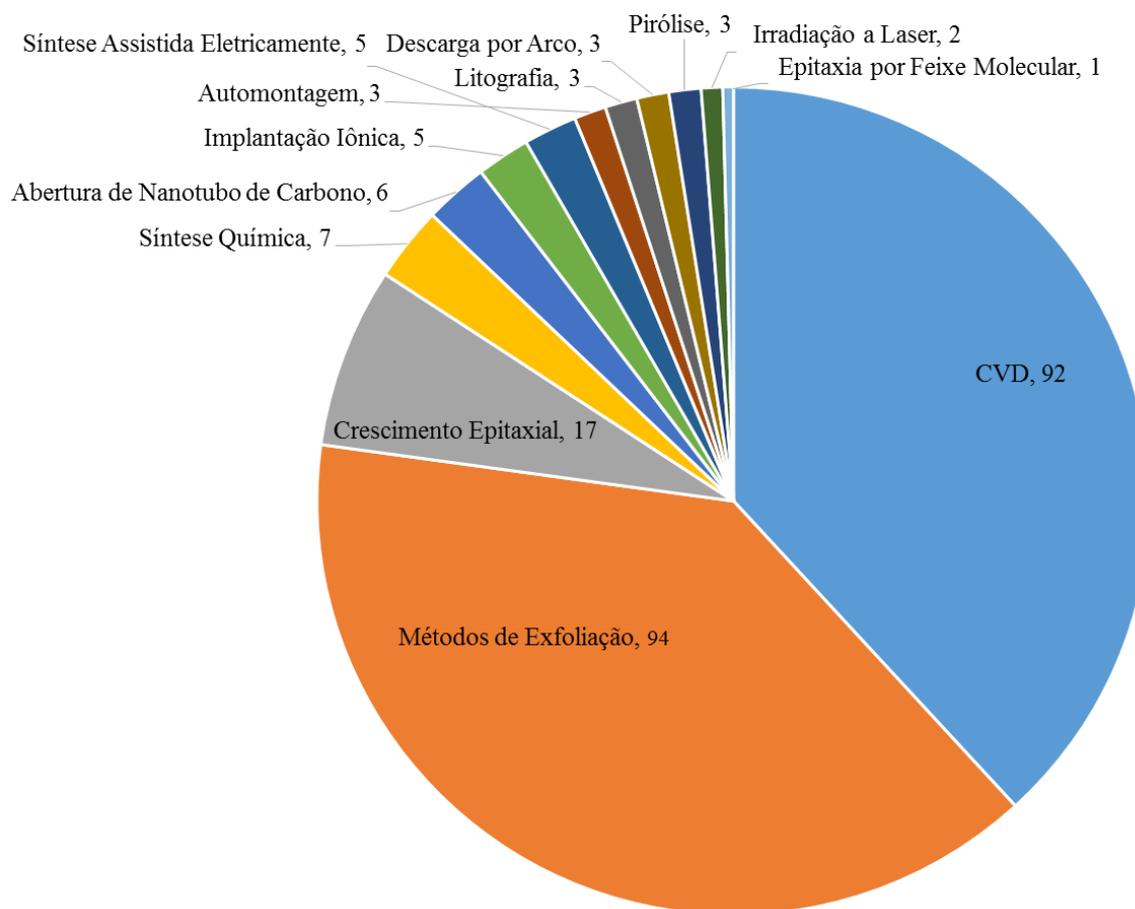
## 2.4 Produções do Grafeno

As formas de obtenção do grafeno são diversas, como podemos ver na Figura 2.7 e em (NANO WERK, 2012), porém três métodos são os principais: esfoliação (dividindo-se em várias outras, porém as mais utilizadas são: micromecânica e em fase líquida), deposição química da fase vapor (CVD – do inglês, chemical vapor deposition), crescimento epitaxial em SiC.

---

<sup>7</sup> Um fônon é uma excitação mecânica que se propaga pela rede cristalina de um sólido. Normalmente, essa excitação, que se desloca como uma onda pelo material, é causada pela agitação natural existente em todo sistema sujeito a uma temperatura finita. Ela consiste de pequenos deslocamentos dos átomos da rede. É claro que, quanto maior a temperatura maior o número de fônons, e esses fônons se propagam em todas as direções dentro do material (UFC, 2017)

Figura 2.7: Gráfico Representando os Diferentes Métodos de Síntese do Grafeno em Relação ao Número de Patentes.



Fonte: Nanowerk<sup>8</sup>, 2012 (adaptado pelo autor)

### 2.4.1 Esfoliação Micromecânica

O grafeno teve seu ápice na década de 2000, quando Geim e Novolosev conseguiram isolá-lo pela primeira vez (sem contaminação heteroatômica) utilizando a terminologia amplamente aceita hoje como o “método da fita adesiva” (NOVOLOSEV, 2004a). Esse método de extração é considerado esfoliação mecânica porque basicamente utiliza-se um pedaço de fita adesiva para remover camadas de grafite de um grande pedaço de um grafite pirolítico altamente ordenado (HOPG – do inglês high ordered pyrolytic graphite), cujas camadas são subsequentemente depositadas sobre um substrato, geralmente de Si/SiO<sub>2</sub>. Cada vez mais camada de grafite são esfoliados usando fita adesiva até que se obtenha uma fina camada de grafite (de um átomo de espessura), denominado de grafeno. Esse processo produz grafeno de alta qualidade e de ótima espessura atômica porém não é possível usar essa técnica para produção de grafeno em escala industrial.

<sup>8</sup> Disponível em: <<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=25744.php>>. Acesso em: 26 fev. 2017.

### **2.4.2 Decomposição Química da Fase Vapor**

Esse tipo de processo permite o crescimento de grafeno sobre superfícies metálicas, tais como níquel (Ni), cobalto (Co), rutênio (Ru), ouro (Au) e cobre (Cu).

Para isso, coloca-se o substrato metálico em uma câmara a vácuo na presença de gases diluídos de hidrocarbonetos em altas temperaturas (porém abaixo de 1000 °C). Como isso, uma quantidade limitada de átomos de carbono se depositam na superfície metálica. Em seguida, o substrato é submetido a um resfriamento rápido. Neste processo, podemos controlar o número de camadas do grafeno pela temperatura de resfriamento do substrato.

A decomposição química da fase vapor consegue produzir grafeno de duas ou três camadas utilizando o níquel como superfície metálica. E consegue produzir grafeno de uma ou de duas camadas utilizando o cobre como substrato.

### **2.4.3 Crescimento Epitaxial em SiC**

O processo de crescimento epitaxial em SiC consiste em aquecer, em condições de ultra vácuo, um substrato de SiC (carbeto de silício) até que os átomos de silício sublimem, deixando os átomos de carbono na superfície, os quais se organizam na estrutura do grafeno. É importante mencionar que o tempo e a temperatura desse processo influenciam na quantidade de camadas do grafeno obtido.

Esse é um dos processos de maior interesse para a indústria de semicondutores, pois se obtém o grafeno sobre substratos de SiC (sem que haja transferência do grafeno para outro substrato). As desvantagens dessa técnica são: não ter o controle do número de camadas de grafeno (principalmente a nível industrial que existe algo em larga escala) e o crescimento do grafeno de poucas camadas não ter um padrão, ou seja, algumas camadas têm padrões diferentes (empilhamentos diferentes).

### **2.4.4 Esfoliação Química em Fase Líquida**

Esse método consiste em colocar qualquer tipo de grafite (natural, expandido, oxidado, etc.) em solventes orgânicos ou soluções aquosas e, posteriormente, submetendo a mistura a uma fonte de energia (comumente ondas ultrassônicas) por um determinado tempo. Com isso, consegue-se esfoliar o grafite obtendo dispersões coloidais de grafeno. Depois disso, a mistura

passa por um processo de centrifugação com o objetivo de retirar os agregados de grafite que não foram esfoliados.

É considerado um dos métodos de produção de grafeno mais promissores pelo fato de possibilitar sua produção em grande escala. “Além disso, é muito versátil em termos de funcionalização química do grafeno e produção de filmes finos” (NASCIMENTO, 2013).

## 2.5 A Energia de Fermi e o Potencial Químico ( $\mu_C$ )

A Energia de Fermi é o nível de energia mais energético em um sistema quântico fermiônico à temperatura de zero absoluto, podendo se estender a sistemas acima desta temperatura. Já em temperatura ambiente esse nível energético é chamado de potencial químico. Como a diferença entre eles é em torno de 0,01%, podemos considerar o potencial químico e a Energia de Fermi como essencialmente equivalentes.

### 2.5.1 Método de Variação do Potencial Químico ( $\mu_C$ )

As principais formas de variação do potencial químico são através de campo elétrico e de dopagem química.

A variação por campo elétrico advém da densidade da portadora, dado por (HANSON, 2008):

$$n_S = \frac{2}{\pi h^2 v_f^2} \int_0^{\infty} \varepsilon (f_d(\varepsilon) - f_d(\varepsilon + 2\mu_C)) d\varepsilon \quad (2.9)$$

onde  $f_d(\varepsilon) = \left(1 + \exp\left(\frac{(\varepsilon - \mu_C)}{k_B T}\right)\right)^{-1}$  é a distribuição de Fermi-Dirac e  $v_f$  é a velocidade de Fermi, que é aproximadamente igual a  $10^6$  eV.

A equação (2.9) também pode ser representada em função do campo elétrico, dado por:

$$n_S = \frac{2\varepsilon_b E}{q_e} \quad (2.10)$$

onde  $E$  é o campo elétrico,  $\varepsilon_b$  é a permissividade do meio,  $q_e$  é a carga do elétron.

Combinando (2.9) e (2.10), temos:

$$\frac{\varepsilon_b E}{q_e} = \frac{1}{\pi h^2 v_f^2} \int_0^{\infty} \varepsilon (f_d(\varepsilon) - f_d(\varepsilon + 2\mu_c)) d\varepsilon \quad (2.11)$$

Pela equação (2.11) podemos concluir que ao passarmos uma tensão constante por um substrato também podemos variar o potencial químico.

O outro método de alteração do potencial químico é através de dopagem química que consiste basicamente em adicionar impurezas ao grafeno (GUO, 2011). Os elementos com melhor interação para isso são o boro (B) e o nitrogênio (N) devido sua proximidade com o número atômico do carbono (um número a menos e um número a mais, respectivamente, em relação ao carbono que possui número atômico igual a 6). Ao fazermos uma dopagem com o Boro, o nível de Fermi recai a um ponto abaixo do ponto de Dirac, indicando um potencial negativo, logo os elétrons são induzidos para estados localizados na banda de valência. Ao fazermos uma dopagem com o Nitrogênio, o nível de Fermi recai a um ponto acima do ponto de Dirac, indicando um potencial positivo, logo os elétrons são induzidos para estados localizados na banda de condução.

## 2.6 Nanofotônica

Nanofotônica estuda as propriedades da luz e sua interação com materiais nanoestruturados em escala nanométrica, que pode chegar a dimensões inferiores ao comprimento de onda da luz (GAPONENKO, 2010; PRASAD, 2004). Essa interação, que pode ser natural ou artificial, é determinada pela natureza física, química e estrutural do material. Outra definição também acerca da nanofotônica diz respeito ao confinamento espacial de ondas de luz e elétrons confinados, pois o confinamento espacial de ondas de luz em meios complexos e ondas de elétrons confinados geram vários fenômenos na nanofotônica. Essa outra definição é dividida em quatro partes: primeiro, a influência do confinamento de elétrons nas propriedades ópticas do material; segundo, confinamento de ondas de luz em dielétricos estruturados; terceiro, a modificação da luz com a matéria modificada em nanoestruturas com ondas confinadas; e quarto, engenharia óptica baseada em nanoestruturas dielétrico-metal (GAPONENKO, 2010).

## 2.7 Nanoplasmonica

Nanoplasmonica ou plasmônica é um ramo da nanofotônica que investiga como o campo eletromagnético pode ser confinado em estruturas com dimensões imediatamente acima ou abaixo do comprimento de onda operante, sendo assim, este campo está relacionado com o controle da localização e propagação da luz em dimensões inferiores ao comprimento de onda da luz utilizado (MAIER, 2007; NOVOTNY, 2006). Este fenômeno se dá pela interação entre a radiação eletromagnética e elétrons de condução nas interfaces metálicas que gera um campo óptico próximo altamente amplificado (MAIER, 2007).

No estudo de nanoplasmonica observa-se que, em frequências ópticas, o efeito da radiação eletromagnética está diretamente ligado aos elétrons livres de condução do metal, que oscilam fora de fase em relação ao campo elétrico de condução, levando a maioria dos metais terem uma refletividade elevada por possuírem constante dielétrica negativa em frequências ópticas. Além disso, nessas frequências existem oscilações de elétrons nos metais, localizados ao longo da superfície, chamadas de ressonância de plasmon de superfície.

As oscilações de densidade de carga superficial juntamente com a polarização por plasmon de superfície (do inglês, SPPs – Surface Plasmons Polarizations) na interface entre um metal e um dielétrico pode dar origem a campos ópticos próximos espalhados altamente amplificados que são espacialmente confinados perto da superfície do metal (MAIER, 2007; NOVOTNY, 2006; SHALAEV, 2007; KIM, 2012). Outro ponto importante é que, se alteramos a superfície do metal, podemos alterar as propriedades dos SPPs, principalmente sua relação com a luz, possibilitando o desenvolvimento de dispositivos fotônicos em escalas bem pequenas (nanométricas), o que era difícil nessa escala, pois a luz propagante não podia ser confinada em uma seção transversal menor que meio comprimento de onda.

## 2.8 Considerações Finais

O grafeno é um material que possui propriedades particulares bastante interessantes como condutividade elétrica e térmica elevada, rigidez, boa absorção ótica, possibilidade de miniaturização que o tornam um material promissor em diversas áreas, inclusive para geração de onda na faixa do terahertz devido suas características estruturais.

Os métodos para sua obtenção são diversos, seja de forma mecânica ou utilizando algum ativo químico. Métodos mecânicos conseguem obter amostras com boa qualidade e ótima

espessura, porém é inviável em escala industrial. Métodos por deposição química a vapor são mais utilizados em escala industrial e a esfoliação em fase líquida está cada vez mais ganhando visibilidade nesse contexto, apesar de produzirem gases tóxicos e nocivos.

Nanoplasmonica é um ramo da nanofotônica que investiga como o campo eletromagnético pode ser confinado em estruturas com dimensões inferiores ao comprimento de onda da luz utilizado. No estudo de nanoplasmonica observa-se que em frequências ópticas o efeito da radiação eletromagnética está diretamente ligado aos elétrons livres de condução do metal, que oscilam fora de fase em relação ao campo elétrico de condução, levando a maioria dos metais terem uma refletividade elevada por possuírem constante dielétrica negativa em frequências ópticas. Além disso, nessas frequências existem oscilações de elétrons nos metais, localizados ao longo da superfície, chamadas de ressonância de plasmon de superfície. Essas oscilações de densidade de carga superficial juntamente com a polarização por plasmon de superfície na interface entre um metal e um dielétrico pode dar origem a campos ópticos próximos espalhados altamente amplificados que são espacialmente confinados perto da superfície do metal e se alteramos a superfície do metal pode-se levar ao desenvolvimento de dispositivos fotônicos em escalas nanométricas.

O grafeno possui uma ressonância de plasmon de superfície elevada o que o torna um material promissor no desenvolvimento de dispositivos muito menores que o comprimento de onda, possibilitando a miniaturização de antena, e, pelas propriedades elétricas do grafeno, possibilitar trabalhar na faixa do terahertz.

## 3. Método dos Momentos para Análise de Antenas de Grafeno

A aplicação de métodos analíticos em problemas que envolvam estruturas cujo tamanho é muito menor que o comprimento de onda ou para casos de nanoestruturas plasmônicas é muito difícil. A solução é a utilização de métodos numéricos. No caso da plasmônica, o problema de espalhamento e a radiação eletromagnética podem ser calculadas usando as equações de Maxwell. Os métodos numéricos são divididos em duas formas: métodos de solução de equações integrais e métodos de solução de equação diferenciais.

Técnicas numéricas integrais (também chamado de técnicas exatas – devido sua garantia de convergência em discretizações densas) utilizam equações integrais para modelar os problemas físicos. Porém, devido à complexidade de manipulação dessas equações, elas são mais indicadas em problemas cujo domínio seja composto por material linear, homogêneo e isotrópico. Os métodos que utilizam essas técnicas são o método dos elementos de contorno (do inglês, BEM – *Boundary Element Method*) (CHENG, 2005; POLJAK, 2005; BEER, 2008) e o método dos momentos (do inglês, MoM – *Method of Moments*) (WALTON, 2015; HARRINGTON, 1968; BALANIS, 2012; BALANIS, 2005; SADIKU, 2000; DUDLEY, 1994).

No método dos elementos de contorno a solução é determinar os pontos discretos localizados apenas sobre o contorno. Isso implica em uma redução das dimensões dos problemas analisados, logo teremos menos dados de entrada, menos tempo de processamento e menor área de armazenamento secundário das informações necessárias no processamento, tornando esse método bastante útil.

No método dos momentos, a solução é transformar uma equação integral em um sistema de equações algébricas mediante a aproximação por funções base e funções teste. Esse método é muito útil na resolução de problemas de radiação, antenas e espalhamento em frequências óticas devido ao baixo custo computacional, robustez e resultados precisos. Além disso, Seus resultados precisos permitem avaliar as propriedades eletromagnéticas dos elementos que compõem o circuito, como a fonte de alimentação, a linha de transmissão, a superfície refletora, entre outras. Mesmo que a quantidade de elementos que compõem o circuito analisado conjuntamente acabe por diminuir a eficiência do método, porém o método continua sendo bem preciso.

Em contrapartida, as técnicas numéricas diferenciais são indicadas para solução de problemas de contorno em domínio fechado, que pode ser preenchido por materiais heterogêneos, não-lineares ou anisotrópicos. Os métodos que utilizam essas técnicas são o método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD – *Finite-Difference Time-Domain Method*) (SADIKU, 2000; ZHILIN, 2010; SULLIVAN, 2000; FARJADPOUR, 2006) e o método de elementos finitos (SADIKU, 2000; TSUKERMAN, 2008; SILVESTER, 1996; HUTTON, 2004).

O método de diferenças finitas consiste em discretizar as estruturas em pequenos elementos retangulares ou curvilíneos (podendo ser utilizado outras formas de discretização), depois é feita a resolução das equações de Maxwell na forma diferencial aproximando as derivadas parciais no tempo e no espaço por diferenças finitas centrais, para então calcular os campos elétricos e magnéticos, célula após célula. O método resolve às equações de Maxwell no domínio do tempo de forma dinâmica e simples, evitando usar sistemas lineares para solução dos problemas e inversão de matrizes de grande ordem. O FDTD é excelente em análise de meios não homogêneos e não-lineares, porém suas desvantagens estão nas suas altas exigências de memória devido à discretização bem fina, problemas de dispersão numérica, bem como a necessidade de truncar artificialmente o limite da solução. O FDTD se destaca na solução de problemas de espalhamento por calcular dinamicamente campos eletromagnéticos, distribuições de temperatura ou outros fenômenos descritos por equações diferenciais parciais.

Já o método dos elementos finitos (FEM), consiste em pegar o domínio do problema, dividi-lo em pequenas áreas ou células de geometria simples (elementos finitos) com forma e comprimentos arbitrários. No interior desses elementos são aproximadas soluções através do uso de funções que interpolam os valores nodais desconhecidos. E, combinada com o método dos erros ponderados ou o método variacional, a equação diferencial parcial é transformada em um sistema algébrico de equações, em que elementos específicos são inseridos num sistema global de equações. Feito isso, o sistema é resolvido por alguma técnica adequada. No FEM, o domínio da solução deve ser truncado artificialmente, assim como no FDTD, ambos utilizam as condições de contorno absorvente (ABCs, do inglês - Absorbing Boundary Condition) para serem truncados, e assim poder limitar a região de discretização fora do espalhador. Uma característica interessante do FEM é que o método tem a capacidade de modelar problemas com geometrias complexas e cujos domínios estejam preenchidos por diferentes materiais.

Neste trabalho, optou-se por usar as técnicas numéricas integrais, mais precisamente o método dos momentos devido sua resolução de problemas de radiação, antenas e espalhamento em frequências óticas a um baixo custo computacional e precisão.

### 3.1. Método dos Momentos

Método dos momentos ou método dos resíduos ponderados é uma forma de resolução utilizando um sistema de equações lineares simples ao invés de equações integrais, assim, o sistema pode ser resolvido numericamente utilizando ferramentas computacionais.

O método consiste na determinação aproximada de uma função resposta  $f$ , especificando um operador integro-diferencial linear  $L$  e uma função de excitação  $g$ , através da seguinte equação:

$$L(f) = g \quad (3.1)$$

A função resposta  $f$  pode ser aproximada por uma combinação linear de  $N$  termos de  $\hat{f}$ :

$$f(z') \cong \hat{f}(z') = a_1 \hat{f}_1(z') + a_2 \hat{f}_2(z') + \dots + a_n \hat{f}_n(z') = \sum_{n=1}^N a_n \hat{f}_n(z') \quad (3.2)$$

onde  $a_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, N$ ) são constantes desconhecidas e  $\hat{f}_n(z')$  são funções conhecidas denominadas funções base ou funções de expansão. Essas funções possuem o mesmo domínio de  $f(z')$  e conseguem representar a função desconhecida  $f$ .

Substituindo (3.2) em (3.1), tem-se:

$$L(f(z')) \cong L(\hat{f}(z')) = \sum_{n=1}^N a_n L(\hat{f}_n(z')) \cong g \quad (3.3)$$

Pela equação (3.3), temos  $a_n$  como valores escalares desconhecidos. Se aproximarmos essa equação, tendo as  $N$  funções como funções base, teríamos uma indeterminação pois teríamos tantas incógnitas quanto for o valor de  $N$  do que equações.

Para efetuar as grandezas escalares de  $a_n$ , efetua-se o produto interno com um conjunto de funções conhecidas  $w_m$  denominadas por funções de teste ou peso. Para que as  $N$  equações sejam linearmente independentes, as funções pesos também devem ser. Assim, para cada função de teste  $w_m$  tem-se (DUDLEY, 1964):

$$\langle g, w_m \rangle = \left\langle \sum_n^N a_n L(\hat{f}_n), w_m \right\rangle = \sum_n^N a_n \langle L(\hat{f}_n), w_m \rangle \Leftrightarrow \sum_n^N a_n \langle w_m, L(\hat{f}_n) \rangle = \langle w_m, g \rangle \quad (3.4)$$

onde  $m = 1, 2, \dots, N$ .

O somatório pode ser desmembrado em um conjunto de equações na forma matricial como a seguir:

$$\begin{bmatrix} \langle w_1, L\hat{f}_1 \rangle & \langle w_1, L\hat{f}_2 \rangle & \dots & \langle w_1, L\hat{f}_N \rangle \\ \langle w_2, L\hat{f}_1 \rangle & \langle w_2, L\hat{f}_2 \rangle & \dots & \langle w_2, L\hat{f}_N \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle w_N, L\hat{f}_1 \rangle & \langle w_N, L\hat{f}_2 \rangle & \dots & \langle w_N, L\hat{f}_N \rangle \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \vdots \\ \langle w_N, g \rangle \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Podemos simplificar o produto matricial acima da seguinte forma:

$$[Z_{mn}][I_n] = [V_m] \quad (3.6)$$

Sendo  $Z_{mn} = \langle w_m, L\hat{f}_n \rangle$ ,  $I_n = a_n$  e  $V_m = \langle w_m, g \rangle$ .

Os escalares de  $I_n$  serão determinados pela inversa da matriz  $[Z_{mn}]$ , que existirá se ela não for singular, é dado por:

$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1}[V_m] \quad (3.7)$$

E a solução aproximada  $\hat{f}$ , por:

$$\hat{f} = \sum_n a_n f_n \quad (3.8)$$

Fazendo as escolhas certas das funções base e das funções testes podemos ter uma boa convergência na resolução das equações integrais. Porém, devemos nos ater que a escolha dessas funções determina a complexidade em obter os elementos da matriz  $[Z_{mn}]$ .

## 3.2. Equação Integral dos Potenciais

O método dos momentos bidimensional (MoM-2D) foi utilizado para analisar numericamente a antena de grafeno composta dipolo-espira deste trabalho. Suas estruturas são compostas basicamente de condutores planares, logo as seguintes equações foram utilizadas:

$$\bar{E}_r = -j\omega\bar{A} - \nabla\phi \quad (3.9)$$

$$\bar{A} = \mu_0 \iint_S \bar{J} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} ds' \quad (3.10)$$

$$\phi = \frac{1}{\epsilon_0} \iint_S \sigma \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} ds' \quad (3.11)$$

$$\sigma = -\frac{1}{j\omega} \nabla \cdot \bar{J} \quad (3.12)$$

onde  $\bar{E}_r$  (V/m) é o campo elétrico radiado devido a fontes de correntes localizados no espaço livre,  $\bar{A}$  o vetor potencial magnético,  $\phi$  o potencial escalar elétrico,  $\bar{J}$  (A/m) a densidade de corrente elétrica superficial,  $\sigma$  (C/m<sup>2</sup>) a densidade de carga elétrica superficial, S a superfície que contém  $\bar{J}$  e  $\sigma$ , j a unidade imaginária,  $k = \omega(\mu_0\epsilon_0)^{1/2}$ ,  $\omega$  (rad/s) é a frequência angular,  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do espaço livre, respectivamente.

Substituindo (3-12), (3-11) e (3-10) em (3-9) temos a equação para o campo espalhado definido por:

$$\bar{E}_r = -j\omega\mu_0 \iint_S \bar{J} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' + \nabla \left[ \frac{1}{j\omega\epsilon} \iint_S \nabla \cdot \bar{J} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' \right] \quad (3.13)$$

### 3.3. Método dos Momentos Aplicado ao Problema da Antena de Grafeno Composta de Dipolo-Espira

Os resultados experimentais mostram que os efeitos de borda sobre a condutividade do grafeno pode ser desconsiderado na escala micrométrica (HAN, 2007). Portanto, pode ser utilizado o modelo de condutividade elétrica existente na literatura e aplicadas as folhas de grafeno infinitas. Neste trabalho, utilizou-se o modelo de Drude (dado pela equação 3.14) para determinar a condutividade de superfície do grafeno. Esse modelo descreve a resposta da movimentação dos elétrons livres na banda de condução do grafeno quando aplicado um campo elétrico variável no tempo (NOVOTNY, 2006). Quando submetidos a frequências ópticas, os elétrons oscilam fora de fase em relação ao campo elétrico incidente, tornando a constante elétrica do grafeno negativa.

$$\sigma(\omega) = \frac{2e^2k_B T}{\pi h^2} \ln \left[ 2 \cosh \left( \frac{\mu_C}{2\mu_B T} \right) \right] \frac{-j}{\omega - j\tau^{-1}} \quad (3.14)$$

onde  $\tau = 10^{-12}$ s é o tempo de relaxação, T é a temperatura e  $\mu_C$  é o potencial químico.

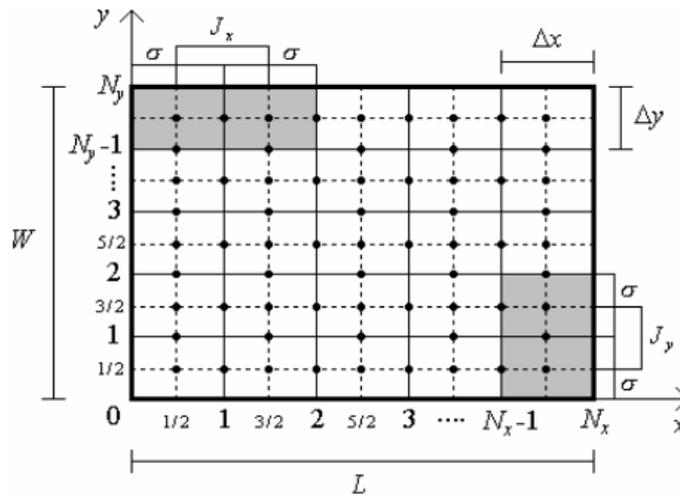
A condição de contorno na superfície da antena deste trabalho resulta na equação integral de espalhamento do campo elétrico no domínio da frequência com dependência temporal  $\exp(j\omega t)$  dada abaixo:

$$[(\bar{E}_r + \bar{E}_i) \cdot \bar{a}_t] \bar{a}_t = Z_S \bar{J} \quad (3.15)$$

onde  $\bar{E}_i$  (V/m) é o campo elétrico incidente da fonte de tensão,  $\bar{a}_t$  é o vetor unitário tangencial a superfície da antena,  $\bar{J}$  (A/m) é a densidade de corrente superficial e  $Z_s = 1/\sigma$  é a impedância de superfície do grafeno.

A Figura 3.1 mostra a malha genérica da antena de microfita retangular deste trabalho. Ela é considerada uniforme, pois todas as seções retangulares são iguais e de dimensões  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , respectivamente nos eixos X e Y.

Figura 3.1 - Malha de discretização uniforme da antena de microfita retangular.



Fonte: COSTA, 2006a

onde L e W são o comprimento e a largura da antena de microfita retangular, respectivamente;  $N_x$  e  $N_y$  são os números de retângulos de tamanhos iguais que dividem a antena no eixo x e y, respectivamente;  $J_x$  e  $J_y$  são as densidades de correntes superficiais em x e y da antena, respectivamente<sup>9</sup>.

As dimensões  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são dadas por:

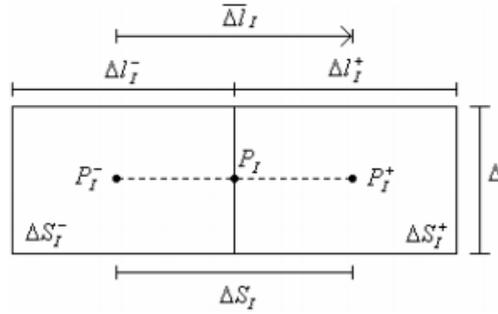
$$\Delta x = \frac{L}{N_x} \quad (3.16)$$

$$\Delta y = \frac{W}{N_y} \quad (3.17)$$

A figura 2 mostra a descrição geométrica utilizada em um elemento de corrente genérico de índice  $l$  contido na malha da figura 1. O sentido de  $P_l^-$  para  $P_l^+$ , da figura abaixo, pode ser representado nas coordenadas xy fazendo as adaptações necessárias.

<sup>9</sup> A mesma malha de discretização é aplicado a espira circular proposta neste trabalho, porém nas regiões da borda dela usa-se a condição de contorno para delimitar as seções  $\Delta x$  e  $\Delta y$ .

Figura 3.2 - Elemento de corrente genérico de índice  $I$  da malha de discretização.



Fonte: COSTA, 2006a

O problema deste trabalho consiste em determinar a distribuição de corrente na superfície condutora  $S$  composta pelo dipolo e pelo gap de tensão (photomixer) quando um dado campo elétrico de excitação  $\bar{E}_i$  incide na estrutura<sup>10</sup>. Primeiramente, temos que aproximar  $\bar{J}$  e  $\sigma$  por uma combinação linear finita de determinadas funções base para podemos resolver o problema por MoM.

As densidades de correntes superficiais em  $x$  e  $y$  são dadas pelas seguintes equações:

$$J_x(n, m) = J_x^{n, m} P_{J_x}^{n, m}, \text{ onde } n = 1, 2, \dots, N_x - 1 \text{ e } m = 1, 2, \dots, N_y \quad (3.18)$$

$$J_y(n, m) = J_y^{n, m} P_{J_y}^{n, m}, \text{ onde } n = 1, 2, \dots, N_x \text{ e } m = 1, 2, \dots, N_y - 1 \quad (3.19)$$

As condições de contorno dos pontos  $P_{J_x}$  e  $P_{J_y}$  são:

$$P_{J_x}(n, m) = \begin{cases} 1, & x_{n-1/2} < x < x_{n+1/2} \text{ e } y_{m-1} < y < y_m \\ 0, & \text{fora do limite} \end{cases} \quad (3.20)$$

$$P_{J_y}(n, m) = \begin{cases} 1, & y_{m-1/2} < y < y_{m+1/2} \text{ e } x_{n-1} < x < x_n \\ 0, & \text{fora do limite} \end{cases} \quad (3.21)$$

Juntando as equações (3-18) a (3-21) obtemos a densidade de corrente superficial  $\bar{J}$ , dado por:

$$\bar{J} = \sum_{n=1}^{N_x-1} \sum_{m=1}^{N_y} J_x^{n, m} P_{J_x}^{n, m} \bar{a}_x + \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y-1} J_y^{n, m} P_{J_y}^{n, m} \bar{a}_y \quad (3.22)$$

A densidade de carga elétrica superficial é dada por:

<sup>10</sup> Mesmo que tenha sido citado somente o dipolo, a mesma análise é feita para a espira circular, com a ressalva que somente o dipolo é alimentado.

$$\sigma = -\frac{1}{j\omega} \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} \left[ \frac{J_x^{n,m} - J_x^{n-1,m}}{\Delta x} + \frac{J_y^{n,m} - J_y^{n,m-1}}{\Delta y} \right] P_\sigma^{n,m} \quad (3.23)$$

onde a condição de contorno de  $P_\sigma^{n,m}$  é:

$$P_\sigma^{n,m} = \begin{cases} 1, & x_{n-1} < x < x_n \text{ e } y_{m-1} < y < y_m \\ 0, & \text{fora do limite} \end{cases} \quad (3.24)$$

Expandindo a equação (3.23), temos:

$$\begin{aligned} \sigma = -\frac{1}{j\omega} & \left\{ \frac{1}{\Delta x} \sum_{m=1}^{N_y} [(J_x^{1,m} - J_x^{0,m}) P_\sigma^{1,m} + (J_x^{2,m} - J_x^{1,m}) P_\sigma^{2,m} + (J_x^{3,m} - J_x^{2,m}) P_\sigma^{3,m} \right. \\ & + (J_x^{4,m} - J_x^{3,m}) P_\sigma^{4,m} + \dots + (J_x^{N_x,m} - J_x^{N_x-1,m}) P_\sigma^{N_x,m}] \\ & + \frac{1}{\Delta y} \sum_{n=1}^{N_x} [(J_y^{n,1} - J_y^{n,0}) P_\sigma^{n,1} + (J_y^{n,2} - J_y^{n,1}) P_\sigma^{n,2} + (J_y^{n,3} - J_y^{n,2}) P_\sigma^{n,3} \\ & \left. + (J_y^{n,4} - J_y^{n,3}) P_\sigma^{n,4} + \dots + (J_y^{n,N_y} - J_y^{n,N_y-1}) P_\sigma^{n,N_y}] \right\} \quad (3.25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma = -\frac{1}{j\omega} & \left\{ \frac{1}{\Delta x} \sum_{m=1}^{N_y} [J_x^{1,m} (P_\sigma^{1,m} - P_\sigma^{2,m}) + J_x^{2,m} (P_\sigma^{2,m} - P_\sigma^{3,m}) + J_x^{3,m} (P_\sigma^{3,m} - P_\sigma^{4,m}) \right. \\ & + J_x^{4,m} (P_\sigma^{4,m} - P_\sigma^{5,m}) + \dots + J_x^{N_x-1,m} (P_\sigma^{N_x-1,m} - P_\sigma^{N_x,m})] \\ & + \frac{1}{\Delta y} \sum_{n=1}^{N_x} [J_y^{n,1} (P_\sigma^{n,1} - P_\sigma^{n,2}) + J_y^{n,2} (P_\sigma^{n,2} - P_\sigma^{n,3}) + J_y^{n,3} (P_\sigma^{n,3} - P_\sigma^{n,4}) \\ & \left. + J_y^{n,4} (P_\sigma^{n,4} - P_\sigma^{n,5}) + \dots + J_y^{n,N_y-1} (P_\sigma^{n,N_y-1} - P_\sigma^{n,N_y})] \right\} \quad (3.26) \end{aligned}$$

$$\sigma = -\frac{1}{j\omega} \left\{ \left[ \sum_{n=1}^{N_x-1} \sum_{m=1}^{N_y} J_x^{n,m} \left( \frac{P_\sigma^{n,m} - P_\sigma^{n+1,m}}{\Delta x} \right) \right] + \left[ \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y-1} J_y^{n,m} \left( \frac{P_\sigma^{n,m} - P_\sigma^{n,m+1}}{\Delta y} \right) \right] \right\} \quad (3.27)$$

Substituindo (3-22) e (3-27) em (3-13), e fazendo alguns ajustes, temos a seguinte equação para o campo elétrico radiado:

$$\begin{aligned}
\bar{E}_r = & \sum_{n=1}^{N_x-1} \sum_{m=1}^{N_y} J_x^{n,m} \left\{ -j\omega\mu \iint_S P_{J_x}^{n,m} \bar{a}_x \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' + \frac{1}{j\omega\varepsilon} \nabla \iint_S \left( \frac{P_\sigma^{n,m} - P_\sigma^{n+1,m}}{\Delta x} \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' \right\} \\
& + \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y-1} J_y^{n,m} \left\{ -j\omega\mu \iint_S P_{J_y}^{n,m} \bar{a}_y \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' \right. \\
& \left. + \frac{1}{j\omega\varepsilon} \nabla \iint_S \left( \frac{P_\sigma^{n,m} - P_\sigma^{n,m+1}}{\Delta y} \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS' \right\}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Considerando a condição de contorno da antena em (3-15), temos que

$$\int_{C_{IJ}} \bar{E}_i \cdot \bar{dl} = ZJ - \int_{C_{IJ}} \bar{E}_r \cdot \bar{dl} \tag{3.29}$$

logo,

$$\int_{\Delta l_J} \bar{E}_i \cdot \bar{dl} = ZJ - \sum_{l=1}^{N_t} J_l \left[ j\omega\mu_0 \phi \bar{\Delta l}_l \cdot \bar{\Delta l}_l + \frac{1}{j\omega\varepsilon_0} (\Phi^{++} - \Phi^{-+} - \Phi^{+-} + \Phi^{--}) \right] \tag{3.30}$$

onde  $N_t = (N_x - 1) \times (N_y) + (N_y - 1) \times (N_x)$  é o número total das constantes desconhecidas sobre o dipolo ( $J_x^{n,m}$  ou  $J_y^{n,m}$ ) e:

$$\Phi = \frac{1}{\Delta l_I} \iint_{\Delta S_I} \frac{e^{-jkR_{IJ}}}{4\pi R_{IJ}} dS' \Bigg|^{P_J} \tag{3.31}$$

$$\Phi^{++} = \frac{1}{\Delta l_I^+} \iint_{\Delta S_I^+} \frac{e^{-jkR_{IJ}^{++}}}{4\pi R_{IJ}^{++}} dS' \Bigg|^{P_J^+} \tag{3.32}$$

$$\Phi^{+-} = \frac{1}{\Delta l_I^+} \iint_{\Delta S_I^+} \frac{e^{-jkR_{IJ}^{+-}}}{4\pi R_{IJ}^{+-}} dS' \Bigg|^{P_J^-} \tag{3.33}$$

$$\Phi^{-+} = \frac{1}{\Delta l_I^-} \iint_{\Delta S_I^-} \frac{e^{-jkR_{IJ}^{-+}}}{4\pi R_{IJ}^{-+}} dS' \Bigg|^{P_J^+} \tag{3.34}$$

$$\Phi^{--} = \frac{1}{\Delta l_I^-} \iint_{\Delta S_I^-} \frac{e^{-jkR_{IJ}^{--}}}{4\pi R_{IJ}^{--}} dS' \Bigg|^{P_J^-} \tag{3.35}$$

As variáveis  $R$ 's contidas em (3-31) a (3-35) representam as distâncias entre os pontos (+ ou -) do elemento de corrente  $I$  aos pontos de observação (+ ou -) do elemento de corrente  $J$ . Se  $kR \ll 1$  as integrais (3-31) a (3-35) podem ser calculadas aproximadamente por:

$$\Phi = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\Delta l} \left[ \Delta l x \ln \frac{(\sqrt{\Delta l^2 + \Delta^2} + \Delta)}{(\sqrt{\Delta l^2 + \Delta^2} - \Delta)} + \Delta x \ln \frac{(\sqrt{\Delta l^2 + \Delta^2} + \Delta l)}{(\sqrt{\Delta l^2 + \Delta^2} - \Delta l)} - jk\Delta l x \Delta \right] & \text{se } I = J \\ \frac{1}{4\pi\Delta l} \frac{e^{-jkR}}{R} (\Delta l x \Delta) & \text{se } I \neq J \end{cases} \quad (3.36)$$

O primeiro membro de (3-30) representa uma tensão  $\Delta V$  aplicada entre os pontos  $P_J^-$  e  $P_J^+$ . Quando (3-30) é calculada para  $J = 1, 2, \dots, N_t$ , tem-se um sistema de equações lineares de ordem  $N_t$ . A solução deste sistema, para uma determinada configuração de campos de excitação  $E_i$ , fornece a distribuição de corrente sobre o dipolo.

### 3.4. Considerações Finais

Dentre as técnicas numéricas presentes na literatura, o método dos momentos foi utilizado neste trabalho por causa da sua facilidade em resolver problemas de radiação, antenas e espalhamento em frequências ópticas com robustez e a um baixo custo computacional. Seus resultados precisos permitem avaliar as propriedades eletromagnéticas dos elementos que compõem o circuito, como a fonte de alimentação, a linha de transmissão, a superfície refletora, entre outras.

Método dos momentos é uma forma de resolução utilizando um sistema de equações lineares simples ao invés de equações integrais, com o intuito de obter uma determinação aproximada de uma função resposta  $f$ , especificando um operador integro-diferencial linear  $L$  e uma função de excitação  $g$ , assim o sistema pode ser resolvido numericamente utilizando ferramentas computacionais.

Os resultados experimentais mostram que os efeitos de borda sobre a condutividade do grafeno pode ser desconsiderado na escala micrométrica, logo pode-se utilizar o modelo de condutividade elétrica existente na literatura e aplicar as folhas de grafeno infinitas. Neste trabalho, utilizou-se o modelo de Drude para determinar a condutividade de superfície do grafeno. Tendo este parâmetro, mais o campo elétrico radiado devido a fontes de correntes localizados no espaço livre, o vetor potencial magnético e o potencial escalar elétrico, podemos obter o campo elétrico espalhado e o campo elétrico incidente.

## 4. Dipolo de Grafeno Retangular

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos para a antena de microfita retangular de grafeno isolada. Foi feita uma análise inicial dessa antena da referência a fim de comparar e validar os resultados obtidos em (TAMAGNONE, 2012b) como o programa criado usando o método dos momentos.

### 4.1. Validação da Formulação Numérica Proposta

A geometria da antena de grafeno utilizada para validar o método é: uma microfita retangular de grafeno com dimensões: comprimento =  $17\mu\text{m}$  e largura =  $10\mu\text{m}$ , representados por  $L$  e  $W$ , respectivamente, e são as mesmas da referência (TAMAGNONE, 2012b) (ver figura 4.1).

É importante frisar que a antena da referência está sobre um substrato de vidro. Já o modelo de antena criado neste trabalho para validação está sem substrato porém encontra-se imersa em um meio que é a média das permissividades do vácuo e do substrato utilizado em (TAMAGNONE, 2012b) – que é o vidro. O valor da permissividade relativa do meio da antena deste trabalho é  $\epsilon_R=2,4$ .

A ideia principal de colocar a antena sem substrato é verificar a influência somente do grafeno na largura de banda e na radiação da antena. Porém, mesmo que a antena deste trabalho não tenha substrato, o meio possui uma média de permissividade entre o vácuo e o vidro e, como veremos mais adiante, terá um comportamento semelhante caso a antena estivesse sob um substrato.

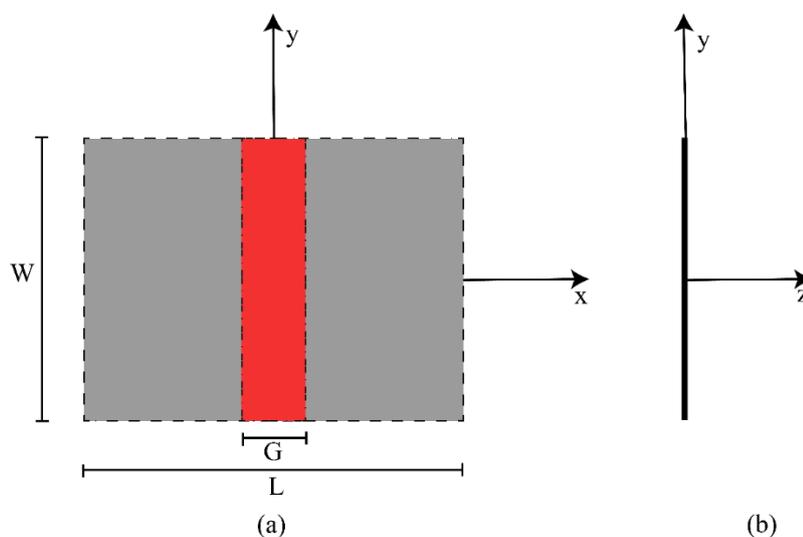
A dimensão da microfita de grafeno tem apenas uma dimensão planar porque está sendo considerada uma folha de grafeno de espessura muito pequena. A antena foi alimentada por uma fonte de tensão ideal denominada photomixer com comprimento do gap  $G$  ( $2\mu\text{m}$ ) no meio do patch e largura  $W$ .

A Tabela 4.1 mostra os valores das duas primeiras frequências de ressonância e as Figuras 4.3 e 4.4 mostram as distribuições de corrente superficial nestas frequências. É importante frisar que a antena da referência usa o programa computacional Ansys HFSS e foi utilizado o Comsol para ter mais um parâmetro de comparação entre os métodos.

Os resultados da Tabela 4.1 mostram uma boa concordância dos resultados do MoM-2D com os resultados do Comsol e os da referência. Além disso, observa-se para a primeira

ressonância existe uma relação  $L/\lambda = 0,05$ , a qual é dez vezes menor que a relação de uma microfita retangular metálica de micro-ondas ( $L/\lambda = 0,5$ ). Isto se deve a impedância superficial do grafeno que suporta ondas plasmônicas com comprimento de onda menores que o da fonte de excitação. Apesar dessa diferença, as antenas de microfita de grafeno e as convencionais (micro-ondas) apresentam distribuição de corrente semelhantes (Figuras 4.3 e 4.4), mas com fases diferentes entre a fonte e as placas do patch.

Figura 4.1. Geometria da Antena de Microfita Retangular Usando as Mesmas Dimensões de (TAMAGNONE, 2012b). Dados:  $W = 10\mu\text{m}$ ,  $L = 17\mu\text{m}$ ,  $G = 2\mu\text{m}$  e  $\mu_c = 0.13 \text{ eV}$ .



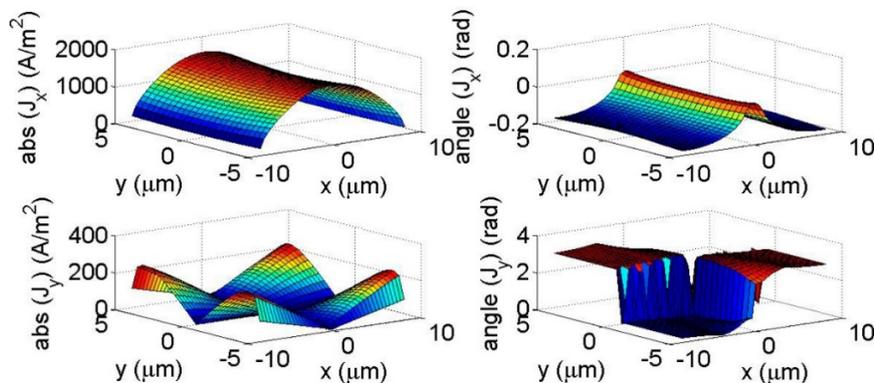
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4.1. Comparação entre as Frequências de Ressonância Calculadas por Diferentes Métodos.

	<b>1ª Ressonância</b>	<b>2ª Ressonância</b>
<b>MoM</b>	F1 = 0,89 THz	F2 = 1,34 THz
<b>Comsol</b>	F1 = 0,97 THz	F2 = 1,33 THz
<b>(TAMAGNONE, 2012b)</b>	F1 = 1,02 THz	F2 = 1,35 THz

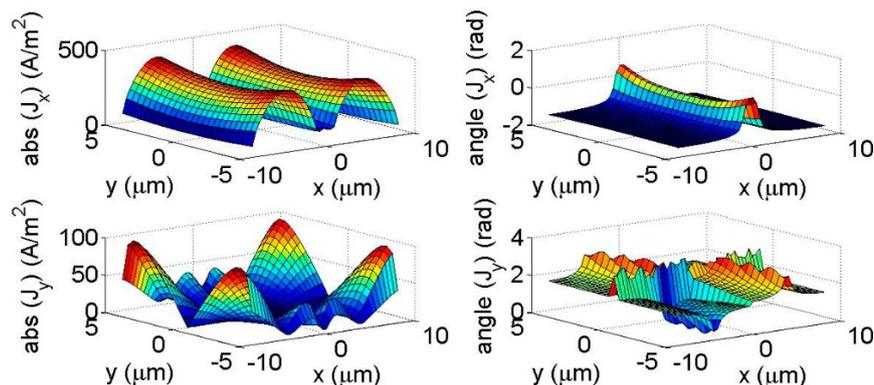
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.2. Distribuição da Corrente Superficial da Microfita Retangular de Grafeno da Figura 1 obtida na 1ª Frequência de Ressonância ( $F1 = 0,89\text{THz}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor

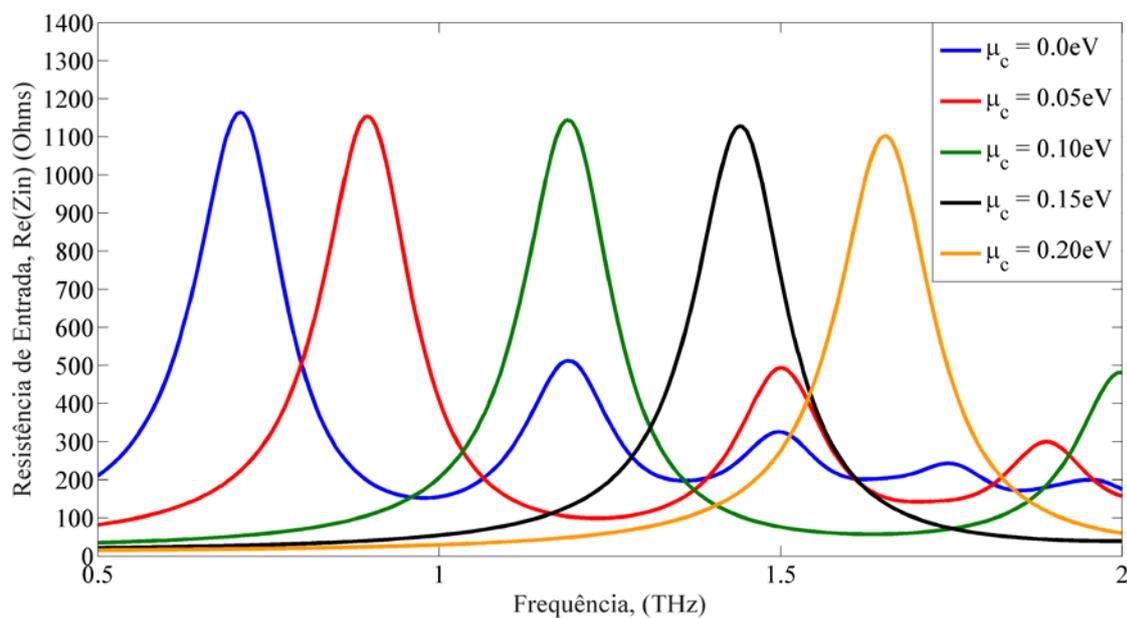
Figura 4.3. Distribuição da Corrente Superficial da Microfita Retangular de Grafeno da Figura 1 Obtida na 2ª Frequência de Ressonância ( $F2 = 1,34\text{THz}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor

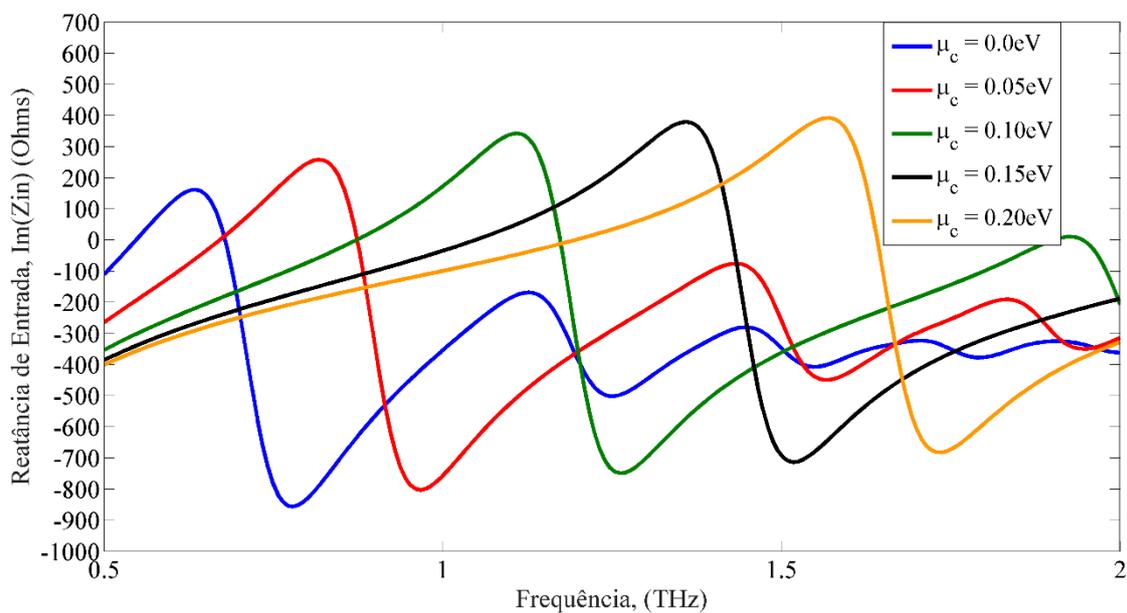
Quando alteramos os valores do potencial químico ( $\mu_C$ ) do grafeno percebemos que a impedância de entrada da antena é deslocada para a direita, porém as amplitudes se mantêm praticamente intactas. Em outras palavras, a forma das curvas permanece quase o mesmo quando são deslocadas. Os efeitos de diferentes valores de potencial químico na impedância de entrada são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6.

Figura 4.4. Variação da Impedância de Entrada  $R_{in}$  Versus Frequência para Diferentes Valores de Potencial Químico  $\mu_c$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.5. Variação da Reatância de Entrada  $X_{in}$  Versus Frequência para Diferentes Valores de Potencial Químico  $\mu_c$ .

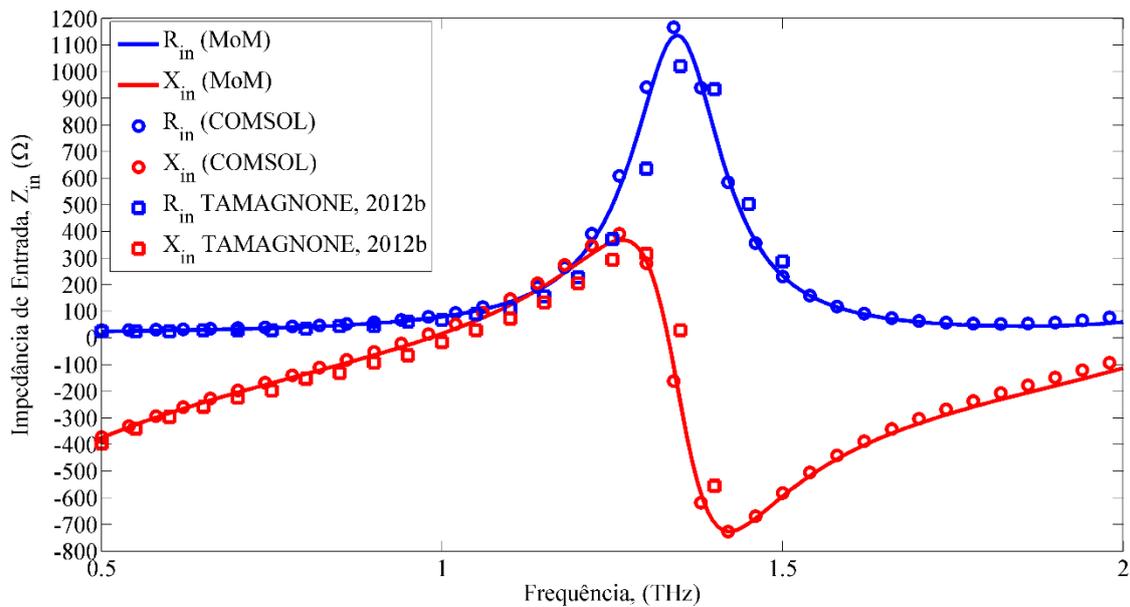


Fonte: Elaborado pelo autor

Foi feito um comparativo entre o MoM e o Comsol para análise da impedância de entrada para as duas antenas propostas em (TAMAGNONE, 2012b) – a saber, antena 1: comprimento =  $17\mu\text{m}$  e largura =  $10\mu\text{m}$  (que é a utilizada neste trabalho), utilizando um  $\mu_c = 0,13$ ; e

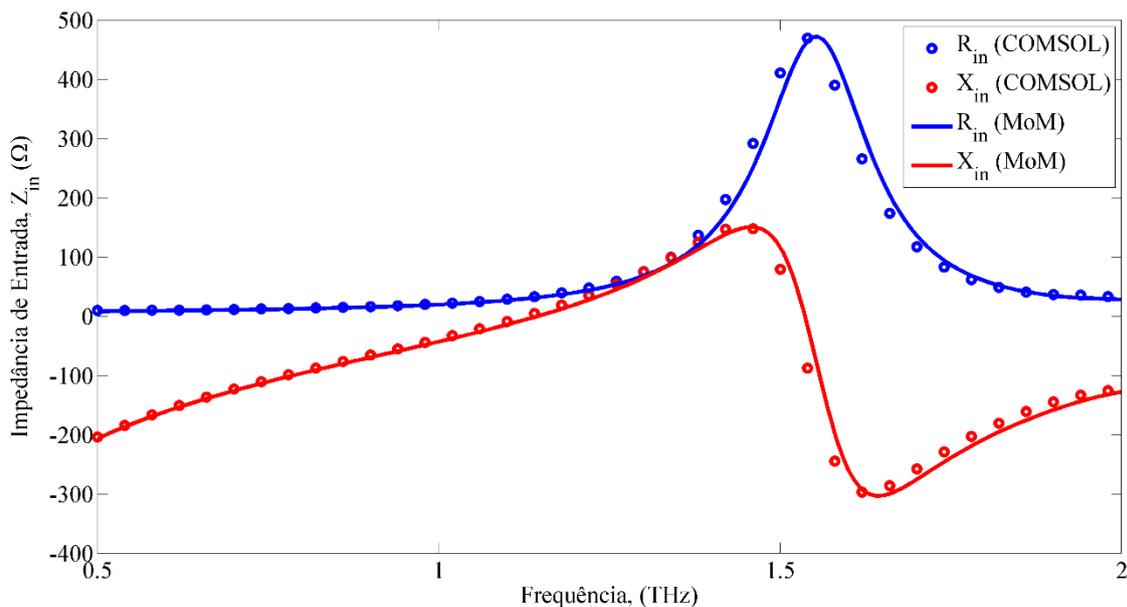
antena2: comprimento =  $23\mu\text{m}$  e largura =  $20\mu\text{m}$ , utilizando um  $\mu_c = 0,25$ . Essa análise é mostrada nas figuras 4.6 e 4.7, sendo que na figura 4.6, é feito um comparativo com a referência (já que é essa antena a ser estudada neste trabalho).

Figura 4.6. Comparação da Impedância de Entrada da Antena 1 de (TAMAGNONE, 2012b) com o MoM, o Comsol e a Referência.



Fonte: Elaborado pelo autor

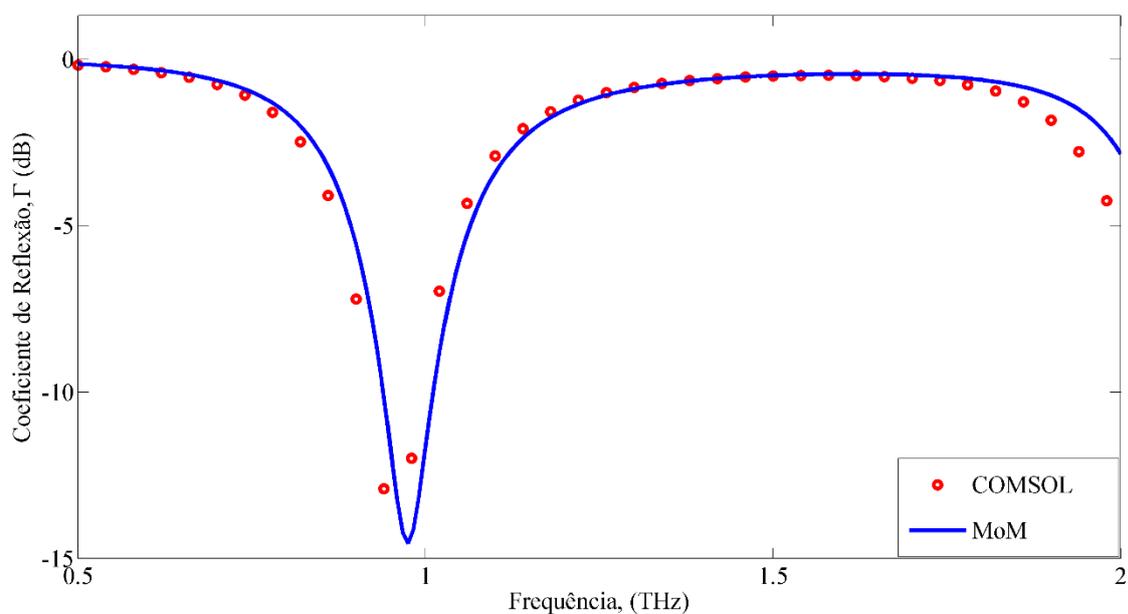
Figura 4.7. Comparação da Impedância de Entrada da Antena 2 de (TAMAGNONE, 2012b) com o MoM e Comsol.



Fonte: Elaborado pelo autor

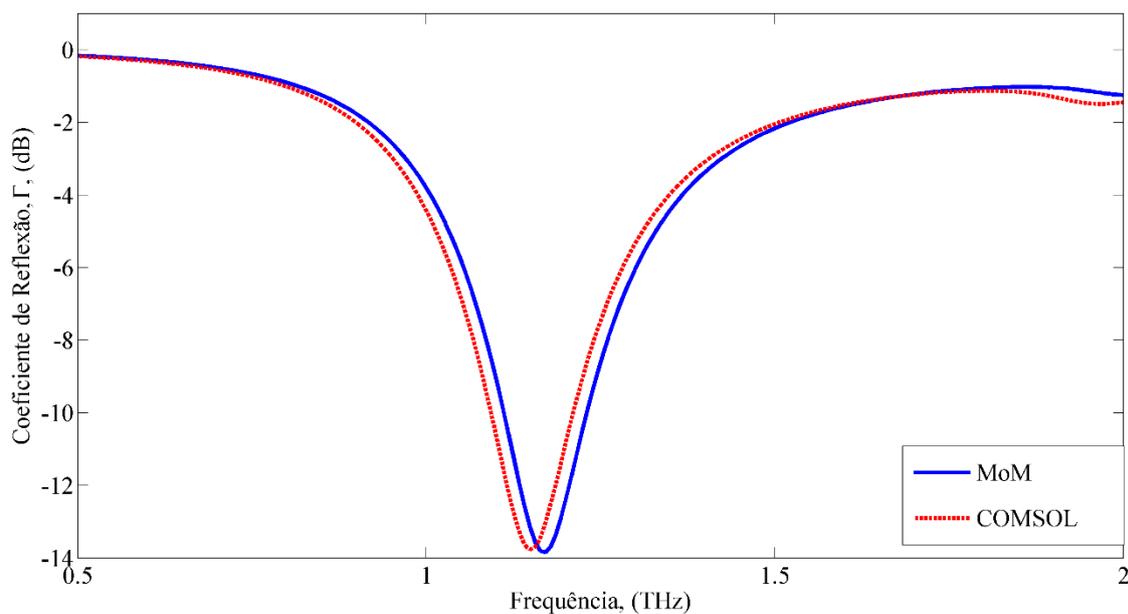
Também foi feito um comparativo entre o MoM e o Comsol para análise do coeficiente de reflexão para as duas antenas propostas em (TAMAGNONE, 2012b). Essa análise é mostrada nas figuras 4.8 e 4.9.

Figura 4.8. Coeficiente de Reflexão para a Antena 1 de (TAMAGNONE, 2012b) Comparando os Três Métodos: do MoM, do Comsol e da Referência.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.9. Coeficiente de Reflexão para a Antena 2 de (TAMAGNONE, 2012b) Comparando os Três Métodos: do MoM, do Comsol e da Referência.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os percentuais de largura de banda para a antena 1 e 2 estão discriminados na tabela 4.2. Nela podemos perceber que os maiores valores de largura de banda são 11,44% e 10,38% para as antenas 1 e 2, respectivamente e que esses valores são obtidos na 1ª ressonância.

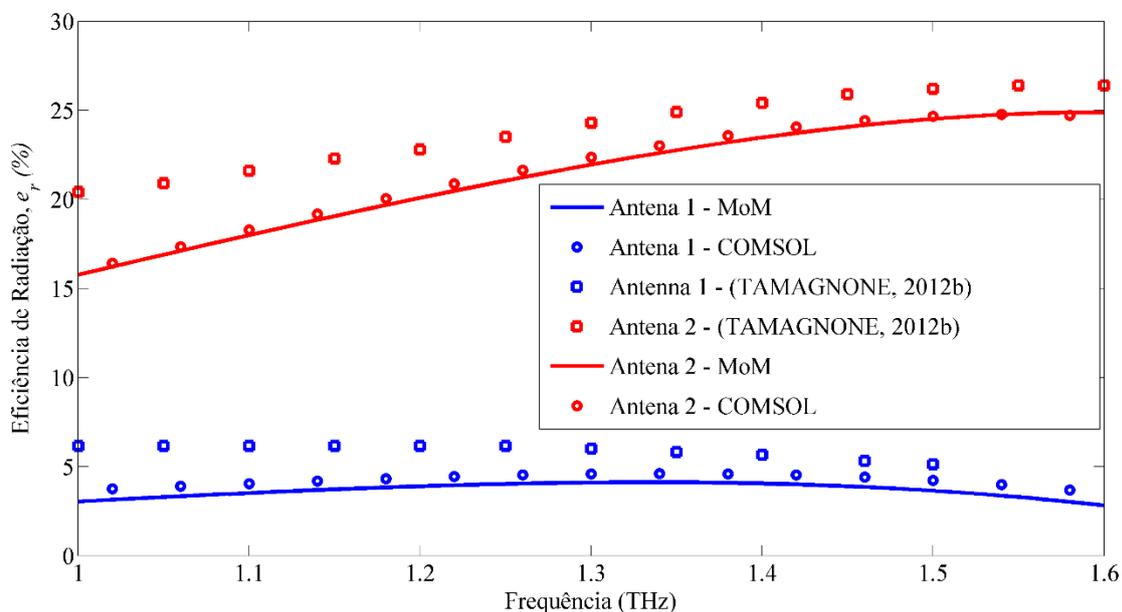
Tabela 4.2. Largura de Banda Percentual para as Duas Antenas de (TAMAGNONE, 2012b).

Largura de Banda Percentual		
	1ª Ressonância	2ª Ressonância
<b>Antena 1</b>	11,44%	10,38%
<b>Antena 2</b>	8,88%	9,12%

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, é feito um comparativo entre o MoM, o Comsol e (TAMAGNONE, 2012b) da eficiência de radiação das duas antenas propostas na referência. Perceba que para o nosso caso, a linha azul, a eficiência de radiação da microfita retangular é em torno de 5% para todos os métodos analisados. Essa análise é mostrada na figura 4.10.

Figura 4.10. Eficiência de Radiação para Ambas as Antenas de (TAMAGNONE, 2012b) Comparando os Três Métodos: do MoM, do Comsol e da Referência.



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2 Considerações Finais

Nessa seção foi feita uma comparação e validação do modelo do método dos momentos e com as da referência (TAMAGNONE, 2012b) e com o Comsol. Percebemos que a variação entre os métodos foi bem pequena, o que nos permite validar a análise.

Outra questão importante é que, ao alterarmos o potencial químico do grafeno, a impedância da antena não sofre modificação significativa em sua amplitude porém percebemos um deslocamento da impedância para diferentes valores de potencial. Isso pode ser um fator de grande influência na construção de antenas físicas, pois ao invés de alterar fatores como frequência do sinal de operação da antena, o tipo do material do qual a antena é composta, a aproximação com os condutores ou com o plano de terra, o formato da antena, por exemplo, poderíamos alterar os valores de potencial químico.

## 5. Antena de Grafeno Dipolo-Espira: Alteração da Geometria da Espira

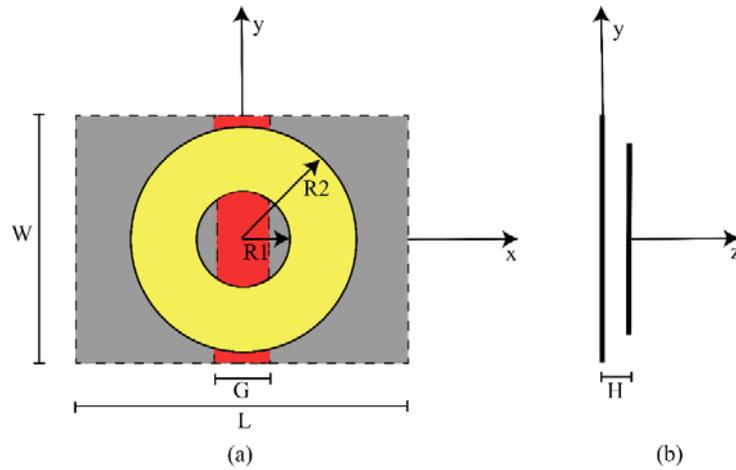
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos da análise da antena composta de microfita dipolo planar e espira circular (ambas de grafeno). O dipolo possui as mesmas dimensões fixas da antena analisada em (TAMAGNONE, 2012b) e já descrito no capítulo anterior e agora foi acrescentado uma espira circular acima do dipolo e tendo modificado suas dimensões a cada simulação para verificar a influência dela no aumento da largura de banda do dipolo.

### 5.1 Modificando a Geometria da Espira Circular

Como dito anteriormente, foi feita simulações usando uma microfita dipolo planar (alimentado por um gap de tensão – photomixer) e uma espira circular (sem alimentação - parasita), como mostrada na figura 5.1. Para análise foram alteradas as dimensões da espira (raio interno:  $R_1$ , raio externo:  $R_2$ , altura em relação ao dipolo:  $H$ ), sendo os valores de  $R_1$  com as seguintes porcentagens: 40%, 60% e 80% do raio externo, os valores de  $R_2$  em oito valores: 3 a  $10\mu\text{m}$  e os valores de  $H$ : 1 a  $5\mu\text{m}$ , como são mostrados alguns exemplos na figura 5.2. No total foram realizadas 120 simulações com o código MoM-2D desenvolvido. O valor do potencial químico foi mantido fixo em todas as simulações ( $\mu_C = 0.13 \text{ eV}$ ) para ambas as antenas.

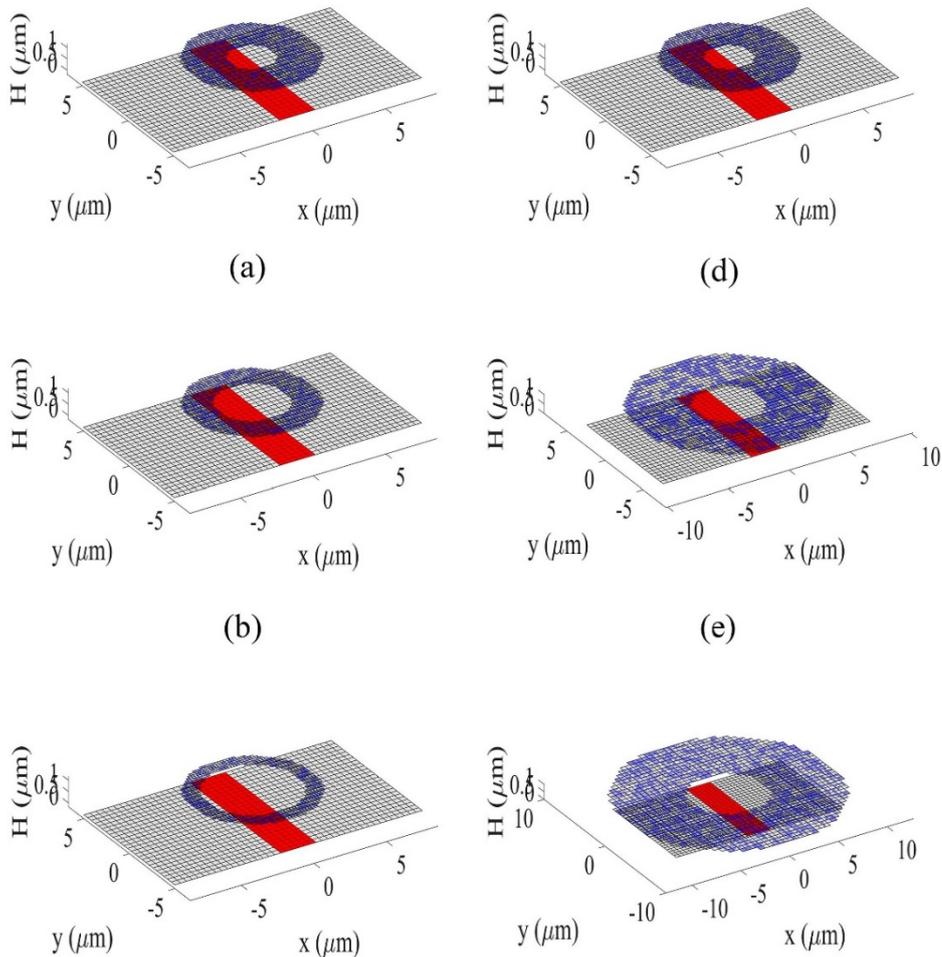
A escolha de uma espira circular como antena parasita se dá pelo melhor resultado obtido em análises da região do campo distante usando antenas parasitas circulares e esféricas em antenas metálicas, tendo uma simetria rotacional completa no plano  $z$  (COSTA, 2006b; COSTA, 2010). Espera-se que essa mesma ideia seja aplicada para antenas de grafeno. Por isso a escolha de uma espira circular como parasita a fim de averiguar esse comportamento.

Figura 5.1. Geometria da Antena de Grafeno Composta de Dipolo e Espira Circular.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.2. Geometria e Malha do MoM-2D de Exemplos da Antena de Grafeno Composta com Diferentes Valores do Raio Interno. (a)  $R1 = 0,4 \times R2$ . (b)  $R1 = 0,6 \times R2$ . (c)  $R1 = 0,8 \times R2$ . E com diferentes valores de raio externo  $R2$ , sendo o raio interno fixo  $R1 = 0,4 \times R2$ . (d)  $R2 = 4\mu\text{m}$ , (e)  $R2 = 7\mu\text{m}$  e (f)  $R2 = 10\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

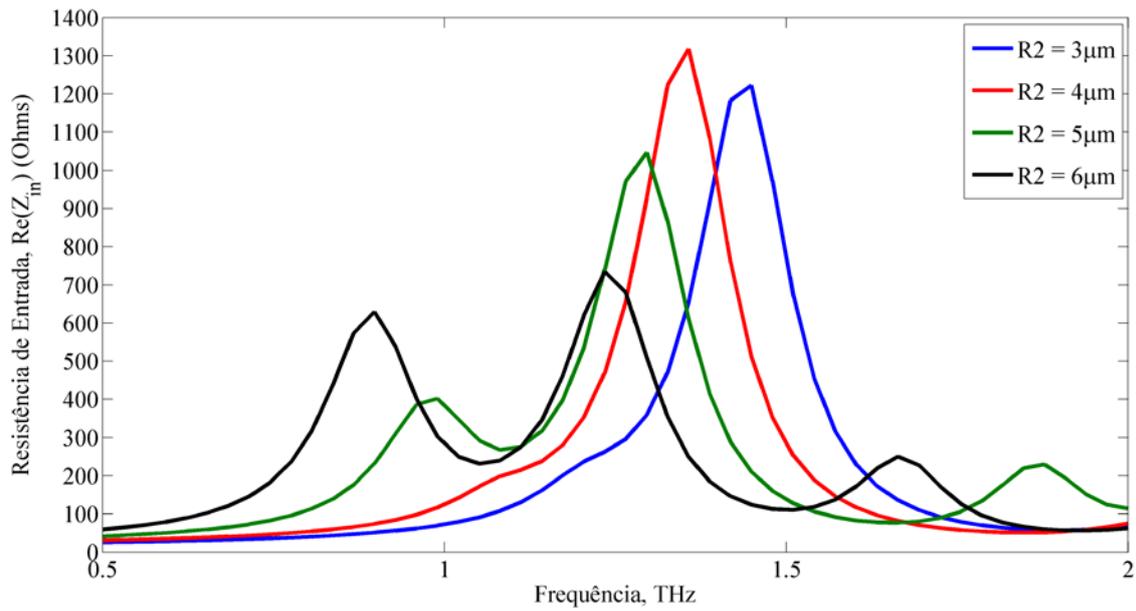
A análise dos resultados dessas simulações permitiu concluir inicialmente que quanto maior  $R_1$  e quanto mais distante o dipolo estiver da espira, menor é o acoplamento eletromagnético entre os elementos e a impedância de entrada fica praticamente igual a do dipolo isolado. Logo, a distância entre os dois elementos e o valor de  $R_1$  que obteve melhores acoplamentos e características de banda larga foram  $H = 1\mu\text{m}$  e  $R_1 = 0,4 \times R_2$ .

Outro ponto importante a ser mencionado é que ao aproximarmos a espira circular do dipolo, não houve influência significativa em relação a eficiência de radiação da antenna para as duas primeiras ressonâncias, tendo valores muito próximos a  $H = 1\mu\text{m}$ . Só vamos ter influência quando afastamos a espira do dipolo e, nesse caso, a eficiência de radiação tende ao valor da eficiência para o caso do dipolo isolado (ver Figura 4.10); e para valores de ressonância maiores (da terceira em diante), porém essas ressonâncias não são tão intensas quanto as duas primeiras, logo são desprezadas e não são analisadas neste trabalho.

A fim de obter um melhor casamento entre a impedância de entrada da antenna ( $Z_{in}$ ) e impedância característica da linha de transmissão ( $Z_0$ ) foi feito uma análise das resistências de entrada para os melhores acoplamentos, ou seja, para os valores da espira circular iguais a  $H = 1\mu\text{m}$  e  $R_1 = 0,4 \times R_2$  (ver figuras 5.3 e 5.4 – resistência e reatância, respectivamente, para os valores de raios externos entre 3 e 6  $\mu\text{m}$ ; ver figuras 5.5 e 5.6 – resistência e reatância, respectivamente, para os valores de raios externos entre 7 e 10  $\mu\text{m}$ ;). Visando esse acoplamento e uma melhor largura de banda, temos dois valores aproximados para a impedância característica da linha de transmissão:  $Z_0 = 80 \Omega$  para os valores de raios externos entre 3 a 6  $\mu\text{m}$  (primeiro grupo) e  $Z_0 = 150 \Omega$  para os valores de raios externos entre 7 a 10  $\mu\text{m}$  (segundo grupo).

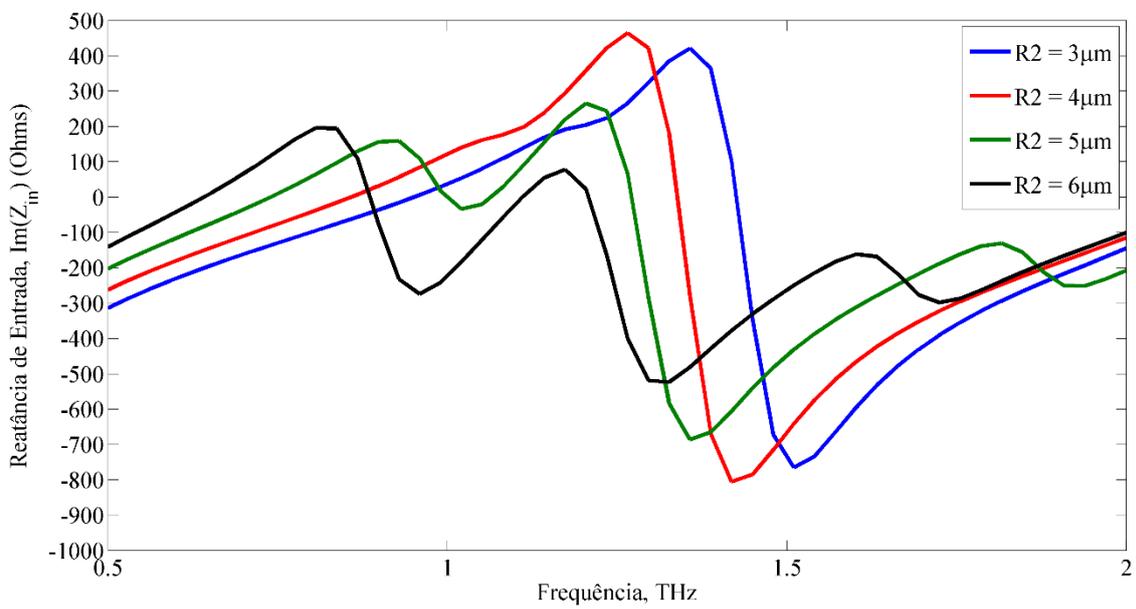
Os valores para a impedância característica da linha de transmissão (80  $\Omega$  e 150  $\Omega$ ) foram escolhidos devido apresentarem o melhor valor de largura de banda levando em consideração cada grupo como um todo (sendo que cada grupo é formado por 4 variações de raio externo), ou seja, esse valores de  $Z_0$  foram escolhidos pensando nos quatro valores de raio externo que compõe cada grupo como um todo e não individualmente para cada valor de raio externo.

Figura 5.3. Resistência de Entrada para Raios Externos entre 3 a 6  $\mu\text{m}$ .



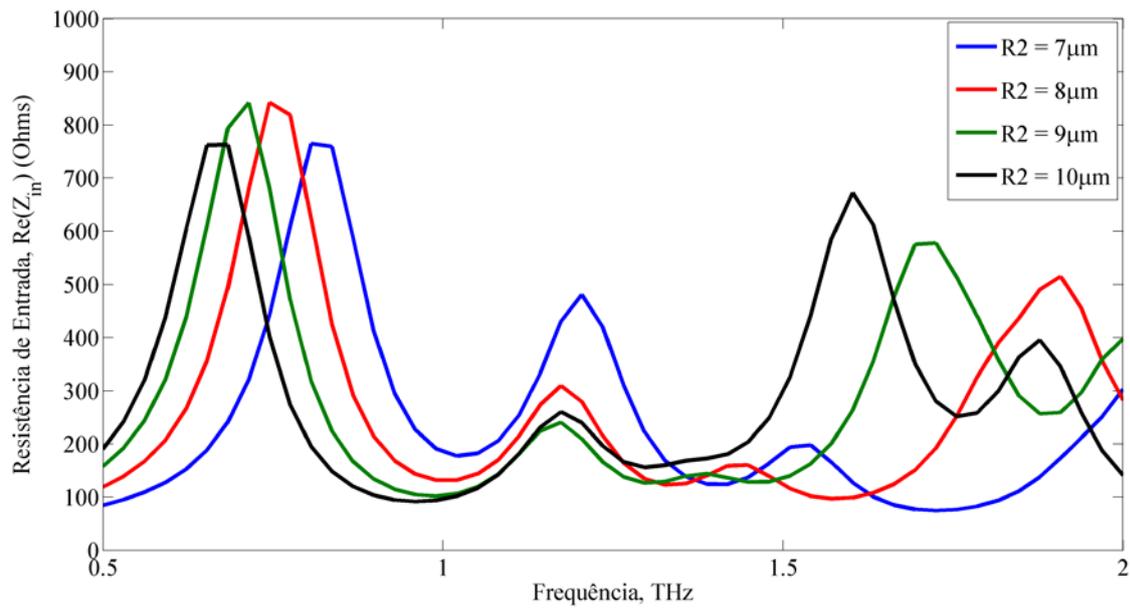
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.4. Reatância de Entrada para Raios Externos entre 3 a 6  $\mu\text{m}$ .



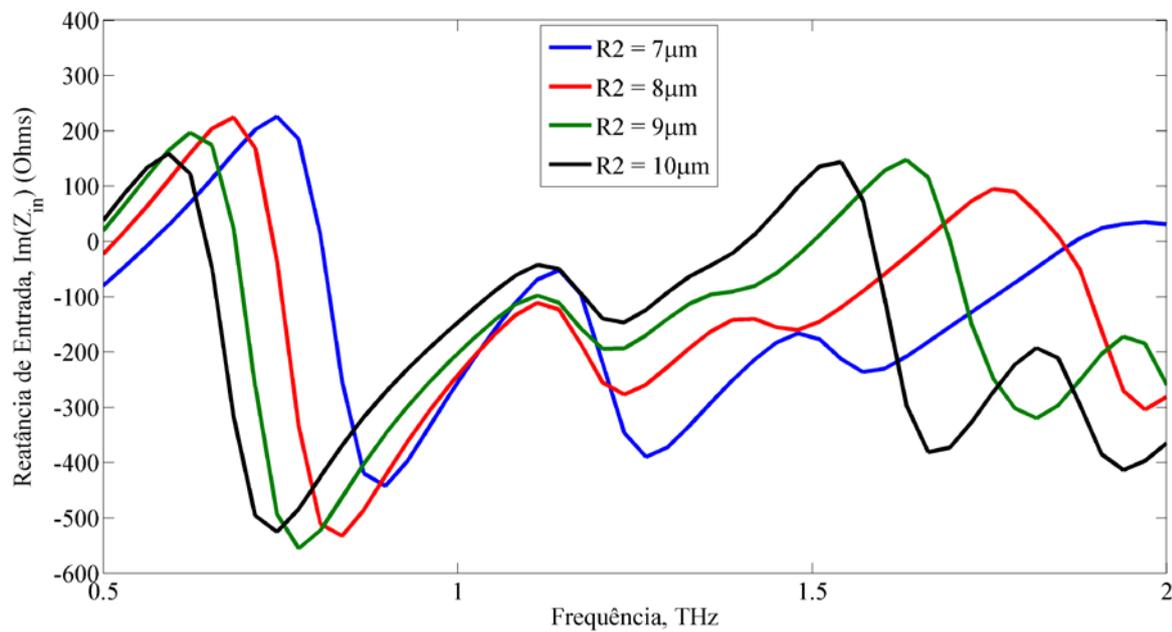
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.5. Resistência de Entrada para Raios Externos entre 7 a 10  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.6. Reatância de Entrada para Raios Externos entre 7 a 10  $\mu\text{m}$ .



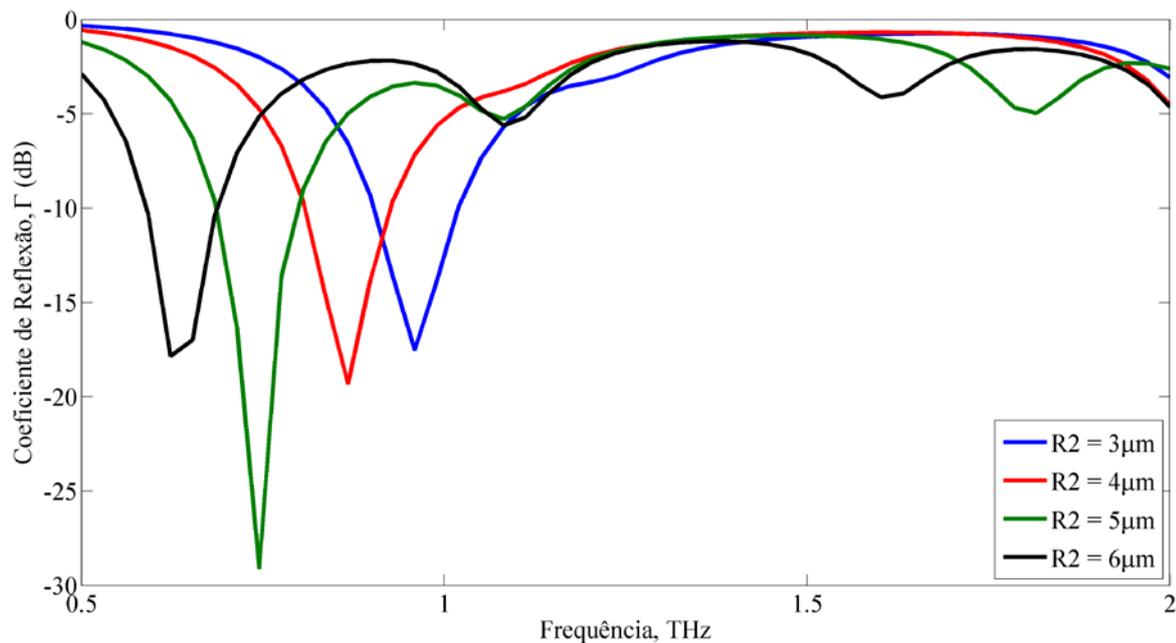
Fonte: Elaborado pelo autor

Nas figuras 5.7 e 5.8 temos os coeficientes de reflexão para cada valor de  $R_2$ . Através delas, obtemos a largura de banda percentual, utilizando a seguinte equação:

$$\%B = 200x \left( \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \right) \quad (5.1)$$

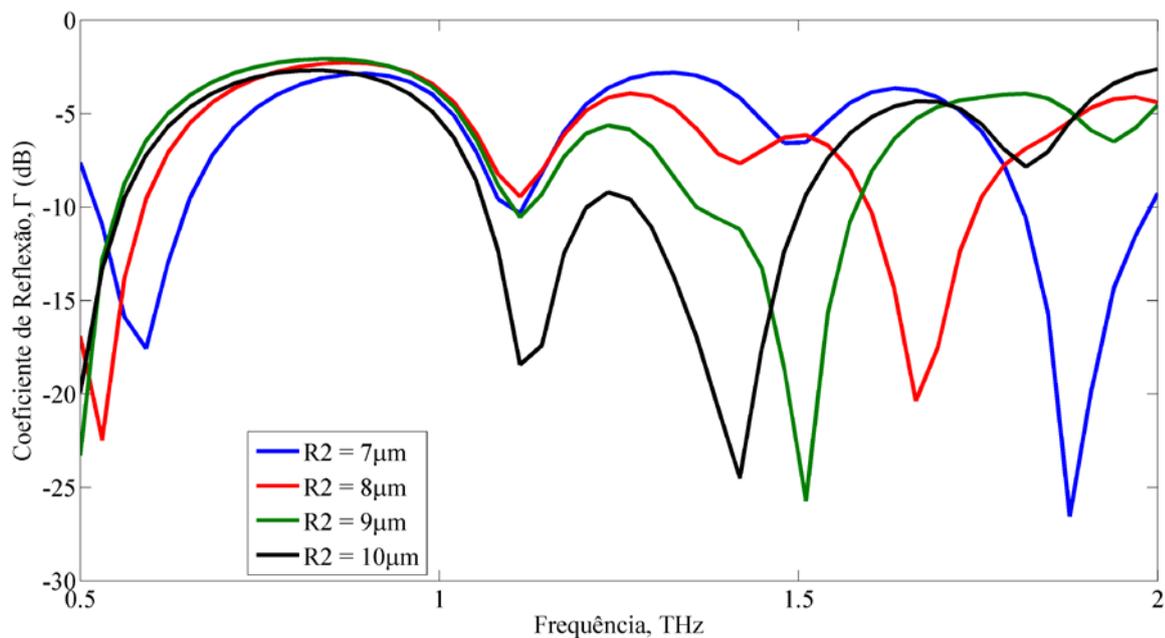
onde  $f_H$  é a frequência mais alta e  $f_L$  é a frequência mais baixa (considerando o limiar de -10dB).

Figura 5.7. Coeficiente de Reflexão para Raios Externos entre 3 a 6  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.8. Coeficiente de Reflexão para Raios Externos entre 7 a 10  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaborador pelo autor

A largura de banda percentual está descrita na tabela 5.1. Nela temos os resultados tanto para  $R_1 = 0,4 \times R_2$  quanto para  $R_1 = 0,6 \times R_2$  e  $R_1 = 0,8 \times R_2$ . Os resultados mostram que ao

aumentarmos o valor do raio externo da espira circular aumenta-se a largura de banda da antena e a faixa de casamento vai se deslocando cada vez mais para baixas frequências. Comparando as três variações de R1 com as oito variações do R2, nota-se que o melhor resultado é quando  $R2 = 7 \mu\text{m}$  e  $R1 = 0,4 \times R2$ , tendo um valor de 21,65% de largura de banda.

Tabela 5.1. Largura de Banda Percentual da Antena de Grafeno Composta para Diferentes Valores dos Raios R1 e R2.

<b>Largura de Banda Percentual</b>			
	<b>R1</b>		
<b>R2</b>	<b>40% de R2</b>	<b>60% de R2</b>	<b>80% de R2</b>
<b>3<math>\mu\text{m}</math></b>	12,10	14,72	11,24
<b>4<math>\mu\text{m}</math></b>	13,69	10,73	10,68
<b>5<math>\mu\text{m}</math></b>	15,35	6,86	10,11
<b>6<math>\mu\text{m}</math></b>	15,37	4,60	10,2
<b>7<math>\mu\text{m}</math></b>	21,65	11,69	15,27
<b>8<math>\mu\text{m}</math></b>	9,023	12,60	14,41
<b>9<math>\mu\text{m}</math></b>	2,154	18,74	14,48
<b>10<math>\mu\text{m}</math></b>	9,901	17,67	14,60

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro ponto é que uma forma de aumentar a largura de banda de uma antena de microfita em 10 a 20% é adicionando patches parasitas (HUYNH, 1995). Como nessa análise, a antena estudada tem uma antena parasita e seu melhor resultado foi de 21,65%, então temos uma concordância com a literatura (mesmo que seja de materiais diferentes mas o comportamento é bem similar entre uma antena de microfita convencional e uma de grafeno).

Os resultados mostram que quanto maior for o valor do raio interno, a largura de banda tende a diminuir. Porém, nota-se que, em todos os casos, a largura de banda, para um determinado valor de raio interno, não possui uma tendência crescente ou decrescente. Isso se deve ao fato da escolha da impedância característica da linha de transmissão, ou seja, ao escolher um valor para  $Z_0$ , podemos aumentar ou diminuir a largura de banda da antena. Além disso, se escolhermos um valor de  $Z_0$  para cada alteração paramétrica da espira circular,

podemos alterar a largura de banda para aquela geometria da espira. Neste trabalho, uma análise de qual melhor valor de impedância característica de linha de transmissão para cada alteração geométrica da espira está fora do escopo.

Para o melhor caso apresentado nesta seção ( $R2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $R1 = 0,4 \times R2$  e  $H = 1 \mu\text{m}$ ) temos que a frequência da 1ª e da 2ª ressonância são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.2. Frequências de Ressonância da Antena de Grafeno Composta para o caso da Espira com Dimensões  $R2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $R1 = 0,4 \times R2$  e  $H = 1 \mu\text{m}$ .

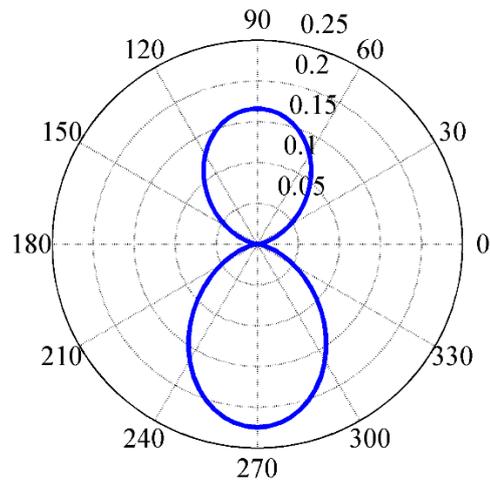
<b>R2</b>	<b>1ª Ressonância</b>	<b>2ª Ressonância</b>
<b>7<math>\mu\text{m}</math></b>	F1=0.51 THz	F2=0,6162 THz

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas figuras 5.9 e 5.10, temos o diagrama 2D de radiação para o campo distante no plano  $\theta = 0$  para a 1ª e a 2ª ressonância, respectivamente, e nas figuras 5.11 e 5.12, temos o diagrama 3D de radiação para o campo distante para a 1ª e a 2ª ressonância, respectivamente. Os quatro diagramas são para o melhor caso.

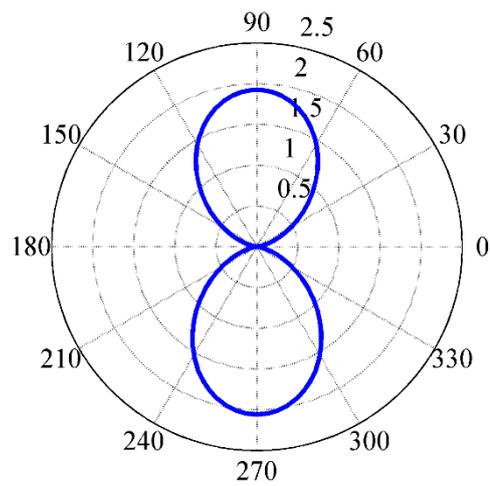
Analisando as figuras, temos uma diretividade com um valor igual a 0,16 (ou -7,95 dB) para a 1ª ressonância e igual a 1,92 (ou 2,83 dB) para a 2ª ressonância (valor próximo a diretividade de uma antena dipolo infinitesimal é igual a 1,5 (BALANIS, 2005)). Podemos perceber que o formato do diagrama assemelha-se a um dipolo infinitesimal, esse comportamento é esperado devido ao tamanho reduzido (miniaturizado) da antena aliado ao fato da densidade de corrente está concentrada no centro da antena. Podemos perceber também que a espira circular atua como um refletor, devido a intensidade do campo elétrico ser maior na 2ª ressonância do que na 1ª.

Figura 5.9. Diagrama de Radiação 2D no plano  $\theta = 0$  para o caso  $R_2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1 \mu\text{m}$  para a 1ª Ressonância.



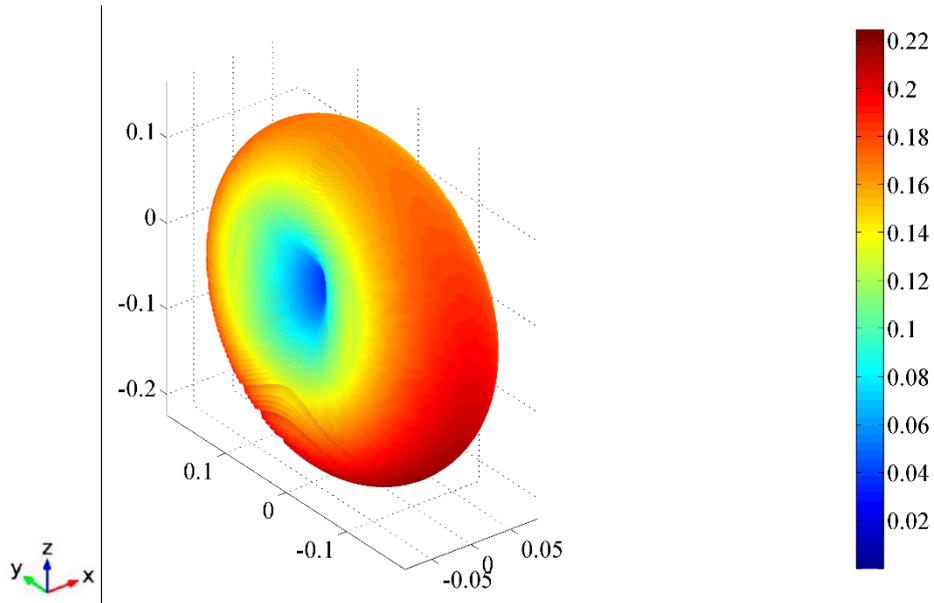
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.10. Diagrama de Radiação 2D no plano  $\theta = 0$  para o caso  $R_2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1 \mu\text{m}$  para a 2ª Ressonância.



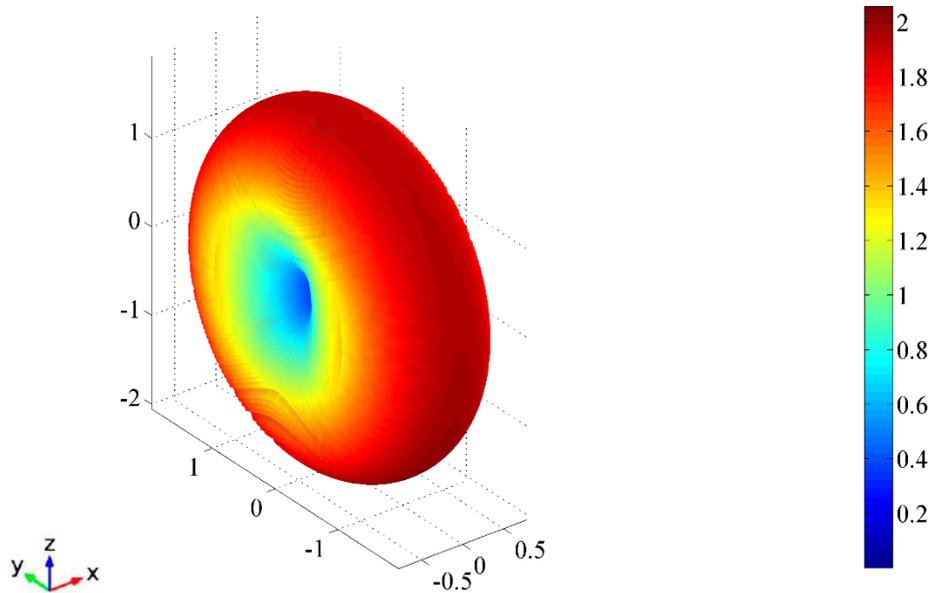
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.11. Diagrama de Radiação 3D para o caso  $R_2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1 \mu\text{m}$  para a 1ª Ressonância.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.12. Diagrama de Radiação 3D para o caso  $R_2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1 \mu\text{m}$  para a 2ª Ressonância.



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.2 Considerações Finais

Nesta seção foi feita uma análise alterando as dimensões da espira circular (raio interno:  $R_1$ , raio externo:  $R_2$ , altura em relação a microfita:  $H$ ) e mantendo os valores das dimensões da

microfita dipolo planar. Para ambas as antenas o valor de potencial químico é mantido igual ( $\mu_C = 0.13 \text{ eV}$ ).

Foi verificado que quanto maior  $R_1$  e quanto mais distante o dipolo estiver da espira, menor é o acoplamento eletromagnético entre os elementos e a impedância de entrada fica praticamente igual a da microfita dipolo planar isolado. Logo, a distância entre os dois elementos e o valor de  $R_1$  que obteve melhores acoplamentos e características de banda larga foram  $H = 1\mu\text{m}$  e  $R_1 = 0,4 \times R_2$ .

Dependendo da escolha da impedância característica da linha de transmissão podemos aumentar ou diminuir a largura de banda da antena e para cada alteração geométrica na antena parasita podemos escolher um valor  $Z_0$  para aumentar a largura de banda.

Nas nossas simulações, o melhor resultado obtido foi 21,65% para a espira circular com a seguinte geometria:  $R_2 = 7\mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1\mu\text{m}$ .

A antena espira circular atua como uma antena refletora na 1ª ressonância e somente na 2ª ressonância ela gera uma diretividade 1,92 (muito próxima a obtida por um dipolo infinitesimal).

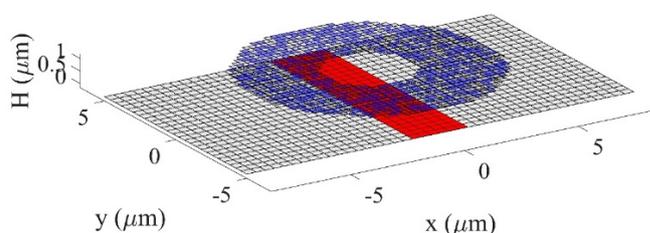
## 6. Antena de Grafeno Dipolo-Espira: Alteração do Potencial Químico da Espira

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos da análise da antena de grafeno composta apresentado no capítulo anterior, com o diferencial que o potencial químico da espira circular é alterado, a fim de averiguar a influência dessa alteração no aumento (ou diminuição) da largura de banda. É feito um comparativo com o trabalho de (SOARES, 2016), o qual utilizou a ferramenta Comsol para modelagem e análise das antenas.

### 6.1 Modificando o Potencial Químico da Espira Circular

As dimensões das antenas (tanto do dipolo quanto da espira) foram mantidas fixas – dimensões da antena de microfita dipolo planar:  $W = 17\mu\text{m}$  e  $L = 10\mu\text{m}$ ; dimensões da espira circular:  $H = 1\mu\text{m}$ ,  $R1 = 0,4 \times R2$  e  $R2 = 5\mu\text{m}$  – variando somente o potencial químico do grafeno na espira circular (como mostrado na figura 6.1). Como dito anteriormente, para análise foi mantido o potencial químico da antena de microfita dipolo planar em  $\mu_C = 0,13$  eV e foram alterados os valores do potencial químico da espira circular em  $\mu_C = 0; 0,03; 0,07; 0,1$  e  $0,13$  eV.

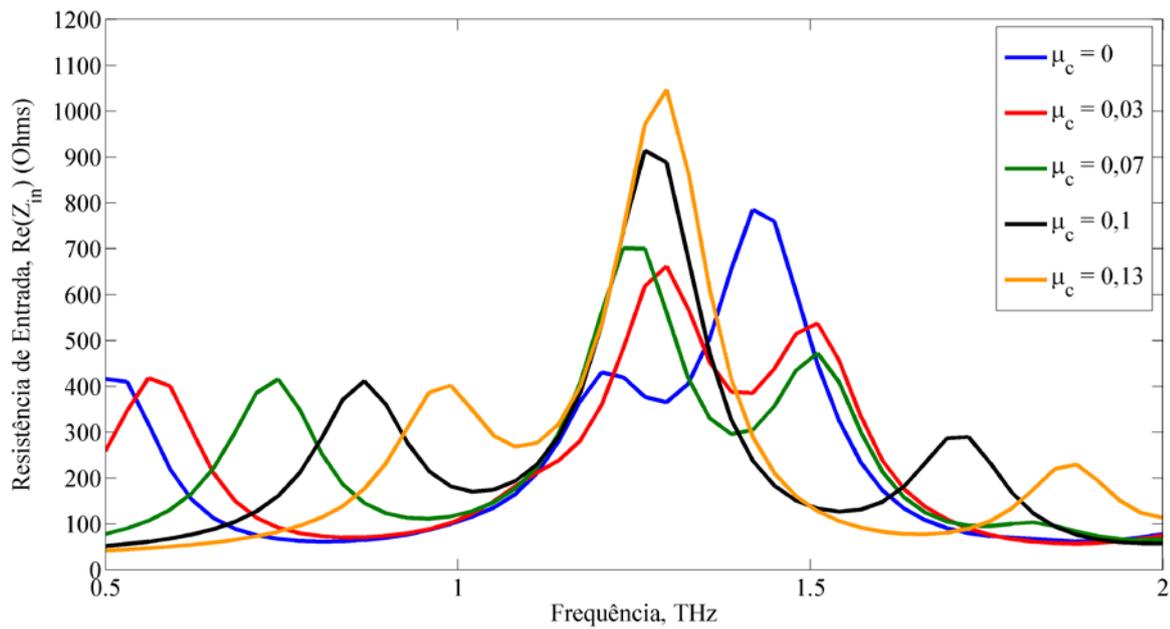
Figura 6.1. Geometria e Malha do MoM-2D da Antena de Grafeno Composta com Espira Circular com Dimensão:  $R2 = 5\mu\text{m}$ ,  $R1 = 0,4 \times R2$  e  $H = 1\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

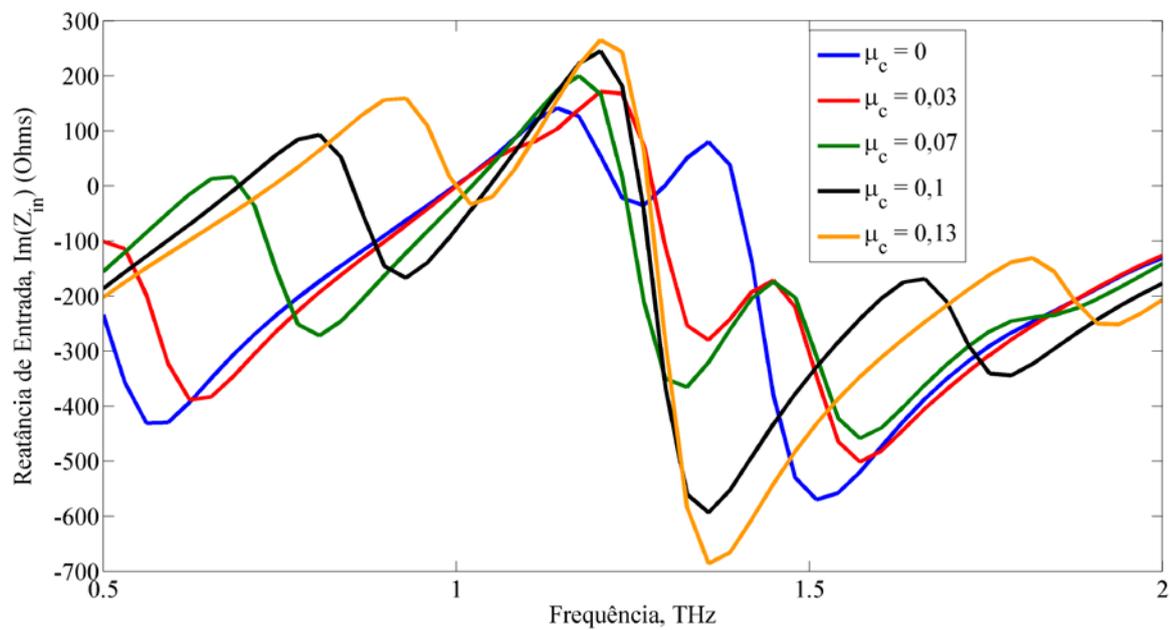
Na Figura 6.2 e 6.3 são apresentadas a impedância e a reatância de entrada para os diferentes valores de  $\mu_C$ .

Figura 6.2. Resistência de Entrada da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões:  $R_2 = 5\mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6.3. Reatância de Entrada da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões:  $R_2 = 5\mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise dos resultados das simulações permitiu concluir inicialmente que alterando os valores do potencial químico da espira podemos alterar a largura de banda, podendo aumentá-la para praticamente o dobro, como mostrado na tabela 6.1, quando comparado a análise anterior (Tabela 5.1, Seção 5.1). Dentre os valores alterados de potencial químico o que teve melhor resultado foi o  $\mu_C = 0,1$  eV.

Tabela 6.1. Largura de Banda Percentual da Antena Dipolo-Espira de Grafeno para Diferentes Valores de  $\mu_C$

<b>Largura de Banda Percentual</b>					
<b>Potencial Químico</b>					
<b><math>\mu_C</math></b>	<b>0</b>	<b>0,03</b>	<b>0,07</b>	<b>0,1</b>	<b>0,13</b>
<b>Percentual</b>	22,36%	16,89%	21,47%	43,47%	26,78%

Fonte: Elaborado pelo autor

Visando o acoplamento entre  $Z_{in}$  e  $Z_0$  e uma melhor largura de banda, para os valores de  $\mu_C = 0; 0,07, 0,1$  e  $0,13$ , foi usado a impedância característica da linha de transmissão:  $Z_0 = 300 \Omega$ . E para o valor  $\mu_C = 0,03$ , foi usado a impedância característica da linha de transmissão:  $Z_0 = 150 \Omega$ . Esses mesmo valores foram usados no comparativo com o Comsol (SOARES, 2016).

Quando comparamos os dados do MoM e o do Comsol (SOARES, 2016), percebemos que a diferença entre eles é muito pouca, tanto que, para o melhor caso dele, foi com  $\mu_C = 0,1$  e obteve 40,26% de largura de banda contra 43,47% do MoM.

Vale frisar que a escolha da impedância característica da linha de transmissão influencia na largura de banda. Na seção anterior, foi utilizado um  $Z_0 = 150 \Omega$  e aqui foi utilizado um  $Z_0 = 300 \Omega$ . Na seção anterior, tivemos um percentual de largura de banda de 15,35% e aqui tivemos um percentual de 26,78%<sup>11</sup>.

Para o melhor caso apresentado nesta seção ( $\mu_C = 0,1$ ) temos que a frequência da 1ª e da 2ª ressonância são apresentadas na tabela 6.2.

<sup>11</sup> Os valores de  $Z_0$  são diferentes nos capítulos 5 e 6 devido a escolha ser uma padronização entre as faixas de raio externo do capítulo 5 (3 $\mu$ m a 6  $\mu$ m).

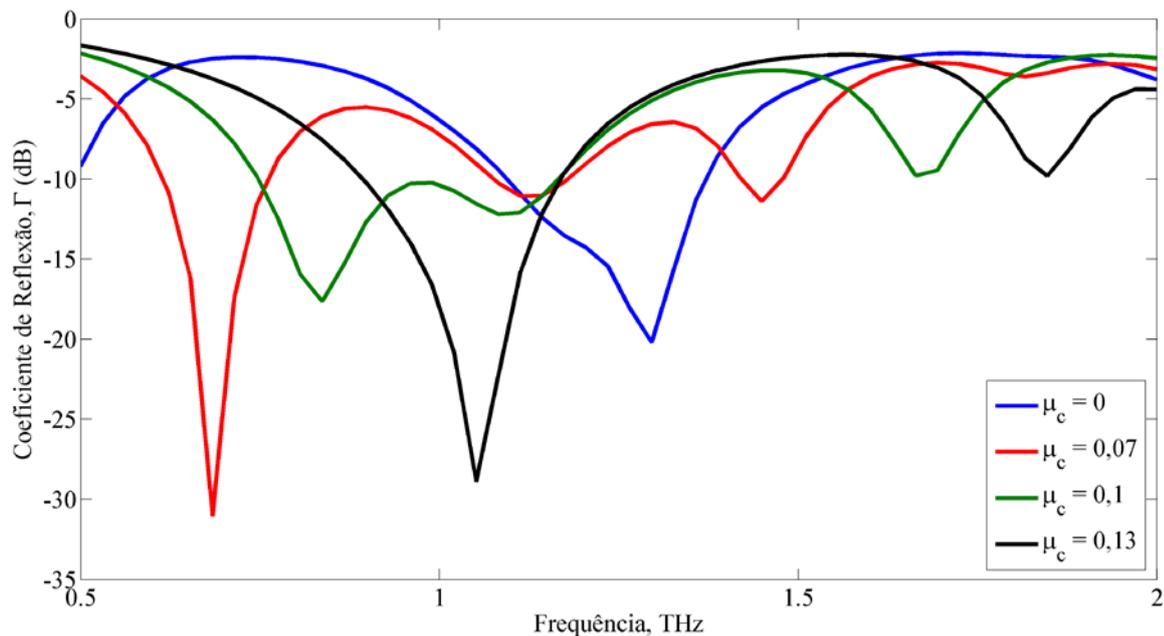
Tabela 6.2. Frequências de Ressonância da Antena de Grafeno Composta para o caso da Espira com  $\mu_c = 0,1$ .

$\mu_c$	1ª Ressonância	2ª Ressonância
0,1	F1=0.69 THz	F2=0,85 THz

Fonte: Elaborado pelo autor

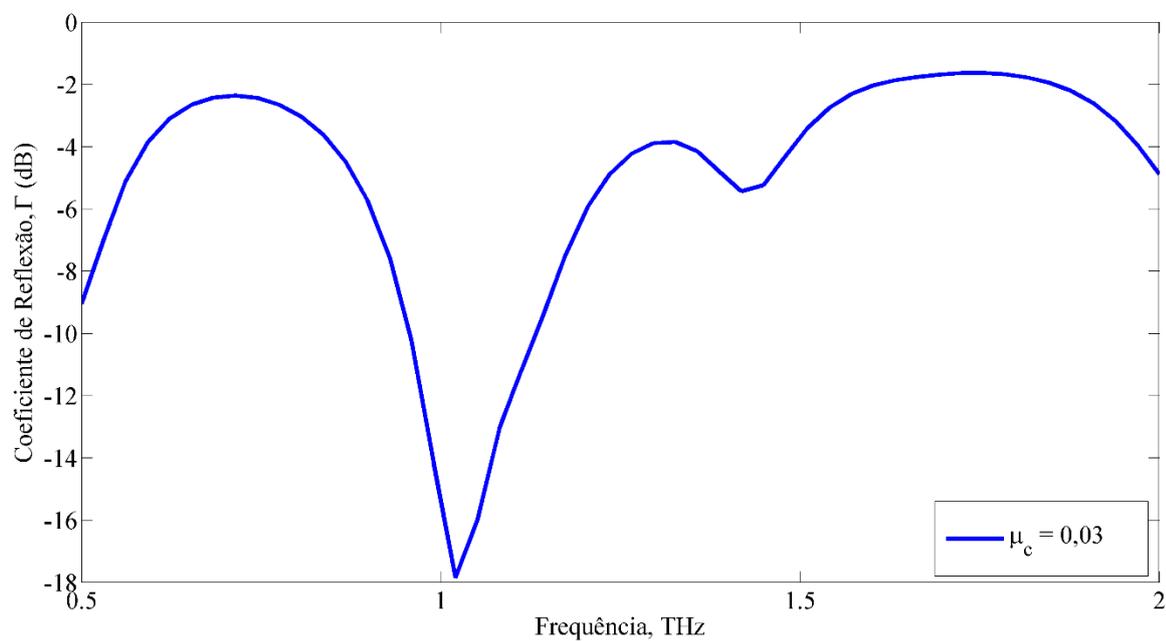
As figuras 6.4 e 6.5 apresenta os resultados do coeficiente de reflexão, sendo que a 1ª figura não possui  $\mu_c = 0,03$  e a 2ª possui o coeficiente de reflexão somente para a espira circular com esse potencial químico. Essa separação só foi feita devido esse potencial químico utilizar um valor de  $Z_0$  diferente dos demais. Através destas curvas obtemos a largura de banda para cada um dos valores de  $\mu_c$ . Para calcular a largura de banda percentual a equação usada a mesma equação 5.1.

Figura 6.4. Coeficiente de Reflexão da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões:  $R_2 = 5\mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1\mu\text{m}$ . Sem o  $\mu_c = 0,03$



Fonte: Elaborado pelo autor

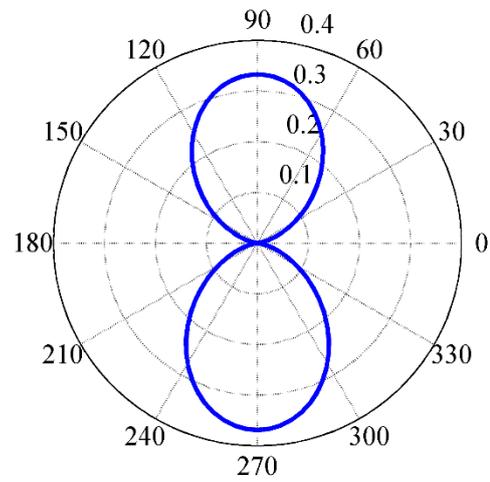
Figura 6.5. Coeficiente de Reflexão da Antena de Grafeno Composta Alterando o Potencial Químico da Espira com Dimensões:  $R_2 = 5\mu\text{m}$ ,  $R_1 = 0,4 \times R_2$  e  $H = 1\mu\text{m}$ . Somente do  $\mu_c = 0,03$



Fonte: Elaborado pelo autor

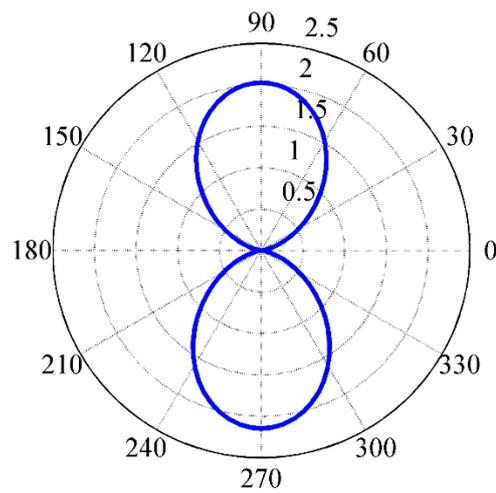
Nas figuras 6.6 e 6.7, temos o diagrama 2D de radiação para o campo distante no plano  $\theta = 0$  para a 1ª e a 2ª ressonância, respectivamente, e nas figuras 6.8 e 6.9, temos o diagrama 3D de radiação para o campo distante para a 1ª e a 2ª ressonância, respectivamente. Os quatro diagramas são para o melhor caso.

Figura 6.6. Diagrama de Radiação 2D no plano  $\theta = 0$  para o caso  $\mu_C = 0,1$  para a 1ª Ressonância.



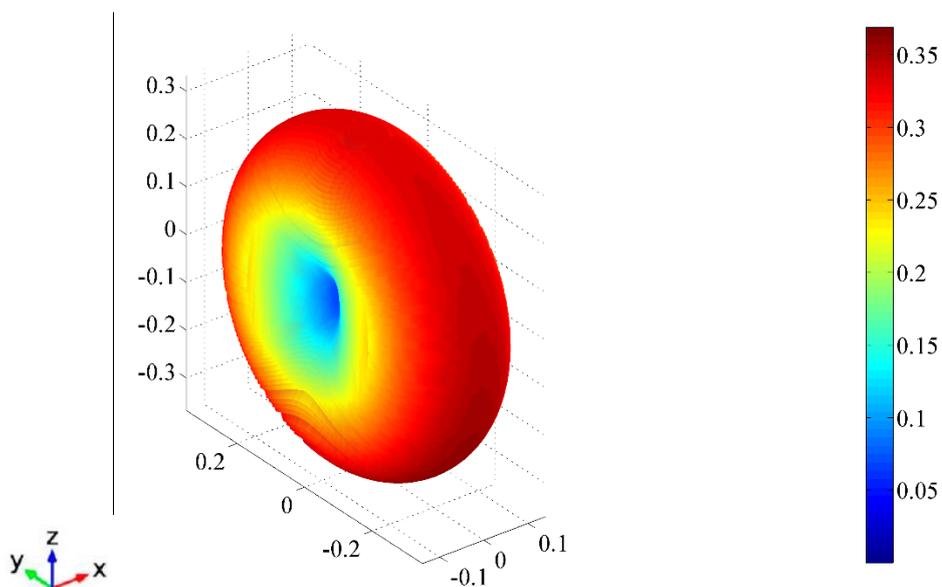
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6.7. Diagrama de Radiação 2D no plano  $\theta = 0$  para o caso  $\mu_C = 0,1$  para a 2ª Ressonância.



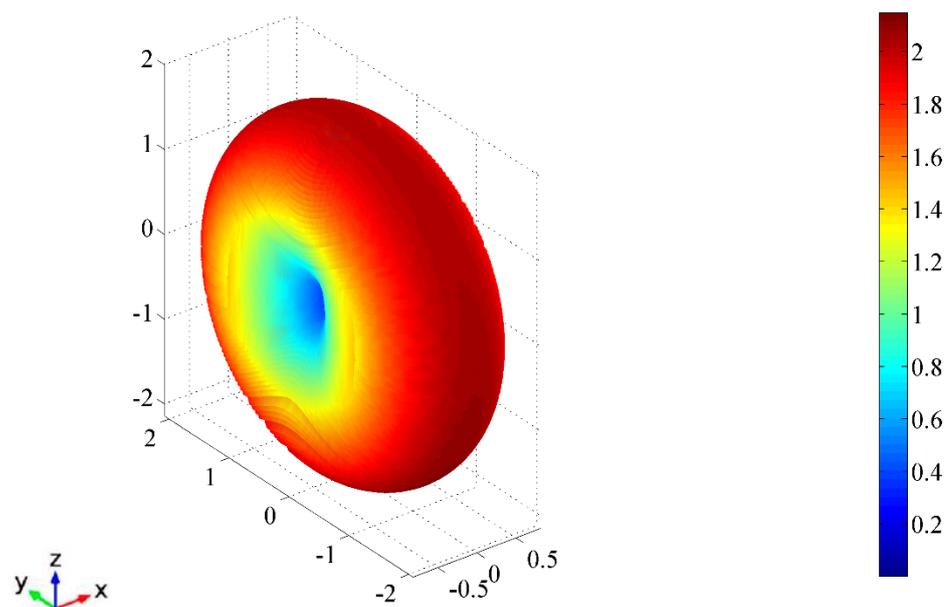
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6.8. Diagrama de Radiação 3D para o caso  $\mu_c = 0,1$  para a 1ª Ressonância.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6.9. Diagrama de Radiação 3D para o caso  $\mu_c = 0,1$  para a 2ª Ressonância.



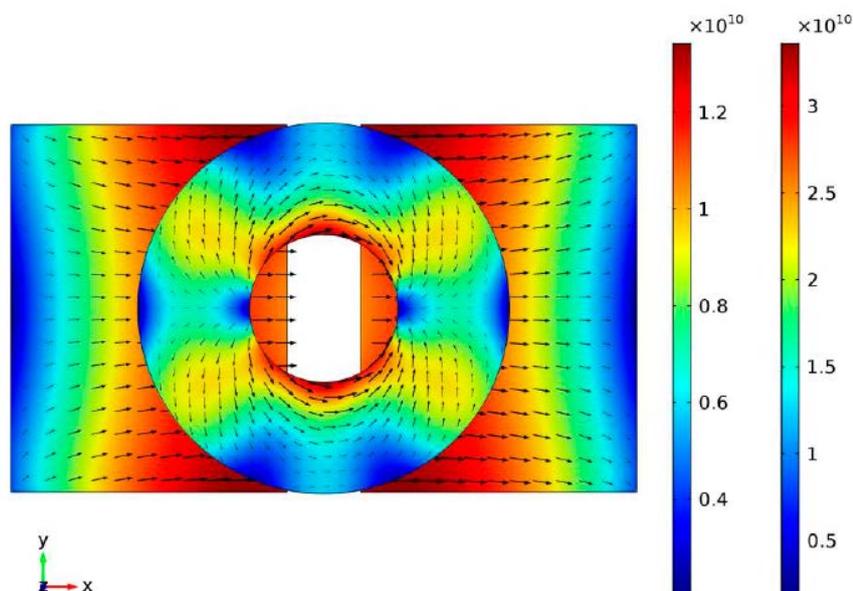
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando as figuras, temos uma diretividade com um valor igual a 0,33 (ou -4,81 dB) para a 1ª ressonância e igual a 2,02 (ou 3,05 dB) para a 2ª ressonância. Podemos perceber que novamente o formato assemelha-se a um dipolo infinitesimal. Podemos perceber novamente que a espira circular atua como um refletor, devido a intensidade do campo elétrico ser maior na 2ª ressonância do que na 1ª.

As figuras 6.10 a 6.14 mostram a distribuição de corrente superficial da microfita dipolo planar e da espira circular utilizando o Comsol. Podemos perceber que para os potenciais químicos de 0 eV e 0,03 eV, o sentido da corrente segue é o mesmo tanto do dipolo quanto da espira comprovando que, para esses valores de  $\mu_C$  não houve acoplamento entre as duas antenas. Já para os demais valores, o sentido da corrente segue em lados opostos para o dipolo e para a espira, logo houve um acoplamento entre as duas antenas e, conseqüentemente, ressonâncias mais intensas. Para as figuras citadas, a legenda da esquerda representa os valores de densidade de corrente superficial da espira e o da direita o da microfita dipolo planar.

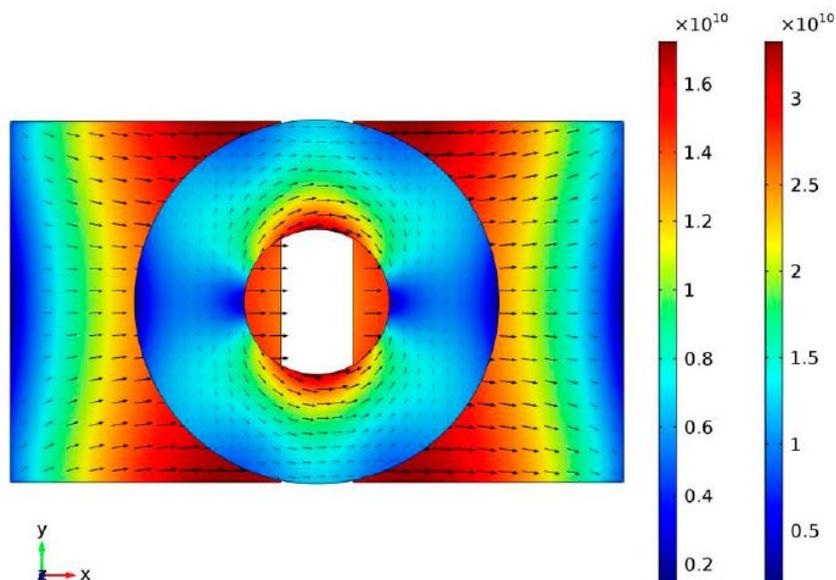
Na figura 6.13, onde tivemos o melhor resultado da largura de banda, percebemos uma distribuição de corrente praticamente igual da espira circular e do dipolo e a intensidade de radiação ter uma maior concentração no meio da antena, o que explica o diagrama de radiação ter um valor maior na direção do  $\theta = 0$ . Outro fato também é que como os níveis de correntes das duas antenas possuem magnitudes significativas praticamente iguais, a espira circular funciona com um elemento refletor.

Figura 6.10. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0 eV feita no Comsol.



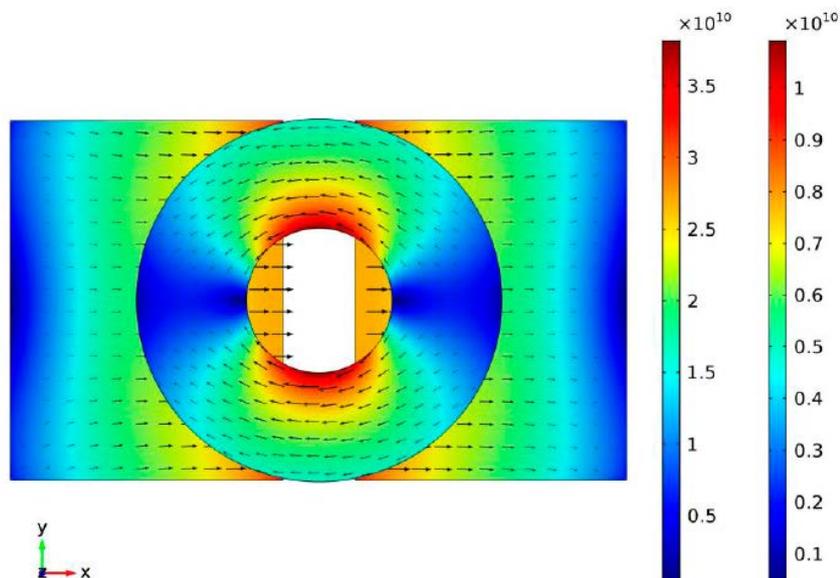
Fonte: SOARES, 2016

Figura 6.11. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,03 eV feita no Comsol.



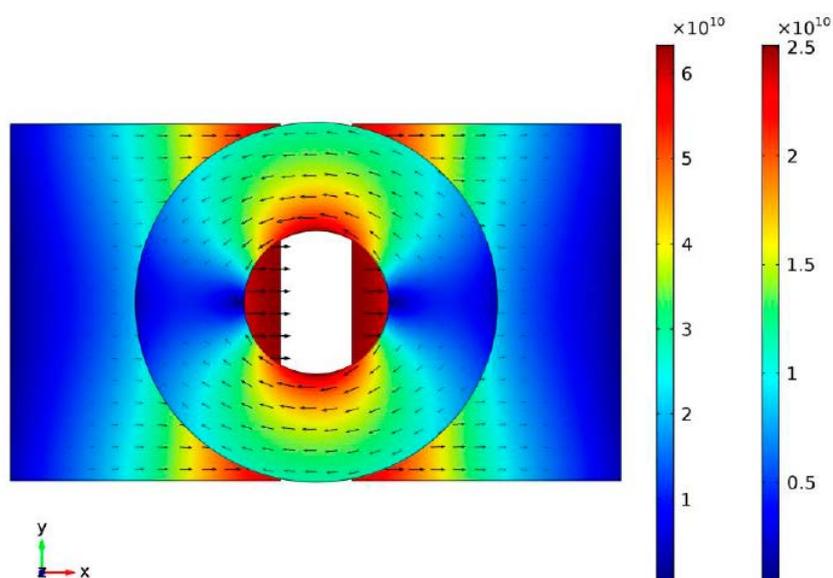
Fonte: SOARES, 2016

Figura 6.12. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,07 eV feita no Comsol.



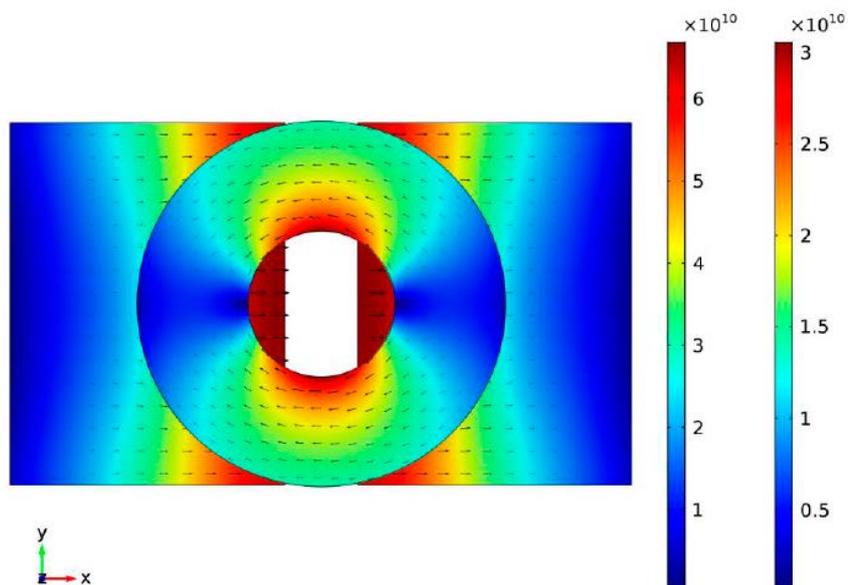
Fonte: SOARES, 2016

Figura 6.13. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,1 eV feita no Comsol.



Fonte: SOARES, 2016

Figura 6.14. Densidade de Corrente Superficial, em  $A/m^2$ , na 1ª Frequência de Ressonância para o Potencial Químico de 0,13 eV feita no Comsol.



Fonte: SOARES, 2016

## 6.2 Considerações Finais

Nesta seção foi feita uma análise mantendo as dimensões físicas tanto da microfita dipolo planar quanto da espira circular, somente variando somente o potencial químico do grafeno na espira circular.

Foi verificado que a alteração química do grafeno influencia na largura de banda da antena e que podemos chegar a valores bem altos. Tanto que nas nossas simulações, o melhor resultado obtido foi de 43,47% de largura de banda com  $\mu_C = 0,1$ .

Outro ponto interessante também é que, dependendo da escolha da impedância característica da linha de transmissão, podemos aumentar ou diminuir a largura de banda da antena.

A antena espira circular novamente atua como uma antena refletora na 1ª ressonância e somente na 2ª ressonância ela gera uma diretividade 2,02.

## 7. Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma análise numérica usando método dos momentos de uma antena de grafeno composta por um dipolo planar e uma espira circular, sendo que o dipolo é alimentado por uma fonte de tensão e a espira sendo parasita posicionada próximo ao dipolo. Foi feita uma alteração da geometria e do potencial químico da espira circular e foi analisado a influência que essas alterações contribuem para o aumento da largura de banda.

Primeiramente, a análise foi feita alterando a geometria da espira circular para diferentes tamanhos e espessura do anel da espira, assim como a altura desta em relação ao dipolo. Concluímos que quanto mais próximo a antena parasita do dipolo e quanto maior a área da espira, maior é a largura de banda da antena composta, onde obteve-se um valor máximo de largura de banda de 21,65%, com uma diretividade 1,92 na 2ª ressonância.

Posteriormente, a análise foi feita alterando o potencial químico da espira circular e mantendo a geometria de ambos os elementos constantes (dipolo e espira). Concluímos que a alteração do potencial químico pode proporcionar um aumento da largura de banda, onde o valor máximo obtido da largura de banda foi de 43,47%, com uma diretividade 2,02 na 2ª ressonância.

Como propostas de trabalhos futuros, pode ser aplicado um método de otimização, por exemplo, algoritmo genético, para obter a melhor geometria e potencial químico da espira para operação em banda larga; outra proposta seria investigar o efeito do substrato na resposta da antena composta e também utilizar duas espiras para aumentar mais a largura de banda.

## **7.1 Publicações Geradas**

AZEVEDO, R. G. de; COSTA, K. Q. da. Combinação de Dipolo e Espira de Grafeno para Aumento da Largura de Banda. MOMAG, 2016.

AZEVEDO, R. G. de; COSTA, K. Q. da. Antena de Grafeno Composta com Largura de Banda Controlável pelo Potencial Químico. XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT, 2016.

## 8. Referências Bibliográficas

AKBARI, M., et al. Fabrication and Characterization of Graphene Antenna for Low-Cost and Environmentally Friendly RFID. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 15, 1569 – 1572, 2015.

AKYILDIZ, I. F.; JORNET, J. M., HAN, C. Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications. *Physical Communication*, n. 12, p. 16-32, 2014.

ASIF, S. M, et al. Design of an Ultra-Wideband Antenna Using Flexible Graphene-Based Conductor Sheets. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2016.

BALANIS, C. A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. USA: John Wiley & Sons, 2ª ed., 2012.

\_\_\_\_\_. *Antenna Theory-Analysis and Design*. USA: John Wiley & Sons, 3ª ed., 2005.

BAHL, I. J.; BHARTIA, P. *Microstrip Antennas*. Dedham MA: Artech House, 2001.

BONANNI, Alessandra; PUMERA, Martin. Graphene Platform for Hairpin-DNA-Based Impedimetric Genosensing. *ACS Nano Journal*. v. 5, p. 2356-2361, 28 fevereiro 2011.

BEER, G.; SMITH, I. K.; DUENSER, C. *The Boundary Element Method with Programming*. New York: Springer Wien, 2008.

CARPINTERO G., et al. *Semiconductor terahertz technology: Devices and Systems at Room Temperature Operation*. Wiley-IEEE Press, 2015. 408 p.

CHENG, X., et al. Circular Beam-Reconfigurable Antenna Based on Graphene-metal hybrid. *IET - Electronics Letters*, v. 52, p. 494-496, 31 Março 2016.

CHENG, A. H.-D.; CHENG, D. T. Heritage and early history of the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements Journal: Elsevier*, v.29, p. 268-302, 2005.

CHERRY, S. Edholm's Law of Bandwidth. *IEEE Spectr.* 41, n. 7, p. 58-60, 2004.

COMSOL. COMSOL Multiphysic 4.4. COMSOL Inc. Disponível em: <<http://www.comsol.com>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

CONTROLLAB. Boletim Controllab Qualifique. Disponível em: <[http://www.controllab.com.br/pdf/qualifique\\_21.pdf](http://www.controllab.com.br/pdf/qualifique_21.pdf)>. Acesso em: 13 jan. 2017.

COSTA, Ewerton Santos. *Universidade Federal do Pará: Estudo da Condutividade Elétrica do Grafeno e Aplicações em Dispositivos*. 2016. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

COSTA, K. Q. da; et al. Análise Numérica pelo Método dos Momentos de uma Antena de Microfita Retangular Alimentada via L-Probe. *Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, setembro 2006a.

COSTA, K. Q. da; DMITRIEV, V; SILVA, A. O. A Broadband Combined (Linear and Loop) Antenna Above a Ground Plane. IEEE International Workshop on Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials, março 2006b.

COSTA, K. Q. da; DMITRIEV, V. Comparative Analysis of Circular and Triangular Gold Nanodisks for Field Enhancement Applications. *Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications Journal*, v. 9, p. 123-130, n. 2, dezembro 2010.

DOVE, M.T. *Structure and Dynamics: An Atomic View of Materials*. Oxford University Press, 1ª ed., 2002.

DUDLEY, D. G. *Mathematical Foundations for Electromagnetic Theory*. New York: IEEE Press, 1994.

FANG, Z., et al. Graphene-Antenna Sandwich Photodetector. *Nano Letters*, p.3808-3813, 2012.

FARJADPOUR, A., et al. Improving Accuracy by Subpixel Smoothing in the Finite Difference Time Domain. *Optics Letters Journal*, v.31, p. 2972-2974, 2006.

FEDERICI, J.; MOELLER, L. Review of Terahertz and Subterahertz Wireless Communications. *Applied Physics Journal*, n. 107, 2010.

FILTER, R., et al. Tunable Graphene Antennas for Selective Enhancement of THz Emission. *Optics Express Journal*, v.21, p. 3737-3745, 2013.

GAPONENKO, S. V. *Introduction to Nanophotonics*. New York: Cambridge University Press, 2010.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The Rise of Graphene. *Nature Journal*, v.6, n.3, p. 183–91, 2007.

GOMEZ-DIAZ, J.S.; ESQUIUS-MOROTE, M.; PERRUISSEAU-CARRIER, J. Plane Wave Excitation-Detection of Non-Resonant Plasmons along Finite-Width Graphene Strips. *Optics Express Journal*, v.21, n.21, 2013.

GUO, Beidou, et al. Graphene Doping: A Review. *Insciences Journal*, p.80-89, 2011.

HAN, M. Y., et al. Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons. *Physical Review Letters*, v.98, 2007.

HANSON, G. W. Dyadic Green's Functions and Guided Surface Waves for a Surface Conductivity Model of Graphene. *Applied Physics Journal*, 2008.

HARRINGTON, R. F. *Field Computation by Moment Method*. New York: Macmillan, 1968.

HUANG, K.-C.; WANG, Z. Terahertz Terabit Wireless Communication. *IEEE Microwave Magazine*, v.12, n.4, p. 108–116, 2011.

HUTTON, D. V. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York: McGrawHILL, 2004.

HYUN, W. J.; PARK, O Ok; CHIN, B. D. Foldable Graphene Electronic Circuits Based on Paper Substrates. *Advanced Materials*, v. 25, p. 4729-4734, 14 setembro 2013.

HUYNH, T.; LEE, K. F. A Single-Layer Single Patch Capacitively Microstrip Antenna. *Electronics Letters*, v. 31, p. 1320-1312, 1995.

KIM, K. Y. *Plasmonic – Principles and Application*, Croatia: InTech, 2012.

KITTEL, C. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley, 7<sup>a</sup> ed., 1996.

KLEINE-OSTMANN, T.; NAGATSUMA, T. A Review on Terahertz Communications research. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, v.32, n.2, p. 143–171, 2011.

KOCH, M. Terahertz Communications: a 2020 Vision, in: *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*. by R. Miles, X. C. Zhang, H. Eisele, A. Krotkus, Eds. in: *NATO Security through Science Series*, vol. 19, Springer, p. 325–338, 2007.

KÜRNER, T.; PRIEBE, S. Towards THz Communications-status in Research, Standardization and Regulation. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, v.35, n.1, p. 53–62, 2014.

LLATSER, I., et al. Radiation Characteristics of Tunable Graphennas in the Terahertz Band. *Radio Engineering Journal*, v.21, n.4, p. 946-953, 2012.

MAHAN, B. M.; MYERS, R. J. *Química: Um Curso Universitário*”. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 4<sup>a</sup> ed, 1995.

MAIER, S. A. *Plasmonic: Fundamentals and Applications*. New York: Springer, 2007.

NANO WERK. Mass Production of High Quality Graphene: An Analysis of Worldwide Patentes. 2012. Disponível em: <<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=25744.php>>. Acesso em: 09 jan. 2017.

NASCIMENTO, Jefferson Patrício. *Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear: Esfoliação Química do Grafite Natural em Mistura de Solventes Orgânicos: A obtenção de Grafenos de Poucas Camadas*. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Belo Horizonte, 2013.

NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K.; MOROZOV, S. V. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science Journal*, v. 308, 2004a.

NOVOSELOV, K. S., et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science Journal*, v.306, p. 666-669, 2004b.

NOVOSELOV, K. S., et al. Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene. *Nature Journal*, v.438, p. 197-200, 10 novembro 2005.

NOVOSELOV, K. S. K. et al, Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene. *Science Journal*, v.315, p. 1379, 2007.

- NOVOTNY, L.; HECHT, B. Principles of Nano-optics. New York: Cambridge University Press, 2006.
- PERRUISSEAU-CARRIER, J. Graphene for Antenna Applications - Opportunities and Challenges from Microwaves to THz. In: Loughborough Antennas & Propagation Conference, UK, 2012.
- PIESIEWICZ, R., et al. Short-Range Ultra-Broadband Terahertz Communications: Concepts and Perspectives. IEEE Antennas Propagation Society Magazine, v.49, n.6, p. 24–39, 2007.
- POLJAK, D.; BREBBIA, C. A. Boundary Element Methods for Electrical Engineers. USA: Wit Press, 2005.
- PRASAD, P. N. Nanophotonics. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- PRASAI, D., et al. Graphene: Corrosion-Inhibiting Coating. ACS Nano Journal. v. 6, p. 1102-1108, 2 fevereiro 2012.
- RADIVOJEVIC, Z., et al. Electrotactile touch surface by using transparent graphene. França, Virtual Reality International Conference, n. 16, 2012.
- RADWAN, A.; D'AMICO, M.; GENTILI, G. G., VERRI, V. Reconfigurable THz Metamaterial Antenna Based on Graphene. 9<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2015.
- RANDVIIR E. P., BROWNSON, D. A. C., BANKS C. E. A decade of graphene research: production, applications and outlook. Material Today Journal, Elsevier, v. 17, p. 426-432, novembro 2014.
- RODRIGUES, Nilton Rodolfo Nascimento Melo. Universidade Federal do Pará: Antenas de Grafeno com Controle de Diagrama de Radiação – Projeto e Modelagem via Método FDTD. 2015. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2015.
- SADIKU, M. N. O. Numerical Techniques in Electromagnetics. USA: CRC Press LLC, 2<sup>a</sup> ed., 2000.
- SAJAL, S. Z., et al. Design of a CPW-Fed Graphene-based Conformal Monopole on a Paper Substrate. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2016.
- SAJAL, S. Z.; BRAATEN, B. D.; MARINOV, V. R. A Microstrip Patch Antenna Manufactured with Flexible Graphene-Based Conducting Material. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Canadá, 2015.
- SCHWIERZ, F. Graphene Transistors: Nature Nanotechnology. Nature Nanotechnology n.5, p. 487-496, 30 maio 2010.
- SHALAEV, V. M.; KAWATA, S. Nanophotonics with Surface Plasmons. Elsevier B. V., 2007.

SIEVENPIPER, D., et al. High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, v.47, n.11, p. 2059-2074, 1999.

SILVESTER, P. P.; FERRARI, R.L. *Finite Element for Electrical Engineers*. USA: Cambridge University Press, 3<sup>a</sup> ed., 1996.

SOARES, Felipe Bamberg. *Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí: Análise Numérica de Antenas de Grafeno da Faixa de Terahertz*. 2016. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Faculdade de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

SONG, H.; NAGATSUMA, T. Present and Future of Terahertz Communications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, v.1. n.1, p. 256 – 263, 2011.

SULLIVAN, D. M. *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*. New York USA: IEEE Press, 2000.

TAMAGNONE, M., et al. Reconfigurable Terahertz Plasmonic Antenna Concept Using a Graphene Stack. *Applied Physics Journal*, v.101, p.214102, 2012a.

\_\_\_\_\_. M., et al. Analysis and Design of Terahertz Antennas Based on Plasmonic Resonant Graphene Sheets. *Applied Physics Journal*, vol. 112, dezembro 2012b.

TSUKERMAN, I. *Computational Methods for Nanoscale Applications*. USA: Springer, 2008.

UFC. A Supercondutividade. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/especiais/fisica/supercondutividade/supercondutividade3.htm>>. Acesso 31 jan. 2017.

UNICAMP. Estruturas Cristalinas. Disponível em: <[http://sites.ifi.unicamp.br/brum/files/2014/01/F888\\_JAB\\_1s2010\\_P2\\_cap2.pdf](http://sites.ifi.unicamp.br/brum/files/2014/01/F888_JAB_1s2010_P2_cap2.pdf)>. Acesso em: 17 jan. 2017.

ZHANG, Y., et al. Experimental Observation of the Quantum Hall Effect and Berry's Phase in Graphene. *Nature Journal*, v.438, p. 201-204, 10 novembro 2005.

WALTON, G. C. *The Method of Moments in Electromagnetics*. USA: Chapman & Hall/CRC by Taylor & Francis Group, 2<sup>a</sup> ed., 2015.

WANG, H. et al. 3D Honeycomb-Like Structured Graphene and Its High Efficiency as a Counter-Electrode Catalyst for Dye-Sensitized Solar Cells. *Angewandte Chemie Journal*. v. 52, p. 9210-9214, 26 agosto 2013.

WU, Y. et al. Graphene-based Yagi-Uda Antenna with Reconfigurable Radiation Patterns. *American Institute of Physics Journal*. v. 6, junho 2016.

ZHAO. Xin, et al. In-Plane Vacancy-Enabled High-Power Si–Graphene Composite Electrode for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials Journal*. v. 1, p. 1079-1084, novembro 2011.

ZHILIN, Y., et al. FDTD for Plasmonics: Applications in Enhanced Raman Spectroscopy. Chinese Science Bulletin Journal, v.55, p. 2635-2642, 14 agosto 2010.

ZHU, Y., et al. Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications. Advanced Materials Journal, v.22, p. 3906-3924, 29 junho 2010.