

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SEMICONDUTORES, INSTRUMENTOS E FOTÔNICA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Contribuição ao Estudo de Nanoantenas para a Faixa de
Subterahertz**

Judson Benévolo Xavier Junior

Orientador: Prof. Dr. Vitor Baranauskas

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani

Campinas, SP – Brasil
Dezembro - 2008

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SEMICONDUTORES, INSTRUMENTOS E FOTÔNICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Contribuição ao Estudo de Nanoantenas para a Faixa de Subterahertz

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Judson Benévolo Xavier Junior

Orientador: Prof. Dr. Vitor Baranauskas

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani

Banca Examinadora (prevista):

Prof. Dr. Vitor Baranauskas (presidente)

Dr. Alfredo Carlos Peterlevitz

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

Campinas, SP – Brasil

Dezembro – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

X19c Xavier Junior, Judson Benévolo
Contribuição ao estudo de nanoantenas para a faixa
de subterahertz / Judson Benévolo Xavier Junior. --
Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Vitor Baranauskas, Luiz Henrique
Bonani.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Nanotubos de carbono. 2. Comunicação. 3.
Telecomunicações. I. Baranauskas, Vitor. II. Bonani,
Luiz Henrique. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV.
Título.

Título em Inglês: Study of nanoantennas for subterahertz range

Palavras-chave em Inglês: Carbon nanotubes, Communications,
Telecommunications

Área de concentração: Eletrônica e Comunicações

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Alfredo Carlos Peterlevitz, Francisco Tadeu
Degasperi

Data da defesa: 16/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Judson Benévolo Xavier Junior

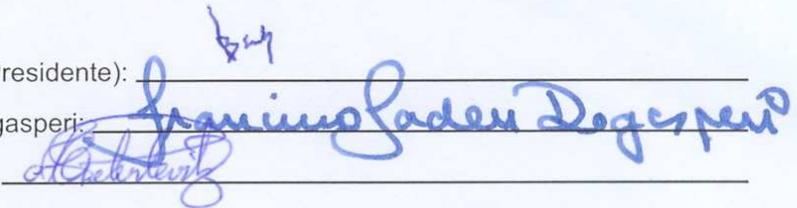
Data da Defesa: 16 de dezembro de 2008

Título da Tese: "Contribuição ao Estudo de Nanoantenas para a Faixa de Subterahertz"

Prof. Dr. Vitor Baranauskas (Presidente):

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi:

Dr. Alfredo Carlos Peterlevitz:

The image shows three horizontal lines representing signature lines. The first line has a small blue mark above it. The second line is filled with a large, cursive blue signature that reads "Francisco Tadeu Degasperi". The third line is filled with a smaller, cursive blue signature that reads "Alfredo Carlos Peterlevitz".

Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho, especialmente:

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais, Judson e Teresa, e irmãos Karina, Emerson e Gustavo, pelo amor, incentivo, orações e torcida, durante todo o período do curso.

A minha esposa Marinez e meu filho Enzo, pela paciência, compreensão, amor e suporte irrestrito, particularmente nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof Dr Vitor Baranauskas, que acreditou no trabalho, orientou, incentivou e deu suporte, inclusive financeiro, para que a pesquisa fosse levada a termo.

Ao meu co-orientador Prof Dr Luiz Bonani, pela orientação, serenidade, suporte e amizade, ajudando a conduzir o trabalho e a escrever artigos.

Aos meus ex-chefes do 3º Centro de Telemática de Área, Cel Rufino e TC Ricardo, que permitiram que eu realizasse o mestrado em tempo parcial quando eu ainda estava em São Paulo e facilitaram minha transferência para Campinas.

Aos companheiros da Seção de Gerência de Redes/3ª CTA, Cap Fabrício, ST Marcos, para ficar por aqui, que prosseguiram nas suas missões e possibilitaram que as atividades da SGR não fossem interrompidas durante minhas ausências.

Aos meus chefes do Centro Tecnológico do Exército, Gen Ribeiro Souto, TC Castelo e Maj Gustavo, que permitiram que prosseguisse com o programa de mestrado em tempo parcial e me deram suporte para este curso fosse concluído no fim de 2008 antes de minha nova missão no Projeto Radar do CTEEx.

Aos companheiros Maj Galvão e 2º Ten Freitas pela amizade, suporte e profissionalismo, dando continuidade às missões do Escritório do CTEEx em Campinas e possibilitando que minhas ausências não impactassem as atividades do Escritório.

A secretária Jaqueline Bisson pela amizade e pelos eficientes serviços de secretaria.

Ao amigo Alexandre Silva da Unicamp/FEEC pelas úteis, pertinentes e pacientes discussões, que me deu valiosas orientações para emprego do aplicativo CST Microwave Studio e sobre antenas de uma forma geral.

A Marcelo Perotoni da Computer Simulation Technology, pelo suporte e retorno construtivo no uso do aplicativo CST Microwave Studio.

Aos meus amigos do DSIF, Carla, Celso, Carol, Érika, Hudson, Indayara, Kleber, Jackson, Lídia, Rojas e Scheila pela amizade e companheirismo durante quase três anos de trabalho.

Ao CNPq pelo apoio de infra-estrutura.

Resumo

Em um mundo no qual a demanda por largura de banda e miniaturização estão aumentando fortemente é discutida a aplicação potencial de dispositivos de nanotubos para comunicações em terahertz. Questões como propriedades estruturais, mecânicas, térmicas e elétricas são discutidas e são também revistas as possibilidades que podem ser exploradas por nanoantenas compostas por nanotubos de carbono metálicos e nanofios de ouro, quando comparados com o emprego de cobre. Comunicações na faixa de terahertz têm aplicações potenciais para as redes emergentes WLANs/WPANs. Nessas frequências, normalmente, as restrições para propagação são muito altas e antenas de bom rendimento são necessárias para permitir comunicação em banda larga. Além disso, são apresentadas algumas configurações de antenas e materiais para comunicações em terahertz para verificar a viabilidade de usar nanotubos neste tipo de aplicação.

Palavras-chave: nanotubos de carbono, comunicação em terahertz, nanoantenas, propagação eletromagnética, antena dipolo.

Abstract

In a world on which the demand for bandwidth and miniaturization are increasing strongly, we discuss the potential application of nanotube devices for terahertz communications. Issues as structural, mechanical, thermal and electrical properties of carbon nanotubes are discussed and we also review the possibilities that could be exploited by nano-antennas composed by metallic carbon nanotubes and gold nanowires, compared to copper utilization. Communications at terahertz range have potential applications to currently emerging WLANs/WPANs. In these frequencies, normally, the propagation constraints are very high and we need antennas with a good performance in order to provide broadband communication. Therefore, we present some configurations of antennas and materials for terahertz communications to verify the viability of using nanotubes in this kind of application.

Keywords: carbon nanotubes, terahertz communication, nanoantennas, electromagnetic propagation, dipole antenna.

SUMÁRIO

Agradecimentos	iii
Resumo	vi
Abstract.....	vi
Glossário.....	viii
Lista de Símbolos	ix
Capítulo I.....	1
Introdução.....	1
Capítulo II.....	4
Propriedades de nanotubos de carbono	4
2.1 Propriedades mecânicas e estruturais	4
2.2 Propriedades térmicas.....	8
2.3 Propriedades elétricas.....	8
2.4 Feixes de nanotubos de carbono.....	10
Capítulo III	15
Nanoantenas.....	15
3.1 Introdução.....	15
3.2 Teoria de antenas.....	16
3.3 Considerações sobre nanoantenas baseadas em nanotubos de carbono	18
Capítulo IV	21
Necessidade de largura de banda.....	21
Capítulo V	24
Comunicação em Terahertz.....	24
5.1 Propagação.....	24
5.2 Escolha da janela de frequência.....	26
Capítulo VI.....	28
Métodos e Resultados.....	28
6.1 Métodos.....	28
6.2 Resultados.....	36
Capítulo VII.....	51
Conclusões e considerações finais.....	51
Referências Bibliográficas.....	54

Glossário

AuNW – Nanofio de Ouro
CST – Computer Simulation Technology
CNT – Nanotubo de Carbono
CVD – Chemical Vapor Deposition
Diam – Diâmetro
DSL – Digital Subscribers Line
FIT – Finite Integration Technique
IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers
MIMO – Multiple-Input Multiple-Output
MWCNT – Multi Wall Carbon Nanotube
NiNW – Nanofio de Níquel
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PBA – Perfect Boundary Approximation
PEC – Perfect Electric Conductor
RAM – Random Access Memory
RF – Rádio Frequência
SWCNT – Single Wall Carbon Nanotube
UWB – Ultra Wide Band
VSWR – Taxa de Onda Estacionária
WLAN – Wireless Local Area Network
WPAN – Wireless Personal Area Network
YBCO – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
ZnNW – Nanofio de Zinco

Lista de Símbolos

θ – Ângulo quiral dos nanotubos

Z_c – Impedância característica

h – Constante de Planck

e – Carga de um elétron

L_k – Indutância cinética

C_Q – Capacitância quântica

c – Velocidade da luz

a – Prefixo ato que indica ordem de grandeza de 10^{-18}

σ_{cn} – Condutância quântica de um SWCNT

ω – Frequência angular

v_F – Velocidade de Fermi

\hbar – constante reduzida de Planck

ν – Frequência de relaxação fenomenológica

γ – Constante de propagação

α – Parte real da constante de propagação associada à atenuação

β – Parte imaginária da constante de propagação associada à fase

C – Capacitância por unidade de comprimento

G – Condutância por unidade de comprimento

L_M – Indutância magnética

N – Número de tubos SWCNT em um feixe de SWCNT

k_P – Número de onda de superfície uma antena dipolo

k_o – Número de onda no espaço livre

f – Frequência de onda

λ – Comprimento de onda

d – diâmetro de cada SWCNT

(m,n) – Índices duais para descrever as propriedades físicas de SWCNT

l – comprimento físico da antena, que na dipolo de meia onda vale $\lambda/2$

E_θ – Campo eletromagnético

θ – Em um sistema de coordenadas esféricas, é o ângulo entre o eixo Z e o plano XY

z – Em um sistema de coordenadas retangulares, é a coordenada do eixo perpendicular aos eixos X e Y

I – Corrente elétrica que passa pelo condutor

η – Impedância característica no espaço livre

k – constante de propagação

Z_0 – Impedância de entrada

S_{11} – Perda de retorno

E – Campo elétrico

P – Campo relacionado com o diagrama de potência

Capítulo I

Introdução

Nanotecnologia tem recebido bastante atenção em todo o mundo, principalmente ao longo das últimas décadas, quando ocorreram muitos esforços para atingir o tão desejado controle em nível atômico e molecular sobre os processos industriais. É o campo da ciência dedicado a pesquisa, desenvolvimento e controle de materiais em escala nanométrica [1]. O termo *nano* tem origem etimológica do Grego, significa “anão” e indica as dimensões físicas que estão na ordem de grandeza de um bilionésimo de metro, ou seja, 10^{-9} metro.

Em termos comparativos, átomos têm dimensão típica entre 0,1 e 0,5 nm, ao passo que o diâmetro de um fio de cabelo é de cerca de 100 mil nm e um vírus, 100 nm. Por sua vez, uma hélice de DNA (ácido desoxirribonucleico) tem diâmetro de 2 nm, uma célula sanguínea típica possui diâmetro de 8,4 μm e o diâmetro de um pequeno grão de areia é de cerca de 20 μm . Em um cubo de 1 nm, é possível se ter cerca de 125 átomos de carbono ou 15 átomos de hidrogênio [4].

A escala nanométrica, ou nanoescala possui uma característica intrigante. É nesta escala que os sistemas biológicos constroem seus componentes estruturais tais como microtubos, microfilamentos e cromatina. Uma propriedade chave de nanoestruturas biológicas é o reconhecimento molecular [4]. Pesquisadores que desejam criar nanoestruturas almejam desenvolver sistemas que emulem esse comportamento.

Por outro lado, percebe-se que por meio de estudos da física e da química quântica que materiais em nanoescala apresentam propriedades diferentes dos materiais em macroescala. Condutividade, resistência, cor, elasticidade, e emissão de campo, dentre outras propriedades, podem sofrer mudanças significativas à medida que se reduz o tamanho do material. Pode-se citar o exemplo do cobre nanocristalino, que é cinco vezes mais duro que um cobre comum com sua estrutura cristalina em tamanho micrométrico [5].

Desenvolvimentos em nanotecnologia têm potencial para revolucionar muitos campos da ciência, e conduzir a uma nova base tecnológica que pode ter grande impacto em áreas como telecomunicações, computação e tecnologia da informação na forma de redes ópticas, nanofotônica, nanoeletrônica e nanoarmazenamento. Outras áreas que

poderão ser afetadas são ciências da saúde, biotecnologia, meio ambiente, energia, transporte, e exploração espacial, dentre outros [6].

Recentes descobertas dão conta de sensores nanoeletromecânicos que podem detectar uma única molécula de um agente empregado em guerra química. Nanopartículas de ferro podem remover cerca de 96% de um principal contaminante, como tri-cloro-etileno, da água de esgoto de uma planta industrial. Materiais energéticos com nanocompósitos para propelentes e explosivos têm cerca de duas vezes mais energia que explosivos típicos de alta capacidade. Vê-se, portanto, que a multiplicidade de aplicações é enorme e a demanda de conhecimentos multidisciplinares tem por objetivo ampliar a capacidade humana de manipular a matéria até os limites do átomo.

Telecomunicações é a designação genérica das comunicações a longa distância que abrange a transmissão, emissão, ou recepção de sinais, sons, ou mensagens por fio, rádio, eletricidade, meios ópticos, ou qualquer outro processo eletromagnético [7].

Reunindo os conceitos de nanotecnologia e telecomunicações, em um mundo no qual a demanda por largura de banda e miniaturização aumenta fortemente, é discutido o potencial de aplicação de nanoestruturas para comunicações na faixa de frequência em terahertz.

Comunicações em terahertz (THz) têm potencial de aplicação nas redes emergentes WLANs (*Wireless Local Area Network* ou rede local sem fio, rede local que usa ondas de rádio para fazer uma conexão a Internet ou entre redes)/WPANs (*Wireless Personal Area Network*, ou rede pessoal sem fio, muito associada à tecnologia Bluetooth, com pequenas distâncias) [3].

Nessas frequências em THz, normalmente, as restrições de propagação são muito altas, apresentando grande atenuação, e é necessária a disponibilidade de antenas de boa performance para que se obtenha comunicação em banda ultra larga.

Neste trabalho, do ponto de vista semântico para o título da dissertação, o termo subterahertz é definido como a faixa de frequências que vai de 100 GHz (inclusive) a 1 THz (exclusive). Entretanto, no decorrer do texto, os termos subterahertz e terahertz serão usados com este significado.

Por outro lado, pesquisas têm sido feitas para desenvolver nanoantenas para as faixas de terahertz, infravermelho e óptica com a utilização de nanotubos de carbono [8] e [9].

Associado a nanotubos de carbono, há registro de sua aplicação em transistores [10], [11], sensores de gás [12], nanotweezers [13], dispositivos de emissão de campo [14], armazenadores de hidrogênio [15],[16], baterias [17], pinças [18], pontas de microscópio [19], sensores diversos [20] e interconexão de dispositivos [21], dentre outros usos.

São analisadas algumas configurações de antenas e materiais com o objetivo de verificar a viabilidade de emprego de nanomateriais para aplicação em comunicações nessa faixa de frequência.

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, sendo este (Capítulo I) o de introdução.

O Capítulo II trata de propriedades de nanotubos de carbono, abordando questões como propriedades mecânicas e estruturais, propriedades térmicas, propriedades elétricas e feixes de nanotubos de carbono.

O Capítulo III discute nanoantenas, analisando teoria de antenas e considerações sobre nanoantenas de nanotubos de carbono.

O Capítulo IV analisa a necessidade de largura de banda e a relação com as redes WLAN e WPAN.

O Capítulo V aborda o tema de comunicação em terahertz, tratando de aspectos relativos à propagação e escolha adequada da janela de frequência de utilização.

O Capítulo VI discute os métodos empregados e resultados obtidos no trabalho de pesquisa.

Por fim, no Capítulo VII são apresentadas as conclusões e considerações finais, discutindo propostas de trabalhos futuros.

Capítulo II

Propriedades de nanotubos de carbono

2.1 Propriedades mecânicas e estruturais

Nanotubos de carbono são formas alotrópicas de carbono. Outros alótropos de Carbono que podem ser citados são diamante, grafite, carbono amorfo, e fulerenos [22]. Na figura I-1 pode ser vista uma amostra destes alótropos.

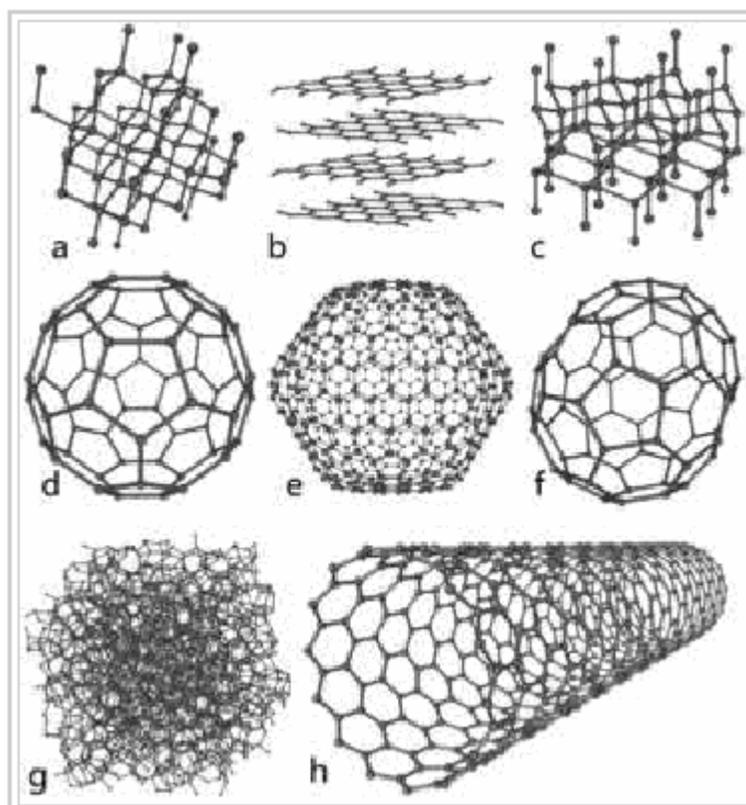


Figura II-1: Alótropos de Carbono, onde é possível identificar a) diamante, b) grafite, c) lonsdaleite, d) C_{60} ou buckyball, e) C_{540} , f) C_{70} , g) carbono amorfo e h) nanotubo de carbono de parede simples) [23].

Os nanotubos de carbono serão abordados nesse trabalho por terem maior potencial para serem utilizados como antenas que as demais formas alotrópicas. Os nanotubos de carbono são formados a partir de uma camada de grafite (grafeno), que se enrola,

produzindo cilindros perfeitos. O grafeno é uma estrutura hexagonal de átomos de carbono com apenas um átomo de espessura. Recentemente o grafeno foi elevado à condição de material mais forte que existe, sendo 200 (duzentas) vezes mais resistente que o aço estrutural [24]. Há vários fatores que influenciam as propriedades dos nanotubos de carbono, dentre os quais se podem destacar o diâmetro, a forma como o nanotubo é enrolado e o número de camadas enroladas [25].

Na figura II-2 pode-se ver a formação de nanotubos de carbono a partir de folhas de grafeno que são enroladas .

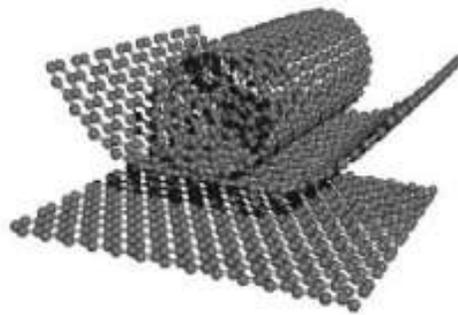


Figura II-2: Formação de nanotubos de carbono a partir de folhas de grafeno enroladas [26].

O módulo de Young de nanotubos de carbono de parede simples é 1,06 TPa, cerca de cinco vezes maior que o do aço e aproximadamente dez vezes maior que o do cobre [47], o que lhes confere uma elasticidade enorme. Adicionalmente, nanotubos de carbono possuem resistência mecânica altíssima e dureza similar a do diamante.

Levando em conta o número de camadas concêntricas enroladas, há nanotubos de parede simples, *single wall carbon nanotube* (SWCNT), no qual apenas uma folha de grafeno forma sua parede, e nanotubos de múltiplas camadas, *multi wall carbon nanotube* (MWCNT), conforme se pode ver na Figura II-3, que possuem várias camadas de folhas de grafeno enroladas de forma cilíndrica, com diversos tubos de diferentes diâmetros inseridos um dentro do outro, como apontado por Iijima [27]. A distância de van der Waals entre as camadas de grafeno no grafite determina o espaçamento dos tubos internos em um MWCNT, com valor aproximado de 0,34 nm. Um SWCNT tem um raio de poucos nanômetros e seu comprimento pode chegar a alguns centímetros [28]. Dessa forma, a

razão entre comprimento e o raio de nanotubos pode ter uma ordem de grandeza de 10^7 ou maior.

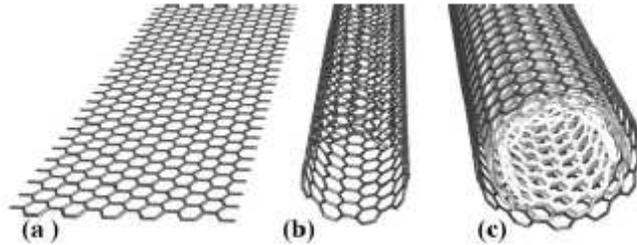


Figura II-3: Folha de grafeno (a), SWCNT (b) e MWCNT (c) [2].

Tratando da orientação da estrutura de um nanotubo, temos que ela é comandada pelo vetor Quiral, com a possível formação de três tipos de nanotubos: armchair, zigzag e quiral. Na figura II-4, pode-se ver o vetor Quiral perpendicular ao eixo do nanotubo de carbono e conforme a sua inclinação, que influencia o enrolamento da folha de grafeno, são gerados diferentes nanotubos, com distintas propriedades (Figura II-5).

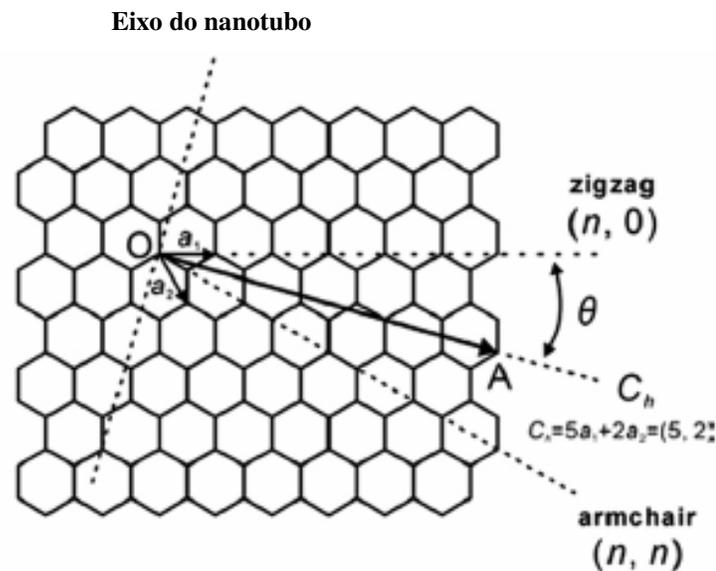


Figura II-4: Vetor Quiral para nanotubos de carbono [2].

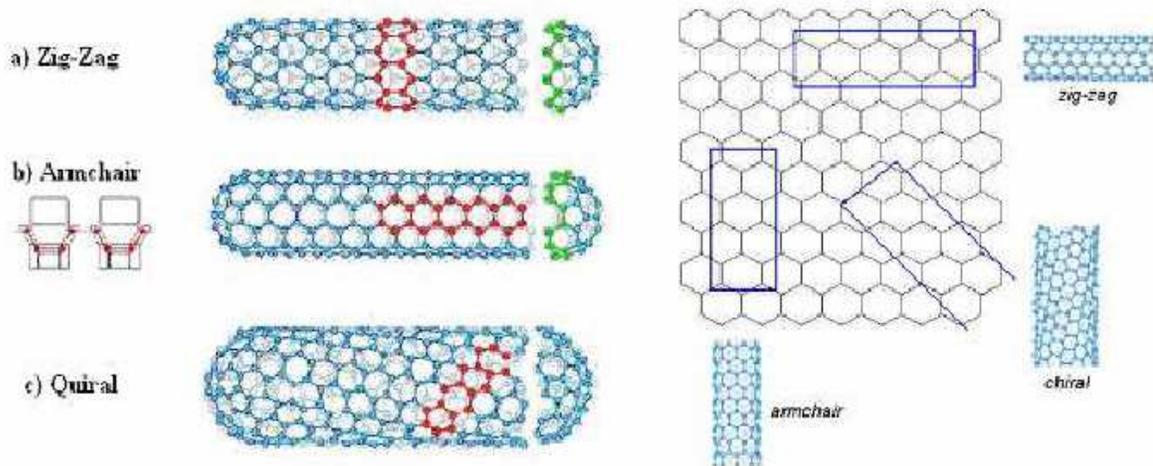


Figura II-5: O enrolamento da folha de grafeno com orientações diferentes de suas redes cristalinas produz diferentes estruturas de nanotubos de carbono, a) zig-zag, b) armchair, c) quiral [29].

O nanotubo de carbono *zig-zag* possui sucessão de átomos de carbono orientados em formação *zig-zag* ao longo do diâmetro do nanotubo. Na Figura II-4(a), com destaque em vermelho, o padrão *zig-zag* é identificado nos sucessivos hexágonos orientados em tal direção, de forma ortogonal ao eixo do tubo.

Na letra b da figura II-4, vê-se nanotubos monocamada do tipo poltrona (*armchair*, em inglês). É possível ver o direcionamento das seqüências de hexágonos ao longo do eixo do nanotubo, na cor vermelha. Devido às suas características, este tipo de nanotubo monocamada é o que apresenta maior incidência de comportamento metálico, uma vez que não possui energia na banda proibida, e por isso foi escolhido para compor a nanoantena analisada.

Por sua vez, na figura II-4(c), há a orientação da rede cristalina no nanotubo de carbono do tipo quiral, no qual a cadeia de hexágonos é direcionada de forma tal que se situa numa posição intermediária entre o *zig-zag* e o *armchair*.

O diâmetro e o ângulo chiral θ dos nanotubos influenciam fortemente as propriedades dos nanotubos. No item propriedades elétricas a seguir, será abordada a questão do comportamento metálico ou semicondutor dos nanotubos monocamada.

Por fim, nanotubos de carbono podem ser produzidos a partir de vários métodos, dos quais podem-se destacar deposição química de vapor (CVD) [30], [31], [32], descarga por arco [33], [34], [35] e ablação por laser [36], [37]. O primeiro método é o mais utilizado pelo Laboratório de Nanoengenharia e Diamante do Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Unicamp.

2.2. Propriedades térmicas

Nanotubos de carbono possuem condutividade térmica de valores extremamente elevados, característica que os tornam os materiais com a maior condutividade térmica, apresentando valores que variam de 2500 a 6600 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para SWCNT, 600 a 3000 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para MWCNT, e 15 a 250 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para filmes de nanotubos de carbono em maior escala para temperaturas superiores a 100K [38] ,[39].

A partir da Tabela II.1 pode-se verificar que os nanotubos de carbono possuem condutividades térmicas muito altas, principalmente quando compara-se com outros materiais de maior volume.

Tabela II.1. Valores de condutividade térmica comparativos entre CNT e materiais mais volumosos [40].

Materiais	Ge	Si	Al	Au	Cu	Diamante	MWCNT	SWCNT
Condutividade térmica($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	60	148	237	317	485	1000	2000-3000	2500-6600

Por outro lado, analisando estritamente as propriedades térmicas, temos que os nanotubos de carbono apresentam comportamento de material semicondutor, uma vez que sua condutividade térmica aumenta com a temperatura [2].

2.3 Propriedades elétricas

As propriedades elétricas de elementos condutivos sofrem mudanças quando estão em escala nanométrica. O fio forma um guia de onda *single-mode* para ondas eletromagnéticas quando as dimensões de sua seção reta se comparam ao comprimento de

onda de Fermi. A distribuição de corrente no nanotubo é unidimensional, com o movimento dos elétrons ocorrendo apenas de forma axial.

Um importante aspecto a considerar é a impedância característica de nanotubos de carbono. Este parâmetro, para casos típicos de nanotubos, de acordo com Burke [41] é dado por

$$Z_c \approx h / 2e^2 = 12 \text{ k}\Omega \quad (1),$$

onde h é a constante de Planck e e é a carga de um elétron, valor próximo do obtido quando calculado levando em conta a indutância cinética $L_k \approx 16 \text{ nH}/\mu\text{m}$ e a capacitância quântica $C_Q \approx 100 \text{ aF}/\mu\text{m}$ [42] com $\sqrt{L_k/C_Q}$ [1].

Velocidade de onda da ordem da velocidade da luz, em uma linha de transmissão bifilar comum, ocorre devido à capacitância eletrostática e indutância magnética distribuídas. Por outro lado, há uma indutância devida a energia cinética dos elétrons em nanotubos de carbono e tem magnitude de cerca de 10 000 maior que indutância magnética [43], o que acarreta, para os nanotubos, um comportamento como uma linha de transmissão quântica para tensões RF.

Fios metálicos e nanotubos apresentam, condutividades elétricas distintas. As cargas estão relativamente livres para se moverem nos fios metálicos, havendo concentração de fluxo de carga na superfície do condutor, caracterizando a “*conductivity skin depth*”, ou profundidade de condução superficial. Já para nanotubos, que possuem estrutura especial, isso não ocorre. Nestes últimos, para nanotubos curtos, o movimento de elétrons é feito via *tunneling across gaps* [44], ou tunelamento através das bandas proibidas, com uma alta resistência de tunelamento ou transporte balístico com seu comprimento próximo a 100 nm em uma estrutura tubular [45]. Nanotubos apresentam um comportamento de condutividade diferente do cobre. Nos primeiros, este parâmetro aumenta com o comprimento. Já para o segundo, a condutividade aumenta com seu diâmetro [46]. Para o caso em estudo, com comprimentos oscilando entre 400 e 800 μm , é possível ver que o diâmetro também afeta o rendimento da antena. Os valores de resistividade elétrica dos materiais usados serão tratados na sessão Resultados.

2.4 Feixes de nanotubos de carbono

Como visto na seção anterior, a resistência quântica, que pode ser obtida a partir da fórmula de Landauer-Buttiker [47], é um importante fator a ser considerado. Para um fio constituído de metal normal, ou seja, comumente encontrado no mundo macro, sua resistência ôhmica é inversamente proporcional ao quadrado de seu raio. Já a resistência quântica de um nanotubo de carbono não tem esse comportamento análogo, e é muito menor que a resistência de um fio metálico normal, na escala nanométrica e mantida a mesma geometria do condutor. Além disso, considerando a faixa de frequências em terahertz, o efeito *skin*, ou efeito de superfície, em nanotubos de carbono pode ser desprezado, uma vez que, nos nanotubos, os elétrons conduzem por meio de ligações do tipo π em átomos de carbono, de forma similar ao que ocorre em uma folha fina de grafite, e, assim, a dissipação de energia de uma antena de nanotubos de carbono é baixa, potencialmente levando a uma alta eficiência de antena [48], contrariando estudos anteriores que demonstraram que a eficiência de radiação de uma antena de nanotubos de carbono de parede simples é muito baixa [2] e [41], devido, principalmente, ao grande retardo da onda de superfície, implicando em redução da resistência de radiação.

Considerando ainda o problema de descasamento de impedância, uma vez que a impedância característica dos nanotubos de carbono, que pode chegar a cerca de 100 k Ω , é muito alta quando se compara a impedância habitual de uma linha de transmissão, ou seja, 50 Ω , a utilização de feixes de nanotubos de carbono se apresenta como uma possível solução para reduzir tais desafios técnicos [49].

A condutância quântica de um SWCNT de raio r , como apontado por [50] e [52] e é dada pela seguinte relação

$$\sigma_{cn}(\omega) = -j \frac{2e^2 v_F}{\pi \hbar r (\omega - j\nu)} \quad (2)$$

onde j é a unidade imaginária, ω é a frequência angular, v_F é a velocidade de Fermi, \hbar é a constante de Planck, e ν é a frequência de relaxação fenomenológica. Prosseguindo na análise, a impedância de superfície de um SWCNT pode ser equacionada pela relação

$$Z = \frac{1}{2\pi\sigma_{cn}(\omega)} = j \frac{\pi\hbar(\omega - j\nu)}{4e^2v_F} = \frac{\pi\hbar\nu}{4e^2v_F} + j \frac{\pi\hbar}{4e^2v_F} \omega \quad (3)$$

na qual a parte real é a resistência de espalhamento total [43] e escrevendo a parte imaginária como ωL_K , com $L_K = \pi\hbar / (4e^2v_F)$, sendo que L_K é a indutância cinética, como apontado em [43], com valor já citado na sessão anterior, e a resistência de espalhamento total, na faixa de terahertz, possui a mesma ordem de ωL_K .

Por outro lado, a constante de propagação de onda guiada em um SWCNT pode ser calculada pela expressão

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4),$$

onde o termo β é definido por

$$\beta = k_p = \sqrt{\frac{\omega^2 L_K C}{4}} + \sqrt{\frac{\omega^4 L_K^2 C^2}{16} + \omega^2 C^2 R^2} \quad (5)$$

no qual C é a capacitância por unidade de comprimento, que é composta por capacitância quântica e capacitância eletrostática; por sua vez, a condutância por unidade de comprimento G é aproximadamente nula, pois o valor de R é bastante elevado.

A capacitância por unidade de comprimento (C) de um feixe SWCNT é dominada por sua capacitância eletrostática, que pode ser calculada conforme sua geometria [49]. Por sua vez, a indutância magnética L_M é muito menor que a indutância cinética L_K [48], cerca de 10^4 vezes.

O número de onda de uma antena dipolo com feixes de SWCNT pode ser calculado pela relação

$$k_p = \sqrt{\frac{\omega^2 L_K C}{4N}} + \sqrt{\frac{\omega^4 L_K^2 C^2}{16N^2} + \frac{\omega^2 C^2 R^2}{N^2}} \quad (6)$$

onde N é o número de tubos.

No cálculo da resistência de radiação de uma antena dipolo com SWCNT, o termo $(k_o / k_p)^2$ desempenha um importante função, no qual k_o é o número de onda no espaço livre e k_p é o número de onda de superfície no SWCNT. Uma vez que $k_p \approx 100k_o$, a

fração acima faz com que a resistência de radiação de um único SWCNT seja muito pequena, como apontado em [41],[52],[9]. O uso de feixes de SWCNT pode ajudar a reduzir o valor de k_p e assim melhorar a eficiência de radiação da antena .

Voltando à equação (6), pode-se verificar que o número de onda k_p da onda guiada pela antena dipolo com feixe de SWCNT é muito maior que o número de onda k_o no espaço livre. Usando o exemplo de [48], quando $f=1,6$ THz, $N=190$, $C=89$ pF, k_p é $6,03 \times 10^5$, que é cerca de 18 vezes maior que o número de onda de espaço livre k_o . Dessa forma, o comprimento do feixe de SWCNT deve ser escolhido de forma tal a garantir que a primeira frequência de ressonância esteja na faixa desejada.

Antenas dipolo com feixes de SWCNT com geometria circular e retangular, respectivamente, estão plotadas na figura II-6 (a)-(d), nos quais cada SWCNT, por hipótese, é metálico. No nosso caso, optou-se por simular apenas as antenas com feixe de SWCNT de seção reta circular. O comprimento do feixe é denotado por L . Na figura II-6 (a) , o diâmetro d de cada SWCNT é definido pela expressão [52]

$$d = \frac{\sqrt{3}}{\pi} b \sqrt{m^2 + mn + n^2} \quad (7)$$

onde $b = 0,142$ nm é a distância interatômica no grafite. Os índices duais (m, n) são usados para descrever as propriedades físicas de SWCNT, ou seja, comportamento metálico ou semicondutor. Reforçando a ideia, para este trabalho, foi assumido que todos os tubos são metálicos e suas dimensões estão definidas na seção Resultados.

Falando em distribuição de corrente, uma vez que todos SWCNT do feixe circular estão densamente empacotados juntos, apenas as correntes ao longo dos tubos mais externos contribuem para a radiação de campo distante, ao passo que os tubos mais internos têm sua radiação blindada pelos tubos mais externos.

Na simulação desenvolvida por [48], vê-se que a distribuição de corrente ao longo do feixe circular de SWCNT é muito sensível à variação do diâmetro do tubo ou ao número total de tubos do feixe. Para ilustrar, para um feixe circular de SWCNT de raio R de 10 nm, o número de tubos N envolvidos foi de 590, 190 e 150, respectivamente, conforme variava o diâmetro d de cada SWCNT de 0,5 nm, 1 nm e 1,2 nm.

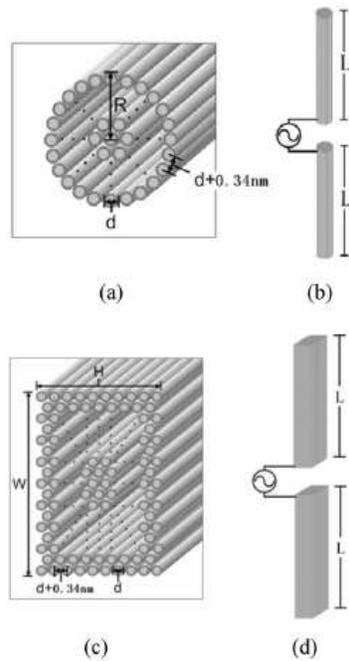


Figura II-6: Diagrama pictórico de antenas dipolo com feixe de SWCNT com geometria circular (a) e (b) e retangular (c) e (d), excitadas por fonte de tensão unitária [48].

Interessante notar que a eficiência de radiação ou o rendimento de uma antena dipolo com feixe de SWCNT é bastante sensível à variação do diâmetro do tubo, ao comprimento do feixe e à frequência de operação, que não sofrem mudança monotônica em nenhum desses parâmetros.

Em se tratando de um único tubo, quando seu diâmetro aumenta, sua resistência total será reduzida e eficiência da antena terá melhor rendimento [66]. Por outro lado, convém destacar que para um determinado valor do raio R do feixe de SWCNT, ao se aumentar o diâmetro do tubo, o número de tubos N do feixe será reduzido. Por sua vez, o decaimento do número de tubos N no feixe implicará no aumento do valor de k_p do feixe de nanotubos, causando perda de rendimento da eficiência da antena.

Por fim, foi demonstrado que uma antena dipolo de feixe de SWCNT possui eficiência bem superior àquela composta por um único SWCNT, conforme se pode verificar na figura II-7 a seguir.

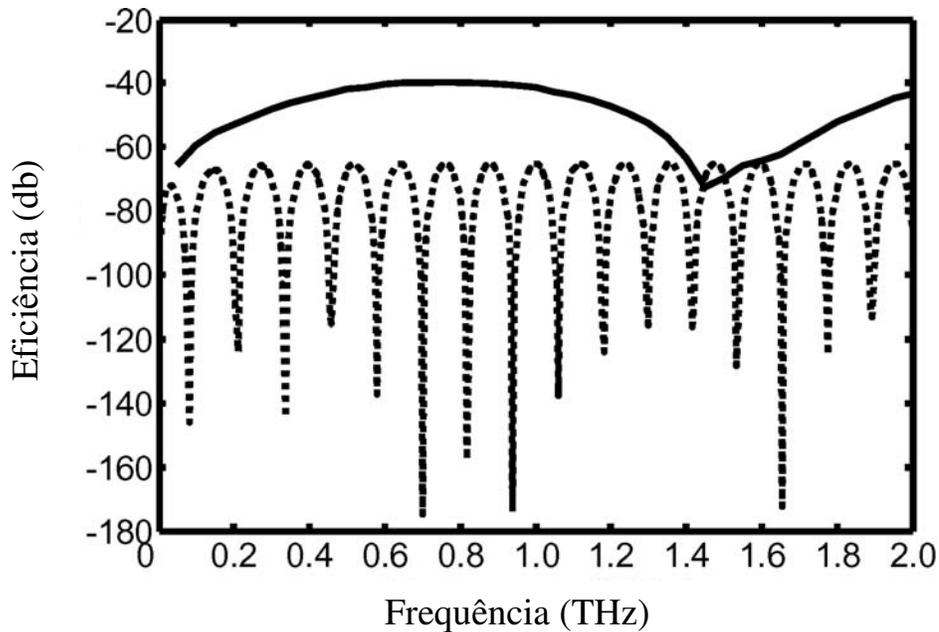


Figura II-7: diagrama pictórico comparativo de eficiência de antena, com antena dipolo de único SWCNT em linha pontilhada e antena dipolo de feixe de SWCNT com geometria circular em linha contínua [48].

Neste capítulo foram abordadas questões relativas às propriedades mecânicas, estruturais, térmicas e elétricas de nanotubos de carbono, sendo discutido o seu rendimento na condição de feixes de SWCNT com vistas a melhorar sua eficiência de radiação. Nanotubos de carbono possuem propriedades bem especiais, particularmente em relação à forma de condução de elétrons pelo material e sua melhor condutividade quando comparada com outros materiais condutores típicos, como cobre, na mesma escala.

No capítulo seguinte serão tratadas as nanoantenas. Neste trabalho, para as simulações de antenas com diâmetro igual ou superior a 10 nm, foi considerada uma antena dipolo vertical de feixe de SWCNT de geometria circular composta por nanotubos de diâmetro 1 nm e comportamento metálico, do tipo armchair. Para antenas de menor diâmetro, foi considerada uma antena dipolo vertical de um único SWCNT, também de comportamento metálico, do tipo armchair.

Capítulo III

Nanoantenas

3.1 Introdução

Alguns grupos de pesquisa em todo o mundo têm se dedicado a estudar a viabilidade do uso de nanotubos de carbono como antena, e já há indícios das possibilidades abertas para emprego de dispositivos nanométricos para comunicação.

Há também grande interesse em se desenvolver circuitos nanoscópicos e dispositivos autônomos na escala nanométrica para aplicações médicas e militares. Uma importante consideração a ser feita é o estabelecimento de enlaces de comunicação sem fio e/ou transferência de energia, também sem emprego de fio, para tais dispositivos [41].

Nanotubos apresentam algumas particularidades em suas propriedades elétricas quando comparados com um fio de cobre de mesmo comprimento e diâmetro. A primeira característica é a condutividade que é aproximadamente duas vezes maior que a do cobre, tendo tal parâmetro para este último material o valor de $5,8 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$, ao passo que para um nanotubo de carbono de diâmetro 1,5 nm a condutividade é de $1,0 \times 10^8 \text{ Sm}^{-1}$ [51]. A segunda particularidade é que a velocidade de propagação de onda no nanotubo de carbono varia de 1/50 a 1/100 da velocidade da luz, apresentando menor valor quando a frequência de ressonância é atingida [52].

Por apresentar comprimentos que podem ter ordem de grandeza centimétrica, aliado à possibilidade de ter comportamento metálico, é razoável considerar o emprego de nanotubos de carbono para antenas, particularmente para ondas centimétricas ou milimétricas [41].

Um modelo de linha de transmissão serviu de base para antenas dipolo de nanotubos de carbono [41]. Para isso, uma linha de transmissão é formada por dois condutores, sendo que os materiais e a geometria da linha de transmissão determinam os parâmetros de resistência R , indutância L e capacitância C , e a partir daí as quantidades de constante de propagação, impedância característica e velocidade de fase são determinadas. A corrente da linha de transmissão devida a um circuito aberto é obtida usando o modelo de linha de transmissão *flared-out*, ou seja, tomando-se por base uma linha de transmissão

reta, a partir de uma extremidade é escolhido um ponto para a linha começar a dobrar, usualmente no comprimento $l/2$, onde l é o comprimento físico da antena e, completada essa manobra, tem-se uma antena dipolo.

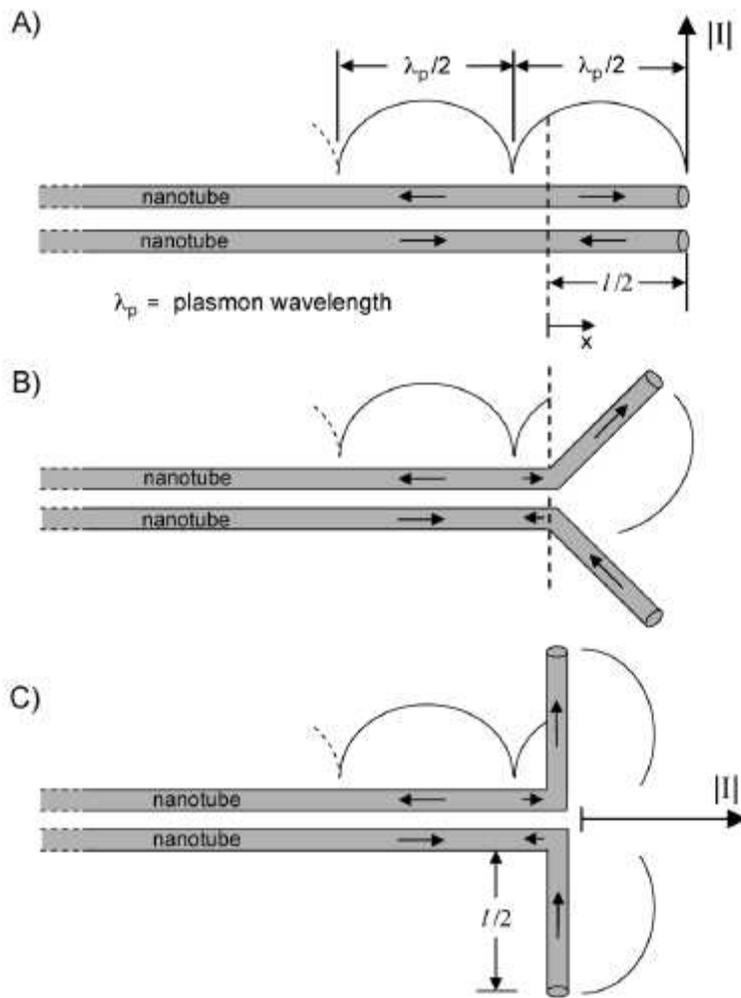


Figura III-1: Linha de transmissão e sua conversão em antena dipolo [41], com linha de transmissão de dois fios (a), linha de transmissão dobrada (b) e dipolo linear (c).

3.2 Teoria de antenas

Uma das antenas mais utilizadas é a dipolo de meia onda que é uma antena do tipo filamentar com tamanho $l = \lambda/2$.

O que a torna tão popular é a facilidade de construção e de casamento de impedância. A figura III-2 ilustra a distribuição de corrente ao longo de um dipolo de meia onda.

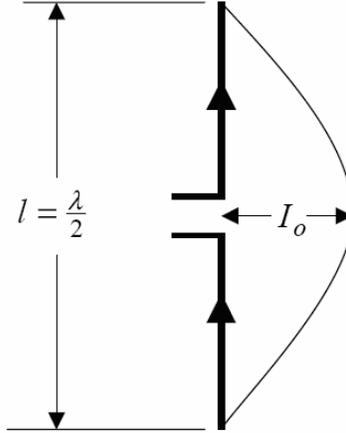


Figura III-2: Antena dipolo

A distribuição de corrente na antena pode ser considerada em uma dimensão, e sua variação no tempo gerará um campo eletromagnético. A equação (2) abaixo mostra a relação entre o campo radiado E_θ e a variação de corrente $I(z)$ na região de campo distante:

$$E_\theta = i\eta \frac{ke^{-ikr}}{4\pi r} \sin \theta \left[\int_{-l/2}^{+l/2} I(z)e^{ikz \cos \theta} dz \right] \quad (2)$$

onde i é a unidade imaginária, η é a impedância característica no espaço livre, k é a constante de propagação, l e r , comprimento e raio do dipolo respectivamente. A figura III-3 mostra o diagrama de radiação de uma antena dipolo. O dispositivo radiador está na direção $0^\circ - 180^\circ$. O conceito de região de campo distante será tratado no capítulo VI.

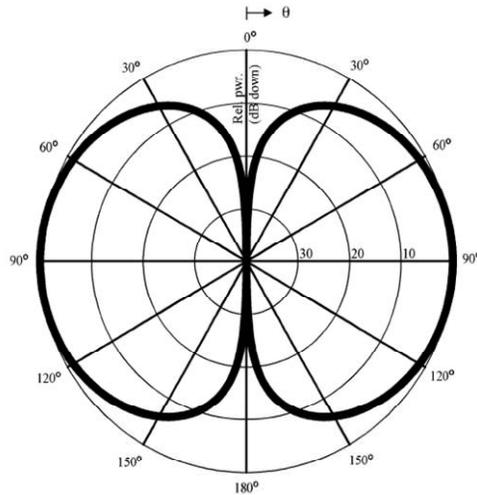


Figura III-3: Diagrama de radiação de antena dipolo [65]

Há vários parâmetros que são considerados para quantificar uma antena e seu desempenho, dentre os quais podemos destacar:

- Impedância de entrada e a impedância do circuito onde está conectada deverão estar casadas a fim de maximizar a potência para o dispositivo radiar.
- O ganho é a razão entre a máxima densidade superficial de potência radiada pela antena e a densidade superficial de potência radiada caso a antena fosse um radiador isotrópico.
- A diretividade que é habilidade de uma antena em concentrar a potência radiada na direção de máxima radiação.
- A eficiência de radiação que é razão entre a potência radiada pela antena e a potência entregue à antena.

3.3 Considerações sobre nanoantenas baseadas em nanotubos de carbono

Deve-se a sua propriedade de transporte elétrico descrita no capítulo II o comportamento de uma antena de nanotubo. Estas características são as mesmas conhecidas

para uma macro antena, mas com valores muito diferentes. A velocidade de propagação em um nanotubo e a frequência de ressonância são alguns desses valores. Em modelos macros, a velocidade de onda é igual a velocidade da luz, entretanto isso não se aplica ao nanotubo, onde a velocidade de propagação de onda está em torno de $\frac{1}{50}c$, sendo c a velocidade da luz. Isso faz com que o comprimento da antena de nanotubo seja menor que o de uma antena macro para mesma frequência.

Outra característica a ser considerada é a impedância de entrada. Para uma macro antena, a impedância de entrada é cerca de $50\Omega \pm 50\%$. Já para uma antena de nanotubo, esta resistência é equivalente a resistência quântica do nanotubo de carbono que é $12,6 \text{ k}\Omega$. Esta é a impedância que caracterizará todo dispositivo em escala nanométrica [2].

O casamento de impedância entre o nanotubo e sua linha de transmissão é uma questão central a ser resolvida para tornar realidade antenas de nanotubos, além da questão de casamento de tamanho entre os dispositivos envolvidos. Outro grave problema será o ganho e eficiência de radiação muito baixo comparada à macro antena. Segundo Hanson [52], o ganho estará entre -60 e -70 dB para uma antena de nanotubo trabalhando uma frequência de 100GHz . Isto está ligado diretamente à frequência de relaxação de elétrons em nanotubos de carbono, que pode variar de 50 GHz a 1THz [53]. Isso torna bastante difícil o emprego de nanotubos de carbono em frequências abaixo de 50GHz . Entretanto, para frequências mais altas, muitas aplicações podem ser consideradas.

Um dos maiores objetivos é a obtenção de antenas capazes de comunicar com componentes nanométricos sem fio. Se cada interconexão for conectada por um nanotubo de diferente comprimento (com isso diferente frequência de ressonância), então o problema para “*multiplexing input/output signals*”, ou multiplexação de sinais de entrada e saída, pode ser levado do domínio espacial para o domínio da frequência, conseqüentemente superando assim limitações para fazer contatos elétricos em nanossistemas.

Na figura III-4 a seguir é possível visualizar uma antena monopolo óptica usada para excitar moléculas fluorescentes com um comprimento de onda de emissão de aproximadamente 570 nm.

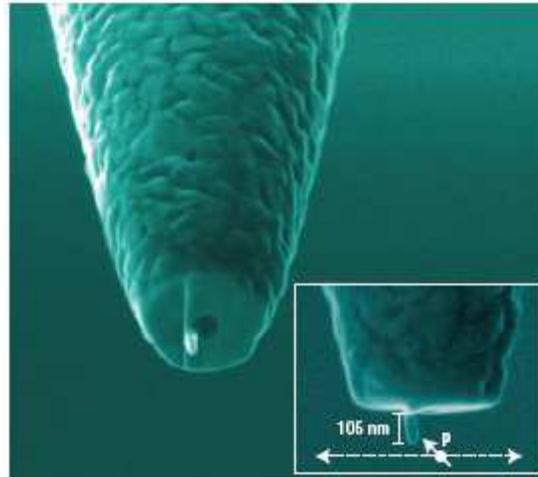


Figura III-4: Antena monopolo óptica [54]. Uma nanoantena de alumínio foi esculpida com um feixe de íon focado no final da face de uma ponta de prova de fibra de campo próximo. A antena possui comprimento de 105 nm e largura típica de 40 nm e foi usada para excitar moléculas fluorescentes com um comprimento de onda de emissão de aproximadamente 570 nm.

Capítulo IV

Necessidade de largura de banda

Em anos recentes tem havido um crescimento bastante explosivo no desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio, já que a flexibilidade destes sistemas, que têm como principal atrativo a mobilidade, não pode ser encontrada em qualquer outro sistema de comunicação. No entanto, o rápido crescimento da utilização destes sistemas requer velocidades de transmissão cada vez mais altas e por conseguinte, a capacidade deles deve ser ampliada pelo menos na mesma taxa da crescente demanda de utilização para que não haja gargalos no oferecimento destes serviços. Com base na lei de crescimento da capacidade dos sistemas de comunicação sem fio, as taxas de dados poderão chegar a 15 Gb/s em menos de 10 anos [55]. Além disso, muitos sistemas de comunicação sem fio atuais e em desenvolvimento, têm procurado agregar aspectos de transmissão importantes através da adoção de sistemas híbridos sem fio e com fio.

No entanto, as altas taxas de dados nos futuros sistemas de comunicação sem fios disponibilizarão uma série de aplicações aos usuários, o que acarretará uma maior necessidade de largura de banda e a necessidade de ocupação das bandas de frequência na faixa de centenas de GHz. Entre as aplicações que podem se beneficiar da ocupação dessas faixas estão as futuras gerações de redes de acesso sem fios, que suportarão dezenas de Gb/s e poderão inclusive substituir as atuais formas de acesso via cabo, como o xDSL (*Digital Subscribers Line*). Por outro lado, os futuros sistemas de comunicação em altas taxas podem ser operados em conjunto com sistemas cujo alcance seja menor, como as atuais WLANs (*Wireless Local-Area Networks*) e WPANs (*Wireless Personal Area Networks*), melhorando a interoperabilidade dos sistemas e permitindo acesso de banda larga a vários usuários em uma área restrita coberta por pico-células, mas com qualidade de serviço para serviços multimídia.

Como as comunicações sem fio de banda ultra larga terão seus principais desafios na disponibilização de recursos de transmissão aos usuários, naturalmente recairão sobre as WLAN/WPANs a tarefa de suportar as altas taxas de dados. Desta forma, os padrões recentes de WLAN permitem taxas de dados de até 108 Mb/s nas frequências de operação em 2.4 GHz e 5 GHz com 83 MHz de banda disponível, considerando condições usuais de

acordo com o padrão IEEE 802.11g. Entretanto, outros padrões têm sido propostos para melhorias no aumento das velocidades de transmissão usando técnicas como multiplexação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), emprego de códigos ótimos e técnicas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). No caso das tecnologias WPAN está hoje em dia em uso o padrão Bluetooth, com uma taxa de dados de 1 Mb/s na frequência de operação de 2.4 GHz com 79 canais de 1 MHz de largura. Melhorias neste padrão já foram propostas, mas o que se deve ressaltar são os padrões para serem usados em banda ultra-larga (UWB), tecnologias para conectividade sem fio de alta velocidade e que serão acomodados na faixa de 3.1 GHz a 10.6 GHz [56], com taxa de transmissão limitada a 1.3 Gb/s [57].

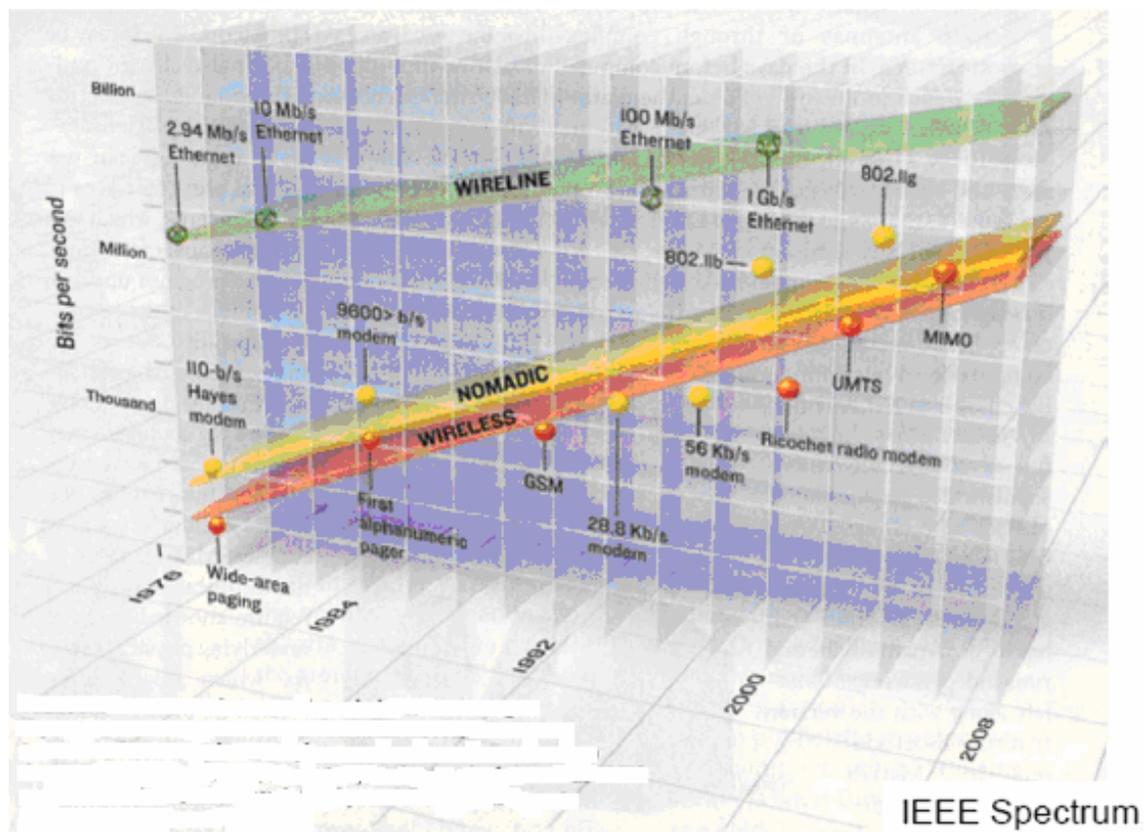


Figura IV-1: Evolução de necessidade de largura de banda ao longo dos anos dos meios de comunicações sem fio e com fio. É possível perceber a demanda crescente por maiores velocidades de transmissão [58].

Como se pode perceber, cada vez mais caminha-se no sentido das transmissões sem fio em altas velocidades, que deverão ser suficientes para suprir a crescente demanda por

largura de banda. Cada vez mais as faixas de frequência superiores, que até poucos anos atrás eram tidas como de uso proibitivo por conta dos altos custos de implementação de sistemas nesta faixa vão se tornando alternativas viáveis devido à grande disponibilidade de espectro ainda não licenciado e às tecnologias emergentes que baratearam as tarefas de processamento eletrônico e têm permitido a exploração das faixas subterahertz. Por conta disso, as pesquisas na área de dispositivos que trabalhem com esta faixa de frequências tem sido cada vez mais incentivadas e as antenas para transmissão e recepção apresentam-se como um dos tópicos mais atraentes neste cenário, em que o estudo de dimensionamento e dos parâmetros de operação são de grande valia para a implementação dos futuros sistemas de comunicação sem fio. No entanto, antes da apresentação dos resultados da avaliação de várias antenas compostas por materiais nanoestruturados, deve-se fazer algumas considerações sobre as comunicações na faixa de subterahertz, que será abordada na próxima sessão.

Capítulo V

Comunicação em Terahertz

5.1 Propagação

Fora as questões tecnológicas dos sistemas sem fio de alta velocidade, o fenômeno de propagação impõe muitas restrições aos futuros sistemas de comunicação sem fio operando na faixa de Terahertz, já que as ondas eletromagnéticas sofrem um espalhamento de energia e também sofrem com a interação com as moléculas dos elementos presentes na atmosfera, provocando atenuação, desvios de fase e variações nos ângulos de chegada. Como se pode imaginar, esses problemas prejudicam muito a comunicação em condições climáticas adversas. O espalhamento de energia é descrito através da fórmula de Friis, que permite obter a atenuação no espaço livre. A potência recebida devido apenas à atenuação no espaço livre é proporcional ao quadrado do comprimento de onda e inversamente proporcional à distância entre a antena transmissora e receptora. Considerando as antenas com Ganhos iguais a 1, a perda no espaço livre pode ser dada, em dB, através de [69]

$$L = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.44 \text{ (dB)} \quad (3)$$

onde a distância d entre as antenas é dada em km e a frequência de propagação f em MHz.

A perda no espaço livre devido à distância de propagação para um enlace de 10 m operando a 300 GHz e 1 THz está entre 102 e 112 dB. A Figura V-1 mostra esta variação, para frequências próximas a 300 GHz. Os valores de atenuação devido a absorção molecular podem chegar a centenas de dB/km em 60 GHz, mas existem algumas janelas de frequência onde a atenuação geralmente está abaixo ou próximo de 60 dB/km. No caso de chuva, a atenuação para frequências perto de 300 GHz depende apenas da intensidade da chuva e pode alcançar valores até 100 dB/km. Além disso, a difração em obstáculos que pode ocorrer na propagação ocasiona problemas de desvanecimento, devido às rápidas flutuações na amplitude do sinal que se propaga.

Por conta desses problemas, está claro que os futuros sistemas de comunicação sem fio para acesso de banda larga não poderão prover acesso a grandes distâncias e também não serão eficientes para transmissão em ambientes abertos, sendo melhor adaptados para ambientes fechados, onde os problemas de propagação no espaço livre, atenuação por condições climáticas e difração em obstáculos podem ser minimizados pelo projeto das dimensões do ambiente e da disposição dos objetos de modo a obter um aumento de eficiência de transmissão.

Um assunto que não deve ser deixado de lado é a questão da frequência de operação das antenas, que como se pode ver afeta diretamente a perda de propagação e a perda por absorção atmosférica, devido a vapor d'água e oxigênio, e espalhamento por hidrometeoros tais como chuva e granizo. Nesse caso, uma janela de transmissão deve ser escolhida para esta operação, em que haja possibilidade para projeto de uma antena. Esse assunto será abordado na próxima sessão.

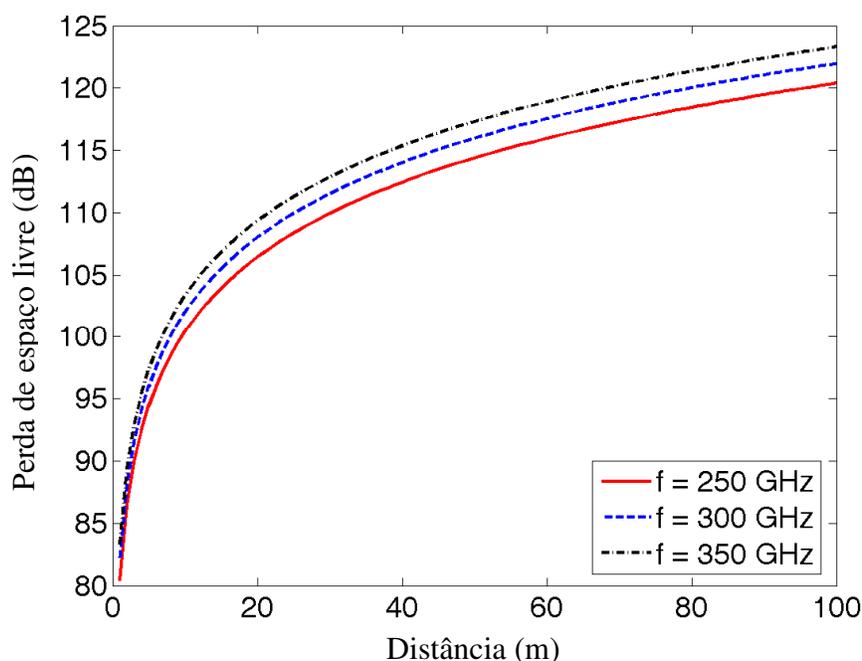


Figura V-1 – Perda no Espaço Livre em dB para as frequências de 250, 300 e 350 GHz em função da distância do enlace em metros.

Atenuação gasosa

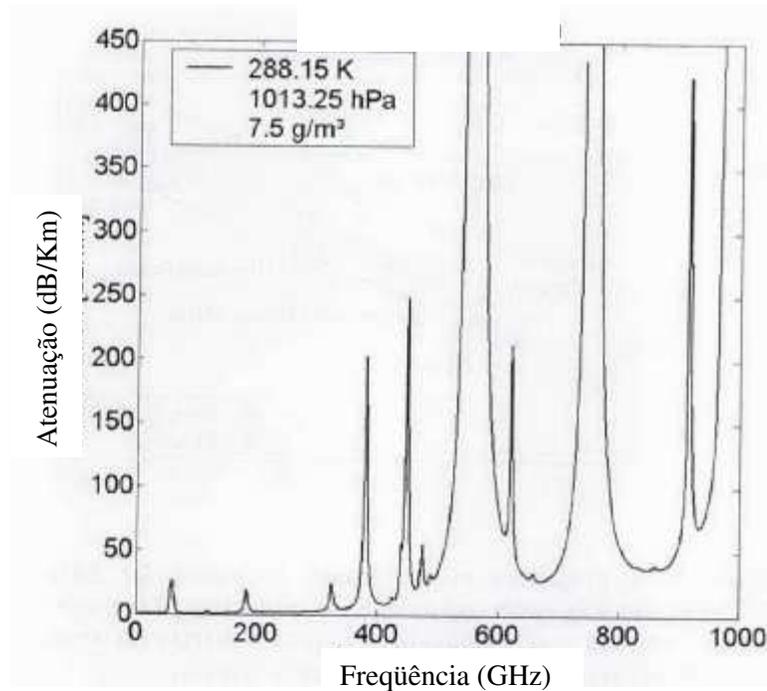


Figura V-2 – Atenuação atmosférica em db/Km na faixa de frequência de 0 a 1 THz [3].

Na figura V-2 visualiza-se o gráfico de atenuação atmosférica em dB/Km na faixa de frequência que vai de 0 a 1000 GHz. É possível identificar que há algumas “janelas” de frequência que apresentam menor atenuação atmosférica e que, por isso, aumentam a possibilidade do enlace de comunicações ser bem sucedido nessa faixa de frequência.

5.2 Escolha da janela de frequência

A escolha da frequência portadora para os futuros sistemas de comunicação em sub Terahertz pode recair na faixa de 300 GHz a 1 THz devido à existência de avanços eletrônicos que permitiram o tratamento de informações nesta faixa. Contudo, a grande limitação para o uso destas faixas está no nível de perdas observadas tanto devido à propagação no espaço livre, quanto à absorção atmosférica. Em [3] são apresentadas algumas janelas de frequência nessa faixa, onde são mostrados os parâmetros de largura de banda e de atenuação. Estes dados são reproduzidos na Tabela V.1, que segue.

Tabela V.1 – Parâmetros para algumas janelas de propagação [3].

Frequência Central (GHz)	Largura de Banda (GHz)	Atenuação (dB/km)
300	47	3
350	47	7
410	51	12
670	87	38
850	111	51

Devido aos parâmetros encontrados e à diminuição da complexidade dos sistemas, para este trabalho serão feitos estudos de antenas feitas a partir de materiais nanoestruturados para operação na faixa de 300 a 350 GHz.

É certo que apesar da escolha criteriosa das janelas de frequência e do cenário para as aplicações, as perdas continuam a ser bastante altas para distâncias curtas, requerendo ganho típico acima de 20 dB [3]. Sendo assim, as antenas devem ser projetadas para a obtenção do maior ganho possível, com parâmetros de radiação eficientes. Esses ganhos podem ser ainda aumentados usando técnicas de aumento de cobertura por reflexões sucessivas, o que aumenta o ganho efetivo das antenas e melhora a confiabilidade do enlace devido à possibilidade de multipercursos.

A seguir, passaremos aos estudos dos parâmetros de desempenho de antenas compostas por materiais nanoestruturados operando na faixa de 350 GHz como uma possível solução para aplicações nos futuros sistemas de comunicações sem fio para acesso local.

Capítulo VI

Métodos e Resultados

6.1 Métodos

Os principais parâmetros de antenas dipolo vertical com dipolos filamentosas de diferentes materiais foram numericamente calculados usando o aplicativo CST Microwave Studio. PEC, CNT, AuNW, ZnNW e NiNW representam os parâmetros associados a *Perfect Electric Conductor* (condutor elétrico perfeito), nanotubos de carbono e nanofios de ouro, zinco e níquel, respectivamente.

Para que fosse possível realizar a simulação das antenas e seus materiais, foi necessário delimitar algumas condições de contorno visando simplificar o problema e reduzir o tempo de processamento, sempre objetivando ter um cenário o mais realista possível.

Dentro desse escopo, as seguintes condições de contorno foram estimadas:

- a) Utilização da faixa de sub-THz para maior velocidade de transmissão;
- b) Comunicações sem fio indoor em ambiente típico de escritório em uma sala de dimensões 5 x 6 x 2,5 metros (comprimento, largura, altura);
- c) Espelhos dielétricos nas paredes e no teto em quantidade adequada para permitir a redundância de enlaces e aumentar a confiabilidade das comunicações;
- d) Antena dipolo vertical;
- e) Materiais e suas resistividades:
 - i. PEC
 - ii. Feixe de nanotubos de Carbono de parede simples ($1,0 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$), do tipo armchair [59]
 - iii. Nanofio de Ouro ($2,5 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) [60]
 - iv. Nanofio de Zinco ($9,3 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) [60]
 - v. Nanofio de níquel ($20 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) [60]
- f) A Linha de Transmissão foi desprezada ;
- g) Utilização de janela específica de comunicações em Sub THz para melhor condição de propagação [3];
- h) Condição de espaço livre;

Antes de definir que a antena dipolo vertical seria o modelo de antena a ser analisado, foram investigadas outras configurações de antenas, tais como hélice, *loop* quadrado, antena de carga volumétrica e antena log-periódica de filme fino para a faixa de THz. Tais configurações de antena apresentam vantagens de melhor ganho quando comparadas com a antena dipolo e poderiam ajudar a reduzir o comprimento físico do dispositivo radiador, o que certamente é uma característica bem desejada, uma vez que o tema em análise são antenas de dimensões muito reduzidas.

Por outro lado, em função do trabalho aqui desenvolvido envolver estruturas com diâmetro em escala nanométrica, entende-se que o estudo inicial seria mais produtivo se fossem abordadas as antenas do tipo dipolo, de modo a reduzir as dificuldades associadas a realização das simulações e posterior implementação em laboratório. A adoção de configuração de antenas dipolo vertical revelou-se acertada para analisar as simulações, uma vez que para as condições de contorno do problema, mesmo para uma antena simples como a dipolo, o tempo de processamento foi bastante longo, tendo algumas simulações durado quase uma semana.



Figura VI-1: Configurações de antenas estudadas, antena hélice quadrifilar [61]. Esta antena apresenta ganho de cerca de 5 dB e boa relação frente costa, sendo empregada em sistemas de comunicações espaciais.

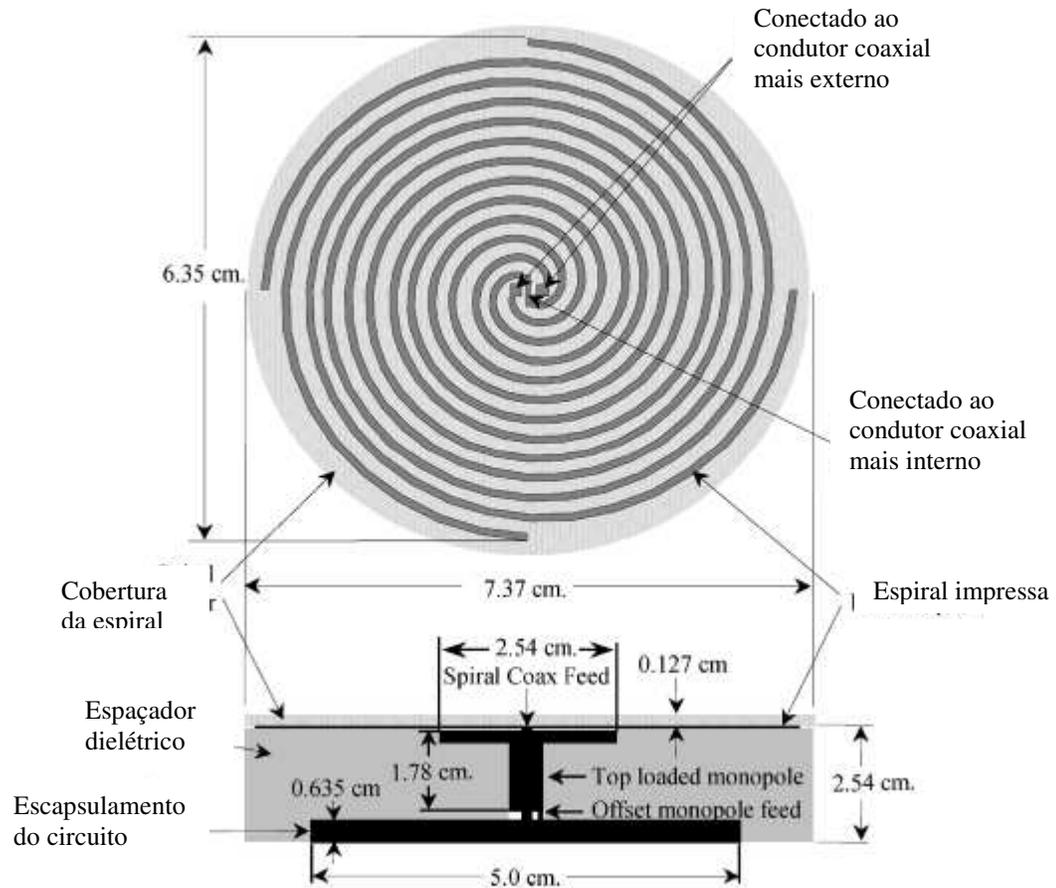


Figura VI-2: Configurações de antenas estudadas, antena de carga volumétrica do tipo pólo em espiral [62]. Esta antena apresenta diretividade máxima a 45° de seu eixo, e diretividade nula no seu eixo, sendo empregada em sistemas de comunicações para satélites geo-estacionários e estações terrestres.

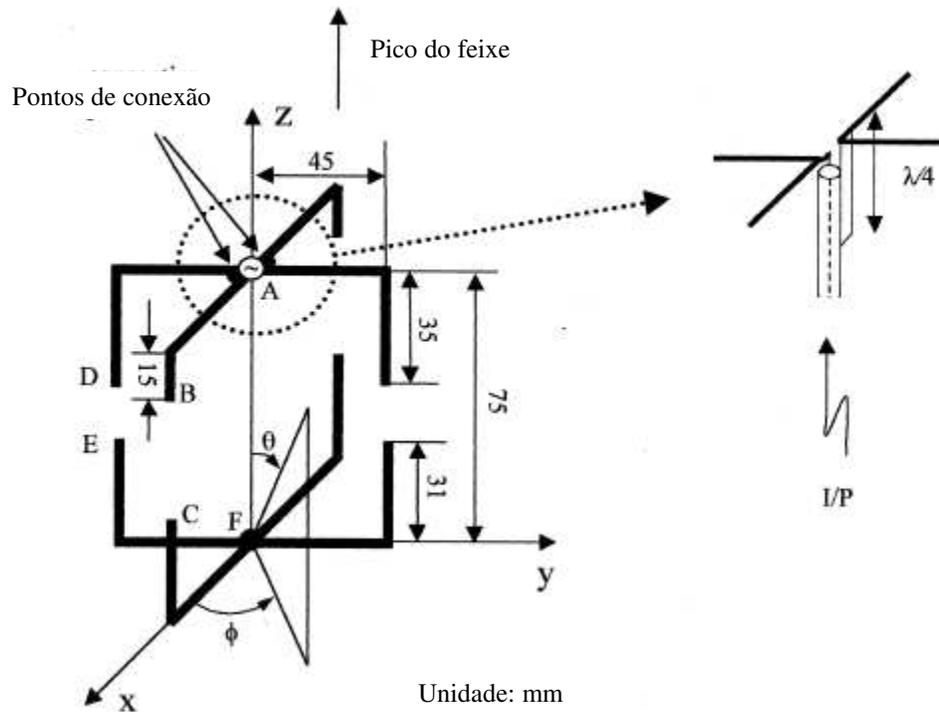


Figura VI-3: Configurações de antenas estudadas, antena loop quadrifilar de alimentação central única [63]. Esta antena possui boa relação frente-costa (cerca de 20 db), e largura de banda de cerca de 15%. Pode ser empregada em sistemas de comunicações satelitais e outros sistemas de comunicações de alta frequência.

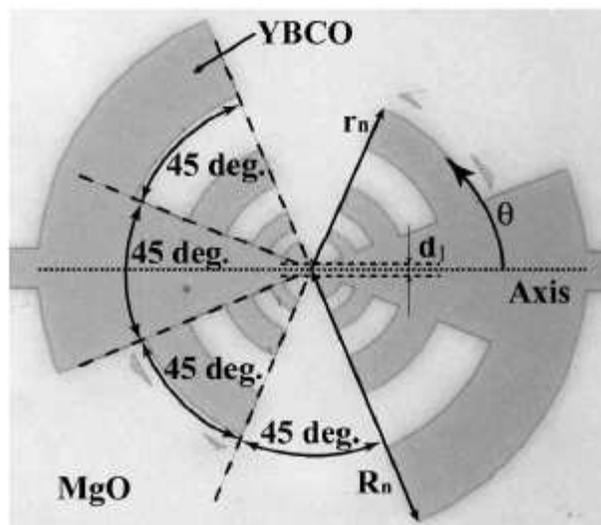


Figura VI-4: Configurações de antenas estudadas, antena log periódica de filme fino YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) [64]. Esta antena foi feita numa estrutura planar dentada, com raios

entre 82 e 700 μm , e espessura de filme fino de YBCO de 100 nm foi depositado em substrato de MgO. O filme fino acima citado é um tipo de supercondutor.

Dentro das condições de contorno estipuladas, foi definido que a antena a ser utilizada no estudo seria a dipolo vertical de meia onda sintonizada para a frequência de 350 GHz.

As simulações ocorreram com o software CST Microwave Studio, que é uma ferramenta de simulação eletromagnética em 3D (três dimensões) para análise e projeto na faixa de alta frequência, e seu método numérico é baseado na FIT – *Finite Integration Technique*, ou técnica de integração finita. A partir deste método, a forma Integral das Equações de Maxwell é discretizada, e a solução pode ser obtida por meio de *solver* (solucionador) no domínio da frequência e do tempo. Neste último caso, pode ser usado o método PBA – *Perfect Boundary Approximation*, ou método de aproximação do contorno perfeito, que permite que mais de um material esteja presente em uma única célula. Além disso, convém ressaltar que os requisitos de memória são menos exigidos e a velocidade de processamento de uma forma geral é aumentada, com convergência de resultados mais rápida em relação ao *solver* no domínio da frequência.

O hardware usado nas simulações foi um computador desktop Pentium 4, de processador de núcleo duplo, clock de 3 GHz, memória de acesso aleatório RAM de 2 GB, disco rígido de 215 GB e sistema operacional Windows XP service pack 2.

É importante fazer a malha de células adequada para que os cálculos tenham a maior precisão possível, buscando um equilíbrio com o custo computacional, pois quanto mais densa a malha, maior a quantidade de células a serem processadas, e maior o tempo de simulação. A necessidade de se ter uma maior ou menor densidade de células na malha é função de vários fatores tais como frequência de operação, dimensões da antena, configuração geométrica da antena, dentre outros. Apenas para exemplificar, no caso de simulação de antena dipolo vertical com diâmetro de 100 nm e comprimento de 410 μm , cerca de 4 células pequenas no interior da antena e uma dezena de células também de menor dimensão nos arredores do elemento irradiador, gerando cerca de 200.000 células, normalmente são suficientes para produzir resultados com precisão. Cada situação específica vai determinar a malha mais adequada a ser empregada. Os trabalhos de

simulação são iniciados com pequena quantidade de células, e este número vai sendo aumentado gradativamente até que se perceba que o acréscimo de células não influencia mais os parâmetros a serem observados.

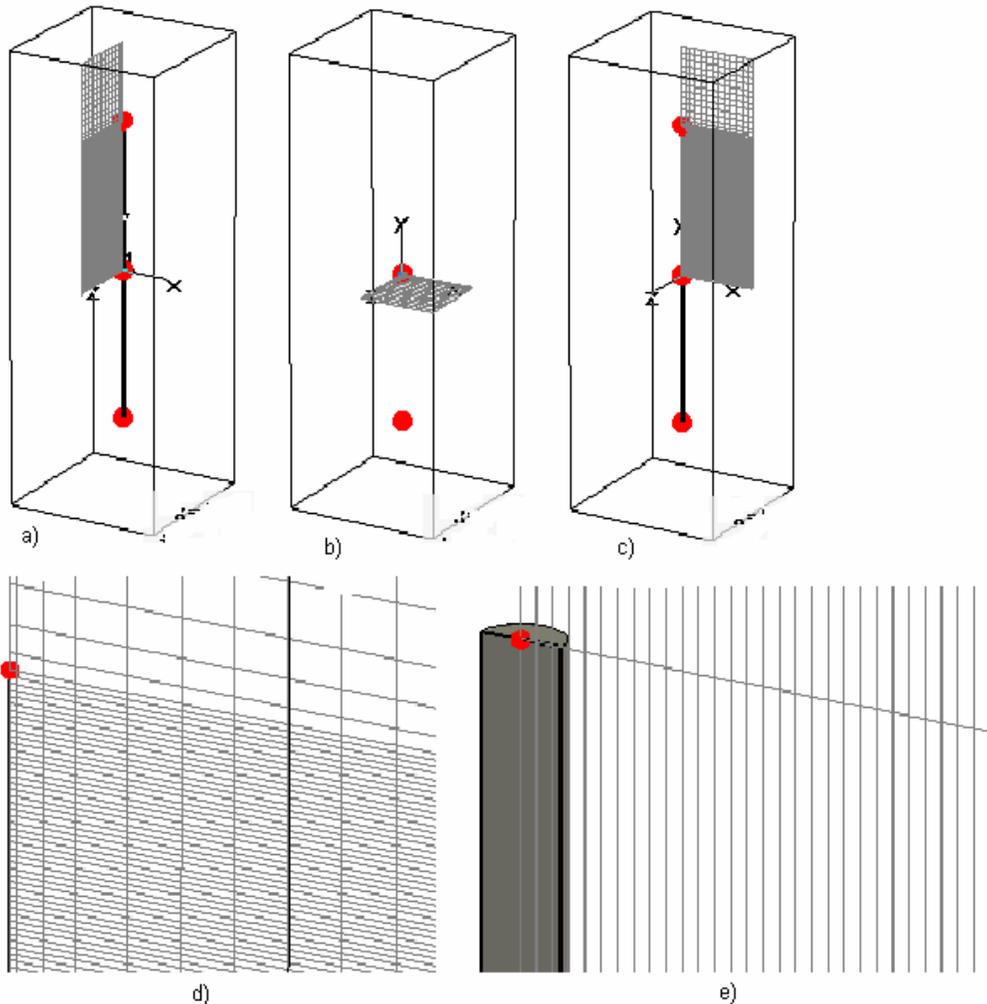


Figura VI-5: Ilustração de malha para antena dipolo vertical em 350 GHz, com comprimento de 410 μm , diâmetro de 10 nm, com nanotubo de carbono. a) Plano de malha normal em x; b) Plano de malha normal em y; c) Plano de malha normal em z; d) Detalhe de plano de malha normal em z; e) Maior detalhe de plano de malha normal em z, permitindo a visualização da distribuição de células da malha dentro e nas proximidades da antena.

Do ponto de vista dos *solvers* no domínio do tempo e da frequência, o primeiro forma malha de células de geometria hexaédrica. Já o segundo, gera malha de células de geometria tetraédrica. Foi observado que o *solver* no domínio da frequência apresentou

grande dificuldade em constituir a malha devido ao fato da antena em estudo apresentar grande razão de aspecto nas dimensões envolvidas, uma vez que em um sentido a dimensão era de centenas de microns (comprimento do dispositivo radiador) e no outro sentido a dimensão era de poucos nanômetros. Isso é especialmente crítico quando as dimensões do diâmetro do condutor foram menores que 100 nm para um comprimento de antena de 400 μm . Assim, em função das condições encontradas, o *solver* no domínio do tempo mostrou-se mais adequado para analisar as antenas deste trabalho.

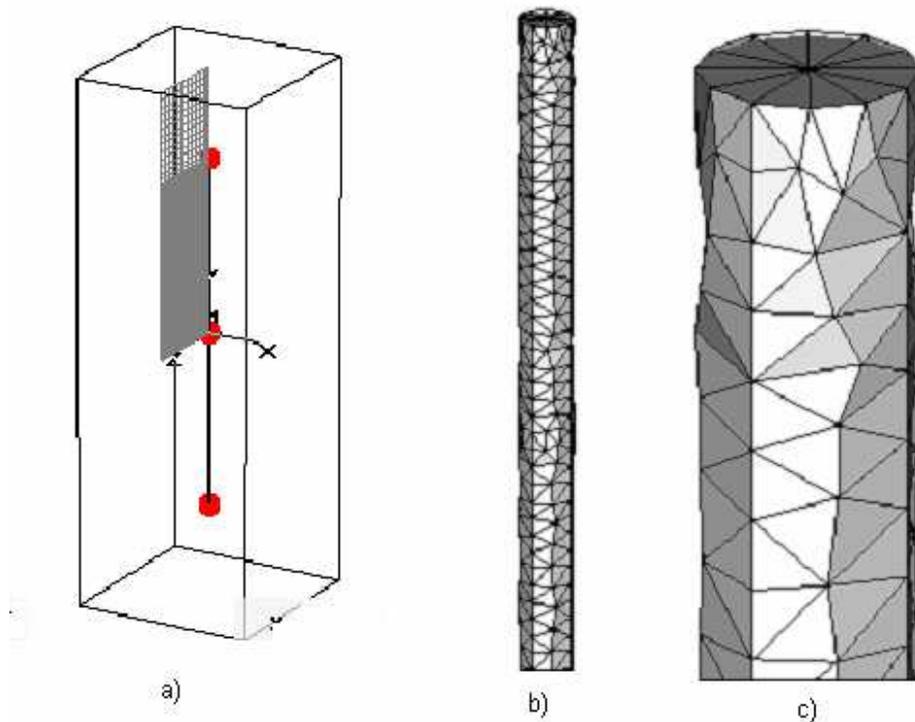


Figura VI-6: Malhas hexaédricas do *solver* T e malhas tetraédricas do *solver* F. a) Malha hexahédrica com plano de malha normal em x; b) Malha tetraédrica; c) Detalhe de malha tetraédrica.

Os parâmetros observados são diretividade, parâmetro S (perda de retorno, S_{11}), VSWR (taxa de onda estacionária), ganho (que será chamado de ganho IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), ganho realizado (definido por ganho multiplicado pelo termo $(1 - S_{11}^2)$, que inclui as perdas por descasamento de impedância e por isso é um valor mais confiável que o ganho IEEE), campo elétrico (campo E), diagrama de potência (que será denominado de campo P , definido como valor da potência no campo distante em uma distância de referência, 1 metro), e eficiência de radiação.

Tratando da questão das regiões de campo, temos que o espaço em torno da antena é comumente dividido em três regiões, a saber: região de campo próximo reativo (*reactive near-field region*), região de campo próximo radiante (*radiating near-field region*) e região de campo distante (*far-field region*), conforme figura VI-7.

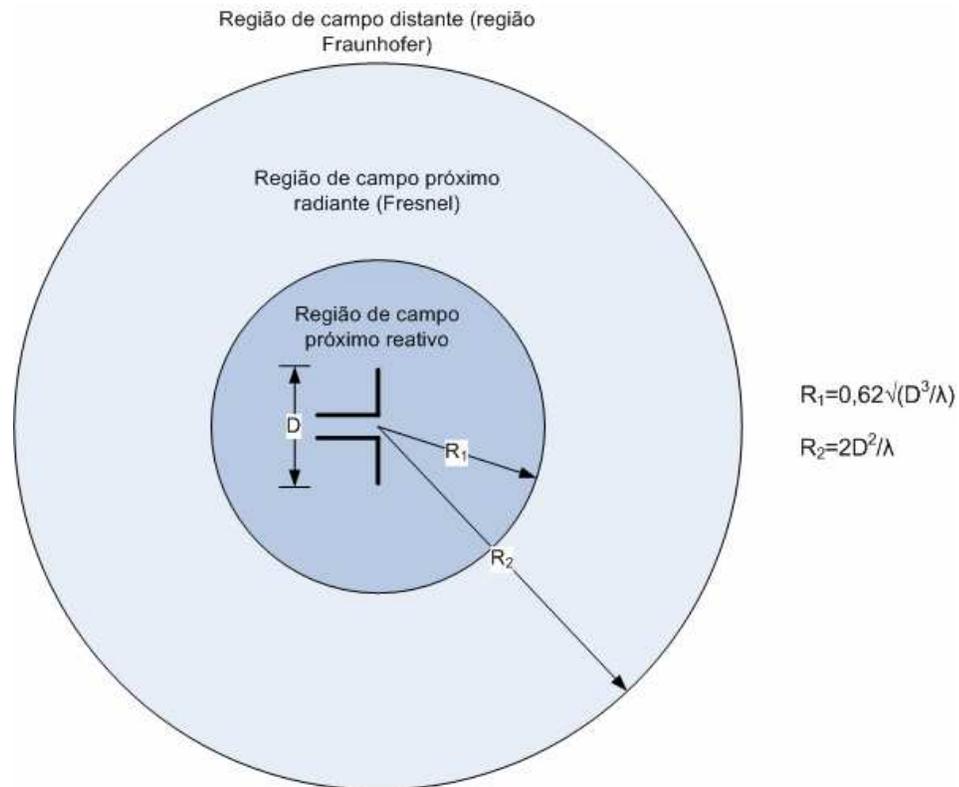


Figura VI-7: Regiões de campo de uma antena [65].

A região de campo distante é definida como “região de campo de uma antena onde a distribuição de campo angular é essencialmente independente da distância a partir da antena” [65]. Se a antena possui uma dimensão máxima D , ou seja D é o comprimento dipolo, e λ é o seu comprimento de onda da frequência de operação, a região de campo distante começa em uma distância definida pela relação [65]

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4),$$

sendo esta região a mais interessante para análise de condições de campo eletromagnético para o trabalho em estudo. Nas condições analisadas, onde o comprimento da antena variou de cerca de 400 a 800 μm e a frequência de operação foi de 350 GHz, o comprimento de onda é de $8,571 \times 10^{-4}$ m, ela começa a partir de 370 μm para o primeiro comprimento ou 1500 μm no segundo caso. Ou seja, distâncias muito pequenas se considerarmos que as dimensões normalmente envolvidas para enlaces de comunicações sem fio são da ordem de metros ou ainda quilômetros.

Separando as simulações em grupos conforme o objetivo a analisar, o primeiro conjunto teve por propósito verificar como a resistividade de diferentes materiais influencia o comportamento dos parâmetros já citados. O segundo grupo objetivou estudar a influência do diâmetro nos parâmetros mencionados para PEC. Por fim, o terceiro grupo comparou as diferenças de resultados conforme a variação da impedância de entrada da antena para os diferentes materiais.

6.2 Resultados

Analisando o comportamento do primeiro conjunto, na tabela VI.1, para diferentes materiais, mantendo-se a mesma impedância de entrada Z_0 em 50 ohms, o mesmo comprimento físico da antena em 410 micrometros e o mesmo diâmetro de 100 nanometros, percebe-se que a resistividade influenciou diretamente o ganho, sendo que quanto menor a resistividade, maior o ganho. Entretanto, para materiais que não sejam condutores elétricos perfeitos, percebe-se que o ganho em dB sofreu ligeira variação, da ordem de fração de dB. Já para o ganho realizado, foi identificada uma maior modificação,

mas não superior a 3 dB em nenhum caso dos nanomateriais empregados. Observou-se que a diretividade manteve-se praticamente inalterada para os diferentes materiais empregados.

Tabela VI.1. Ganho e diretividade dos materiais em função da resistividade com $Z_0 = 50$ ohms

Resistividades (Ωm)	Material	Diretividade (dBi)	Ganho (IEEE) (dB)	Ganho Realizado (dB)
-	PEC	1,821	1,794	1,582
1.0exp-08	CNT	1,819	-0,240	-1,873
2.5exp-08	Au NW	1,819	-0,350	-2,22
9.3exp-08	Zn NW	1,805	-0,635	-3,607
20exp-08	Ni NW	1,79	-0,606	-4,259

Na figura VI.7, vê-se gráfico tri-dimensional de diretividade da antena dipolo vertical para PEC, com diâmetro de 100 nm, comprimento de 410 μm e $Z_0 = 50$ ohms. Pode-se verificar que há maior direcionamento de radiação (cor vermelha, mais quente) na direção perpendicular ao eixo vertical (seta na cor verde, na vertical, correspondente ao eixo Y), ao passo que nas extremidades da antena quase não há radiação (cor verde, mais fria), em conformidade com a teoria clássica de antenas dipolo [65]. Convém ressaltar que a antena dipolo vertical está direcionada, em todos os casos analisados, paralela ao eixo Y.

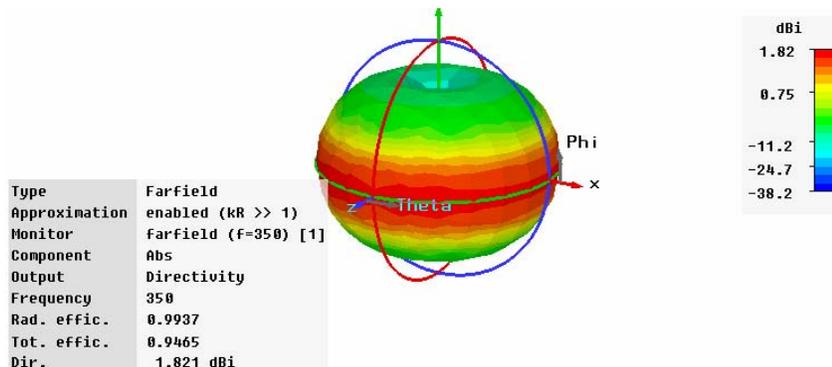


Figura VI-7: Padrão de radiação tri-dimensional de Diretividade de antena dipolo vertical com material PEC para $Z_0 = 50$ ohms com diâmetro de 100 nm.

Já na figura VI.8, vê-se o padrão de radiação bi-dimensional na forma polar de distribuição de campo elétrico da antena dipolo vertical para nanofio de zinco de diâmetro 100 nm, comprimento de 410 μm e Z_0 50 ohms. Pode-se verificar que há maior intensidade de campo elétrico nas direções 0° e 180° perpendicular ao eixo vertical (aqui representado pela direção 90° - 90° , com a qual a antena está alinhada), ao passo que nas extremidades da antena quase não há radiação, conforme também observado na figura anterior.

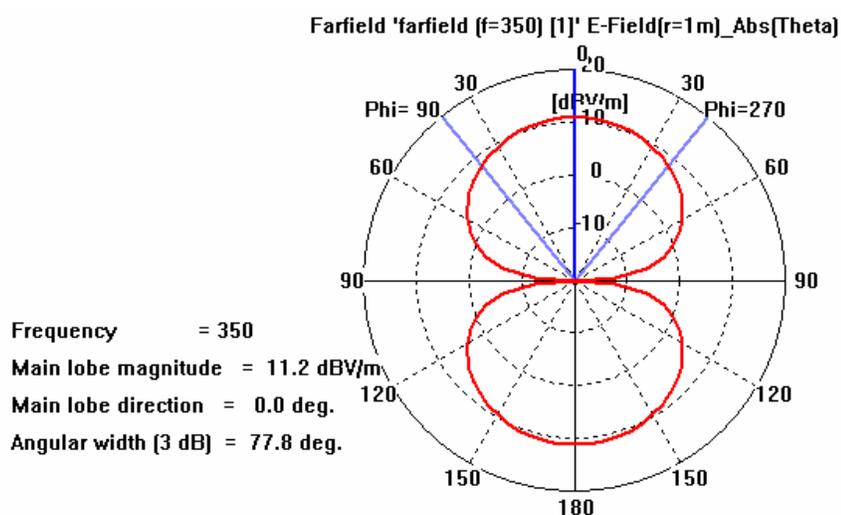


Figura VI-8: Padrão de radiação bi-dimensional na forma polar de antena dipolo vertical com nanofio de zinco para $Z_0 = 50$ ohms e diâmetro 100 nm.

Por sua vez, na figura VI.9, vê-se gráfico bi-dimensional de ganho realizado da antena dipolo vertical para nanotubo de carbono de diâmetro 100 nm, comprimento de 410 μm e Z_0 50 ohms. Pode-se verificar que há menor intensidade de ganho realizado nas regiões azuis, que correspondem à interseção dos ângulos ϕ e θ de 90° e os ângulos ϕ 270° e θ 90° , coincidindo com as extremidades do eixo da antena. Esse diagrama é

um interessante recurso para se saber qual o valor do parâmetro de campo distante analisado (nesse caso, ganho realizado) em determinada posição do espaço.

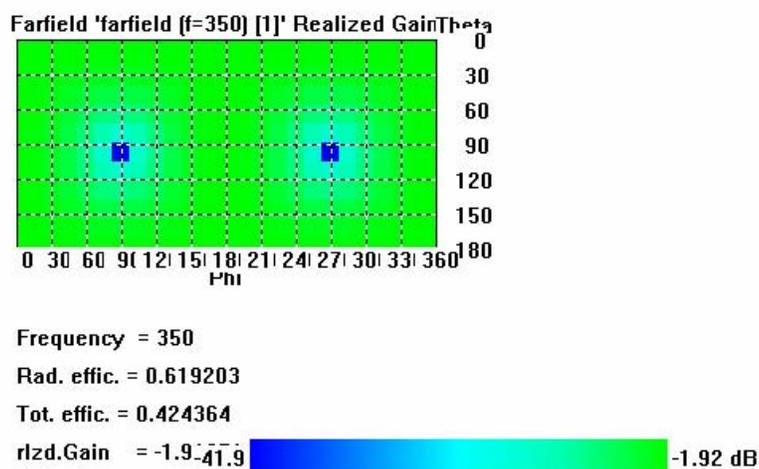


Figura VI-9: Gráfico bi-dimensional de ganho realizado de antena dipolo vertical com nanotubo de carbono para Z_0 50 ohms e diâmetro 100 nm.

Analisando os valores de campo elétrico e diagrama de potência (*P-field*), constata-se que houve um decréscimo do campo E e do campo P à medida que a resistividade aumentava, mas excetuando os valores relativos ao material PEC, as variações de tais parâmetros não foram superiores a 3dBV/m ou 3dBW/m², conforme se verifica na Tabela VI.2 abaixo.

Tabela VI.2. Campo E e Campo P em função da resistividade do material para diâmetro de 100 nm e $Z_0 = 50$ ohms.

Resistividades (Ω m)	Material	Campo E (dBV/m)	Campo P (dBW/m ²)
-	PEC	16,25	-9,410
1.0exp-08	CNT	12,9	-12,87
2.5exp-08	Au NW	12,55	-13,21
9.3exp-08	Zn NW	11,16	-14,6
20exp-08	Ni NW	10,51	-15,25

Já em relação à eficiência de radiação, a situação muda de figura. Vendo a tabela VI.3 abaixo, se percebe que a resistividade é um importante fator a se considerar. Há uma diferença de quase 20% de eficiência total quando se comparam os valores de CNT e nanofios de Níquel.

Tabela VI.3. Eficiência de radiação em função da resistividade do material para diâmetro 100 nm e $Z_0 = 50$ ohms.

Resistividades (Ωm)	Material	Eficiência Radiação (%)	Eficiência Total (%)
-	PEC	99,37	94,65
1.0exp-08	CNT	61,92	42,43
2.5exp-08	Au NW	60,69	39,46
9.3exp-08	Zn NW	57,01	28,76
20exp-08	Ni NW	57,59	24,83

Pela análise da perda de retorno em dB, verifica-se que a alteração de material deslocou o ponto de ressonância da antena, reduzindo a sua frequência de ressonância, como se pode verificar na figura VI-10. É necessário recalculer o melhor comprimento de antena para sintonia para os diversos materiais empregados. Para nanotubos e nanofios empregados em subTHz, a atualização da dimensão da antena para a melhor sintonia é um fator importante quando do emprego de diferentes materiais, pois as dimensões envolvidas são bastante reduzidas. Apenas para PEC foi obtida perda de retorno inferior a -10 dB, o que corresponde a um VSWR de 2. Os demais materiais obtiveram tal perda em torno de -8 dB, o que pode limitar as aplicações de nanotubos de carbono e nanofios metálicos nessa situação. A realização do adequado casamento de impedância de entrada da antena pode contribuir para melhorar o parâmetro de perda de retorno e ampliar o cenário de emprego de nanomateriais para antenas.

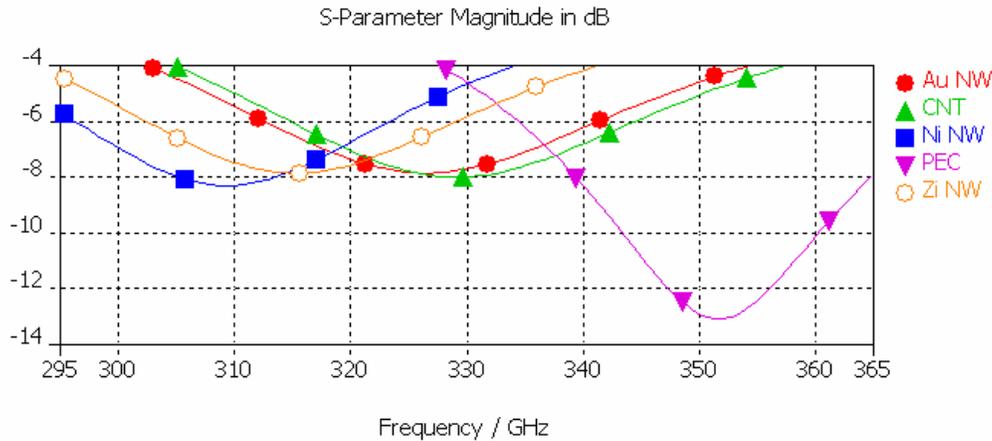


Figura VI-10: Perda de retorno comparativa de antena dipolo vertical para $Z_0 = 50$ ohms para PEC, nanotubo de carbono e nanofios de ouro, níquel e zinco para diâmetro de 100 nm e comprimento de 410 μm .

Partindo para o estudo do 2º grupo de simulações, analisou-se a influência do aumento de diâmetro da antena dipolo vertical para PEC. Os diâmetros avaliados foram 10, 100, 500 e 1000, todos em nm e com material PEC. Percebeu-se que os parâmetros avaliados de diretividade, ganho, ganho realizado, campo E e campo P não sofreram alteração digna de nota, de acordo com a tabela VI.4. Além disso, não foram observadas mudanças significativas na eficiência de radiação, perda de retorno e VSWR mínimo, de acordo com a tabela VI.5.

Por outro lado, percebe-se que ocorreu aumento de largura de banda ao se aumentar o diâmetro do dipolo. À medida que os diâmetros se alteravam, modificava também a sintonia da antena, e foi necessário promover pequenas mudanças no comprimento físico da antena, que saiu de seu tamanho original 410 μm para 390 μm (redução de 5%), conforme Tabela VI.6. Tal recurso pode ser usado para pequenos acréscimos de largura de banda da antena. É importante notar que, por se tratar de antena de dimensões bastante reduzidas, a manutenção da antena em seu tamanho original de projeto (PEC) pode inviabilizar o emprego da antena em determinada faixa de operação.

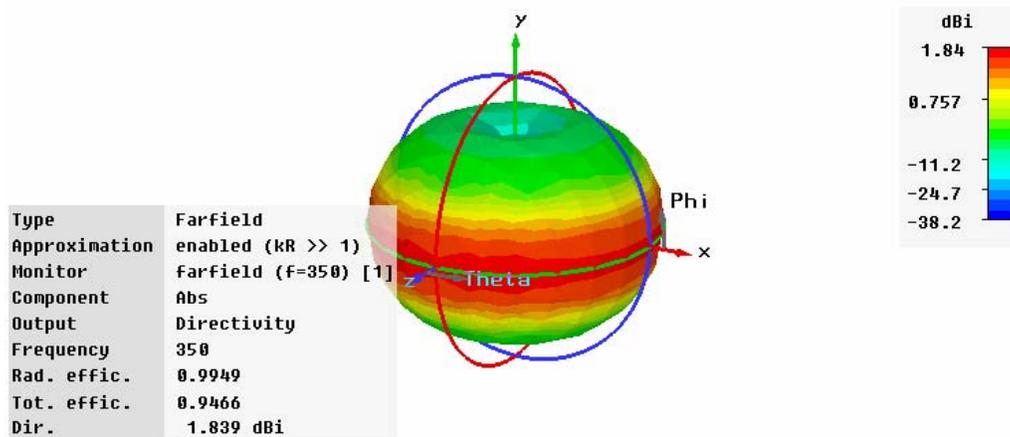


Figura VI-11: Gráfico tri-dimensional de Diretividade de antena dipolo vertical com material PEC para $Z_0 = 50$ ohms com diâmetro de 500 nm.

Verifica-se na tabela VI.6 que quando o diâmetro passa de 10 nm para 100 nm, ocorre uma aumento de largura de banda pouco menor que 1 GHz e em torno de 2 GHz considerando, respectivamente, VSWR de 2 e de 2,5. Já ao se comparar a situação na qual o diâmetro se altera de 10 para 500 nm, há acréscimo de largura de banda de pouco menos de 4 GHz e mais de 5 GHz, respectivamente, VSWR de 2 e de 2,5.

Tabela VI.4. Parâmetros de diretividade, ganho, ganho realizado, campo E, campo P da antena PEC dipolo vertical em função da variação de seu diâmetro com Z_0 de 50 ohms e comprimento variável de 390 a 410 μm .

Diâmetro (nm)	Material	Diretividade (dBi)	Ganho (dB)	Ganho Realizado (dB)	Campo E (dBV/m)	Campo P (dBW/m ²)
10	PEC	1,845	1,801	1,591	16,36	-9,402
100	PEC	1,821	1,794	1,582	16,35	-9,410
500	PEC	1,839	1,817	1,601	16,37	-9,391
1000	PEC	1,847	1,807	1,602	16,37	-9,390

Analisando a figura VI-12, percebe-se que para todos os diâmetros considerados, a perda de retorno na frequência de ressonância desejada manteve-se abaixo de -10 dB, o que é certamente almejado. É possível também visualizar nesse gráfico que a largura de banda é maior para as antenas que tiveram seu diâmetro aumentado, uma vez que o conjunto de frequências que possuem perda de retorno abaixo de -10 dB é maior para a antena dipolo vertical de diâmetro 1000 nm.

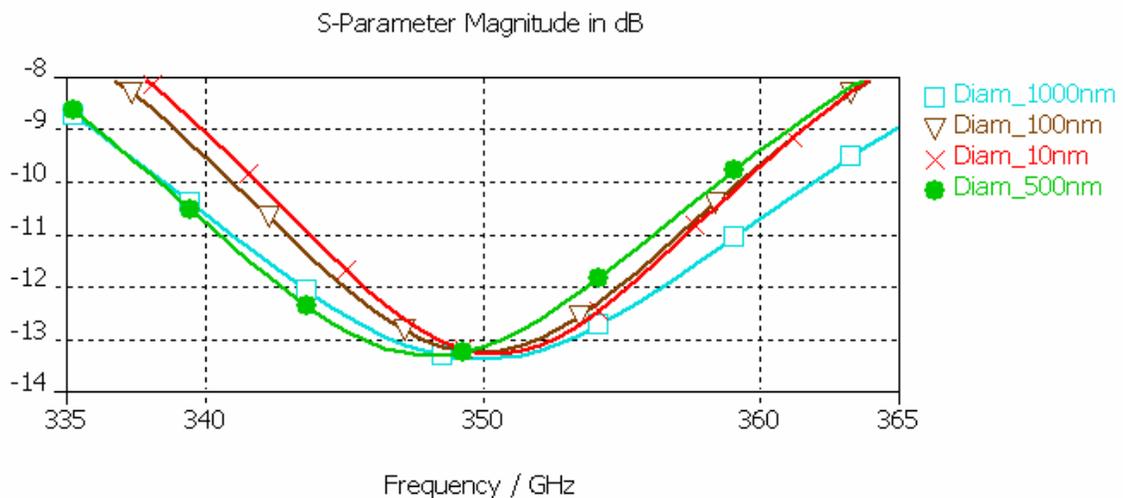


Figura VI-12: Perda de retorno comparativa de antena dipolo vertical PEC com diferentes diâmetros.

Verifica-se na tabela VI.6 que quando o diâmetro passa de 10 nm para 100 nm, ocorre uma aumento de largura de banda pouco menor que 1 GHz e em torno de 2 GHz considerando, respectivamente, VSWR de 2 e de 2,5. Já ao se comparar a situação na qual o diâmetro se altera de 10 para 500 nm, há acréscimo de largura de banda de pouco menos de 4 GHz e mais de 5 GHz, respectivamente, VSWR de 2 e de 2,5.

Tabela VI.5. Parâmetros de eficiência de radiação, eficiência total, perda de retorno e VSWR mínimo da antena dipolo vertical PEC em função da variação de seu diâmetro.

Diâmetro (nm)	Material	Eficiência Radiação (%)	Eficiência Total (%)	S db (perda retorno)	VSWR mínimo
10	PEC	98,99	94,31	-13,26	1,555
100	PEC	99,37	94,65	-13,23	1,558
500	PEC	99,49	94,66	-13,14	1,553
1000	PEC	99,08	94,51	-13,37	1,547

Tabela VI.6. Largura de banda da antena dipolo vertical PEC em função da variação de seu diâmetro e seu comprimento físico.

Diâmetro (nm)	Material	Larg Banda em GHz (VSWR <2)	Larg Banda em GHz (VSWR <2,5)	Comprimento físico (micrometros)
10	PEC	19,56	29,18	410
100	PEC	20,33	31,04	410
500	PEC	23,28	34,29	390
1000	PEC	26,88	39,13	405

Fechando a análise de simulação de antena dipolo vertical de PEC com diâmetro variável, na figura VI-13, de forma similar ao ocorrido na figura VI-12 para o gráfico de perda de retorno, nota-se que para todos os diâmetros considerados, o VSWR na frequência de ressonância desejada manteve-se abaixo de 2. É possível também identificar em tal gráfico que a largura de banda é maior para as antenas que tiveram seu diâmetro aumentado, uma vez que o conjunto de frequências que possuem VSWR abaixo de 2 é maior para a antena dipolo vertical de diâmetro 1000 nm.

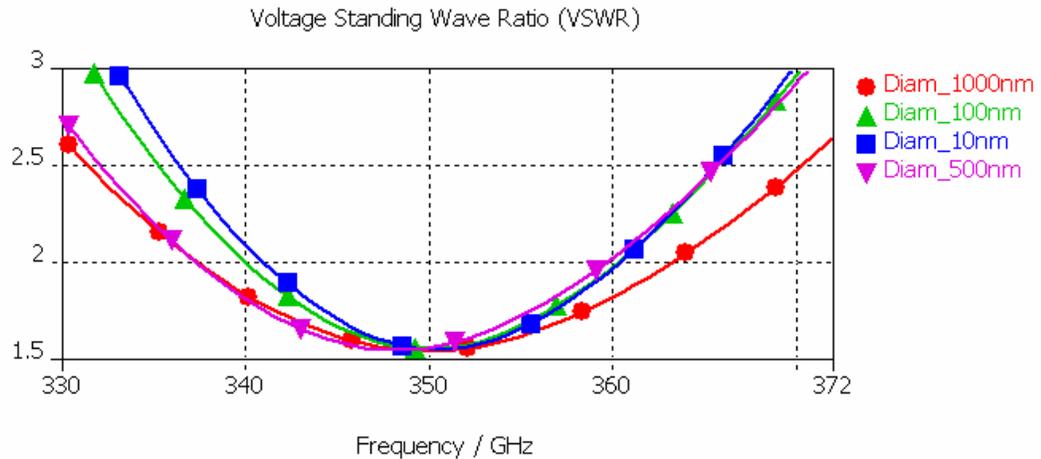


Figura VI-13: VSWR comparativa de antena dipolo vertical PEC com diferentes diâmetros.

Para o 3º grupo de simulações, foi considerada a impedância de entrada de 2350 ohms, diâmetro de antena de 100 nanômetros e o comprimento físico da antena mudou, de acordo com o material usado, de 760 a 790 micrômetros.

Ao considerar a impedância de entrada da antena dipolo como 2350 ohms, conforme [2], teve-se por objetivo melhorar o casamento de impedância da antena e foi observado que o rendimento da antena melhorou de forma significativa. A perda de retorno de todos os materiais analisados ficou abaixo de -10 dB dentro da frequência de ressonância (tabela VI.7), o que é uma sensível melhora quando comparada com os resultados obtidos com impedância de 50 ohms, onde a perda de retorno se situou em torno de -8 dB para os nanomateriais avaliados.

Tabela VI.7. Dados de parâmetros S, VSWR e largura de banda de antena dipolo vertical com $Z_0=2350$ ohms

Material	S db (perda retorno)	VSWR mínimo	Freq VSWR Mín (GHz)	<u>VSWR@350GHz</u>	Larg Banda em GHz (VSWR <2)	Larg Banda em GHz (VSWR <2,5)
PEC	-16.93	1.332	350	1.332	47.905	67.031
CNT	-14.53	1.462	352.4	1.469	46.63	67.21
Ouro (NW)	-14.28	1.479	351.4	1.483	45.61	66.594
Zinco (NW)	-13.38	1.545	349.3	1.546	42.259	63.097
Níquel (NW)	-12.96	1.58	348.6	1.583	39.891	61.202

A largura de banda com VSWR de 2 e 2,5 também teve seu índice aumentado quando se compara com os resultados obtidos na tabela VI.6 . Pode-se observar que demais parâmetros de diretividade, ganho, campo E e campo P também obtiveram resultados melhores que os anteriores.

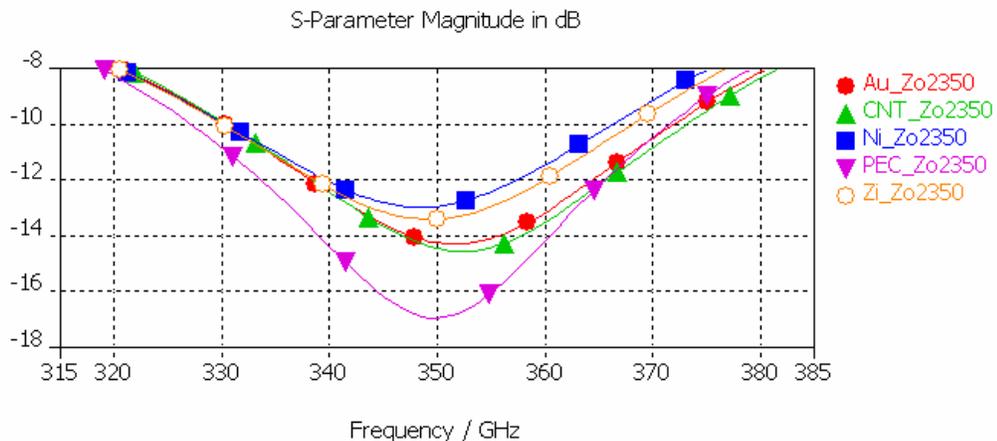


Figura VI-14: Perda de retorno comparativa de antena dipolo vertical com $Z_0 = 2350$ ohms para diferentes nanomateriais.

Para os nanomateriais, o ganho realizado saiu de uma faixa de -0,24 db a -0,60 db para impedância de entrada de $Z_0 = 50$ ohms para a casa de 2 dB. Uma análise do Campo E revela que ele saiu de um patamar de aproximadamente 12 dBV/m para 17 dBV/m em Z_0 2350 ohms. Para campo P , tal parâmetro evoluiu de cerca de -13 dBW/m² para -8 dBW/m².

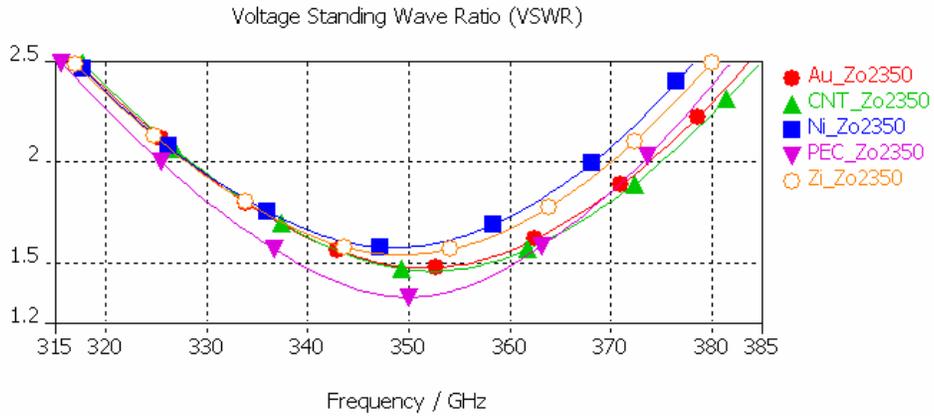


Figura VI-15: VSWR comparativa de antena dipolo vertical com $Z_o = 2350$ ohms para diferentes nanomateriais

Para que a antena fosse sintonizada em 350 GHz, foi necessário quase dobrar o comprimento físico da antena quando comparadas as dimensões originais com Z_o de 50 ohms.

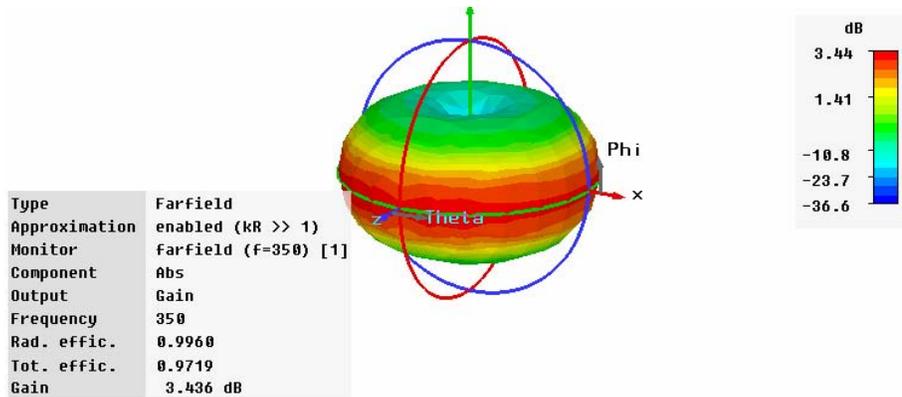


Figura VI-16: Ganho para antena dipolo vertical com PEC, diâmetro de 100 nm e $Z_o = 2350$ ohms.

Era de se esperar, de acordo com os resultados obtidos no primeiro conjunto de simulações de nanoantenas com Z_o de 50 ohms, que à medida que fossem alteradas as resistividades dos materiais empregados com Z_o de 2350 ohms, ocorresse alteração de

perda de retorno e VSWR, com melhor desempenho no PEC e pior rendimento no nanofio de níquel, o que de fato ocorreu.

Por outro lado, foi observada uma melhoria dos parâmetros de campo distante como diretividade, ganho, campo elétrico e eficiência de radiação, de modo que os materiais com maior resistividade apresentaram melhor desempenho dos parâmetros de campo distante acima citados quando comparados com os materiais de menor resistividade, conforme tabela VI-8. Isto pode ser devido a diferentes ajustes de sintonia da antena para os diversos materiais, com variação de frequência de ressonância de 348,6 GHz a 352,4 GHz.

Convém ainda ressaltar que a utilização de idêntico casamento de impedância de 2350 ohms para materiais de diferentes resistividades também pode ter contribuído para gerar valores de campo distante diferentes do esperado.

Por oportuno, uma possibilidade que se coloca é o fato de que a quantidade de células analisadas pode ter sido insuficiente para permitir a convergência de cálculos de campo eletromagnético. Uma dificuldade que se apresenta é que nenhuma demonstração experimental de nanoantenas para comunicações foi realizada para se comprovar e/ou comparar os estudos teóricos nessa área.

Tabela VI.8. Dados de parâmetros de campo distante (diretividade, ganho, ganho realizado, campo E , campo P , eficiência de radiação e eficiência total) de antena dipolo vertical com $Z_0 = 2350$ ohms.

	Diretividade (dBi)	Ganho (dB)	Ganho Realizado (dB)	Campo E (dBV/m)	Campo P (dBW/m ²)	Eficiência Radiação (%)	Eficiência Total (%)
PEC	3,453	3,436	3,33	18,1	-7,662	99,6	97,19
CNT	3,269	2,794	2,635	17,4	-8,357	89,66	86,42
Ouro (NW)	3,274	2,825	2,658	17,43	-8,334	90,17	80,77
Zinco (NW)	3,306	2,970	2,766	17,53	-8,226	92,55	88,3
Níquel (NW)	3,307	3,039	2,812	17,58	-8,180	94,02	89,23

Os resultados obtidos nas simulações para os parâmetros de perda de retorno e VSWR indicam que nanomateriais, em particular, nanotubos de carbono, têm potencial para serem empregados como antenas em enlaces de comunicações. Por outro lado, as características críticas de propagação da faixa subterahertz demandam por antenas de ganho elevado, tipicamente superior a 20 dB. Uma vez que as antenas dipolo vertical analisadas permitiram ganhos realizados na ordem de 2 dB, os resultados aqui obtidos indicam que estes dispositivos radiadores na configuração analisada não são os mais adequados para emprego em enlaces de comunicações na faixa de frequência de subterahertz.

Para que seja viável operar nesta banda de subterahertz, ou mesmo terahertz, outras configurações de antena precisam ser avaliadas de modo que seja possível obter altos ganhos. O emprego de arranjo de antenas, ou conjunto de antenas, semelhantes às citadas no início deste capítulo, tais como arranjo de antenas dipolo, pode ser um caminho a ser investigado.

Por outro lado, a utilização de nanoestruturas, ainda que a dimensão *nano* esteja limitada, ao menos inicialmente, ao diâmetro da antena, dificulta fortemente a implantação de dispositivos irradiadores nanométricos, uma vez que as geometrias envolvidas em tais arranjos são frequentemente complexas para serem trabalhadas em nanoescala.

Apesar dos feixes de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) apresentarem maior eficiência de radiação quando comparados com o uso de um único nanotubo de carbono de parede simples [48], uma dificuldade que se apresenta na parte experimental é como garantir a formação do feixe de SWCNT na geometria e dimensões desejadas para que a nanoantena opere na frequência de ressonância almejada.

Considerando que os parâmetros analisados podem ter desempenho aceitável para enlaces de comunicações nos quais os fatores impactantes tais como atenuação de vapor d'água e atenuação por absorção de oxigênio não são tão críticos, como é o caso, por exemplo, da frequência de 50 GHz, e considerando que neste comprimento de onda é viável, do ponto de vista de dimensões físicas, o emprego de nanotubos de carbono, a utilização dessas nanoestruturas como antenas surge como uma alternativa a ser estudada, particularmente para aplicações na área biomédica [67], [68], em que pese a questão da frequência de relaxação de elétrons apontada por [53].

Convém ressaltar que para validar o emprego de nanoestruturas como antenas em condições diferentes das analisadas no trabalho desenvolvido (outras frequências, dimensões, geometrias, arranjos, polarizações, dentre outras), é absolutamente necessário que mais estudos teóricos e simulações sejam realizados para isso.

Finalizando o capítulo, foram realizadas simulações de antenas dipolo vertical de um único SWCNT de diâmetro 1 nm e de feixe de SWCNT de 10 nm de diâmetro. O tempo de simulação para cada caso foi superior a uma semana de processamento e os resultados não convergiram, pois não havia quantidade de células suficientes para a convergência de cálculos do aplicativo. O número de células utilizado foi limitado pela capacidade de memória RAM da máquina na qual a simulação rodou. Devido ao alto custo computacional, novas simulações deixaram de ser realizadas.

Capítulo VII

Conclusões e considerações finais

Nessa dissertação foi analisado o emprego de nanoestruturas como antenas para a faixa de frequência de subterahertz.

Inicialmente foram estudadas as propriedades de nanotubos de carbono. Tais materiais possuem singulares propriedades estruturais, térmicas e elétricas que os tornam interessantes para emprego como antenas entre o mundo macro e nanodispositivos em faixas de frequências de GHz e THz. A distribuição de corrente elétrica no nanotubo é unidimensional, como o movimento dos elétrons ocorrendo apenas de forma axial.

Apresentando condutividade elétrica cerca de duas vezes superior à do cobre quando em nanoescala, além de resistência mecânica altíssima, nanotubos de carbono despontam como uma interessante alternativa para emprego como dispositivo radiador nesta condição.

Outros aspectos importantes de nanotubos de carbono tais como sua alta impedância de entrada, baixa eficiência de radiação e baixo ganho precisam ser endereçados para que se possa viabilizar, de fato, o seu uso como dispositivo irradiador eficiente. A utilização de feixes de nanotubos de carbono de parede simples, em que pese o fato de serem de difícil implementação para assegurar a geometria e a dimensão da antena na frequência de ressonância desejada, é uma alternativa que se apresenta para melhorar a eficiência de radiação da antena. O casamento de impedância realizado contribuiu sensivelmente para melhoria de todos os parâmetros da antena dipolo vertical avaliada. O aumento do diâmetro do condutor da antena é um recurso que pode ser usado para expandir sua largura de banda.

A miniaturização e a grande demanda de largura de banda são questões atuais que tendem a ter um lugar de destaque cada vez maior quando se trata de comunicações sem fio. Desde que foram criados os primeiros dispositivos eletrônicos, tem ocorrido forte redução de suas dimensões físicas e a aumentada a necessidade de comunicações com velocidades de transmissão cada vez mais rápidas. Nesse contexto, emprego de comunicações em banda ultra larga em terahertz para redes WLAN/WPAN, resguardadas

as condições operacionais necessárias, surge como uma interessante proposta que permitirá tráfego de dados sem fio em largura de banda superior a 100 GHz.

Comunicações em terahertz apresentam características de propagação bem singulares. Ao mesmo tempo em que oferecem a vantagem de permitir maiores velocidades de transmissão de dados, enlaces nesta faixa de frequência estão sujeitos a atenuações significativas devido a perdas de espaço livre, absorção molecular devido a vapor d'água e oxigênio, e espalhamento por hidrometeoros, dentre outros. Dessa forma, a viabilidade do emprego de comunicações nessa faixa de frequência está fortemente ligada à escolha de janelas de frequências adequadas, necessariamente em ambientes *indoor* (fechados) a curtas distâncias e o emprego de técnicas de aumento de cobertura por reflexões sucessivas para melhorar a confiabilidade do enlace.

Os resultados obtidos permitiram observar que a resistividade dos nanomateriais empregados, mantida a geometria e as dimensões dos dispositivos radiadores, influenciou a frequência de ressonância das antenas avaliadas, bem como os parâmetros de perda de retorno e VSWR.

Por outro lado, parâmetros de campo distante tais como diretividade, ganho, campo elétrico e diagrama de potência não tiveram alterações dignas de nota ao se considerar as diferentes resistividades envolvidas.

Em função do desempenho apresentado pelas configurações de nanoantenas estudadas, percebe-se que para o emprego em redes WLAN/WPAN, a largura de banda e as distâncias envolvidas, necessariamente em ambiente *indoor*, devido as fortes restrições de propagação das faixas de frequências em subTHz analisadas, terão que ser reavaliadas.

Convém ressaltar que os parâmetros analisados, após o casamento de impedância, têm desempenho potencialmente aceitável para condições de propagação de enlaces de comunicações nos quais os fatores tais como atenuação de vapor d'água e atenuação por absorção de oxigênio não apresentam a criticidade da faixa de terahertz estudada. Para que essa hipótese seja confirmada, novos estudos deverão ser conduzidos.

Digno de nota é o fato de que o emprego de nanotubos de carbono como dispositivos radiadores, além das considerações anteriormente levantadas em relação às suas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, passa necessariamente pela avaliação consistente das condições de propagação da faixa de frequência desejada, tendo sido este trabalho, até onde foi possível pesquisar, pioneiro na análise de emprego de nanoantenas em conjunto com condições de propagação.

Dessa forma, abre-se a possibilidade de análise do emprego de nanotubos de carbono como antenas na faixa de frequência de poucos gigahertz, uma vez que é viável a obtenção de nanotubos de carbono na escala centimétrica.

Como perspectivas para trabalhos futuros, é proposta a realização de outras simulações com diferentes configurações de antenas, particularmente arranjos de antenas que possibilitem maiores ganhos e que apresentem geometria não muito complexa, como por exemplo antenas log-periódicas, visando prosseguir nos estudos para viabilizar o emprego de nanoantenas em diversas faixas de frequência.

Ainda para trabalhos futuros, uma possível aplicação de nanoantena seria para viabilizar a comunicação sem fio por intermédio de sensores biológicos de dimensões nanométricas inseridos em organismos vivos.

Uma vez que nenhuma demonstração experimental de nanoantenas para comunicações jamais foi realizada para se comprovar e/ou comparar os estudos teóricos nessa área, as simulações conduzidas neste trabalho serão confrontadas com experiências práticas oportunamente.

Referências Bibliográficas

- [1] A. T. Wolde, “Nanotechnology: Towards a molecular construction kit, The Netherlands Study Centre for Technology Trends, The Hague, The Netherlands (1998).
- [2] S. Demoustier, E. Minoux M. L. Baillif, M. Charles and A. Ziaei, C. R. Physique, 9, 53-66 (2008).
- [3] R. Piesiewicz, T. K. Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebel and T. Kurner, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No 6, (2007).
- [4] D. Minoli, “Nanotechnology applications to telecommunications and networking”, J. Wiley and Sons, (2006).
- [5] E. Giannelis, “Discovering materials science and engineering”, Department of materials science and engineering, Cornell University, Ithaca, NY, www.mse.cornell.edu (2002).
- [6] D. Leff, “The truth about nanotechnology, ZDNet Austrália, www.zdnet.com.au, Dec. 6, (2002).
- [7] Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa, online, (2008).
- [8] L. Novotny, B. Hecht, Principles of Nano-optics, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- [9] J. Hao and G. H. Hanson, “Infrared and optical properties of carbon nanotube dipole antennas”, IEEE Trans. Nanotechnol., vol 5, nr 6, pp 766-744, (Nov 2006).
- [10] S. Li, Z. Yu, S. F. Yen, W. C. Tang, and P. J. Burke, “Carbon nanotube transistor operation at 2.6 GHz”, Nano Lett, vol. 4, pp. 753-756, (2004).
- [11] J. P. Clifford, D. L. John, L. C. Castro, and D. L. Pulfrey, “Electrostatics of partially gated carbon nanotube FETs”, IEEE Trans. Nanotechnol., vol. 3, pp. 281-286, (2004).
- [12] K. G. Ong, K. Zeng, and C. A. Grimes, “A wireless, passive, carbon nanotube-based gas sensor”, IEEE Sensors J., vol.2, pp. 82-88, (2002).
- [13] P. Kim and C. M. Lieber, “Nanotube nanotweezers”, Science, vol. 286, pp. 2148-2150, (1999).
- [14] G. Pirio, P. Legagneux, D. Pribat, K. B. K. Teo, M. Chhowalla, G.A. J. Amaratunga, and W. I. Milne, “Fabrication and electrical characteristics of carbon nanotube field emission microcathodes with an integrated gate electrode”, Nanotechnology, vol. 13, pp.1-4, (2001).

- [15] Y. Chem, D. T. Shaw, X. D. Bai, E. G. Wang, C. Lund, W. M. Lu, D. D. L. Chung, *Appl. Phys. Letters*, 78, 2128, (2001).
- [16] A. C. Dillon, M. J. Heben, *Appl. Phys. A* 72, 133, (2001).
- [17] C. Niu, E. K. Sickel, R. Hoch, H. Tennent, *Appl. Phys. Lett.* 70, 1480, (1997).
- [18] P. Klim, c. M. Lieber, *Science* 286, 2148, (1999).
- [19] J. H. Hafner, C. L. Cheung, C. M. Lieber, *Nature* 398, 761, (1999).
- [20] P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami, A. Zettl, *Science* 287, 1801, (2000).
- [21] A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi, C. Dekker, *Science* 294, 1317, (2001).
- [22] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R.F. Curl, R. E. Smalley, *Nature* 318, 162 (1985).
- [23] Wikipedia, fonte Michael Ströck usando iMol for Mac OS X and Photoshop, liberado por meio de GFDL-GNU Free Documentation License.
- [24] C. Lee, X. Wei, J. Kysar, J. Hone, *Science*, Vol. 321, 385-388 (Jul 2008).
- [25] J. S. Batista, Dissertação de Mestrado, “Modelos morfológicos e estruturais de fragmentos de nanotubos de carbono dopados com átomos de boro ou nitrogênio”, Universidade Estadual de Campinas (2007).
- [26] P. Schewe, B. Stein, *American Institute of Physics*, (Abr 2006).
- [27] S. Iijima, *Nature* 354, 56 (1991).
- [28] S. Li, Z. Yu, C. Retherlang, and P. J. Burke, “Electrical properties of 0.4 cm long single-walled carbon nanotubes”, *Nano Lett.*, vol. 4, pp. 2003-2007, (2004)
- [29] P. J. Harris, *Carbon Nanotubes and Related Structures*, Cambridge Press, Cambridge, London (1999).
- [30] M. J. Bronikowski, P. A. Willis, D. T. Colbert, K. A. Smith, R. E. Smalley, *J Vac Sci Technol A* 19, 1800 (2001).
- [31] H. Dai, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert, R. E. Smalley, *Chem Phys Lett* 260, 471 (1996).
- [32] E. Flahaut, A. Peigney, C. Laurent, A. Rousset, *J Matter Chem* 10, 249 (2000).
- [33] T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert, R. E. Smalley, *Chem Phys Lett* 243, 49 (1995).

- [34] C. Journet, P. Bernier, *Appl. Phys. A* 67, 1 (1998).
- [35] T. W. Ebbesen, P. M. Ajayan, *Nature*, 358, 220 (1992).
- [36] A. Thess et. al. *Science* 273, 483 (1996).
- [37] M. Paradise and T. Goswami, *Materials&Design*, 28, 5, 1477 (2007).
- [38] F. Arai, C. Ng, P. Liu, L. Dong, Y. Imaizumi, K. Maeda, H. Maruyama, A. Ichikawa, T. Fukuda, Ultra-small site temperature sensing by carbon nanotube thermal probes, 4th IEEE Conference on Nanotechnology, 2004.
- [39] K. Zhang, M. M. F. Yuen, N. Wang, J. Y. Miao, D. G. W. Xiao, H. B. Fan, Thermal interface material with aligned CNT and its application in HB-LED packaging, *Electronic Components and Technology Conference, 2006, Proceedings, 56th, 30May-2June 2006*, pp. 177-182.
- [40] E. Pop, S. Sinha, K. E. Goodson, Heat generation and transport in nanometer-scale transistor, *Proc IEEE* 94 (8) 2006, 1587-1601.
- [41] P.J. Burke, S. Li, Z. Yu, Quantitative theory of nanowire and nanotube antenna performance, *IEEE T. Nanotechnology* 5 (4) (July 2006).
- [42] P.J. Burke, An RF circuit model for carbon nanotubes, *IEEE T. Nanotechnologies* 2 (1) (Jan 2003) 55-58; with erratum in *IEEE T. Nanotechnologies* 3 (2) (Mar 2004) 331.
- [43] P. J. Burke, Luttinger liquid theory as a model of the gigahertz electrical properties of carbon nanotubes, *IEEE T. Nanotechnologies* 1 (3) (May 2002) 129 –144; with erratum in *IEEE T. Nanotechnologies* 3 (2) (March 2004) 331.
- [44] D. K. Ferry, S. M. Goodnick, *Transport in nanostructures*, cambridge University Press, Cambridge, UK 1999.
- [45] J. Bernhole, D. Brenner, M. Buongiorno Nardelli, V. Meunier, C. Roland, Mechanical and electrical properties of nanotubes, *Annu. Rev. Mater. Res.* 32 (2002) 347-375.
- [46] A. Naeemi, G. Huang, J.D. Meindl, Performance modelling for carbon nanotube interconnects in on-chip power distribution, in: “*Electronic Component and Technology Conference, 2007, ECTC’07 Proceedings, 57th, May 29 2007*”, pp. 420-428.
- [47] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P. Avouris, Eds., *Topics in Applied Physics. Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications*. New York: Springer 2000.

- [48] Y. Huang, W. Y. Yin, Q. H. Liu, "Performance prediction of carbon nanotube bundle dipole antennas", *IEEE Trans. Nanotechnol.*, vol. 7, no 3, (May 2008).
- [49] J. J. Plombom, K. P. O'Brien, F. Gstreim, V. M. Dubin, and Y. Jiao, "High-frequency electrical properties of individual and bundled carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 6, pp 063106-1-063106-3 (2007).
- [50] G. Ya. Slepian, M. V. Shuba, and S. A. Maksimenko, "Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas", *Phys. Rev. B*, vol. 73, pp. 195416-11 (May 2006).
- [51] P. J. Burke, Z. Yu, C. Rutherglen, Carbon nanotubes for RF and microwaves, in: 13th GAAS® Symposium – Paris 2005.
- [52] G.W. Hanson, Fundamental transmitting properties of carbon nanotube antennas, *IEEE T. Antennas Propagation* 53 (11) (November 2005).
- [53] G.Y. Slepian, S.A. Makismenko, Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions and surface wave propagation, *Phys. Rev. B* 2 (1) (15 December 1999).
- [54] T. Taminiau, F. Stefani, F. Segerink, and N. Van Hulst, "Optical antennas direct single-molecule emission", *Nature Photonics*, vol. 2, (April 2008).
- [55] S. Cherry, "Edholm's Law of Bandwidth", *IEEE Spectrum*, Vol. 41, no. 7, July 2004, p. 50.
- [56] S. Roy, J. R. Foester, V. S. Somayazulu, and D. G. Leeper, "Ultrawideband Radio Design: the promise of high Speed, Short Range Wireless Connectivity", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, no. 2, February 2004, pp. 295-311.
- [57] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Edition, New York, John Wiley & Sons, 2005.
- [58] Martin Koch, presentation "Towards terahertz communication systems", Technische Universität Braunschweig Germany, (2007).
- [59] A. Nieuwoudt, Y. Massoud, "On the optimal design, performance, and reliability of future carbon nanotube-based interconnect solutions", *IEEE Transactions on Electrical Devices*, vol. 55, nr 8, August 2008.
- [60] A. S. Walton et al, "Four-probe electrical transport measurements on individual metallic nanowires", Institute of Physics Publishing, *Nanotechnology*, 18, 2007.
- [61] M. Amin, R. Cahill and V. Fusco, "Mechanically tunable multiband compact quadrifilar helix antenna with dual mode operation", *IEEE Transactions and Antenna Propagation*, vol. 56, no. 6, (June 2008).

- [62] J. Colburn, J. J. Lynch, A. Obatoyinbo, and T. Talty, "Spirapole antenna for communications systems utilizing both satellite and terrestrial assets", *IEEE Transactions and Antenna Propagation*, vol. 53, no. 2, (Feb 2005).
- [63] V. Fusco and R. Cahill, "Quadrifilar loop antenna", *IEEE Transactions and Antenna Propagation*, vol. 51, no. 1, (Jan 2003).
- [64] H. Saijo, M. Morimoto, T. Kiwa, M. Tonouchi, "terahertz emission properties from YBCO thin film log-periodic antennas", *Physica C*, 362, 319-323, (2001).
- [65] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, second ed., John Wiley&Sons, 1997.
- [66] A. Naeemi and J. D. Meindl, "Design and performance modeling for single-wall carbon nanotubes as local, semiglobal, and global interconnects in gigascale integrate systems", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 54, no. 1, pp.26-37, Jan 2007.
- [67] S. K. Smart, A. I. Cassady, G. Q. Lu, D. j. Martim, *Carbon* 44, 1034 (2006).
- [68] P. W. Barone, S. Baik, D. A. Heller, M. S. Strano, *Nature Materials* 4, 86 (2005).
- [69] M. P. M. Hall and L. W. Barclay, *Radiowave Propagation*, London, Peter Peregrinus Ltd., (1989).