

Técnicas de Processamento de Sinais e Telecomunicações

**Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)**

Henrique Ajuz Holzmann

(Organizador)

Técnicas de Processamento de Sinais e Telecomunicações

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Karine de Lima
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
T255	Técnicas de processamento de sinais e telecomunicações [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-449-8 DOI 10.22533/at.ed.498190807 1. Tecnologia da informação. 2. Telecomunicações. I. Holzmann, Henrique Ajuz. CDD 338.47
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra Técnicas de Processamento de Sinais e Telecomunicações está organizada de maneira a atender a temas atuais sobre a área de telecom e processamento de sinais de maneira sucinta e otimizada, sendo dividido em 17 capítulos sequenciais.

A transmissão de dados juntamente com suas vertentes representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade, estando presente nos mais diversos setores. Desenvolve-la de maneira eficiente é uma busca constante de grandes empresas e pesquisadores, buscando otimizar e agilizar o processo de troca de informações.

Produzir conhecimento nestas áreas é de extrema importância, a fim de gerar desenvolvimento e ampliar possibilidades nos mais diversos campos. Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre temas referentes a comunicação e processamento de sinais em diferentes níveis de profundidade em pesquisas, envolvendo aspectos técnicos, científicos e humanos é trazido nesta obra.

Boa leitura!

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR PARA APLICAÇÃO EM 2,5 GHZ UTILIZANDO SUBSTRATO METAMATERIAL	
Almir Souza e Silva Neto Bruno Pontes Alves da Silva Matheus Mesquita Correa Humberto César Chaves Fernandes Ronilson Mendes Fonseca	
DOI 10.22533/at.ed.4981908071	
CAPÍTULO 2	7
BANDWIDTH ENHANCEMENT OF AN ULTRA WIDE BAND PLANAR INVERTED F-ANTENNA	
Pedro Paulo Ferreira do Nascimento Glauco Fontgalland Raymundo de Amorim Júnior Tagleorge Marques Silveira Rodrigo César Fonseca da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.4981908072	
CAPÍTULO 3	14
COMPORTAMENTO DE MODELOS DE DIFRAÇÃO SOBRE MÚLTIPLOS GUMES DE FACA EM VHF E UHF	
Lorenço Santos Vasconcelos Gilberto Arantes Carrijo	
DOI 10.22533/at.ed.4981908073	
CAPÍTULO 4	27
ON-CHIP KOCH FRACTAL ANTENNA ARRAY FOR 60 GHZ ISM BAND APPLICATION	
Paulo Fernandes da Silva Júnior Ewaldo Eder Carvalho Santana Mauro Sérgio Pinto Filho Almir Souza e Silva Neto Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira Paulo Henrique da Fonseca Silva Alexandre Jean René Serres Raimundo Carlos Silvério Freire	
DOI 10.22533/at.ed.4981908074	
CAPÍTULO 5	36
PROJETO E ANÁLISE DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS UTILIZANDO A CURVA FRACTAL DE KOCH	
Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira Pedro Carlos de Assis Júnior Marcelo da Silva Vieira Rodrigo César Fonseca da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.4981908075	

CAPÍTULO 6	48
FINDING REPEATER PLACEMENT FOR P2P WIRELESS LINKS WITH NLOS IN EXTREMELY MOUNTAINOUS REGIONS	
Alvaro Javier Ortega	
DOI 10.22533/at.ed.4981908076	
CAPÍTULO 7	60
NOVA ARQUITETURA DE DEMODULADOR $\pi/3$ -BPSK PARA OS SATÉLITES DO SISTEMA BRASILEIRO DE COLETA DE DADOS	
Flavia Vasconcelos Maia	
Antonio Macilio Pereira de Lucena	
Francisco de Assis Tavares Ferreira da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.4981908077	
CAPÍTULO 8	73
PROPOSTA DE UM NOVO ALGORITMO QOS-AWARE PARA O ESCALONAMENTO <i>DOWNLINK</i> LTE-A EM CENÁRIOS DE TRÁFEGO MISTO: UMA COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO	
Júnio Moreira	
Éderson Rosa da Silva	
Paulo Roberto Guardieiro	
DOI 10.22533/at.ed.4981908078	
CAPÍTULO 9	85
SERVIÇO DE L2VPN EM REDES DE <i>BACKBONE</i> IP: ESTUDO DE CASO DA REDECOMEP-RIO	
Pedro Henrique Diniz da Silva	
Natália Castro Fernandes	
Nilton Alves Jr.	
Márcio Portes de Albuquerque	
DOI 10.22533/at.ed.4981908079	
CAPÍTULO 10	101
SISTEMA DISTRIBUÍDO PARA DETECÇÃO DE AMEAÇAS EM REDES UTILIZANDO <i>DEEP LEARNING</i>	
Fábio César Schuartz	
Mauro Sérgio Pereira Fonseca	
Anelise Munaretto	
DOI 10.22533/at.ed.49819080710	
CAPÍTULO 11	113
UM MÓDULO DE DEFESA PARA ATAQUES DDOS NA CAMADA DE APLICAÇÃO USANDO ESTRATÉGIAS SELETIVAS	
Túlio Albuquerque Pascoal	
João Henrique Gonçalves Corrêa	
Vivek Nigam	
Iguatemi Eduardo da Fonseca	
DOI 10.22533/at.ed.49819080711	

CAPÍTULO 12	125
AN EMPIRICAL RATE BALANCED ALIEN XTALK MITIGATION METHOD FOR G.FAST SYSTEMS	
Diego de Azevedo Gomes	
Cláudio de Castro Coutinho Filho	
João Victor Costa Carmona	
Evaldo Gonçalves Pelaes	
DOI 10.22533/at.ed.49819080712	
CAPÍTULO 13	135
REPRESENTAÇÃO ESPARSA UTILIZANDO WAVELETS E VARIAÇÃO TOTAL APLICADOS AO PROCESSAMENTO DE SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS	
Paulo Vitor do Carmo Batista	
Hilton de Oliveira Mota	
DOI 10.22533/at.ed.49819080713	
CAPÍTULO 14	152
REDUÇÃO DE DIMENSÕES USANDO TRANSFORMADA DE KARHUNEN-LOÈVE EM SISTEMAS MIMO MASSIVO DISTRIBUÍDO COM <i>FRONTHAUL</i> LIMITADO	
Ricardo de Souza Cerqueira	
André Noll Barreto	
DOI 10.22533/at.ed.49819080714	
CAPÍTULO 15	167
WSN COVERAGE IMPROVEMENT WITH ROF IN BUS TOPOLOGY FOR SMART CITIES	
Raphael Montali da Assumpção	
Indayara Bertoldi Martins	
Frank Herman Behrens	
Omar Carvalho Branquinho	
Fabiano Fruett	
DOI 10.22533/at.ed.49819080715	
CAPÍTULO 16	179
MODELO ELETROMAGNÉTICO DE UM ARRANJO PLANAR DE NANODIPOLOS SOBRE PLANO DE OURO ATRAVÉS DA FUNÇÃO DE GREEN 3D	
André Felipe Souza da Cruz	
Nadson Welkson Pereira de Souza	
Karlo Queiroz da Costa	
DOI 10.22533/at.ed.49819080716	
CAPÍTULO 17	194
AVALIAÇÃO DE FADIGA MUSCULAR LOCALIZADA EM SINAIS ELETROMIOGRÁFICOS UTILIZANDO TAXA DE AMOSTRAGEM VARIÁVEL NO TEMPO	
Jean Kevyn Correia Pessoa	
Pedro Henrique Melgaço de Oliveira Martins	
Thiago Raposo Milhomem de Carvalho	
DOI 10.22533/at.ed.49819080717	
SOBRE O ORGANIZADOR	207

MODELO ELETROMAGNÉTICO DE UM ARRANJO PLANAR DE NANODIPOLOS SOBRE PLANO DE OURO ATRAVÉS DA FUNÇÃO DE GREEN 3D

André Felipe Souza da Cruz

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Eng.
Elétrica.
Tucuruí – Pará

Nadson Welkson Pereira de Souza

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará,
Faculdade de Eng. Elétrica.
Marabá – Pará

Karlo Queiroz da Costa

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Eng.
Elétrica.
Tucuruí – Pará

RESUMO: Neste trabalho é apresentado a modelagem eletromagnética tridimensional de um arranjo periódico planar de nanodipolos operando em frequência óptica sobre um plano de ouro. Os campos eletromagnéticos foram determinados através do método do potencial magnético, definido por meio da Função de Green Periódica (PGF). Foram realizadas análises paramétricas de campo próximo e distante, e análises dos coeficientes de reflexão e transmissão. A concentração de luz sobre o plano de ouro devido à ressonância plasmônica superficial é observada. Para verificar a convergência do método, foram gerados resultados gráficos da convergência de Cauchy das séries da PGF cossenoidal. Os resultados apontam que as condições físicas de contorno

são atendidas, tanto de campo próximo quanto campo distante, demonstrando que o modelo matemático obtido pode ser utilizado como ferramenta na análise e desenvolvimento de dispositivos fotônicos de sensoriamento e comunicação.

PALAVRAS-CHAVE: Arranjo planar, Função de Green Periódica, Campos Próximo e Distante, Método Analítico.

ABSTRACT: In this work is presented the three - dimensional electromagnetic modeling of a planar periodic array of nanodipoles operating at optical frequency upon a gold plane. The electromagnetic fields were determined by the magnetic potential method, defined by the Periodic Green's Function (PGF). Parametric analyzes of the near and far field were performed, as well analysis of the reflection and transmission coefficients. The concentration of light on the gold layer due to the surface plasmon resonance is observed. To verify the method convergence, graphical results of the Cauchy convergence of the cosine PGF series were generated. The results show that the physical boundary conditions are met, both in the near and far field, demonstrating that the obtained mathematical model can be used as a tool in the analysis and development of photonic devices for sensing and communication.

KEYWORDS: Planar Array, Periodic Green's

1 | INTRODUÇÃO

Nanoantenas, também conhecidas como antenas ópticas, são estruturas metálicas com dimensões de poucos nanômetros, capazes de transmitir, receber, confinar e amplificar a luz (POHL et al., 2013; SANTOS, 2012). Estas características possibilitam o controle e a modulação da luz, desempenhando assim, o papel principal em muitas aplicações, tais como em sensores (RODRÍGUES et al., 2011), microscopia óptica de alta resolução (SQALLI et al., 2002), controle e diretividade da luz (AHMEDI et al., 2010), entre outras.

Nanopartículas, com dimensões menores que o comprimento de onda de excitação, podem ser equivalentemente modeladas por nanoantenas do tipo dipolo (nanodipolos) ou por correntes elementares (HOFMANN et al., 2007). Dessa forma, os efeitos do acoplamento óptico de um arranjo de nanopartículas, sobre um substrato e suas interações de campo próximo e distante, podem ser descritas através da solução de um arranjo de nanodipolos (TAJDINI & MOSALLAEIL, 2011; BOHREN & HUFFMAN, 1983).

Especial atenção tem sido dada a nanopartículas posicionadas sobre metais nobres (ouro e prata) (COSTA et al., 2015; RASHIDI & MOSALLAEIL, 2010), pois, quando excitadas, sua re-irradiação pode provocar ondas plasmônicas de superfície na interface metálica que, por sua vez, alteram características de concentração e emissão de luz do conjunto (AHMEDI et al., 2010; SOUZA et al., 2017). Diante disto, diferentes arranjos periódicos de nanoantenas têm sido propostos (ROSTAMI et al., 2013; RASHIDI et al., 2013). A análise e designer destas estruturas são, em geral, realizados através de métodos numéricos, tais como Método dos Elementos Finitos (FEM) e Método dos Momentos (MOM), entretanto, a representação de arranjos de nanoantenas pode demandar elevado custo e tempo computacional. Contudo, métodos analíticos baseados em Funções de Green Periódicas (PGF) no domínio espectral são propostos, viabilizando a modelagem eletromagnética (CRUZ et al., 2018; DUDLEY, 1994).

Neste trabalho, é apresentado o estudo analítico *full-wave* tridimensional de um arranjo planar periódico de nanodipolos hertzianos sobre um plano metálico de ouro. Os campos eletromagnéticos foram definidos através do método do potencial magnético, determinado através da solução da equação de Helmholtz, para isso, utilizou-se o método da transformada série complexa de Fourier, com condições periódicas na coordenada xy , e o método da função de Green na coordenada z . Foram realizadas análises de campo próximo e distante para um comprimento de onda 632.8nm, e análises espectrais dos coeficientes de reflexão e transmissão TE e TM. Através da identidade de Euler, os somatórios nas séries complexas foram alterados para reduzir o custo computacional das simulações, e por fim, verificou-se a convergência de

Cauchy destas séries.

2 | MODELAGEM ANALÍTICA

2.1 Descrição Teórica e Modelagem da Estrutura

A estrutura em análise é definida por um arranjo periódico de nanodipolos hertzianos sobre uma camada de ouro infinita, conforme Fig. 1:

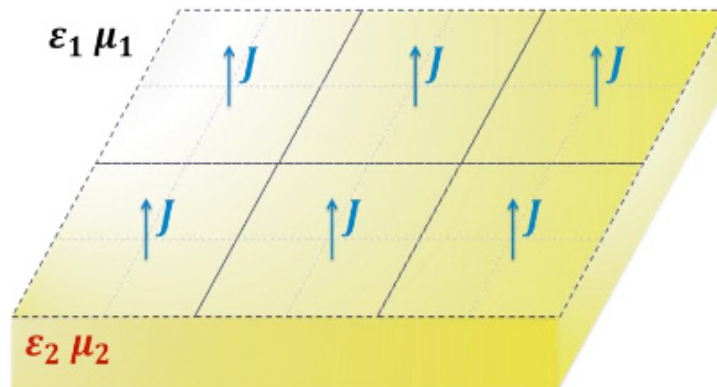


Figura 1 - Arranjo periódico de nanodipolos sobre camada de ouro.

Consideram-se nanodipolos com comprimento $l \ll \lambda/50$ localizados a uma altura h da interface d , representados por correntes concentradas \mathbf{j} , com momentos de corrente orientados na direção $\hat{\mathbf{a}}_r$ pelos ângulos fixos θ' e ϕ' :

$$\mathbf{J}(\theta', \phi') = I_0 l \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') [\cos \phi' \sin \theta' \hat{\mathbf{a}}_x + \sin \phi' \sin \theta' \hat{\mathbf{a}}_y + \cos \theta' \hat{\mathbf{a}}_z] \quad (1)$$

onde $\mathbf{r} = (x, y, z)$ e $\mathbf{r}' = (0, 0, h)$. Como a estrutura possui periodicidade bidimensional ao longo do plano xy , podemos realizar a análise de campo através de uma célula com largura $2a$ em x e $2b$ em y (Fig. 2a). Neste trabalho ambos os meios são considerados não magnéticos, sendo o meio 1 (ϵ_1, μ_1) , $Z > d$, o espaço livre, e o meio 2 (ϵ_2, μ_2) , $z < d$, caracterizado pela permissividade relativa complexa do ouro que, no espectro óptico, é descrita pelo modelo de Lorentz-Drude com excelente precisão (SOUZA et al., 2017).

A região de análise é delimitada por dois volumes V_1 e V_2 , meio 1 e meio 2, respectivamente, encerrados pelas superfícies fechadas $S_1 = S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14} + S_{15} + S_{16}$ e $S_2 = S_{21} + S_{22} + S_{23} + S_{24} + S_{25} + S_{26}$, conforme Fig. 2b.

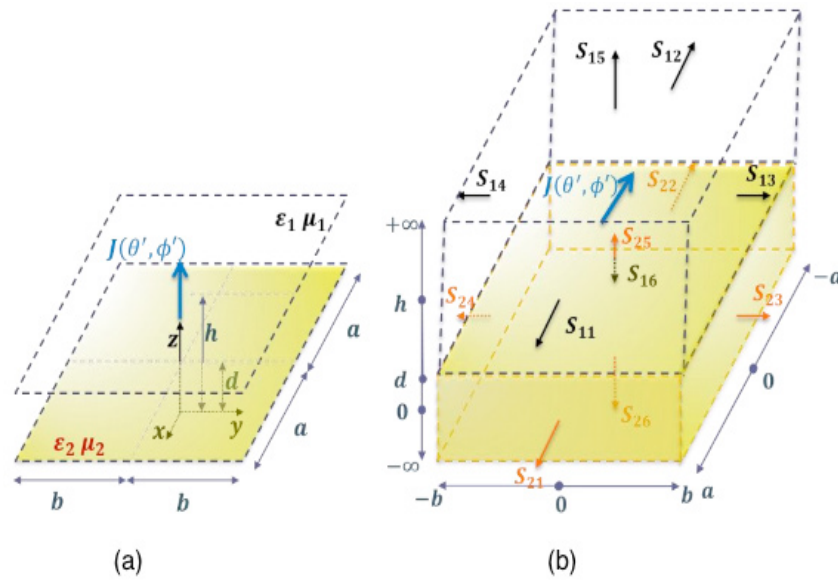


Figura 2 - (a) Célula de análise. (b) Regiões de análise V1 e V2.

Para determinar analiticamente os campos elétrico e magnético, primeiramente foi definido o potencial magnético em ambos os meios através da solução da equação diferencial vetorial de Helmholtz, não homogênea no meio 1, e homogênea no meio 2 (DUDLEY, 1994):

$$\begin{aligned}\nabla^2 \mathbf{A}_1 + k_1^2 \mathbf{A}_1 &= -\mu_1 \mathbf{J} \\ \nabla^2 \mathbf{A}_2 + k_2^2 \mathbf{A}_2 &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

Note que o campo potencial nas superfícies $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}$ deve atender as condições periódicas em (3), e em regiões distantes da fonte, como nas superfícies S_{15} e S_{26} , o campo potencial deve atender as condições de limite em (4), ou seja, serem nulos no infinito.

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_1(a, y, z)|_{S_{11}} &= \mathbf{A}_1(-a, y, z)|_{S_{12}}, & \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{A}_1(a, y, z)|_{S_{11}} &= \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{A}_1(-a, y, z)|_{S_{12}} \\ \mathbf{A}_1(x, b, z)|_{S_{13}} &= \mathbf{A}_1(x, -b, z)|_{S_{14}}, & \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{A}_1(x, b, z)|_{S_{13}} &= \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{A}_1(x, -b, z)|_{S_{14}} \\ \mathbf{A}_2(a, y, z)|_{S_{21}} &= \mathbf{A}_2(-a, y, z)|_{S_{22}}, & \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{A}_2(a, y, z)|_{S_{21}} &= \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{A}_2(-a, y, z)|_{S_{22}} \\ \mathbf{A}_2(x, b, z)|_{S_{23}} &= \mathbf{A}_2(x, -b, z)|_{S_{24}}, & \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{A}_2(x, b, z)|_{S_{23}} &= \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{A}_2(x, -b, z)|_{S_{24}}\end{aligned}\quad (3)$$

$$\lim_{z \rightarrow +\infty} \mathbf{A}_1(x, y, z)|_{S_{15}} = 0, \quad \lim_{z \rightarrow -\infty} \mathbf{A}_2(x, y, z)|_{S_{26}} = 0\quad (4)$$

Na interface $z=d$ formada pelas superfícies S_{16} e S_{25} , o campo potencial deve atender (5) para que sejam obedecidas às condições de continuidade dos campos EM tangenciais e fluxos EM normais.

$$\begin{aligned}
A_{x_2,y_2}|_{z=d} = A_{x_1,y_1}|_{z=d} \quad , \quad \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial}{\partial z} A_{x_2,y_2} \Big|_{z=d} = \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial}{\partial z} A_{x_1,y_1} \Big|_{z=d} \\
\frac{1}{\mu_2} A_{z_2} \Big|_{z=d} = \frac{1}{\mu_1} A_{z_1} \Big|_{z=d} \quad , \quad \frac{1}{\varepsilon_2 \mu_2} \nabla \cdot \mathbf{A}_2 \Big|_{z=d} = \frac{1}{\varepsilon_1 \mu_1} \nabla \cdot \mathbf{A}_1 \Big|_{z=d}
\end{aligned} \tag{5}$$

Cada equação em (2) produz três equações diferenciais escalares com a mesma estrutura e condições de contorno idênticas, com exceção das condições na interface $z=d$, dito isso, primeiramente determinou-se a solução para uma componente genérica A_v excitada pela fonte genérica $J_v = I_0 l f_v(\theta', \phi')$, e posteriormente o resultado foi estendido para as componentes A_x, A_y e A_z , no meio 1 e 2.

2.2 Tensores de Campo Através do Método PGF

Este tópico apresenta os principais passos do formalismo utilizado na obtenção das soluções de (2), com condições (3) - (5). As equações diferenciais genéricas de A_v foram determinadas com o auxílio da Função de Green Periódica (PGF), com condições de Neumann e Limite em z , e condições periódicas em xy , todas condições homogêneas e derivadas a partir das condições de contorno dos problemas em A_v (DUDLEY, 1994). O método baseia-se em utilizar a transformada dupla série complexa de Fourier para levar o problema tridimensional espacial ao domínio espectral discreto m e n , retirando a dependência espacial de xy , e então resolvendo o problema unidimensional na variável z com constante de propagação k_{zu} (6), com $Im\{k_{zu}\} < 0$, nos meios 1 e 2.

$$k_{z1} = \sqrt{k_1^2 - \left[\frac{m\pi}{a}\right]^2 - \left[\frac{n\pi}{b}\right]^2} \tag{6}$$

Através da transformada inversa dupla série complexa de Fourier (DUDLEY, 1994) obtém-se a PGF no domínio espacial xyz (7), em que os indices 1 e 2 indicam o meio de análise.

$$g^{1,2}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_{mn}^{1,2}(z, z') \bar{u}_m(x') \bar{u}_n(y') u_m(x) u_n(y) \tag{7}$$

$$u_m(x) = (2a)^{-1/2} e^{j\frac{m\pi}{a}x} \tag{8}$$

$$u_n(y) = (2b)^{-1/2} e^{j\frac{n\pi}{b}y} \tag{9}$$

onde $u_m(x)$ e $u_n(y)$ são as autofunções próprias do problema periódico em x e y , com autovalores $k_x = m\pi/a$ e $k_y = n\pi/b$. No domínio espectral mn as funções de

Green unidimensionais em z no meio 1 e 2 são, respectivamente:

$$g_{mn}^1(z, z') = \frac{1}{2jk_{z1}} [e^{-jk_{z1}|z-z'|} + e^{-jk_{z1}(z+z'-2d)}] \quad (10)$$

$$g_{mn}^2(z, z') = \frac{1}{2jk_{z2}} [e^{-jk_{z2}|z'-z'|} + e^{jk_{z2}(z+z'-2d)}] \quad (11)$$

Aplicando a identidade de Green ao produto interno entre a equação diferencial escalar de Helmholtz, na componente genérica A_v , e a função de Green (7) nos meios $u=1$ e 2 :

$$\langle -(\nabla^2 + k_u^2)A_{vu} | g^u \rangle = \langle A_{vu} | -(\nabla^2 + k_u^2)g^u \rangle + \mathcal{J}(A_{vu}, g^u)|_{S_u} \quad (12)$$

O operador $-\nabla^2$, para condições de contorno periódicas, Neumann e limite, possui propriedades do operador auto-adjunto (DUDLEY, 1994). Assim, a solução para as componentes genéricas do campo potencial magnético no meio 1 e 2 são obtidas por:

$$A_{v1}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_1}{j8ab} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ I_0 I_f(\theta', \phi') \frac{1}{k_{z1}} [e^{-jk_{z1}|z-h|} + e^{-jk_{z1}(z+h-2d)}] - \frac{2}{\mu_1 k_{z1}} e^{-jk_{z1}(z-d)} \Lambda_{v1}^{mn} \right\} e^{-j\pi \left[\frac{m}{a}x + \frac{n}{b}y \right]} \quad (13)$$

$$A_{v2}(\mathbf{r}) = \frac{1}{j8ab} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{2}{k_{z2}} e^{jk_{z2}(z-d)} \Lambda_{v2}^{mn} \right\} e^{-j\pi \left[\frac{m}{a}x + \frac{n}{b}y \right]} \quad (14)$$

onde:

$$\Lambda_{v1}^{mn} = \int_{-b}^b \int_{-a}^a e^{j\pi \left[\frac{m}{a}x' + \frac{n}{b}y' \right]} \frac{\partial}{\partial z} A_{v1}(x', y', d) dx' dy' \quad (15)$$

$$\Lambda_{v2}^{mn} = \int_{-b}^b \int_{-a}^a e^{j\pi \left[\frac{m}{a}x' + \frac{n}{b}y' \right]} \frac{\partial}{\partial z} A_{v2}(x', y', d) dx' dy' \quad (16)$$

Aplicando as condições de fronteira (5) na interface $z=d$ e resolvendo o sistema de equações formado por (13)-(16), o campo potencial magnético na forma tensorial é dado por (17).

$$\mathbf{A} = \mathbf{I}(\theta', \phi') \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} A_{xx}^{mn} & 0 & 0 \\ 0 & A_{yy}^{mn} & 0 \\ -j \left[\frac{m\pi}{a} \right] A_{zx}^{mn} & -j \left[\frac{n\pi}{b} \right] A_{zy}^{mn} & A_{zz}^{mn} \end{bmatrix} e^{-j\pi \left[\frac{m}{a}x + \frac{n}{b}y \right]} \quad (17)$$

com elementos A_{ij}^{mn} , sendo a componente i excitada pela componente j da fonte de corrente linear $\mathbf{I}(\theta', \phi')$, conforme (18).

$$\mathbf{I}(\theta', \phi') = \frac{I_0 l}{8ab} \left[\cos \phi' \sin \theta' \hat{a}_x + \sin \phi' \sin \theta' \hat{a}_y + \cos \theta' \hat{a}_z \right] \quad (18)$$

Nos meios 1 e 2, as componentes do tensor (17) são formadas por:

$$A_{xx1}^{mn} = A_{yy1}^{mn} = -j\mu_1 \frac{1}{k_{z1}} \left[e^{-jk_{z1}|z-h|} + R^{TE} e^{-jk_{z1}(z+h-2d)} \right] \quad (19)$$

$$A_{zx1}^{mn} = A_{zy1}^{mn} = \mu_1 S^{TEM} e^{-jk_{z1}(z+h-2d)} \quad (20)$$

$$A_{zz1}^{mn} = -j\mu_1 \frac{1}{k_{z1}} \left[e^{-jk_{z1}|z-h|} + R^{TM} e^{-jk_{z1}(z+h-2d)} \right] \quad (21)$$

$$A_{xx2}^{mn} = A_{yy2}^{mn} = -j\mu_2 \left[\frac{\mu_1 k_{z2}}{\mu_2 k_{z1}} \right] \frac{1}{k_{z2}} e^{j[k_{z2}(z-d) - k_{z1}(h-d)]} \quad (22)$$

$$A_{zx2}^{mn} = A_{zy2}^{mn} = \mu_2 S^{TEM} e^{j[k_{z2}(z-d) - k_{z1}(h-d)]} \quad (23)$$

$$A_{zz2}^{mn} = -j\mu_2 \left[\frac{k_{z2}}{k_{z1}} \right] T^{TM} \frac{1}{k_{z2}} e^{j[k_{z2}(z-d) - k_{z1}(h-d)]} \quad (24)$$

onde os coeficientes de reflexão e transmissão dos modos TE e TM são:

$$R^{TE} = \left[\frac{\mu_2 k_{z1} - \mu_1 k_{z2}}{\mu_2 k_{z1} + \mu_1 k_{z2}} \right] \quad (25)$$

$$T^{TE} = \left[\frac{2\mu_2 k_{z1}}{\mu_2 k_{z1} + \mu_1 k_{z2}} \right] \quad (26)$$

$$R^{TM} = \left[\frac{\varepsilon_2 k_{z1} - \varepsilon_1 k_{z2}}{\varepsilon_2 k_{z1} + \varepsilon_1 k_{z2}} \right] \quad (27)$$

$$T^{TM} = \left[\frac{2\varepsilon_2 k_{z1}}{\varepsilon_1 k_{z2} + \varepsilon_2 k_{z1}} \right] \quad (28)$$

e STEM um coeficiente de acoplamento que relaciona os coeficientes de transmissão dos modos TE e TM (CHEW, 1995):

$$S^{TEM} = \frac{1}{2k_{z1}^2} \left[\frac{\mu_1 \epsilon_1}{\mu_2 \epsilon_2} - 1 \right] T^{TM} T^{TE} \quad (29)$$

Definido o potencial magnético (17), os tensores de campos magnético e elétrico próximos e distante podem ser facilmente obtidos através de operações diferenciais (BALANIS, 2005).

2.3 Forma Alternativa da Representação da PGF

A representação espectral discreta, nas soluções das PGF em (17), são feitas na forma de somatórios duplos de menos infinito a mais infinito, o que pode demandar um razoável custo computacional nas simulações. Para reduzir tal custo é proposto alterar os somatórios utilizando a identidade de Euler, desde que os termos espectrais nas expressões de campo obedecem as seguintes condições:

$$\begin{aligned} c_{m,n}(z) &= c_{-m,-n}(z) = c_{-m,n}(z) = c_{m,-n}; \\ c_{m,0}(z) &= c_{-m,0}(z); \quad c_{0,n}(z) = c_{0,-n}(z) \end{aligned} \quad (30)$$

As identidades propostas são:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{mn}(z) e^{-j\pi \left[\frac{m}{a}x + \frac{n}{b}y \right]} \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_{mn} c_{mn}(z) \cos \left[\frac{m\pi}{a}x \right] \cos \left[\frac{n\pi}{b}y \right] \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial x} &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{mn}(z) \left[-j \frac{m\pi}{a} \right] e^{-j\pi \left[\frac{m}{a}x + \frac{n}{b}y \right]} \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_{mn} c_{mn}(z) \left[-\frac{m\pi}{a} \right] \sin \left[\frac{m\pi}{a}x \right] \cos \left[\frac{n\pi}{b}y \right] \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial y} &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{mn}(z) \left[-j \frac{n\pi}{b} \right] e^{-j\pi \left[\frac{m}{a}x + \frac{n}{b}y \right]} \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_{mn} c_{mn}(z) \left[-\frac{n\pi}{b} \right] \cos \left[\frac{m\pi}{a}x \right] \sin \left[\frac{n\pi}{b}y \right] \end{aligned} \quad (33)$$

onde ϵ_{mn} é o número de Neumann duplo:

$$\epsilon_{mn} = \begin{cases} 1, & m = 0, n = 0 \\ 2, & m \neq 0, n = 0 \\ 2, & m = 0, n \neq 0 \\ 4, & m \neq 0, n \neq 0 \end{cases} \quad (33)$$

3 | RESULTADOS

A partir do modelo teórico desenvolvido, foram preparados algoritmos computacionais no software Matlab, que permitem avaliar numericamente os coeficientes de reflexão e transmissão TE e TM na interface ar/ouro, o campo próximo e o diagrama de radiação de um arranjo de nanodipolos. Os resultados dos coeficientes de transmissão e reflexão foram coletados no intervalo λ entre 450nm e 750nm. Para análises de campo próximo e diagrama de radiação foram gerados resultados gráficos em $\lambda=632.8\text{nm}$, equivalente ao utilizado em circuitos ópticos. No programa desenvolvido foram utilizadas as séries cossenoidais propostas em (31) - (33), estas foram truncadas utilizando $m=0:M$ e $n=0:N$. Por fim, verificou-se a característica de convergência das séries cossenoidais nas PGF do campo potencial A.

3.1 Coeficientes de Reflexão e Transmissão TE e TM

Os modos TE e TM, ou mesmo modos híbridos, podem ser excitados na estrutura através da orientação dos nanodipolos sobre o plano de ouro. Os campos radiados pelos nanodipolos são compostos por somas discretas de ondas planas, das quais a componente espectral fundamental $m=n=0$, com incidência normal (onda predominante), é a escolhida para as análises gráficas dos coeficientes de reflexão e transmissão apresentados na Fig. 3.

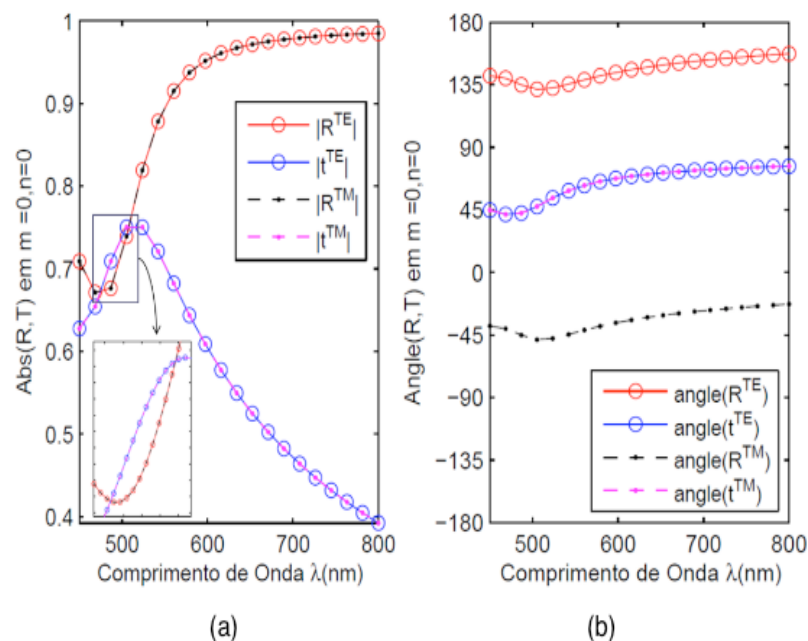


Figura 3 - Coeficientes R^{TE} , t^{TE} , R^{TM} e t^{TM} : (a) Módulo (b) Fase, para $m=n=0$.

A partir da Fig. 3a nota-se que os coeficientes de reflexão R^{TE} e R^{TM} , assim como os coeficientes de transmissão t^{TE} e t^{TM} , são iguais, o que significa que em amplitude as ondas refletidas e transmitidas, para incidência normal, nos modos TM e TE são iguais. Na Fig. 3b, verifica-se que os coeficientes de reflexão R^{TE} e R^{TM} estão defasados de 180° em todos os comprimentos de onda, estando de acordo com o esperado para incidência normal sobre bons condutores (BALANIS, 2005). Os coeficientes de transmissão t^{TE} e t^{TM} possuem o mesmo ângulo de defasagem (curva ao centro), indicando que a transmissão nestes modos sempre está em fase.

Na Fig. 3a, nota-se também que para comprimentos de onda menores, o ouro perde sua característica de condutor perfeito, ou seja, há a presença da onda transmitida. Na maior parte do espectro em análise, a transmissão é menor que a reflexão, com exceção de uma pequena faixa entre 473.64nm e 507.89nm, onde a transmissão se torna ligeiramente maior que a reflexão. O pico de transmissão ocorre no comprimento de onda $\lambda \approx 514.14\text{nm}$. Os coeficientes de reflexão efetiva foram calculados a partir de (25) e (27), e os coeficientes de transmissão efetiva foram calculados através das relações:

$$t^{TM} = \left[\frac{k_{z2}\epsilon_1}{k_{z1}\epsilon_2} \right] T^{TM} = 1 - R^{TM} \quad (35)$$

$$t^{TE} = \left[\frac{k_{z2}\mu_1}{k_{z1}\mu_2} \right] T^{TE} = 1 - R^{TE} \quad (36)$$

3.2 Campos Elétrico e Magnético Próximos

Foram gerados gráficos das componentes E_z e H_y em três células, considerando que os nanodipolos nos arranjos possuem comprimento $l \ll \lambda/50$ e estão localizados no centro da célula, a uma distância $a = 3\lambda$, em x, e $b=3\lambda$, em y, das bordas da célula, posicionados em uma altura $h = \lambda/10$ da interface metal/ar em $z = d = 0$. Todos excitados por uma corrente normalizada em $I_0 = 1A$.

A Fig. 4 mostra a distribuição de campo no plano xy em $z = 0.15\lambda$ (altura focal) para um arranjo de nanodipolos horizontais ($\theta' = 90^\circ$ e $\phi' = 45^\circ$). A Fig. 5 mostra a distribuição no plano xz em $y=0$ para um arranjo de nanodipolos verticais ($\theta' = 0^\circ$).

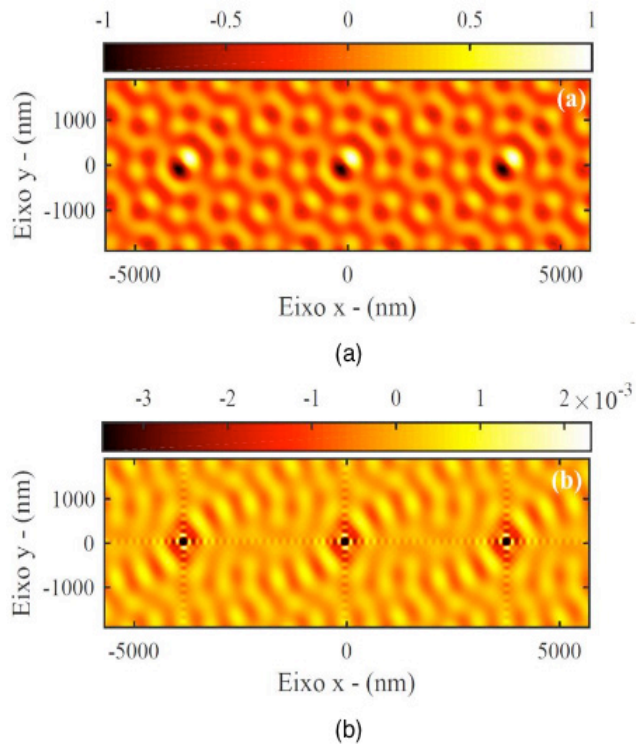


Figura 4 - Componentes de campos no plano xy em $z = 0.15\lambda$, polarização horizontal: (a) $Re\{E_z\}$, (b) $Re\{H_y\}$.

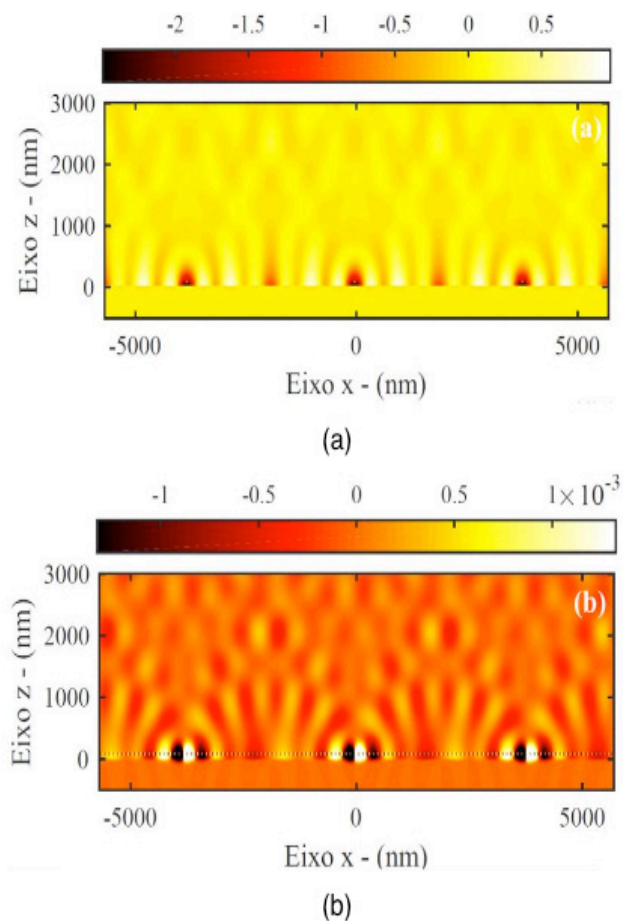


Figura 5 - Componentes de campos no plano xz em $y=0$, polarização vertical: (a) $Re\{E_z\}$, (b) $Re\{H_y\}$.

Primeiramente, verifica-se que as condições de contorno periódicas para

ambos os campos são atendidas. Nas Fig. 4 e Fig.5, os modos predominantes são, respectivamente, o TE e o TM. Note, na Fig. 5, o surgimento de ondas plasmônicas sobre a camada metálica, justamente devido à predominância do modo TM que é exigência necessária ao surgimento destas ondas (SOUZA, et al., 2017; MAIER, 2007) O aparecimento destas ondas é de grande interesse em aplicações de sensoriamento e em células fotovoltaicas devido a concentração da intensidade de luz localizada sobre a superfície dos metais.

Por fim, utilizando todas as componentes de E e H, os campos elétrico e magnético totais em uma célula de período $2a = 6\lambda$ são demonstrados na Fig. 6. Na Fig. 7 é mostrada a visão do topo da célula, nesta as características rotacionais do campo magnético, e radiais do campo elétrico são observadas, corroborando com a teoria clássica destes campos (BALANIS, 2005).

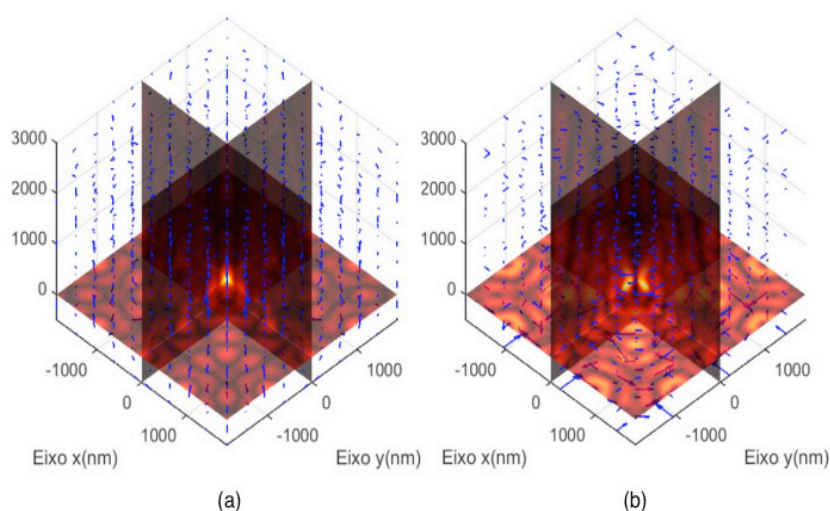


Figura 6 – Campo Total na Célula de Análise, visão tridimensional: (a) E; (b) H.

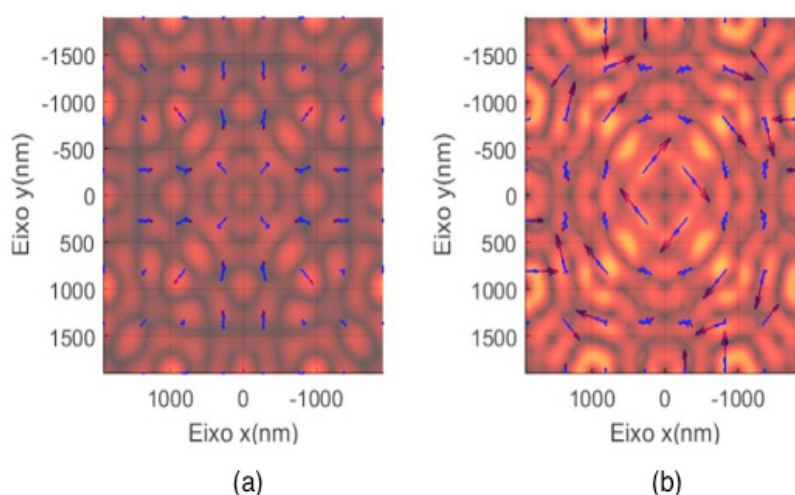


Figura 7 - Campo Total na Célula de Análise, visão do topo: (a) E; (b) H.

3.3 Diagramas de Radiação

Utilizando a definição de far-field (BALANIS, 2005), os diagramas de radiação

foram gerados e são demonstrados na Fig. 8. O espaçamento entre os nanodipolos no arranjo é calculado para $a = b = 0.25\lambda$, 0.5λ e λ . Estes são posicionados em $h = \lambda/10$ e $h = \lambda$, e orientados na vertical e horizontal.

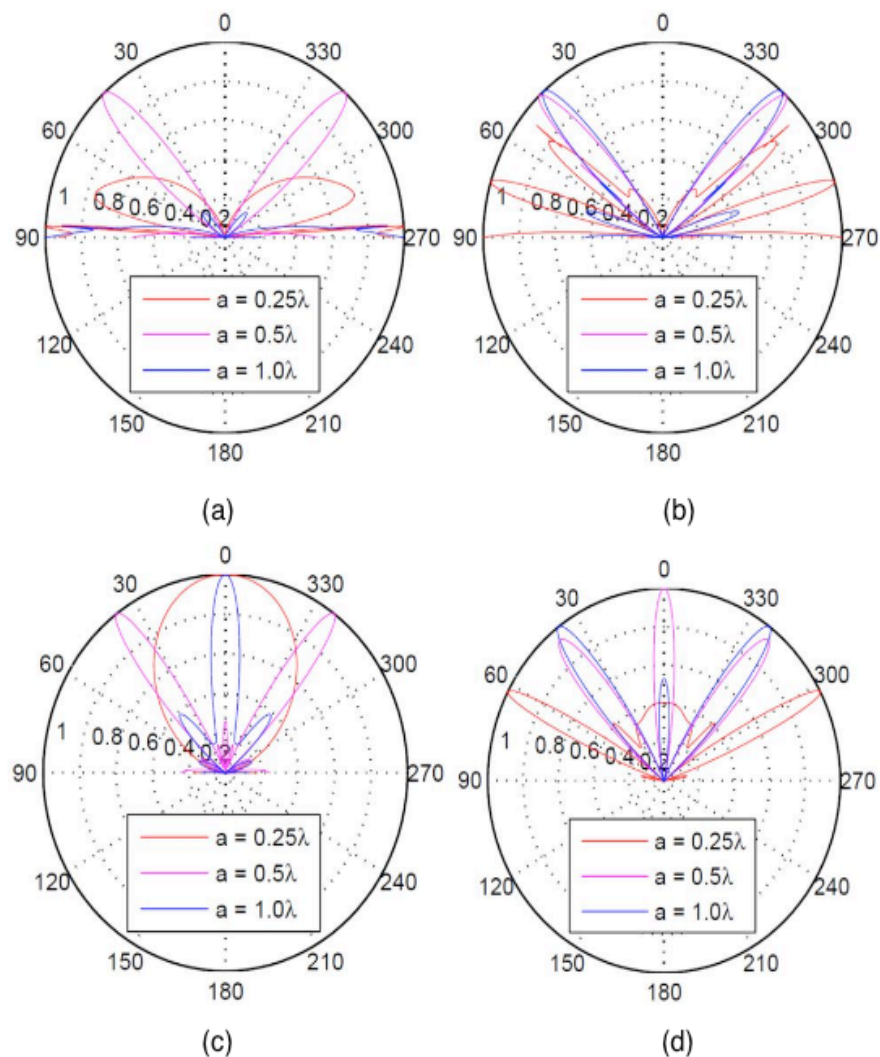


Figura 8 - Diagramas de Radiação com nanodipolos orientados na: Vertical: (a) ,

A partir das Fig. 8a e 8b, podemos verificar que quando os nanodipolos são orientados verticalmente, ($\theta' = 0^\circ$), a radiação é concentrada na região da interface metal/ar. Esta concentração de ondas é proveniente da excitação de ondas SPP, e é amplificada à medida que aproximamos o arranjo da interface, confinando a radiação nesta região. No caso das Fig. 8c e 8d, quando os nanodipolos são orientados horizontalmente ($\theta' = 90^\circ$) praticamente toda radiação é longitudinal e perpendicular ao arranjo. Os resultados demonstram a capacidade de controle da intensidade da luz em diferentes direções a partir da mudança da distribuição e inclinação do arranjo de nanodipolos.

3.4 Convergência do Método

Nos resultados de campos as séries duplas foram truncadas em $M=N=20$ para Fig. 4, $M=N=50$ para Fig.5. As simulações foram realizadas com razoável

custo computacional, aproximadamente 35 minutos e 40 segundos, contudo, fez-se necessário verificar a convergência do método e a real necessidade do número de termos nas séries. Na Fig. 9 é demonstrada o erro relativo para a componente $A_z(0,0,z)$ em termos do número de iterações $m \times n$, para três pontos em z .

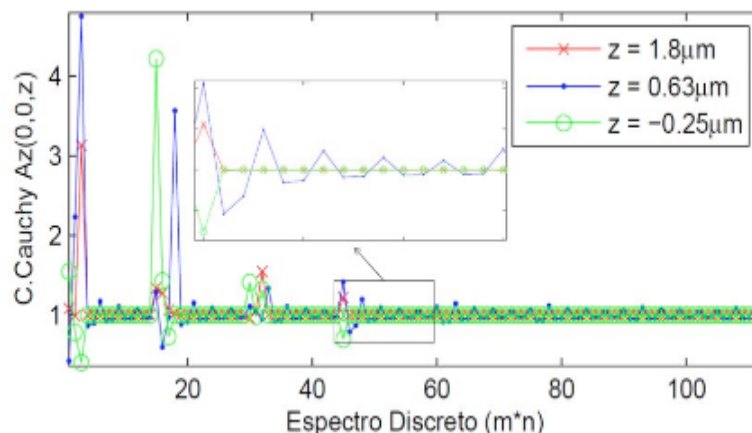


Figura 9 - Erro relativo da série cossenoidal na componente $A_z(0,0,z)$, onde $z = 1.8\mu m$ (sobre a fonte), $z = 0.63\mu m$ (próximo a fonte) e $z = -0.25\mu m$ (abaixo da interface metal/ar).

Após verificar que a convergência do método ocorre em $M=N=7$, as simulações foram refeitas, demandando um tempo de 2 minutos e 16 segundos, sucedendo resultados praticamente iguais aos obtidos nas Fig. 4 e Fig. 5.

4 | CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada a modelagem eletromagnética de um arranjo periódico planar de nanodipolos, sobre um plano de ouro, através do método da função de Green periódica, com o principal intuito de propor um modelo que possa ser utilizado na otimização de projetos de nanodispositivos. A partir dos resultados obtidos podemos verificar as características de campos próximo e radiado. Na Fig. 9, verificamos que a convergência das séries ocorre de formas diferentes para diferentes pontos no espaço, sendo muito rápida distante da fonte, e lenta nas proximidades, principalmente pelo fato do método tentar aproximar uma fonte delta de Dirac. A utilização da série dupla em termos de cosseno propicia a redução em quatro vezes o número de termos em relação a série complexa de Fourier convencional.

REFERÊNCIAS

AHMADI, A; GHADARGHADR, S; MOSALLAEI, H. **An optical reflectarray nanoantenna: The concept and design**. Opt. Express 18, pp. 123-133, 2010.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design. MICROSTRIP ANTENNAS**, third edition, John Wiley sons,(2005).

- BOHREN, C. F; Huffman, D. R. **Absorption and Scattering of Light by Small Particles**, Wiley: New York, 1983.
- CHEW, W. C; **Waves and Fields in inhomogeneous media**. IEEE press,(1995).
- COSTA, K. Q; COSTA J. S; DMTRIEV, V; DEL ROSSO, T; PANDOLI O; AUCELIO R. Q. **Analysis of surface plasmon resonance sensor coupled to periodic array of gold nanoparticles**, in {IMOC: SBMO/IEEE MTT-S International}, Porto de Galinhas, PE, Brazil, 2015, pp. 15.
- DUDLEY, D. G. **Mathematical Foundations for Electromagnetic Theory**, IEEE Press, 1994
- HOFMANN, H. F; KOSAKO, T; KADOYA, Y. **Design parameters for a nano-optical Yagi Uda antenna**. New Journal of Physics 9, 2007.
- MAIER, S. A. **Plasmonics: Fundamentals and Applications**, ed. New York, NY, USA: Springer, 2007, pp. 65--87.
- POHL, D. W; ALU, A; ENGHETA, N; MARQUIER, F; **Optical Antennas**. Forthcoming Publications: Science, PRL, 2013.
- RASHIDI, A; MOSALLAEI, H. **Array of plasmonic particles enabling optical near-field concentration: A non-linear inverse scattering design approach**, Phys. Rev. B, 82, 035117, 2010.
- RASHIDI, A; MOSALLAEI, H; Mittra, R. **Numerically efficient analysis of array of plasmonic nanorods illuminated by an oblique incident plane wave using the characteristic basis function method**, J. Comput. Theor. Nanosci. 10, pp 427-445, 2013.
- RODRÍGUEZ, C. P. J; MARTÍNEZ M. M; RODRÍGUEZ, F. F. J; TOMÁS, N. B; ORTUÑO, R; PERANSÍ, L. S; MARTÍNEZ, A. **Demonstration of near infrared gas sensing using gold nanodisks on functionalized silicon**. Opt. Express 19, pp. 7664-7672, 2011.
- ROSTAMI, M; D. ANSARI O.B; MOSALLAEI H. **Dispersion diagram analysis of arrays of multishell multimaterial nanospheres**, PIERB, 48, pp. 77-98, 2013.
- SANTOS, T. L. T. **Análise comparativa das propriedades ressonantes de nanopartículas e nanoantennas bowtie de ouro de diferentes geometrias**, 2012. Tese, Universidade Federal do Pará, Belém.
- SOUZA, N. W. P; COSTA, J. S; SANTOS R. C; CRUZ, A. F. S; DEL ROSSO T; COSTA K. Q. **Modal analysis of surface plasmon resonance sensor coupled to periodic array of core-Shell metallic nanoparticles**, Resonance, Prof. Jan Awrejcewicz (Ed.), InTech, 2017.
- SQALLI, O; UTKE, I; HOFFMANN, P; WEIBLE, F. M. **Gold elliptical nanoantennas as probes for near field optical microscopy**. J. of Appl. Physics, vol. 92, pp. 1078-1083, July 2002.
- TAJDINI, M. M ; MOSALLAEI, H. **Characterization of large array of plasmonic nanoparticles on layered substrate: dipole mode analysis integrated with complex image method**. Applied EM and Optics Laboratory Northeastern University, 2011.

SOBRE O ORGANIZADOR

Henrique Ajuz Holzmann - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-449-8



9 788572 474498