

# Análise da Impedância de Entrada de Nanodipolos Cilíndricos Utilizando o Método dos Momentos

Janilson L. de Souza e Karlo Q. da Costa

**Resumo**— Este artigo apresenta uma análise da impedância de entrada de nanodipolos metálicos cilíndricos utilizando o Método dos Momentos (MoM) para solução da equação integral do campo elétrico, com aproximação linear da corrente, funções base senoidal e impedância superficial finita. São apresentadas algumas simulações variando parâmetros geométricos da nanoestrutura, onde serão comparadas com os resultados calculados pelo software Comsol Multiphysic.

**Palavras-Chave**— Nanodipolos metálicos cilíndricos, Método dos Momentos (MoM), impedância superficial finita.

**Abstract**— This article presents an analysis of input impedance of metallic cylindrical nanodipoles using the Method of Moments (MoM) for solution of the electric field integral equation, with linear current approximation, sinusoidal basis functions, and finite surface impedance. We present some simulations varying the geometric parameters of the nanostructure, which will be compared with the results calculated by the software Comsol Multiphysic.

**Keywords**— Metallic cylindrical nanodipoles, Method of Moments (MoM), finite surface impedance.

## I. INTRODUÇÃO

As nanoantenas têm despertado grande interesse da comunidade científica na área da nanofotônica devido suas possibilidades de aplicação na biologia, química, informática, microscopia óptica, etc [1]. Este interesse se deve as inovações tecnológicas na técnica de fabricação de nanoestruturas, uma delas é a litografia que permite a produção de antenas ópticas com gaps abaixo de 10 nanômetros [2], outra é a fotolitografia utilizada para criar dispositivos plasmônicos.

Recentemente têm sido trabalhadas diversas geometrias de nanoantenas, como em [3] onde elas são dipolos dobrados sendo analisado o comportamento da impedância. Em [4] e apresentado nanoantenas na forma de T, onde demonstrar a flexibilidade do casamento da impedância pela variação dos parâmetros geométricos da nanoestrutura. Em [5] a nanoantena é em formato de loop e em [6]-[7] tem um formato cilíndrico reto, que consistir em um sistema de linha de transmissão óptica (OTL) e radiação em escalas nanométricas que podem ser considerados um problema de casamento de linhas de transmissão.

Neste trabalho, um nanodipolo cilíndrico será analisado teoricamente utilizando o MoM com o objetivo de verificar o comportamento da impedância de entrada quando uma fonte de tensão alternada é injetada no mesmo.

## II. DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O problema de análise de antenas da Fig. 1 (a) consiste em um campo elétrico  $E_i$  proveniente de uma fonte de tensão conectada no centro da antena, esta tensão produz corrente elétrica no condutor que por sua vez irá radiar um campo  $E_e$ . Este nanodipolo cilíndrico é constituído de ouro de comprimento finito, onde  $L$  é o comprimento de um “braço”,  $a$  o raio de seção transversal,  $d$  o gap de tensão e  $V_f$  a fonte de tensão centrada na origem, sendo  $I_f$  a corrente da fonte.

O ouro apresenta uma permissividade  $\epsilon_r$  na faixa óptica ( $\lambda > 550\text{nm}$ ) e uma impedância superficial  $Z_s$  [8]. Após ter todos os parâmetros da Fig. 1, aplica-se a condição de contorno do campo elétrico na superfície do metal (1).

$$(\vec{E}_e + \vec{E}_i) \cdot \vec{a}_i = Z_s I, \quad (1)$$

Ao ser substituída a equação integral do campo elétrico  $E_e$  [1] em (1) e aplicando o MoM com funções base senoidal e funções teste pulso retangular e a aproximação linear da corrente em [9] na Fig. 1 (b), obtemos o seguinte sistema de equações

$$V_m = Z_s I_m \Delta + \sum_{n=1}^{N-1} Z_{mn} I_n, \quad m = 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

onde  $V_m$  é a tensão em um segmento genérico  $m$ , os elementos de  $Z_{mn}$  representam a impedância mútua entre os pontos  $m$  e  $n$ . A partir disso o sistema é solucionado encontrando a distribuição de corrente. Assim a impedância de entrada é calculada através de

$$Z_{in} = \frac{V_{N/2}}{I_f}, \quad I_f = \frac{1}{\sinh \lambda d} \left[ I_{\left(\frac{N}{2}\right)} \sinh \frac{\gamma d}{2} + I_{\left(\frac{N}{2}+1\right)} \sinh \frac{\gamma d}{2} \right]. \quad (3)$$

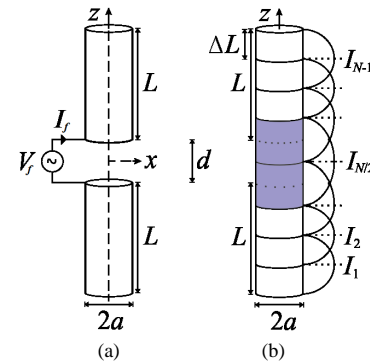


Fig. 1. Geometria de uma nanoantena cilíndrica de comprimento de “braço”  $L$ , raio  $a$  e gap de tensão  $d$ , alimentada por uma fonte de tensão.

## III. RESULTADOS

Com base na teoria apresentada acima foi desenvolvido um programa computacional no *software* MatLab para calcular a impedância de entrada do nanodipolo em uma faixa de frequência de 100 a 500THz. As simulações serão feitas a partir do MoM aplicando uma fonte de tensão de  $V_f = 1V$  no centro do dipolo, com um gap  $d$  de 20nm e comparadas com as simulações do *software* Comsol, conforme mostra a Fig. 1 (b). É variando alguns parâmetros e fixando outros para um determinado valor de  $N_b$  segmentos em  $L=0,5d$  no qual este deverá satisfazer um critério de estabilidade limite de  $\Delta L/a \geq 1$ .

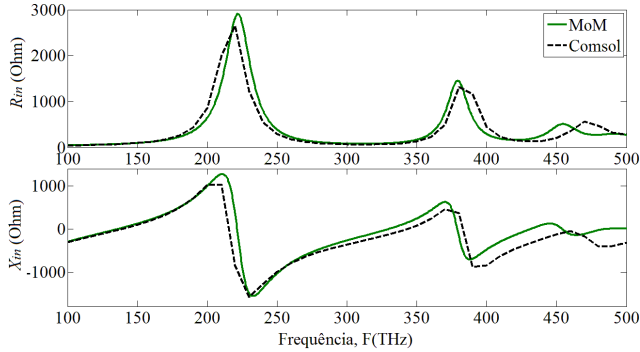


Fig. 2. Variação da impedância de entrada do nanodipolo em função da frequência para  $L=220nm$  e  $a=10nm$ .

A Fig. 2 apresenta a variação da impedância de entrada em função da frequência para  $L=220nm$ ,  $a=10nm$  e  $N_b=11$ . Os resultados mostram que os dois métodos apresentam boa concordância para uma faixa de frequência de 100 a 400THz, para frequências mais elevadas o método começa a divergir devido a existência de correntes transversais no cilindro, no qual o método considera apenas as correntes longitudinais no condutor. Pela figura a primeira frequência de ressonância ( $F_{\lambda/2}$ ) para o MoM é de 136,1THz e para o Comsol de 139,3THz. É importante comentar que a simulação no MoM demorou 50 segundos e a do COMSOL 40 minutos.

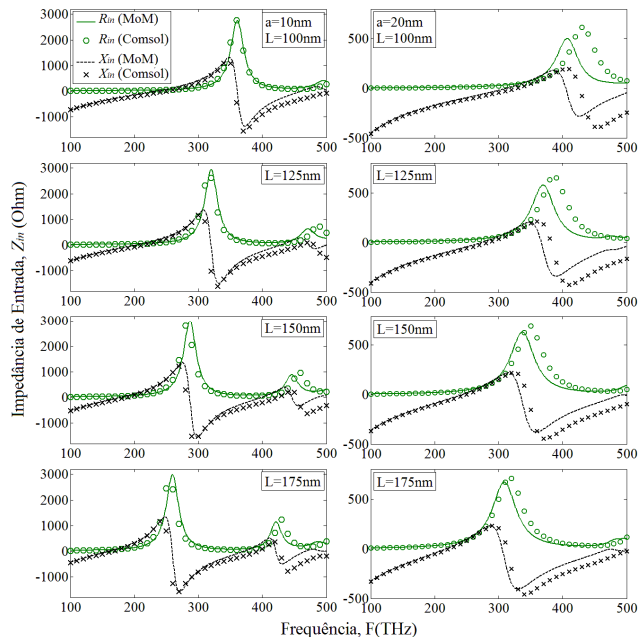


Fig. 3. Variação da impedância de entrada do nanodipolo em função da frequência para  $L=100, 125, 150$  e  $175nm$  com  $a=10nm$  e  $d=20nm$ .

TABELA I. COMPARAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E A RESISTÊNCIA DE ENTRADA RESSONANTE OBTIDAS PELO MoM E PELO COMSOL VARIANDO O COMPRIMENTO E O RAIO DO NANODIPOLO.

		MoM		L (nm)			
				100	125	150	175
a (nm)	10	$F_{\lambda/2}$ (THz)	234,49	203,02	179,12	160,38	
		$R_{in}$ (Ohm)	45,06	50,58	56,22	61,89	
	20	$F_{\lambda/2}$ (THz)	312,11	273,53	242,98	218,44	
		$R_{in}$ (Ohm)	33,76	37,15	40,09	42,83	
		Comsol		L (nm)			
				100	125	150	175
a (nm)	10	$F_{\lambda/2}$ (THz)	249,6	213,5	186,8	166,2	
		$R_{in}$ (Ohm)	48,65	53,01	58,13	63,51	
	20	$F_{\lambda/2}$ (THz)	327,24	283,33	249,82	223,29	
		$R_{in}$ (Ohm)	39,24	41,47	43,56	45,96	

A Tabela I mostra os resultados obtidos pelo MoM e pelo Comsol da frequência de ressonância ( $F_{\lambda/2}$ ) e da resistência de entrada ressonante ( $R_{in}$ ), ao variarmos os parâmetros  $L$  e  $a$ . Os resultados mostram que as ressonâncias decaem à medida que o comprimento  $L$  aumenta o que é característico para o caso de antenas de microondas, e elas aumentam quando o raio  $a$  aumenta. Além disso, a resistência de entrada ressonante ( $R_{in}$ ) aumenta com o aumento de  $L$  e diminui com o aumento de  $a$ . Os parâmetros da tabela foram retirados da Fig. 3.

## IV. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a aplicação do método dos momentos para análise da impedância de entrada em nanodipolos cilíndricos, no qual o modelo apresentou boa concordância com o Comsol e boa eficiência computacional. Os resultados mostraram que as frequências de ressonância decaem com o aumento do comprimento, o que é característico para o caso de antenas de microondas, e elas aumentam com o aumento do raio. Além disso, observou-se que a resistência de entrada ressonante aumenta com o aumento de  $L$  e diminuem com o aumento  $a$ . Como proposta de continuação deste trabalho, será conectada uma linha de transmissão óptica ao nanodipolo e melhorar a precisão do método.

## REFERÊNCIAS

- [1] K. Q. da Costa, and V. Dmitriev, "Numerical Analysis of Cylindrical Nanodipoles by Linear Moment Method", *International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC* 2011.
- [2] W. Zhu, M. G. Banaee, D. Wang, Y. Chu, and K. B. Crozier, "Lithographically Fabricated Optical Antennas with Gaps Well Below 10 nm", *Small*, vol. 7, No. 13, pp. 1761-1766, 2011.
- [3] H. Iizuka, N. Engheta, H. Fujikawa, and K. Sato, "Arm-edge conditions in plasmonic folded dipole nanoantennas", *Optics Express*, vol. 19, No. 13, pp. 12325, June 2011.
- [4] Y. Sachkou, A. Andryieuski, and A. V. Lavrinenko, "Impedance Conjugate Matching of Plasmonic Nanoantennas in Optical Nanocircuits", *53rd International Symposium ELMAR*, September 2011, Zadar, Croatia.
- [5] A. Locatelli, "Peculiar Properties of Loop Nanoantennas", *IEEE photonics society*, vol. 3, No. 5, pp. 1943-0655, October 2011.
- [6] J.S. Huang, T. Feichtner, P. Biagioni, and B. Hecht, "Impedance Matching and Emission Properties of Nanoantennas in an Optical Nanocircuit", *Nano Letters*, vol. 9, No. 5, pp. 1897-1902, April 2009.
- [7] A. Alú and N. Engheta, "Input Impedance, Nanocircuit Loading, and Radiation Tuning of Optical Nanoantennas", *Physical Review Letters*, vol. 101, pp. 043901, July 2008.
- [8] K. Q. Da Costa and V. A. Dmitriev, "Bowtie nanoantennas with polynomial sides in the excitation and emission regimes," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 32, 57-73, 2011.
- [9] K. Q. da Costa, and V. Dmitriev, "Software based on MoM model to analyze electromagnetic transients in grounding systems", *International Conference on Grounding and Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effects*, November 2006.