

Conjuntos de Antenas de Microfita Esférico-trapezoidais

Odilon M. C. Pereira-Filho
Dept. Eletrônica e Sistemas,
Univ. Federal de Pernambuco,
Recife, Brasil
odilon@ee.ufpe.br

Leonardo A. Costa
CEMPES,
PETROBRAS,
Rio de Janeiro, Brasil
leonardoaquino@yahoo.com.br

Fernando J. S. Moreira
Dept. Engenharia Eletrônica,
Univ. Federal de Minas Gerais,
Belo Horizonte, Brasil
fernandomoreira@ufmg.br

Resumo—Este trabalho apresenta a análise de conjuntos de antenas de microfita esférico-trapezoidais. A análise é desenvolvida usando o método dos momentos em domínio espectral, levando-se em consideração o acoplamento entre os elementos do conjunto. Os conjuntos são caracterizados pelos diagramas de radiação e impedância de entrada dos elementos. O modelo é validado por comparação com o caso especial de uma antena de microfita esférico-retangular.

I. INTRODUÇÃO

Antenas de microfita são bastante utilizadas devido a suas características elétricas e mecânicas, como por exemplo, baixa seção reta, baixo peso, baixo custo, e facilidade de se integrar a circuitos de microondas. Antenas esféricas de microfita [1] são aquelas que se conformam a superfícies total, ou parcialmente esféricas, e são especialmente úteis em aplicações de sensoramento remoto ou comunicações via satélite.

As antenas esféricas de microfita foram estudadas usando-se o método da cavidade [2]-[6], o método das correntes elétricas superficiais [7], o método da linha de transmissão generalizada [8], e o método dos momentos (MoM) [10]-[17]. Especificamente as antenas esférico-retangulares foram analisadas usando o método da cavidade para se obter a eficiência de radiação [2], e os diagramas de radiação [3]. Posteriormente as antenas esférico-retangulares foram estudadas usando-se o método dos momentos [13]-[15], obtendo-se os diagramas de radiação, impedância de entrada, acoplamento entre elementos, e conjuntos de antenas esférico-retangulares. Em [13] foi introduzida a série vetorial modificada de Legendre, utilizando funções associadas de Legendre normalizadas. As antenas esférico-trapezoidais foram analisadas inicialmente em [16], usando o método dos momentos e correntes de "attachment".

Este trabalho¹ estende a análise desenvolvida em [16] para o caso de conjuntos de antenas esférico-trapezoidais. A utilização do método dos momentos para a análise do conjunto de antenas garante que o acoplamento entre os elementos é levado em consideração. São mostrados exemplos de impedância de entrada e diagramas de radiação de conjuntos esférico-trapezoidais. A análise utiliza funções associadas de Legendre normalizadas. A

formulação se distingue da mostrada anteriormente em [13]-[15] na forma em que a função de Green é escrita, nos procedimentos numéricos de avaliação das matrizes do método dos momentos, nas funções de base utilizadas, e claro no formato dos elementos do conjunto.

II. FORMULAÇÃO

A geometria da antena esférico-trapezoidal é mostrada na Fig. 1. Um conjunto de N_p antenas é impresso sobre uma camada dielétrica de espessura h , e constante ϵ_r , que recobre uma esfera metálica de raio r_1 . Os elementos do conjunto formam um círculo, de θ_1 a θ_2 , centrados em $\theta_c = (\theta_1 + \theta_2)/2$. A largura das antenas na direção θ vale $W_\theta = r_2 \Delta_\theta$, onde $\Delta_\theta = \theta_2 - \theta_1$. Na direção ϕ cada elemento do conjunto varia de $\phi_1(i)$ a $\phi_2(i)$, centrados em $\phi_c(i) = [\phi_1(i) + \phi_2(i)]/2$, $i = 1, \dots, N_p$. Em geral a largura das antenas na direção ϕ não é constante, e no centro da mesma vale $W_\phi = r_2 \sin(\theta_c) \Delta_\phi(i)$, onde $\Delta_\phi(i) = \phi_2(i) - \phi_1(i)$.

O problema foi analisado pelo método dos momentos [18] em domínio espectral, usando a série vetorial modificada de Legendre [13] e funções associadas de Legendre normalizadas. Inicialmente as correntes superficiais nas antenas são expandidas em um conjunto de funções de base:

$$J_\theta(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{q=1}^{Q_\theta} \sum_{p=0}^{P_\theta} a_{i qp} J_{\theta i qp}(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$J_\phi(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{q=0}^{Q_\phi} \sum_{p=1}^{P_\phi} b_{i qp} J_{\phi i qp}(\theta, \phi) \quad (2)$$

onde $a_{i qp}$ e $b_{i qp}$ são os coeficientes da expansão a serem determinados. As funções de base na direção θ são dadas por:

$$J_{\theta i qp}(\theta, \phi) = f_{\theta q}(\theta) g_{\theta ip}(\phi) \quad (3)$$

onde

$$f_{\theta q}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{q\pi}{\Delta_\theta}(\theta - \theta_1)\right)}{\sin(\theta)} \quad (4)$$

$$g_{\theta ip}(\phi) = \cos\left(\frac{p\pi}{\Delta_\phi(i)}(\phi - \phi_1(i))\right) \quad (5)$$

¹Este trabalho foi parcialmente financiado pela FACEPE E CNPq.

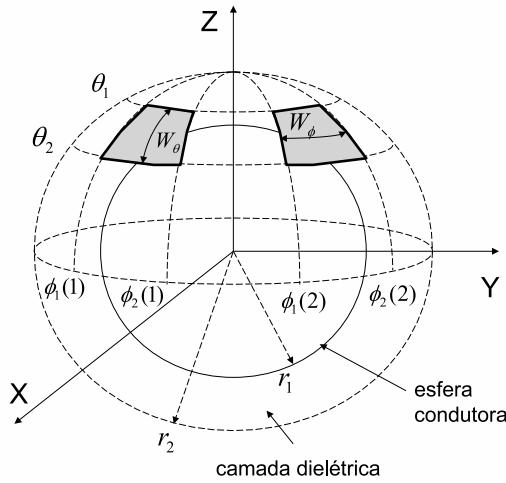


Figura 1. Geometria do conjunto de antenas esférico-trapezoidais, com apenas 2 antenas visíveis.

E as funções de base na direção ϕ são dadas por:

$$J_{\phi i q p}(\theta, \phi) = f_{\phi q}(\theta) g_{\phi i p}(\phi) \quad (6)$$

onde

$$f_{\phi q}(\theta) = \cos\left(\frac{q\pi}{\Delta\theta}(\theta - \theta_1)\right) \quad (7)$$

$$g_{\phi i p}(\phi) = \sin\left(\frac{p\pi}{\Delta\phi(i)}(\phi - \phi_1(i))\right) \quad (8)$$

No domínio espectral o campo elétrico em cada região é dado por [17]:

$$\tilde{E}_t^o(r, n, m) = \overline{\overline{G}_t^{Eo}}(r, n) \tilde{J}(n, m) \quad (9)$$

$$\tilde{E}_t^d(r, n, m) = \overline{\overline{G}_t^{Ed}}(r, n) \tilde{J}(n, m) \quad (10)$$

onde $\tilde{J}(n, m)$ é a transformada da distribuição superficial de corrente $\tilde{J}(\theta, \phi)$, e $\overline{\overline{G}_t^{Eo}}(r, n)$ e $\overline{\overline{G}_t^{Ed}}(r, n)$ são as transformadas das funções de Green no ar e no dielétrico, respectivamente. As funções de Green acima podem ser encontradas em trabalhos anteriores, mas são escritas em uma forma numericamente mais apropriada.

As antenas são alimentadas por cabos coaxiais com correntes $I_o(i)$, modelados como fitas condutoras centradas em $\theta_f(i)$, e de largura W_{fi} . As densidades superficiais de corrente nas antenas são determinadas pela imposição das condições de contorno em suas superfícies, resultando em equações que são resolvidas por resíduos ponderados. O mesmo conjunto de funções de base é utilizado como funções de teste, resultando

no método de Galerkin. Os coeficientes das funções de base são determinados resolvendo-se o sistema linear resultante do método dos momentos $[Z][I] = [V]$. Os elementos da matriz $[Z]$ podem ser escritos na forma:

$$\begin{aligned} Z_{test, basis} &= \langle \tilde{E}(\tilde{J}_{basis}), \tilde{J}_{test} \rangle_s \\ &= r_2^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} \left[\tilde{J}_{test}(n, -m) \right]^t \overline{\overline{G}_t^{Eo}}(r_2, n) \times \\ &\quad \left[\tilde{J}_{basis}(n, m) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

E os elementos da matriz $[V]$ podem ser obtidos por:

$$V_{test} = - \langle \tilde{E}(J_f), \tilde{J}_{test} \rangle_s \quad (12)$$

e avaliados com o auxílio do teorema da reciprocidade, e J_f inclui as correntes de excitação de todas as antenas. Uma vez resolvido o sistema linear do método dos momentos, as correntes superficiais nas antenas são determinadas.

A impedância de entrada observada em alguma das antenas do conjunto, por exemplo antena n , é dada pela expressão variacional [19]:

$$Z_n = - \frac{1}{I_o(n)^2} \int \int_S \tilde{E}(\tilde{J}_s) \cdot \tilde{J}_{fn} ds \quad (13)$$

onde $\tilde{J}_s$ é a corrente superficial nas N_p antenas, e $\tilde{J}_{fn}$ é a distribuição de corrente na fita que alimenta a antena n . Usando a expansão em funções de base (1) e (2), e o teorema da reciprocidade [19], Z_n pode ser obtido por:

$$Z_n = \frac{1}{I_o(n)^2} \sum_{i=1}^{N_p} \left[\sum_{q=1}^{Q_\theta} \sum_{p=0}^{P_\theta} a_{iqp} V_{iqp}^{\theta n} + \sum_{q=0}^{Q_\phi} \sum_{p=1}^{P_\phi} b_{iqp} V_{iqp}^{\phi n} \right] \quad (14)$$

onde $V_{iqp}^{\theta n}$ e $V_{iqp}^{\phi n}$ são elementos da matriz de tensão $[V]$ para o caso em que apenas o alimentador n excita o conjunto de antenas, i.e., $J_f(r, \theta, \phi) = J_{fn}(r, \theta, \phi)$.

III. RESULTADOS

Inicialmente uma antena esférico-retangular é analisada para comparação com resultados disponíveis na literatura [15]. Para que a forma esférico-trapezoidal das antenas analisadas se reduza a uma antena esférico-retangular, a mesma é centrada em $z = 0$. A antena tem dimensões médias 20 x 20 cm², e é polarizada na direção ϕ por um cabo coaxial a 8 cm do centro da antena, modelado por uma fita condutora de 1 cm de largura. A esfera metálica tem raio $r_1 = 18.5$ cm, coberta por um dielétrico de permissividade relativa igual a 1 e espessura de $h = 4.5$ mm. A Fig. 2 mostra resultados para a impedância de entrada da antena usando a formulação atual, e a compara com os resultados teóricos e medidas mostrados em [15]. Uma ótima concordância é observada, com um desvio de frequência de ressonância de apenas 4 MHz.

Exemplos de conjuntos de 4 antenas esférico-trapezoidais são mostrados nas figuras 3 a 5. A esfera condutora de raio

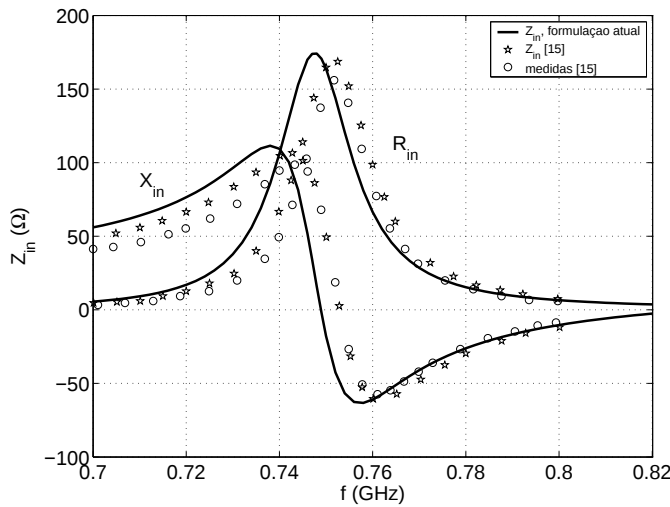


Figura 2. Impedância de entrada de antena esférico-retangular. $\theta_c = 90^\circ$, $r_1 = 18.5$ cm, $h = 4.5$ mm, $\varepsilon_r = 1$, $W_\theta = W_\phi = 20$ cm, $\phi_c = 0^\circ$, $d_\theta = 0$, $d_\phi = 8$ cm, e $W_f = 1$ cm.

$r_1 = 18.5$ cm é recoberta por uma camada de espuma de constante dielétrica igual a 1 e espessura de 3.8 mm. Sobre ela são impressas 4 antenas de larguras médias de 10×10 cm², polarizadas na direção ϕ e alimentadas a 4 cm do centro das antenas. As 4 antenas estão centradas em $\phi_c(1) = 0^\circ$, $\phi_c(2) = 90^\circ$, $\phi_c(3) = 180^\circ$, e $\phi_c(4) = 270^\circ$. Os conjuntos são alimentados de forma assimétrica, onde os elementos 1 e 2 são excitados em fase ($I_o(1) = I_o(2) = 1$ mA), e os elementos 3 e 4 são excitados em oposição de fase ($I_o(3) = I_o(4) = -1$ mA). Os conjuntos de antenas foram centrados em $\theta_c = 90^\circ$, $\theta_c = 45^\circ$, ou $\theta_c = 30^\circ$. Para $\theta_c = 90^\circ$ as antenas são esférico-retangulares, enquanto para $\theta_c = 45^\circ$ ou $\theta_c = 30^\circ$ as antenas são esférico-trapezoidais. Para cada caso as antenas tem formas diferentes, mas todas com larguras médias iguais $W_\theta = W_\phi = 10$ cm de forma a permitir a comparação. As figuras 3 e 4 mostram os diagramas de radiação para cada conjunto de antenas, avaliados próximo à frequência de ressonância de cada conjunto, i.e., em $f = 1.40$ GHz para $\theta_c = 90^\circ$, em $f = 1.42$ GHz para $\theta_c = 45^\circ$, e em $f = 1.435$ GHz para $\theta_c = 30^\circ$. Na figura 3 as intensidades de radiação são mostradas imediatamente sobre a antena, em $\theta = \theta_c$. Pode-se observar que para antenas mais próximas do eixo dos z as intensidades de radiação apresentam menor variação com ϕ . Enquanto isso a direção de máxima intensidade de radiação em função de θ se move para o eixo dos z , conforme mostrado na Fig. 4. Esta propriedade permite o projeto de conjuntos de antenas esférico-trapezoidais com a capacidade de irradiação no eixo de simetria. De forma geral as impedâncias de entrada dos elementos de um conjunto são distintas, mas para esse caso especial elas são iguais, e são apresentadas na Fig. 5. Nela observa-se que a impedância de entrada de antenas esférico-trapezoidais de mesmas dimensões

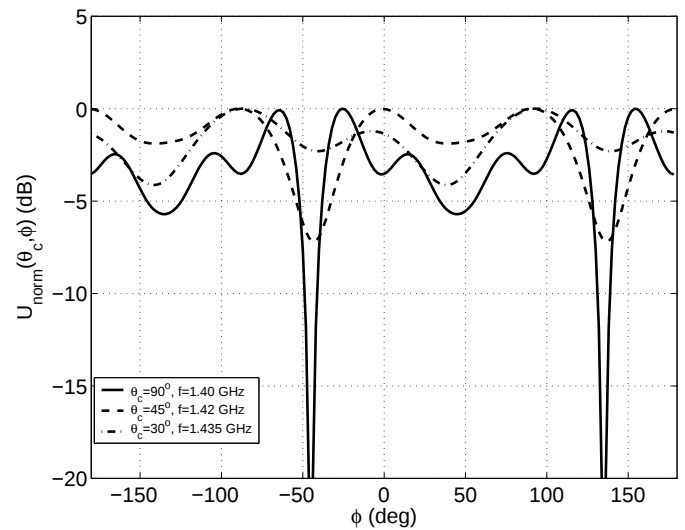


Figura 3. Diagrama de radiação para conjuntos de 4 elementos assimétricos esférico-trapezoidais, em $\theta = \theta_c$, e $\theta_c = 90^\circ$, 45° , e 30° . $r_1 = 18.5$ cm, $h = 3.8$ mm, $\varepsilon_r = 1$, $W_\theta = W_\phi = 10$ cm, $\phi_c(1) = 0^\circ$, $\phi_c(2) = 90^\circ$, $\phi_c(3) = 180^\circ$, e $\phi_c(4) = 270^\circ$, $d_\theta = 0$, $d_\phi = 4$ cm, $I_o(1) = I_o(2) = 1$ mA, $I_o(3) = I_o(4) = -1$ mA, e $W_f = 1$ cm.

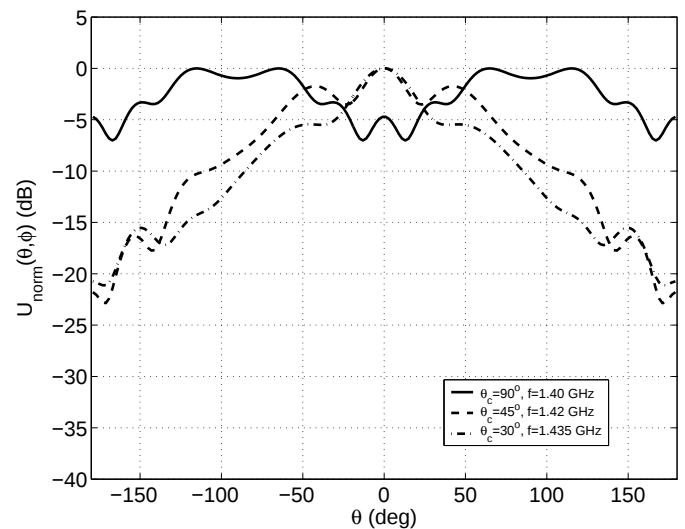


Figura 4. Diagrama de radiação para conjuntos de 4 elementos assimétricos esférico-trapezoidais, em $\phi = 0^\circ$, e $\theta_c = 90^\circ$, 45° , e 30° . $r_1 = 18.5$ cm, $h = 3.8$ mm, $\varepsilon_r = 1$, $W_\theta = W_\phi = 10$ cm, $\phi_c(1) = 0^\circ$, $\phi_c(2) = 90^\circ$, $\phi_c(3) = 180^\circ$, e $\phi_c(4) = 270^\circ$, $d_\theta = 0$, $d_\phi = 4$ cm, $I_o(1) = I_o(2) = 1$ mA, $I_o(3) = I_o(4) = -1$ mA, e $W_f = 1$ cm.

médias dependem do valor central θ_c . Para valores menores de θ_c a frequência de ressonância aumenta, enquanto o valor máximo da resistência diminui e a banda passante aumenta. Esses efeitos são devido às diferentes formas das antenas para diferentes valores de θ_c , como também devido ao acoplamento entre os elementos do conjunto.

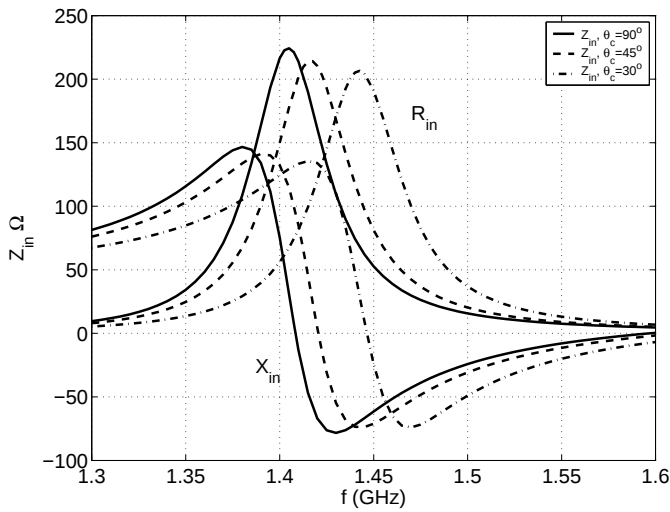


Figura 5. Impedância de entrada em cada antena de conjuntos de 4 elementos assimétricos esférico-trapezoidais, centrados em $\theta_c = 90^\circ$, 45° , e 30° . $r_1 = 18.5$ cm, $h = 3.8$ mm, $\epsilon_r = 1$, $W_\theta = W_\phi = 10$ cm, $\phi_c(1) = 0^\circ$, $\phi_c(2) = 90^\circ$, $\phi_c(3) = 180^\circ$, e $\phi_c(4) = 270^\circ$, $d_\theta = 0$, $d_\phi = 4$ cm, $I_o(1) = I_o(2) = 1$ mA, $I_o(3) = I_o(4) = -1$ mA, e $W_f = 1$ cm.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise de conjuntos de antenas esférico-trapezoidais, utilizando o método dos momentos. O acoplamento entre os elementos do conjunto é levado em consideração. Os resultados apresentados para conjuntos de antenas incluem diagramas de radiação, e impedância de entrada. Foi mostrado que a frequência de ressonância depende do ângulo centra θ_c , e que a banda passante aumenta à medida que as antenas se aproximam do eixo de simetria.

REFERÊNCIAS

- [1] K.-L. Wong, Design of Nonplanar Microstrip Antennas and Transmission Lines, John Wiley & Sons, 1999.
- [2] C. M. Krowne, Radiation efficiency for spherical-rectangular microstrip antenna, *AP-S International Symposium*, Vol.20:171-174, May 1982.
- [3] K. Y. Wu and J. F. Kauffman, Radiation Pattern for Spherical-Rectangular Microstrip Antennas, *IEEE Antennas Propagat. Int. Symposium Digest*, 1983, pp. 43-46.
- [4] W. Y. Tam and K. M. Luk, Patch antennas on a Spherical Body, *IEE Proc.-H.*, vol. 138, No.1, February 1991, pp. 103-108.
- [5] A. Das, S. K. Das and M. S. Narasimhan, Radiation Characteristics of Wraparound Microstrip Antenna on Spherical Body, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, pp. 1031-1034, July. 1991.
- [6] J. R. Descardec, A. C. C. Lima and A. J. Giarola, Microstrip antenna on a spherical surface, *AP-S Digest*, Vol. 2, pp. 820-23, June 1991.
- [7] W. Y. Tam and K. M. Luk, Far field analysis of spherical-circular microstrip antennas by electric surface current models, *IEE Proc.-H.*, vol. 138, No.1, February 1991, pp. 98-102.
- [8] B. Ke and A. A. Kishk, Analysis of spherical circular microstrip Antennas, *IEE Proc.-H.*, vol. 138, No.6, Dec. 1991, pp. 542-548.
- [9] A. A. Kishk, Analysis of Spherical Annular Microstrip Antennas, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, No.3, March. 1993, pp. 338-343.
- [10] W.-Y. Tam and K.-M. Luk, Resonance in spherical-circular microstrip structures, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.39, No.4, pp. 700-704, April 1991.
- [11] K.-L. Wong, S.-F. Hsiao and H.-T. Chen, Resonance and radiation of a superstrateloaded spherical-circular microstrip patch antenna, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.41, No. 5, pp. 686-690, May 1993.
- [12] W. Y. Tam, A. K. Y. Lai and K. M. Luk, Input Impedance of spherical microstrip antenna, *IEE Proc. Microw. Antennas Propagat.*, vol. 142, No.3, June 1995, pp. 285-288.
- [13] Z. Sipus, N. Burum, and J. Bartolic, Analysis of Rectangular Microstrip Patch Antennas on Spherical Structures, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 36, No. 4, pp. 276-80, February 20, 2003.
- [14] N. Burum, Z. Sipus, and J. Bartolic, Mutual Coupling between Spherical-Rectangular Microstrip Antennas, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 40, No. 5, pp. 387-91, March 5, 2004.
- [15] Z. Sipus, N. Burum, S. Skokic, and P.-S. Kildal, Analysis of Spherical Arrays of Microstrip Antennas using Moment Method in Spectral Domain, *IEE Proc. Microwave, Antennas and Propagation*, Vol. 153, No. 6, pp. 533-43, December 2006.
- [16] L. A. Costa, O. M. C. Pereira-Filho, and F. J. S. Moreira, Input Impedance of Rectangular Microstrip Antennas on Spherical Bodies using MoM and Attachment Modes, *IEEE AP-S 2006 Digest*, pp. 3947-50, 2006.
- [17] L. A. Costa, Antenas de Microfita Esférico-retangulares, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil, 2006.
- [18] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Method*, Macmillian, New York, 1968.
- [19] R. F. Harrington, *Time-harmonic Electromagnetic Ffields*, McGraw-Hill, New York, 1961.