

# Um método simples para ajustar a frequência de ressonância de uma FSS

Emanuele da Silva Rodrigues Montalvão, Augusto César Pereira da Silva Montalvão, Alfrêdo Gomes Neto, Adaildo Gomes D'Assunção e Laércio Martins de Mendonça

**Resumo** — Este artigo apresenta um método simples para ajustar a frequência de ressonância de uma FSS. A FSS analisada utiliza uma célula básica retangular, na qual são inseridas reentrâncias e as dimensões dessas reentrâncias são variadas, tornando possível o ajuste da frequência. Para isso, as estruturas são analisadas numericamente, utilizando o Método das Ondas - WCIP, e posteriormente são caracterizadas experimentalmente, comparando-se os resultados obtidos. É mostrado ainda, o comportamento dos campos elétrico e magnético, este último através do vetor densidade de corrente elétrica. São apresentadas sugestões para a continuidade deste trabalho.

**Palavras-chave** — FSS, frequência de ressonância, WCIP, análise numérica e experimental.

**Abstract** — This paper presents a simple method to adjust the frequency resonance of a FSS. The FSS analyzed uses a basic rectangular cell, in which are inserted two reentrance and the dimensions of these reentrance are varied, making it possible to adjust the frequency. To this end, the structures are analyzed numerically, using the Method of Waves - WCIP, and later are characterized experimentally, comparing the results obtained. It is shown the behavior of electric and magnetic fields, the latter through the electric current density vector. Are presented suggestions for the continuation of this work.

**Keywords** — FSS, resonance frequency, WCIP, numerical and experimental analyze.

## I. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos e o contínuo aumento da oferta de serviços de comunicações, em especial aplicações de comunicações sem fio, tem sido cada vez maior a demanda por estruturas que operem em diferentes faixas de frequência, e que atendam às características requeridas como largura de banda, seletividade, dimensões e pesos reduzidos, baixo custo, etc. As Superfícies Seletivas de Frequência (*Frequency Selective Surfaces*), ou simplesmente FSS, têm recebido grande interesse por atender a esses requisitos, bem como pela sua capacidade de se integrar com outros circuitos de micro-ondas.

---

Emanuele da Silva Rodrigues Montalvão<sup>1</sup>, Augusto César Pereira da Silva Montalvão<sup>1</sup>, Alfrêdo Gomes Neto<sup>2</sup>, Adaildo Gomes D'Assunção<sup>1</sup> e Laércio Martins de Mendonça<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, <sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Brasil, E-mails: manu.aps@hotmail.com, augusto.com.br@gmail.com, alfredogomes@ieee.org, adaildo@ct.ufrn.br, laercio@ct.ufrn.br.

As FSS são estruturas periódicas em uma ou duas dimensões que atuam como filtros espaciais, podendo ser formadas por elementos do tipo *patches* condutores ou aberturas, funcionando como filtros rejeita-faixa ou passa-faixa, respectivamente [1]. Esse tipo de estrutura tem um grande número de aplicações e vem contribuindo para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicações [2].

Um grande número de métodos tem sido usado para análise de FSS. Na literatura encontram-se fórmulas aproximadas, desenvolvidas para determinar as características de transmissão e reflexão em uma FSS [3]. Dentre esses métodos pode-se citar: Casamento Modal, Método dos Circuitos Equivalentes, Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), Método dos Momentos (MoM), Método dos Elementos Finitos (FEM) e Método das Ondas (WCIP).

A partir de meados dos anos 90 foi desenvolvido o Método das Ondas, um processo iterativo, mais conhecido na literatura por *Wave Concept Interactive Procedure*, WCIP, baseado em princípios relativamente simples e com diversas aplicações. O WCIP é um método de onda completa, baseado na incidência de uma onda transversal sobre uma superfície e no espalhamento dessa onda [4]. A necessidade relativamente reduzida de recursos computacionais e a flexibilidade quanto à forma da estrutura planar são características do WCIP, o que torna a sua aplicação particularmente interessante na análise de FSS [5].

Neste trabalho é apresentado um método simples para ajustar a frequência de ressonância de uma FSS, através da análise numérica e experimental de uma FSS com célula básica retangular, na qual são inseridas duas reentrâncias e as dimensões dessas reentrâncias são variadas, possibilitando o ajuste da frequência.

## II. PROJETO DA FSS

O método utilizado para ajustar a frequência de ressonância de uma FSS, consiste na introdução de duas reentrâncias de dimensões  $w$  e  $l$ , no elemento tipo *patch* retangular, como mostra a Figura 1.

Inicialmente a célula básica retangular é caracterizada numericamente utilizando o WCIP. A partir dessa célula, com a introdução das reentrâncias e a variação da dimensão  $l$ , realiza-se o ajuste da frequência de ressonância. Para avaliar a influência da introdução das reentrâncias, é analisado o comportamento dos campos elétrico e magnético, este último

através do vetor densidade de corrente elétrica, para a frequência de ressonância.

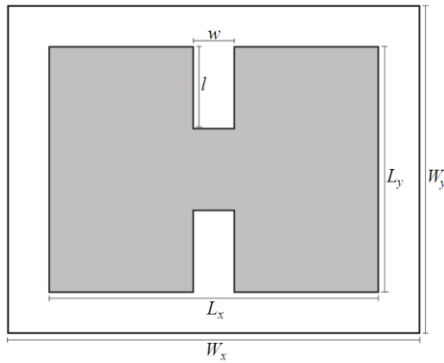


Fig. 1. Modelo da célula básica da FSS proposta.

Na análise numérica utilizando o WCIP, considera-se uma célula unitária de superfície  $S$ , sobre a qual é desenhada a estrutura a ser analisada. Para descrever essa estrutura, a superfície  $S$  é discretizada através de uma malha de  $n_x \times n_y$  pontos, originando uma malha de  $(n_x - 1) \times (n_y - 1)$  pixels,  $\Delta x \times \Delta y$ . Em cada pixel, a natureza da interface (superfície metálica, superfície magnética, superfície dielétrica, fonte ou carga) é descrita pelo respectivo operador espalhamento [6]. O processo de múltiplas reflexões é iniciado a partir de condições iniciais e finalizado quando a convergência é alcançada.

Na realização das simulações foi utilizado um programa computacional implementado na linguagem FORTRAN, chamado "wcpag07". Este programa foi executado em um computador pessoal, com processador Pentium Dual-Core, com relógio de 2 GHz e memória RAM de 2 GB. Em todas as simulações, para descrever a célula unitária, foram utilizados 151 x 101 pontos, definidos pela quantidade de pixels necessária para descrever as estruturas, sendo considerado que a convergência é alcançada com 500 iterações. Considerou-se o campo elétrico polarizado na direção  $x$ .

Para validar os resultados numéricos obtidos utilizando o WCIP, as estruturas foram caracterizadas experimentalmente, sendo a FSS composta por 10 x 12 células, 200 mm x 200 mm. O substrato utilizado foi o FR-4, com  $\epsilon_r = 4,4$  e altura  $h = 1,5$  mm. A faixa de frequência utilizada para a análise numérica e para a caracterização experimental foi de 7,0 a 13,5 GHz. Foi feita a medição da curva de referência e os valores obtidos foram subtraídos dos valores medidos para cada estrutura. A determinação das frequências de ressonância foi realizada a partir da simulação e medição do módulo coeficiente de transmissão,  $|S_{21}|$ . A Figura 2 mostra uma das FSS confeccionadas para as medições.

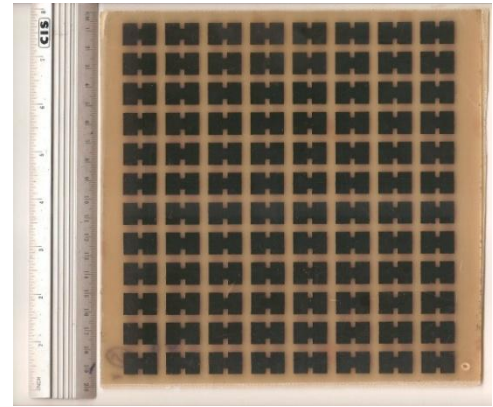


Fig. 2. FSS construída.

Por limitações técnicas, não foi possível fazer a medição das estruturas com  $l = 4$  mm e  $l = 5$  mm, pois tais estruturas apresentam frequência de ressonância fora da faixa dos equipamentos disponíveis para medição. Para estas estruturas foi realizada apenas a simulação utilizando a faixa de análise de 4,5 a 13,5 GHz.

### III. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Inicialmente, é analisada uma FSS com elementos tipo patch retangular, cujas dimensões da célula unitária são:  $W_x = 20$  mm;  $W_y = 16$  mm;  $L_x = 16$  mm e  $L_y = 12$  mm, como mostra a Figura 3.

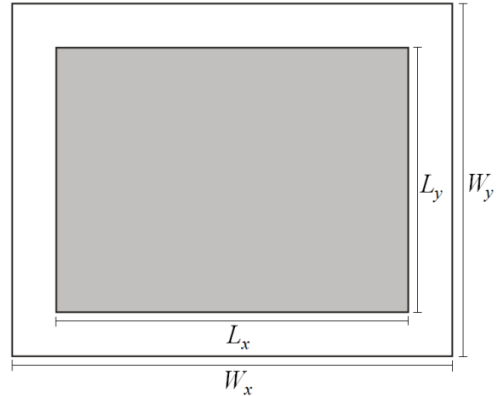


Fig. 3. Célula básica da FSS original.

A análise mostra que a FSS original possui frequência de ressonância em 11,8 GHz a -48 dB para a simulação e em 11,9 GHz a -41 dB para a medição, como pode ser visto na Figura 4.

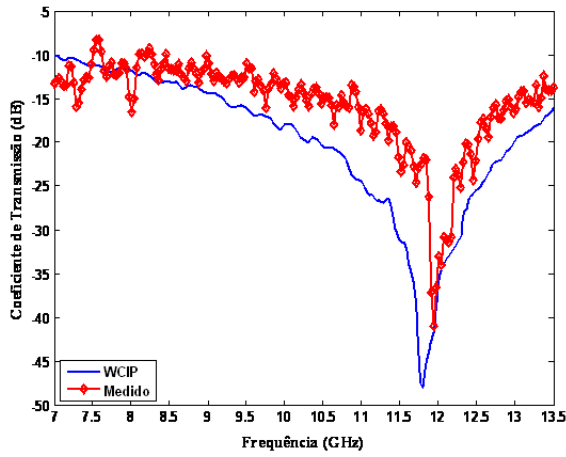


Fig. 4. Coeficiente de transmissão (dB) x frequência (GHz): FSS original.

A Figura 5 mostra o comportamento do campo elétrico gerado para a frequência de ressonância encontrada na simulação da FSS original. Verifica-se que a maior intensidade de campo elétrico encontra-se nas extremidades das laterais da estrutura. É importante notar que ao longo de  $x$ , no meio da estrutura, o campo elétrico é quase nulo.

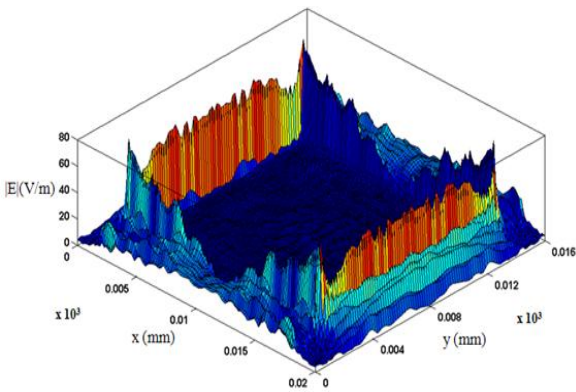


Fig. 5. Distribuição do módulo do campo elétrico na FSS original, na frequência de ressonância simulada, 11,8 GHz.

A Figura 6 mostra o comportamento da densidade de corrente elétrica gerada para a frequência de ressonância encontrada na simulação da FSS original. Observa-se que a maior densidade de corrente elétrica, é encontrada nas extremidades da parte superior e inferior da estrutura.

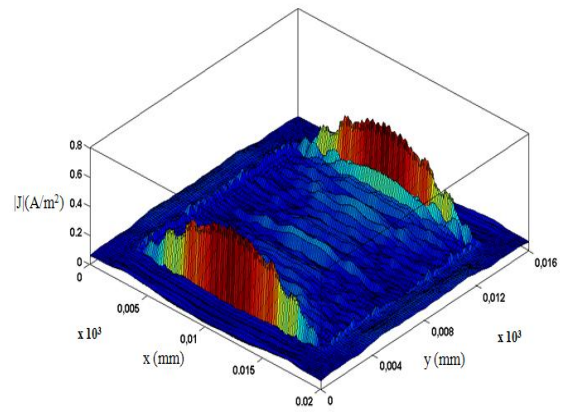


Fig. 6. Distribuição do módulo da densidade de corrente elétrica na FSS original, na frequência de ressonância simulada, 11,8 GHz.

Para as demais estruturas analisadas, foram mantidas as mesmas dimensões da FSS original, com a introdução de reentrâncias com dimensões  $w = 2$  mm e  $l$  variando de 1 mm a 5 mm, como ilustra a Figura 7.

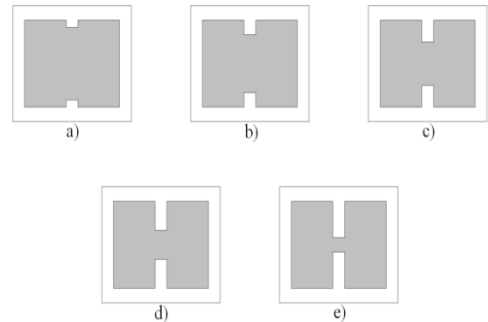


Fig. 7. FSS proposta ( $w = 2$  mm): a)  $l = 1$  mm; b)  $l = 2$  mm; c)  $l = 3$  mm; d)  $l = 4$  mm e e)  $l = 5$  mm.

A segunda FSS analisada ( $l = 1$  mm) possui frequência de ressonância em 10,8 GHz a -42 dB para a simulação e em 10,6 GHz a -40 dB para a medição, como pode ser visto na Figura 8.

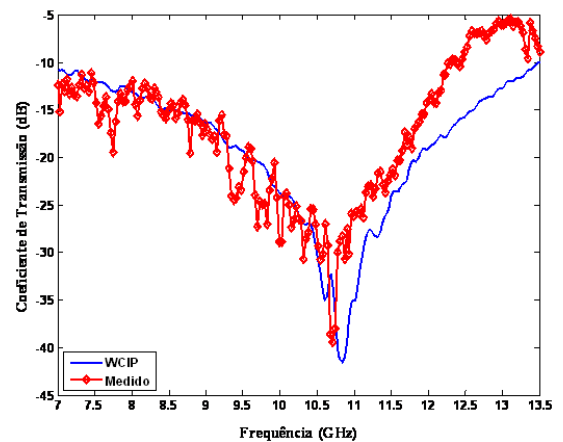


Fig. 8. Coeficiente de transmissão (dB) x frequência (GHz): 2ª FSS.

A Figura 9 mostra o comportamento do campo elétrico gerado para a frequência de ressonância encontrada na simulação da segunda FSS.

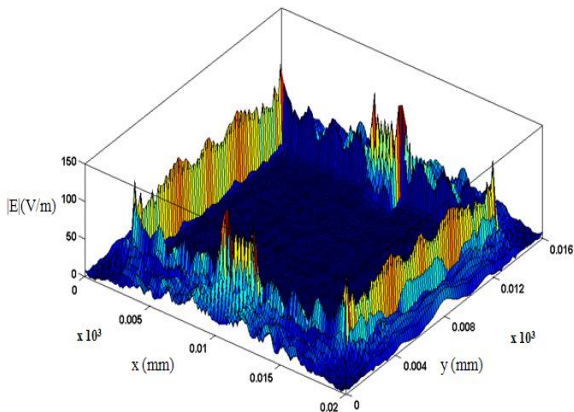


Fig. 9. Distribuição do módulo do campo elétrico na FSS original, na frequência de ressonância simulada, 10,8 GHz.

A Figura 10 mostra o comportamento da densidade de corrente elétrica gerada para a frequência de ressonância encontrada na simulação da segunda FSS.

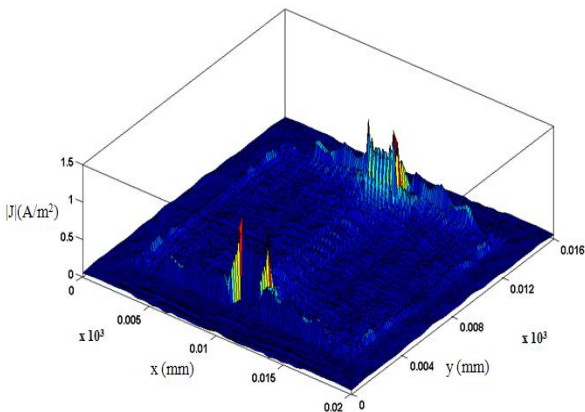


Fig. 10. Distribuição do módulo da densidade de corrente elétrica na FSS original, na frequência de ressonância simulada, 10,8 GHz.

Da análise do comportamento do campo elétrico e da densidade de corrente elétrica, para a frequência de ressonância simulada, percebeu-se que com a introdução das reentrâncias, tem-se uma intensidade de campo elétrico nas extremidades das laterais da estrutura, porém a maior intensidade agora se encontra centralizada na região das reentrâncias. Já em relação à densidade de corrente elétrica, nota-se que a maior densidade, tende a centralizar-se na região das reentrâncias, ficando cada vez mais próxima do centro da estrutura, o que é verificado também nas demais estruturas analisadas.

A terceira FSS analisada ( $l = 2$  mm) possui frequência de ressonância em 9,0 GHz a -53 dB para a simulação e em 9,2 GHz a -42 dB para a medição, como pode ser visto na Figura 11.

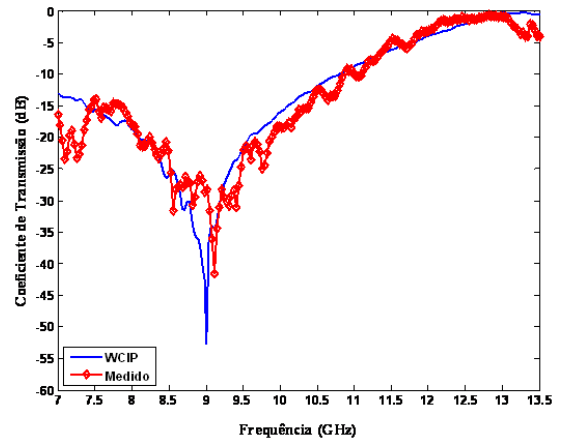


Fig. 11. Coeficiente de transmissão (dB) x frequência (GHz): 3ª FSS.

A quarta FSS analisada ( $l = 3$  mm) possui frequência de ressonância em 7,40 GHz a -49 dB para a simulação e em 7,45 GHz a -38 dB para a medição, como pode ser visto na Figura 12.

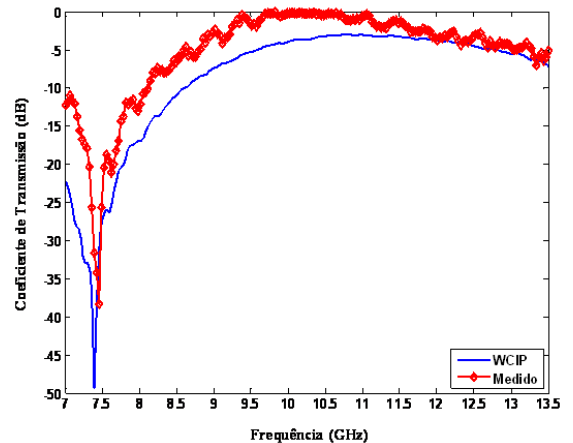


Fig. 12. Coeficiente de transmissão (dB) x frequência (GHz): 4ª FSS.

A Figura 13 mostra a variação da frequência de ressonância (GHz) em função de  $l$  (mm) obtida a partir das simulações e medições para todas as estruturas analisadas.

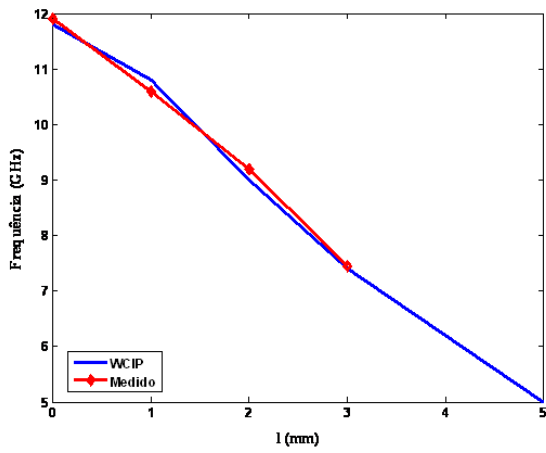


Fig. 13. Variação da frequência de ressonância (GHz) em função de  $l$  (mm).

A Tabela I mostra um resumo dos resultados obtidos. A diferença nos resultados pode ser atribuída às diferenças entre as dimensões das FSS simuladas e as dimensões reais das FSS.

TABELA I. RESULTADOS OBTIDOS

$l$ (mm)	$f$ (GHz) - Simulação	$f$ (GHz) - Medição	Erro (%)
0	11,8	11,9	0,84
1	10,8	10,6	1,85
2	9,0	9,2	2,22
3	7,4	7,45	0,67
4	6,2	-	-
5	5,0	-	-

#### IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados os resultados numéricos obtidos através do WCIP, para ajustar a frequência de ressonância de uma FSS, através da introdução de reentrâncias de dimensões  $w$  e  $l$ , em um elemento tipo *patch* retangular,

bem como os resultados experimentais, comparando-se os resultados obtidos. Foram mostrados os efeitos na frequência de ressonância, ocorridos com a variação da dimensão  $l$ , mantendo-se o  $w$  constante.

A FSS original possui uma frequência de ressonância em 11,8 GHz e a partir da introdução da reentrância,  $w = 2$  mm, e com a variação da dimensão  $l$ , essa frequência foi reduzida até 5,0 GHz. Além da variação de  $l$ , foi mostrado o comportamento dos campos eletromagnéticos.

Os resultados obtidos indicam aplicabilidade do método proposto na sintonia de FSS, assim como instigam a investigação de diversas outras aplicações, incluindo aplicações com faixas mais largas de rejeição e aplicações multibanda. É possível analisar ainda, os efeitos da variação de  $w$  e a influência da polarização do campo elétrico.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro prestado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e o suporte técnico prestado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicações Sem Fio – INCT – CSF da UFRN e pelo Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado – GTEMA do IFPB.

#### REFERÊNCIAS

- [1] R. M. S. Cruz, “Análise e otimização de superfícies seletivas de frequência utilizando redes neurais artificiais e algoritmos de otimização natural”, Tese de Doutorado, UFRN, Natal - RN, Brasil, 2009.
- [2] B. A. Munk, “Frequency Selective Surfaces – Theory and design”, John Wiley and Sons, Nova York, EUA, 2000.
- [3] A. L. P. S. Campos, “Estudo da flexibilidade de projeto de Superfícies Seletivas de Frequência”, II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa, PB, Brasil, 2007.
- [4] A. L. Lima, A. N. Silva, F. M. Pontes, I. S. Araújo e A. Gomes Neto, “Redução da complexidade geométrica de estruturas fractais”, Anais do MOMAG 2010, em CD-ROM, p. 141 - 146, Vila Velha - ES, Brasil, 2010.
- [5] M. Titaouine; A. Gomes Neto; H. Baudrand; F. Djahli, “Determination of metallic ring FSS scattering characteristics using WCIP method”, *Microwave and Optical Technology Letters*, v.50, pp.1324 - 1328, 2008.
- [6] D. Bajon, S. Wane, M. Titaouine, H. Baudrand e A. Gomes Neto, “Resolução de problemas eletromagnéticos usando wcip - parte I: formulação teórica”, Anais do MOMAG 2006, em CD-ROM, Belo Horizonte - MG, Brasil, 2006.