

Caracterização numérica do efeito do diodo PIN em superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis utilizando o Método Iterativo das Ondas

Alfrêdo Gomes Neto^[1], Sérgio Madruga Sales Filho^[2]

[1] alfredogomes@ifpb.edu.br. [2] sergiomadruga.sales@gmail.com. Instituto Federal da Paraíba – IFPB Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado – GTEMA

RESUMO

A caracterização numérica é uma importante etapa de projeto, pois minimiza a construção de protótipos e otimiza resultados, sendo a escolha da técnica a ser utilizada um aspecto de fundamental importância. Nesse contexto, uma análise da caracterização numérica de superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis – RFSS (*Reconfigurable frequency selective surface*) –, tendo como elemento ativo o diodo PIN, a partir da aplicação do Método Iterativo das Ondas – WCIP (*Wave Concept Iterative Procedure*) –, é apresentada neste trabalho. O diodo PIN é numericamente substituído por uma resistência, o que corresponde a uma região de cargas, sendo possível observar como a resposta em frequência da RFSS é alterada pela variação dessa resistência equivalente, incluindo a sua região de transição. As dimensões da região de cargas equivalente ao diodo PIN e a variação do valor da resistência são avaliadas, o que corresponde a diferentes níveis de excitação DC do diodo PIN. Os resultados obtidos são comparados aos casos ideais do curto circuito e do circuito aberto, observando-se uma boa concordância para o valor da frequência de ressonância. Além disso, verifica-se que a técnica proposta descreve o comportamento da RFSS inclusive na região de transição do diodo PIN, o que é um resultado bastante interessante, indicando a aplicabilidade da metodologia apresentada.

Palavras-chave: FSS. RFSS. WCIP. Diodo PIN.

ABSTRACT

Numerical characterization is an important design step, since it minimizes the construction of prototypes and optimizes results. The choice of the technique to be used is an aspect of fundamental importance. In this context, this paper presents an analysis of the numerical characterization of reconfigurable frequency selective surfaces, RFSS, using the PIN diode as an active element, from the application of the Wave Concept Iterative Procedure, WCIP, is presented in this paper. The PIN diode is numerically replaced by a resistor, which corresponds to a load region, and it is possible to observe how the frequency response of the RFSS is altered by the variation of this equivalent resistance, including its transition region. The dimensions of the load region equivalent to the PIN diode and the resistance value variation are evaluated, which corresponds to different DC bias levels of the PIN diode. The results obtained are compared to the ideal cases of the short circuit and the open circuit, observing a good agreement for the value of the resonant frequency. Moreover, it has been verified that the proposed technique describes the behavior of the RFSS including in the transition region of the PIN diode, which is a very interesting result, indicating the applicability of the presented methodology.

Keywords: FSS. RFSS. WCIP. Diode PIN.

1 Introdução

A caracterização numérica é uma importante etapa de projeto, pois permite prever o comportamento da estrutura estudada, minimizando a construção de protótipos e otimizando resultados. Com a atual disponibilidade de recursos computacionais, de *hardware* e de *software*, a caracterização numérica encontra aplicações em praticamente todas as áreas da atividade humana, da saúde às telecomunicações, da agricultura à música (AYUGA, 2015; CHAPRA, CANALE, 2015).

No caso específico das telecomunicações, o crescente número de usuários e a diversidade de aplicações dos sistemas de comunicações, assim como as demandas impostas pela ainda incipiente massificação das tecnologias relacionadas à Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) (WILLIAN, 2016; BNDES, 2017) têm imposto desafios cada vez maiores aos engenheiros de telecomunicações. Considerando as limitações do espectro de frequência, assim como a limitada disponibilidade de espaço físico para instalação de antenas, torna-se necessário otimizar a utilização das faixas de frequências disponíveis e das antenas. Portanto, apresentar soluções tecnológicas que permitam separar os sinais desejados dos indesejados, ou redirecionar sinais, assume um papel de fundamental importância. Nesse contexto, a utilização de superfícies seletivas em frequência reconfiguráveis – *Reconfigurable Frequency Selective Surfaces* (RFSS) – vem sendo intensivamente investigada.

Em Costa (2016) foi apresentada uma RFSS baseada na geometria estrela de quatro braços tipo fenda com bordas, utilizando como elemento ativo diodos PIN. Trabalho semelhante foi apresentado em Evangelista (2018), também utilizando o diodo PIN como elemento ativo. Em ambos os casos, um dos problemas identificados foi a caracterização numérica do diodo PIN quando aplicado na RFSS.

Neste trabalho é apresentada uma análise da caracterização numérica de uma RFSS baseada na geometria estrela de quatro braços utilizando o Método Iterativo das Ondas (WCIP, *Wave Concept Iterative Procedure*), aproveitando as vantagens já observadas para esse método, além de ser uma ferramenta numérica cuja implementação foi desenvolvida no próprio GTEMA-IFPB. Os resultados numéricos obtidos consideram diferentes valores de resistência equivalente ao diodo PIN, assim como diferentes valores das áreas correspondentes a essa região.

Comparados aos casos do curto circuito e do circuito aberto ideal, observa-se uma boa concordância com os valores das frequências de ressonância, incluindo efeito da região de transição do diodo PIN, o que indica a aplicabilidade da metodologia apresentada.

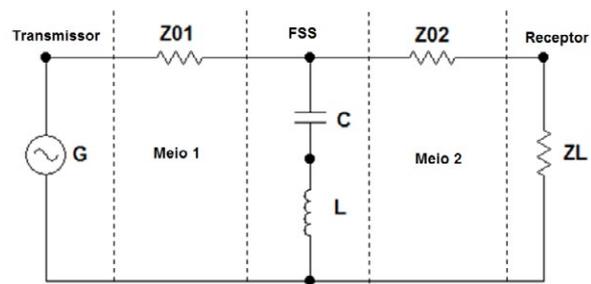
2 Fundamentação teórica

Nesta seção são apresentados os três principais fundamentos utilizados neste trabalho: FSS, WCIP e o diodo PIN.

2.1 FSS

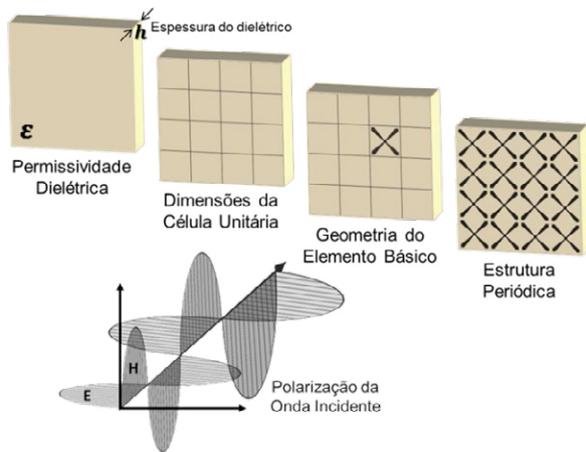
Basicamente, uma FSS comporta-se como um circuito LC, como ilustrado na Figura 1. Ao serem introduzidas modificações em sua geometria, esse circuito LC é modificado, passando a apresentar novos elementos reativos (VARDAXOGLU, 1997; SILVA, 2014). Entretanto, esses elementos reativos não são determinados analiticamente, sendo fortemente influenciados por fatores tais como dimensões, posicionamento e orientação do detalhe, polarização do campo elétrico e ordem do modo ressonante (LIMA, 2014; MOURA 2015; GOMES NETO *et al.*, 2016; COSTA, 2016), ilustrados na Figura 2. Um dos métodos utilizados para determinar a resposta em frequência de uma FSS é a aplicação do Método Iterativo das Ondas (WCIP) (GOMES NETO *et al.*, 2013; TITAUOINE *et al.*, 2013; BAUDRAND, TITAUOINE, RAVUE, 2016).

Figura 1 – Ilustração do circuito LC equivalente a uma FSS



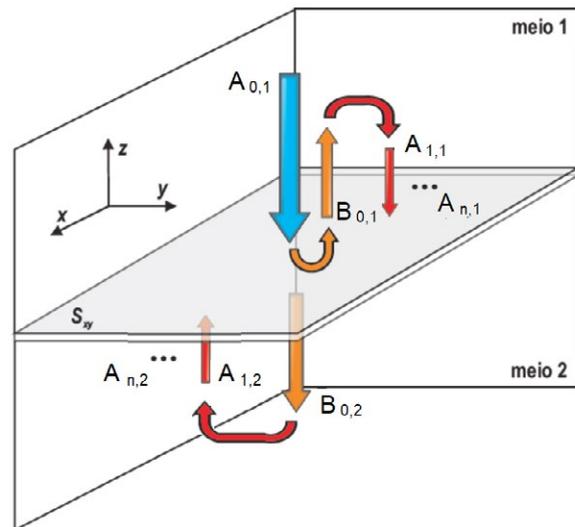
Fonte: Silva (2014)

Figura 2 – Ilustração do circuito LC equivalente a uma FSS



Fonte: Ramos (2016)

Figura 3 – Incidências e reflexões no Método Iterativo das Ondas, WCIP



Fonte: Lima (2014)

2.2 WCIP

O Método Iterativo das Ondas (WCIP) baseia-se em um princípio relativamente simples, que pode ser ilustrado a partir de Figura 3, em que:

- 1) Os dois meios, 1 e 2, em uma região limitada do espaço, estão separados por uma superfície S ;
- 2) Uma onda $A_{0,1}$ incide perpendicularmente na superfície S , a partir do meio 1, direção Z , sentido negativo;
- 3) Ao incidir sobre a superfície, a onda $A_{0,1}$ sofre dois processos:
 - 3.1) Uma parte passa para o meio 2, $B_{0,2}$, direção Z , sentido negativo;
 - 3.2) Outra parte é refletida, $B_{0,1}$, na direção Z , sentido positivo;
- 4) Em função dos limites e das condições de propagação na região 1, a onda $B_{0,1}$ sofre uma nova reflexão, dando origem a onda $A_{1,1}$;
- 5) A onda $A_{1,1}$ incide perpendicularmente na superfície S e o processo se repete;
6. Analogamente, a onda $B_{0,2}$ sofre uma reflexão no meio 2, dando origem a onda $A_{1,2}$.

Após a k -ésima repetição do processo, a onda resultante sobre a superfície S será a soma de todas as ondas incidentes e refletidas. Se parte da potência é absorvida a cada iteração, seja pelas características da superfície S , ou pelas condições de propagação nos meios 1 e 2, o processo converge e os somatórios das ondas incidentes, A , e refletidas, B , podem ser determinados. Matematicamente,

$$\vec{B} = S_{xy} \cdot (\vec{A} + \vec{A}_0) \quad (1)$$

$$\vec{A} = \Gamma \cdot \vec{B} \quad (2)$$

em que:

S_{xy} descreve o comportamento da onda ao incidir sobre a superfície;

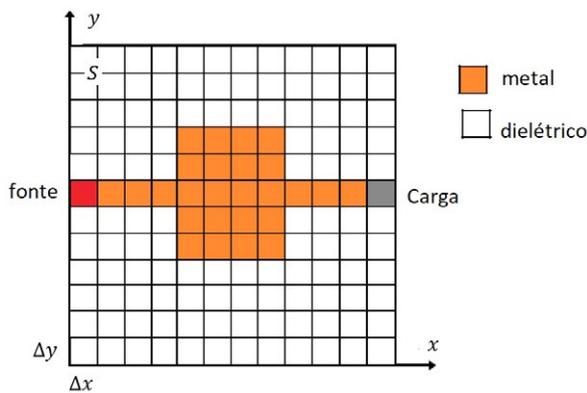
Γ descreve o comportamento da onda ao se propagar no meio;

A_0 é a onda inicial, análoga a uma fonte, que dá origem ao processo iterativo.

Portanto, os pontos a serem analisados são dois: a incidência/reflexão da onda na superfície S e a propagação/reflexão da onda no meio.

Para descrever o circuito a ser analisado, a região S é discretizada em *pixels* de dimensão $\Delta x \times \Delta y$, em que cada *pixel* descreve as propriedades da região que delimita, podendo ser metal, isolante, dielétrico, fonte ou carga, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Discretização do circuito em pixels



Fonte: Elaborada pelos autores

O Método Iterativo das Ondas encontra-se descrito na literatura específica (BAUDRAND, TITAOUINE, RAVUE, 2016; TITAOUINE *et al.*, 2013) e não será detalhado neste artigo.

2.3 Diodo PIN

O diodo PIN é um dispositivo semicondutor que opera como um resistor variável em aplicações de RF e micro-ondas. Basicamente, é um dispositivo semicondutor de silício constituído de uma camada de material intrínseco de alta resistividade, de área e espessura finitas, contida entre camadas altamente dopadas de materiais tipo P e N, cuja impedância, nas frequências de micro-ondas, é controlada por uma excitação DC (HEWLETT PACKARD, 1999). Os diodos PIN são considerados bons comutadores, uma vez que sua impedância pode ser alterada a partir de um valor muito alto para quase zero em um reduzido intervalo de tempo, por meio do controle por valores reduzidos de corrente DC.

Basicamente, existem dois pontos de operação do diodo PIN: a polarização direta e a reversa. Na polarização direta (estado *ON*), uma grande quantidade de portadores é injetada na camada intrínseca, resultando na elevação da condutividade do material, sendo que essa elevação na condutividade pode ser interpretada como a diminuição da resistência do componente. Na polarização reversa (estado *OFF*), acontece um acúmulo de cargas nas regiões de alta dopagem P e N, e esse acúmulo de cargas resulta em uma resistência elevada. Sob essas circunstâncias, o diodo PIN comporta-se como uma resistência quase pura na faixa de frequência RF, com um valor de resistência que pode ser variado sobre uma faixa de

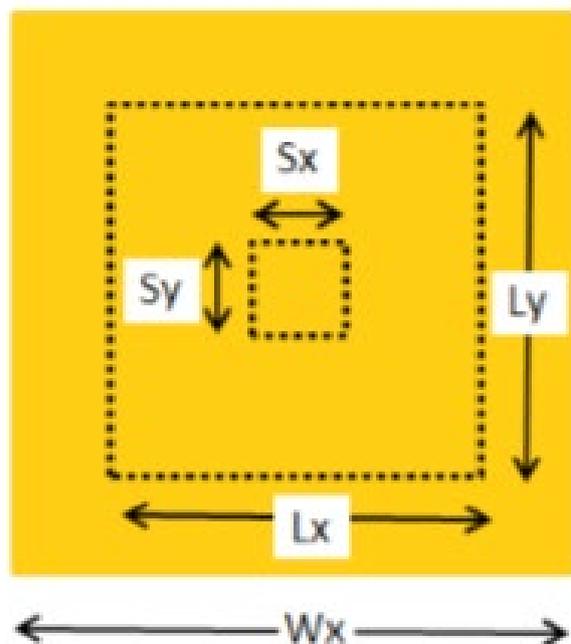
aproximadamente 1 Ω até 10 kΩ, por meio do uso de uma tensão DC ou de uma corrente de controle de baixa frequência.

Dessa forma, neste artigo é investigada a caracterização numérica do diodo PIN utilizando o WCIP, por meio da inserção de uma região, como será descrito na seção 3.

3 FSS reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços utilizando o diodo PIN

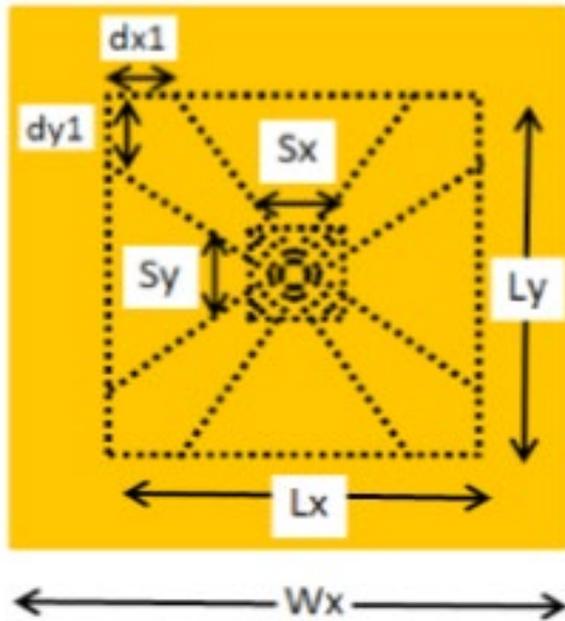
A geometria estrela de quatro braços vem sendo estudada no GTEMA-IFPB e aplicada às RFSS (GOMES NETO *et al.*, 2013; MOURA, 2015; COSTA, 2016; EVANGELISTA, 2018). O projeto inicia-se com uma célula unitária com dimensões W_x e W_y , ilustrada na Figura 5. Em seguida, é adicionado um *patch* retangular convencional, com dimensões L_x e L_y , e o ponto de comutação, com dimensões S_x e S_y , localizado no centro do *patch*. O ponto de comutação é delimitado ao centro do *patch*, com dimensões S_x e S_y . As dimensões dos braços da estrela são definidas por L_x , L_y (mesmas dimensões do), $dx1$, $dy1$ (espaçamento da fenda triangular ao vértice do *patch* retangular) e, posteriormente, diagonais das extremidades dos braços da estrela são traçadas até o canto oposto do ponto de comutação, ilustradas na Figura 6.

Figura 5 – Célula básica e ponto de comutação



Fonte: Evangelista (2018)

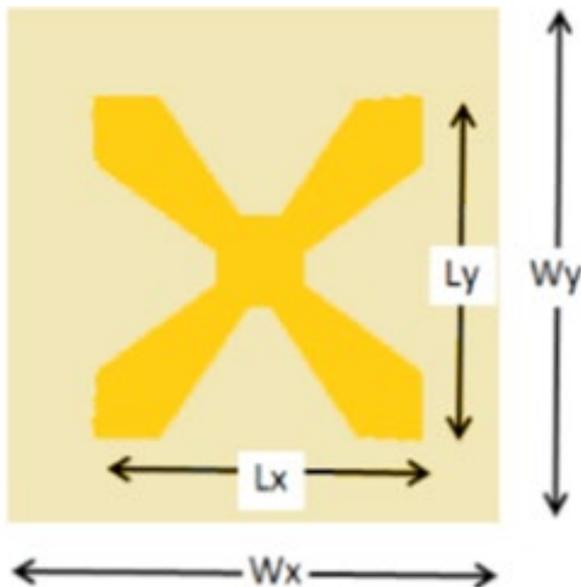
Figura 6 – Linhas partindo das bordas do patch até o ponto de comutação



Fonte: Evangelista (2018)

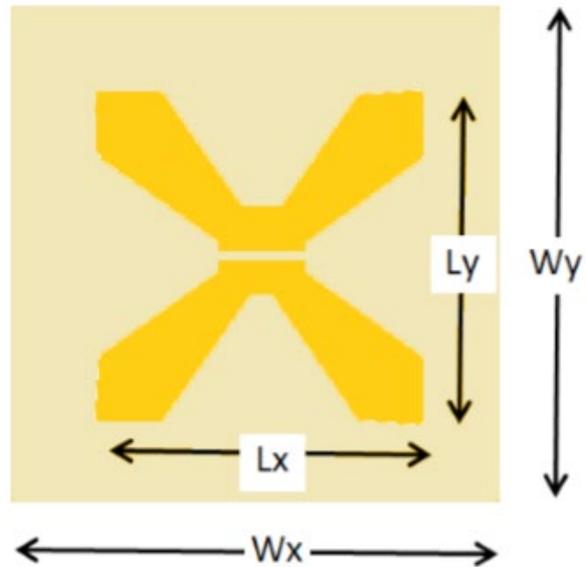
Finalmente, é retirada a parte da camada de metalização em que não constitui a estrela de quatro braços, obtendo-se a estrutura desejada, visualizada na Figura 7. Para inserir um elemento de comutação, um diodo PIN, por exemplo, é introduzida uma fenda no ponto de comutação, separando os braços inferior e superior, como ilustrado na Figura 8.

Figura 7 – Geometria estrela de quatro braços



Fonte: Evangelista (2018)

Figura 8 – Fenda para inserção do elemento de comutação



Fonte: Evangelista (2018)

O cálculo das dimensões da FSS é geralmente baseado na experiência do engenheiro de micro-ondas, juntamente com um processo de otimização numérica. Entretanto, equações para obtenção das dimensões iniciais e a estimativa das frequências de ressonância auxiliam no procedimento de projeto. Para a geometria estrela de quatro braços, a Equação 3, proposta a partir da experiência acumulada no GTEMA-IFPB, fornece uma boa aproximação para a frequência de ressonância (f_{res}), especialmente quando $h \ll \lambda_0$:

$$f_{res} \text{ (GHz)} = \frac{0,3}{2 Lefe} \quad (3)$$

em que:

$$Lefe = Lx + Ly$$

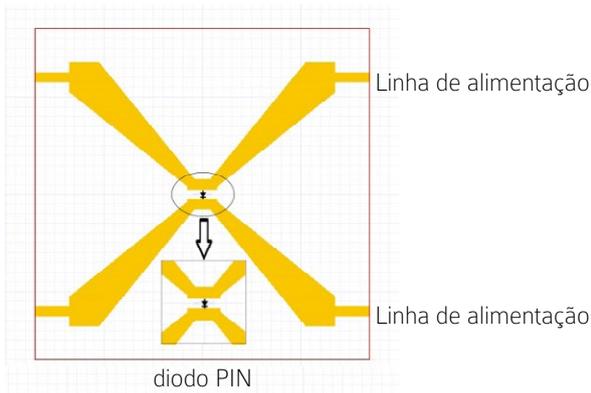
O diodo PIN é inserido no ponto de comutação, sendo necessária a introdução de linhas de alimentação deste, situação ilustrada na Figura 9 (página seguinte).

Para realizar a simulação numérica do diodo PIN utilizando o WCIP, uma região de cargas no ponto de comutação é definida, sendo considerado o comprimento dessa região, Wx_d , para uma largura fixa, Wy_d , conforme ilustrado na Figura 10, na página seguinte.

4 Resultados numéricos

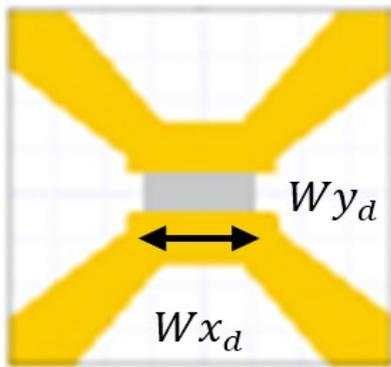
Para avaliar a caracterização do diodo PIN usando o WCIP, foi considerada a RFSS estudada em Evangelista (2016), cuja célula unitária é ilustrada na Figura 11. Essa RFSS foi fabricada em um substrato de FR-4, com espessura de 1,6 mm, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas de 0,02. O diodo PIN utilizado foi o BAR 64-03 W, ilustrado na Figura 12 (INFINEON TECHNOLOGIES, 2009).

Figura 9 – Célula unitária da RFSS incluindo o diodo PIN e linhas de polarização



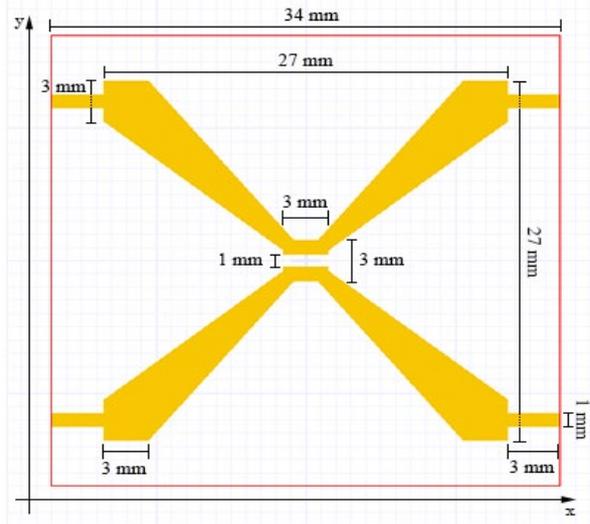
Fonte: Evangelista (2018)

Figura 10 – Detalhe da região de cargas para simulação usando o WCIP



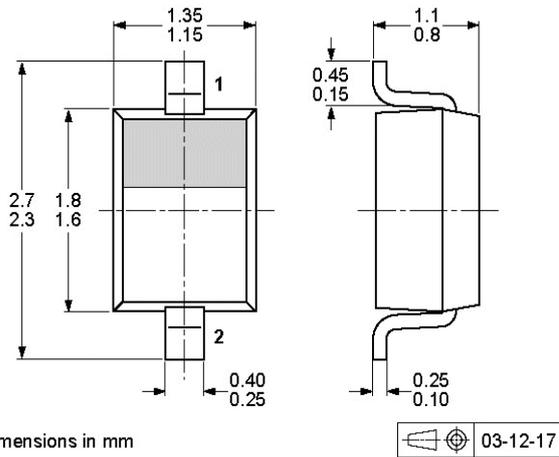
Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 11 – Célula básica da RFSS considerada

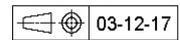


Fonte: Evangelista (2018)

Figura 12 – Diodo PIN BAR 64-03 W



Dimensions in mm



Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES (2019)

Como para o campo elétrico na direção x a polarização do diodo PIN (estados ligado e desligado) não afeta a resposta em frequência da RFSS, apenas a polarização y é considerada.

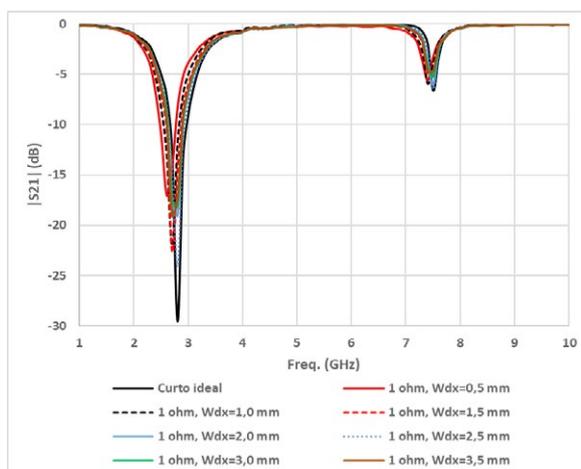
Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa WCIPAG10, desenvolvido no GTEMA-IFPB. Em todas as simulações foram utilizados 151 x 151 pontos para discretização da célula unitária e 200 iterações.

Inicialmente, o diodo foi considerado como um curto circuito ideal, $R = 0 \Omega$, $Wx_d = 3,0 \text{ mm}$. Em seguida, o curto circuito ideal foi substituído por uma resistência de $1,0 \Omega$, o que é um valor menor do especificado pelo fabricante para a polarização direta do diodo PIN ($2,1 \Omega$). Na sequência, o valor de Wx_d

variou de $0,5 \text{ mm}$ até $3,5 \text{ mm}$, em intervalos de $0,5 \text{ mm}$. As respostas em frequência obtidas são apresentadas na Figura 13 e, em detalhe, na Figura 14. Observa-se que a partir de $1,0 \text{ mm}$ os valores da frequência de

ressonância são muito próximos, variando de $2,6 \text{ GHz}$ a $2,8 \text{ GHz}$. Embora apresentem uma diferença quanto à intensidade da ressonância, os valores obtidos indicam uma boa convergência quando comparados ao curto circuito ideal.

Figura 13 – Resposta em frequência para $R = 1 \Omega$, variando o valor de Wx_d

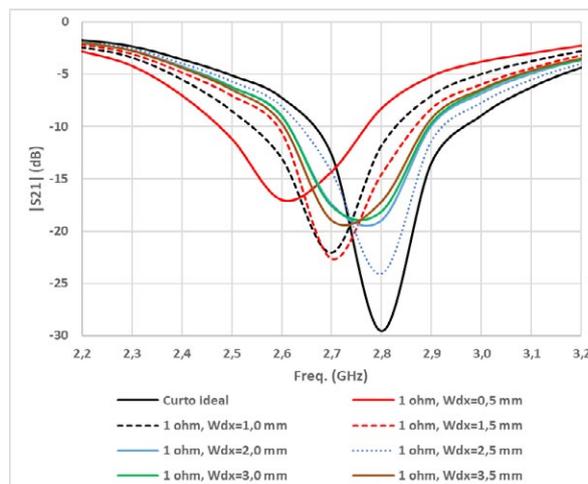


Fonte: Elaborada pelos autores

Na Figura 15 são apresentados os resultados obtidos considerando uma resistência $R = 10 \Omega$. Novamente, uma boa concordância da frequência de ressonância é observada, independentemente do valor de Wx_d .

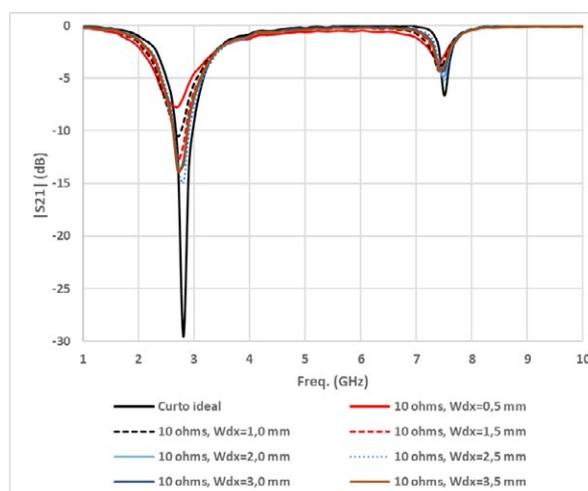
Na Figura 16 são apresentados os resultados obtidos considerando uma resistência $R = 1000 \Omega$. Observe-se que esse caso se aproxima mais de um circuito aberto ideal. Dessa forma, ao ser aumentado o valor de Wx_d , ocorre uma variação da intensidade da ressonância, mas não o seu deslocamento.

Figura 14 – Resposta em frequência para $R = 1 \Omega$, variando o valor de Wx_d – Escala ampliada



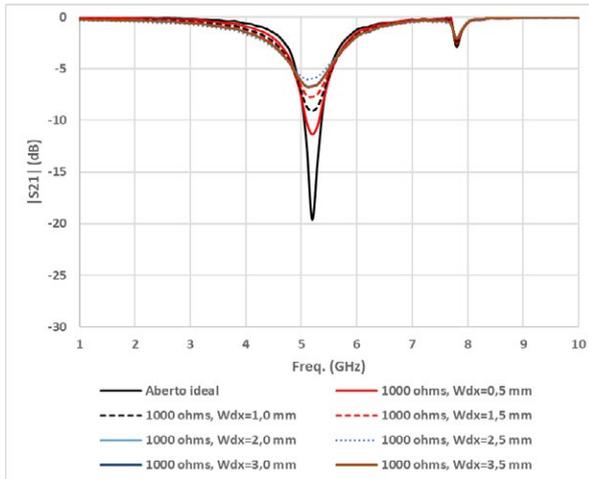
Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 15 – Resposta em frequência para $R = 10 \Omega$, variando o valor de Wx_d .



Fonte: Elaborada pelos autores

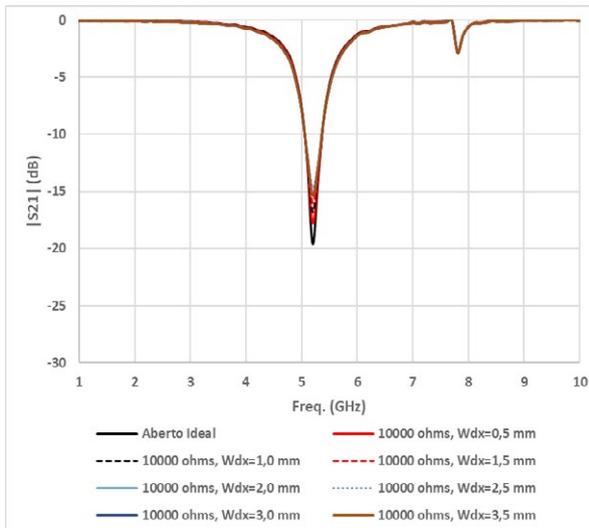
Figura 16 – Resposta em frequência para $R = 1000 \Omega$, variando o valor de Wx_d .



Fonte: Elaborada pelos autores

Para $R = 10000 \Omega$ os resultados são apresentados na Figura 17. Observa-se que a variação da intensidade da ressonância, quando comparada ao caso em que $R = 1000 \Omega$, é bem menor para os mesmos valores de Wx_d .

Figura 17 – Resposta em frequência para $R = 10000 \Omega$, variando o valor de Wx_d .

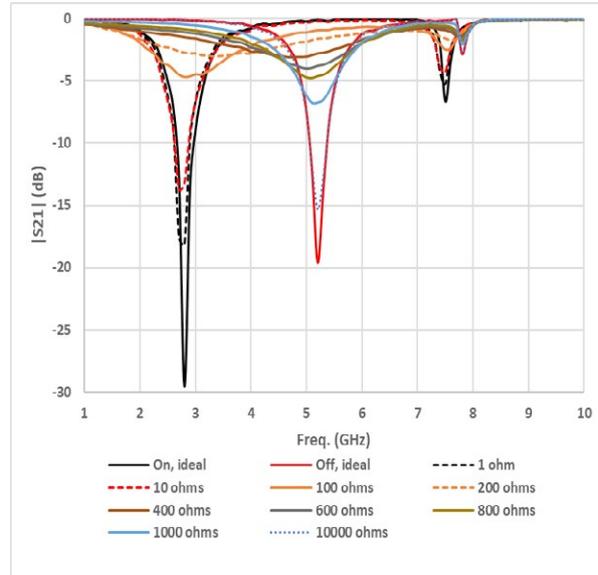


Fonte: Elaborada pelos autores

Considerando um valor fixo de $Wx_d = 3,0 \text{ mm}$, na Figura 18 os resultados para uma variação de R são apresentados, sendo observado o deslocamento da frequência de ressonância da região de curto circuito ideal para circuito aberto ideal. Destaca-se a resposta em frequência para $100 \Omega \leq R \leq 400 \Omega$, na qual praticamente a RFSS não apresenta uma ressonância,

estando, esse resultado, de acordo com o observado em Mamedes (2018).

Figura 18 – Resposta em frequência para $Wx_d = 3,0 \text{ mm}$, considerando a variação de R .



Fonte: Elaborada pelos autores

5 Conclusões

Uma investigação da caracterização numérica do efeito do diodo PIN quando aplicado às RFSS, a partir da utilização do Método Iterativo das Ondas, foi apresentada neste trabalho. Um dos aspectos investigados foi a largura da região de cargas, equivalente numericamente ao diodo PIN, tanto para baixos valores de resistência como para valores elevados, correspondendo às situações ideais de curto circuito e circuito aberto.

Observou-se que para baixos valores de resistência, quanto maior a região de cargas, mais o resultado se aproxima do curto circuito ideal. Já para valores elevados de resistência, quanto menor a região de cargas, mais o resultado se aproxima do circuito aberto ideal. Portanto, a utilização de uma região de cargas com as dimensões da fenda correspondente ao ponto de comutação apresenta-se como uma boa opção. Note-se que os valores das frequências de ressonância, tanto para o curto circuito como para o circuito aberto, foram adequadamente determinados.

Destaque-se que a técnica proposta foi capaz de prever o comportamento da região de transição do diodo PIN, uma propriedade bastante interessante, na qual a RFSS praticamente não apresenta ressonância.

REFERÊNCIAS

- AYUGA, F. Present and future of the numerical methods in buildings and infrastructures areas of biosystems engineering. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 46, n. 1, p. 1-12, 2015.
- BAUDRAND, H.; TITAOUINE, M.; RAVUE, N. **The wave concept in electromagnetism and circuits: theory and applications**. London: Wiley, 2016.
- BNDES. **Internet das coisas: um plano de ação para o Brasil**. Versão 1.1. Rio de Janeiro: BNDES, 2017. Disponível em <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/pesquisaedados/estudos/estudo-internet-das-coisas-iot/estudo-internet-das-coisas-um-plano-de-acao-para-o-brasil>. Acesso em: ago. 2018.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers**. 7. ed. New York: McGraw Hill Education, 2015.
- COSTA, A. P. **Implementação de uma superfície seletiva em frequência reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- EVANGELISTA, T. S. **Desenvolvimento de superfície seletiva em frequência reconfigurável baseada na geometria estrela de quatro braços para aplicação em 2,4 GHz**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- GOMES NETO, A. *et al.* Four arms star: an useful geometry for switchable FSS. *In: SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE & OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC)*, 2013, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro: IEEE, 2013. p. 1-5.
- GOMES NETO, A. *et al.* Bandpass frequency selective surface using asymmetrical slot four arms star geometry. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 58, n. 5, p. 1105-1109, 2016.
- HEWLETT PACKARD. **Applications of PIN diodes (AN 922)**. 1999. Disponível em : <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-8666E.pdf>. Acesso em: jun. 2018
- INFINEON TECHNOLOGIES. BAR 64. 2009. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon-BAR64series-DS-v01_02-EN-1107806.pdf. Acesso em: ago. 2018.
- LIMA, I. S. S. **Caracterização de FSS com geometria em forma de estrela de quatro braços**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2014.
- MAMEDES, D. F. *et al.* Design of reconfigurable frequency selective surfaces including the PIN diode threshold region. **IET Microwaves Antennas & Propagation**, v. 12, n. 5, p. 1483-1486, 2018.
- MOURA, L. C. M. de. **Caracterização de FSS com geometria estrela de quatro braços tipo fenda**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- RAMOS, N. J. P. L. **Caracterização de antena tipo refletor de canto utilizando superfícies seletivas em frequência**, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- SILVA, A. N. da. **Caracterização de FSS com geometria em forma de U**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2014.
- TITAOUINE, M. *et al.* The WCIP Method: Theory and Applications. *In: PETROVA, V. M. (Org.) Advances in Engineering Research*. New York: Nova Science, 2013, cap. 5.
- VARDAXOGLU, J. C. **Frequency selective surfaces: analysis and design**. Taunton: Research Studies Press, 1997.
- WILLIAN, L. 4G LTE versus WiFi versus Bluetooth: what every aspiring IoT entrepreneur needs to know. **Remote Magazine**, 2016. Disponível em: <http://www.remotemagazine.com/main/articles/4g-lte-versus-wi-fi-versus-bluetooth-what-every-aspiring-iot-entrepreneur-needs-to-know/>. Acesso em: fev. 2017.