

# Estudo Numérico do Impacto da Adição de $\text{TiO}_2$ no substrato de $\text{Al}_2\text{O}_3$ em Antenas de Microfita

S. C. dos Santos, R. V. B. Campos, J. S. de Andrade e A. S. B. Sombra

**Resumo**— Este estudo investigou o impacto da adição de  $\text{TiO}_2$  em substratos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na fabricação de antenas de microfita operando em 5,2 GHz. Foram avaliadas diferentes concentrações de dopagem (2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%). Utilizando simulações no HFSS, observou-se que a adição de  $\text{TiO}_2$  influenciou o desempenho das antenas. A perda de retorno aumentou, a largura de banda diminuiu e tanto o ganho quanto a eficiência de radiação reduziram à medida que a concentração de  $\text{TiO}_2$  aumentou. A antena com 2,5% de  $\text{TiO}_2$  apresentou a melhor performance.

**Palavras-Chave**— Antenas de Microfita, Matriz Cerâmica, HFSS.

**Abstract**— This study investigated the impact of adding  $\text{TiO}_2$  to  $\text{Al}_2\text{O}_3$  substrates in the fabrication of microstrip antennas operating at 5,2 GHz. Different doping concentrations (2,5%, 5,0%, 7,5%, and 10,0%) were evaluated. Using HFSS simulations, it was observed that the addition of  $\text{TiO}_2$  influenced the antenna performance. Return loss increased, bandwidth decreased, and both gain and radiation efficiency reduced as the  $\text{TiO}_2$  concentration increased. The antenna with 2,5%  $\text{TiO}_2$  showed the best overall performance.

**Keywords**— Microstrip Antennas, Ceramic Matrix, HFSS.

## I. INTRODUÇÃO

As antenas são fundamentais para a telecomunicação, sendo indispensáveis na transmissão e recepção de sinais em várias aplicações. Em particular, as antenas de microfita têm ganhado destaque devido às suas características favoráveis, como baixo perfil, leveza, facilidade de fabricação e integração com circuitos impressos [1]. Essas características tornam esse tipo de antena uma solução interessante para diversas aplicações nos setores militar e civil, incluindo aeronaves, mísseis, satélites, navios, veículos terrestres, além de sistemas biomédicos e alarmes de intrusão [2].

O desempenho das antenas de microfita é fortemente influenciado pelas propriedades do material do substrato utilizado. Materiais cerâmicos são uma opção promissora para substratos devido aos seus altos valores de permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ), o que os torna excelentes para a miniaturização de antenas

[3]. Esses materiais permitem a fabricação de antenas menores em comparação com substratos tradicionais, como fenolite ( $\epsilon_r \approx 3,6$ ) e fibra de vidro ( $\epsilon_r \approx 4,4$ ), mantendo a mesma frequência de ressonância [4]. Nesse contexto, a escolha da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como substrato de antenas de microfita se destaca devido à sua alta permissividade relativa, fazendo dela uma excelente opção para a miniaturização de antenas [5] [6].

No entanto, a produção dessa cerâmica enfrenta um desafio significativo devido à exigência de altas temperaturas de sinterização, necessárias para garantir seu desempenho em aplicações na faixa de micro-ondas. Para contornar essa dificuldade na fabricação de cerâmicas de alumina, a adição de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) é uma solução eficaz. O  $\text{TiO}_2$  atua como um excelente agente de sinterização, permitindo a sinterização da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a temperaturas mais baixas, o que pode resultar em economia de energia e redução de custos na fabricação. Além disso, a adição de  $\text{TiO}_2$  pode aumentar a permissividade relativa do composto, promovendo uma maior miniaturização das antenas. Também altera o coeficiente de temperatura da frequência ressonante do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , melhorando a estabilidade térmica das propriedades dielétricas do material [7] [8].

O objetivo deste estudo é investigar a influência da adição de dióxido de titânio nas propriedades dielétricas de substratos de matriz cerâmica de alumina e, conseqüentemente, no desempenho de antenas de microfita projetadas para operar na frequência de 5,2 GHz.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II revisa os princípios das antenas de microfita e as propriedades dos substratos cerâmicos. A Seção III detalha a pesquisa bibliográfica, o design e as simulações das antenas de microfita. A Seção IV apresenta e analisa os resultados obtidos.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Antenas de Microfita

Uma antena é uma estrutura condutora ou dielétrica que facilita a irradiação eficiente de ondas eletromagnéticas no espaço. Ela funciona como um dispositivo de conversão, transformando a energia elétrica de uma linha de transmissão ou guia de onda em ondas eletromagnéticas que se propagam pelo espaço livre [9].

Existem diversos tipos de antenas, cada uma com suas características e aplicações específicas. Um tipo bastante utilizado é a antena de microfita, que é composta por três elementos principais. O *patch* é uma plaqueta metálica que atua como o elemento radiante e é posicionado sobre um substrato dielétrico. Este substrato isola o *patch* do plano de

Samuel Chaves dos Santos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), Instituto Federal do Ceará - Fortaleza - CE, e-mail: samuel.chaves.santos06@aluno.ifce.edu.br; Raphael Victor Barros Campos, Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, e-mail: raphaelvbc@gmail.com; Joacir Soares de Andrade, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), Instituto Federal do Ceará - Fortaleza - CE, e-mail: joacirsoares@yahoo.com.br; Antonio Sergio Bezerra Sombra, Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, e-mail: asbsombra@gmail.com. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (88887.950131/2024-00).

terra, uma superfície metálica situada abaixo dele. O *patch* das antenas de microfita pode apresentar diferentes formatos, entretanto, as formas retangulares e circulares são mais fáceis de serem fabricados e analisados [1].

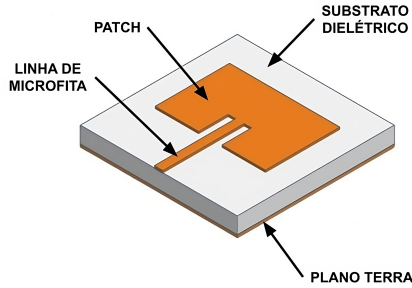


Fig. 1. Estrutura da antena de microfita retangular.

Para que o *patch* funcione como um elemento radiante, é essencial que seja adequadamente alimentado. As formas mais comuns de alimentar uma antena de microfita incluem a linha de microfita, a sonda coaxial, o acoplamento por abertura e o acoplamento por proximidade [10].

As antenas de microfita apresentam algumas limitações, tais como uma largura de banda estreita, baixa eficiência, baixa potência de operação, baixo ganho, emissão de radiação a partir da linha de alimentação e a possibilidade de surgimento de ondas de superfície [11].

### B. Matriz Cerâmica de Alumina e Dióxido de Titânio

A alumina possui uma permissividade relativa de aproximadamente 10 e à baixa tangente de perda  $\tan \delta$ , em torno de  $1,0 \cdot 10^{-5}$ . Além disso, apresenta um coeficiente de temperatura da frequência de ressonância  $\tau_f$  de  $-60 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Por outro lado, o dióxido de titânio possui uma permissividade relativa significativamente maior, cerca de 100, e um coeficiente de temperatura da frequência de ressonância de  $450 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  [12].

Campos investigou diferentes concentrações de  $\text{TiO}_2$  (2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%) em matrizes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Com 2,5% de  $\text{TiO}_2$ , o substrato apresentou uma permissividade relativa de 9,19, uma tangente de perda de  $1,10 \cdot 10^{-3}$  e um coeficiente de temperatura da frequência de ressonância de  $-22,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Aumentando a concentração para 5,0%, a permissividade relativa subiu para 10,15, enquanto a tangente de perda caiu ligeiramente para  $1,02 \cdot 10^{-3}$  e o coeficiente de temperatura da frequência de ressonância melhorou para  $-19,4 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Para uma concentração de 7,5%, observou-se um aumento na permissividade relativa para 10,99, uma redução na tangente de perda para  $9,15 \cdot 10^{-4}$  e o coeficiente de temperatura tornou-se positivo, atingindo  $16,0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Com 10,0% de  $\text{TiO}_2$ , a permissividade relativa alcançou 12,68, a tangente de perda foi  $8,23 \cdot 10^{-4}$  e o coeficiente de temperatura da frequência de ressonância subiu para  $28,0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  [12].

A adição de  $\text{TiO}_2$  ao  $\text{Al}_2\text{O}_3$  permitiu a sinterização dos compostos a  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , uma temperatura significativamente menor que os  $2050 \text{ }^\circ\text{C}$  normalmente exigidos para a sinterização do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  puro. Essa redução não só diminuiu o tempo e os custos de produção, mas também resultou em materiais com maior

densidade e menor porosidade, tornando-os mais adequados para aplicações em micro-ondas [12].

As matrizes cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  foram utilizadas com sucesso como Antenas Ressoradoras Dielétricas, operando de forma eficiente na Banda C. Esses resultados indicam que a matriz cerâmica de alumina com dióxido de titânio é uma opção promissora para substratos de antenas de microfita.

## III. METODOLOGIA

### A. Pesquisa bibliográfica

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre as propriedades elétricas, incluindo a permissividade relativa e a tangente de perda, das matrizes cerâmicas de alumina com adição de dióxido de titânio. Os valores dessas propriedades foram encontradas em [12] e estão apresentados na Tabela I.

TABELA I  
PROPRIEDADES ELÉTRICAS PARA CADA CONCENTRAÇÃO DE  $\text{TiO}_2$ .

% $\text{TiO}_2$	2,5%	5,0%	7,5%	10,0%
$\epsilon_r$	9,19	10,15	10,99	12,68
$\tan \delta$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$9,15 \cdot 10^{-4}$	$8,23 \cdot 10^{-4}$

### B. Design da Antena de Microfita

Para o *design* das antenas de microfita, foram projetadas quatro antenas, cada uma com uma concentração diferente de dióxido de titânio: 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10,0%. As antenas foram projetadas para operar na frequência de 5,2 GHz.

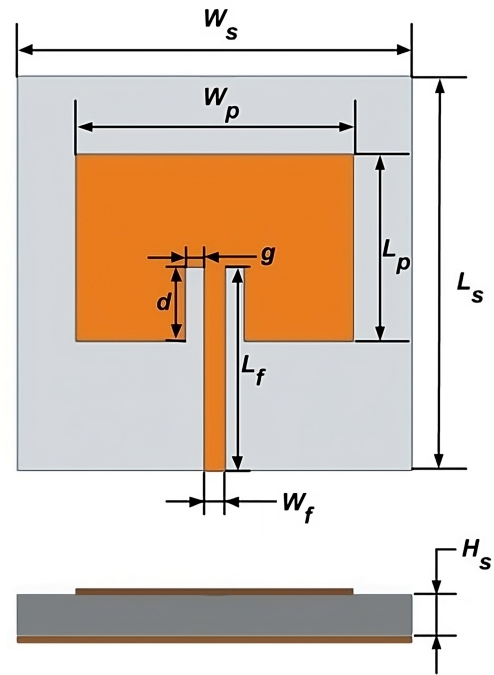


Fig. 2. Vista superior e frontal da antena de microfita retangular.

Para determinar a espessura do substrato  $H_s$ , será utilizada a equação (1) [13].

$$H_s \geq 0,06 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1)$$

Onde  $\lambda_0$  é comprimento de onda no espaço livre.

A equação (1) pode ser reescrita em função da frequência de ressonância  $f_r$ :

$$H_s \geq 0,06 \frac{c}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

Sendo  $c$  a velocidade da luz no espaço livre.

A largura  $W_p$  e o comprimento  $L_p$  do *patch* são calculados através das equações (3) e (4) [1].

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (3)$$

$$L_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_e}} - 0,412h \frac{(\varepsilon_e + 0,3)(W_p/h + 0,264)}{(\varepsilon_e - 0,258)(W_p/h + 0,8)} \quad (4)$$

Onde  $\varepsilon_e$  é a permissividade relativa efetiva, que é dada pela equação (5).

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_p}\right)^{-1/2} \quad (5)$$

A impedância de entrada do *patch*  $Z_{in}$  pode ser encontrada utilizando a equação (6).

$$Z_{in} = 90 \left(\frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1}\right) \left(\frac{L_p}{W_p}\right)^2 \quad (6)$$

Para calcular a largura da linha de microfita  $W_f$ , é utilizada a equação (7) [9].

$$\frac{W_f}{H_s} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & \frac{W_f}{H_s} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} [B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right\}], & \frac{W_f}{H_s} > 2 \end{cases} \quad (7)$$

Onde  $A$  e  $B$  são dados por:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r}\right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\varepsilon_r}}$$

Sendo  $Z_0$  a impedância característica da linha de microfita, cujo o valor será igual a 50  $\Omega$ .

As dimensões  $d$  e  $g$ , referentes à técnica de *inset feed*, são calculadas utilizando as equações (8) e (9) [13].

$$d = \frac{L_p}{\pi} \arccos \left( \sqrt{\frac{Z_0}{Z_{in}}} \right) \quad (8)$$

$$g = \frac{c}{\sqrt{2\varepsilon_e}} \frac{46,5}{f_r} \quad (9)$$

A largura mínima  $W_{smin}$  e o comprimento mínimo  $L_{smin}$  do substrato são obtidos através das equações (10) e (11) [14].

$$W_{smin} = 6H_s + W_p \quad (10)$$

$$L_{smin} = 6H_s + L_p \quad (11)$$

Neste projeto, o comprimento da linha de alimentação  $L_f$  é a medida do início da inserção da linha de alimentação no *patch* até a borda do substrato.

Os resultados obtidos dos cálculos estão apresentados na Tabela II.

TABELA II  
DIMENSÕES CALCULADAS DA ANTENAS DE MICROFITA.

%TiO <sub>2</sub>	2,5%	5,0%	7,5%	10,0%
$H_s$ (mm)	1,142	1,086	1,044	0,972
$L_p$ (mm)	9,273	8,836	8,501	7,927
$W_p$ (mm)	12,780	12,217	11,781	11,030
$L_f$ (mm)	7,1015	6,7995	6,5665	6,1655
$W_f$ (mm)	1,183	1,024	0,909	0,729
$g$ (mm)	0,673	0,641	0,616	0,574
$d$ (mm)	3,676	3,540	3,434	3,249
$L_s$ (mm)	16,124	15,355	14,766	13,760
$W_s$ (mm)	19,631	18,736	18,046	16,862

### C. Simulações

As simulações das quatro antenas de microfita foram realizadas no *software High Frequency Structure Simulator (HFSS)*, da Ansys, que utiliza a técnica de Elementos Finitos.

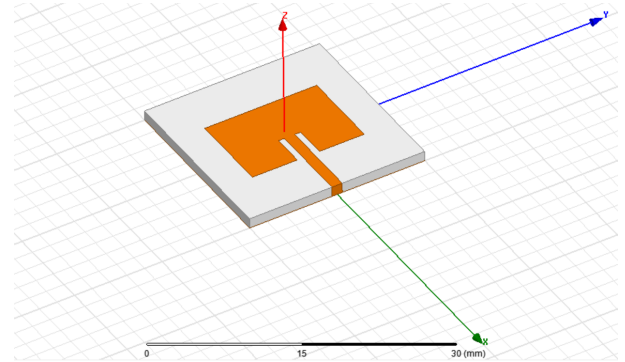


Fig. 3. Modelo da antena de microfita no software HFSS.

Para cada antena, as dimensões do *patch* e do substrato foram ajustadas após a simulação inicial, uma vez que as dimensões calculadas não atingiram a frequência de 5,2 GHz. As dimensões ajustadas das antenas são apresentadas na Tabela III.

TABELA III  
DIMENSÕES AJUSTADAS DA ANTENAS DE MICROFITA.

%TiO <sub>2</sub>	2,5%	5,0%	7,5%	10,0%
$H_s$ (mm)	1,142	1,086	1,044	0,972
$L_p$ (mm)	9,063	8,640	8,312	7,754
$W_p$ (mm)	12,778	11,988	11,344	10,527
$L_f$ (mm)	9,039	8,6225	8,1845	7,786
$W_f$ (mm)	1,183	1,024	0,909	0,729
$g$ (mm)	0,673	0,641	0,616	0,574
$d$ (mm)	3,5705	3,4425	3,3405	3,163
$L_s$ (mm)	20,0	19,0	18,0	17,0
$W_s$ (mm)	20,0	19,0	18,0	17,0

Para comparar o desempenho das antenas, foram analisados os seguintes parâmetros: perda de retorno, largura de banda, ganho e eficiência de radiação.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mostrado na Figura 4, há uma tendência de aumento da perda de retorno com o aumento da concentração de  $\text{TiO}_2$ . A antena com 2,5% de  $\text{TiO}_2$  apresentou a melhor performance, com a menor perda de retorno de -35.80 dB, sugerindo que uma pequena adição de  $\text{TiO}_2$  pode melhorar as propriedades dielétricas do substrato de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sem comprometer o desempenho da antena. No entanto, à medida que a concentração de  $\text{TiO}_2$  aumenta, a perda de retorno piora, atingindo -13.05 dB para a antena com 10,0% de  $\text{TiO}_2$ .

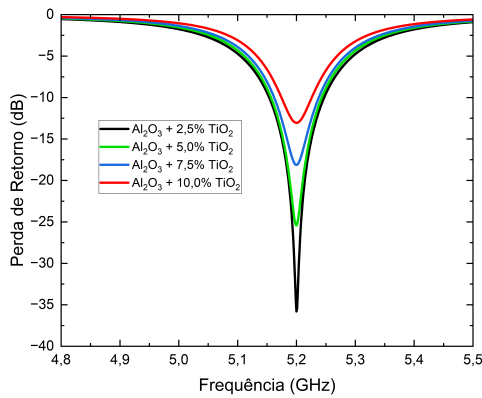


Fig. 4. Perda de retorno para cada concentração de  $\text{TiO}_2$ .

Além da perda de retorno, a largura de banda é outro parâmetro crucial para o desempenho das antenas. Observa-se que a largura de banda diminui com o aumento da concentração de  $\text{TiO}_2$ . A antena com 2,5% de  $\text{TiO}_2$  apresentou a maior largura de banda de 93 MHz, enquanto a antena com 10,0% de  $\text{TiO}_2$  apresentou a menor largura de banda de 52 MHz. Essa diminuição da largura de banda é atribuída ao aumento da permissividade elétrica relativa do substrato [2].

O ganho da antena diminui à medida que a concentração de  $\text{TiO}_2$  no substrato de  $\text{TiO}_2$  aumenta. Essa tendência é claramente visível nos diagramas de radiação dos planos E e H (Figuras 5 e 6), onde o valor do ganho em  $\theta$  igual a zero na frequência de 5,2 GHz diminui com o aumento da concentração de  $\text{TiO}_2$ . A antena com 2,5% de  $\text{TiO}_2$  apresentou o maior ganho de 4,57 dB, enquanto a antena com 10,0% de  $\text{TiO}_2$  apresentou o menor ganho de 3,92 dB.

A eficiência de radiação também diminuiu à medida que a concentração de  $\text{TiO}_2$  no substrato de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aumentou. Embora todas as antenas apresentem alta eficiência de radiação, a antena com 2,5% de  $\text{TiO}_2$  exibe a maior eficiência, de 95,91%, enquanto a antena com 10,0% de  $\text{TiO}_2$  mostra a menor eficiência, de 94,97%.

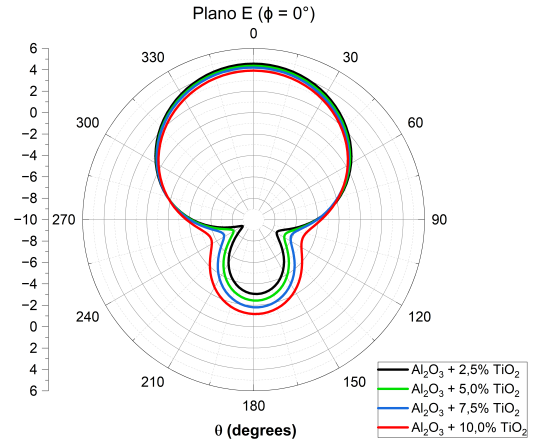


Fig. 5. Diagramas de radiação do plano E.

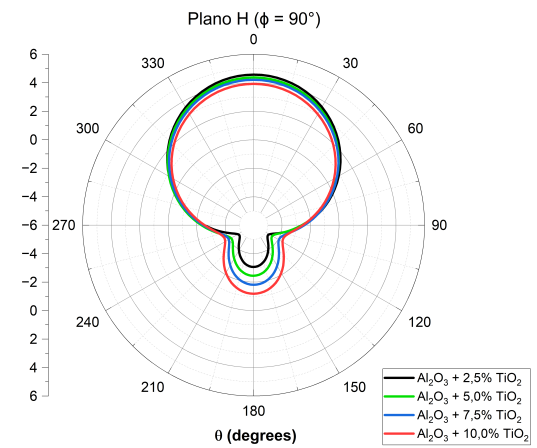


Fig. 6. Diagramas de radiação do plano H.

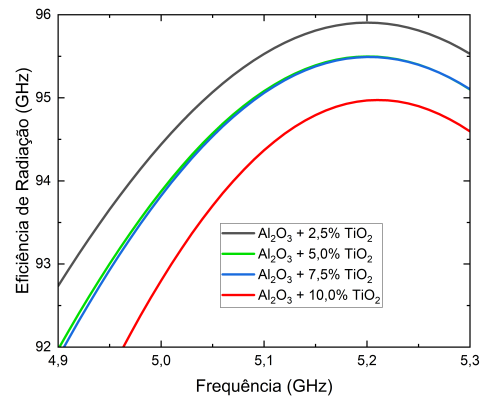


Fig. 7. Eficiência de radiação entre 4,9 GHz e 5,3 GHz.

A Tabela IV resume os resultados obtidos para as antenas de microfita com diferentes concentrações de dióxido de titânio no substrato de alumina.

TABELA IV  
PARÂMETROS DE DESEMPENHO DAS ANTENAS.

%TiO <sub>2</sub>	2,5%	5,0%	7,5%	10,0%
$f_r$ (GHz)	5,20	5,20	5,20	5,20
Perda de Retorno (dB)	-35.80	-25.43	-18.13	-13.05
Ganho (dB)	4,57	4,38	4,21	3,92
Largura de Banda (MHz)	93.00	86.00	76.00	52.00
Eficiência de Radiação (%)	95,91	95,55	95,49	94,97

## V. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi investigado o desempenho de antenas de microfita fabricadas com substratos de alumina dopados com diferentes concentrações de dióxido de titânio. A partir das simulações realizadas no *software* HFSS, foi possível observar que, embora a adição de TiO<sub>2</sub> tenha uma influência favorável na fabricação da alumina, houve um aumento na perda de retorno, uma diminuição na largura de banda e uma redução no ganho e na eficiência de radiação à medida que a concentração de TiO<sub>2</sub> aumentou.

A antena com 2,5% de TiO<sub>2</sub> apresentou a melhor performance, com a menor perda de retorno (-35.80 dB), a maior largura de banda (93 MHz), o maior ganho (4,57 dB) e a maior eficiência de radiação (95,91%). Esses resultados sugerem que a adição de uma pequena quantidade de TiO<sub>2</sub> não prejudica a viabilidade de utilizar a matriz cerâmica de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> como substrato de uma antena de microfita.

As principais limitações deste estudo incluem a falta de validação experimental dos resultados simulados. Estudos futuros devem focar na validação experimental desses resultados e na exploração de outras concentrações de TiO<sub>2</sub> ou de outros materiais para dopagem, a fim de otimizar ainda mais o desempenho das antenas de microfita.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal do Ceará (IFCE), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), e ao Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM).

## REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and design*. 3th ed. Nova Jersey, USA: Wiley, 2005.
- [2] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," *Proceedings of the IEEE*, v. 80, pp. 79–91, January 1992.
- [3] J. L. G. Medeiros, A. G. d'Assunção e L. M. Mendonça, "Microstrip Fractal Patch Antennas Using High Permittivity Ceramic Substrate," *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, USA, 2012, pp. 1-2.
- [4] R. C. Filho, "Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO<sub>4</sub> para antenas de microfita de sistemas de comunicações sem fio," Ph.D. dissertation, PPGEEC/CT, UFRN, Natal, RN, 2010.
- [5] M. H. Ullah e M. T. Islam, "Design of a modified w-shaped patch antenna on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic material substrate for ku-band," *Chalcogenide Letters*, v. 9, pp. 61–66, February 2012.
- [6] Ke Xia, Hai-Feng Zhang, "Application of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic for a circularly polarized filtering antenna," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 96, pp. 237-248, Jun 2024.
- [7] F. A. C. Nobrega et al., "Estudo das propriedades dielétricas do composto (BaMoO<sub>4</sub>)<sub>0,99</sub>(BiCu<sub>3</sub>Ti<sub>3</sub>FeO<sub>12</sub>)<sub>0,01</sub>," presented at the 64nd CBC, Águas de Lindóia, SP, Brazil, Dec. 7–10, 2020.
- [8] R. V. B. Campos et al., "A study of the dielectric properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> composite in the microwave and RF regions," *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, pp. 4220-4226, Feb 2015.
- [9] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*. 7th ed. New York, NY, USA: OUP, 2018.
- [10] W. G. da Silva, "Miniaturização de Antenas de Microfita para Aplicações em CubeSats," Ph.D. dissertation, PPGEEC/CT, UFRN, Natal, RN, 2021.
- [11] F. C. B. de Sena, "Otimização de Estruturas DGS e PBG em Antenas de Microfita Retangular Usando Algoritmo Genético," Ph.D. dissertation, PPGEEC/CT, UFRN, Natal, RN, 2018.
- [12] R. V. B. Campos, "Estudo de Antenas Dielétricas Ressonadoras Baseadas na Matriz Cerâmica Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Operando na Banda C," M.S. thesis, PPGET, IFCE, Fortaleza, CE, 2015.
- [13] M. A. Matin e A. I. Sayeed, "A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna," *Wseas Transactions on Communications*, v. 9, pp. 63–73, January 2010.
- [14] P. S. Nakar, "Design of a Compact Microstrip Patch Antenna for Use in Wireless/Cellular Devices," M.S. thesis, Dept. Elect and Comp. Eng., FSU., Tallahassee, FL, 2004.