

AVALIAÇÃO DA CARACTERIZAÇÃO DIELÉTRICA COMO DADO DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DE RESSONADORES DIELÉTRICOS

Alyson Leite Marreiro de Araújo¹
Isaac Barros Tavares da Silva¹

¹Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, Brasil

Resumo: O estudo de antenas é de extrema relevância para o campo das telecomunicações, uma vez que estes elementos constituem parte fundamental dos sistemas eletrônicos utilizados nesse meio. Em um ramo que demanda cada vez mais por eficiência, e, ao mesmo tempo, promove a saturação gradativa da porção inferior do espectro eletromagnético, destacam-se as antenas ressonadoras dielétricas (DRA's), que se utilizam da versatilidade dos materiais cerâmicos para a obtenção de propriedades dielétricas e magnéticas desejáveis, o que pode abrir caminhos para o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes e com novas funcionalidades. Dada a importância da análise do comportamento de materiais cerâmicos como antenas ressonadoras dielétricas (DRA), este estudo visa a simulação do funcionamento de três DRA's com diferentes dimensões no *software High Frequency Structure Simulator* (HFSS), cujas propriedades dielétricas implementadas são provenientes da análise de amostras de ferritas de níquel (NiFe_2O_4) previamente sintetizadas e caracterizadas em laboratório, com o intuito de avaliar o comportamento desse material como DRA. As simulações sinalizaram correlação entre as dimensões e as frequências de ressonância, que variaram entre 5 GHz e 15 GHz, aproximadamente.

Palavras-chave: Antenas ressonadoras dielétricas; Ferrita de níquel; HFSS.

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo que demanda cada vez mais o desenvolvimento de meios eficientes de comunicação, o ramo das telecomunicações vem se tornando o foco de diversos estudos nas suas mais variadas vertentes, dentre as quais é possível destacar as antenas, devido ao papel fundamental que exercem. Basicamente, as antenas operam como intermediadoras entre espaço livre e dispositivos de guiamento de ondas eletromagnéticas, e constituem um elemento crítico no desenvolvimento de sistemas compactos, que sejam, ao mesmo tempo, eficientes [1].

Nas últimas décadas, as conquistas alcançadas neste campo se mostraram fundamentais para o rápido desenvolvimento das telecomunicações. No entanto, conforme novas demandas surgem, é inevitável que desafios intrínsecos as acompanhem [1]. Dispositivos móveis de diversos gêneros, para que atendam a demanda por sistemas cada vez mais interconectados, requerem projetos cada vez mais complexos de antenas, além da pesquisa em torno de novos materiais, suas propriedades mecânicas e seu comportamento eletromagnético. De acordo com [1], “um bom projeto de antena pode relaxar outros requisitos do sistema e melhorar seu desempenho global”, o que evidencia o peso das antenas na qualidade dos sistemas. Conforme novas aplicações surgem no mercado, a região das micro-ondas do espectro eletromagnético torna-se cada vez mais saturada, e os desafios para conciliar a presença de todas as tecnologias com o mínimo de interferência possível só aumentam.

O crescimento acelerado das telecomunicações via rádio e satélite traz consigo maiores exigências para tecnologias como filtros e osciladores, tais como o estreitamento das larguras de banda, ou o aumento da estabilidade e da seletividade, que constituem atributos necessários para garantir que sinais sejam confinados em faixas específicas de frequência, sem que interfiram com outros sistemas, prejudicando assim a qualidade da comunicação [2]. A questão da portabilidade constitui, também, elemento importante a ser considerado; a necessidade de compactação em satélites e sistemas móveis é evidente [3]. Nesse contexto, destacam-se as propriedades de compósitos cerâmicos.

O desenvolvimento de compósitos cerâmicos para aplicações em transmissão sem fio tem sido objeto de estudo e discussões em institutos de tecnologia, universidades e empresas. A crescente demanda por soluções de baixo consumo de energia, mínimas dimensões e custos reduzidos neste ramo tem despertado a atenção de pesquisadores para compósitos cerâmicos, justamente pela ampla gama de propriedades possíveis de se alcançar em função da alta variedade de composições e processos de síntese [4].

Materiais cerâmicos apresentam um grande potencial para aplicação em diversos cenários, uma vez que suas

propriedades podem ser controladas por meio dos processos de síntese envolvendo diferentes composições, proporções entre as fases e a manipulação de variáveis do processo. Em geral, apresentam altas constantes dielétricas, e baixas perdas por condução na faixa de radiofrequência (RF) e micro-ondas, o que atrai a atenção do setor de telecomunicações, especialmente em aplicações como antenas ressonadoras dielétricas (DRA's) [2].

Com o auxílio de ferramentas de *software* e a possibilidade de se fabricar DRA's nas mais variadas formas, é possível imaginar, projetar e simular diferentes versões de uma mesma ideia, e com isso propor protótipos cada vez mais precisos sem a necessidade de um grande número de tentativas práticas até que se encontre um modelo funcional.

O presente trabalho tem por objetivo, portanto, o projeto e a simulação de três DRA's no *software High Frequency Structure Simulator* (HFSS), diferenciadas apenas pelas suas dimensões, cujas características dielétricas implementadas são provenientes de um material previamente caracterizado, compactado no formato cilíndrico, constituído basicamente por ferrita de níquel NiFe_2O_4 , com o intuito de conhecer/estimar graficamente o seu comportamento como DRA nas diferentes versões, proporcionando assim informações relevantes para que se possa planejar experimentos futuros para validação das simulações.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Síntese e Caracterização de Materiais

De um modo geral, a fabricação de uma DRA passa primeiramente pela síntese do material cerâmico do qual ela será constituída, o que pode ocorrer de diferentes formas, por meio de técnicas como a sol-gel, rotas de estado sólido, co-precipitação, etc., como visto em [2],[4],[5], [6], todas elas amplamente difundidas e que dependem de uma variedade de fatores para serem escolhidas. Em estágios posteriores as amostras são submetidas à maceração quando necessário, aquecimento (calcinação), e compactação no formato desejado para que possam então ser caracterizadas.

As caracterizações podem ser feitas por diferentes técnicas, dependendo do objetivo, dentre as quais destacam-se a Difratomia por Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), como utilizado em [2], [5] e [6], que auxiliam na obtenção de informações relativas à morfologia e composição do material, enquanto análises elétricas e magnéticas podem ser obtidas por técnicas como sonda coaxial, linha de transmissão, espaço livre, cavidade ressonante, placas paralelas e por medição de indutância [5].

2.2 Antenas Ressonadoras Dielétricas

Antenas ressonadoras dielétricas são fortes candidatas a substituir elementos radiantes tradicionais em se tratando, principalmente, da porção superior do espectro eletromagnético, especialmente em aplicações de ondas milimétricas, uma vez que não sofrem por perdas associadas à condução e apresentam uma alta eficiência de radiação quando devidamente excitadas. Sob altas frequências, antenas tradicionais metálicas podem sofrer com altos níveis de aquecimento [7].

Entre as vantagens do uso de DR's como antenas, destacam-se [7]:

- O seu tamanho é proporcional à $\frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$, sendo λ_0 o comprimento de onda no espaço livre para a frequência de ressonância, e $\sqrt{\epsilon_r}$ a permissividade relativa do material, o que contrasta com antenas metálicas, cujas dimensões devem ser proporcionais à λ_0 ;
- Baixas perdas devido à baixa condutividade;
- Podem ser excitadas por diferentes técnicas;
- Propriedades como ganho, largura de banda e polarização podem ser controladas de acordo com a geometria da DRA, bem como por meio da metodologia da síntese – algo que vem sendo amplamente estudado em artigos recentes.

Por meio de uma excitação adequada, qualquer estrutura dielétrica pode se tornar um objeto radiante em determinadas frequências [7]. Além disso, uma vez que a dimensão do DRA é função inversa de uma propriedade elétrica que pode ser modificada pelos processos de síntese no caso de materiais cerâmicos, é relevante entender a correlação entre os métodos de síntese e os produtos finais obtidos, para que se possa projetar tecnologias que correspondam cada vez mais com as demandas emergentes. Como mencionado em [2], “um estudo combinado entre estrutura cristalina e propriedades eletrofísicas de novos componentes e soluções sólidas é necessário para o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos”.

Percebe-se, portanto, que, apesar de a pesquisa em torno da manipulação das variáveis adequadas para se obter um produto final com as características desejadas não ser uma tarefa simples, o peso que estes estudos podem exercer no desenvolvimento de novas tecnologias é bastante relevante.

2.2.1 Tipos de DRA's

Existem diversas geometrias possíveis para se fabricar DRA's. O comportamento sob excitação e as formas possíveis de alimentação variam de um formato para outro, e a escolha dependerá dos objetivos e dos recursos no momento da fabricação. A Figura 1 apresenta um esboço dos principais formatos:

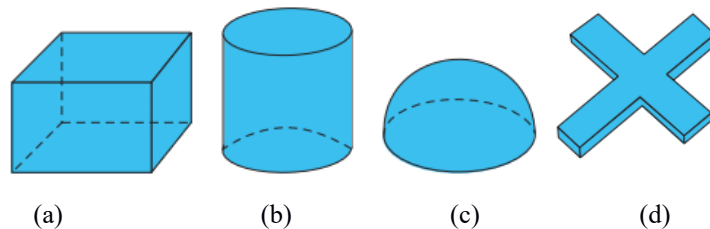


Figura 1. Principais formatos de DRA's. a) Retangular; b) Cilíndrico; c) Hemisfério; d) Cruz. [7]

Ressonadores retangulares dispõem de um maior grau de liberdade em se tratando de dimensões, já que as mesmas são independentes entre si. Além disso, comparativamente a DRA's cilíndricas, apresentam baixo nível de polarização cruzada. Ressonadores cilíndricos, por sua vez, destacam-se por serem capazes de excitar diferentes modos de propagação e pela facilidade de fabricação. No entanto, não apresentam independência entre as dimensões, o que reduz a gama de possibilidades, que ainda assim é grande. Já o formato hemisférico apresenta a possibilidade da inserção de aberturas internas (com ar) para melhorias na largura de banda, enquanto o formato de cruz é recomendado para projetos de antena com polarização circular, que podem ser melhorados por meio de uma associação de DRA's neste formato, alimentada sequencialmente [7]. Um outro fator relevante encontra-se nos modos de propagação de ondas eletromagnéticas no interior dos cilindros dielétricos, o que será melhor detalhado no tópico a seguir.

2.2.2 Modos de propagação em DRA's cilíndricas

Ondas eletromagnéticas podem ser classificadas de acordo com o comportamento vetorial de suas parcelas elétrica e magnética em determinado meio. Cada geometria e tipo de material permite a propagação das mesmas em diferentes modos. Sabe-se que a frequência de ressonância para cada modo de propagação em uma DRA é função das suas dimensões e das suas propriedades dielétricas e magnéticas [8].

Em DRA's cilíndricas, são três os modos de propagação que podem ser excitados: Transverso-elétrica (TE), Transverso-magnética (TM) e Eletromagnética Híbrida (HEM) [9]. Considerando um espaço tridimensional, no modo TE, a direção de propagação do campo elétrico é perpendicular a sua direção de oscilação, enquanto a parcela magnética possui componentes de oscilação nas três direções. No modo TM, por outro lado, é o campo magnético que não possui componente oscilatória na direção de propagação, enquanto o campo elétrico apresenta componentes nas três direções [10]. O modo híbrido, por sua vez, apresenta campo elétrico e magnético oscilando nas três direções [11]. A Figura 2 ilustra de maneira mais clara a diferença entre estes três modos de propagação.

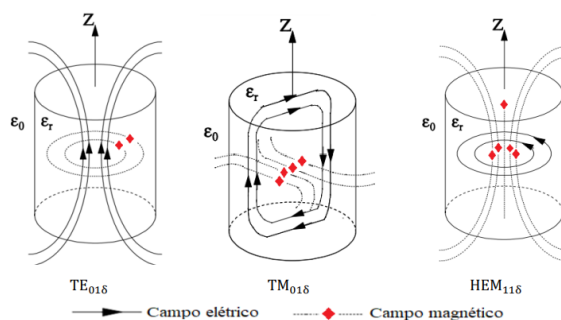


Figura 2. Modos de Propagação em DRA's. [13] *apud* [8].

É possível estimar, para cada modo de excitação, uma frequência de ressonância, em função dos parâmetros físicos de uma DRA. As equações (1), (2) e (3) podem ser utilizadas para determinar as frequências de ressonância respectivamente para os modos de propagação TE, TM, e HEM [9].

$$f_{TE_{n\pi m}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \cdot \sqrt{\left(\frac{X_{np}}{a}\right)^2 + \left(\frac{(2m+1)\pi}{2h}\right)^2} \quad (1)$$

$$f_{TM_{npm}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \cdot \sqrt{\left(\frac{X'_{np}}{a}\right)^2 + \left(\frac{(2m+1)\pi}{2h}\right)^2} \quad (2)$$

$$f_{HEM_{11\delta}} = \frac{6,321 \cdot c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r + 2}} \cdot \left(0,63 + 0,02 \cdot \left(\frac{r}{2h}\right)\right) \quad (3)$$

Onde h é a altura, a o raio da DRA, X_{np} a raiz da função de Bessel, X'_{np} a raiz da derivada de primeira ordem da função de Bessel, e os índices npm especificam o modo ressonante [5].

De posse desses parâmetros, as frequências de ressonância para cada modo de propagação podem ser vistas como funções das constantes permissividade relativa ϵ_r e permeabilidade relativa μ_r , propriedades eletromagnéticas do objeto. Com manipulações matemáticas apropriadas, é possível, ainda, determinar uma frequência de ressonância para a qual se possa projetar a altura mais adequada de um DRA, como visto em [5].

Tão importante quanto o projeto da própria DRA são os métodos de alimentação, responsáveis pela excitação dos diferentes modos. Uma breve revisão acerca dos principais métodos de alimentação será realizada no tópico a seguir.

2.2.3 Modos de Excitação

Uma das principais vantagens das DRA's encontra-se na variedade de técnicas de alimentação que podem ser usadas para excitar os diferentes modos de propagação. De acordo com [7], destacam-se as técnicas de alimentação por cabo coaxial, linha de microfita, guias de onda coplanares e *slot* (abertura no plano de terra). A Figura 3 apresenta cada caso:

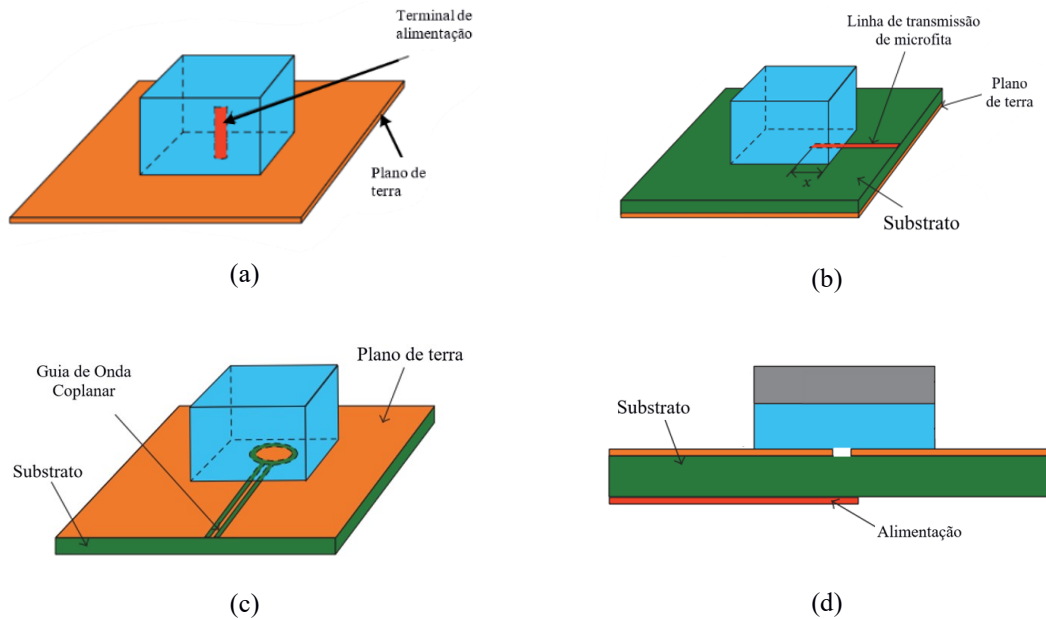


Figura 3. Formas de excitação de DRA's; Alimentação (a) coaxial, (b) por linha de microfita, (c) por guia de onda coplanar e (d) por *slot* (vista transversal). Adaptado de [7]

Na alimentação coaxial, o sistema é composto por um plano de terra – sobre o qual o dielétrico é posicionado –, e por um cabo coaxial, cujo terminal interno pode ser posicionado no interior da DRA ou na lateral, enquanto o terminal externo deve estar em contato com o plano de terra. Embora uma maior eficiência de radiação seja alcançada por meio da inserção do cabo coaxial no interior da DRA, dificuldades práticas associadas a este tipo de arranjo, devido à necessidade de perfuração do material sintetizado, tornam mais viável a alimentação lateral [7].

Em alimentações por linha de microfita, a DRA é posicionada sobre uma fita condutora plana, que é separada do plano de terra por meio de um substrato. As dimensões da linha de microfita influenciam diretamente na força do acoplamento, bem como no modo de propagação que será excitado.

A alimentação por guias de onda coplanares destaca-se, por sua vez, pela possibilidade de modificação da

abertura de acoplamento, que pode ser circular, indutiva ou capacitiva, visando melhorias na eficiência [7]. Esse tipo de técnica é amplamente utilizado em aplicações de ondas milimétricas, especialmente em sistemas integrados (*on Chip*).

Já no sistema de excitação por meio de abertura no plano de terra, ou *slot*, o mais popular segundo [7], a principal vantagem encontra-se no afastamento (devido ao substrato), entre a linha de alimentação e a DRA, o que reduz interações eletromagnéticas indesejáveis. A posição da abertura influencia diretamente a qualidade do acoplamento. A principal desvantagem, no entanto, situa-se no comprimento da abertura, que deve ser próximo de $\frac{\lambda}{2}$, o que prejudica a viabilidade de projetos de baixa frequência que mantenham compactas as DRA's.

3 METODOLOGIA

3.1 Implementações no *software* HFSS

Neste trabalho as simulações realizadas foram executadas tomando como referência o formato cilíndrico, alimentado lateralmente por cabo coaxial. Utilizando o *software* HFSS, foram desenhados três modelos de DRA's cilíndricas com este tipo de alimentação, diferenciados pelas alturas do dielétrico cilíndrico e de um dos pólos do terminal de alimentação. A Figura 4 apresenta o modelo projetado.

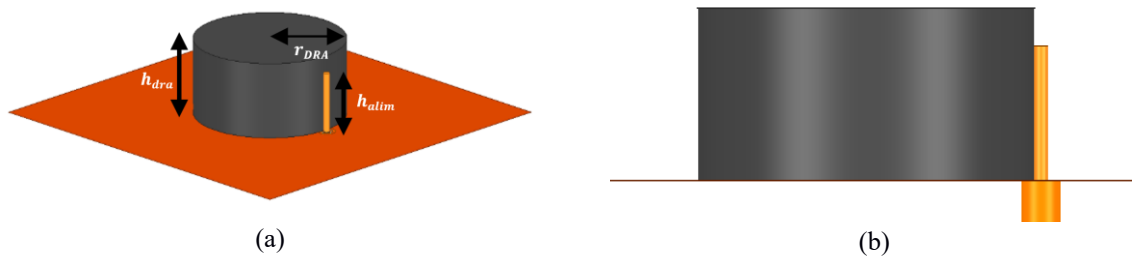


Figura 4. Modelo de DRA para simulação. Vista (a) dimétrica e (b) frontal. Autoria própria.

As dimensões principais de cada uma das DRA's e das alimentações são adaptações do trabalho realizado por [12] e estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões dos componentes das simulações

Nome	h_{dra} (mm)	r_{dra} (mm)	h_{alim} (mm)
DRA 1	12,75	12,50	10,00
DRA 2	08,50	12,50	06,67
DRA 3	04,25	12,50	03,33

Fonte: Autoria própria.

A caracterização da ferrita de níquel (NiFe_2O_4) sintetizada em [12] forneceu informações relevantes acerca dos valores de permissividade elétrica e tangente de perdas em função da frequência de excitação (Figura 5), que, por sua vez, foram implementadas no *software* HFSS para simular o comportamento do material como DRA nas três versões propostas.

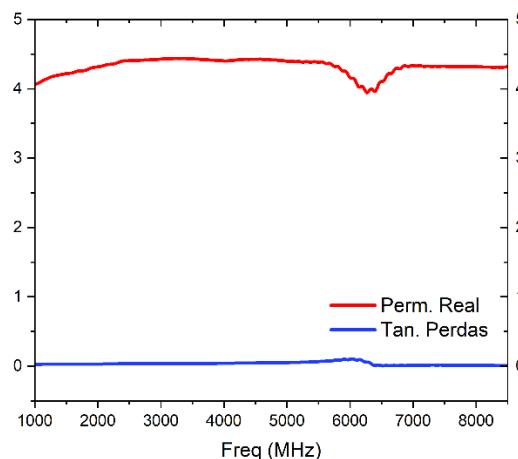


Figura 5. Permissividade real e tangente de perdas em função da frequência. Adaptado de [12].

Como se pode notar, a permeabilidade relativa real do material oscilou em torno de **4**, enquanto a tangente de perdas apresentou, como se espera de materiais deste tipo, valores próximos a **0**. É importante salientar que a implementação destes dados pode aproximar as simulações ainda mais dos experimentos reais, uma vez que, por padrão, o *software* adotaria valores constantes, independentes da frequência de alimentação.

3.2 Simulações

Por meio da análise do comportamento do parâmetro distribuído S_{11} em função da frequência de excitação no trabalho realizado por [12], no qual alimentou-se uma DRA de altura **12,75 mm**, é possível inferir que a frequência de ressonância da mesma situa-se numa região entre **5 GHz** e **6 GHz**, e, portanto, essa referência serviu como base para a realização das simulações no presente trabalho.

As simulações tinham por objetivo a obtenção de três informações principais: parâmetro S_{11} em função da frequência, diagrama 3D relativo ao ganho da DRA em diferentes direções para uma frequência específica, e diagrama 2D relativo ao ganho da DRA tanto para o campo elétrico (E) quanto para o campo magnético (H) para a mesma frequência que a determinada para o diagrama em 3D. A determinação da frequência para a qual os diagramas de ganho em 3D e 2D foram plotadas passou primeiramente pela análise do comportamento do parâmetro S_{11} em função da frequência de excitação.

A frequência de ressonância para a DRA no trabalho de [12] localiza-se em torno de 5,5 GHz, o que serviu como base para primeira simulação feita no *software* HFSS, para o projeto de DRA de 12,75 mm de altura. A primeira simulação, portanto, foi configurada para plotar o comportamento do parâmetro S_{11} para frequências de 1 GHz à 10 GHz. Uma vez que os resultados dessa simulação fornecem informações para a plotagem dos outros dois gráficos de interesse desse projeto, foi possível então determinar um valor de frequência para a configuração dessas simulações.

O mesmo procedimento foi seguido para as DRA's 2 e 3. Na simulação da DRA 3, foi necessário aumentar a frequência limite no processo de varredura (*sweep*) para encontrar o valor da frequência de ressonância e seguir com a obtenção dos demais resultados. Em seguida, uma análise comparativa foi realizada em torno do comportamento das três DRA's tendo como foco principal a relação dos resultados com as dimensões propostas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 destaca o comportamento do parâmetro S_{11} em função da frequência para cada uma das DRA's projetadas, sobrepostos para fins de comparação.

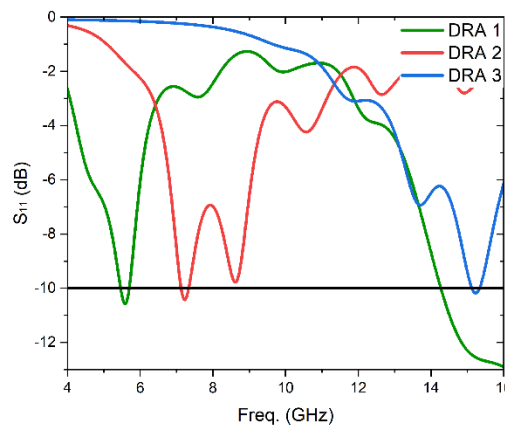


Figura 6. Parâmetro S_{11} em função da frequência. Autoria própria.

Por meio de uma linha auxiliar no nível -10 dB, é possível destacar diferenças significativas nas frequências de ressonância entre as DRA's simuladas. A Tabela 2 mostra com precisão os intervalos de frequência dentro dos quais o ganho de cada DRA é menor ou igual à -10 dB, a largura de banda das mesmas e as frequências centrais, para as quais o ganho foi o menor observado no intervalo, respectivamente de $-10,576$ dB, $-10,427$ dB e $-10,177$ dB para as DRA's 1, 2 e 3.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos nas simulações em estudo.

	f_{inf} (GHz)	f_{sup} (GHz)	BW (GHz)	f_{cent} (Hz)
DRA 1	5,473	5,692	0,219	5,590
DRA 2	7,138	7,327	0,189	7,228
DRA 3	15,150	15,330	0,180	15,240

Fonte: Autoria própria.

Além desses dados, destaca-se que a DRA 1 apresentou um segundo intervalo de frequência de ressonância para valores em torno de $14,296\text{ GHz}$, que, no entanto, não será levado em consideração nesta análise.

Com base nos dados da Tabela 2, depreende-se que há correlação entre as dimensões das DRA's e os seus respectivos coeficientes de reflexão S_{11} em função da frequência. Comparando-se as DRA's 1 e 2, observa-se que uma redução de 33,33 % nas alturas do cilindro e da alimentação resultou em um aumento de $1,638\text{ GHz}$ na frequência de ressonância, equivalente a 29,30 %. Comparando-se as DRA's 2 e 3, no entanto, uma redução de 50 % nas mesmas dimensões produziu um aumento de $8,012\text{ GHz}$ na frequência de ressonância, equivalente a 110,84 %, significativamente maior do que o aumento produzido na primeira alteração, o que sinaliza uma não-linearidade entre as grandezas *altura* e *frequência de ressonância*.

Tomando como base as frequências centrais apresentadas na Tabela 2, foram exportados do *software* os gráficos tridimensionais das simulações para cada DRA (Figura 7), que mostram o comportamento dos ganhos direcionais em cada caso. Também foram plotados os diagramas bidimensionais para os ganhos direcionais, tanto para o plano *E* quanto para o plano *H*, como mostra a Figura 8.

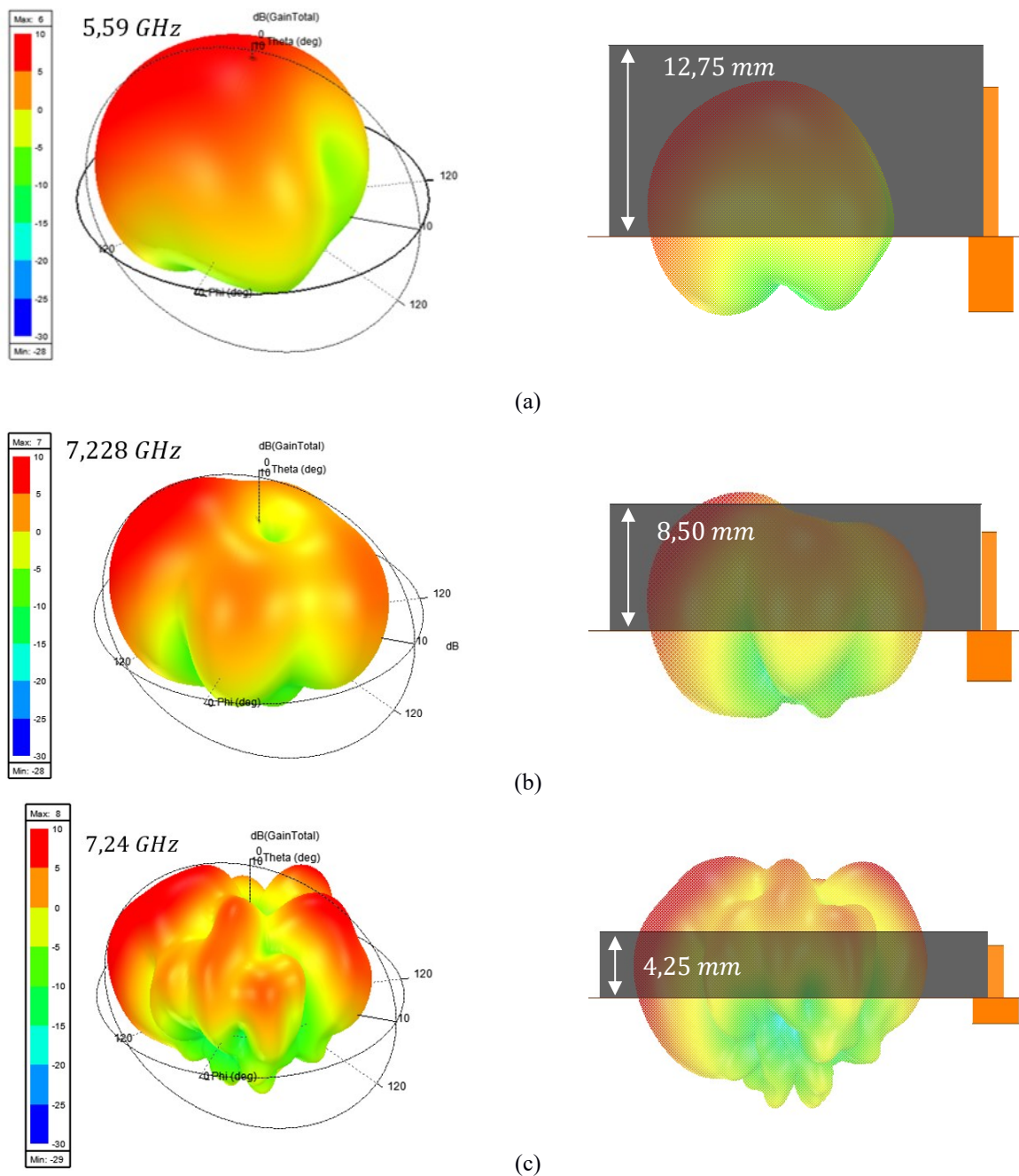


Figura 7. Ganho direcional para as DRA's (a) 1, (b) 2 e (c) 3, nas respectivas frequências de ressonância. Autoria própria.

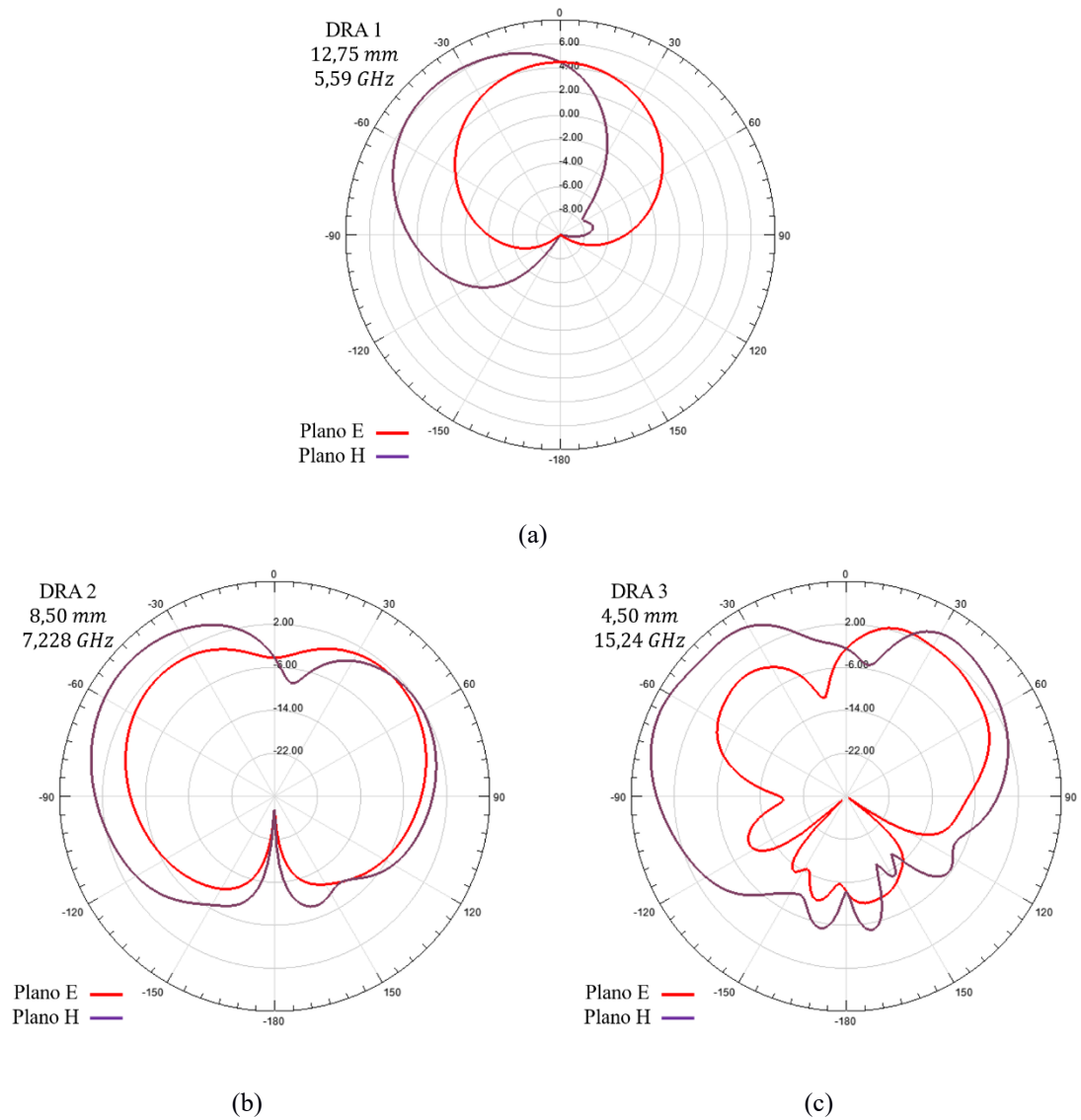


Figura 8. Ganho direcional nos planos *E* e *H*, para as DRA's (a) 1, (b) 2 e (c) 3 nas respectivas frequências de ressonância. Autoria própria.

As Figuras 7 e 8 permitem observar diferenças na distribuição da potência de radiação em função da direção, o que pode ser confirmado pela análise do ganho máximo em cada caso. A Tabela 3 resume os ganhos máximos obtidos, associando-os com as alturas das DRA's e as respectivas frequências de ressonância.

Tabela 3 – Resumo dos principais parâmetros obtidos nas simulações.

	h_{DRA}	$f_{cent}(Hz)$	Ganho máximo (dB)
DRA 1	12,75 mm	5,590	6
DRA 2	8,50 mm	7,228	7
DRA 3	4,25 mm	15,240	8

Fonte: Autoria própria.

Conforme a dimensão da DRA reduz, observa-se um aumento da diretividade em determinadas direções, em detrimento da uniformidade. Pode-se observar também que uma redução de **33,33 %** na altura da DRA (do caso 1 para o caso 2) produziu um aumento de 1 dB no ganho máximo, e o mesmo aconteceu comparando-se as DRA's 2 e 3, embora a altura tenha reduzido em 50%, o que pode indicar uma sensibilidade cada vez menor conforme as DRA's tornam-se menores.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as simulações evidenciaram a correlação entre as dimensões das DRA's e as frequências de ressonância, de acordo com o esperado, uma vez que as equações (1), (2) e (3) já sinalizavam tal relação. Em suma, quanto menor a DRA, maior a frequência de ressonância. As larguras de banda não se modificaram significativamente.

Após a análise dos resultados obtidos pelas simulações realizadas, é importante que estas sejam validadas experimentalmente, o que pode ser realizado em trabalhos futuros, visto que a confiabilidade das simulações pode instigar a idealização e investigação de variações no projeto, para que seja possível atingir modelos ótimos antes mesmo de uma primeira prototipagem. A simulação, por exemplo, de uma alimentação coaxial acoplada no interior da DRA, pode ser de grande valia para que se estude a viabilidade da implementação desse projeto na prática.

Vale lembrar, ainda, que a DRA 1 apresentou um segundo intervalo com coeficiente de reflexão menor que -10 dB , o que pode ser investigado também futuramente.

Ressalta-se, por fim, a importância da observação criteriosa em torno de todas as variáveis do processo de fabricação das DRA's juntamente com o estudo do comportamento radiante das mesmas nos seus diferentes modos de excitação, em função da frequência da alimentação, para que se possa projetar melhor estes elementos no futuro, e, então, atender a demanda cada vez maior por tecnologias que resolvam os desafios a serem enfrentados pela sociedade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BALANIS, C. A. Teoria de Antenas – Análise e Síntese – Vol. 1, 3a. Ed., LTC. 2008.
- [2] DUARTE, A. V. et al. Characterization of the BFO-BZN-based electroceramic composite for application as DRA. *Cerâmica*. 2020, v. 66, n. 377, pp. 1-6. Epub, 13 Dec, 2019. ISSN 1678-4553. <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663772796>.
- [3] MOULSON, A. J.; HERBERT, J. M. *Electroceramics: materials, properties, applications*. 2. ed. Wiley: India, 2003.
- [4] DE MORAIS, J.E.V et al. Magneto Tuning of a Ferrite Dielectric Resonator Antenna Based on LiFe₅O₈ Matrix. *Journal of Elec Materi* 47, 3829–3835 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6255-0>.
- [5] DA SILVA, I. B. T. Desenvolvimento de material ferrimagnético do tipo NiFe₂O₄ para aplicação em sistemas de comunicação de micro-ondas. UFRN (2019).
- [6] USSUI, V. et al. Síntese e Caracterização de Cerâmicas à Base de Titanato de Zircônio. IPEN (2205).
- [7] KEYROUZ et al. Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies, *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2016, p. 20, Sep. 2016.
- [8] COSTA, A. P. D. Implementação de uma antena ressoadora magneto-dielétrica cilíndrica baseada na matriz YIG para o controle dos modos de propagação HEM_{11δ}, TE_{01δ} e TM_{01δ}. Campina Grande, 2021.
- [9] PETOSA, A. *Dielectric Resonator Antenna Handbook*, United States Of America: Artech House, 2007.
- [10] WENTWORTH, S. M. *Fundamentos De Eletromagnetismo Com Aplicações Em Engenharia*. Tradução: Abelardo Podcameni, Gláucio Lima Siqueira. Rio De Janeiro: Ltc, 2006.
- [11] FILHO, J. P. *Ondas Guiadas*. UNICAMP, 2015.
- [12] DA SILVA, I.B.T. et al., 2021. Design and analysis of nickel ferrite resonator antenna for C band applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 63(6), pp.1781-1785.
- [13] DE SOUZA, W. F. Ferramenta de simulação dos campos elétrico e magnético nos guias de ondas retangular e circular. 61 f. Monografia (Graduação)- Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2021.
- [14] KISHK, A. A.; ANTAR, Y. M. M. Dielectric resonator antennas. In: Volakis, J. (Org). *Antenna Engineering Handbook*, New York: McGraw-Hill, 2007



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural Do Semi-Árido - UFERSA
Centro de Ciências Exatas e Naturais - CCEN

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às quinze horas do dia **19 de novembro de dois mil e vinte e um**, através do recurso do uso de tecnologias de comunicação à distância, do tipo vídeo conferência e conforme determina Resolução CONSEPE/UFERSA nº 003/2020, de 25 de setembro de 2020, sob a presidência do Prof. Dr. Isaac Barros Tavares da Silva, reuniu-se a banca examinadora de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de autoria do aluno **Alyson Leite Marreiro de Araújo**, do curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia desta Universidade, número de matrícula **2014010970** com o título **“Avaliação da Caracterização Dielétrica como Dado de Entrada para Simulação de Ressonadores Dielétricos”**. A Banca Examinadora foi composta pelos professores Dr. Isaac Barros Tavares da Silva, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso, Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, como primeiro membro e Prof.^a Dra. Samanta Mesquita de Holanda, como segundo membro. Toda a banca examinadora reuniu-se em tempo real e utilizaram do recurso de vídeo conferência para realização da mesma. Foram registradas as seguintes ocorrências: o aluno apresentou o trabalho e em seguida houve arguição por parte dos membros da banca. As correções e alterações textuais foram enviadas ao aluno, que se comprometeu em fazê-las em sua totalidade. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada, tendo o aluno obtido o conceito **APROVADO, cumprindo as exigências para a aprovação do componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso**. Para constar, eu, Isaac Barros Tavares da Silva, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso, lavrei a presente ata que, após lida e considerada conforme, segue assinada pelos membros da banca.

Mossoró, 19 de Novembro de 2021

Prof. Dr. Isaac Barros Tavares da Silva – CE/UFERSA
Presidente e Orientador

IDALMIR DE SOUZA
QUEIROZ
JUNIOR:63510731468

Assinado de forma digital por
IDALMIR DE SOUZA QUEIROZ
JUNIOR:63510731468
Dados: 2021.11.19 16:38:46 -03'00'

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – CE/UFERSA
Primeiro Membro

Prof.^a Dra. Samanta Mesquita de Holanda – CE/UFERSA
Segundo Membro