



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SAMANTHA MOTA PINTO

**APLICAÇÃO DO HFSS PARA ANÁLISE DO EFEITO DE VÉRTICES NO
PATCH DE ANTENAS DE MICROFITA: COMPILADO DE ARTIGOS PUBLICADOS
EM 2024**

TUCURUÍ

2024

SAMANTHA MOTA PINTO

**APLICAÇÃO DO HFSS PARA ANÁLISE DO EFEITO DE VÉRTICES NO
PATCH DE ANTENAS DE MICROFITA: COMPILADO DE ARTIGOS PUBLICADOS
EM 2024**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:

Dr. André Felipe Souza da Cruz

Coorientadora:

Dr.^a Andrécia Pereira da Costa.

TUCURUÍ

2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

P659a Pinto, Samantha Mota.
Aplicação do HFSS para Análise do Efeito de Vértices no
Patch de Antenas de Microfita : Compilado de artigos
publicados em 2024 / Samantha Mota Pinto. — 2024.
20 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Coorientação: Prof^a. Dra. Andrécia Pereira da Costa
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí,
Faculdade de Engenharia Elétrica, Tucuruí, 2024.

1. HFSS. 2. antena de microfita. 3. efeito de vértices.
4. fenda poligonal regular. I. Título.

CDD 621.3

Samantha Mota Pinto

**APLICAÇÃO DO HFSS PARA ANÁLISE DO EFEITO DE VÉRTICES NO
PATCH DE ANTENAS DE MICROFITA:** Compilado de artigos publicados em
2024

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 25/11/2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof^ª. Dr^ª. Andrécia Pereira da Costa
Coorientadora - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa
Avaliador Externo - ITEC/UFPA

TUCURUÍ

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

TÍTULO: TÍTULO: APLICAÇÃO DO HFSS PARA ANÁLISE DO EFEITO DE VÉRTICES NO PATCH DE ANTENAS DE MICROFITA: COMPILADO DE ARTIGOS PUBLICADOS EM 2024

DISCENTE: SAMANTHA MOTA PINTO

MATRÍCULA: 202033940004

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	<i>Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz – FEE/UFPA</i>	<i>Orientador</i>
2	<i>Prof.ª Dr.ª Andrécia Pereira da Costa – FEE/UFPA</i>	<i>Coorientadora</i>
3	<i>Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa – ITEC/UFPA</i>	<i>Membro externo</i>

Data da Defesa: 25/11/2024 | **Hora Início:** 9:00 | **Hora Término:** 11:30

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,00	10,00	10,00
Linguagem (gramática e semântica)	9,00	10,00	9,00
Conteúdo técnico	9,00	10,00	10,00

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	10,00	10,00	10,00
Administração do tempo	10,00	10,00	10,00
Expressão oral	10,00	10,00	10,00
Domínio do tema	8,50	10,00	9,50

Média por examinador	9,36	10,00	9,79
Média Final	9,71		
Conceito Final	EXC		

Tucuruí-Pa, 26 de novembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRE FELIPE SOUZA DA CRUZ
Data: 27/11/2024 14:14:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRECIA PEREIRA DA COSTA
Data: 27/11/2024 14:20:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br KARLO QUEIROZ DA COSTA
Data: 27/11/2024 16:07:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro externo

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará e seus servidores, que são fundamentais para a sustentação desta, e conseguem, através da entidade, prover ensino gratuito e de qualidade à benefício da sociedade.

À minha mãe e irmã, pelo apoio e dedicação contínua ao me dar meios de conseguir fechar mais este ciclo em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz, o qual sempre conseguiu reservar algum tempo para me aconselhar, opinar sobre o meu trabalho e tantas outras situações enquanto diretor da FEE. Igualmente a Prof^a. Dr^a. Andrécia Pereira da Costa.

Ao corpo docente da FEE por todo o empenho em transmitir conhecimento para que eu pudesse conquistar essa profissão tão admirável de Engenheiro Eletricista. A mencionar suas contribuições extraclasse e de experiência.

Agradeço àqueles cujos laços foram desfeitos, mas que me ofereceram palavras de consolo em momentos muito difíceis da minha vida e as demonstrações de afeto mais bonitas, que estão guardadas eternamente em minha memória e em meu coração.

À Diretora da Biblioteca pela amizade e aprendizado que adquiri durante o estágio na Biblioteca do campus e a gentileza de todos os dias.

Aos meus amigos da turma do ano dois mil e vinte (2020), pessoas (e profissionais) excelentes que sempre me motivaram durante o curso, me proporcionaram momentos de muita alegria.

E, acima de tudo e todos, a Deus pela minha vida, por me fortalecer nos momentos de dor, e por me permitir chegar até aqui.

RESUMO

Neste trabalho, são apresentados os artigos intitulados, “Análise dos efeitos provocados pelo aumento de vértices no *patch* regular de uma antena de microfita” e “Análise dos efeitos de uma fenda poligonal regular em uma antena de microfita *patch* circular”, desenvolvidos durante o período de 04/09/2023 a 31/08/2024, através da execução do Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica (PIBIC) PRO6432-2023, sob orientação do Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz. O primeiro artigo descreve um projeto de antena de microfita no simulador *High-Frequency Structure Simulator* (HFSS), com *patch* quadrado, alimentada por cabo coaxial de 50Ω por baixo do plano de terra, operando na frequência de 2,59 GHz. A partir deste projeto, foram feitas simulações para dois conjuntos de antenas, variando a geometria da plaqueta em figuras poligonais regulares, em que são avaliadas a perda de retorno (S_{11}), a Taxa de Onda Estacionária (VSWR), a impedância de entrada Z , e a largura de banda (BW). O segundo artigo, tratou de uma análise sobre os efeitos que uma fenda poligonal regular produz, quando inserida no *patch* de um antena circular de raio 1,69 cm, projetada para operar em 2,4 GHz e alimentada por cabo coaxial a 30% do centro, construída também no HFSS. Para este projeto, decidiu-se realizar simulações para quando variava-se a posição relativa θ de 0° a 90° da fenda e o número de lados N de 4 a 12. Verificou-se que o caso da antena com *slot* heptagonal produziu maior largura de banda, e para este caso, foi variado o fator de proporção K para verificar os efeitos da área do *slot* na resposta da antena. Os mesmos parâmetros de desempenho do primeiro artigo, são os parâmetros avaliados no segundo artigo. Ambos os artigos estão disponíveis como anexo, e estão correlacionados por um texto integrador introdutório.

Palavras-chave: HFSS; antena de microfita; efeito de vértices; fenda poligonal regular.

ABSTRACT

In this work, papers entitled “Analysis of the effects caused by the increase of vertices on the regular patch of a microstrip antenna” and “Analysis of the effects of a regular polygonal slot on a circular patch microstrip antenna”, developed during the period from 09/04/2023 to 08/31/2024, through the execution of the Undergraduate Research Project (PIBIC) PRO6432-2023, under the guidance of Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz, are presented. The first paper describes a microstrip antenna project in the High-Frequency Structure Simulator (HFSS), with a square patch fed by a 50Ω coaxial cable beneath the ground plane, operating at a frequency of 2.59 GHz. From this design, simulations were conducted for two sets of antennas, varying the geometry of the patch into regular polygonal shapes, where return loss (S_{11}), Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), input impedance Z , and bandwidth (BW) were evaluated. The second paper focused on an analysis of the effects produced by a regular polygonal slot when inserted into the patch of a circular antenna with a radius of 1.69 cm, designed to operate at 2.4 GHz and coaxial cable feed at 30% from the center, also designed using HFSS. For this design, simulations were performed varying the relative position θ from 0° to 90° of the slot and the number of sides N from 4 to 12. It was found that the case of the antenna with a heptagonal slot produced the largest bandwidth, and for this case, the proportionality factor K was varied to observe the effects of the slot area on the antenna response. The same performance parameters as in the first paper were evaluated in the second paper. Both papers are available as an appendix and are connected by an integrative introductory text.

Keywords: HFSS; microstrip antenna; vertices effect; regular polygonal slot.

SUMÁRIO

1	TEXTO INTEGRADOR	9
	ANEXO A – ANÁLISE DOS EFEITOS PROVOCADOS PELO AUMENTO DE VÉRTICES NO <i>PATCH</i> RE- GULAR DE UMA ANTENA DE MICROFITA	11
	ANEXO B – ANÁLISE DOS EFEITOS DE UMA FENDA POLIGONAL REGULAR EM UMA ANTENA DE MICROFITA <i>PATCH</i> CIRCULAR	17

1 Texto Integrador

As antenas de microfita foram introduzidas pelo engenheiro Georges A. Deschamps em 1953, mas popularizaram-se somente na década de 1970. Desde então, estas antenas foram exploradas por pesquisadores devido suas aplicações em naves espaciais, principalmente por serem de baixo peso, custo, possuírem compatibilidade com circuitos integrados, entre outras características atrativas para sua fabricação. As antenas de microfita são constituídas de um fino material dielétrico, onde em sua superfície é adicionada uma pequena plaqueta metálica que funciona como elemento radiante. Abaixo do substrato pode ser adicionado um plano de terra condutor, que pode ser alterado a depender da aplicação. Para melhorar a resposta eletromagnética dessas antenas são propostos diversos tipos de modificações na geometria do *patch* da antena, além da inserção de fendas.

Durante os anos de 2023 e 2024, o grupo de pesquisa do Laboratório de Eletromagnetismo (LEMAG), da Universidade Federal do Pará - Campus Universitário de Tucuruí, desenvolveu estudos sobre efeitos de variações geométricas no *patch* de antenas de microfita no projeto “PRO6432-2023 - Dimensionamento e análise de arranjo de antenas em microfita utilizando LiteVNA-64 e métodos baseados em funções de Green”. Os discentes de Iniciação Científica desenvolveram revisões bibliográficas da teoria de antenas sobre os tipos de antenas, mecanismo de radiação, seus parâmetros fundamentais e o estudo particular das antenas de microfita. Durante a pesquisa foram realizadas apresentações orais para solidificar o conteúdo estudado e, em paralelo, foram realizadas uma série de simulações no *software* da Ansys *High-Frequency Structure Simulator* (HFSS) para modelos diversos de antenas de microfita dispostos na literatura.

Um dos trabalhos resultantes deste projeto de pesquisa, foi o artigo intitulado “Análise dos efeitos provocados pelo aumento de vértices no *patch* regular de uma antena de microfita” apresentado no 16º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo — CBMAG 2024. Neste artigo foi realizada uma análise sobre o aumento do número de vértices no *patch* de antenas de microfita. Para isso, foi proposto dois conjuntos de antenas, um com número par, e outro número ímpar de vértices no *patch*, comparando com uma antena de referência com *patch* quadrado, e área fixa de $16,44 \text{ cm}^2$, operando em 2,59 GHz. Os resultados mostraram o deslocamento da frequência de ressonância para a faixa entre 2,90 a 3,13 GHz com o aumento do número de vértices.

Outro trabalho foi o artigo intitulado “Análise dos efeitos de uma fenda poligonal regular em uma antena de microfita *patch* circular” apresentado no XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2024 (DOI: 10.14209/sbrt.2024.1571032721). Neste trabalho, buscou-se discutir os resultados obtidos a partir da simulação de uma antena de microfita alimentada por cabo coaxial posicionado

a 30% do centro, com *patch* circular de raio fixo $a \approx 1,6976$ cm, projetada para operar na frequência de 2,4 GHz. E verificar os efeitos da inserção de uma fenda poligonal regular no *patch* da antena. Verificou-se que a antena com fenda heptagonal apresentou maior largura de banda, para os casos avaliados.

A produção destes dois artigos decorreu da grande variedade de configurações geométricas disponíveis na literatura, que permitem aos projetistas de antenas escolher livremente o modelo para suas experimentações. Para que essas escolhas sejam direcionadas a melhorias de desempenho previamente desejadas, as simulações tornam-se essenciais. As simulações os ajudam a entender como as antenas com geometria poligonal regular se comportam para os parâmetros de Taxa de Onda Estacionária de Tensão (VSWR), perda de retorno S_{11} , frequência de ressonância f_r e largura de banda (BW).

O projeto de pesquisa foi realizado com fomento da Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa (FAPESPA), processo 00000.9.001282/2023, por meio do edital 18/2023 da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP). Os artigos foram submetidos e apresentados no CBMAG 2024 e SBrT 2024. As atividades do projeto traduziram-se em ganho de habilidades em escrita científica, capacidade de projetar e analisar a resposta eletromagnética de antenas de microfitas.

As dificuldades encontradas neste projeto foram, especialmente, a construção das antenas no Ansys HFSS e as configurações adequadas que impactam no bom desempenho do solucionador. Algumas melhorias podem ser implementadas como repetir os passos de construção e simulação para outros tipos de alimentação, e realizar testes experimentais para o comparativo simulado versus experimental, que também compõe as atividades do Laboratório LEMAG para outros trabalhos realizados nesse período. Um outro desafio foi a parametrização matemática das características geométricas das antenas, buscando a realização automatizada de múltiplas simulações.

Os dois artigos enriquecem trabalhos pioneiros no desenvolvimento de metodologias específicas para antenas de microfita e, se complementam, pois enquanto um analisa a influência do aumento do número de vértices no *patch* de uma antena, o outro avalia, além do número de vértices, a posição e a área de uma fenda em outra antena, que é uma melhoria já conhecida na literatura de antenas. E ambos concentram-se em estudar, mais especificamente, figuras poligonais regulares e suas equações para construção e projetos de antenas.

**ANEXO A – ANÁLISE DOS EFEITOS PROVOCADOS PELO
AUMENTO DE VÉRTICES NO *PATCH* REGULAR DE UMA ANTENA
DE MICROFITA**

Na próxima página encontra-se o arquivo original do artigo intitulado “Análise dos efeitos provocados pelo aumento de vértices no *patch* regular de uma antena de microfita”, apresentado no “16^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo — CBMAG 2024”, realizado remotamente em Goiânia/GO, no ano de 2024.

Análise dos efeitos provocados pelo aumento de vértices no *patch* regular de uma antena de microfita

Samantha Mota Pinto
Curso de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará
Tucuruí, Pará, Brasil
eng.smota@outlook.com

Leonardo França da Cruz
Curso de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará
Tucuruí, Pará, Brasil
leonardo.cruz@tucurui.ufpa.br

Karlo Queiroz da Costa
Instituto de Tecnologia
Universidade Federal do Pará
Belém, Pará, Brasil
karlo@ufpa.br

Andrécia Pereira da Costa
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará
Tucuruí, Pará, Brasil
andreciacosta@ufpa.br

André Felipe Souza da Cruz
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará
Tucuruí, Pará, Brasil
andacruz@ufpa.br

Resumo—Neste trabalho é apresentada uma análise dos efeitos provocados pelo aumento do número de vértices no *patch* de uma antena de microfita. Para isso foram propostos dois conjuntos de antenas com *patch* no formato de polígonos regulares: o primeiro com número par de vértices, e o segundo com número ímpar de vértices, todos com a mesma área $A = 14,44 \text{ cm}^2$, equivalente à área de uma antena de referência com *patch* quadrada. As estruturas foram desenvolvidas no software *High Frequency Structure Simulator (HFSS)* da ANSYS, e a partir dos resultados simulados verificou-se a perda de retorno (S_{11}), a razão de onda estacionária de tensão (VSWR), largura de banda (BW), a impedância de entrada ($Z = R + jX$) e o diagrama de radiação das antenas na faixa de 1,5 a 3,5 GHz. Optou-se pelo método de alimentação utilizando linha coaxial de 50Ω conectada por baixo do plano de terra. A antena *patch* quadrada apresentou Perda de Retorno de $-40,52 \text{ dB}$ na frequência 2,59 GHz, com largura de banda 38,10 MHz. Os resultados mostram o deslocamento da frequência de ressonância para a faixa entre 2,90 e 3,13 GHz, e a convergência das respostas das antenas com geometrias poligonais para o caso limite, da antena com *patch* circular.

Palavras-chave—*patch* regular, efeito de vértices, HFSS, micro-ondas

I. INTRODUÇÃO

Antenas de microfita são estruturas cuja construção baseia-se em uma plaqueta metálica (*patch*) posicionada sobre um substrato dielétrico que, por sua vez, é depositado sobre um plano de terra (*ground*). A sua alimentação é realizada comumente através de uma linha de microfita ou um cabo coaxial conectado ao plano terra [1]. Estas antenas podem possuir *patch* com geometrias diversas como, por exemplo, quadrada, retangular, circular ou elíptica [2]. As antenas de microfita são muito versáteis e possuem amplas aplicações na indústria aeronáutica e aeroespacial devido suas dimensões re-

duzidas, peso, custo, desempenho, serem facilmente moldáveis a diferentes superfícies e de fácil instalação [3].

Em [4] é apresentada uma antena de microfita vestível com performance em Redes de Área Corporal Sem Fio (*WBAN – Wireless Body Area*) para operar em 5,8 GHz, sendo posicionada sobre a cabeça humana, já em [5] é desenvolvida uma antena com *patch* circular para a detecção de descargas parciais em transformadores de potência.

Na busca de melhorar a resposta eletromagnética das antenas de microfita, muitas são as modificações propostas para o *patch*; desde a inserção de cavidades com as mais diversas geometrias, contornos variados até estruturas fractais. Entender os efeitos das mudanças geométricas do *patch* torna-se fundamental para a proposição de antenas que apresentem a resposta eletromagnética adequada, seja em um diagrama de radiação diretivo, baixa perda de retorno e taxa de onda estacionária de tensão (VSWR) e/ou multilargura de banda.

Neste trabalho é apresentada uma análise sobre os efeitos do aumento do número de vértices do *patch* com geometria poligonal regular de antenas de microfita. A partir da antena *patch* quadrada com área $A = 14,44 \text{ cm}^2$ projetada como antena de referência, operando na frequência de 2,59 GHz, alimentada por baixo do plano de terra por um cabo coaxial de 50Ω , foram propostos dois conjuntos de antenas: o primeiro com *patches* com $N = 6, 8, 10, 12$ vértices (onde N é número de lados, igual ao número de vértices), e o segundo com $N = 5, 7, 9, 11$ vértices. Utilizando o software *High Frequency Structure Simulator (HFSS)* da ANSYS foi possível avaliar a perda de retorno, VSWR, impedância de entrada e diagrama de radiação, comparando com a resposta da antena de referência.

A partir desta avaliação, é possível inferir uma escolha mais lógica da geometria do *patch*, evitando decisões pouco criteriosas ou após muitas experimentações, dando abertura para criação de metodologias próprias em projetos de antenas de microfita.

Trabalho realizado com apoio da Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa (FAPESPA) por meio do programa Forma Pará, subprograma UFPA/FAPESPA 2023-2 (IC), PRO6432-2023.

II. PROJETO DAS ANTENAS PATCHS REGULARES

Para projetar a antena de microfita de referência foi necessário, inicialmente, calcular a largura W do *patch* retangular, utilizando (1) [3].

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Para aplicações em redes *wireless*, é usual projetar as antenas de microfita para operar na frequência de 2,4 GHz. Considerando um substrato com espessura $h = 1,5$ mm e constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas 0,02 (fibra de vidro FR4), a largura da antena de referência é $W = 38,03$ mm. A literatura propõe métodos para calcular o comprimento L da antena para considerar os efeitos de franjamento nas cavidades da antena. Contudo, como objetiva-se realizar a análise dos efeitos de vértice no *patch* poligonal regular, propomos utilizar $L = W = 38,03$ mm, produzindo uma plaqueta quadrada com área $A = 14,46$ cm².

A alimentação da antena foi realizada utilizando um cabo coaxial com diâmetro 0,32 cm externo, e diâmetro do condutor interno de 0,14 cm, com impedância característica de 50 Ω , conectado por baixo do plano de terra. O centro do condutor interno é posicionado na coordenada $(x_m, y_m, 0)$ do primeiro quadrante do *patch* retangular, com centro em $(0,0,0)$. Na Fig. 1 é mostrado o esquema geométrico da antena *patch* de referência.

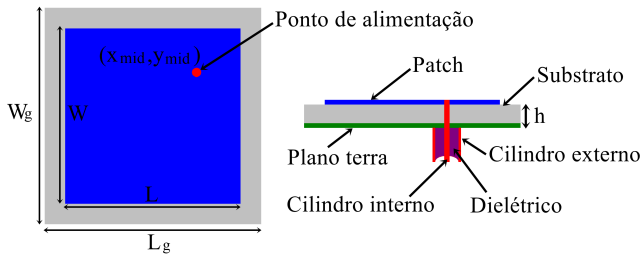


Fig. 1. Esquema da antena *patch* retangular de referência: (a) Visão superior; (b) Visão lateral.

Para escolher o ponto de alimentação $(x_m, y_m, 0)$ foram realizadas 25 simulações percorrendo os pontos médios do primeiro quadrante do *patch* retangular. A Fig. 2 mostra a perda de retorno obtida na frequência de ressonância em cada ponto de alimentação.

Na Fig. 2 a região em azul escuro indica que não houve frequências de ressonância. Os quadrados em verde e laranja mostram os pontos de aplicação da alimentação que produziram perda de retorno entre -43 dB e -10 dB, com a frequência de ressonância variando entre 2,58 e 2,61 GHz. O ponto de alimentação escolhido foi em $x_{mid} = 12,23$ mm e $y_{mid} = 6,79$ mm. Com esta alimentação a antena de referência apresentou perda de retorno de -40,52 dB na frequência 2,59 GHz (variação de 0,19 GHz da especificação do projeto), e largura de banda de $BW = 38,10$ MHz.

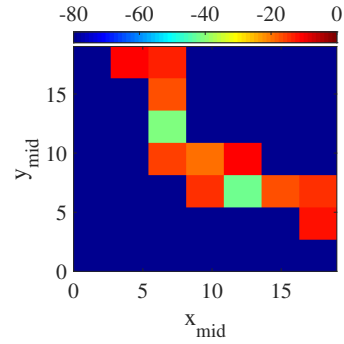


Fig. 2. Perda de retorno em função de $(x_m, y_m, 0)$ no 1º quadrante do *patch*.

Para calcular as dimensões do plano de terra quadrado, foi utilizada a equação (2) [6], assim $W_g = L_g = 47,0363$ mm.

$$W_g = 6h + W \quad (2)$$

Para verificar os efeitos do aumento do número de vértices no *patch* da antena de microfita, foram produzidos dois conjuntos de antenas, no primeiro as antenas com $N = 6, 8, 10, 12$ lados (número par de vértices do *patch* regular, Fig. 3), e um segundo conjunto com $N = 5, 7, 9, 11$ lados (número ímpar de vértices do *patch* regular, Fig. 4).

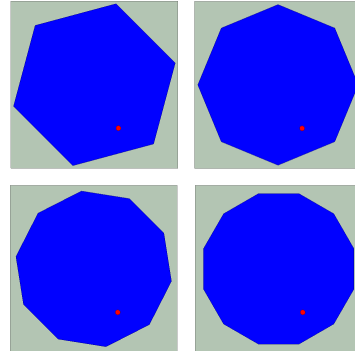


Fig. 3. Conjunto de antenas 1: $N = 6, 8, 10, 12$ par.

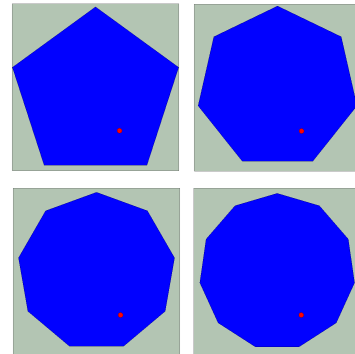


Fig. 4. Conjunto de antenas 2: $N = 5, 7, 9, 11$ ímpar.

As antenas apresentadas no conjunto 1 (Fig. 3) são respectivamente com *patch* hexagonal, octogonal, decagonal e dodecagonal. As antenas do conjunto 2 (Fig. 4) possuem *patch* pentagonal, heptagonal, eneagonal e undecagonal.

As antenas nos conjuntos 1 e 2 foram projetadas para possuir *patch* com área igual a da antena de referência $A = 14.4676 \text{ cm}^2$. A partir desta definição, foi proposto usar a equação (3) para calcular a distância do centro ao vértice de cada polígono regular com N vértices.

$$d = \frac{\sqrt{A}}{\cos\left(\frac{\pi}{N}\right) \sqrt{N \tan\left(\frac{\pi}{N}\right)}} \quad (3)$$

A definição da equação (3) auxiliou na construção dos *patches* no *software* HFSS. A medida que o número de vértices aumenta, a figura geométrica regular do *patch* se aproxima de um disco circular, de forma que a distância d se aproxima do raio r do disco (4).

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \approx 21,4597 \text{ mm} \quad (4)$$

O círculo, apesar de não ser um polígono, pode ser aproximado a partir de um polígono regular quando o seu número de vértices N tende ao infinito. Assume-se como uma figura geométrica importante para este estudo, pois é possível uma comparação entre o efeito das pontas, acréscimo e ausência delas para o desempenho da antena de microfita.

III. SIMULAÇÕES

Os parâmetros das simulações realizadas no *software* HFSS são apresentados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS PARA CONSTRUÇÃO DAS ANTENAS.

Patch				
Geometria	Distância do centro ao vértice	Nº de vértices		
Quadrado	26.8957 mm	4		
Pentágono	24.6675 mm	5		
Hexágono	23.5978 mm	6		
Heptágono	22.9936 mm	7		
Octógono	22.6165 mm	8		
Encágono	22.3644 mm	9		
Decágono	22.1873 mm	10		
Undecágono	22.0578 mm	11		
Dodecágono	21.9603 mm	12		
Substrato	Largura e comprimento		Material	
	47,036 mm × 47,036 mm		FR4_epoxy	
Plano Terra	Largura e comprimento		Material	
	47,036 mm × 47,036 mm		PEC	
Cabo Coaxial				
Cilindro Interno	Posição do centro	Raio	Altura	Material
	$(x_{mid}, y_{mid}, -h)$	0,07 cm	0,5 cm	PEC
Cilindro Externo	Posição do centro	Raio	Altura	Material
	$(x_{mid}, y_{mid}, -h)$	0,2 cm	0,5 cm	PEC
Probe	Posição do centro	Raio	Altura	Material
	$(x_{mid}, y_{mid}, -h)$	0,07 cm	0,15 cm	PEC
Dielétrico	Posição do centro	Raio	Altura	Material
	$(x_{mid}, y_{mid}, -h)$	0,16 cm	0,5 cm	Polyethylene
Alimentação				
Porta	Posição			Altura
	$(x_{mid}, y_{mid}, -0,65\text{cm})$			0.16 cm

É importante eliminar as interseções de figuras tridimensionais durante a modelagem, que são basicamente entre cilindro externo e o dielétrico e entre o substrato e a probe de alimentação.

A alimentação foi feita através do desenho de cabo coaxial para conectar a *Modal Lumped Port*, configurada com impedância de 50Ω . Para configurar o *Driven Solution Setup* foi selecionado o *Sweep Type* como sendo o *Fast*, distribuição *Linear Step* de 1,5 a 3,5 GHz e 0.0015 GHz de passo.

IV. RESULTADOS

Na Fig. 5 é mostrada a Perda de retorno para o conjunto 1, comparando com a Perda de retorno da antena de referência. Para melhor visualização dos comportamentos, os gráficos foram limitados na faixa de 2,5 a 3,5 GHz.

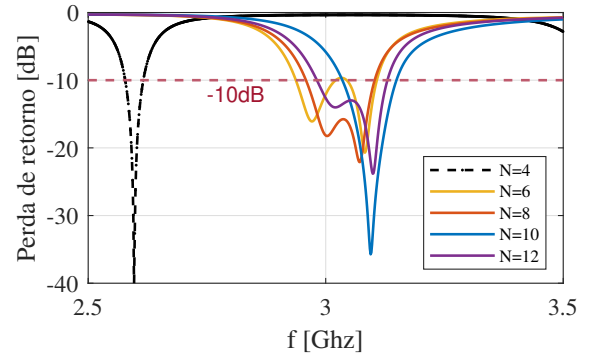


Fig. 5. Comparação da perda de retorno em função da frequência de ressonância para o conjunto de antenas 1, com a antena de referência.

Ao aumentar o número de vértices de 4 para 6, há um deslocamento abrupto da frequência de ressonância de 2,59 para 3,08 GHz. Ao aumentar de 6 para 8, a frequência é deslocada para 3,07 GHz. Ao passo que o número de vértices aumenta de 8 para 12, a frequência de ressonância aumenta. Portanto, não foi possível verificar um comportamento de linearidade entre o número de vértices e o deslocamento na frequência de ressonância para o primeiro conjunto. Comparando com a antena de referência, a antena com *patch* decagonal apresentou menor perda de retorno, de -35,72 dB.

A Fig. 6 apresenta a Perda de retorno para o conjunto 2, comparando com a Perda de retorno da antena de referência.

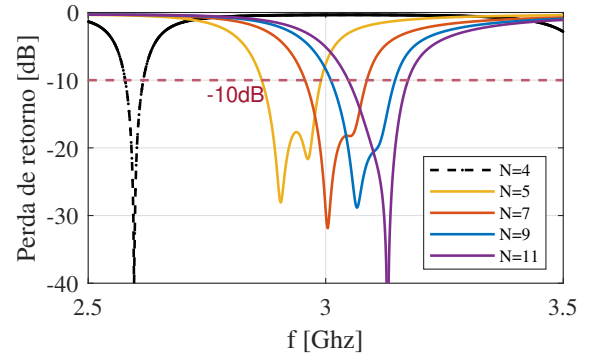


Fig. 6. Comparação da perda de retorno em função da frequência de ressonância para o conjunto de antenas 2, com a antena de referência.

Para o conjunto de antenas 2, na Fig. 6 observa-se um comportamento expressivo de deslocar a frequência de ressonância. Para $N = 5$, a antena é ressonante em 2,96 GHz, e ao passo em que N aumenta de 5 para 7, 7 para 9, e 9 para 11, observa-se, respectivamente, os deslocamentos de 99 MHz, 61,5 MHz, e 64,5 MHz. Verifica-se também que o *patch* undecagonal apresentou a menor Perda de Retorno, de -49,96 dB.

Analisando a razão de onda estacionária (ou Razão de onda estacionária de tensão - VSWR) para o conjunto de antenas 1 na Fig. 7, observou-se que a antena com *patch* decagonal apresentou menor VSWR entre os conjuntos de $N = 6$ a $N = 12$, sendo 73,76% maior que o da antena de referência com VSWR = 0,1635 dB, e o segundo menor encontrado foi para o dodecágono com VSWR = 1,1204 dB.

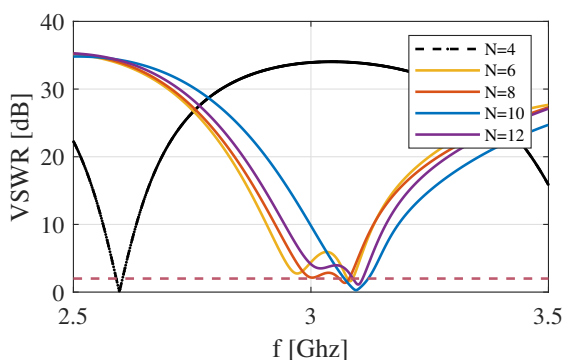


Fig. 7. Comparação da VSWR em função da frequência de ressonância para o conjunto de antenas 1, com a antena de referência.

Para os *patches* com $N = 6, 8$ e 12 lados, especificamente, surgem duas frequências ressonantes, embora somente as com perda de retorno menor sejam as com a razão de onda estacionária (VSWR) abaixo de 2 dB e, portanto, com uma transmissão mais eficiente e aceitável em um projeto.

Para o conjunto de antenas 2 da Fig. 8, Verifica-se que todos as antenas apresentam VSWR menor que 2 dB para uma única frequência, e a antena com *patch* undecagonal (11 vértices) apresentou VSWR em 75,84% quando comparado a VSWR da antena de referência.

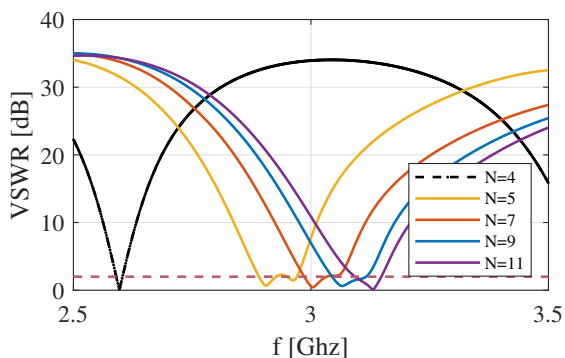


Fig. 8. Comparação da VSWR em função da frequência de ressonância para o conjunto de antenas 2, com a antena de referência.

Para melhor comparação em perspectivas numéricas, o resumo dos resultados nas respectivas frequências de ressonância podem ser conferidos na Tabela II para o conjunto 1, na Tabela III para o conjunto 2.

TABELA II
RESUMO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DAS ANTENAS DO CONJUNTO 1.

Geometria	f (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	BW (MHz)	R (Ω)	X(Ω)
Hexágono	3,0825	-20,7076	1,6058	64,5	42,8576	4,7368
Octógono	3,072	-22,1032	1,3664	72,75	43,1600	2,5939
Decágono	3,0945	-35,7286	0,2841	114	50,7508	-1,4666
Dodecágono	3,099	-23,8211	1,1204	74	45,0588	3,6228

TABELA III
RESUMO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DAS ANTENAS DO CONJUNTO 2.

Geometria	f (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	BW (MHz)	R (Ω)	X(Ω)
Pentágono	2,9055	-28,0799	0,6856	62,25	49,8130	3,9358
Heptágono	3,0045	-31,8693	0,4431	130,5	49,5951	2,508
Eneágono	3,066	-28,8452	0,6277	135	49,6974	3,5906
Undecágono	3,1305	-49,9682	0,0395	126	50,1507	-0,171

Na Tabela II é possível constatar com mais clareza, que a antena com melhor desempenho considerando-se a menor perda de retorno S_{11} , o menor VSWR, impedância de entrada $Z = R + jX$ em 50Ω e a maior largura de banda BW , cuja foi aproximadamente 200% maior que a de referência foi a antena com geometria de decágono. Observando os mesmos parâmetros na Tabela III para o segundo conjunto, o melhor desempenho foi da antena com geometria de undecágono, porém a terceira com maior largura de banda BW , sendo 230,7% maior que a da quadrada.

Buscando nortear sobre o caso limite, quando o número de vértices tende a infinito, na Tabela IV são apresentados os resultados para antena *patch* quadrada, de referência, e para a antena com *patch* circular.

TABELA IV
RESUMO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DAS ANTENAS DE REFERÊNCIA E CIRCULAR.

Geometria	f (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR (dB)	BW (MHz)	R (Ω)	X(Ω)
Quadrado	2,59	-40,52	0,1635	38,1	50,81	-0,35
Círculo	3,16	-23,43	1,1700	114,6	54,78	5,2

Comparando-se somente a antena com geometria quadrada e circular, nota-se uma queda na performance desses parâmetros quando comparada as de geometria de polígonos regulares, evidenciando que vértices (como observado no decágono e undecágono) podem melhorar o desempenho da antena até um certo ponto, mas aumentar seu número pode levar a diminuição da eficiência da antena.

A antena de referência apresentou um diagrama de radiação diretivo perpendicularmente ao plano da antena, além de apresentar o mesmo perfil no plano E ($\phi = 0^\circ$) e no plano H ($\phi = 90^\circ$). Em ambos os conjuntos, aumentar o número de vértices resultou em quatro lóbulos a partir do plano da antena. Verificou-se que os diagramas sofrem pouca influência do número de vértices, e se aproximam do padrão de radiação da antena com *patch* circular.

V. CONCLUSÃO

Conforme os resultados das simulações, em linhas gerais, o aumento de vértices desloca a frequência de ressonância para valores na faixa dos 3 GHz, no entanto, não se verificou um padrão pois isso não ocorre de maneira linear.

Quanto ao comportamento dos conjuntos 1 e 2, identificou-se a tendência de convergir para o valor de frequência e de VSWR do polígono de 10 lados no primeiro conjunto. Por outro lado, esses dois parâmetros no segundo conjunto apresentaram-se com uma maior distância espacial (sem convergir a determinados valores de uma geometria em particular), mas produzindo bons resultados para a perda de retorno S_{11} , razão de onda estacionária (VSWR), largura de banda BW e impedância de entrada Z como foi o caso do heptágono, eneágono e undecágono.

Em síntese, estes resultados expressam o deslocamento da frequência em função do aumento de lados N e, inclusive, a característica de convergência a valores de uma dada geometria quando N é um número par e de divergência quando N é um número ímpar. Avaliações que favorecem o estudo de geometrias mais complexas e fomentam o desenvolvimento de abordagens no projeto dessas antenas.

Para futuros trabalhos, pretende-se investigar o comportamento da variação da posição da alimentação considerando-se seções de área particulares e suas posições simétricas, para verificar se efetivamente traduzem-se no mesmo desempenho. E, também, tendo em vista o comportamento dos polígonos com mais de 4 lados com ligeiras variações, torna-se interessante analisar os efeitos de incremento de área, mudança do tipo de alimentação, inserção de cavidades ou arranjos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa (FAPESPA) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos financiamentos deste projeto de pesquisa e a contribuição dos colaboradores do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMAG) do Campus Universitário de Tucuruí da UFPA.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl e A. Ittipiboon. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House Antennas and Propagation Library, 2000, pp. 14–19.
- [2] M. Ayyappan, B. Manoj, e S. Rodrigues, “Low Return Loss Circular Microstrip Patch Antenna at 5.8GHz for Wide-band Applications,” *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740–741, Março 2016 [Resumo da Conferência Internacional sobre Técnicas Elétricas, Eletrônicas e de Otimização (ICEEOT), p. 301, 2016].
- [3] C. A. Balanis, *Teoria de Antenas: Análise e Síntese*, 3rd ed., vol. 2. LTC, 2009, pp.425–439.
- [4] R. S. Campos. *Avaliação de Performance de Antena Microstrip Vestível Considerando Curvatura Corporal*. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 15, n. 1, 2023.
- [5] G. V. R. Xavier et al. *Desenvolvimento de antenas de microfita para detecção de descargas parciais*. 2018.
- [6] Rachmansyah, A. Irianto e A. Benny Mutiara. *Designing and manufacturing microstrip antenna for wireless communication at 2.4 GHz*. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, v. 3, n. 5, p. 670-675, 2011.

ANEXO B – ANÁLISE DOS EFEITOS DE UMA FENDA POLIGONAL REGULAR EM UMA ANTENA DE MICROFITA PATCH CIRCULAR

Na próxima página encontra-se o arquivo original do artigo intitulado “Análise dos efeitos de uma fenda poligonal regular em uma antena de microfita *patch* circular”, apresentado no “XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2024”, realizado presencialmente em Belém/PA, no ano de 2024.

Análise dos efeitos de uma fenda poligonal regular em uma antena de microfita *patch* circular

Samantha Pinto, Leonardo Cruz, Karlo Costa, Andrécia Costa e André Cruz

Resumo— Este trabalho apresenta uma análise dos efeitos de uma fenda poligonal regular inserida no *patch* de uma antena de microfita projetada para operar na frequência de 2,4 GHz. A antena com raio aproximado de 1,69 cm foi alimentada por uma sonda coaxial por baixo do plano de terra. Foi proposto variar o número de vértices da fenda e a sua posição relativa em relação ao ponto de alimentação. Os resultados gerados no *software* HFSS mostram os efeitos da inserção da fenda sobre a perda de retorno S_{11} , a taxa de onda estacionária (VSWR), frequência de ressonância f_r e largura de banda da antena.

Palavras-Chave— Antena de microfita, *patch* circular, fenda poligonal regular, análise paramétrica.

Abstract— This paper presents an analysis of the effects of a regular polygonal slot inserted into the *patch* of a microstrip antenna designed to operate at a frequency of 2.4 GHz. The antenna, with an approximate radius of 1.69 cm, was fed by a coaxial probe from beneath the ground plane. It was proposed to vary the number of vertices of the slot and its relative position with respect to the feed point. The results generated in the HFSS *software* show the effects of slot insertion on return loss S_{11} , Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), resonance frequency f_r , and bandwidth of the antenna.

Keywords— Microstrip antenna, circular patch, regular polygonal slot, parametric analysis.

I. INTRODUÇÃO

Uma antena de microfita, na sua configuração mais básica, consiste de um *patch* radiante depositado sobre um substrato dielétrico, com plano de terra abaixo. O *patch* da antena pode assumir geometrias diversas, embora geometrias regulares sejam utilizadas para simplificar a análise de predição da sua performance [1]. A pesquisa por estruturas mais eficientes tem mostrado que a inserção de fendas (ou *slots*), produz uma melhora no desempenho destas antenas. Em [2] verificou-se que há um aumento do ganho de uma antena tribanda 5,73 GHz, 6,16 GHz e 8,34 GHz para aplicações 5G, pela simples inserção de um *slot* em *loop* seccionado no *patch* retangular.

Neste trabalho, é apresentada uma análise sobre os efeitos da inserção de um *slot* poligonal regular em um *patch* circular de raio $a \approx 1,6976$ cm, alimentado por cabo coaxial a 30% do centro. Nas simulações realizadas no *software* HFSS, foram variados o número de vértices do *slot* de $N = 4$ a 12 e sua posição angular relativa θ . Constatou-se que o *slot* heptagonal ofereceu a maior largura de banda, de 58,70 MHz, e para esta, analisou-se o efeito da redução da área do *slot* na resposta eletromagnética da antena.

Samantha Pinto¹, e-mail: eng.smota@outlook.com; Leonardo Cruz¹, e-mail: francaleo062@gmail.com; Karlo Costa², e-mail: karlo@ufpa.br; Andrécia Costa³, e-mail: andreciacosta@ufpa.br; André Cruz³, e-mail: andcruz@ufpa.br. ¹Curso de Engenharia Elétrica, ²Instituto de Tecnologia, ³Faculdade de Engenharia Elétrica; ^{1,2,3} Universidade Federal do Pará. Este trabalho foi parcialmente financiado por FAPESPA (00000.9.001282/2023).

II. PROJETO DA ANTENA PATCH CIRCULAR COM SLOT

As etapas incluem projetar um *patch* circular com raio a , calculado pela equação (1) [3], para operar em $f_r = 2,4$ GHz.

$$a = F \left\{ 1 + \left[\frac{2h}{\pi \varepsilon_r F} \right] \left(\ln \left[\frac{\pi F}{2h} \right] + 1,7726 \right) \right\}^{-1/2}, \quad (1)$$

onde $F = 8,791 \times 10^9 / (f_r \sqrt{\varepsilon_r})$, a frequência f_r em Hz e a espessura h do substrato em cm. Este cálculo é realizado considerando que a antena possui um substrato de fibra de vidro FR4 com espessura $h = 0,15$ cm, com constante dielétrica $\varepsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas 0,02, resultando em um *patch* com raio $a \approx 1,6976$ cm. O comprimento e largura do substrato quadrado (com plano de terra) foram calculados por $L_g = W_g = 6h + 2a \approx 4,2951$ cm [4]. A Fig. 1 ilustra a visão superior e em corte lateral da antena final.

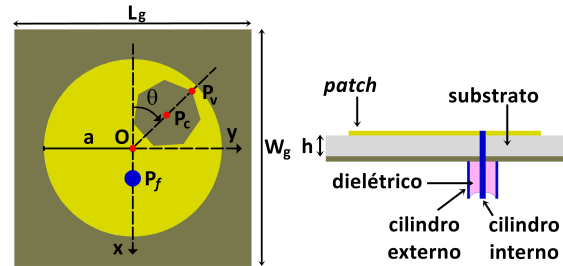


Fig. 1. Antena *patch* circular com *slot* poligonal: superior e corte lateral.

Em seguida, determinar o ponto ótimo de alimentação $P_f(x_f, 0)$ feito pela parte inferior através de um cabo coaxial com diâmetro externo de 0,4 cm e diâmetro do condutor interno de 0,14 cm e um dielétrico com permissividade relativa de 2,25. A Fig. 2 mostra a perda de retorno da antena (S_{11} em dB) na frequência de ressonância, a medida que é variado o ponto de alimentação $P_f(x_f, y_f)$ sobre o eixo x ($y_f = 0$) de $x_f = 0$ a $0,9a$, para a antena *patch* circular sem o *slot*.

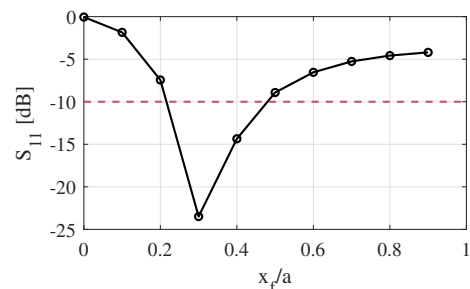


Fig. 2. Perda de retorno em função do ponto de alimentação $P_f(x_f, 0)$.

Na posição $x_f = 0,3a$ a antena *patch* circular sem a fenda poligonal regular apresentou menor perda de retorno de $-23,4873$ dB na frequência de $2,3963$ GHz.

Para inserir o *slot* com geometria de polígono regular no *patch*, é necessário definir no *software* HFSS as coordenadas do centro do polígono em $P_c(x_c, y_c, 0)$ (2), e as coordenadas do vértice mais afastado da origem $P_v(x_v, y_v, 0)$ (3).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c0} & y_{c0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{v0} & y_{v0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde $(x_{c0}, y_{c0}) = (-a/2, 0)$ e $(x_{v0}, y_{v0}) = (-(a/2 + d), 0)$, são, respectivamente, as coordenadas do centro e do vértice do polígono regular sobre o eixo $-x$. O ângulo θ entre o eixo $-x$ e o segmento que vai de P_v à origem O define a rotação do *slot* em relação ao centro do *patch*. A distância d do centro ao vértice do polígono é calculada em função do número de lados N , e da área A do polígono, conforme (4).

$$d = \frac{\sqrt{A}}{\cos\left(\frac{\pi}{N}\right) \sqrt{N \tan\left(\frac{\pi}{N}\right)}} \quad (4)$$

Para padronizar todos os *slots* com a mesma área, foi definido $A = K A_{ref}$, onde K é um fator de proporcionalidade entre 0 e 1, e $A_{ref} = 1,44 \text{ cm}^2$ (área do maior *slot* quadrado posicionado em $\theta = 0^\circ$ sobre o *patch*).

III. RESULTADOS

A Fig. 3 mostra as respostas de largura de banda, perda de retorno e VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) nas respectivas frequências de ressonância para 45 antenas *patch* circular, com *slots* de $N = 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ vértices, posicionados conforme $\theta = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ$ e 90° .

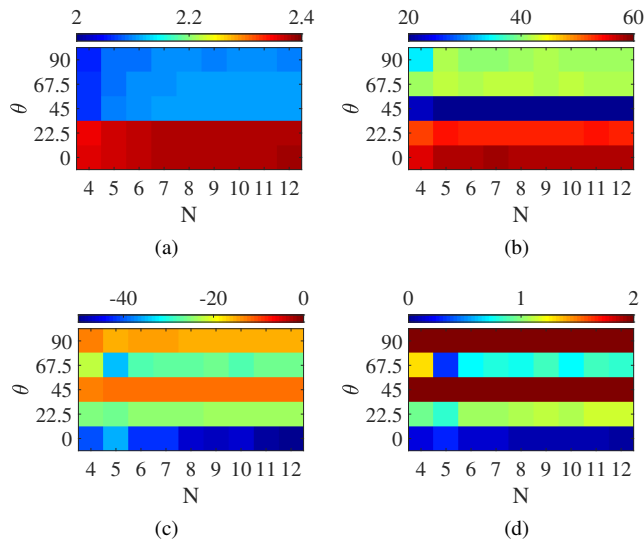


Fig. 3. Respostas das antenas *patch* circular com *slot* regular de N vértices, posicionados em função do ângulo θ em graus: (a) Frequência de ressonância em GHz; (b) Largura de banda em MHz; (c) Perda de retorno em dB; (d) VSWR em dB.

É possível observar na Fig. 3 (a) que, para as antenas com *slot* em 0° e $22,5^\circ$, as frequências de ressonância são próximas de $2,4$ GHz, e para $67,5^\circ$ ou 90° , a ressonância ocorre próxima de $2,06$ GHz. Na Fig. 3 (d) verifica-se que as antenas com *slot* localizados em 45° ou 90° produzem $VSWR > 2$ dB, portanto, não apresentam resposta aceitável. A Fig. 3 (c) mostra que as antenas com *slots* localizados em $0^\circ, 22,5^\circ$, e $67,5^\circ$ apresentam perda de retorno aceitável menor que -20 dB, e a medida que o número de vértices no *slot* aumenta, menor é a perda de retorno. A Fig. 3 (b) mostra que a antena com $N = 7$ com *slot* em $\theta = 0^\circ$ apresentou a maior largura de banda de $58,7$ MHz.

A Fig. 4 ilustra a configuração da antena *patch* circular com o *slot* heptagonal ($N = 7$ em $\theta = 0^\circ$) no HFSS.

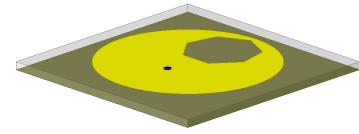


Fig. 4. Antena *patch* circular com *slot* heptagonal.

Para verificar os efeitos do tamanho do *slot* no *patch* da antena, na Fig. 5 é mostrada a perda de retorno e a VSWR para a antena com *slot* heptagonal, variando o fator de proporção de área do *slot* $K = 1, 0,5, 0,25$ e 0 (sem *slot*).

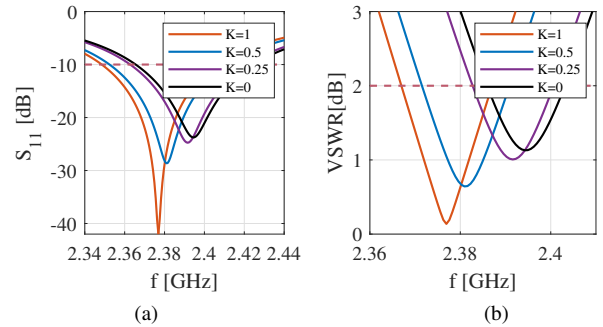


Fig. 5. Respostas da antena *patch* circular variando a área do *slot* heptagonal: (a) Perda de retorno; (b) VSWR.

IV. CONCLUSÕES

A partir da análise paramétrica na Fig. 3 verifica-se que para $N > 8$ as antenas apresentam perda de retorno entre -40 e $-50,23$ dB, com a frequência de ressonância de $2,3769$ GHz (mais próximo do especificado). No entanto, a antena com *slot* heptagonal apresentou maior largura de banda. Ao diminuir o tamanho do *slot*, verifica-se um aumento da perda de retorno até $-23,75$ dB, contudo, a f_r se desloca para a $2,3943$ GHz.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl e A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House Antennas and Propagation Library, 2000.
- [2] E. Li, X. J. Li e Q. Zhao, "A Design of Ink-Printable Triband Slot Microstrip Patch Antenna for 5G Applications", em 4th Australian Microwave Symposium (AMS), Sydney, Austrália, 2020.
- [3] C. A. Balanis, *Teoria de Antenas: Análise e Síntese*, 3ª ed., vol. 2. LTC, pp. 425–439, 2009.
- [4] A. I. Rachmansyah, & A. B. Mutiara, Designing and manufacturing microstrip antenna for wireless communication at 2.4 GHz. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 3(5), 670-675, 2011.