

PROJETO E ANÁLISE DE ANTENAS DE MICROFITA MINIATURIZADAS OPERANDO EM 2,45 GHz PARA APLICAÇÕES EM CUBESAT

Gustavo Lucas Dias Rocha¹, Samanta Mesquita de Holanda²

Resumo: Este trabalho apresenta o projeto, a simulação e a análise de antenas de microfita miniaturizadas operando em 2,45 GHz, com aplicação voltada a satélites do tipo CubeSat. Com base em fundamentos teóricos da eletromagnetismo aplicado, foram adotadas duas estratégias principais de miniaturização: a mudança do substrato, por meio da escolha de materiais dielétricos de alta permissividade relativa, e a alteração da geometria do *patch* para o formato *meander line*. Quatro antenas distintas foram simuladas utilizando o *software* HFSS®, considerando diferentes combinações de substratos (FR4 e Rogers TMM® 10i) e geometrias. Os parâmetros de desempenho analisados foram frequência de ressonância, coeficiente de reflexão, largura de banda, ganho e área física das antenas. Os resultados mostraram que a variação do substrato contribuiu para a redução de 35,8% da área da antena, mantendo o coeficiente de reflexão próximo a -25 dB, com ganho máximo de até 5,03 dBi. Já a geometria *meander line* permitiu maior compactação, concedendo 74,2% de miniaturização quando utilizado o FR4 e 85,5% com o Rogers TMM® 10i. Mas a utilização desta técnica reduziu o ganho máximo para valores próximos a -5 dBi. Apesar da largura de banda próxima a 2% em todas as abordagens, os resultados estão dentro dos padrões esperados para antenas compactas. Conclui-se que a integração de antenas miniaturizadas com substratos de baixa tangente de perdas é viável para uso em CubeSats.

Palavras-chave: CubeSat. Antenas de Microfita. Miniaturização de Antenas. *Meander Line*. Substratos Dielétricos para Antenas de Microfita.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos focos da comunicação sem fio são as antenas [1]. Baseadas em princípios eletromagnéticos amplamente consolidados, estes dispositivos garantem que os sinais de rádio sejam transmitidos, amplificados, direcionados e recebidos com máxima eficiência permitida, possibilitando uma ampla variedade de aplicações. Particularmente, as antenas são elementos essenciais nos diferentes subsistemas de satélites artificiais e naves espaciais, levando, desse modo, à necessidade de diversificação para cumprir com êxito as missões definidas [1].

Sob essa perspectiva, é de conhecimento geral que a construção de grandes satélites demanda recursos e técnicas construtivas avançadas e de alto valor monetário. Além disso, os seus lançadores exigem da mesma afinidade técnica, considerando riscos elevados e infraestrutura terrestre complexa [2]. A partir disso, com o advento da microeletrônica de baixa potência, no final da década de 90, houve o desenvolvimento de uma multiplicidade de pequenos satélites no setor espacial nos últimos anos [3]. Essa prática foi justificada pela ótima relação de desempenho sobre a massa, que permitia a integração de tecnologias avançadas nos pequenos satélites, que eram possíveis apenas nos satélites de grande porte [4].

Por consequência, com base nessa iniciativa de redução da proporção do tamanho dos satélites, em uma visão geral, surgiram os dispositivos de tamanho reduzido, classificados de acordo com a sua massa em kg, diferenciando-se em minissatélites, com massa de 100-500 kg, microssatélites, com 10-100 kg e nanosatélites, com apenas 1-10 kg [5]. No entanto, mesmo que haja uma ampla variedade de classificação de satélites, este trabalho teve como foco principal as antenas para satélites com massa entre 1-10 kg, considerados nanosatélites.

Simultaneamente, os nanosatélites, em sua maioria, são construídos com objetivos educacionais, em projetos de nível de organização universitária. Contudo, grandes instituições ainda priorizam a construção desses dispositivos para demonstrações tecnológicas e uso operacional em medições científicas ou comunicação por rádio [6]. Em um levantamento sobre as missões mundiais de nanosatélites, Bouwmeester e Guo [4] afirmam que é preciso observar que as medições científicas geralmente são muito limitadas em comparação com os grandes satélites científicos. Além disso, quando utilizados para comunicação, o desempenho ainda não é comparável ao dos satélites de comunicação comercial, enfatizando ainda mais a necessidade de inovação tecnológica na área.

No Brasil, a iniciativa de redução do tamanho dos satélites para aprimoramento das tecnologias espaciais nacionais disponíveis, é uma porta de entrada para atender as demandas técnicas e a realidade orçamentária do Programa Espacial Brasileiro [7,8]. Nesse sentido, visando tecnologias econômicas para pesquisadores e organizações, além de tempo reduzido de desenvolvimento, tem-se os pequenos satélites chamados de CubeSats, classificados como nanossatélites, que obedecem às especificações do Programa CubeSats [9].

Kim *et al.* [10], por exemplo, um CubeSat é projetado e analisado para redes de comunicação em órbita baixa (LEO) solo-espaco, aproveitando-se de um conjunto de antenas planas para comunicação *mmWave*, mostrando pela primeira vez a viabilidade do uso da plataforma CubeSat para comunicação via satélite *mmWave* de alta velocidade. Indo além, Buongiorno *et al.* [11], em uma missão CubeSat para observação da terra dedicada à análise da atividade de vulcões, supervisionada pela Agência Espacial Europeia (ESA), desenvolveu o projeto de construção de dois nanossatélites de 12U voando em formação, com cada satélite embarcando instrumentos de bordo específicos e adaptados para atenderem os objetivos científicos do projeto.

Desse modo, concomitante à redução das dimensões dos satélites, as especificações impostas pela plataforma em aplicações com dispositivos de dimensões reduzidas, tornam-se mais restritas e, apesar da sua ampla compatibilidade, os CubeSats inviabilizam soluções construtivas que não se adaptam a esse padrão. Como resultado, é indispensável que os subsistemas dos CubeSats no momento do projeto preliminar sejam submetidos a avaliação, visto que a arquitetura e design dos principais elementos integradores devem adequar-se às imposições de ambiente, tamanho, forma, e garantir, com eficiência, o seu funcionamento.

Nesse aspecto particular, as antenas estão entre os primeiros elementos a necessitarem de modificações para se alinharem ao padrão CubeSat, pois diversos modelos são incompatíveis com as dimensões desses pequenos satélites por possuírem dimensões excessivas. Isso ocorre com antenas monopolo e 3D implantáveis, assim como antenas de frequência mais baixa (UHF/VHF) não miniaturizadas, uma vez que exigem tamanho maior para serem compatíveis com seu comprimento de onda, aumentando a complexidade de operação e a possibilidade de falhas em nanossatélites [12]. As antenas *patch* de microfita, em contrapartida, mostram-se como a alternativa mais adequada para essa aplicação, visto que estas antenas são leves, de tamanho pequeno e baixo perfil aerodinâmico, capaz de combinar com diferentes superfícies [13].

Dessa forma, evidencia-se a necessidade de construção de antenas em diferentes configurações que possam ser utilizadas nesses tipos de satélites, mantendo grau equivalente de eficiência em relação ao tamanho miniaturizado e expandindo a categoria de aplicação de acordo com a frequência de operação. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo projetar, simular, otimizar e comparar diferentes configurações de antenas de microfita operando na frequência de 2,45 GHz, a partir da aplicação de técnicas de miniaturização, buscando-se avaliar as principais características de desempenho, tais como coeficiente de reflexão, largura de banda e ganho, considerando também os limites físicos inerentes ao projeto de antenas compactas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico será apresentado um breve contexto estatístico do padrão CubeSat, bem como os conceitos fundamentais da teoria de antenas de microfita utilizados no desenvolvimento deste trabalho, junto às noções essenciais de técnicas de miniaturização amplamente utilizadas no projeto de antenas.

2.1. O Padrão CubeSat e Estatísticas Atuais

A princípio, segundo The CubeSat Program [9], um CubeSat é uma classe de satélite criado pelas Universidades Estaduais Politécnicas de Stanford e da Califórnia em 1999, que adota um tamanho e forma padrão, cuja unidade é definida como "U". Um CubeSat 1U é um cubo de aproximadamente 10x10x10 cm³ com massa de até 2 kg, onde sua forma e dimensões podem ser observadas através da Figura 1. Outra característica importante do padrão CubeSat é que os seus satélites são modulares e, com a união de múltiplas unidades, pode-se criar CubeSats com especificações variáveis e com mais de um módulo, formando os CubeSats com fator de forma de 2U até 12U. Em suma, o CubeSat é o padrão de satélites modular comercialmente mais difundido, tanto pelos seus critérios econômicos e construtivos, como pela aplicabilidade em diversas oportunidades de testes e monitoramento.

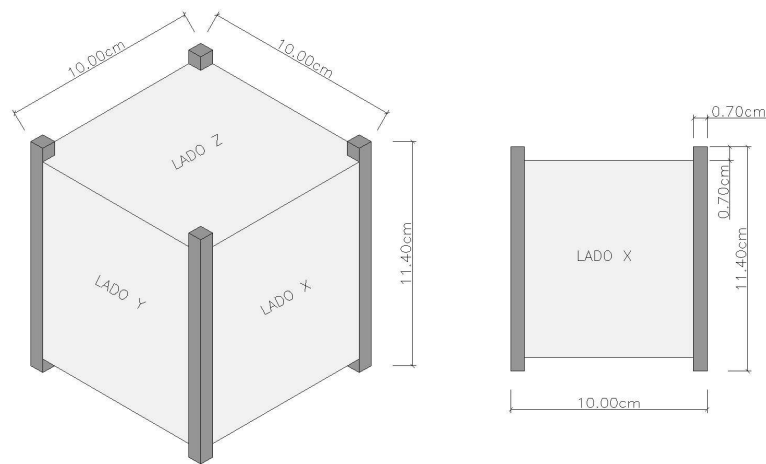


Figura 1. Modelo de CubeSat 1U e suas dimensões. (Autoria própria)

Ao final de dezembro de 2024, cerca de 2596 CubeSats já haviam sido lançados, em diferentes missões em quase todas as nações do mundo [6]. Além disso, a previsão global para os lançamentos de nanossatélites apenas em 2025 alcança o acúmulo de 579 modelos, pouco maior que o dobro do montante obtido no ano de 2024, com aproximadamente 280 modelos lançados [6]. Em outra perspectiva, no Brasil, apenas 5 CubeSats operacionais estão em órbita, estando a maioria em missões de desenvolvimento tecnológico [14].

A partir desses dados, tem-se um breve entendimento do panorama das instituições nacionais com relação a utilização de CubeSats nas missões de lançamento, possibilitando a previsão e análise da importância do incentivo ao conhecimento desta área, garantindo, assim, a ampliação de técnicas do Programa Espacial Brasileiro.

2.2. Características Básicas das Antenas de Microfita

A antena de microfita, comumente reconhecida como antena do tipo *patch*, é um tipo popular de antena planar, que incorpora materiais condutores e isolantes, que podem ser construídos com geometria variada para operar nas faixas de frequência desejada para o projeto [15]. As antenas de microfita, basicamente, são compostas por três partes planas que, ao terem suas faces sobrepostas paralelamente, formam camadas que desempenham funções físicas específicas. A camada central é formada pelo substrato, constituído por material dielétrico de interesse, geralmente fibra de vidro reforçada com resina epóxi (FR4). Por outro lado, ambas as camadas separadas pelo material substrato são feitas de uma fita metálica de cobre, em que a primeira face opera como elemento radiante, denominado *patch*, e a última como plano de terra [16]. A Figura 2 (a) mostra a estrutura característica de uma antena de microfita.

O *patch* é um dos elementos relevantes de uma antena de microfita, pois suas propriedades físicas permitem que a geometria do *patch* seja variada de acordo com múltiplos fatores de projeto, logo, há uma gama de possibilidades geométricas para o *patch* da antena de microfita, que vão além de padrões bem definidos. Na Figura 2 (b) tem-se algumas formas geométricas para o *patch*, sendo a principal a antena de microfita com *patch* retangular.

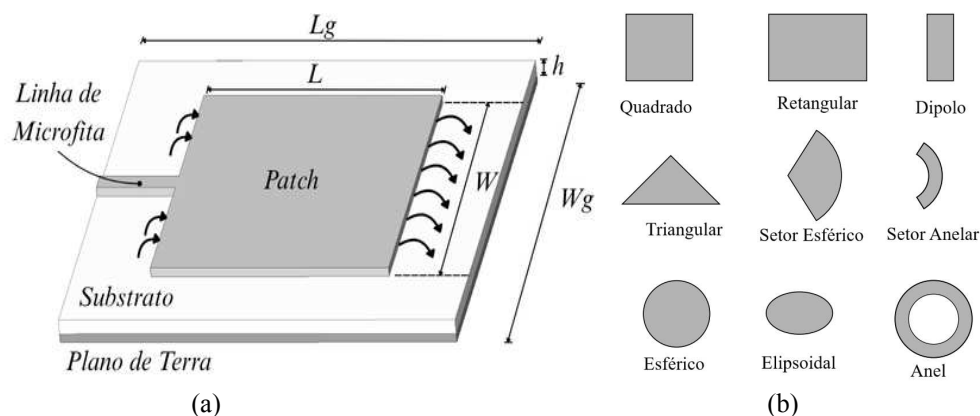


Figura 2. (a) Estrutura básica da antena de microfita. (b) geometrias comuns para *patches* de antenas de microfita. (Autoria própria)

Nesse contexto, considerando que os componentes da antena estão corretamente dispostos, seu funcionamento ocorre por meio da excitação do elemento radiante, o que gera campos elétricos e magnéticos oscilantes entre o *patch* e o plano de terra, através do substrato dielétrico. Esses campos resultam de distribuições oscilantes de carga nas superfícies condutoras, e não de polarizações estáticas do material dielétrico. O campo elétrico que se forma no interior do substrato é responsável pela propagação do modo ressonante fundamental da antena. Nas bordas do *patch*, os campos escapam parcialmente para fora do substrato, caracterizando o efeito de franja, que é o principal mecanismo responsável pela radiação. Com isso, a antena passa a operar de modo semelhante a uma cavidade ressonante aberta [17].

A partir do que foi abordado, entende-se que o *patch* sempre irá se comportar como elemento radiante quando adequadamente alimentado. Neste trabalho, explorou-se a forma de alimentação por linha de microfita, devido a facilidade no ajuste de impedância e na integração com antenas miniaturizadas. No entanto, é conhecido que existem diferentes métodos de alimentação e cada método apresenta algumas vantagens e desvantagens relacionadas a facilidade de construção, largura de banda e casamento de impedância [16]. Além disso, torna-se evidente que antenas de microfita podem ser analisadas também por métodos diversos, variando, do mesmo modo, seu nível de complexidade e precisão. Neste trabalho, utilizou-se o método da linha de transmissão discutido por Balanis [16] e Huang [18].

Desse modo, na modelagem de uma antena *patch* retangular pelo modelo da linha de transmissão, com alimentação através da linha de microfita, os parâmetros do *patch* são a largura (W) e o comprimento (L). Ambos possuem influência no comportamento da radiação da antena. Nesse sentido, a largura do *patch* proporciona influência na eficiência, na largura de banda e na impedância da antena, e para uma radiação eficiente, um valor para W pode ser obtido através da Equação 1, considerando c como a velocidade da luz no vácuo, f_r como a frequência de ressonância e ϵ_r como a constante dielétrica relativa [16].

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

O material dielétrico tem parâmetros importantes como espessura (h), constante dielétrica relativa (ϵ_r) e a tangente de perdas ($\tan(\delta)$). Estes parâmetros devem mudar de acordo com o material selecionado para o projeto. Além disso, a quantidade de cargas nas faces dos materiais metálicos no momento da distribuição das cargas depende principalmente da constante dielétrica relativa do material [17]. Conforme conceituado anteriormente, devido ao efeito de franja, algumas linhas de campo elétrico percorrem dois meios com constantes dielétricas diferentes. Portanto, é necessário calcular a constante dielétrica efetiva resultante do efeito de franja, seguindo a Equação 2, levando em conta a espessura do substrato (h) e a largura do *patch* (W) [16].

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left[1 + 12 \cdot \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

O efeito de franja também contribui para um aumento efetivo Δ no comprimento L do *patch*, como visto pela Equação 3 [16].

$$\Delta L = 0,412h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0,300) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0,258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,813\right)} \quad (3)$$

O comprimento do *patch* é o fator mais importante a ser dimensionado, pois sua variação implica diretamente na frequência de ressonância da antena. Deve ser calculado para corresponder a meio comprimento de onda, considerando os efeitos de franja, como mostrado na Equação 4 [16].

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_r \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2 \cdot \Delta L \quad (4)$$

O comprimento inicial da linha de microfita é expresso pela Equação 5 [16].

$$L_0 = \frac{c}{4 \cdot f_r \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (5)$$

A largura da linha de microfita (W_0) é definida pela Equação 6, que deve ser resolvida numericamente para W_0 [18].

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]} = 50 \, \Omega \quad (6)$$

É interessante que a impedância da linha de microfita seja aproximada da impedância na borda do *patch* e a mesma impedância da fonte de excitação de entrada, que é padronizada em $Z_{in} = 50 \Omega$. Por outro lado, faz-se necessário um dispositivo que realize o casamento de impedância entre a linha de microfita e a borda do *patch* quando a impedância dele não for 50Ω [16]. Para realizar o casamento de impedância, a linha de alimentação deve ser inserida a uma distância y_0 com uma fenda x_0 na borda do *patch*. O valor y_0 pode ser aproximado pela Equação 7, para valores de permissividade relativa do material $2 \leq \epsilon_r \leq 10$ [19].

$$y_0 = \frac{10^4 L}{2} (0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 - 682,29\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697) \quad (7)$$

Onde L é o comprimento do *patch*. O primeiro valor de x_0 pode ser considerado igual a largura da linha de microfita (W_0), devendo ser ajustado posteriormente em simulação. Essa abordagem pode ser adotada considerando o estudo realizado por Islam *et al.* em [20].

Adicionalmente, supõe-se, na maioria dos estudos sobre antenas de microfita, que as dimensões do plano de terra são infinitas. No entanto, na prática as suas dimensões são finitas e devem ser levadas em consideração para determinar o tamanho geral da estrutura da antena [21]. Em um estudo sobre os efeitos do plano de terra no desempenho de uma antena retangular de microfita, Bukhari e Rather [22], concluíram que o tamanho do aterramento é um fator muito importante para o desempenho geral da antena. Ao variar as dimensões do aterramento, o ganho e a perda de retorno podem ser melhorados, mostrando que o projeto do plano de terra com dimensões adequadas desempenha um papel importante na otimização da antena para um melhor desempenho. As dimensões de largura (W_g) e comprimento (L_g) do plano de terra podem ser obtidas seguindo a Equação 8 e Equação 9 [20].

$$W_g = W + 12h \quad (8)$$

$$L_g = L + 12h \quad (9)$$

As antenas de microfita contam com alguns parâmetros importantes que permitem avaliar o desempenho dela. Baseando-se na teoria de antenas, de acordo Balanis [16], este trabalho aproveitou-se da análise do coeficiente de reflexão (parâmetro S_{11}), da frequência de ressonância, da largura de banda e do ganho da antena para verificar o desempenho dos dispositivos projetados.

A largura de banda de uma antena pode ser definida como o intervalo de frequências no qual o desempenho dela permanecerá próximo ao obtido na frequência de ressonância, tendo como base algum parâmetro que os relacione, como o coeficiente de reflexão, a impedância de entrada, o ganho, etc [16]. Nesse sentido, é destacado que as antenas de microfita comumente apresentam largura de banda muito menor que a frequência de ressonância, contudo, técnicas podem ser utilizadas para modificar a largura de banda para valores pretendidos no projeto, como indicado por Mishra *et al.* [23].

A partir desta definição, considerando o coeficiente de reflexão igual ou inferior a -10 dB, para garantir que pelo menos 90% da potência seja transmitida para a antena, a largura de banda (BW) pode ser expressa pelos limites de frequência superior (f_{sup}) e inferior (f_{inf}) da curva na faixa de -10 dB, em relação a frequência de ressonância (f_r). A Figura 3 exemplifica um gráfico de diagrama de reflexão que identifica os limites de frequência, a largura de banda e a frequência de ressonância.

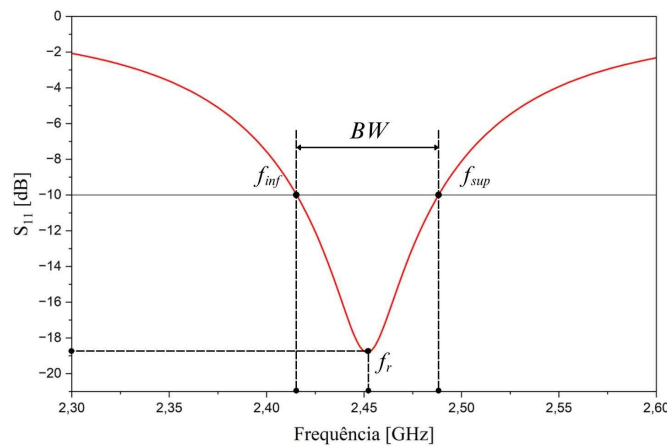


Figura 3. Gráfico do diagrama de reflexão com identificação de frequências e largura de banda. (Autoria própria)

A Equação 10 demonstra como calcular o valor BW percentual, que pode ser utilizado nos casos de antenas com largura de banda menor que a frequência de ressonância, como indicado por Ghavami *et al.* [24].

$$BW = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_r} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot (f_{sup} - f_{inf})}{f_{sup} + f_{inf}} \cdot 100\% \quad (10)$$

2.3. Técnicas de Miniaturização de Antenas de Microfita

O processo de miniaturização de antenas *patch* é alvo de interesse, devido aos limites físicos impostos a esses elementos, bem como os diversos fatores que afetam o seu desempenho. Todavia, visando reduzir as dimensões físicas da antena, mantendo, tanto quanto possível, o desempenho desejado, desenvolveram-se as técnicas descritas pela Tabela 1.

Tabela 1. Técnicas de Miniaturização de Antenas *Patch*. (Autoria própria)

Técnica de Miniaturização	Descrição	Referência
Alteração do Material Substrato	Caracteriza-se pelo aumento da permissividade relativa do substrato, selecionando-se materiais com maiores constantes dielétricas.	[25]
Pinos ou Planos de Curto-Circuito	Combinação de vias de curto-circuito entre o <i>patch</i> e o plano de terra, por exemplo pinos.	[26]
Alteração da Geometria do <i>Patch</i>	Reorganização da geometria do <i>patch</i> , alterando-a em formas diversas, como <i>meander line</i> , fractais, entalhes, fendas e outros.	[27]
Modificação do Plano de Terra	Fendas ou defeitos (DGS - <i>Defected Ground Structures</i>) no plano de terra são utilizados, a fim de reduzir a frequência de operação e, portanto, o tamanho total da antena.	[28]
Utilização de Metamateriais	Utilização de materiais artificiais, que provêm propriedades não disponíveis na natureza, ou comercialmente. Podem apresentar permissividade nula ou negativa.	[29]

Vale ressaltar que, apesar desses métodos proporcionarem uma redução considerável no tamanho da antena, algumas consequências necessitam ser consideradas ao reduzir o tamanho delas, como perda de eficiência, ganho e diretividade, diminuição da largura de banda, aumento de custo e complexidade do projeto. Desse modo, compreende-se que antenas de tamanho reduzido são possíveis e, além disso, o estudo dos métodos já se encontra amplamente difundido e de fácil acesso, mas a compensação entre desempenho, custo e porcentagem de redução de tamanho é um fator obrigatório durante o projeto de uma antena miniaturizada [30].

Pretendendo obter maior benefício para o objetivo da pesquisa, neste projeto explorou-se as técnicas de variação do material substrato de acordo com Lee e Harackiewicz [25] e a alteração da geometria do *patch*, onde foi selecionada a geometria *meander line* ou “dipolo curvado”, fundamentando-se nos estudos realizados Oliveira [31] e Calla [32].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão descritos os materiais e métodos aplicados no desenvolvimento e análise do projeto das antenas, os quais se basearam na caracterização e comparação de estrutura física e simulação de quatro diferentes tipos de antenas planares com alimentação através de linha de microfita. Os ensaios foram realizados no programa comercial HFSS® (*High Frequency Structure Simulator*), que utiliza o método dos elementos finitos para obter o comportamento dos parâmetros de funcionamento das antenas. Além disso, o HFSS® possibilita o ajuste das dimensões por meio da ferramenta *optimetrics*, que auxilia na regulagem dos parâmetros da antena ao realizar uma sequência definida de testes. Em suma, a Figura 4 ilustra a metodologia utilizada para a realização deste trabalho.

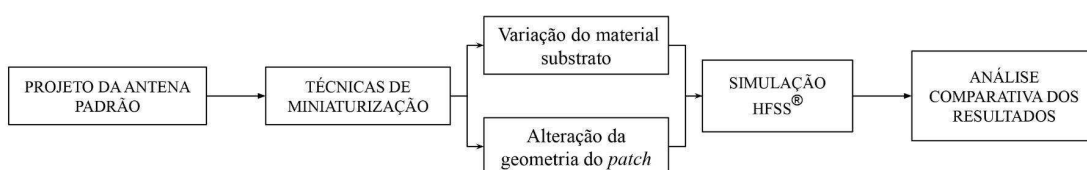


Figura 4. Etapas do processo metodológico utilizadas. (Autoria própria)

Sob esta perspectiva, possuindo os dados dos resultados, analisou-se a curva do parâmetro S_{11} de cada antena simulada, entendendo quais foram as mudanças aplicadas no coeficiente de reflexão, ganho e largura de banda em relação ao percentual de redução de tamanho do projeto, tomando como referência uma antena padrão projetada.

3.1. Projeto e Simulação

Os projetos das antenas possuem *patch* e plano de terra compostos por uma folha de cobre de 0,1 mm de espessura. Além disso, dois tipos de materiais para o substrato foram selecionados, sendo o FR4, o tipo mais comum normalmente, e o Rogers TMM[®] 10i (*Thermoset Microwave Materials*) um substrato apropriado para sistemas de comunicação via satélite, devido às suas certificações para aplicações espaciais.

Na etapa inicial, a critério de comparação, projetou-se uma antena com *patch* retangular e substrato FR4 para ser usada como referência e, por conseguinte, nos próximos três projetos foram aplicadas as técnicas de miniaturização definidas no Tópico 2.3, sendo a variação do material substrato e a alteração da geometria do *patch*, testando também a combinação de ambas as técnicas. Por conseguinte, os projetos receberam as nomenclaturas RPMA (*Rectangular Patch Microstrip Antenna*) e MLPA (*Meander Line Patch Antenna*) seguidas do tipo de material substrato, para indicar qual geometria e substrato foram utilizados no projeto, servindo como identificação.

Ao analisar a Tabela 2 é possível verificar os parâmetros de entrada dos projetos das antenas, que foram especificados como frequência de ressonância (f_r), permissividade relativa (ϵ_r), espessura do substrato (h) e tangente de perdas ($\tan(\delta)$).

Tabela 2. Definições dos Parâmetros dos Projetos. (Autoria própria)

Projeto	<i>patch</i>	Substrato	ϵ_r	$\tan(\delta)$	h (mm)	f_r (GHz)
RPMA FR4	Retangular	FR4	4,4	0,02	1,56	2,45
RPMA ROGERS	Retangular	Rogers TMM [®] 10i	9,8	0,002		
MLPA FR4	<i>Meander line</i>	FR4	4,4	0,02		
MLPA ROGERS	<i>Meander line</i>	Rogers TMM [®] 10i	9,8	0,002		

A antena padrão (RPMA_FR4) foi dimensionada de acordo com o conjunto de equações exploradas no Tópico 2.2, seguindo as propriedades identificadas na Tabela 2. Ressalta-se que foi mantido o mesmo procedimento matemático para projetar todas as antenas retangulares deste trabalho, alterando-se apenas os parâmetros de entrada. Entretanto, as antenas com geometria *meander line* foram influenciadas pelas estratégias de projeto de Oliveira [31] e Calla [32], que demonstram uma abordagem simplificada durante o procedimento metodológico executado, obtendo resultados em concordância com a literatura. Os modelos genéricos das antenas retangulares e *meander line*, junto a descrição das nomenclaturas das medidas empregadas podem ser visualizadas através das Figuras 5 (a) e (b).

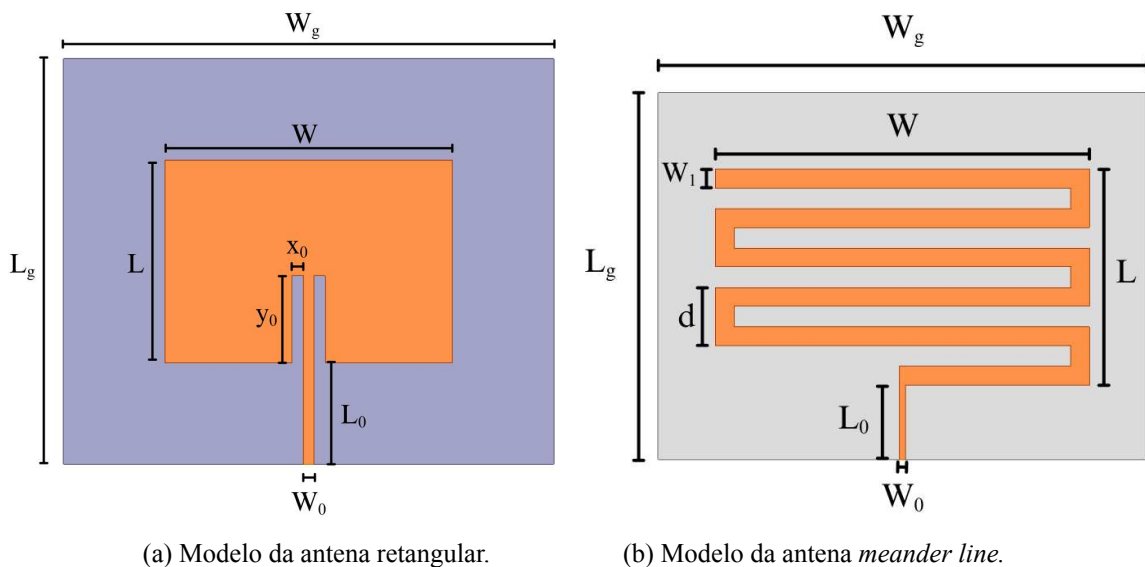


Figura 5. Modelos genéricos das antenas projetadas. (Autoria própria)

Após obter os valores de cada medida para ambos os projetos, através dos cálculos mencionados, a simulação foi realizada e, enquanto os resultados não atenderam aos parâmetros básicos de desempenho da antena, neste caso, coeficiente de reflexão e frequência de ressonância, o recurso *optimetrics* do HFSS® foi empregado para alguns parâmetros. As dimensões finais das antenas simuladas foram compiladas e exibidas na Tabela 3.

Tabela 3. Dimensões físicas propostas para as antenas. (Autoria própria)

Medida	RPMA FR4	RPMA ROGERS	MLPA FR4	MLPA ROGERS
L	28,1500	18,6400	4,6816	3,2968
W	37,2500	26,3700	30,5066	20,8325
W_0	2,4755	1,0120	0,4951	1,0197
L_0	9,3600	9,3600	6,0529	3,1000
y_0	8,8450	8,0122	*	*
x_0	0,3000	1,0197	*	*
W_g	55,9700	45,0900	39,8666	30,1925
L_g	46,8700	37,3600	16,9745	12,6368
W_l	*	*	0,3026	0,4133
d	*	*	1,1784	0,9900

*Nota: as medidas dos parâmetros indicados estão todas em mm. * a antena especificada não possui essa medida.*

A análise de miniaturização foi realizada por meio da comparação da redução da área total das antenas ($W_g \times L_g$), tomando como referência a antena padrão, o que permite avaliar o grau de compactação alcançado em cada proposta, evidenciando quais técnicas apresentaram maior eficiência na redução do tamanho físico sem comprometer significativamente o desempenho da antena.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As etapas de dimensionamento e simulação foram essenciais para obter as dimensões adequadas para que as antenas ressoassem abaixo de -10 dB. Além disso, elas também deveriam se aproximar o máximo possível da frequência pretendida. Afinal, atender ambos os critérios era imprescindível para a validação inicial da antena, atuando como fator eliminatório de projeto antes mesmo da análise comparativa de miniaturização. Dessa forma, com os projetos que atenderam tais critérios em mãos (preservando os parâmetros definidos na Tabela 2 e Tabela 3), os resultados foram apresentados através do Gráfico 1, o qual compara os coeficientes de reflexão simulados.

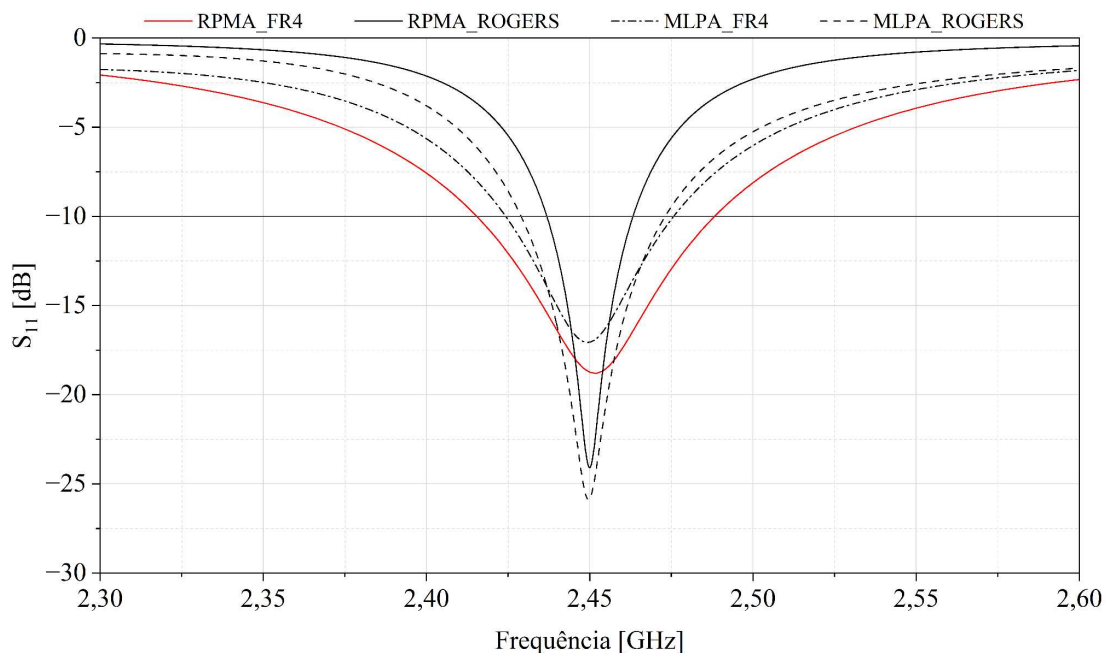


Gráfico 1. Coeficientes de reflexão simulados para as antenas com diferentes parâmetros construtivos. (Autoria própria)

O projeto RPMA_FR4 destaca-se com o coeficiente de reflexão apresentando valores médios (-18,8023 dBi) em comparação às demais curvas. Porém, para uma antena de microfita com *patch* retangular, os resultados mostram-se tecnicamente adequados, considerando que ela possui as dimensões que foram descritas na Tabela 3 e está ressoando em 2,4520 GHz, muito próximo da frequência de ressonância pretendida. Além disso, o coeficiente de reflexão da RPMA_FR4 caracteriza um desempenho eficiente por estar abaixo de -10 dB, mesmo com suas perdas sendo influenciadas pelo uso de um substrato com tangente de perdas maiores e não recomendadas para aplicações em ambientes com restrições rigorosas, como no espaço.

Cumpra salientar que todas as antenas ressoaram abaixo de -10 dB e tiveram frequência de ressonância muito próximas ou iguais a 2,45 GHz. Nesse contexto, possuindo dados suficientes para análise, avaliou-se que as modificações dos parâmetros iniciais, objetivando-se a miniaturização, trouxeram, de fato, consequências significativas para o comportamento da antena, como estreitamento da largura de banda, diminuição do coeficiente de reflexão e a variação no ganho máximo.

O Gráfico 1 cobre uma gama de frequências de 2,30 GHz a 2,60 GHz, a qual, de forma geral, é muito estreita, o que implica que a largura de banda dos projetos simulados é ainda menor. Como resultado, sabendo que isso é esperado e aceitável para antenas compactas de microfita, considera-se a possibilidade das antenas possuírem um fator de qualidade (Q) elevado, que provoca o funcionamento das antenas em uma faixa de frequência muito estreita ao redor da frequência central.

O parâmetro Q não foi levado em consideração na análise comparativa dos projetos desenvolvidos neste trabalho, pois esse parâmetro, assim como os demais associados a antenas eletricamente pequenas, não pode ser otimizado simultaneamente com os outros parâmetros. Assim sendo, foram destacados na Tabela 4 apenas os parâmetros de desempenho considerados relevantes para esta análise.

Tabela 4. Parâmetros de desempenho dos projetos das antenas. (Autoria própria)

Antena	Área (mm ²)	Redução da área em relação ao RPMA_FR4 (%)	f_r (GHz)	S_{11} (dB)	BW (%)	$G_{\text{Máximo}}$ (dBi)
RPMA_FR4	2623,54	*	2,45	-18,80	2,94	3,87
RPMA ROGERS	1684,94	35,80	2,45	-24,08	1,07	5,03
MLPA_FR4	676,68	74,20	2,44	-17,06	2,09	-5,18
MLPA ROGERS	381,47	85,50	2,44	-25,88	1,79	-4,45

Nota: * antena de referência.

A antena MLPA_ROGERS demonstrou ser a mais compacta em relação a antena de referência, com uma área 85,5% menor do que a RPMA_FR4 e, além disso, é também a antena com o menor coeficiente de reflexão (-25,8881 dB), comparando-se apenas com a RPMA_ROGERS que é detentora do segundo menor valor simulado de S_{11} (-24,0842 dB). Esse fato é atribuído a principal característica do substrato dessas antenas, ou seja, a baixa tangente de perdas e a alta constante dielétrica que o material Rogers TMM[®] 10i possui.

Nesse sentido, entende-se que ao realizar a substituição do material do substrato, objetivando-se reduzir o comprimento de onda efetivo e, conseqüentemente, miniaturizar a antena, é possível, como observado no caso da antena RPMA_ROGERS que reduziu 35,8% da sua área apenas com esta alteração. Porém, substratos com constantes dielétricas elevadas, de acordo com o que foi analisado na Tabela 4, podem ocasionar maior confinamento do campo elétrico no substrato, reduzindo a largura de banda, além de diminuir ligeiramente a eficiência de radiação, devido a forma como a energia é dissipada no substrato. Comprova-se estas informações ao visualizar que os projetos MLPA_ROGERS e RPMA_ROGERS possuem bandas mais estreitas (menores que 2%) e ganho superior.

Paralelamente, as antenas simuladas com o FR4 oferecem larguras de banda pouco maiores que 2%, em contrapartida, apresentam maiores perdas por reflexão, como a antena MLPA_FR4, que atingiu, por exemplo, -17,0629 dB. Salienta-se que isso não inviabiliza o projeto da antena, mas mostra que o substrato em questão, devido à sua elevada tangente de perdas, pode provocar redução no ganho da antena, entre outros déficits no desempenho. Nessa perspectiva, confirma-se que as antenas com menor ganho têm essa característica em decorrência do substrato com maiores tangentes de perda. Não obstante, nos projetos simulados, a modificação da geometria do *patch* para *meander line*, na frequência de ressonância especificada, foi suficiente para alterar de forma expressiva o ganho máximo das antenas, como visto na Tabela 4, concomitantemente à porcentagem de redução de tamanho.

As antenas MLPA são as mais compactas, ressoaram muito próximas de 2,45 GHz e seu coeficiente de reflexão está abaixo de -10 dB. A redução das dimensões destas antenas ocorre devido a forma como o *patch meander line* “dobra” o comprimento do condutor dentro de uma área compacta, mostrando-se realmente eficaz nesse quesito. No entanto, as curvas do meandro acabam criando distribuições complexas de corrente, distorcendo o padrão de radiação e aumentando as perdas condutivas e dielétricas. Nos projetos simulados, inclusive, as trilhas paralelas tornaram-se muito próximas após a compactação, ocasionando possivelmente o acoplamento entre essas trilhas, cancelando parcialmente os campos em algumas direções. Como consequência, as antenas com essa geometria apresentaram um ganho máximo negativo.

Em síntese, a mudança do material substrato contribuiu para a redução das perdas e otimização do ganho da antena, ao passo que também resultou no estreitamento da largura de banda e em uma leve redução do tamanho físico. De outro modo, a modificação da geometria do *patch* demonstrou-se mais eficaz na miniaturização da antena, sem impacto significativo nas perdas por reflexão. Apesar disso, essa abordagem também estreitou a largura de banda e comprometeu o ganho máximo da antena, indicando a necessidade de aplicação de técnicas complementares de otimização, como o uso de vias de carga ou ajustes geométricos adicionais, a fim de manter o desempenho mesmo em estruturas compactas.

Quanto à escolha do substrato, o uso do FR4 se justifica pelo seu baixo custo, ampla disponibilidade no mercado e facilidade de fabricação e manuseio. Alternativamente, o material Rogers TMM[®] 10i apresenta vantagens como baixas taxas de expansão térmica e de desgaseificação, o que contribui para a estabilidade da frequência de ressonância frente a variações de temperatura, além de baixa tangente de perdas e elevada constante dielétrica, tornando-o uma alternativa viável para aplicações que exigem maior estabilidade eletromagnética.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentado o projeto, simulação e análise de antenas de microfita compactas, operando em 2,45 GHz, para aplicações em satélites do padrão CubeSat. Os dispositivos em questão apresentaram largura de banda estreita e coeficiente de reflexão aceitável, por estarem abaixo de -10 dB, em relação ao grau de compactação.

Em primeiro caso, enfatiza-se que o estudo inicial da teoria de antenas é indispensável para compreender como a modificação das dimensões físicas das antenas planares implica na alteração dos parâmetros de desempenho, possibilitando realizar as devidas correções e a otimização durante a simulação.

A técnica de variação do material substrato, com prioridade para substratos de elevada permissividade relativa e baixa tangente de perdas, mostrou-se eficaz na redução das dimensões da antena sem comprometer seu desempenho elétrico. Em particular, os projetos utilizando o material Rogers TMM[®] 10i apresentam níveis superiores de eficiência, evidenciando o impacto positivo da escolha do substrato nas características de radiação da antena. É recomendável que, juntamente aos critérios dielétricos do substrato, sejam fixadas as propriedades físicas desse material, sendo a principal delas a estabilidade térmica e baixas taxas de desgaseificação, quando em casos de aplicações espaciais. Para otimizar ainda mais e compactar a antena, em projetos futuros podem ser elaboradas antenas com múltiplas camadas contendo diferentes propriedades dielétricas, reconhecendo os substratos de cerâmica alumina como uma das opções apropriadas para miniaturização, devido sua alta permissividade relativa.

A técnica de miniaturização baseada em *meander line*, bem como sua combinação com as demais estratégias discutidas neste trabalho, demonstrou ser a mais eficiente em termos de compactação da antena. Contudo, observa-se que essa geometria específica pode comprometer a eficiência do dispositivo na frequência de ressonância analisada. Ainda assim, mediante ajustes estruturais adequados no *patch* e a aplicação conjunta de técnicas complementares de otimização, é possível obter uma antena de alto desempenho e dimensões reduzidas, compatível com as restrições físicas típicas de plataformas CubeSat. Em projetos futuros, as antenas MLPA simuladas neste estudo podem ser integradas em arranjos, com o intuito de aprimorar parâmetros como ganho e diretividade, possibilitando sua instalação nas superfícies internas das faces do CubeSat.

Com base nas observações feitas, fica claro que a miniaturização de antenas para CubeSats traz alguns desafios, como a necessidade de equilibrar compactação, eficiência e ganho. Isso significa que é preciso fazer escolhas cuidadosas sobre a geometria e o material do substrato. Torna-se critério do projetista analisar e buscar as melhores técnicas que garantem um desempenho eletromagnético elevado, sem deixar de lado as limitações físicas das plataformas espaciais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AKAN, V.; YAZGAN, E. Antennas for Space Applications: A Review. In: **Advanced Radio Frequency Antennas For Modern Communication And Medical Systems**. 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93116>>. Acesso em: 22 abril 2025.
- [2] SWEETING, M. N. Modern Small Satellites-Changing the Economics of Space. **IEEE**, v. 106, n. 3, p. 343-361, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2806218>>. Acesso em: 22 abril 2025.
- [3] SILVA, R. C. B. A.; XAVIER, A. L. **Em Direção a uma Taxonomia Unificada para Satélites com Base em Massa e Tamanho**. In: CONGRESSO AEROESPACIAL BRASILEIRO, 2., Santa Maria: UFSM, 2019. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/2cab2019/224811-em-direcao-a-uma-taxonomia-unificada-para-satelites-com-base-em-massa-e-tamanho>>. Acesso em: 26 abril 2025.

- [4] BOUWMEESTER, J.; GUO, J. Survey of worldwide pico and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. **Acta Astronautica**, v. 67, n. 8, p. 854-862, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.004>>. Acesso em: 29 abril 2025.
- [5] KOPACZ, J. R.; HERSCHITZ, R.; RONEY, J. Small satellites: an overview and assessment. **Acta Astronautica**, USA, v.170, p.93-105, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.034>>. Acesso em: 26 abril 2025.
- [6] KULO, E. **CubeSats & Nanosatellites – 2024 Statistics, Forecast and Reliability**. In: INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS, n. 75, 2024. Disponível em: <https://www.nanosats.eu/assets/CubeSats-Nanosatellites-2024_ErikKulu_IAC2024.pdf>. Acesso em: 29 abril 2025.
- [7] ANTUNES, E. V. **Ações satelitais brasileiras: um estudo sobre o emprego dos nanossatélites no Brasil**. 2017. 178f. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – UNICAMP, Campinas, SP, p. 178, 2017. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.12733/1631056>>. Acesso em: 2 maio 2025.
- [8] SILVA, R. C. B. A. **Revisão da Realidade Brasileira em Termos da Aplicabilidade de Pequenos Satélites para Missões de Sensoriamento Remoto**. In: CONGRESSO AEROESPACIAL BRASILEIRO, 1., Foz do Iguaçu, PR, 2018. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/337059180>>. Acesso em: 2 maio 2025.
- [9] THE CUBESAT PROGRAM. **CubeSat Design Specification (1U - 12U)**. rev.14.1, p.34, 2022. Cal Poly – San Luis Obispo, CA. Disponível em: <https://www.cubesat.org/s/CDS-REV14_1-2022-02-09.pdf>. Acesso em: 2 maio 2025.
- [10] KIM, D. et al. **SWARM CubeSat: Smart mmWave Active Radio Module on a 2U CubeSat Platform for Ground-Space LEO Communication Networks**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP), 17., 2023, p. 1-4. Disponível em: <<https://doi.org/10.23919/EuCAP57121.2023.10133259>>. Acesso em: 8 junho 2025.
- [11] BUONGIORNO, M. F. et al. **Vulcain: A Cubesat Mission for Monitoring Volcanoes and Active Thermal Areas**. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), Pasadena, CA, USA, 2023, p. 265-267. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282753>>. Acesso em: 8 junho 2025.
- [12] ISLAM, M. T. et al. Compact Antenna for Small Satellite Applications [Antenna Applications Corner], **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 57, n. 2, p. 30-36, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2420471>>. Acesso em: 8 junho 2025.
- [13] TUBBAL, F. E., RAAD, R., CHIN, K. W. A Survey and Study of Planar Antennas for Pico-Satellites, **IEEE Access**, v. 3, p. 2590-2612, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2506577>>. Acesso em: 9 junho 2025.
- [14] CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Bancos de dados**. Disponível em: <<https://www.cgee.org.br/web/observatorio-espacial/bancos-de-dados>>. Acesso em: 29 abril 2025.
- [15] SOUZA, J. da S.; SOUZA, J. J. S. de. Caracterização de antena patch circular usando técnicas de casamento de impedância para faixa de frequência de 2,035 GHz. **Revista Tecnologia**, [S. l.], v. 43, p. 13, 2023. Disponível em: <<https://ojs.unifor.br/tec/article/view/11913>>. Acesso em: 17 junho 2025.
- [16] BALANIS, C. A. **Antenna Theory: analysis and design**. 4 ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. p. 1104. ISBN 978-1-118-64206-1.
- [17] OLIVEIRA, E. E. C. de. **Antenas de microfitas com patch quase-fractal para aplicações em Redes WPAN/WLAN**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- [18] HUANG, Y.; BOYLE, K. **Antennas: from theory to practice**. NJ: John Wiley & Sons, 2008. p. 379. ISBN 978-0-470-51028-5.
- [19] RAMESH, M., YIP, K. B. **Design Inset-Feed Microstrip Patch Antennas**. 2003. Disponível em:

[20] ISLAM, M. S. et al. **A Rectangular Inset-Fed Patch Antenna with Defected Ground Structure for ISM Band**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING (ICCCE), 7. Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, p. 104-108. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICCCE.2018.8539260>>. Acesso em 17 junho 2025.

[21] SKRIVERVIK, A. K. et al. PCS antenna design: the challenge of miniaturization, In: **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 43, n. 4, p. 12-27, Aug. 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/74.951556>>. Acesso em: 23 junho 2025

[22] BUKHARI, B.; RATHER, G. M. **Ground Plane Effects on the Performance of a Rectangular Microstrip Patch Antenna: A Study**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES AND INNOVATIONS IN ENGINEERING (ICRAIE), 5., Jaipur, India, 2020, p. 1-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICRAIE51050.2020.9358371>>. Acesso em: 23 junho 2025.

[23] MISHRA, B. et al. A review on microstrip patch antenna parameters of different geometry and bandwidth enhancement techniques. **International Journal of Microwave and Wireless Technologies**, v. 14, n. 5, p. 652–673, 2022.

[24] GHAVAMI, M. et al. **Ultra Wideband: Signals and Systems in Communication Engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons. p. 278. 2004.

[25] LEE, B.; HARACKIEWICZ, F. J. Miniature microstrip antenna with a partially filled high-permittivity substrate. In: **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 50, n. 8, p. 1160-1162, Aug. 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TAP.2002.801360>>. Acesso em: 08 julho 2025.

[26] LI, R. et al. Development and analysis of a folded shorted-patch antenna with reduced size. In: **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 52, n. 2, p. 555-562, Feb. 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TAP.2004.823884>>. Acesso em: 8 julho 2025.

[27] CONSTANTINE, G. et al. **A compact microstrip antenna with tapered peripheral slits for CubeSat RF Payloads at 436MHz: Miniaturization techniques, design & numerical results**. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON SATELLITE AND SPACE COMMUNICATIONS (IWSSC), Toulouse, France, 2008, p. 255-259. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/IWSSC.2008.4656804>>. Acesso em: 8 julho 2025.

[28] SARKAR, S. et al. Miniaturization of rectangular microstrip patch antenna using optimized single slotted ground plane. **Microw. Opt. Technol. Lett.**, 2011, p. 111–115. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/mop.25661>>. Acesso em: 8 julho 2025.

[29] MAHMOUD, S. F. A new miniaturized annular ring patch resonator partially loaded by a metamaterial ring with negative permeability and permittivity. In: **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 3, p. 19-22, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/LAWP.2004.825092>>. Acesso em: 8 julho 2025.

[30] SAADI, M. A. Review on Size Reduction Techniques of the Microstrip Patch Antenna. In: **Journal of Millimeterwave Communication, Optimization and Modelling**. v. 1, n. 2, p. 34-36, 2021.

[31] OLIVEIRA, E. R. S. et al. Projeto de uma Antena Planar Dipolo Curvado para Aplicação na Comunicação da Indústria 4.0. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 2, n. 1, p. 103-111, 2020.

[32] CALLA, O. P. N. et al. **Empirical relation for designing the meander line antenna**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN MICROWAVE THEORY AND APPLICATIONS, Jaipur, India, p. 695-697, 2008.