

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

FELIPE LUCIANO NEIVA SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE RECTENNAS COM DIFERENTES TOPOLOGIAS
DE METAMATERIAIS PARA A SUA MINIATURIZAÇÃO**

BELO HORIZONTE

2026

FELIPE LUCIANO NEIVA SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE RECTENNAS COM DIFERENTES TOPOLOGIAS
DE METAMATERIAIS PARA A SUA MINIATURIZAÇÃO**

Trabalho de Projeto Final de Curso,
apresentado no curso de graduação em
Engenharia Elétrica do Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais,
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ursula do Carmo Resende

BELO HORIZONTE

2026

ANÁLISE COMPARATIVA DE RECTENNAS COM DIFERENTES TOPOLOGIAS DE METAMATERIAIS PARA A SUA MINIATURIZAÇÃO

Felipe Luciano Neiva Souza¹
Profa. Dra. Úrsula do Carmo Resende²

RESUMO

Este trabalho compara o desempenho de rectennas compostas por antenas de microfita miniaturizadas com diferentes topologias de metamateriais aplicadas ao plano terra, visando à redução dimensional e à integração em sistemas compactos de conversão RF-CC. Para isso, projetou-se uma antena convencional de referência em 2,45 GHz e desenvolveram-se três antenas miniaturizadas com topologias CSRR, MNG e DGS. As estruturas foram modeladas e otimizadas no CST *Studio Suite*, com uso de algoritmo genético, confeccionadas e caracterizadas experimentalmente por meio do coeficiente de reflexão. Também foi projetado no software *Advanced Design System* um retificador dobrador de tensão, integrado às antenas para avaliação das rectennas em ensaio de transmissão direta. Os resultados indicaram reduções de área de 68,67% para a CSRR, 71,55% para a MNG e 64,73% para a DGS. A CSRR apresentou o melhor casamento de impedância medido, a MNG a maior miniaturização e a DGS o maior ganho entre as antenas miniaturizadas. Embora a rectenna convencional tenha gerado maior tensão de saída, as versões miniaturizadas mantiveram capacidade de conversão RF-CC, demonstrando viabilidade para aplicações compactas e de baixo consumo.

Palavras-chave: rectenna; antena de microfita; metamateriais; miniaturização.

Data de submissão: 11 jun. 2026

Data de aprovação: 18 jun. 2026

¹ Artigo científico elaborado para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Nova Gameleira. E-mail: neivafelipe1@gmail.com

² Professora Doutora do curso de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Nova Gameleira. E-mail: resendeursula@cefetmg.br

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
2	DESENVOLVIMENTO	5
2.1	Fundamentação teórica sobre metamateriais.....	5
2.2	Projeto da antena convencional de referência.....	6
2.3	Projetos das antenas com metamaterial.....	8
2.3.1	Topologia do metamaterial CSRR.....	8
2.3.2	Topologia do metamaterial MNG.....	9
2.3.3	Topologia do metamaterial DGS	10
2.4	Resultados simulados e medidos das antenas	11
2.5	Projeto do retificador.....	15
2.6	Desempenho das rectennas.....	17
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
	REFERÊNCIAS	20
	APÊNDICE A – Resultados complementares	22

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução dos sistemas de comunicação sem fio, ampliou-se a necessidade de dispositivos de radiofrequência (RF) e micro-ondas com dimensões reduzidas, baixo custo, facilidade de integração e desempenho compatível com aplicações compactas. Nesse contexto, as antenas de microfita apresentam destaque por possuírem estrutura planar, baixo perfil, simplicidade de fabricação e boa compatibilidade com circuitos integrados de RF. Essas características tornam esse tipo de antena atrativo para sistemas embarcados, sensores, dispositivos portáteis, aplicações de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), redes sem fio e sistemas de captação de energia eletromagnética (TUNG; LAM; HOA, 2016).

No caso das rectennas, a miniaturização da antena torna-se ainda mais relevante, pois o desempenho do sistema depende da capacidade de captar energia eletromagnética e transferi-la adequadamente ao circuito retificador. Uma rectenna é composta, de forma geral, por uma antena receptora e uma etapa de retificação, sendo aplicada em sistemas de conversão de radiofrequência em corrente contínua (RF-CC), principalmente em dispositivos de baixa potência e aplicações compactas.

Apesar das vantagens das antenas de microfita, a redução de suas dimensões pode deslocar a frequência de ressonância, alterar a distribuição de corrente, dificultar o casamento de impedância e comprometer parâmetros como largura de banda, ganho, eficiência e diagrama de radiação. Fallahpour e Zoughi (2018) destacam que a redução do tamanho elétrico de uma antena tende a impor limitações sobre a largura de banda e a eficiência. Por isso, diferentes estratégias de miniaturização têm sido investigadas, como linhas meandradas, substratos com propriedades eletromagnéticas específicas, estruturas fractais e modificações no plano terra (MIRZA; DHAGE, 2017; SHAW; SAMANTA, 2021).

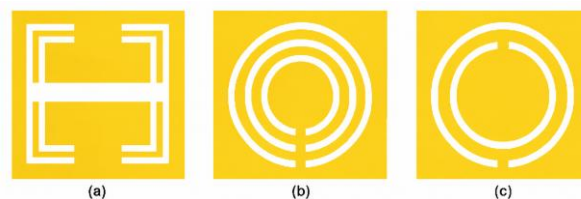
Nesse cenário, os metamateriais surgem como alternativa para modificar a resposta eletromagnética de antenas de microfita sem depender apenas da redução direta do elemento radiador. Por meio de geometrias artificiais inseridas na estrutura da antena, torna-se possível influenciar a frequência de ressonância, o casamento de impedância, a largura de banda e o comportamento de radiação. Parmar e Suthar (2021) destacam que estruturas baseadas em metamateriais têm sido utilizadas em antenas de microfita com o objetivo de reduzir dimensões, melhorar ganho, diretividade, largura de banda e possibilitar operação multibanda.

Diante disso, este artigo investiga, de forma comparativa, três topologias de metamateriais aplicadas ao plano terra de antenas de microfita para uso em rectennas: o ressonador de anel dividido complementar (*Complementary Split Ring Resonator* - CSRR), a

célula unitária com permeabilidade efetiva negativa (μ -negative - MNG) e a estrutura de plano terra defeituoso (*Defected Ground Structure* - DGS) com anéis circulares. Essas topologias foram selecionadas com base nos trabalhos de Tung, Lam e Hoa (2016), Laabadli et al. (2023) e Ripin et al. (2013), por representarem formas distintas de alterar a resposta eletromagnética da antena a partir do plano terra. As geometrias de cada uma são apresentadas de forma comparativa na Figura 1.

A metodologia adotada consiste no projeto de uma antena convencional de microfita em 2,45 GHz, utilizada como referência para comparação com as antenas miniaturizadas. As estruturas são modeladas e otimizadas no CST *Studio Suite*, confeccionadas e caracterizadas experimentalmente por meio do coeficiente de reflexão (S_{11}). Em seguida, é projetado um retificador dobrador de tensão no Advanced Design System (ADS), integrado às antenas para avaliação do sistema completo de rectenna. Dessa forma, a análise considera não apenas a redução física da antena, mas também seus efeitos sobre o S_{11} , o ganho e a tensão de saída obtida na carga.

Figura 1 - Representação das topologias de metamateriais aplicadas ao plano terra: (a) CSRR; (b) MNG; e (c) DGS com anéis circulares



Fonte: elaborado pelo autor, com base em Tung, Lam e Hoa (2016), Laabadli et al. (2023) e Ripin et al. (2013)

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentação teórica sobre metamateriais

Metamateriais são estruturas artificiais cuja resposta eletromagnética é definida principalmente pela geometria, organização e dimensões de suas células unitárias, e não apenas pelo material empregado em sua fabricação. Em aplicações de antenas, essas células são projetadas com dimensões inferiores ao comprimento de onda guiado, permitindo representar seu efeito por parâmetros efetivos, como permissividade elétrica, permeabilidade magnética e índice de refração (ALQADAMI et al., 2017).

Uma forma usual de classificar essas estruturas é baseada nos sinais da permissividade e da permeabilidade efetivas. Quando apenas a permissividade apresenta valor negativo, a estrutura é classificada como ϵ -negativa, ou ENG. Quando apenas a permeabilidade apresenta valor negativo, tem-se uma estrutura μ -negativa, ou MNG. Quando permissividade e permeabilidade são simultaneamente negativas, a estrutura é classificada como duplo-negativa, ou DNG, também associada ao conceito de material de mão esquerda. Neste trabalho, não foi realizada a extração direta desses parâmetros. Assim, a classificação das topologias foi adotada com base nos resultados e nas classificações reportadas nos trabalhos de referência: CSRR como estrutura associada à permissividade efetiva negativa, conforme Tung, Lam e Hoa (2016); célula MNG associada à permeabilidade efetiva negativa, conforme Laabadli et al. (2023); e DGS com anéis circulares associada à permissividade e permeabilidade efetivas negativas, conforme Ripin et al. (2013).

Nas antenas de microfita, a inserção de ressonadores, fendas ou defeitos no plano terra modifica a distribuição das correntes superficiais e a impedância de entrada da estrutura. Dessa forma, as topologias CSRR, MNG e DGS são avaliadas neste trabalho como mecanismos de miniaturização capazes de deslocar a frequência de ressonância e alterar o comportamento de casamento e radiação da antena.

Com base nesses conceitos, a comparação entre as topologias CSRR, MNG e DGS será conduzida considerando seus efeitos sobre a frequência de ressonância, o coeficiente de reflexão e o comportamento de radiação. Essa análise permite avaliar não apenas a redução de área, mas também a manutenção de condições adequadas para a integração da antena ao circuito retificador em sistemas rectenna.

2.2 Projeto da antena convencional de referência

A antena convencional foi projetada e confeccionada como a primeira etapa do projeto, pois estabelece a referência geométrica e eletromagnética para as antenas miniaturizadas. A partir dela, as topologias CSRR, MNG e DGS são posteriormente inseridas no plano terra e comparadas quanto ao coeficiente de reflexão, diagrama de radiação, redução de área e integração com o retificador.

A topologia escolhida foi uma antena de microfita com elemento radiador retangular e alimentação por linha de transmissão impressa. Essa configuração foi adotada por apresentar fabricação simples, baixo perfil e integração direta com circuitos impressos de RF. Além disso, o patch retangular apresenta comportamento diretivo compatível com o ensaio posterior de

transmissão direta, no qual a antena receptora deve captar a energia eletromagnética incidente e entregá-la à entrada do circuito retificador.

O projeto inicial foi realizado a partir das equações básicas de antenas retangulares de microfitas, considerando operação em 2,45 GHz e os parâmetros elétricos e físicos do substrato FR-4 fornecidos pelo fabricante (BALANIS, 2009). Em seguida, a geometria foi modelada no *CST Studio Suite* e otimizada por algoritmo genético. Para padronizar a comparação entre as estruturas, todas as antenas deste trabalho foram otimizadas considerando operação em torno de 2,45 GHz, adotando como critério de projeto a obtenção de coeficiente de reflexão inferior a -10 dB na faixa de 2,4 GHz a 2,5 GHz.

Como os parâmetros elétricos do FR-4 podem variar conforme o fabricante, o lote e a região da placa utilizada, foi realizada uma caracterização indireta do substrato. O procedimento consistiu em ajustar, no modelo simulado, os valores de permissividade relativa e tangente de perdas até que a resposta simulada de S_{11} se aproximasse da resposta medida da primeira antena confeccionada com o mesmo material. Com isso, foram obtidos os valores de permissividade relativa igual a 4,15 e tangente de perdas igual a 0,026, apresentados na Tabela 1 juntamente com os demais parâmetros físicos utilizados nas simulações.

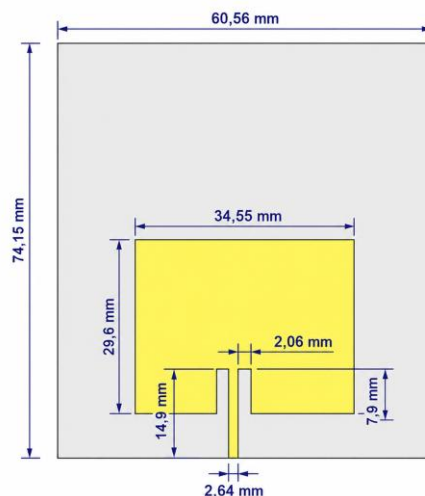
Tabela 1 - Parâmetros do FR-4 utilizado neste trabalho

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Permissividade elétrica relativa	4,15	Espessura do substrato	1,5 mm
Tangente de perdas	0,026	Espessura do cobre	0,035 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

Após a caracterização do substrato, a antena convencional foi novamente ajustada no *CST Studio Suite*, utilizando um modelo mais próximo das condições reais de fabricação. Esse procedimento permitiu estabelecer uma base comum para a comparação com as antenas miniaturizadas, uma vez que todas as estruturas passaram a utilizar o mesmo substrato caracterizado e o mesmo critério de projeto. Salvo indicação em contrário, todas as dimensões geométricas apresentadas nas figuras das antenas estão em milímetros. A geometria final da antena convencional é apresentada na Figura 2, que mostra os parâmetros físicos do substrato, do elemento radiador, da linha de alimentação e dos recortes associados à alimentação.

Figura 2 - Medidas das dimensões, dadas em milímetros, da antena convencional após a sua otimização



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do AutoCAD.

2.3 Projetos das antenas com metamaterial

Nesta seção são apresentados os projetos das antenas miniaturizadas com topologias CSRR, MNG e DGS aplicadas ao plano terra. Em todas as estruturas, utilizou-se o substrato FR-4 caracterizado anteriormente e adotou-se como critério de projeto a operação na faixa de 2,4 GHz a 2,5 GHz, com coeficiente de reflexão preferencialmente inferior a -10 dB. Como o procedimento geral de modelagem e otimização já foi definido para a antena convencional, as subseções seguintes destacam apenas as particularidades geométricas e metodológicas de cada topologia.

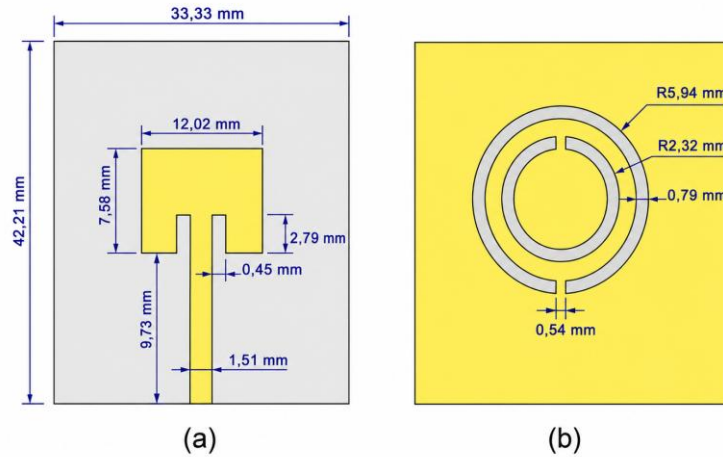
2.3.1 Topologia do metamaterial CSRR

A antena com CSRR foi desenvolvida pela inserção de um ressonador de anel dividido complementar no plano terra da antena de microfitas. Essa topologia foi adotada com base no trabalho de Tung, Lam e Hoa (2016), no qual a modificação do plano terra por CSRR é associada à obtenção de permissividade efetiva negativa e à miniaturização da antena.

Inicialmente, a célula CSRR foi inserida no plano terra a partir de parâmetros geométricos baseados na referência. Em seguida, a estrutura foi otimizada no CST *Studio Suite* por algoritmo genético, permitindo a variação das dimensões gerais da antena e dos parâmetros do ressonador, como raios dos anéis complementares, abertura das fendas e espaçamentos da célula, que são destacados na Figura 3(b). Esse ajuste foi necessário porque a resposta

ressonante do CSRR depende diretamente de sua geometria e de sua interação com os campos eletromagnéticos da antena. A geometria final obtida é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Medidas das dimensões, dadas em milímetros, da antena com metamaterial CSRR após a sua otimização



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do AutoCAD.

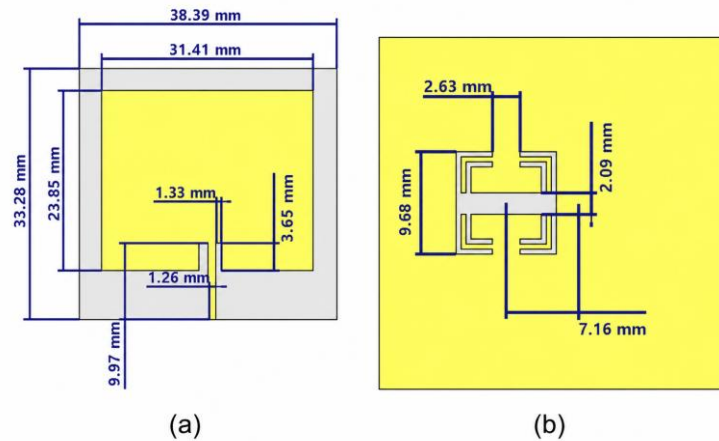
2.3.2 Topologia do metamaterial MNG

A antena com célula MNG foi projetada com base no procedimento apresentado por Laabadli et al. (2023), em que uma célula unitária de permeabilidade efetiva negativa é inserida no plano terra de uma antena inicialmente ajustada para frequência superior, deslocando sua operação para a faixa de 2,45 GHz.

Neste trabalho, foi inicialmente modelada uma antena de microfita em 3,3 GHz, utilizando os parâmetros do FR-4 caracterizados na Tabela 1. Após esse ajuste, a célula MNG foi inserida no plano terra e a estrutura foi otimizada no CST *Studio Suite*. Foram ajustadas as dimensões físicas da antena, os parâmetros geométricos da célula unitária, indicados na Figura 4(b) e sua posição relativa no plano terra, de modo a obter operação próxima de 2,45 GHz e reduzir a área total da antena. A geometria final da antena MNG é apresentada na Figura 4.

A posição da célula MNG foi incluída na otimização porque seu deslocamento lateral altera a interação da estrutura com os campos eletromagnéticos no plano terra. Para isso, a distância no eixo x entre o centro do plano terra e o centro da célula MNG foi variada, permitindo avaliar seu efeito sobre o acoplamento eletromagnético e sobre o casamento de impedância da antena.

Figura 4 - Medidas das dimensões, dadas em milímetros, da antena com metamaterial MNG após a sua otimização



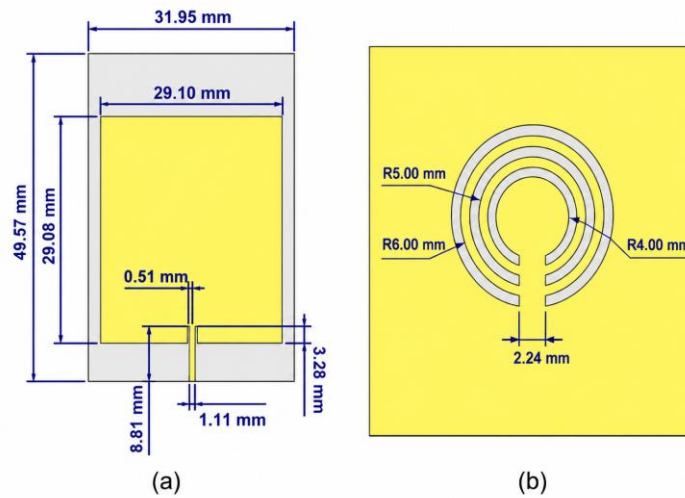
Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do CST *Studio Suite*.

2.3.3 Topologia do metamaterial DGS

A antena DGS foi desenvolvida pela inserção de anéis circulares concêntricos no plano terra da antena de microfita, com base no trabalho de Ripin et al. (2013). Essa topologia utiliza defeitos no plano terra para modificar a distribuição das correntes superficiais e alterar a resposta eletromagnética da antena, sendo associada à obtenção de permissividade e permeabilidade efetivas negativas na referência adotada.

O projeto partiu da antena convencional e utilizou os mesmos parâmetros elétricos e físicos do substrato FR-4. A geometria DGS foi inicialmente definida com base nos valores reportados por Ripin et al. (2013) e, posteriormente, otimizada no CST *Studio Suite* por algoritmo genético. O objetivo foi recuperar a operação na faixa de 2,4 GHz a 2,5 GHz, de modo a obter operação próxima de 2,45 GHz, mantendo o potencial de miniaturização introduzido pela modificação do plano terra. A geometria final é apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Medidas das dimensões, dadas em milímetros, da antena com metamaterial DGS após a sua otimização



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do CST *Studio Suite*.

2.4 Resultados simulados e medidos das antenas

Nesta seção são apresentados os resultados simulados e medidos das quatro antenas analisadas neste trabalho: a antena convencional de referência e as antenas miniaturizadas com as topologias CSRR, MNG e DGS aplicadas ao plano terra. A comparação foi realizada considerando o coeficiente de reflexão medido, o campo distante (*farfield*) em 2,45 GHz obtido por simulação no CST *Studio Suite* e a redução da área total das antenas. Esses parâmetros permitem avaliar o impacto das diferentes topologias sobre a miniaturização, o casamento de impedância e o desempenho radiativo das estruturas projetadas para operação na faixa de 2,45 GHz. É importante destacar que para o cálculo da redução percentual da área é considerada a área do substrato, já que ela cobre a área total do componente.

A caracterização experimental do coeficiente de reflexão foi realizada por meio do analisador FieldFox Keysight N9912A. Para cada antena, foram observados o valor mínimo de S_{11} , a frequência de melhor ressonância medida e o valor de S_{11} na frequência de interesse de 2,45 GHz. A Tabela 2 apresenta a síntese dos principais resultados obtidos.

Tabela 2 - Comparação entre área, redução percentual, coeficiente de reflexão medido e ganho máximo simulado das antenas

Antena	Área do substrato (mm ²)	Redução da área (%)	Frequência de ressonância medida	S ₁₁ mínimo medido	S ₁₁ em 2,45 GHz	Ganho máximo simulado
Convencional	4490,52	0,00	2,455 GHz	-20,58 dB	-20,58 dB	6,69 dBi
CSRR	1406,86	68,67	2,455 GHz	-24,93 dB	-24,93 dB	3,01 dBi
MNG	1277,62	71,55	2,492 GHz	-15,32 dB	-10,23 dB	4,33 dBi
DGS	1583,76	64,73	2,492 GHz	-10,70 dB	-8,52 dB	5,11 dBi

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados indicam que todas as topologias propostas proporcionaram redução significativa da área total em relação à antena convencional. A antena MNG apresentou a maior redução, com 71,55%, seguida pela antena CSRR, com 68,67%, e pela antena DGS, com 64,73%. Esses valores demonstram que a inserção de modificações no plano terra foi efetiva para reduzir as dimensões físicas das antenas, mantendo a operação próxima à faixa de 2,45 GHz. No entanto, a redução geométrica deve ser analisada em conjunto com os demais parâmetros eletromagnéticos, uma vez que a miniaturização pode alterar o casamento de impedância, o ganho e a distribuição dos campos radiados.

Em relação ao coeficiente de reflexão medido, observa-se que a antena convencional apresentou S₁₁ igual a -20,58 dB em 2,455 GHz, valor muito próximo da frequência de projeto. Esse resultado confirma que a antena de referência manteve bom casamento de impedância na faixa de interesse, servindo como base adequada para a comparação com as antenas miniaturizadas.

A antena com CSRR apresentou o melhor valor de S₁₁ entre todas as estruturas analisadas, atingindo -24,93 dB em 2,455 GHz. Esse comportamento indica que a aplicação da topologia CSRR no plano terra permitiu reduzir significativamente a área da antena sem prejudicar o casamento de impedância na frequência de operação. Assim, essa configuração apresentou simultaneamente elevada miniaturização e resposta experimental bem ajustada à faixa de 2,45 GHz.

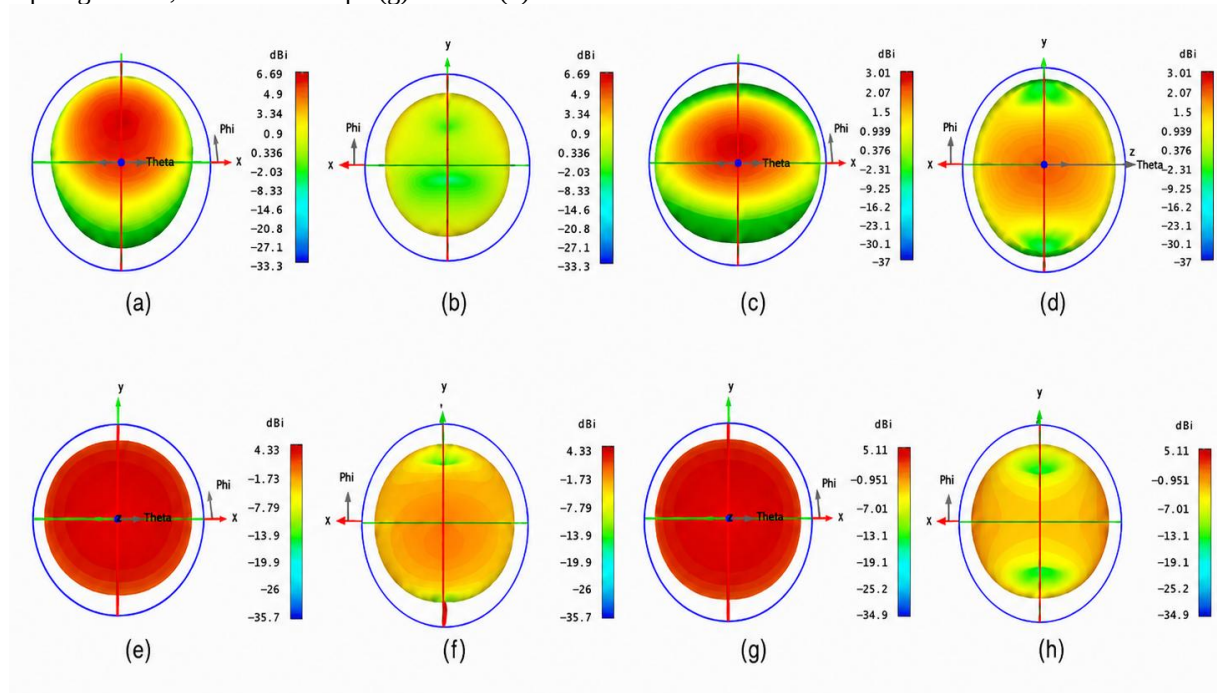
A antena MNG apresentou valor mínimo de S₁₁ igual a -15,32 dB em 2,492 GHz. Embora a melhor ressonância tenha ocorrido em frequência superior à frequência central de interesse, a antena ainda apresentou S₁₁ igual a -10,23 dB em 2,452 GHz, atendendo ao critério usual de casamento inferior a -10 dB na região próxima a 2,45 GHz. Esse resultado indica que, mesmo com o deslocamento da frequência de melhor ressonância, a antena MNG manteve

operação compatível com a faixa de interesse, além de apresentar a maior redução de área entre as topologias avaliadas.

Para a antena DGS, o valor mínimo medido de S_{11} foi de -10,70 dB em 2,492 GHz. Em 2,452 GHz, o coeficiente de reflexão foi de -8,52 dB, ficando acima do critério usual de -10 dB adotado para avaliar o casamento de impedância. Dessa forma, embora a estrutura tenha apresentado ressonância próxima à faixa de interesse e tenha mantido desempenho radiativo favorável, o resultado em 2,45 GHz deve ser tratado como uma limitação de projeto. Esse comportamento indica que a topologia DGS não alcançou, na frequência central de operação, o mesmo nível de casamento observado nas antenas convencional, CSRR e MNG. Essa limitação pode estar associada à maior sensibilidade da estrutura DGS às dimensões dos anéis circulares, às tolerâncias de fabricação e à modificação da distribuição de corrente no plano terra, que afeta diretamente a impedância de entrada da antena.

A Figura 6 apresenta os campos distantes simulados das quatro antenas em 2,45 GHz, juntamente com seus respectivos ganhos máximos. A antena convencional, apresentada na Figura 6(a), apresentou ganho máximo de 6,69 dBi, sendo o maior valor entre as antenas avaliadas. Esse resultado é esperado, uma vez que a antena convencional possui maior área física e não sofre as perturbações introduzidas pelas estruturas de miniaturização no plano terra.

Figura 6 - Diagramas tridimensionais de radiação em campo distante simulados no CST Studio Suite em 2,45 GHz para as antenas analisadas: antena convencional, nas vistas de topo (a) e verso (b); antena com topologia CSRR, nas vistas de topo (c) e verso (d); antena com topologia MNG, nas vistas de topo (e) e verso (f); e antena com topologia DGS, nas vistas de topo (g) e verso (h).



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do CST Studio Suite.

A antena com CSRR, apresentada na Figura 6(c), apresentou ganho máximo de 3,01 dBi. Embora essa topologia tenha proporcionado excelente casamento de impedância e elevada redução de área, verifica-se uma redução significativa do ganho em relação à antena convencional. Esse resultado evidencia o compromisso existente entre miniaturização e desempenho radiativo, pois a redução das dimensões físicas tende a limitar a abertura efetiva da antena e pode modificar a distribuição de corrente responsável pela radiação.

A antena MNG, apresentada na Figura 6(e), obteve ganho máximo de 4,33 dBi, valor intermediário entre as topologias CSRR e DGS. Esse comportamento indica que a estrutura MNG permitiu alcançar a maior redução de área mantendo ganho superior ao obtido pela antena CSRR. No entanto, assim como observado nos resultados de S_{11} , sua melhor ressonância ocorreu em 2,492 GHz, o que sugere a necessidade de ajustes dimensionais adicionais caso se deseje centralizar sua resposta exatamente em 2,45 GHz.

A antena DGS, apresentada na Figura 6(g), apresentou ganho máximo de 5,11 dBi, sendo o maior ganho entre as antenas miniaturizadas. Esse resultado indica que, apesar do casamento de impedância mais limitado em 2,45 GHz, a modificação do plano terra por anéis circulares manteve uma resposta radiativa relativamente próxima à da antena convencional. Dessa forma, a topologia DGS apresentou desempenho favorável do ponto de vista do ganho, embora seu ajuste de impedância ainda possa ser melhorado para operação mais precisa na frequência central desejada.

De modo geral, os diagramas simulados indicam que as quatro antenas mantiveram comportamento radiativo diretivo, compatível com a operação típica de antenas de microfitas. Entretanto, as alterações introduzidas no plano terra modificaram a distribuição de corrente e, conseqüentemente, afetaram a intensidade máxima de radiação. Essa diferença é relevante para aplicações em rectennas, pois o ganho da antena influencia diretamente a potência de radiofrequência captada e entregue ao circuito retificador. Assim, uma antena com bom casamento de impedância, mas ganho reduzido, pode não apresentar necessariamente o melhor desempenho quando integrada ao retificador.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que as três topologias aplicadas ao plano terra permitiram reduzir significativamente a área das antenas em relação à estrutura convencional. No entanto, cada configuração produziu efeitos distintos sobre o desempenho eletromagnético, mostrando que a redução de área não deve ser analisada isoladamente. A antena CSRR destacou-se pelo melhor S_{11} medido, a antena MNG pela maior redução de área e a antena DGS pelo maior ganho entre as antenas miniaturizadas, embora esta última tenha apresentado limitação de casamento em 2,45 GHz. Assim, a escolha da topologia mais

adequada depende do compromisso priorizado no projeto, considerando miniaturização, casamento de impedância, ganho e compatibilidade com a etapa retificadora.

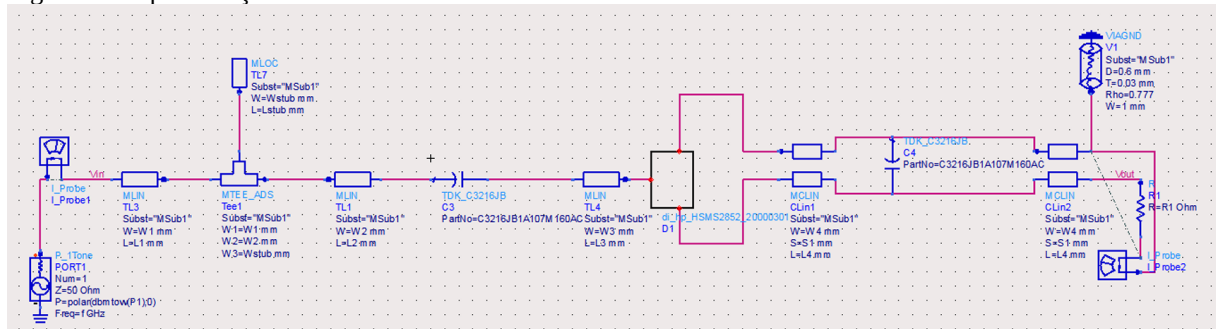
2.5 Projeto do retificador

O circuito retificador foi projetado no software ADS com o objetivo de converter o sinal de radiofrequência captado pelas antenas em tensão contínua na saída da rectenna. A topologia adotada foi a de dobrador de tensão, escolhida por apresentar estrutura simples, utilizar poucos componentes e ser adequada a aplicações em que os níveis de potência disponíveis na entrada são reduzidos. Essa escolha é compatível com o objetivo do trabalho, uma vez que a rectenna deve operar a partir da energia eletromagnética recebida pelas antenas miniaturizadas em 2,45 GHz.

O dispositivo semiconductor utilizado foi o diodo Schottky HSMS-2852, da Avago Technologies, selecionado devido à sua disponibilidade no Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado do CEFET-MG e à existência de modelo equivalente na biblioteca do ADS. Além disso, esse componente apresenta características adequadas para operação em radiofrequência, como baixa resistência série, de $25\ \Omega$, e baixa capacitância de junção, de $0,18\ \text{pF}$. Para a etapa de filtragem e armazenamento da tensão retificada, foi empregado um capacitor de $100\ \mu\text{F}$ da TDK, com encapsulamento SMD 1812, também disponível na biblioteca do software utilizado.

O casamento de impedância entre a antena e o retificador foi realizado por meio de linhas de transmissão em microfita e de um stub em aberto. Essa solução foi adotada por dispensar o uso de componentes passivos adicionais no bloco de casamento, reduzindo perdas associadas à soldagem e simplificando a fabricação do protótipo. Como as antenas foram projetadas para impedância característica de $50\ \Omega$, o circuito de entrada do retificador foi ajustado para se aproximar desse valor na frequência de operação de 2,45 GHz. Entretanto, deve-se considerar que o retificador é um circuito não linear, de modo que sua impedância de entrada depende da potência incidente, da frequência de operação e da carga conectada à saída. Portanto, o casamento em $50\ \Omega$ não representa uma condição fixa para todas as situações de operação, mas sim a condição adotada como referência para o projeto e para a comparação experimental das rectennas.

Figura 7 - Representação do circuito retificador dobrador de tensão no software ADS



Fonte: retrato da simulação feita no ADS.

As dimensões das linhas de transmissão foram otimizadas no ADS por meio do algoritmo genético, considerando como objetivos principais a obtenção de um S_{11} a -10 dB em 2,45 GHz, para potência de entrada de -10 dBm, e a maximização da eficiência de conversão RF-CC. A estrutura simulada do retificador é apresentada na Figura 7, enquanto os valores otimizados das dimensões das linhas de transmissão são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros dimensionais das linhas de transmissão do retificador após a otimização

Parâmetro	Valor (mm)	Parâmetro	Valor (mm)
w_1	2,78	l_1	4,55
w_2	2,78	l_2	5,92
w_3	2,00	l_3	4,94
w_4	8,13	l_4	6,99
w_{stub}	12,3	l_{stub}	12,10

Fonte: elaborado pelo autor.

As simulações foram realizadas utilizando os modos Harmonic Balance (HB) e S-Parameter (SP), adequados para a análise de circuitos não lineares em radiofrequência. O resultado simulado indicou bom casamento de impedância na frequência de projeto, com S_{11} igual a -28,193 dB em 2,45 GHz. A carta de Smith também confirmou que a impedância de entrada se manteve próxima de 50Ω , com componente reativa reduzida. Nessas condições, a eficiência simulada do retificador foi de 31,3% para potência de entrada de -10 dBm.

Após a fabricação, o protótipo do retificador foi caracterizado experimentalmente. O valor mínimo medido de S_{11} foi de aproximadamente -7 dB em 2,02 GHz, indicando deslocamento significativo da frequência de melhor casamento em relação à simulação, na qual foi obtido S_{11} igual a -28,193 dB em 2,45 GHz. Essa diferença representa uma limitação importante da etapa de retificação, pois reduz a transferência de potência entre a antena e o

retificador exatamente na frequência de interesse do sistema. O deslocamento pode estar associado às tolerâncias do processo manual de fabricação, às variações dimensionais das linhas de transmissão, às descontinuidades introduzidas pelas soldas, à modelagem simplificada do conector e às tolerâncias dos componentes utilizados. Além disso, componentes passivos podem apresentar valores efetivos diferentes dos valores nominais na frequência de operação, devido à tolerância de fabricação e aos efeitos parasitas de resistência e indutância série. Assim, um capacitor nominal de 100 μF , por exemplo, pode não apresentar comportamento ideal na faixa de 2,45 GHz, influenciando a resposta do circuito fabricado. Embora essa limitação tenha afetado o casamento experimental do retificador, o circuito ainda permitiu compor a etapa de retificação das rectennas, possibilitando a comparação experimental entre as diferentes topologias de antenas propostas neste trabalho.

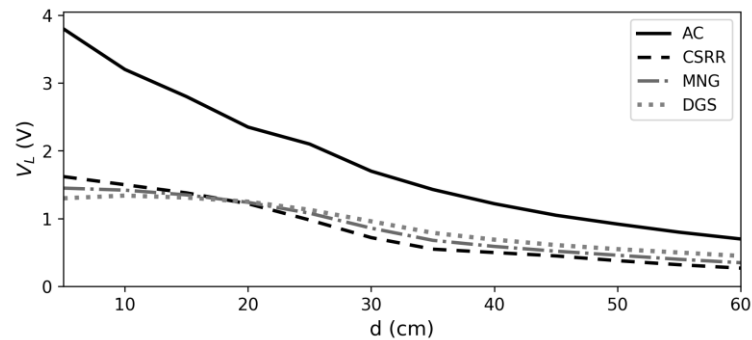
2.6 Desempenho das rectennas

Com o objetivo de avaliar o comportamento das rectennas em uma condição de transmissão direta de energia, foi realizado um ensaio experimental utilizando um gerador de sinais Rohde & Schwarz SMB100A, com faixa de operação de 100 kHz a 20 GHz, conectado a uma antena transmissora direcional de 2,4 GHz. O gerador foi configurado para operar em 2,45 GHz, com potência de transmissão de -10 dBm, e a tensão contínua foi medida na saída do retificador sobre uma carga de 10 k Ω para diferentes distâncias entre a antena transmissora e cada rectenna, até o limite de 60 cm. A primeira medição foi realizada com as antenas posicionadas a 1 cm uma da outra, buscando representar a menor distância possível entre transmissor e receptor. Durante o ensaio, a antena transmissora foi mantida diretamente à frente da antena receptora, preservando o alinhamento entre as estruturas e a polarização correspondente à antena de microfitas com patch retangular. Para cada distância, as medições foram realizadas duas vezes, sendo utilizado o valor médio para a construção do gráfico apresentado na Figura 8, em que AC representa a rectenna com antena convencional e CSRR, MNG e DGS representam as rectennas miniaturizadas por diferentes topologias de metamateriais.

A carga resistiva de 10 k Ω foi adotada como uma aproximação da impedância equivalente de entrada de plataformas de nós sensores utilizados em redes de sensores sem fio. Essa escolha foi baseada na caracterização apresentada por Saraiva (2013), na qual plataformas como Micaz, IRIS, Waspote e T-mode, considerando alimentação de 3 V, apresentaram impedâncias equivalentes na faixa aproximada de 10 k Ω a 13 k Ω . Dessa forma, a carga de 10

$k\Omega$ não representa um nó sensor específico em todas as suas condições dinâmicas de operação, mas fornece uma referência experimental simples para avaliar a capacidade da rectenna de entregar tensão contínua a uma carga compatível com dispositivos de baixo consumo.

Figura 8 - Tensão na carga das rectennas em função da distância no ensaio de transmissão direta



Fonte: elaborada pelo autor a partir dos dados experimentais obtidos no ensaio

Observa-se que, para todas as estruturas analisadas, a tensão na carga diminui com o aumento da distância entre transmissor e receptor, comportamento esperado devido à redução da densidade de potência eletromagnética incidente sobre a antena receptora. A rectenna AC apresentou os maiores valores de tensão em toda a faixa de distâncias avaliada, atingindo aproximadamente 3,8 V na menor distância e mantendo valor superior ao das demais configurações até 60 cm. Esse resultado está associado às maiores dimensões físicas da antena convencional e ao seu desempenho eletromagnético mais favorável em termos de captação de potência, especialmente por apresentar maior ganho diretivo em comparação às antenas miniaturizadas.

As rectennas baseadas em metamateriais apresentaram níveis de tensão inferiores aos da AC, porém mantiveram capacidade de conversão RF-CC ao longo de todo o intervalo analisado. Entre elas, as respostas de CSRR, MNG e DGS foram relativamente próximas, com pequenas diferenças ao longo da distância. A topologia DGS apresentou valores ligeiramente superiores em parte do ensaio, enquanto a CSRR apresentou os menores níveis nas maiores distâncias. Esse comportamento indica que a miniaturização por metamateriais, embora favoreça a redução da área ocupada pela antena, pode impor limitações à energia efetivamente captada e transferida ao retificador, em razão de alterações no ganho, na eficiência de radiação e no casamento de impedância do conjunto.

Considerando a carga de $10\ k\Omega$ utilizada no ensaio, a potência de saída pode ser estimada pela relação de tensão de saída do sistema e carga resistiva. Na menor distância avaliada, a rectenna convencional, com tensão próxima de 3,8 V, forneceu aproximadamente

1,44 mW. Para as rectennas miniaturizadas, foram obtidas potências aproximadas de 302,76 μ W para a CSRR, com 1,74 V, 216,09 μ W para a MNG, com 1,47 V, e 148,84 μ W para a DGS, com 1,22 V. Esses valores indicam que, nas condições experimentais avaliadas, as rectennas miniaturizadas ainda não atingem, de forma direta, a potência estimada para alimentação contínua de nós sensores operando em 3 V, cuja demanda equivalente se situa, aproximadamente, entre 0,69 mW e 0,87 mW para as plataformas analisadas por Saraiva (2013). No entanto, os níveis de tensão obtidos demonstram capacidade de conversão RF-CC e indicam potencial para aplicações de baixa potência, principalmente com o aprimoramento do casamento e da resposta do retificador na frequência de 2,45 GHz.

Ainda assim, os valores obtidos demonstram que a energia captada pelas rectennas miniaturizadas é suficiente para alimentar cargas de baixo consumo, especialmente em aplicações próximas à fonte transmissora ou em sistemas nos quais a compactidade seja um requisito prioritário. Portanto, embora a rectenna AC apresente melhor desempenho absoluto em tensão de saída, as configurações com metamateriais oferecem maior viabilidade de integração em dispositivos compactos, como nós sensores e aplicações IoT. Caso a tensão mínima de alimentação da carga escolhida seja superior ao valor fornecido pela rectenna miniaturizada, pode-se considerar a inclusão de um conversor boost na saída do retificador, de modo a elevar e regular o nível de tensão entregue ao dispositivo alimentado.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise comparativa de rectennas com antenas de microfita miniaturizadas por meio de três topologias de metamateriais aplicadas ao plano terra: CSRR, MNG e DGS com anéis circulares. Para isso, foi projetada uma antena convencional de referência em 2,45 GHz, seguida da implementação, otimização, fabricação e medição das antenas miniaturizadas, além do desenvolvimento de um retificador dobrador de tensão para avaliação do sistema completo de rectenna.

Os resultados obtidos demonstraram que todas as topologias analisadas permitiram redução significativa da área em relação à antena convencional. A topologia MNG apresentou a maior miniaturização, com redução de 71,55 %, seguida pela CSRR, com 68,67 %, e pela DGS, com 64,73 %. Em relação ao casamento de impedância, a antena CSRR apresentou o melhor resultado medido, com S_{11} de -24,93 dB em 2,455 GHz, enquanto a DGS apresentou o maior ganho entre as antenas miniaturizadas, com 5,11 dBi. Dessa forma, verificou-se que cada

topologia apresenta vantagens distintas, não sendo possível definir uma única solução superior sem considerar o critério de projeto adotado.

Na integração com o retificador, a rectenna convencional apresentou os maiores níveis de tensão de saída, alcançando aproximadamente 3,8 V na menor distância avaliada, o que corresponde a cerca de 1,44 mW na carga de 10 k Ω . As rectennas miniaturizadas apresentaram tensões inferiores, com valores máximos de 1,74 V para a CSRR, 1,47 V para a MNG e 1,22 V para a DGS, equivalentes a aproximadamente 302,76 μ W, 216,09 μ W e 148,84 μ W, respectivamente. Esses valores são inferiores à potência estimada para alimentação contínua de nós sensores operando em 3 V, considerando impedâncias equivalentes próximas de 10 k Ω a 13 k Ω , mas demonstram capacidade de conversão RF-CC em estruturas significativamente miniaturizadas. Dessa forma, a viabilidade observada deve ser compreendida para aplicações de baixa potência, curtas distâncias, armazenamento de energia ou alimentação intermitente, especialmente com o aprimoramento do retificador para operação mais ajustada em 2,45 GHz e, quando necessário, com a inclusão de um estágio elevador de tensão.

Conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, pois foi possível comparar diferentes topologias de metamateriais aplicadas à miniaturização de antenas para rectennas, avaliando seus efeitos sobre área, casamento de impedância, ganho e tensão de saída. Como limitações, destacam-se as tolerâncias de fabricação, a sensibilidade das estruturas metamateriais às variações dimensionais e o deslocamento observado no casamento do retificador em relação à simulação. Como trabalhos futuros, recomenda-se aprimorar o casamento entre antena e retificador, investigar novas geometrias de metamateriais, avaliar a eficiência total das rectennas em diferentes níveis de potência e considerar a inclusão de um conversor boost para aplicações em cargas que exijam maior tensão contínua.

REFERÊNCIAS

ALQADAMI, Abdulrahman Shueai Mohsen; JAMLOS, Mohd Faizal; SOH, Ping Jack; RAHIM, Sharul Kamal Abdul; VANDENBOSCH, Guy A. E.; NARBUDOWICZ, Adam. Miniaturized dual-band antenna array with double-negative (DNG) metamaterial for wireless applications. *Applied Physics A*, v. 123, artigo 22, 2017. DOI: 10.1007/s00339-016-0678-3.

BALANIS, Constantine A. Teoria de antenas: análise e síntese. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 2 v.

FALLAHPOUR, Mojtaba; ZOUGHI, Reza. Antenna miniaturization techniques: a review of topology- and material-based methods. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 38-50, fev. 2018. DOI: 10.1109/MAP.2017.2774138.

LAABADLI, Abdel-Ali; MEJDOUB, Youssef; EL AMRI, Abdelkebir; TARBOUCH, Mohamed. A miniaturized rectangular microstrip patch antenna with negative permeability unit cell metamaterial for the band 2.45 GHz. *ITM Web of Conferences*, [s. l.], v. 52, artigo 03002, 2023. DOI: 10.1051/itmconf/20235203002.

MIRZA, Moinuddin M. M.; DHAGE, Sudhir. A miniaturized and improved antenna using metamaterial. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND CONTROL, 2017. Proceedings [...]. [S. l.]: IEEE, 2017.

PARMAR, Kinjal; SUTHAR, A. C. A comprehensive survey of microstrip patch antenna based on metamaterial. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND AUTOMATION, 6., 2021, Arad, Romania. *Proceedings [...]*. [S. l.]: IEEE, 2021. p. 620-625. DOI: 10.1109/ICCCA52192.2021.9666415.

RIPIN, N.; SAIDY, W. M. A. W.; SULAIMAN, A. A.; RASHID, N. E. A.; HUSSIN, M. F. Miniaturization of microstrip patch antenna through metamaterial approach. In: IEEE STUDENT CONFERENCE ON RESEARCH AND DEVELOPMENT, 2013, Putrajaya, Malaysia. *Proceedings [...]*. [S. l.]: IEEE, 2013. p. 365-369.

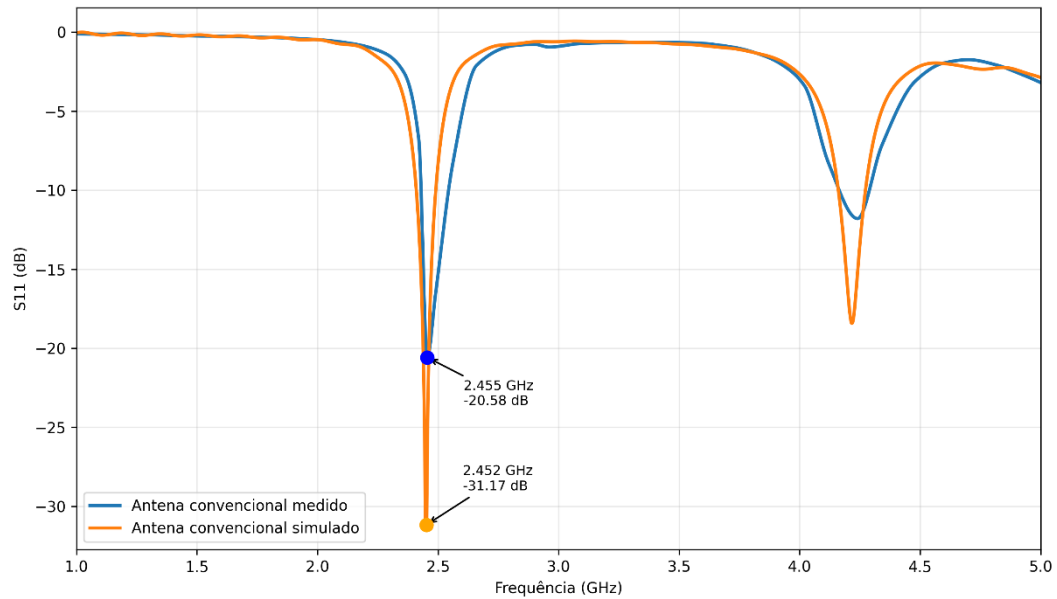
SARAIVA, H. M. Desenvolvimento de Dispositivos de Recolha de Energia Electromagnética Integrados em Vestuário e Aplicados a Redes sem Fios de Área Corporal. Covilhã, Portugal, 2013.

SHAW, Tarakeswar; SAMANTA, Gopinath. Miniaturized slot antenna design using high permittivity & permeability property of metamaterial. In: IEEE INDIAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 2021. Proceedings [...]. [S. l.]: IEEE, 2021. p. 567-570. DOI: 10.1109/INCAP52216.2021.9726433.

TUNG, Phan Duy; LAM, Phan Huu; HOA, Nguyen Thi Quynh. A miniaturization of microstrip antenna using negative permittivity metamaterial based on CSRR-loaded ground for WLAN applications. *Journal of Science and Technology*, [s. l.], v. 54, n. 6, p. 689-697, 2016. DOI: 10.15625/0866-708X/54/6/8375

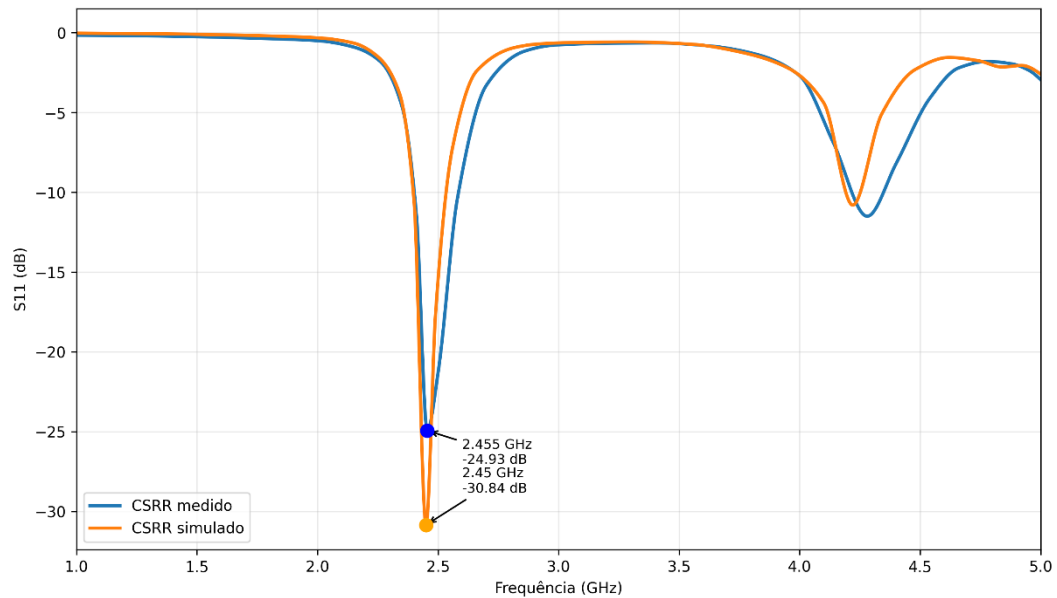
APÊNDICE A – Resultados complementares

Figura 9 - Coeficiente de reflexão S_{11} medido e simulado da antenna convencional em função da frequência



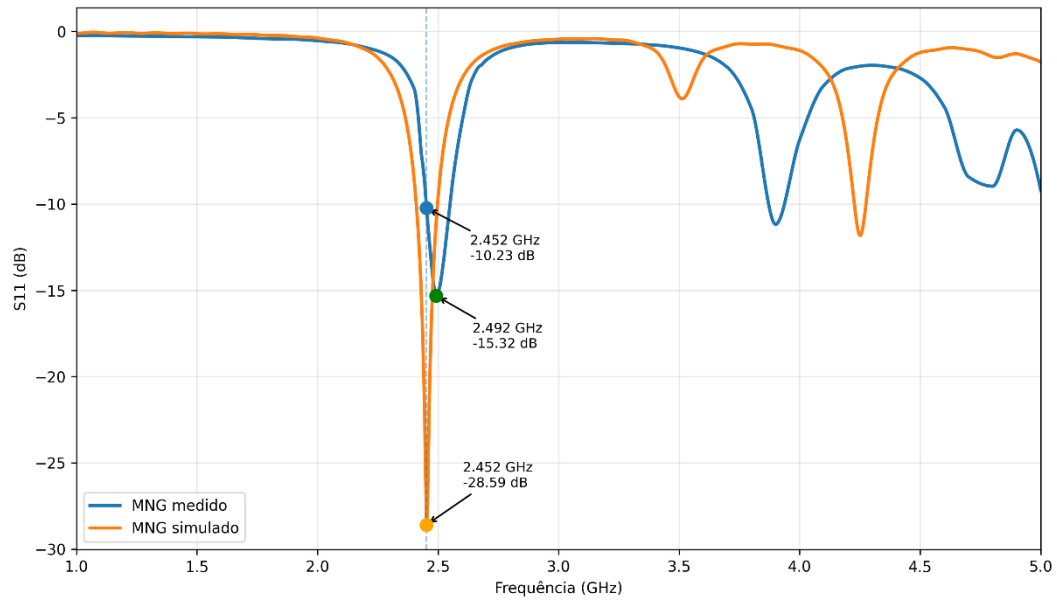
Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do Matplotlib.

Figura 10 - Coeficiente de reflexão S_{11} medido e simulado da antenna com metamaterial CSRR em função da frequência



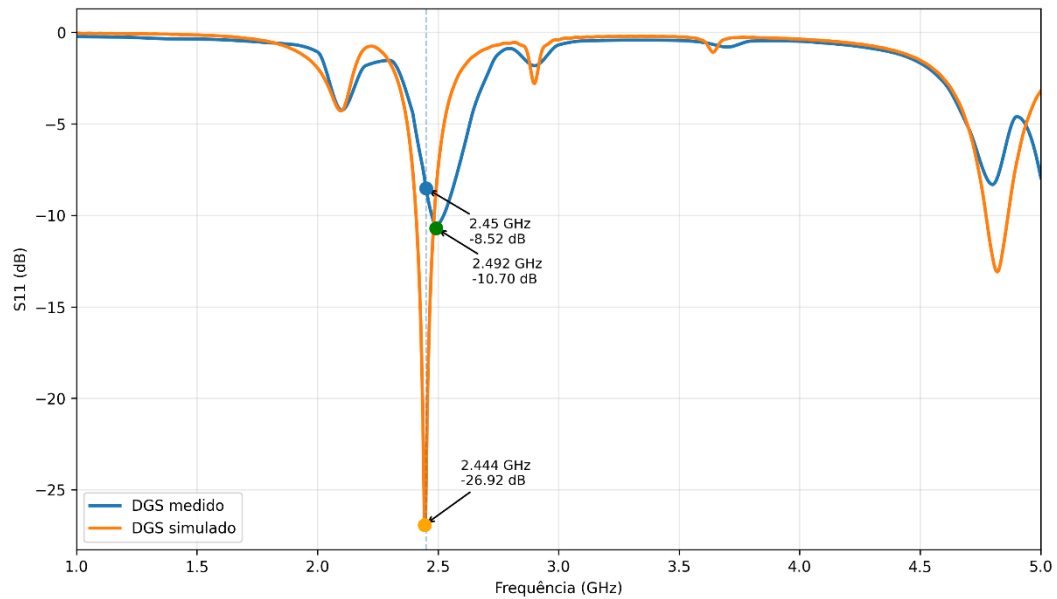
Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do Matplotlib.

Figura 11 - Coeficiente de reflexão S_{11} medido e simulado da antenna com metamaterial MNG em função da frequência



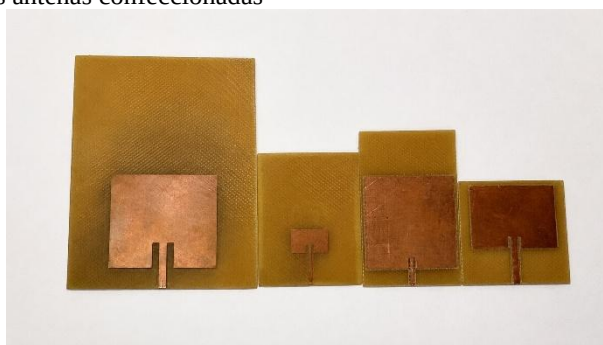
Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do **Matplotlib**.

Figura 12 - Coeficiente de reflexão S_{11} medido e simulado da antenna com estrutura DGS em função da frequência



Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do **Matplotlib**.

Figura 13 - Vista frontal das antenas confeccionadas



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 - Vista dos planos de terra das antenas confeccionadas



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 15 - Setup de medição da tensão de saída da antena sobre carga de 10 k Ω



Fonte: elaborado pelo autor.



ATA Nº 19/2026 - DEE (11.56.08)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Belo Horizonte-MG, 18 de junho de 2026.

ATA DE DEFESA DO PROJETO FINAL DE CURSO

Aos 18 dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e seis, realizou-se a sessão pública de defesa do projeto final de curso intitulado **“Análise Comparativa De Rectennas com Diferentes Topologias de Metamateriais para a sua Miniaturização”**, apresentado por **Felipe Luciano Neiva Souza**, matrícula 201622060016 do **Curso de Engenharia Elétrica – CNG**. Os trabalhos foram iniciados às 10h pela Professora (Orientadora) Ursula do Carmo Resende, do Departamento de Engenharia Elétrica, presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros: Professor Sandro Trindade Mordente Gonçalves do Departamento de Engenharia Elétrica e Professor Maurício Duarte de Almeida do Departamento de Engenharia Elétrica. Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que decidiram por **aprovar** o trabalho. Para constar, redigiu-se a presente ata que, após aprovada por todos os presentes, será assinada pelos membros da banca e pelo discente.

Belo Horizonte, 18 de junho de 2026

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 18:53)

MAURICIO DUARTE ALMEIDA
PROF ENS BAS TEC TECNOLÓGICO-SUBSTITUTO
DEE (11.56.08)
Matrícula: ###710#5

(Assinado digitalmente em 19/06/2026 17:13)
SANDRO TRINDADE MORDENTE GONCALVES

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
PPGEL (11.52.08)
Matrícula: ###304#7

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 20:02)

URSULA DO CARMO RESENDE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
CDIP (11.52.11)
Matrícula: ###434#7

(Assinado digitalmente em 22/06/2026 08:59)

Felipe Luciano Neiva Souza
DISCENTE
Matrícula: 2016#####6

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **19**, ano: **2026**, tipo: **ATA**, data de emissão: **18/06/2026** e o código de verificação: **565c60dc57**