

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA - TELECOMUNICAÇÕES

Chryslène Marilande Merveilles Adetonah

Uma investigação sobre o emprego de ressonadores líquidos em antenas
patch retangulares

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da
UFJF com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Adetonah, Chryslène Marilande Merveilles.

Uma investigação sobre o emprego de ressonadores líquidos em antenas
patch retangulares / Chryslène Marilande Merveilles Adetonah. – 2024.

51 f. : il.

Orientador: Moisés Vidal Ribeiro

Coorientadora: Cláudia de Magalhães Santos Fonseca

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia. Engenharia Elétrica - TELECOMUNICAÇÕES,
2024.

1. Microfita. 2. Antena *patch* retangular. 3. Ressonador. 4. Material
líquido. 5. Sólido geométrico. I. Ribeiro, Moisés Vidal, orient. II. Fonseca,
Cláudia de Magalhães Santos, coorient. III. Título.

Chryslène Marilande Merveilles Adetonah

**Uma investigação sobre o emprego de ressonadores líquidos em antenas
patch retangulares**

Monografia apresentada à Coordenação do
Curso de Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Juiz de Fora, Habilitação
Telecomunicações, como requisito para apro-
vação na disciplina ENE064 - Trabalho de
Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro

Coorientadora: Ma. Cláudia de Magalhães Santos Fonseca

Juiz de Fora

2024

Chryslène Marilande Merveilles Adetonah

Uma investigação sobre o emprego de ressonadores líquidos em antenas
patch retangulares

Monografia apresentada à Coordenação do
Curso de Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Juiz de Fora, Habilitação
Telecomunicações, como requisito para apro-
vação na disciplina ENE064 - Trabalho de
Conclusão de Curso

Aprovada em 11 de outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Ma. Cláudia de Magalhães Santos Fonseca -
Coorientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Benigno Rodríguez Díaz
Universidade da República, Uruguay

Dr. Luís Guilherme da Silva Costa
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder a força, a sabedoria e a perseverança necessárias para concluir este trabalho.

Embora minha família não esteja fisicamente presente, seu amor e apoio, mesmo à distância, foram fundamentais para que eu superasse os desafios ao longo desta jornada. Sou imensamente grata por estarem sempre comigo, apesar da distância.

Agradeço sinceramente ao meu orientador, Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro, pelos valiosos conselhos, apoio constante e dedicação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho assim como a oportunidade de trabalhar no Laboratório de Comunicações. A minha coorientadora, Ma. Cláudia de Magalhães Santos Fonseca, expressei minha gratidão pelas contribuições significativas e pelas sugestões que enriqueceram este trabalho. Aos membros da banca avaliadora, Prof. Dr. Benigno Rodríguez Díaz e Dr. Luís Guilherme da Silva Costa, agradeço pelas críticas construtivas e por dedicarem seu tempo e conhecimento para aprimorar este trabalho.

Minha gratidão também se estende aos colegas do Laboratório de Comunicações, pela atenção e disposição em me ajudar durante minha iniciação científica.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

Este estudo investiga, através de simulações numéricas, a influência de ressonadores que fazem uso de alguns líquidos (água destilada, água deionizada, água salgada e glicerina) e de alguns formatos de sólidos geométricos (paralelepípedo retangular, calota esférica, calota esférica côncava, calota cilíndrica e calota cilíndrica côncava) no desempenho de antenas *patch* retangulares, que fazem uso dos substratos FR-4, Rogers RO4725JXR e RT-DUROID 6010LM. Os resultados das simulações numéricas mostram que o emprego de ressonadores líquidos pode alterar significativamente o desempenho das antenas *patch* retangulares, em termos dos parâmetros de desempenho eletromagnético obtidos a partir dos diagrama de radiação e diagrama polar. Por exemplo, o emprego de ressonadores líquidos exercem maiores impactos em antenas *patch* retangulares que fazem uso de substrato de baixa qualidade (FR-4) em relação ao emprego de substrato de maior qualidade (Rogers RO4725JXR e RT-DUROID 6010LM). Os resultados numéricos também mostram que o formato do sólido geométrico adotado pelo ressonador também é relevante para determinar o ressonador líquido. Finalmente, os resultados numéricos indicam que os ressonadores líquidos baseados em água deionizada e destilada apresentam os melhores desempenhos, enquanto a água salgada apresentou os piores resultados devido à sua alta condutividade. Já o emprego da glicerina no ressonador líquido apresentou bons resultados em relação a água salgada, apesar de ter apresentado descasamento de impedância em alguns casos. As análises apresentadas indicam que o emprego de ressonadores líquidos podem alterar consideravelmente o comportamento de uma antena *patch* retangular e, conseqüentemente, melhorias significativas são observadas quando a qualidade do substrato empregado é baixa.

Palavras-chave: microfita, antena *patch* retangular, ressonador, material líquido, sólido geométrico.

ABSTRACT

This study investigates, through numerical simulations, the influence of resonators using certain liquids (distilled water, deionized water, saline water, and glycerin) and some geometric solid shapes (rectangular parallelepiped, convex hemisphere, concave hemisphere, convex cylinder cap, and concave cylinder cap) on the performance of rectangular patch antennas, which utilize FR-4, Rogers RO4725JXR, and RT-Duroid 6010LM substrates. The results of the numerical simulations show that the use of liquid resonators can significantly alter the performance of rectangular patch antennas in terms of electromagnetic performance parameters obtained from radiation and polar diagrams. For example, liquid resonators have a greater impact on rectangular patch antennas using low-quality substrates (FR-4) compared to those using higher-quality substrates (Rogers RO4725JXR and RT-Duroid 6010LM). The numerical results also show that the geometric shape adopted by the resonator is also relevant in determining the liquid resonator's impact. Finally, the numerical results indicate that liquid resonators based on deionized and distilled water exhibit the best performance, while sea water presents the worst results due to its high conductivity. The use of glycerin in liquid resonators showed good results compared to saline water, despite presenting impedance mismatch in some cases. The presented analyses indicate that the use of liquid resonators can considerably alter the behavior of a rectangular patch antenna and, consequently, significant improvements are observed when the quality of the employed substrate is low.

Keywords: microstrip, rectangular patch antenna, resonator, liquid material, geometric solid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Antena <i>patch</i> retangular.	16
Figura 2 – Linhas de campo na antena <i>patch</i> retangular.	17
Figura 3 – Ilustração do formato dos sólidos geométricos empregados pelos RLs: a) paralelepípedo retangular, b) calota esférica, c) calota esférica côncava, d) calota cilíndrica e e) calota cilíndrica côncava.	23
Figura 4 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na água destilada e sólidos geométricos escolhidos.	26
Figura 5 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na água destilada e sólidos geométricos escolhidos.	27
Figura 6 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na água destilada e sólidos geométricos escolhidos.	28
Figura 7 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na água deionizada e sólidos geométricos escolhidos.	29
Figura 8 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na água deionizada e sólidos geométricos escolhidos.	29
Figura 9 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na água deionizada e sólidos geométricos escolhidos.	30
Figura 10 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na água salgada e sólidos geométricos escolhidos.	31
Figura 11 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na água salgada e sólidos geométricos escolhidos.	32
Figura 12 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na água salgada e sólidos geométricos escolhidos.	33
Figura 13 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na glicerina e sólidos geométricos escolhidos.	34
Figura 14 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na glicerina e sólidos geométricos escolhidos.	35
Figura 15 – $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na glicerina e sólidos geométricos escolhidos.	36
Figura 16 – Padrões de radiação para a antena <i>patch</i> retangular com substrato FR-4: a) 1-D no plano $\phi = 0^\circ$ para as configurações sem RL e com RL baseado na água destilada, b) 3-D para a configuração sem RL e c) 3-D para a configuração com RL baseado na água destilada.	36

Figura 17 – Padrões de radiação para a antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR: a) 1-D no plano $\phi = 94^\circ$ para as configurações sem RL e com RL baseado na água deionizada, b) 3-D para a configuração sem RL, c) 3-D para a configuração com RL baseado na água deionizada. 39

Figura 18 – Padrões de radiação para a antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: a) 1-D no plano $\phi = 0^\circ$ para as configurações sem RL e com RL baseado na água deionizada, b) 3-D para a configuração sem RL e c) 3-D para a configuração com RL baseado na água deionizada. 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Características eletromagnéticas dos substratos.	25
Tabela 2	– Características eletromagnéticas dos materiais líquidos.	25
Tabela 3	– Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena <i>patch</i> retangular com substrato FR-4 em relação ao diagrama de radiação.	37
Tabela 4	– Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena <i>patch</i> retangular com substrato FR-4 em relação ao diagrama polar.	38
Tabela 5	– Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RO4725JXR em relação ao diagrama de radiação.	40
Tabela 6	– Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RO4725JXR em relação ao diagrama polar.	40
Tabela 7	– Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM em relação ao diagrama de radiação.	42
Tabela 8	– Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena <i>patch</i> retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM em relação ao diagrama polar.	43

ACRÔNIMOS

cal-cil	calota cilíndrica
cal-cil-con	calota cilíndrica côncava
cal-esf	calota esférica
cal-esf-con	calota esférica côncava
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
DR	ressonador dielétrico (do inglês, <i>dielectric resonator</i>)
FIT	técnica de integração finita (do inglês, <i>finite integration technique</i>)
GPS	sistema de posicionamento global (do inglês, <i>global positioning system</i>)
HPBW	ângulo de meia potência (do inglês, <i>half-power beamwidth</i>)
MLD	direção do lóbulo principal (do inglês, <i>main lobe direction</i>)
MLM	magnitude do lóbulo principal (do inglês, <i>main lobe magnitude</i>)
par-ret	paralelepípedo retangular
PBA	aproximação de fronteira perfeita (do inglês, <i>perfect boundary approximation</i>)
RF	radio frequência (do inglês, <i>radio frequency</i>)
RL	ressonador líquido
SLL	nível dos lóbulos laterais, (do inglês, <i>side lobe level</i>)
TE	transverso elétrico
TLM	matriz de linha de transmissão (do inglês, <i>transmission line matrix</i>)
TM	transverso magnético
TST	técnica de folha fina (do inglês, <i>thin sheet technique</i>)
Wi-Fi	<i>wireless fidelity</i>

ÍNDICE

1	Introdução	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Organização do trabalho	13
2	Apresentação do Problema	14
2.1	Antenas <i>patch</i>	14
2.1.1	Antena <i>patch</i> retangular	15
2.2	Formulação do problema	18
3	Materiais líquidos para antenas <i>patch</i> retangulares	20
3.1	Tipos de materiais líquidos	20
3.2	Formatos dos sólidos geométricos	21
4	Resultados numéricos	24
4.1	Metodologia das Simulações	24
4.2	Água destilada	25
4.3	Água deionizada	28
4.4	Água salgada	30
4.5	Glicerina	33
4.6	Análise do padrão de radiação	35
4.7	Discussão dos resultados	43
5	Conclusões	46
	REFERÊNCIAS	47
	Apêndices A – Publicações	51

1 Introdução

As antenas de microfitas, conhecidas também como antenas *patch*, tornaram-se componentes fundamentais em diversas áreas tecnológicas desde sua criação nas décadas de 1970 e 1980. A simplicidade de sua construção, aliada à vasta aplicabilidade, inicialmente voltada ao setor espacial, rapidamente expandiu seu uso para aplicações comerciais e governamentais, como comunicações móveis, redes *wireless fidelity* (Wi-Fi), sistemas de posicionamento global (do inglês, *global positioning system*) (GPS) e comunicações via satélite. A característica principal dessas antenas é sua geometria plana, composta por um elemento irradiador montado sobre um substrato dielétrico e um plano de terra. Entre as diversas configurações possíveis, as formas retangulares e circulares são as mais comuns, devido à facilidade de fabricação e análise, além de oferecerem baixas perdas por polarização cruzada [1]. As antenas *patch* apresentam várias vantagens, como perfil reduzido, adaptabilidade a diferentes superfícies, e fácil integração com placas de circuitos impressos. Além disso, permitem flexibilidade em termos de frequência de ressonância, polarização e padrão de radiação, sendo amplamente utilizadas em aplicações como *energy harvesting* [1].

Nos últimos anos, o aprimoramento do desempenho das antenas *patch* tem sido intensamente investigado, com foco na incorporação de novos materiais e técnicas de alimentação [2, 3]. A combinação de ligas metálicas líquidas com dielétricos líquidos demonstrou ser uma abordagem promissora para melhorar a eficiência de radiação e ampliar a largura de banda das antenas, permitindo, ao mesmo tempo, ajustes dinâmicos de suas propriedades [4]. A flexibilidade dos metais líquidos, como o gálio, oferece vantagens notáveis em termos de desempenho e amplia as possibilidades de aplicação de antenas com materiais líquidos [5]. As antenas multi-feixes conformais, desenvolvidas com metais líquidos, são capazes de direcionar sinais em múltiplas direções simultaneamente. A principal vantagem dessa abordagem é a adaptabilidade das antenas a superfícies irregulares ou curvas, sem comprometer seu desempenho [6].

Além dos metais líquidos, líquidos não metálicos, como a água destilada, também têm sido amplamente investigados por sua capacidade de ajustar propriedades específicas das antenas, como a polarização circular e a frequência de ressonância [7]. A utilização de água destilada permite uma reconfiguração eficiente das características da antena, controlando suas propriedades dielétricas para melhorar o desempenho, incluindo o ajuste da frequência de ressonância [8]. As antenas dielétricas reconfiguráveis têm evidenciado a capacidade de ajustar dinamicamente as propriedades dielétricas por meio do uso de materiais líquidos. Essas antenas, que incorporam líquidos como componentes centrais, permitem uma modificação em tempo real de parâmetros como a frequência de operação, polarização e largura de banda, tornando-as altamente adaptáveis a diferentes condições de operação. Essa flexibilidade as torna ideais para aplicações que exigem mudanças

rápidas e eficiência em múltiplas frequências ou cenários variáveis [9, 10].

Neste contexto, a busca por aprimorar o desempenho das antenas *patch* vai além da simples aplicação de novos materiais, abrindo espaço para inovações mais dinâmicas e adaptativas. Uma direção promissora nessa linha de investigação é o emprego de ressonadores líquidos, que traz uma nova abordagem ao projeto de antenas, permitindo ajustes finos e adaptações conforme a necessidade. Ao contrário de materiais sólidos convencionais, os ressonadores líquidos oferecem a possibilidade de modificar dinamicamente as propriedades críticas como a constante dielétrica, a impedância e o ganho das antenas. A utilização de ressonadores líquidos permite ainda que os parâmetros de desempenho eletromagnético da antena *patch* possam ser alterados dinamicamente, de acordo com a escolha do líquido e da forma geométrica do ressonador. Isso possibilita uma personalização e ajuste do comportamento da antena para diversas aplicações, como comunicações sem fio, radares ou sistemas de satélites, onde diferentes faixas de frequência ou ambientes de operação requerem diferentes configurações de antena.

Além disso, a investigação do impacto de diferentes líquidos (como água destilada, água deionizada, glicerina e água salgada) e suas propriedades dielétricas e condutivas torna-se crucial. Cada líquido interage de maneira distinta com o campo eletromagnético, o que pode resultar em variações significativas nos parâmetros de frequência de ressonância, largura de banda, parâmetro de espalhamento ($|S_{11}|$), e ganho da antena. Igualmente importante é o estudo dos formatos geométricos dos ressonadores líquidos, como paralelepípedos retangulares, calotas esféricas e cilíndricas, que podem influenciar o confinamento do campo eletromagnético e, por consequência, o desempenho da antena.

Portanto, ao investigar os possíveis ganhos em desempenho eletromagnético por meio do uso de diferentes materiais líquidos e formatos geométricos de ressonadores, não apenas se abrem novas possibilidades de otimização de antenas *patch*, mas também se contribui para o desenvolvimento de antenas com capacidades dinâmicas e adaptativas, ajustáveis conforme o ambiente de operação e requisitos de desempenho. Isso torna a pesquisa nesta área extremamente relevante para a evolução de sistemas de comunicação modernos e outras aplicações de alta frequência.

1.1 Objetivos

O presente trabalho investiga, através de simulações numéricas, a utilidade de ressonadores líquidos para melhorar o desempenho da antena *patch* retangular. Nesse contexto, o presente trabalho se dedica aos seguintes objetivos:

- Simular e analisar a influência de ressonadores líquidos no desempenho de uma antena *patch* retangular. Para isso, busca-se utilizar diferentes tipos de substratos, como o FR-4, o Rogers RO4725JXR e o Rogers RT/duroid 6010LM, com o intuito

de investigar como cada um desses materiais, com suas distintas propriedades dielétricas e características de perdas, afeta o comportamento eletromagnético da antena. Para tanto, são empregados líquidos de diferentes características, como água destilada, água deionizada, água salgada e glicerina, para examinar sua influência no desempenho da antena *patch* retangular, considerando suas propriedades dielétricas e condutivas.

- Avaliar como os diferentes formatos geométricos que o ressonador líquido pode assumir, incluindo paralelepípedo retangular, calota esférica, calota esférica côncava, calota cilíndrica e calota cilíndrica côncava, influenciam os parâmetros de desempenho da antena *patch* retangular, tais como a frequência de ressonância (f_r), o parâmetro de espalhamento ($|S_{11}|$), a largura de banda (B_ω) e o ganho realizado. Cada um desses formatos geométricos é esperado proporcionar diferentes níveis de confinamento dos campos eletromagnéticos e alterar a interação entre a antena e o ressonador líquido.
- Compreender de maneira mais profunda como a combinação entre o substrato, o líquido e o formato do ressonador líquido pode modificar o comportamento da antena *patch* retangular, buscando melhorar o seu desempenho. A análise dos resultados obtidos a partir das simulações numéricas fornece informações valiosas sobre a melhor configuração de ressonadores líquidos para maximizar a eficiência de radiação, o acoplamento de impedância e a diretividade da antena em cenários práticos.

1.1.1 Organização do trabalho

A organização deste trabalho segue a estrutura descrita a seguir:

- **Capítulo 2:** neste capítulo é apresentada uma revisão sobre as antenas *patch* retangulares, além de uma fundamentação teórica que contextualiza o problema investigado neste trabalho;
- **Capítulo 3:** neste capítulo, são discutidos os líquidos utilizados e as diferentes formas geométricas que os ressonadores líquidos podem assumir quando aplicados em antenas *patch* retangulares, abordando suas características e implicações;
- **Capítulo 4:** neste capítulo, são analisados os resultados obtidos a partir das simulações numéricas, fornecendo *insights* sobre como as diversas configurações de ressonadores líquidos influenciam os principais parâmetros de desempenho das antenas *patch* retangulares;
- **Capítulo 5:** neste capítulo, são apresentadas as conclusões da pesquisa realizada, destacando as principais contribuições.

2 Apresentação do Problema

Conforme discutido no Capítulo 1, as antenas *patch* tem sido objeto de estudo desde a sua introdução em meados do século XX devido a sua extensão aplicabilidade. Assim sendo, pode-se afirmar que existe uma literatura adequada sobre as antenas *patch*. Por outro lado, a natureza dinâmica dos meios de comunicações e o elevado custo dos materiais para se obter elevado desempenho com as antenas *patch*, tem fomentado pesquisas que tornem essas antenas dinâmicas. Nesse contexto, o presente capítulo faz uma apresentação das antenas *patch*, com o foco na geometria retangular, e, a seguir, discute o emprego de materiais líquidos para melhorar o desempenho das antenas *patch*.

O capítulo é organizado da seguinte maneira: a Seção 2.1 dedica-se a apresentação das antenas *patch* e a Seção 2.2 formula o problema investigado.

2.1 Antenas *patch*

As antenas *patch*, são bastante utilizadas por sua simplicidade, facilidade de uso com placas de circuitos impressos e materiais flexíveis, tais como polímeros e filmes condutores. Também destacam-se pelo baixo custo, fácil integração, leveza e capacidade de operação numa ampla faixa de frequências e, portanto, tornando-as versáteis para diversas aplicações [11].

As antenas *patch* começaram a serem desenvolvidas na década de 1950 e, desde então, há uma trajetória de inovações que resultaram num aumento significativo de desempenho. Inicialmente, os estudos contemplavam a concepção básica e nas propriedades fundamentais das antenas *patch*. O trabalho pioneiro de Deschamps [12] na década de 1950 introduziu a ideia de antenas *patch*. A seguir, [13] apresentou um estudo detalhado sobre suas propriedades de radiação e padrões de campo eletromagnético.

Durante as décadas de 1970 e 1980, houve um crescimento significativo no interesse pelas antenas *patch*, posto que o desenvolvimento de substratos de qualidade superior, melhorias em técnicas fotolitográficas e modelos teóricos permitiam analisar e implementar antenas menores [14]. As primeiras implementações das antenas *patch* surgiram em 1972 [15, 16, 17]. Já em 1976, [18] introduziu uma rede equivalente para elementos irradiantes de microfita retangulares, modelando-os como duas fendas separadas por uma linha de transmissão de baixa impedância característica. Também foi investigado a condutância de radiação e a susceptância equivalente e o uso para projetar uma matriz planar de polarização dupla [18]. Estudos posteriores, como o de Carver e Mink [19], consolidaram a teoria das antenas *patch* e introduziram técnicas práticas para melhorar a eficiência e a largura de banda das antenas, com destaque na relevância da constante dielétrica do substrato para a determinação das propriedades de ressonância e eficiência.

Nos últimos anos, a pesquisa em antenas *patch* tem se concentrado em novos pro-

jetos e técnicas de acoplamento, como antenas *dual-band* [2], e na integração de materiais inovadores, como líquidos condutores e dielétricos, para criar antenas dinâmicas [3]. Um destaque recente é o uso de líquidos metálicos, que têm sido explorados para adaptar dinamicamente a frequência de ressonância e a largura de banda [20]. Wang *et al.* [21] investigaram o uso de gálio e índio em canais microfluídicos, permitindo a reconfiguração em tempo real de propriedades como frequência de ressonância e polarização, e, portanto, aprimorando o desempenho da antena.

Outros estudos, como o de Huang *et al.* [4], investigaram a combinação de ligas metálicas líquidas com dielétricos líquidos em antenas *patch* para melhorar ganho e largura de banda. Essa combinação se mostrou eficaz para ajustes dinâmicos das propriedades da antena. Paracha *et al.* [5] revisaram o desenvolvimento e as aplicações das antenas de metal líquido, destacando a versatilidade dos materiais, como o gálio. Lu *et al.* [6] exploraram o desenvolvimento de antenas conformais multi-feixes utilizando metal líquido e apresentaram como esse material pode ser aplicado para criar antenas flexíveis que se adaptam a superfícies curvas e, conseqüentemente, oferecendo condutividade elevada e baixo custo.

Além dos metais líquidos, o uso de líquidos não metálicos, especialmente os baseados em água passaram a ser pesquisados. Sun *et al.* [7] investigaram o uso de água destilada como dielétrico em uma antena *patch* projetada para fornecer polarização circular, enquanto outros, como Xing *et al.* [8], exploraram a reconfiguração da frequência de ressonância em antenas utilizando água destilada. Essas pesquisas deixaram claro o controle eficiente das propriedades dielétricas para projetar antenas com características reconfiguráveis, flexíveis e de desempenho superior. Os autores de [22] discutiram o uso de água pura para ajustar algumas características de antenas, tais como frequência de ressonância e largura de banda.

Algumas pesquisas recentes compararam as características e o emprego de líquidos metálicos e não metálicos em antenas. Por exemplo, Motovilova *et al.* [9] e Huang *et al.* [10] discutiram os avanços das antenas dielétricas reconfiguráveis, dando atenção a capacidade de ajuste das propriedades dielétricas e as aplicações práticas dessas antenas. Esses trabalhos oferecem uma visão abrangente das inovações e perspectivas futuras na aplicação de materiais líquidos em antenas, sublinhando os ganhos e oportunidades para aumentar a eficiência energética e melhorar a transferência de potência.

2.1.1 Antena *patch* retangular

De acordo com a Figura 1, uma antena *patch* retangular consiste em uma estrutura planar com uma camada metálica contínua que atua como plano de terra, sobre a qual é depositado um substrato dielétrico, de altura h , com uma determinada constante dielétrica ϵ_r . Substratos de alturas maiores e de baixa constante dielétrica melhoram o

desempenho da antena, enquanto substratos de altura menores e de constante dielétrica elevada resultam em antenas compactas, porém menos eficientes e com menor largura de banda [1]. Por fim, em relação ao dielétrico, o elemento irradiador possui uma geometria retangular, sendo que W e L representam, respectivamente, sua largura e comprimento. Além disso, L_f e W_f correspondem, respectivamente, ao comprimento e à largura da linha de alimentação.

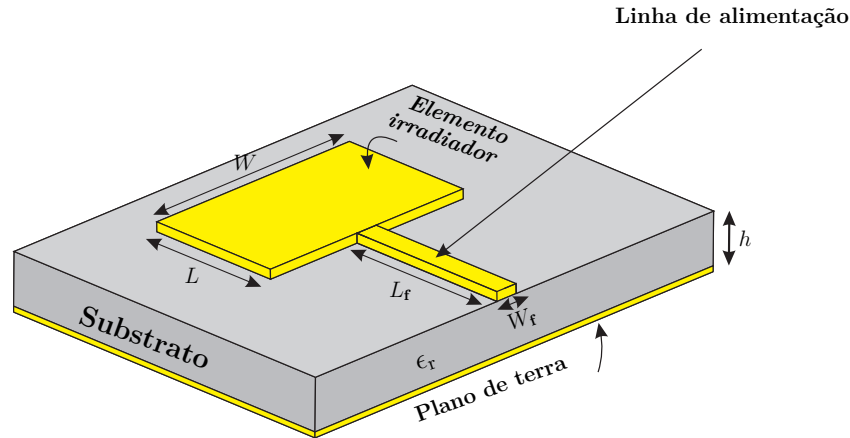


Figura 1 – Antena *patch* retangular.

De acordo com a literatura, a análise de antenas *patch* retangulares é baseada em modelos de linha de transmissão, cavidade e a análise em onda completa (que abrange principalmente equações integrais e método dos momentos). Além disso, o elemento irradiador pode assumir várias formas, sendo as quadrada, retangular, dipolo e circular as mais comuns devido as suas características de radiação, facilidade de análise e prototipagem [1, 23]. Além disso, o projeto dessas antenas utiliza o método de linha de alimentação [24, 25, 26, 27, 28], com destaque para a linha de microfita, que é a mais comum e facilita o casamento de impedância [29].

Conforme destacado por [1], o modelo de linha de alimentação por microfita é o mais utilizado para o projeto destas antenas. Note que na alimentação por linha de microfita na antena, uma fita condutora é conectada diretamente à borda do elemento irradiador. Embora esse modelo ofereça menor precisão, ele se destaca pela simplicidade de uso e pela possibilidade de realizar ajustes em parâmetros como a frequência de ressonância, largura de banda e impedância durante o projeto, que, inevitavelmente envolve *software* dedicado para projeto de antenas. O modelo considera o efeito de franjamento [1], o qual é decorrente das dimensões finitas da largura W e do comprimento L do elemento irradiador.

A Figura 2 ilustra as linhas de campo de um elemento irradiador retangular, evidenciando o efeito de franjamento. Observe que, nas bordas do elemento irradiador (*patch*), o campo elétrico se estende além das suas dimensões físicas interagindo com o ar, e consequentemente, alterando algumas características. Por exemplo, a frequência de ressonância

passa a ter um valor menor, uma vez que o efeito de franjamento faz com que o comprimento elétrico seja maior do que efetivamente é. Para lidar com a presença desse efeito, é necessário utilizar a constante dielétrica efetiva ϵ_{reff} [1], a qual pode ser calculada a partir da expressão [29]:

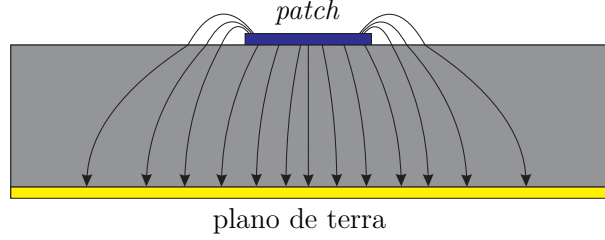


Figura 2 – Linhas de campo na antena *patch* retangular.

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right), W/h > 1. \quad (2.1)$$

em que h é a altura do substrato, W é a largura do elemento irradiador e ϵ_r é a constante dielétrica relativa do substrato. Note que a largura do elemento irradiador é obtida a partir de [29]

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}. \quad (2.2)$$

O efeito de franjamento faz com que as dimensões elétricas do elemento irradiador sejam maiores do que as dimensões físicas. Este efeito pode ser quantificado a partir de uma variação no comprimento do elemento irradiador (L), cuja expressão é dada por [29]:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)(\frac{W}{h} + 0.8)}, \quad (2.3)$$

De posse de ΔL , o comprimento do elemento irradiador é expresso por [30]

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L, \quad (2.4)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}, \quad (2.5)$$

em que f_0 é a frequência de ressonância desejada, c é a velocidade da luz no vácuo e L_{eff} é o comprimento efetivo.

Finalmente, para melhorar o casamento de impedância da antena, é possível realizar um corte de inserção no elemento irradiador, ajustando assim a posição do conector de radio frequência (do inglês, radio frequency) (RF) [31].

2.2 Formulação do problema

A eficiência energética das antenas *patch* é fundamental para aplicações de comunicações e colheita de energia, em vários sistemas de telecomunicações existentes, tais como Wi-Fi, GPS e telefonia celular. No entanto, aprimorar o desempenho das antenas *patch*, em termos de padrão de radiação, largura de banda e parâmetro de espalhamento $|S_{11}|$, é um desafio técnico contínuo e relevante [1]. Resultados recentes mostram que materiais com constante dielétrica elevada e baixa perda dielétrica, têm mostrado potencial para melhorar a eficiência de radiação, o ganho realizado da antena, a diretividade, o casamento de impedância, a redução da polarização cruzada e o aumento da seletividade da frequência, permitindo a operação em uma faixa específica de frequências, minimizando interferências de outras frequências indesejadas [23].

As características e dimensões do material utilizado no substrato exercem um papel relevante no desempenho das antenas *patch* retangulares. Atualmente, diferentes tipos de materiais são empregados nos substratos FR-4 e Rogers [32, 33] e os resultados obtidos são excelentes quando alguns materiais especiais e de custo elevado são utilizados. Um direcionamento interessante é investigar a deposição de materiais líquidos sobre as antenas *patch* retangulares, posto que isso pode alterar o padrão de radiação, a largura de banda e o casamento de impedância com o meio de comunicação das antenas *patch* retangulares. Além disso, se as características do material líquido forem dinamicamente controladas, então tem-se um cenário bastante interessante para reconfigurar antenas *patch* retangulares dinamicamente com o objetivo de obter o melhor desempenho em função da dinâmica do meio de comunicação. Conforme apontado em [34], há a necessidade de investigações que avaliem o impacto do tipo de materiais líquidos depositados sobre as antenas *patch* retangulares, em termos do padrão de radiação, da largura de banda e da magnitude do parâmetro de espalhamento S_{11} , ou seja, $|S_{11}|$. É importante ressaltar que a deposição de um material líquido sobre uma antena tem como objetivo gerar um ressonador dielétrico (do inglês, *dielectric resonator*)s (DRs)¹ líquido e, portanto, capaz de alterar as configurações da antena, mediante a alteração do material líquido e do formato do sólido geométrico que o contém.

Além das propriedades eletromagnéticas dos materiais líquidos, a influência da temperatura, o formato do sólido geométrico que os materiais líquidos assumem e a disposição desses sobre as antenas *patch* retangulares também precisam ser levados em consideração. Desconsiderando a temperatura, tem-se que as propriedades eletromagnéticas do material líquido, o formato do sólido geométrico que esses materiais líquidos assumem e a disposição desses sólidos geométricos sobre as antenas *patch* retangulares constituem

¹ O DR geralmente utiliza materiais com baixa perda e uma constante dielétrica elevada, garantindo que a maior parte dos campos eletromagnéticos seja confinada dentro do dielétrico [23].

um conjunto de variáveis que torna muito complexa a investigação, posto que cada uma dessas variáveis compreende um número elevado de condições a serem consideradas. Para cada escolha dessas variáveis, é necessário avaliar como se altera a distribuição do campo eletromagnético e o casamento de impedância na interface entre a antena e o substrato e, conseqüentemente, obter a frequência de ressonância, a largura de banda e o diagrama de irradiação que resultem no melhor desempenho.

Como a deposição de materiais líquidos sobre as antenas *patch* retangulares é um assunto ainda incipiente, faz-se necessário investigar como materiais líquidos com distintas características eletromagnéticas influenciam a distribuição do campo eletromagnético sobre as antenas *patch* retangulares e o casamento de impedância na interface entre a antena *patch* retangular e o substrato. Além disso, existem lacunas em relação a influência dos diferentes formatos dos sólidos geométricos que os materiais líquidos assumem, no desempenho das antenas *patch* retangulares.

Do ponto de vista teórico, a modelagem matemática é a mais adequada para tratar desse problema. Entretanto, a dedução de um modelo matemático para capturar todas as nuances e complexidade para a análise da influência da deposição de materiais líquidos sobre antenas *patch* retangulares não é de fácil obtenção. Por outro lado, o emprego de *software* de simulações e projeto de antenas, tal como o *software Computer Simulation Technology* (CST) *Microwave Studio Suite* TM, permite contornar a dificuldade relacionada à dedução de um modelo matemático ao permitir a realização de diversas simulações numéricas, a partir de modelos pré-existentes nos *softwares* de projeto e simulação de antenas.

Nesse contexto, a seguinte questão de investigação surge: *Qual é a melhoria do desempenho quando alguns tipos de líquidos, comumente encontrados, assumem o formato de alguns sólidos geométricos e são depositados sobre as antenas patch retangulares? Noutras palavras, qual é o impacto do uso de ressonadores líquidos em antenas patch retangulares?* Para responder essa questão de investigação, o Capítulo 3 apresenta alguns sólidos geométricos e tipos de materiais líquidos que podem ser utilizados pelos ressonadores líquidos.

3 Materiais líquidos para antenas *patch* retangulares

De acordo com a literatura, o tipo de substrato utilizado nas antenas *patch* retangulares (*p.ex.*, substratos FR-4, Rogers RO4725JXR e Rogers RT/duroid 6010LM) impacta consideravelmente o desempenho delas. Por exemplo, a concordância dos projetos e protótipos de uma antena *patch* somente é possível quando a qualidade do substrato é elevada, ou seja, quando por exemplo, os substratos Rogers RO4725JXR e Rogers RT/duroid 6010LM são utilizados; entretanto, o custo desses substratos é bastante elevado. Conforme comentado no Capítulo 2, a deposição de materiais líquidos sobre as antenas *patch* retangulares pode resultar em melhorias no desempenho, viabilizando por exemplo, o uso do substrato FR-4. Para verificar, através de simulações numéricas, que tipo de melhorias podem ser esperadas, o presente capítulo detalha alguns materiais líquidos e formatos de sólidos geométricos que esses materiais assumem ao serem depositados sobre as antenas *patch* retangulares.

Este capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 3.1 apresenta resumidamente os materiais líquidos utilizados na simulações numéricas e a Seção 3.2 descreve as formas dos sólidos geométricos que os materiais líquidos assumem quando depositados sobre as antenas *patch* retangulares.

3.1 Tipo de materiais líquidos

Os materiais líquidos são fundamentais para antenas líquidas, e suas propriedades como constante dielétrica, condutividade e permeabilidade influenciam o *design* e o desempenho das antenas [8]. Existem vários tipos de materiais líquidos e cada um deles influencia de maneira diferente o projeto e o desempenho das antenas *patch* retangulares. Dentre os vários materiais líquidos disponíveis, foram escolhidos alguns que já estão sendo utilizados para o projeto de antenas líquidas. Uma breve descrição de cada líquido analisado é apresentada abaixo:

- **Água destilada:** A água destilada é produzida através da destilação, um processo que transforma a água em vapor e depois a condensa, removendo impurezas. A água destilada é ideal para experimentos laboratoriais, esterilização de equipamentos médicos e produtos cosméticos devido à sua alta pureza [35]. Com baixa condutividade elétrica e constante dielétrica elevada, a água destilada melhora a eficiência de radiação e reduz o tamanho das antenas. É preferida em antenas ajustáveis, com polarização reconfigurável e híbridas, e é adequada para antenas vestíveis, células solares e aplicações de Internet das Coisas [10].
- **Água deionizada:** A deionização da água utiliza um processo de troca iônica para remover sólidos, passando a água por leitos de resina carregados opostamente, re-

sultando em água altamente purificada composta principalmente por hidrogênio e oxigênio [35]. Este tipo de água é ideal para aplicações que exigem extrema pureza, como na indústria automotiva, farmacêutica, bioquímica e em sistemas de resfriamento por imersão. A água deionizada, por não conter íons carregados, é resistente à eletricidade e é preferida em processos que envolvem temperaturas elevadas devido à sua baixa condutividade elétrica, que ajuda a controlar a temperatura durante os processos de fabricação.

- **Água salgada:** A água salgada é amplamente utilizada em pesquisas de antenas líquidas devido à sua disponibilidade e relevância em contextos marítimos. Embora seu uso tenha melhorado o desempenho em termos de largura de banda, reconfigurabilidade e eficiência de radiação, antenas líquidas que fazem uso da água salgada frequentemente enfrentam desafios relacionados à eficiência reduzida, devido à alta condutividade do líquido [10]. Por outro lado, o uso da água salgada oferece algumas vantagens, como reconfiguração em frequência e ajuste dos padrões de radiação [10].
- **Glicerina:** A glicerina é um composto relativamente simples e caracterizado por ser um líquido viscoso, incolor e inodoro, amplamente utilizado na farmácia [36]. Devido à presença de três grupos hidroxilas, a glicerina é solúvel em água, possuindo uma natureza higroscópica, tornando-a um modelo polar ideal para estudos tribológicos. As propriedades físicas e químicas do glicerol estão detalhadas em [36].

3.2 Formatos dos sólidos geométricos

O formato do sólido geométrico que o material líquido assume também impacta o desempenho das antenas *patch* retangulares [37]. Para considerar este aspecto nas análises, os formatos de sólidos geométricos ilustrados na Figura 3 foram utilizados nas simulações numéricas. A seguir, é apresentada uma breve descrição destes sólidos geométricos:

- **Paralelepípedo retangular (par-ret):** suporta predominantemente o modo ressonante transversal elétrico (TE), que determina a distribuição dos campos elétrico e magnético, sendo o campo elétrico transversal e o campo magnético perpendicular à propagação. A variação das dimensões do paralelepípedo retangular permite ajustar a distribuição dos campos elétricos e magnéticos, alterando a largura de banda e a frequência de ressonância [38, 37]. O volume do paralelepípedo retangular utilizado nas simulações é dado por [39]:

$$V = L_p W_p h_p \quad (3.1)$$

em que L_p , W_p e h_p são respectivamente o comprimento, a largura e a altura do paralelepípedo retangular.

- **Calota esférica (cal-esf):** opera em diferentes modos ressonantes, incluindo os modos TE e transversal magnético (TM). Dependendo do modo ressonante em operação, o padrão de radiação pode variar de um padrão amplo e suave para um padrão mais diretivo [40, 41]. A calota esférica e a calota esférica côncava foram cortadas ao longo de um plano que passa pelo centro da esfera, de modo que a altura da calota corresponde ao raio da esfera. Dessa forma, a calota resulta em uma hemisfera (ou semiesfera). O volume da calota esférica utilizada nas simulações é dado por [42]:

$$V = \frac{2}{3}\pi r_e^3 \quad (3.2)$$

em que r_e é o raio da calota esférica.

- **Calota esférica côncava (cal-esf-con):** melhora o casamento de impedância e aumenta as perdas de radiação. Também suporta modos ressonantes TE e TM, com a geometria ajustada para proporcionar um acoplamento de corrente eficiente e alterações na largura de banda da antena *patch* [43]. O volume da calota esférica côncava utilizada nas simulações é dado por [42]:

$$V = \frac{2}{3}\pi r_{ec}^3 \quad (3.3)$$

em que r_{ec} é o raio da calota esférica côncava.

- **Calota cilíndrica (cal-cil):** pode excitar modos ressonantes TE e TM. Esse formato proporciona padrões de radiação variados ao longo do cilindro, permitindo um ajuste preciso na distribuição dos campos eletromagnéticos para atender a diferentes requisitos [44, 45, 46]. A calota cilíndrica e a calota cilíndrica côncava foram cortadas ao longo de um plano que passa pelo centro do cilindro. Dessa forma, a calota resulta em um semicilindro. O volume da calota cilíndrica utilizada nas simulações é dado por [47]:

$$V = \frac{1}{2}\pi r_c^2 h_c \quad (3.4)$$

em que r_c e h_c são respectivamente o raio e a altura da calota cilíndrica.

- **Calota cilíndrica côncava (cal-cil-con):** também opera em modos ressonantes TE e TM. A concavidade influencia a distribuição dos campos eletromagnéticos, proporcionando um controle aprimorado sobre o padrão de radiação e a eficiência do ressonador. O volume da calota cilíndrica côncava utilizada nas simulações é dado por [47]:

$$V = \frac{1}{2}\pi r_{cc}^2 h_{cc} \quad (3.5)$$

em que r_{cc} e h_{cc} são respectivamente o raio e a altura da calota cilíndrica côncava.

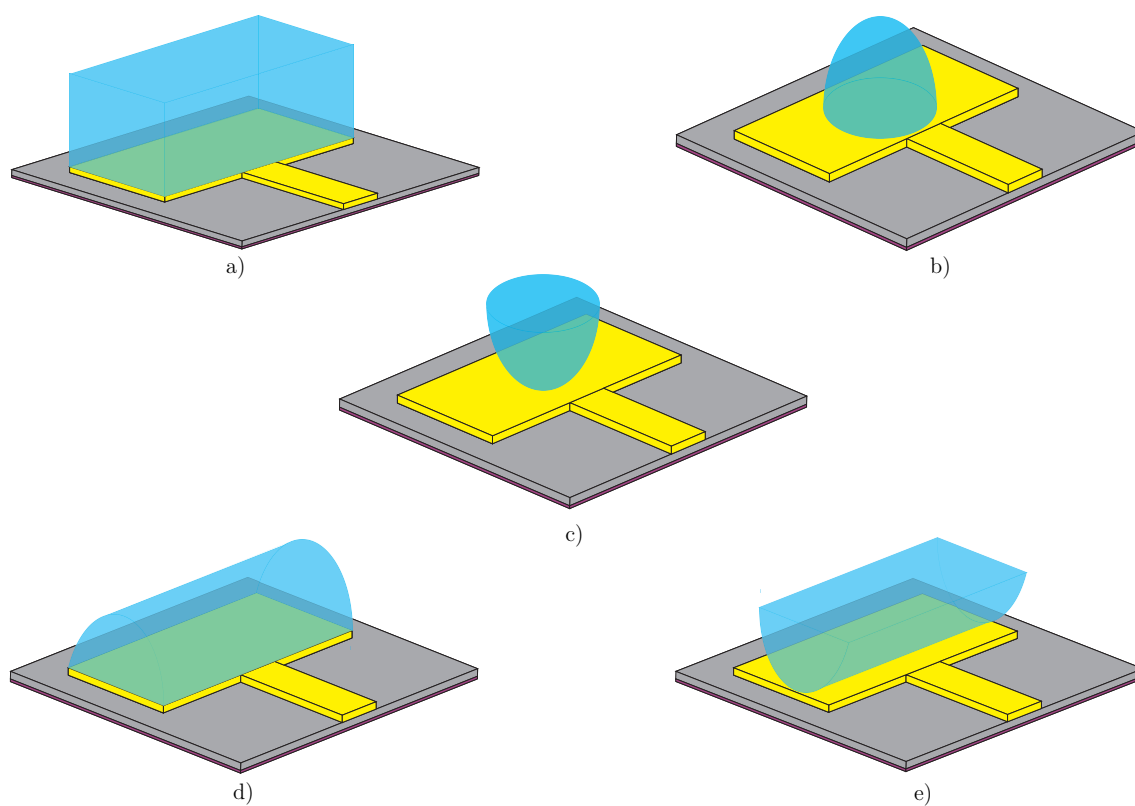


Figura 3 – Ilustração do formato dos sólidos geométricos empregados pelos RLs: a) paralelepípedo retangular, b) calota esférica, c) calota esférica côncava, d) calota cilíndrica e e) calota cilíndrica côncava.

4 Resultados numéricos

Este capítulo se dedica à apresentação e análise dos resultados obtidos através das simulações numéricas. As simulações numéricas focam nas antenas *patch* retangulares com substratos FR-4, Rogers RO4725JXR e Rogers RT/duroid 6010LM. Além disso, contemplam o emprego de ressonadores líquidos com os tipos de líquidos e formatos sólidos descritos no Capítulo 3.

Este capítulo é organizado da seguinte forma: a Seção 4.1 descreve a metodologia utilizada nas simulações numéricas; enquanto as Seções 4.2-4.5 analisam os resultados numéricos obtidos com os materiais líquidos listados no Capítulo 3.

4.1 Metodologia das Simulações

Para realização das simulações numéricas, foi empregado o *software* CST *Microwave Studio Suite* TM. As simulações numéricas baseiam-se nas variações das dimensões dos sólidos geométricos que o ressonador líquido pode assumir, os quais foram centralizados sobre o elemento irradiador da antena *patch* retangular. O *solver* utilizado é o do domínio do tempo, que oferece duas opções: o *solver* transiente e o *solver* matriz de linha de transmissão (do inglês, *transmission line matrix*) (TLM), ambos baseados em malhas hexaédricas e altamente eficientes para projetos de componentes em RF, como conectores, linhas de transmissão, filtros e antenas. Esses *solvers* permitem a análise do comportamento de frequência de banda larga em uma única execução. Contudo, nas simulações, foi utilizado o *solver* transiente devido à sua fundamentação técnica de integração finita (do inglês, *finite integration technique*) (FIT), que, em combinação com a aproximação de fronteira perfeita (do inglês, *perfect boundary approximation*) (PBA) e a técnica de folha fina (do inglês, *thin sheet technique*) (TST), proporciona uma precisão significativamente superior. As simulações numéricas foram realizadas em dois estágios: primeiro, o *software* CST foi utilizado para obter a antena *patch* retangular com frequência de ressonância igual a $f_r = 2,45$ GHz; em seguida, o *software* CST foi utilizado para projetar o ressonador líquido, levando em consideração os melhores resultados obtidos com a variação dos raios e alturas dos sólidos geométricos, de 1 mm a 20 mm. No paralelepípedo retangular, apenas a altura foi variada, enquanto o comprimento e a largura foram mantidos constantes. Nas calotas esféricas e esféricas côncavas, os raios foram variados. Já nas calotas cilíndricas e cilíndricas côncavas, apenas os raios foram variados, com as alturas constantes. Em todas as simulações numéricas, a frequência de ressonância da antena é $f_r = 2,45$ GHz. Os parâmetros de análise de desempenho adotados são: padrão de radiação, largura de banda (B_w) quando a magnitude do parâmetro de espalhamento S_{11} é abaixo de -13 dB, o qual é utilizado pela indústria, e a magnitude do parâmetro de espalhamento S_{11} na faixa de frequência compreendida entre $f_{\min} = 2,2$ GHz e $f_{\max} = 2,7$ GHz. Além dos

resultados obtidos com as diferentes configurações de ressonadores líquidos, também é apresentado o resultado quando a antena *patch* retangular não faz uso de um ressonador líquido (RL); os resultados obtidos nessa condição serão chamados de “sem RL”.

Note que $|S_{11}|$ indica a quantidade de potência refletida pela antena. Portanto, $|S_{11}| = 0$ dB informa total reflexão, enquanto um $|S_{11}| \leq -10$ dB significa que menos de 10% da potência incidente é refletida [23]. Nas simulações numéricas, adotou-se um critério mais rigoroso, com $|S_{11}| \leq -13$ dB, limitando a reflexão a cerca de 5% e assegurando um melhor acoplamento da antena ao sistema de alimentação, o que resulta em uma faixa de frequências menor, mas em conformidade com a indústria. O ganho realizado da antena, que avalia sua eficiência e características direcionais [1], compara a intensidade da radiação na direção desejada com a intensidade que seria obtida caso toda a potência recebida pela antena fosse irradiada isotropicamente, ou seja, uniformemente em todas as direções. Finalmente, a largura de banda B_ω é a faixa de frequências na qual a antena mantém um desempenho aceitável em termos de impedância e padrão de radiação [1].

Na Tabela 1, são apresentadas as características eletromagnéticas dos substratos utilizados nas antenas *patch* retangulares. Na Tabela 2 são apresentadas as características eletromagnéticas dos materiais líquidos utilizados, a saber: água destilada, água deionizada, água salgada e glicerina. Os resultados numéricos mostrados nas seções referem-se apenas aos melhores desempenhos obtidos com os diferentes formatos de sólidos geométricos.

Tabela 1 – Características eletromagnéticas dos substratos.

substrato	constante dielétrica	tangente de perda	altura (mm)
FR-4	4,44	0,013	1,24
Rogers RO4725JXR	2,56	0,0022	1,54
Rogers RT/duroid 6010LM	10,7	0,0023	0,64

Tabela 2 – Características eletromagnéticas dos materiais líquidos.

materiais líquidos	constante dielétrica	condutividade elétrica (S/m)
Água destilada	78,4	$5,55 \times 10^{-6}$
Água deionizada	80	$5,5 \times 10^{-6}$
Água salgada	74	3,53
Glicerina	50	—

4.2 Água destilada

Na Figura 4, são ilustrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular utilizando o substrato FR-4, quando a água destilada é utilizada nos formatos de sólidos

geométricos escolhidos. Nessa figura, a antena *patch* retangular sem RL apresenta $|S_{11}| = -32,5$ dB na frequência de ressonância de 2,45 GHz. Note que $B_\omega = 53,47$ MHz, sendo que as frequências mínima e máxima são iguais a $f_{\min} = 2,43$ GHz e $f_{\max} = 2,48$ GHz, respectivamente. A adição de água destilada em diferentes formatos de sólidos geométricos sobre a antena *patch* retangular resultou em alterações no valores de f_r , $|S_{11}|$ e B_ω . O paralelepípedo retangular com comprimento de 28,08 mm, largura de 55,71 mm e altura de 19 mm, resultou em $|S_{11}| = -30,4$ dB em $f_r = 2,41$ GHz e $B_\omega = 37,85$ MHz. A calota esférica, com raio de 15 mm, resultou em $f_r = 2,43$ GHz com $|S_{11}| = -17,7$ dB e $B_\omega = 22,20$ MHz. A calota esférica côncava, com raio de 20 mm, resultou $f_r = 2,44$ GHz com $|S_{11}| = -18,4$ dB e $B_\omega = 30,49$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 55,71 mm e raio de 14 mm, resultou em $f_r = 2,50$ GHz com $|S_{11}| = -34,2$ dB e $B_\omega = 101,12$ MHz. Finalmente, a calota cilíndrica côncava, com altura de 55,71 mm e raio de 19 mm, resultou em $f_r = 2,38$ GHz com $|S_{11}| = -29$ dB e $B_\omega = 13,59$ MHz. Note que, dependendo do formato do sólido geométrico, o emprego do ressonador líquido pode resultar no aumento ou na redução dos valores de f_r , $|S_{11}|$ e B_ω .

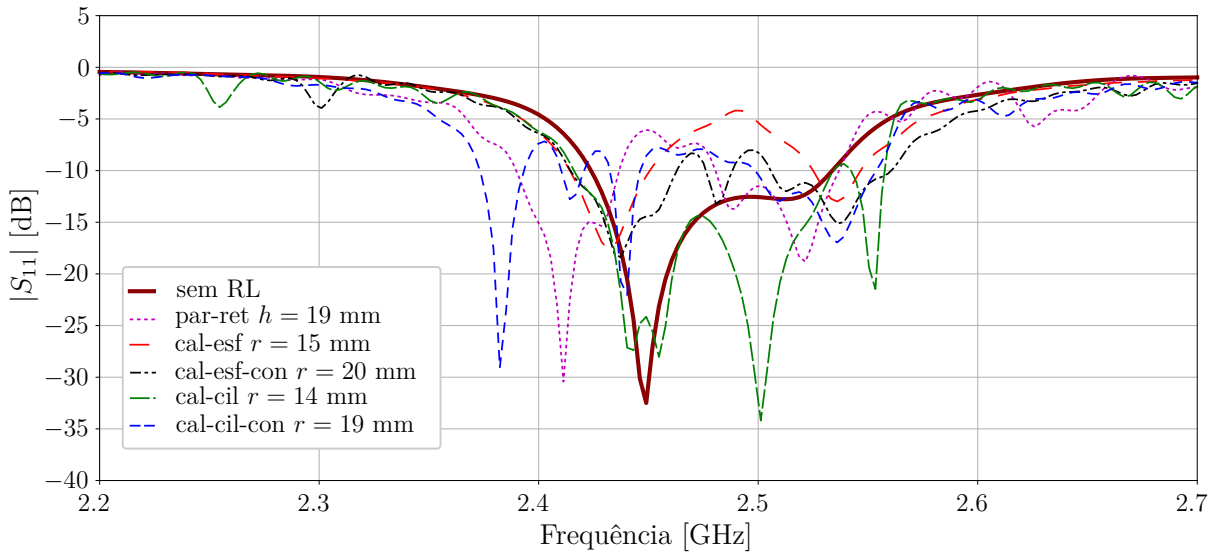


Figura 4 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na água destilada e sólidos geométricos escolhidos.

Comparativamente, a calota cilíndrica obteve a maior frequência de ressonância ($f_r = 2,50$ GHz) e o melhor valor de $|S_{11}|$, ou seja, $-34,2$ dB, além da maior B_ω (101,12 MHz). Em contraste, a calota cilíndrica côncava apresentou a menor frequência de ressonância de 2,38 GHz, com $|S_{11}| = -29$ dB e a menor B_ω (13,59 MHz). Portanto, se a prioridade é maximizar a largura de banda, a calota cilíndrica se apresentou como o ressonador líquido mais vantajoso, apesar de sua frequência de ressonância ser maior. A calota cilíndrica também oferece o melhor desempenho em termos de $|S_{11}|$.

Na Figura 5, são mostradas as magnitudes dos parâmetros S_{11} obtidos para o projeto da antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR, quando não faz uso do RL e quando faz uso do RL baseado na água destilada. A antena *patch* retangular

replacements

sem RL apresentou um $|S_{11}| = -40,7$ dB em $f_r = 2,45$ GHz e $B_w = 20,52$ MHz. O paralelepípedo retangular, com comprimento de 65,71 mm, largura de 76,27 mm e altura de 1 mm, resultou em $f_r = 2,44$ GHz com $|S_{11}| = -37,2$ dB e $B_w = 20,73$ MHz. A calota esférica, com raio de 19 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -18,8$ dB e menor B_w (19,64 MHz). A calota esférica côncava, com raio de 14 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -19,5$ dB e $B_w = 20,48$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 76,27 mm e raio de 5 mm, gerou $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -18,4$ dB e maior B_w (25,22 MHz). A calota cilíndrica côncava, com altura de 76,27 mm e raio de 4 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -24,4$ dB e $B_w = 20,71$ MHz.

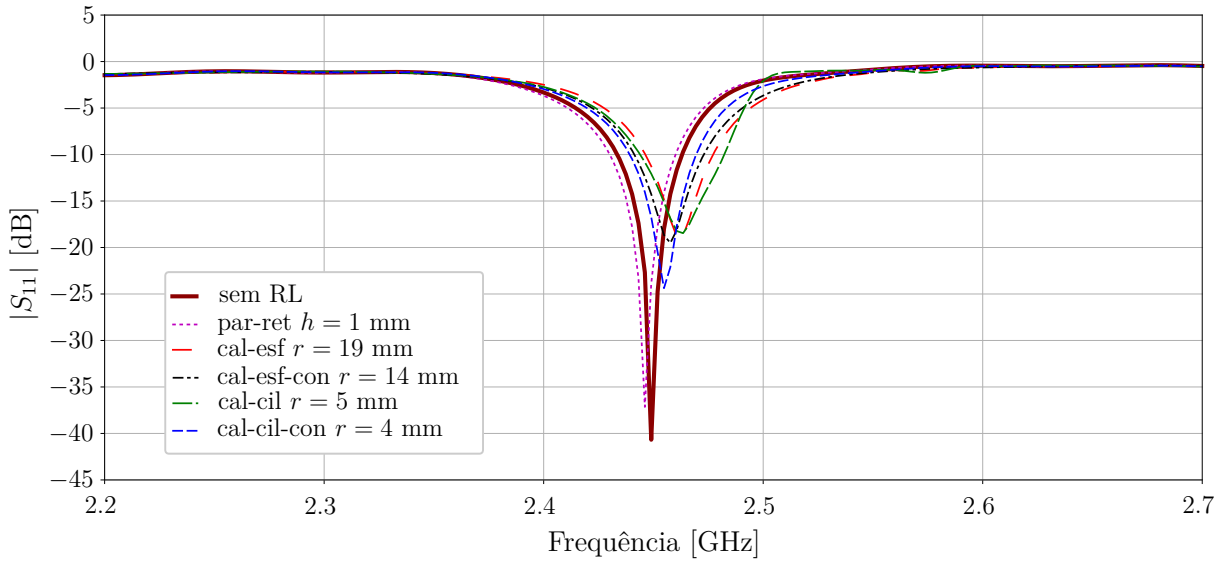


Figura 5 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na água destilada e sólidos geométricos escolhidos.

Entre os diferentes formatos de sólidos geométricos que a água destilada assumiu sobre a antena *patch* retangular, a calota cilíndrica, com raio de 5 mm, destacou-se por proporcionar a maior $B_w = 25,22$ MHz e $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -18,4$ dB, sendo ideal para aplicações que exigem uma antena *patch* retangular de banda larga.

Na Figura 6, são mostrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular utilizando o substrato Rogers RT/duroid 6010LM, quando a água destilada é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. Note que a antena *patch* retangular sem RL apresenta um $|S_{11}| = -36$ dB na frequência de ressonância de 2,45 GHz e $B_w = 22$ MHz. A deposição de água destilada no formato de um paralelepípedo retangular com comprimento de 18,12 mm, largura de 36,96 mm e altura de 1 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -37,8$ dB e $B_w = 22,18$ MHz. A calota esférica, com raio de 6 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -19,4$ dB e $B_w = 17,90$ MHz. A calota esférica côncava, com raio de 9 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -23,3$ dB e $B_w = 21,7$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 36,96 mm e raio de 1 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -32,6$ dB e $B_w = 23,12$ MHz. Finalmente, a calota cilíndrica côncava, com altura de 36,96 mm e raio de 7 mm alcançou o melhor desempenho, com

$f_r = 2,46$ GHz, $|S_{11}| = -40,2$ dB e maior B_ω (25,61 MHz). Comparativamente, essa configuração destacou-se por proporcionar o melhor casamento de impedância e a maior B_ω , superando a antena *patch* retangular sem RL.

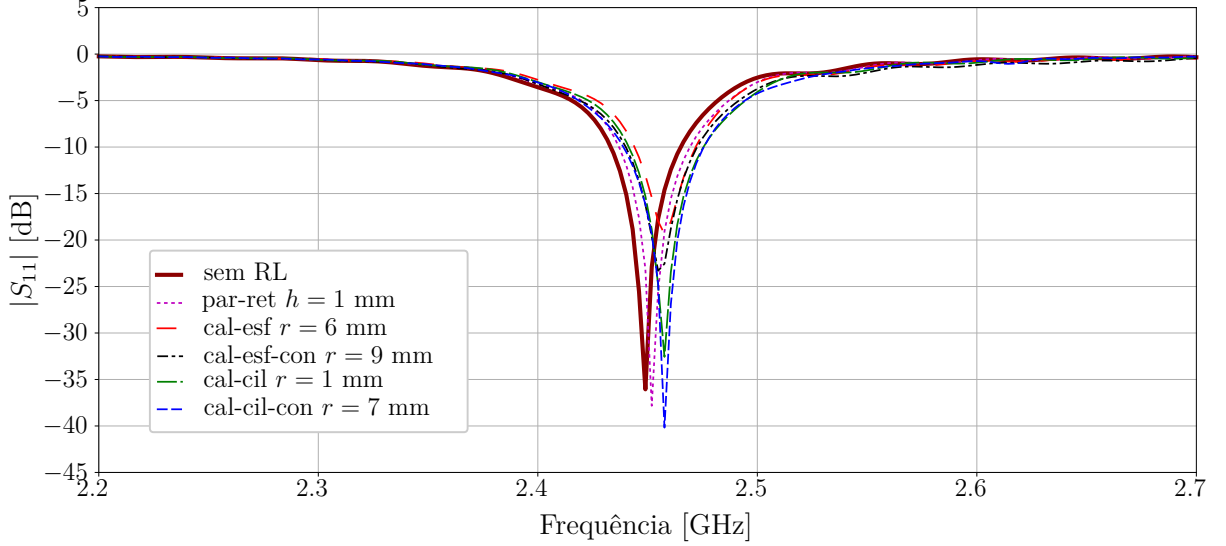


Figura 6 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na água destilada e sólidos geométricos escolhidos.

4.3 Água deionizada

Na Figura 7 são ilustrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular utilizando o substrato FR-4, quando a água deionizada é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. A antena *patch* retangular sem RL apresentou um $|S_{11}| = -32,5$ dB em $f_r = 2,45$ GHz, com $B_\omega = 53,47$ MHz. O paralelepípedo retangular, com comprimento de 28,08 mm, largura de 55,71 mm e altura de 16 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -31,6$ dB e $B_\omega = 32,52$ MHz. A calota esférica, com raio de 12 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -32,2$ dB e $B_\omega = 42,56$ MHz. A calota esférica côncava, com raio de 19 mm, resultou em $f_r = 2,44$ GHz com $|S_{11}| = -22,3$ dB e $B_\omega = 30,34$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 55,71 mm e raio de 14 mm, resultou em $f_r = 2,50$ GHz com $|S_{11}| = -33,4$ dB e maior B_ω (103,81 MHz). Em contrapartida, a calota cilíndrica côncava com altura de 55,71 mm e raio igual a 19 mm, apresentou a menor B_ω (11,79 MHz) e $|S_{11}| = -26,5$ dB em $f_r = 2,42$ GHz.

Na Figura 8, são mostrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular utilizando o substrato Rogers RO4725JXR, quando a água deionizada é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. A antena *patch* retangular sem RL apresentou um $|S_{11}| = -40,7$ dB em $f_r = 2,45$ GHz, com $B_\omega = 20,52$ MHz. A deposição de água deionizada no formato de um paralelepípedo retangular, com comprimento de 65,71 mm, largura de 76,27 mm e altura de 1 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -37,4$ dB e $B_\omega = 20,72$ MHz. A calota esférica, com raio de 18 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz

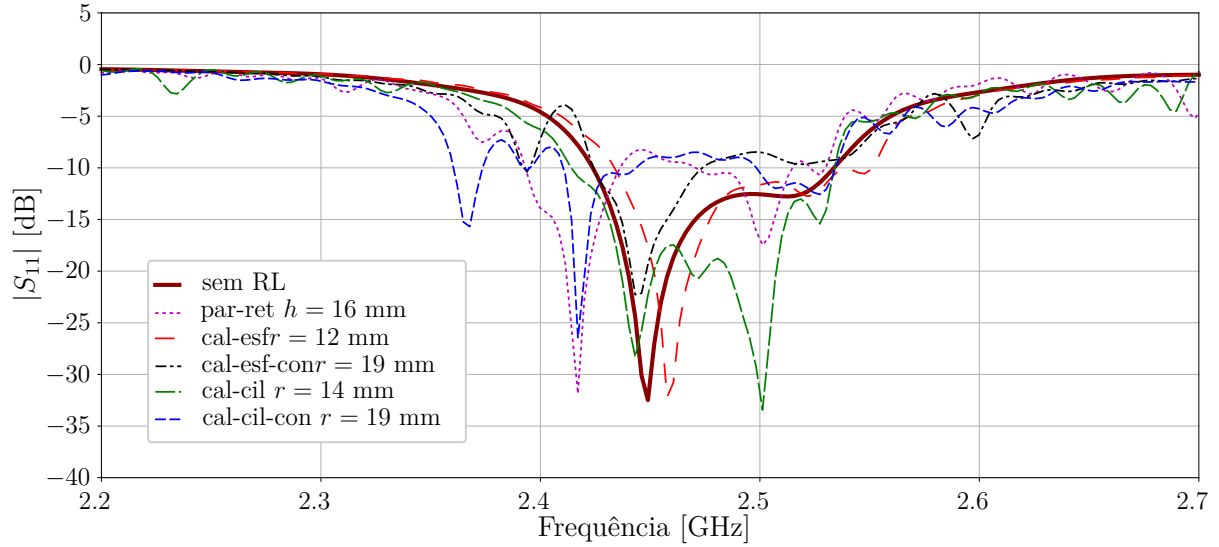


Figura 7 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na água deionizada e sólidos geométricos escolhidos.

com $|S_{11}| = -19,3$ dB e $B_\omega = 19,93$ MHz. A calota esférica côncava, com raio de 20 mm, resultou em $f_r = 2,44$ GHz com $|S_{11}| = -31,9$ dB e $B_\omega = 19,27$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 76,27 mm e raio de 5 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -15,2$ dB e $B_\omega = 9,26$ MHz. Por fim, a calota cilíndrica côncava, com altura de 76,27 mm e raio de 5 mm, resultou em $f_r = 2,44$ GHz com $|S_{11}| = -14,9$ dB e a menor largura de banda ($B_\omega = 5,98$ MHz). Comparativamente, o paralelepípedo retangular baseado na água deionizada mostrou-se a mais eficiente, oferecendo uma leve melhora na largura de banda ($B_\omega = 20,72$ MHz) e mantendo valores de f_r e $|S_{11}|$ semelhantes à antena *patch* retangular sem RL.

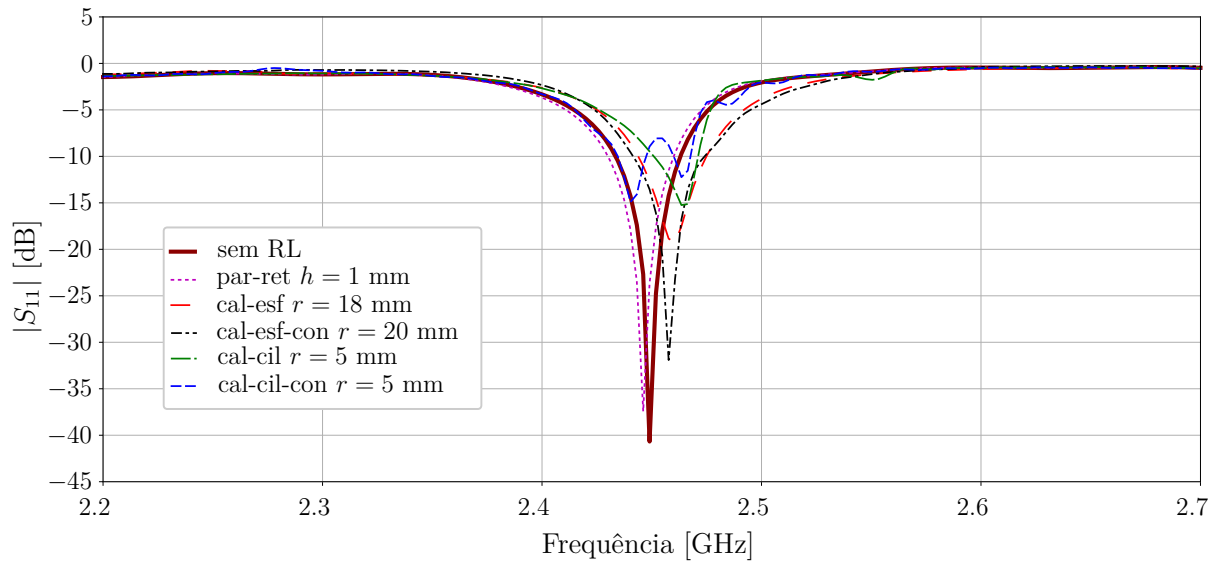


Figura 8 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na água deionizada e sólidos geométricos escolhidos.

Na Figura 9, são ilustrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM, quando a água deionizada é utilizada nos

formatos de sólidos geométricos escolhido. A antena *patch* retangular sem RL exibe um $|S_{11}| = -36$ dB em $f_r = 2,45$ GHz e $B_\omega = 22$ MHz. O paralelepípedo retangular com comprimento de 18,12 mm, largura de 36,96 mm e altura de 18 mm, resultou em $f_r = 2,52$ GHz com $|S_{11}| = -29,1$ dB e $B_\omega = 17,95$ MHz. Na calota esférica com raio de 6 mm, a frequência de ressonância foi de $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -18,7$ dB e $B_\omega = 17,32$ MHz. A calota esférica côncava com raio de 9 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz, com $|S_{11}| = -22,4$ dB e $B_\omega = 21,49$ MHz. Para a calota cilíndrica, com altura de 36,96 mm e raio de 1 mm, a frequência de ressonância deslocou-se para $f_r = 2,46$ GHz, com $|S_{11}| = -31,596$ dB e $B_\omega = 23,13$ MHz. A calota cilíndrica côncava, com altura de 36,96 mm e raio de 7 mm, obteve os resultados mais consideráveis, apresentando $|S_{11}| = -41$ dB em $f_r = 2,46$ GHz e $B_\omega = 25,54$ MHz, tornando-se a mais eficiente das configurações simuladas.

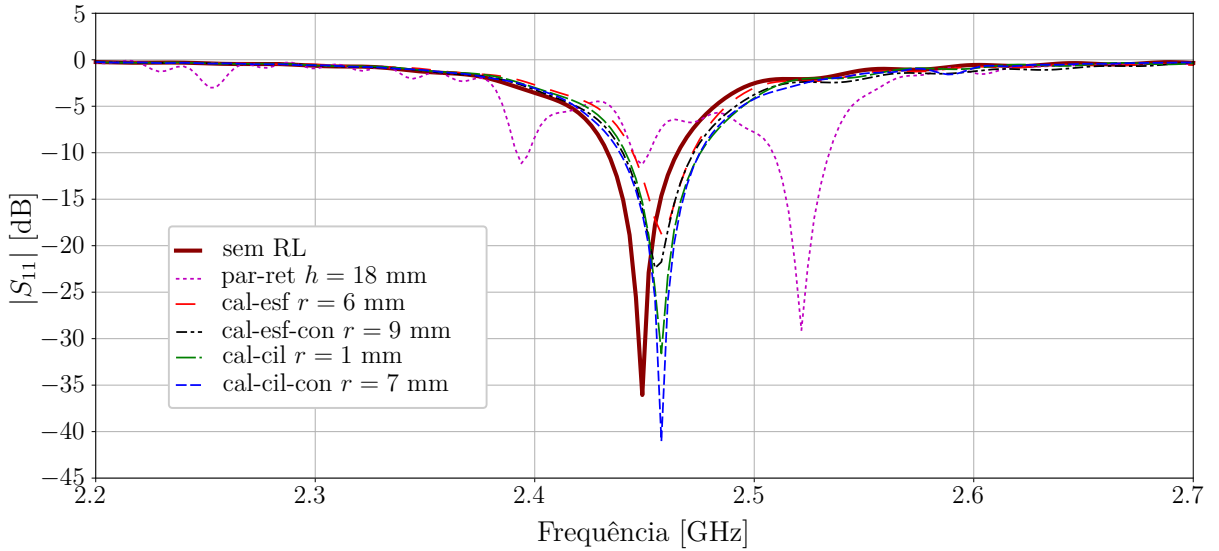


Figura 9 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na água deionizada e sólidos geométricos escolhidos.

4.4 Água salgada

Na Figura 10, são mostrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular utilizando o substrato FR-4, quando a água salgada é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhido. A antena *patch* retangular sem RL apresentou um $|S_{11}| = -32,5$ dB em $f_r = 2,45$ GHz com $B_\omega = 53,47$ MHz. A adição de água salgada no formato de um paralelepípedo retangular com comprimento de 28,08 mm, largura de 55,71 mm e altura de 1 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -27,3$ dB e $B_\omega = 50,04$ MHz. A calota esférica com raio de 1 mm, levou a frequência para $f_r = 2,46$ GHz e ampliou a $B_\omega = 80,90$ MHz, com $|S_{11}| = -26,2$ dB. Na calota esférica côncava com raio de 20 mm, a frequência de ressonância foi de $f_r = 2,44$ GHz com $|S_{11}| = -14,1$ dB e $B_\omega = 26,25$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 55,71 mm e raio de 1 mm, apresentou um $|S_{11}| = -38,8$ dB em $f_r = 2,46$ GHz e $B_\omega = 90,84$ MHz. Na calota cilíndrica

côncava com altura de 55,71 mm e raio de 1 mm, a frequência de ressonância foi de $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -38,8$ dB e $B_\omega = 90,18$ MHz. Em comparação com a antena *patch* retangular sem RL, a água salgada mostrou uma ampla variação de resultados, com os desempenhos relevantes provenientes da calota cilíndrica e da calota cilíndrica côncava. No entanto, o ganho realizado da antena com água salgada foi inferior ao da antena *patch* retangular sem RL em todos os formatos de sólidos geométricos, devido à alta condutividade da água salgada, que gera maiores perdas por absorção.

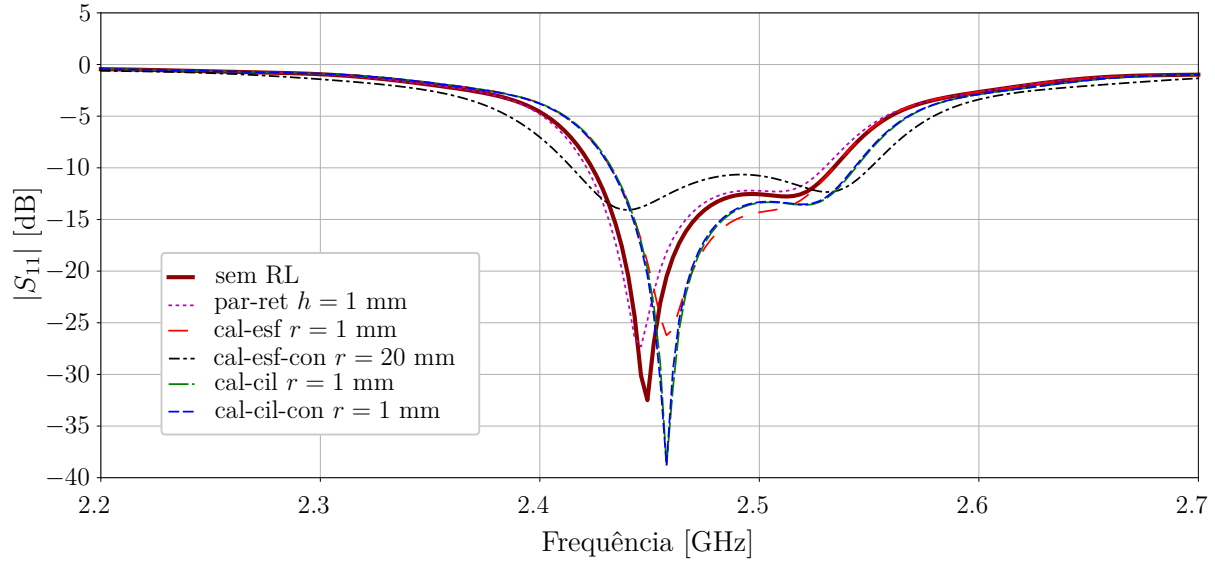


Figura 10 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na água salgada e sólidos geométricos escolhidos.

Na Figura 11, são mostrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular com o substrato Rogers RO4725JXR, quando a água salgada é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. A antena *patch* retangular sem RL apresenta um $|S_{11}| = -40,7$ dB em $f_r = 2,45$ GHz, com $B_\omega = 20,52$ MHz. A adição de água salgada no formato de um paralelepípedo retangular, com comprimento de 65,71 mm, largura de 76,27 mm e altura de 1 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -33,5$ dB e $B_\omega = 20,98$ MHz. A calota esférica com raio de 14 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -22,1$ dB e $B_\omega = 20,81$ MHz. A calota esférica côncava com raio de 9 mm, apresentou a maior $B_\omega = 21,18$ MHz, com $|S_{11}| = -26$ dB em $f_r = 2,45$ GHz. Já a calota cilíndrica e a calota cilíndrica côncava, ambas com altura de 76,27 mm e raio de 1 mm, resultaram em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -27,9$ dB e -27 dB, respectivamente, e B_ω reduzida para 19,90 MHz. Comparando com a antena *patch* retangular sem RL, a água salgada proporcionou alterações significativas no desempenho, especialmente na calota esférica côncava, que apresentou a maior B_ω . Embora a água salgada possa aumentar o ganho realizado da antena em algumas condições, sua alta condutividade leva a perdas maiores e ganhos realizados menores em relação aos outros materiais.

Na Figura 12, são ilustrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular com

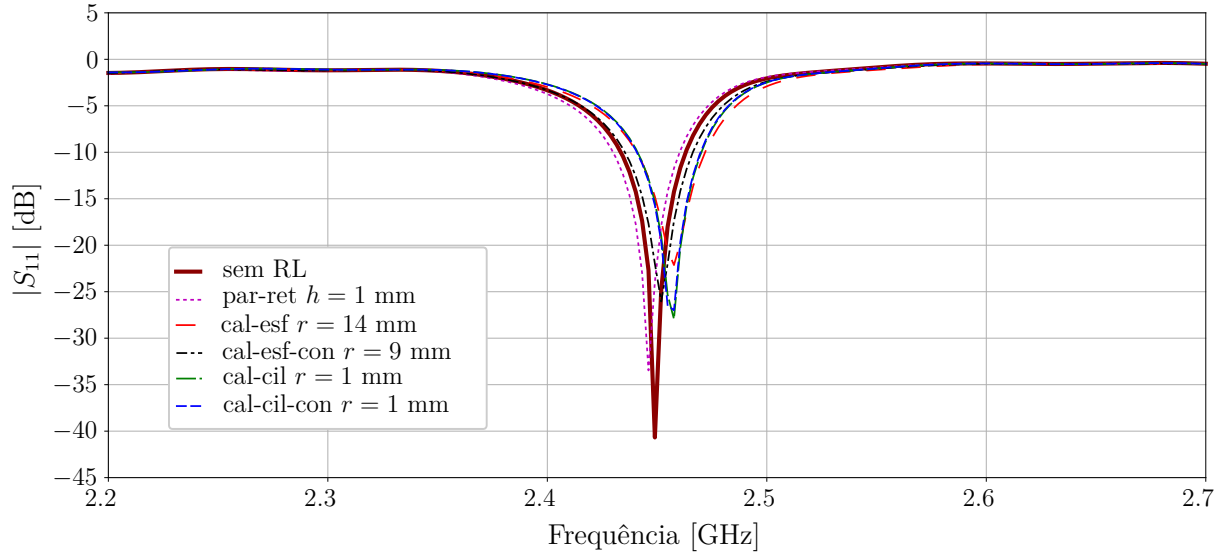


Figura 11 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na água salgada e sólidos geométricos escolhidos.

o substrato Rogers RT/duroid 6010LM, quando a água salgada é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. A antena *patch* retangular sem RL apresentou um $|S_{11}| = -36$ dB em $f_r = 2,45$ GHz com $B_\omega = 22$ MHz. A adição de água salgada no formato de um paralelepípedo retangular, com comprimento de 18,12 mm, largura de 36,96 mm e altura de 1 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz, melhorando o $|S_{11}|$ para $-41,7$ dB, com $B_\omega = 22,96$ MHz. Já a calota esférica, com raio de 4 mm, resultou em $f_r = 2,46$ GHz, mas reduziu a B_ω para 16,78 MHz, com $|S_{11}| = -18,4$ dB. A calota esférica côncava com raio de 7 mm, também resultou em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -21,5$ dB e $B_\omega = 19,30$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 36,96 mm e raio 1 mm proporcionou a melhor combinação de desempenho, com $|S_{11}| = -32,5$ dB e $B_\omega = 23,12$ MHz. Na calota cilíndrica côncava, com altura de 36,96 mm e raio de 1 mm, a frequência de ressonância foi de $f_r = 2,46$ GHz, com $|S_{11}| = -33,7$ dB e $B_\omega = 22,94$ MHz.

A utilização de água salgada na antena *patch* retangular apresenta um comportamento distinto em relação a outros materiais testados, especialmente no que diz respeito ao padrão de radiação. Devido à sua alta condutividade, a água salgada gera maiores perdas dielétricas, resultando em uma absorção significativa da energia eletromagnética, o que prejudica a eficiência da antena. Embora algumas configurações com água salgada tenham apresentado uma melhoria na B_ω , como no caso da calota cilíndrica com altura de 36,96 mm e raio de 1 mm, que resultou em uma $B_\omega = 23,12$ MHz, a tendência geral foi uma redução do ganho realizado da antena. O ganho realizado máximo da antena alcançado com a água salgada, de 2,76 dBi nesse mesmo sólido geométrico, foi pouco superior ao da antena *patch* retangular sem RL, mas ainda assim inferior ao ganho realizado da antena registrado com os outros materiais testados. Isso indica que, embora a água salgada possa oferecer benefícios em termos de B_ω , sua alta condutividade a torna menos eficaz em aplicações que exigem um ganho realizado da antena elevado. Em outras

palavras, a água salgada introduz um compromisso: melhora em alguns aspectos, como a B_ω , mas com uma redução no desempenho geral em termos de padrão de radiação, tornando-se menos eficiente em situações que requerem alta eficiência de radiação.

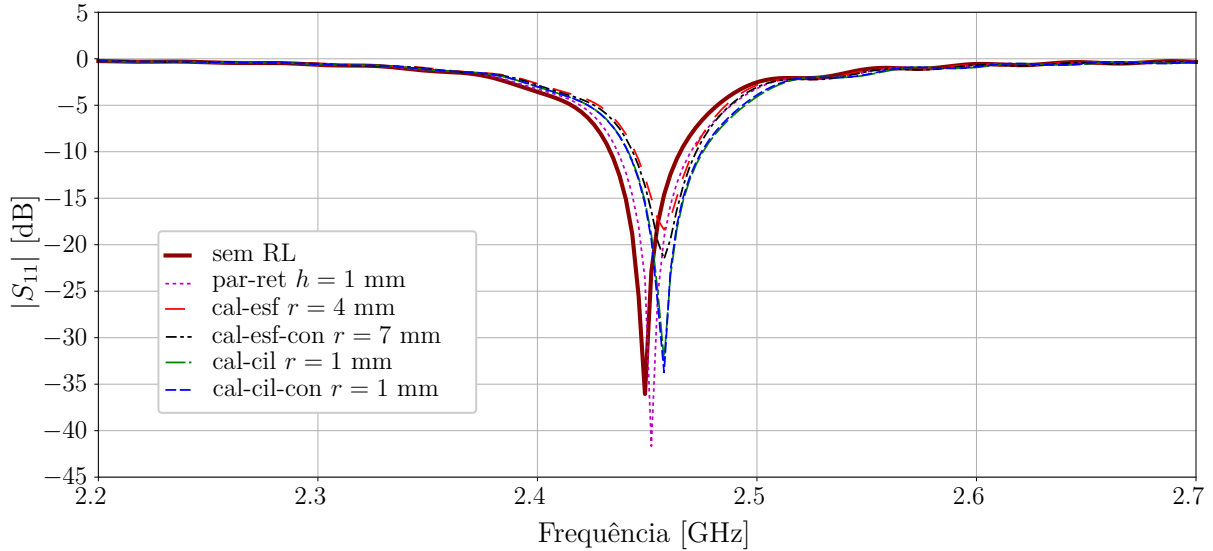


Figura 12 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na água salgada e sólidos geométricos escolhidos.

4.5 Glicerina

Na Figura 13, são ilustrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular utilizando o substrato FR-4, quando a glicerina é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. Nessa figura, a antena *patch* retangular sem RL apresenta um $|S_{11}| = -32,5$ dB em $f_r = 2,45$ GHz e $B_\omega = 53,47$ MHz. A deposição de glicerina no formato de um paralelepípedo retangular, com comprimento de 28,08 mm, largura de 55,71 mm e altura de 11 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -19,5$ dB, e $B_\omega = 50,13$ MHz. A calota esférica com, raio de 15 mm, resultou em $f_r = 2,43$ GHz com $|S_{11}| = -23,4$ dB e $B_\omega = 29,22$ MHz. A calota esférica côncava, com raio de 18 mm, resultou em $f_r = 2,43$ GHz com $|S_{11}| = -25,7$ dB e $B_\omega = 32,90$ MHz. A calota cilíndrica, com altura de 55,71 mm e raio de 12 mm, levou a um aumento da frequência para $f_r = 2,49$ GHz com $|S_{11}| = -25,6$ dB e $B_\omega = 39,27$ MHz. Por fim, a calota cilíndrica côncava, com altura de 55,71 mm e raio de 16 mm, resultou em $f_r = 2,43$ GHz com $|S_{11}| = -22,76$ dB e $B_\omega = 30,65$ MHz. Entre todos os formatos de sólidos geométricos analisados, a antena *patch* retangular sem RL apresenta o desempenho mais eficaz, com o menor valor de $|S_{11}|$ e a maior B_ω , enquanto todos os formatos de sólidos geométricos com glicerina resultaram em aumento do valor de $|S_{11}|$ e redução da B_ω .

Na Figura 14, são mostrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular utilizando o substrato Rogers RO4725JXR, quando a glicerina é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. A antena *patch* retangular sem RL apresenta um $|S_{11}| =$

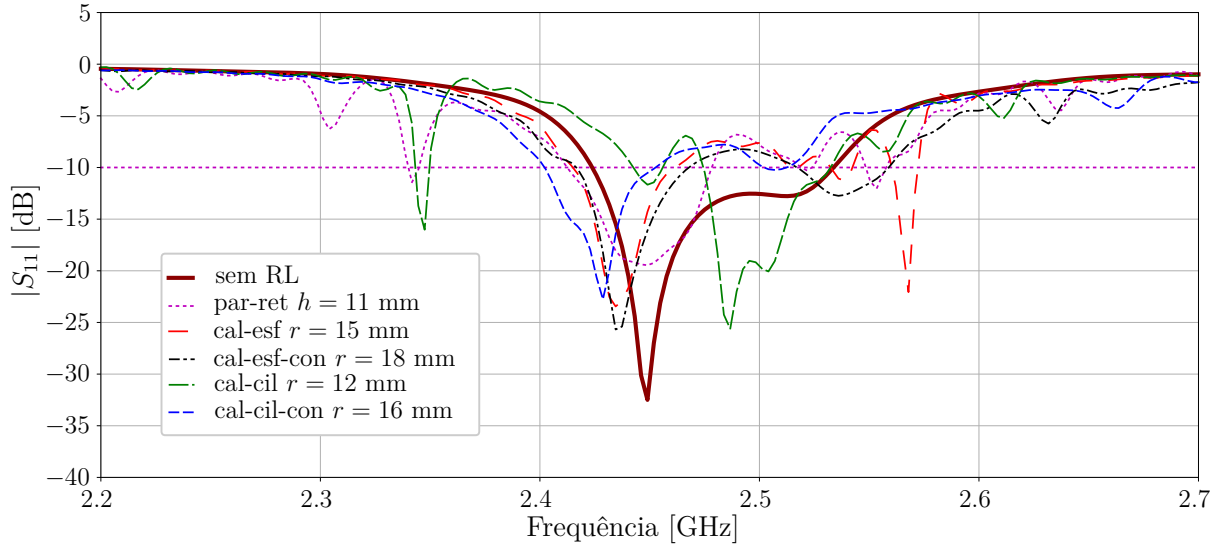


Figura 13 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato FR-4: sem RL e com RL baseado na glicerina e sólidos geométricos escolhidos.

–40,7 dB em $f_r = 2,45$ GHz com $B_w = 20,52$ MHz. A adição de glicerina no formato de um paralelepípedo retangular, com comprimento de 65,71 mm, largura de 76,27 mm e altura de 8 mm, resultou em $f_r = 2,44$ GHz com $|S_{11}| = -11,9$ dB, porém não mostrou B_w em –13 dB. A calota esférica e a calota esférica cônica, ambas com raio de 17 mm, resultaram em $f_r = 2,46$ GHz com $|S_{11}| = -18,9$ dB e B_w de 20,20 MHz e 20,70 MHz, respectivamente. A calota cilíndrica, com altura de 76,27 mm e raio de 6 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -18,5$ dB e $B_w = 19,87$ MHz. Por fim, a calota cilíndrica cônica, com altura de 76,27 mm e raio de 14 mm, resultou em $f_r = 2,45$ GHz com $|S_{11}| = -31,8$ dB e $B_w = 19,90$ MHz.

A comparação entre a antena *patch* retangular sem RL e com deposição de glicerina nos formatos de sólidos geométricos escolhidos, mostra que a antena *patch* retangular sem RL apresenta o desempenho mais relevante, com $|S_{11}| = -40,7$ dB em 2,45 GHz e $B_w = 20,52$ MHz. A adição de glicerina, em qualquer formato, resultou em um aumento nos valores do $|S_{11}|$ e, na maioria dos casos, em uma redução da B_w , indicando uma diminuição na eficiência de acoplamento da antena. Apesar da calota esférica cônica apresentar uma leve melhoria na B_w em relação às demais sólidos geométricos, nenhuma das configurações de antena com RL superou o desempenho da antena *patch* retangular sem RL.

Na Figura 15, são ilustrados os valores de $|S_{11}|$ para a antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM, quando a glicerina é utilizada nos formatos de sólidos geométricos escolhidos. A antena *patch* retangular sem RL apresenta um $|S_{11}| = -36$ dB em $f_r = 2,45$ GHz e $B_w = 22$ MHz. Quando a glicerina é depositada nos diferentes formatos de sólidos geométricos sobre a antena, observa-se um aumento na f_r e no valor de $|S_{11}|$ em todos os formatos. No entanto, comparando a B_w , a maioria dos sólidos geométricos resultou em uma redução, exceto a calota cilíndrica cônica com altura de

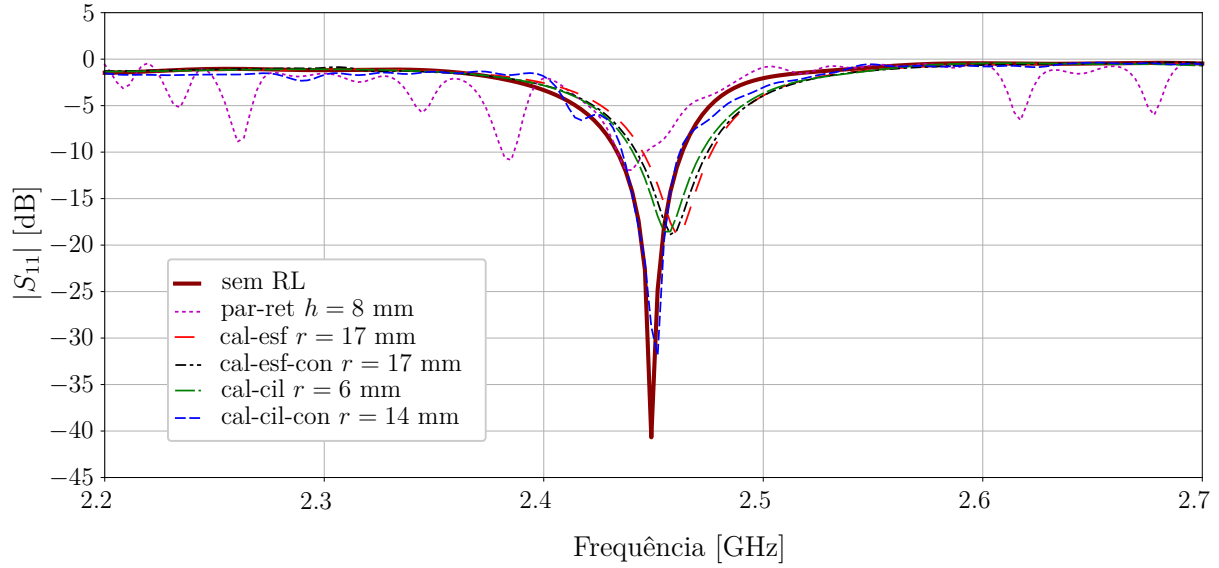


Figura 14 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR: sem RL e com RL baseado na glicerina e sólidos geométricos escolhidos.

36,96 mm e raio de 9 mm, que proporcionou a maior $B_\omega = 32,61$ MHz.

Embora a configuração com a glicerina no formato da calota cilíndrica côncava tenha apresentado a maior B_ω , o valor de $|S_{11}| = -23,4$ dB ainda é superior ao da antena *patch* retangular sem RL, indicando um desempenho inferior em termos de eficiência de acoplamento. Isso mostra que, mesmo com uma B_ω elevada, a presença de glicerina não melhora o parâmetro de espalhamento em comparação com a antena *patch* retangular sem RL. Assim, a antena *patch* retangular sem RL oferece o melhor equilíbrio entre B_ω e valor de $|S_{11}|$, proporcionando um desempenho geral superior em relação às configurações com glicerina. Portanto, apesar da glicerina melhorar a B_ω , especialmente na calota cilíndrica côncava, a antena *patch* retangular sem RL continua sendo a opção mais eficiente devido à sua melhor relação entre $|S_{11}|$ e B_ω .

4.6 Análise do padrão de radiação

Na Figura 16, são mostrados os padrões de radiação da antena *patch* retangular com substrato FR-4, tanto sem o RL quanto com o RL que apresentou o melhor desempenho no plano $\phi = 0^\circ$. Observa-se que o melhor desempenho foi obtido com o RL baseado na água destilada no formato da calota cilíndrica côncava com altura de 55,71 mm e raio de 19 mm. Esse RL causou uma alteração significativa no diagrama de radiação em relação a configuração sem RL. O ganho realizado da antena *patch* retangular sem RL foi de 1,88 dBi na direção principal de 16° , enquanto o ganho realizado da antena com o RL mencionado resultou em 5,16 dBi na direção principal de 3° , evidenciando um aumento significativo do ganho realizado da antena ao se aplicar um RL em uma antena *patch* retangular.

Na Tabela 3, são comparados os melhores resultados obtidos com as diferentes

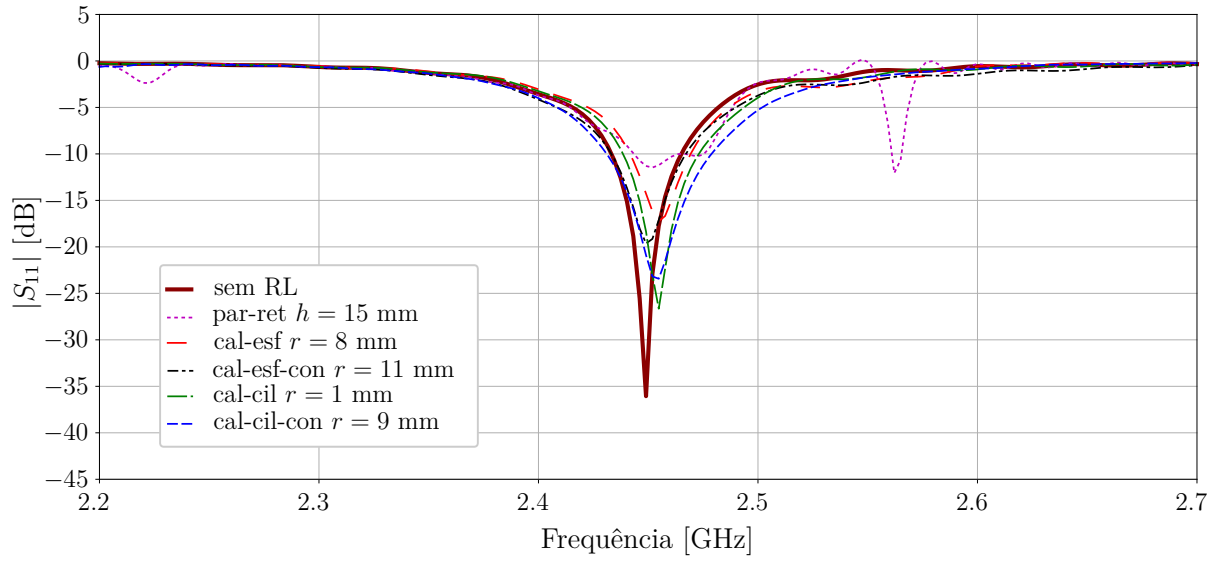


Figura 15 – $|S_{11}|$ da antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: sem RL e com RL baseado na glicerina e sólidos geométricos escolhidos.

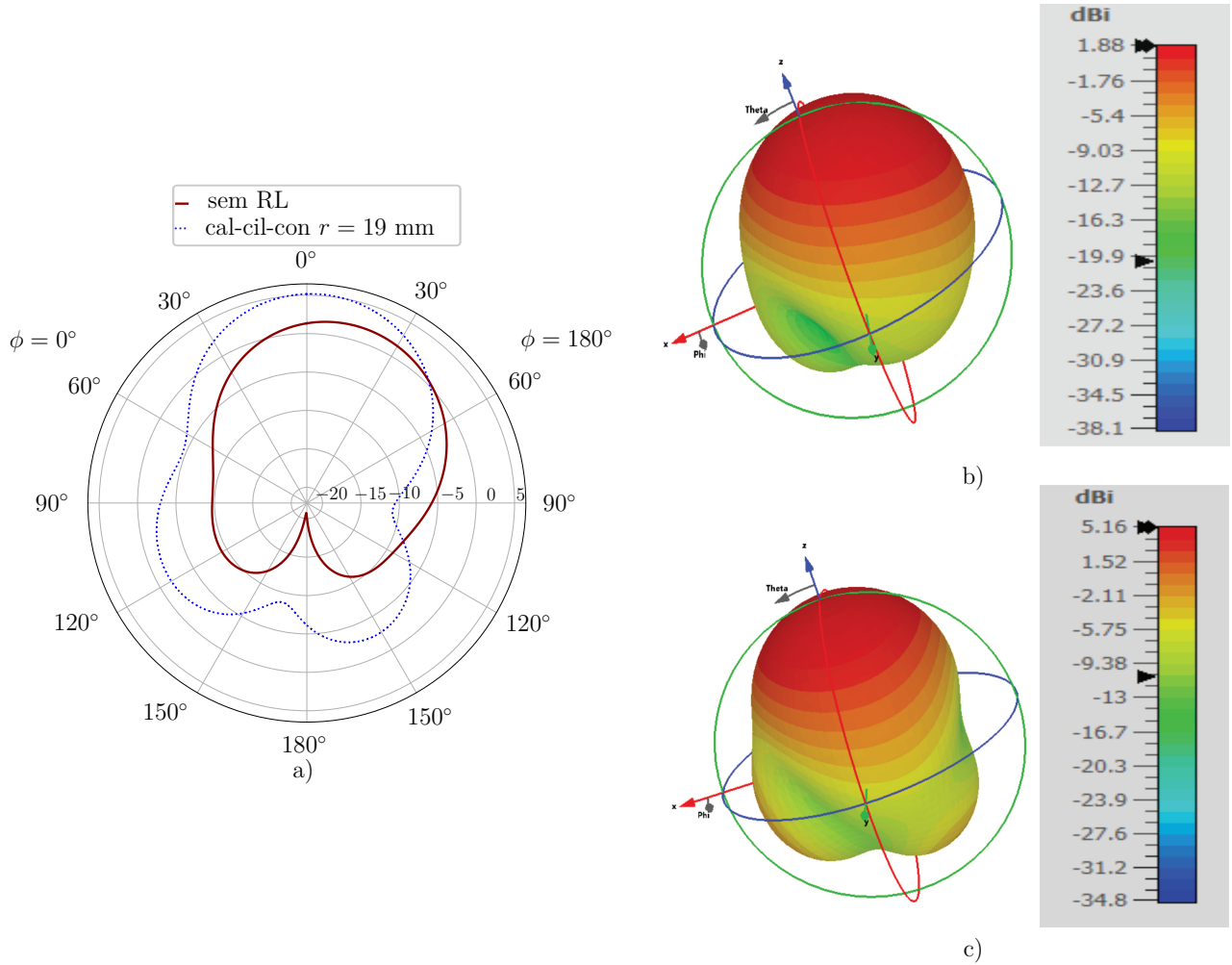


Figura 16 – Padrões de radiação para a antena *patch* retangular com substrato FR-4: a) 1-D no plano $\phi = 0^\circ$ para as configurações sem RL e com RL baseado na água destilada, b) 3-D para a configuração sem RL e c) 3-D para a configuração com RL baseado na água destilada.

configurações de RL aplicado a antena *patch* retangular que faz uso do substrato FR-4. Para tanto, foram considerados os valores de $|S_{11}|$, f_r , o ganho realizado da antena em dBi, a melhoria percentual do ganho realizado em relação à antena *patch* retangular sem RL, e B_ω . Conforme observado, o maior ganho realizado da antena foi obtido com a água destilada no formato da calota cilíndrica côncava, com altura de 55,71 mm e raio de 19 mm, alcançando 5,16 dBi, o que representa um aumento de 112,8% em relação à antena *patch* retangular sem RL. A glicerina e a água destilada no formato de um paralelepípedo retangular também mostraram ganhos realizados significativos, com aumentos de 87% e 93,6%, respectivamente. Todas as configurações de RLs apresentaram valores de $|S_{11}|$ abaixo de -13 dB, indicando a eficiência no casamento de impedância, sendo que a glicerina obteve o maior valor do $|S_{11}| = -19,4$ dB. O emprego dos ressonadores líquidos resultou em variações da frequência de ressonância, entre 2,38 GHz e 2,45 GHz, com o maior desvio observado na água destilada no formato da calota cilíndrica côncava com raio de 19 mm. Em relação a B_ω , a antena *patch* retangular sem RL apresentou a maior largura, igual a 53,47 MHz, enquanto as antenas com RL apresentaram larguras de banda menores, com a água deionizada no formato da calota cilíndrica côncava com raio de 19 mm, exibindo a menor largura de banda ($B_\omega = 11,80$ MHz).

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena *patch* retangular com substrato FR-4 em relação ao diagrama de radiação.

Antena	Sólido Geométrico	$ S_{11} $ (dB)	f_r (GHz)	Ganho (dBi) em 2,45 GHz	Ganho (%)	B_ω (MHz)
Sem RL	—	-32,5	2,45	1,88	—	53,47
Glicerina	par-ret $h = 11$ mm	-19,5	2,45	4,60	87	50,13
Água destilada	par-ret $h = 19$ mm	-30,4	2,41	4,75	93,6	37,86
Água deionizada	cal-cil-con $r = 19$ mm	-26,5	2,42	4,40	78,6	11,79
Água destilada	cal-cil-con $r = 19$ mm	-29	2,38	5,16	112,8	13,59

Na Tabela 4, são comparados os parâmetros de desempenhos eletromagnéticos obtidos a partir do diagrama polar da antena *patch* retangular com substrato FR-4. Os parâmetros analisados são a magnitude do lóbulo principal, (do inglês, *main lobe magnitude*) (MLM), a direção do lóbulo principal (do inglês, *main lobe direction*) (MLD), o ângulo de meia potência, (do inglês, *half-power beamwidth*) (HPBW) em -3 dB, e o nível dos lóbulos laterais, (do inglês, *side lobe level*) (SLL). Os resultados reunidos na Tabela 4 mostram que o emprego do RL impactou o desempenho da antena *patch* retangular em comparação com a antena *patch* retangular sem RL. O parâmetro MLM apresentou um aumento significativo, com destaque para a configuração de água destilada no formato da

calota cilíndrica côncava com raio de 19 mm, que alcançou 5,16 dBi. O HPBW foi reduzido para $66,3^\circ$, indicando uma largura de feixe menor na direção principal, o que resulta em uma maior diretividade e feixe mais estreito. No entanto, o SLL, também aumentou, atingindo $-6,8$ dB com a água destilada, o que aponta para um aumento na radiação indesejada. Apesar desse inconveniente, a água destilada foi considerada a melhor opção, destacando-se pelo alto ganho realizado da antena e pelo HPBW reduzido, sugerindo uma radiação mais focada na direção principal, o que a torna ideal para aplicações que exigem diretividade elevada.

Tabela 4 – Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena *patch* retangular com substrato FR-4 em relação ao diagrama polar.

Antena	Sólido Geométrico	MLM (dBi)	MLD ($^\circ$)	HPBW ($^\circ$)	SLL (dB)
Sem RL	—	1,88	16	80,8	$-11,2$
Glicerina	par-ret $h = 11$ mm	4,60	17	77,8	$-10,1$
Água destilada	par-ret $h = 19$ mm	4,75	0	71,4	$-6,1$
Água deionizada	cal-cil-con $r = 19$ mm	4,40	8	66,7	$-6,7$
Água destilada	cal-cil-con $r = 19$ mm	5,16	3	66,3	$-6,8$

Na Figura 17, são exibidos os padrões de radiação da antena *patch* retangular utilizando o substrato Rogers RO4725JXR sem RL e com o RL que obteve o melhor desempenho no plano $\phi = 94^\circ$. Observa-se que o melhor desempenho foi obtido com a aplicação do RL baseado na água deionizada e no formato da calota cilíndrica côncava com raio de 5 mm sobre a antena *patch* retangular. Essa configuração não causou uma alteração significativa no diagrama polar em relação à antena *patch* retangular sem RL. O ganho realizado da antena *patch* retangular sem RL era de 5,93 dBi na direção principal de 41° e, após a adição da água deionizada no formato da calota cilíndrica côncava, o ganho realizado da antena aumentou para 6,83 dBi na direção principal de 41° . Observa-se que o emprego do RL melhora o ganho realizado; entretanto, esse ganho realizado não é tão elevado quanto ao observado na antena *patch* retangular que faz uso do substrato FR-4. Em outras palavras, o aumento do ganho realizado oferecido pelo RL não é tão relevante se o substrato é de elevada qualidade.

Considerando o diagrama de radiação, os melhores resultados obtidos com a antena *patch* retangular com o substrato Rogers RO4725JXR são apresentados na Tabela 5. O melhor ganho realizado da antena de 6,83 dBi, foi obtido com o uso do RL baseado na água deionizada no formato da calota cilíndrica côncava de raio de 5 mm, representando um aumento de 23% em relação à antena *patch* retangular sem RL. A seguir, tem-se a água destilada no formato da calota cilíndrica com um ganho realizado de 6,82 dBi, ou

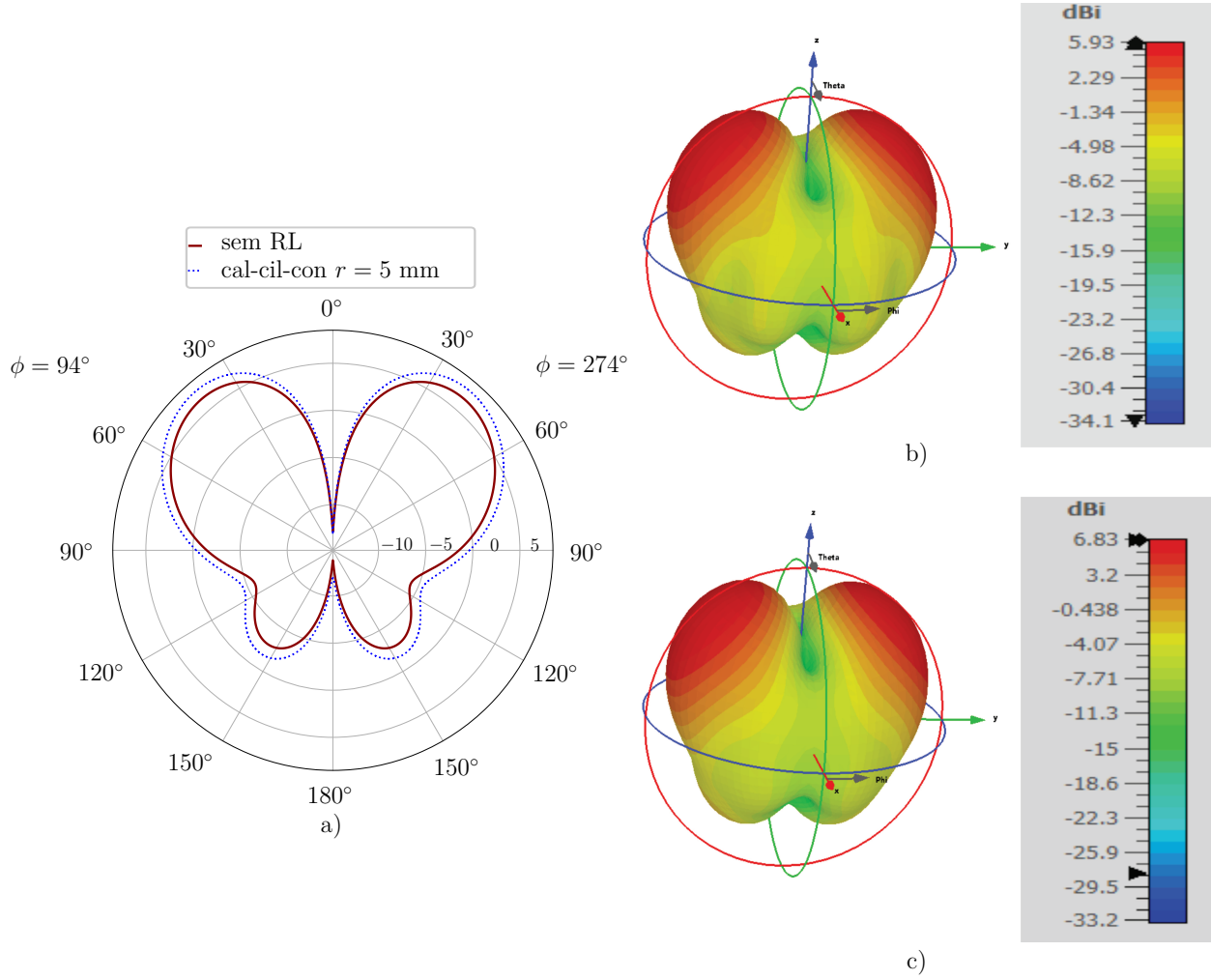


Figura 17 – Padrões de radiação para a antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR: a) 1-D no plano $\phi = 94^\circ$ para as configurações sem RL e com RL baseado na água deionizada, b) 3-D para a configuração sem RL, c) 3-D para a configuração com RL baseado na água deionizada.

seja, aumento de 22,7%. Todas as configurações de RLs simuladas resultam num bom casamento de impedância. Além disso, a glicerina no formato da calota cilíndrica côncava de raio de 14 mm, obteve o melhor valor de $|S_{11}|$ (−31,8 dB), dentre as configurações de RLs; entretanto, a antena *patch* retangular sem RL apresenta o melhor casamento de impedância. As configurações de RLs resultam em pequenas variações na frequência de ressonância, sendo que a $f_r = 2,44$ GHz foi observada na água deionizada, no formato da calota cilíndrica côncava de raio igual a 5 mm. A maior largura de banda ($B_w = 25,22$ MHz) foi observada com água destilada no formato da calota cilíndrica de raio igual a 5 mm, enquanto a menor largura de banda ($B_w = 5,98$ MHz) foi obtida com água deionizada no formato da calota cilíndrica côncava de raio igual a 5 mm.

Na Tabela 6, são comparados os parâmetros de desempenhos eletromagnéticos a partir do diagrama polar da antena *patch* retangular, que faz uso do substrato Rogers RO4725JXR, sem RL e com as diferentes configurações de RLs. Os resultados numéricos

Tabela 5 – Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR em relação ao diagrama de radiação.

Antena	Sólido Geométrico	$ S_{11} $ (dB)	f_r (GHz)	Ganho (dBi) em 2,45 GHz	Ganho (%)	B_ω (MHz)
Sem RL	—	-40,7	2,45	5,93	—	20,52
Água deionizada	cal-cil $r = 5$ mm	-15,24	2,46	6,74	20,5	9,26
Água destilada	cal-cil $r = 5$ mm	-18,5	2,46	6,82	22,7	25,22
Glicerina	cal-cil-con $r = 14$ mm	-31,8	2,45	6,52	14,5	19,90
Água deionizada	cal-cil-con $r = 5$ mm	-14,9	2,44	6,83	23	5,98

listados na Tabela 6 indicam que a configuração com água deionizada no formato da calota cilíndrica côncava de raio igual a 5 mm apresentou o melhor desempenho dentre as configurações simuladas. Essa configuração atingiu um MLM de 6,83 dBi, superando o MLM da antena *patch* retangular sem RL. Apesar do aumento do SLL em relação à antena *patch* retangular sem RL, essa configuração manteve a mesma MLD e o mesmo HPBW que a antena *patch* retangular sem RL. Assim, embora tenha ocorrido um incremento na radiação indesejada, o maior ganho realizado alcançado torna essa configuração a de melhor desempenho.

Tabela 6 – Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena *patch* retangular com substrato Rogers RO4725JXR em relação ao diagrama polar.

Antena	Sólido Geométrico	MLM (dBi)	MLD (°)	HPBW (°)	SLL (dB)
Sem RL	—	5,93	41	50,9	-8,1
Água deionizada	cal-cil $r = 5$ mm	6,74	42	50,9	-9,4
Água destilada	cal-cil $r = 5$ mm	6,82	41	50,8	-8,9
Glicerina	cal-cil-con $r = 14$ mm	6,51	40	49,6	-8,5
Água deionizada	cal-cil-con $r = 5$ mm	6,83	41	50,9	-8

Na Figura 18, são mostrados os padrões de radiação da antena *patch* retangular que faz uso do substrato Rogers RT/duroid 6010LM sem RL e com o RL que apresentou o melhor desempenho no plano $\phi = 0^\circ$. Observa-se que o melhor desempenho foi obtido com o RL baseado na água deionizada no formato de um paralelepípedo retangular com altura de 18 mm. Esse RL causou uma leve alteração no diagrama de radiação em relação a configuração sem RL. O ganho realizado da antena *patch* retangular sem RL foi de 2,26 dBi na direção principal de 6° , enquanto o ganho realizado da antena com o

RL supracitado resultou em 3,51 dBi na direção principal de 7° , evidenciando um leve aumento do ganho realizado da antena ao se aplicar um RL na antena *patch* retangular.

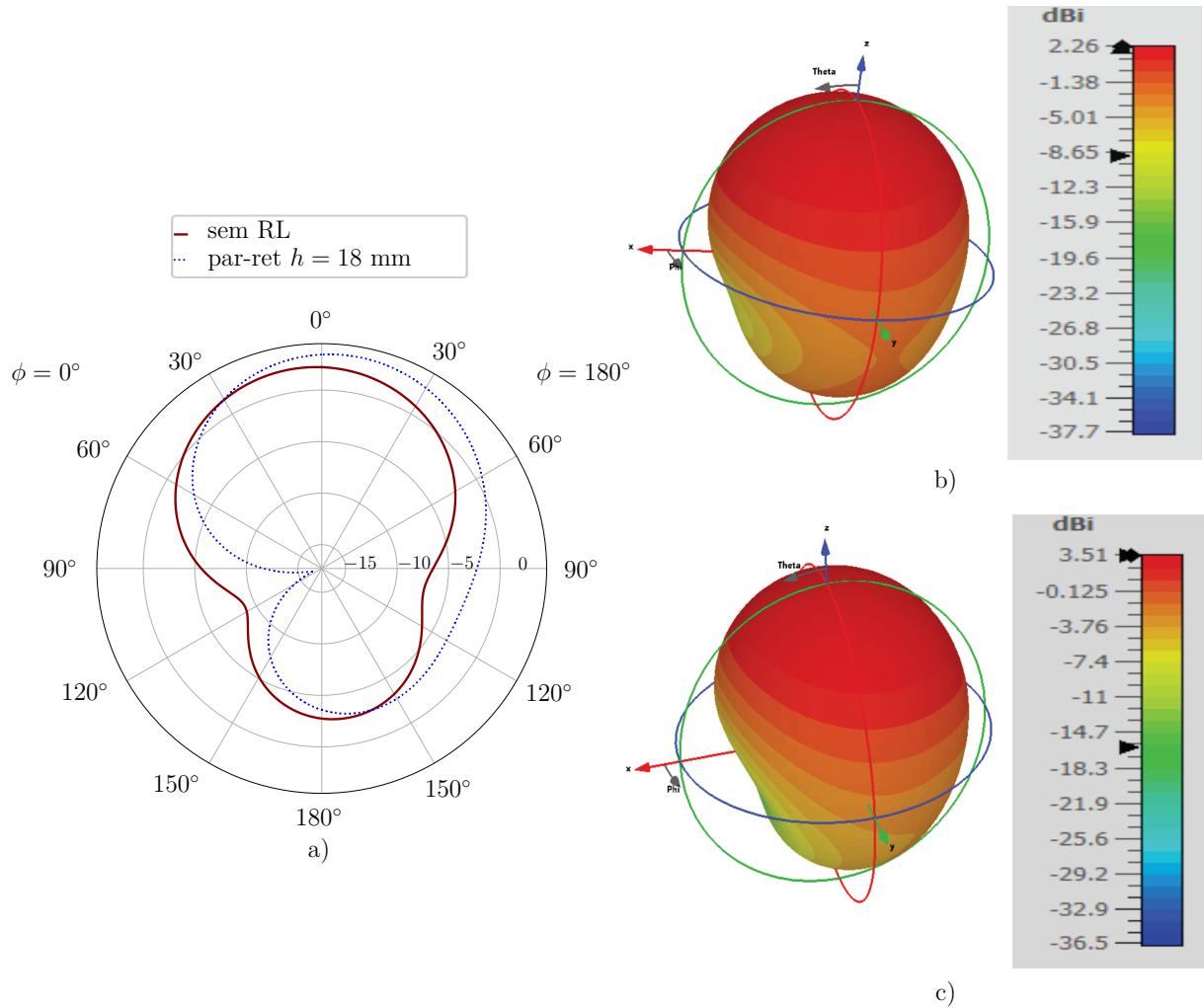


Figura 18 – Padrões de radiação para a antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM: a) 1-D no plano $\phi = 0^\circ$ para as configurações sem RL e com RL baseado na água deionizada, b) 3-D para a configuração sem RL e c) 3-D para a configuração com RL baseado na água deionizada.

A análise dos resultados para as diferentes configurações da antena *patch* retangular com os substratos propostos e adição de materiais líquidos nas diferentes geometrias revela que a água destilada no formato da calota cilíndrica côncava sobre o substrato FR-4 proporcionou o maior aumento de ganho realizado da antena, passando de 1,88 dBi para 5,16 dBi, apesar de resultar em uma alteração considerável no diagrama polar devido à alteração das propriedades dielétricas e à redistribuição do campo elétrico. A água deionizada no formato da calota cilíndrica côncava sobre o substrato Rogers RO4725JXR também obteve um ganho realizado de 6,83 dBi, com uma alteração reduzida no diagrama polar e, portanto, apresentando um excelente resultado. A água deionizada no formato de um paralelepípedo retangular sobre o substrato Rogers RT/duroid 6010LM resultou no aumento do ganho realizado de 2,26 dBi para 3,51 dBi. Esses resultados

evidenciam a relevância na escolha do material líquido e do formato do sólido geométrico no desempenho da antena *patch* retangular. Finalmente, as alterações observadas no diagrama polar refletem as mudanças nas propriedades dielétricas e na distribuição do campo eletromagnético.

Na Tabela 7, é comparado o desempenho da antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM utilizando diferentes materiais líquidos e geometrias. A água deionizada no formato de um paralelepípedo retangular, com altura de 18 mm, alcançou o maior ganho realizado igual a 3,51 dBi, representando um aumento de 33,35% em relação à antena sem RL. A glicerina no formato da calota esférica côncava com raio de 11 mm, também apresentou um ganho realizado significativo de 3,48 dBi, com um incremento de 32,43%. Todas as configurações de RLs analisadas apresentaram valores de $|S_{11}|$ menor que -13 dB, indicando um bom casamento de impedância, exceto a configuração com glicerina no formato de um paralelepípedo retangular. O melhor valor de $|S_{11}| = -29$ dB, foi obtido pela água deionizada no formato de um paralelepípedo retangular. Em relação à frequência de ressonância, a glicerina no formato da calota esférica côncava com raio de 11 mm, apresentou a mesma frequência de ressonância de 2,45 GHz que a antena sem RL, enquanto a água deionizada no formato da calota esférica côncava com raio de 9 mm, apresentou um desvio de 5,8 MHz. Quanto à B_ω , a maior foi de 21,57 MHz observada com a glicerina no formato da calota esférica côncava de raio igual a 11 mm, e a menor foi de 17,95 MHz, observado com a água deionizada no formato de um paralelepípedo retangular de altura igual a 18 mm. As larguras de banda da glicerina nas calotas esférica e esférica côncava foram semelhantes às da antena *patch* retangular sem RL.

Tabela 7 – Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM em relação ao diagrama de radiação.

Antena	Sólido Geométrico	$ S_{11} $ (dB)	f_r (GHz)	Ganho (dBi) em 2,45 GHz	Ganho (%)	B_ω (MHz)
Sem RL	—	-36	2,45	2,26	—	22
Água deionizada	cal-esf-con $r = 9$ mm	-22,4	2,45	3,20	24,2	21,49
Glicerina	cal-esf-con $r = 11$ mm	-19,6	2,45	3,48	32,4	21,57
Glicerina	par-ret $h = 15$ mm	-12	2,56	2,92	16,4	—
Água deionizada	par-ret $h = 18$ mm	-29	2,52	3,51	33,4	17,95

Na Tabela 8, são comparados os resultados mais relevantes dos parâmetros do diagrama polar da antena *patch* retangular sem RL e, com os diferentes materiais e sólidos geométricos depositados sobre ela utilizando o substrato Rogers RT/duroid 6010LM.

A análise dos resultados da Tabela 8 revela que a adição de diferentes RLs no subs-

Tabela 8 – Comparação dos parâmetros de desempenhos eletromagnéticos da antena *patch* retangular com substrato Rogers RT/duroid 6010LM em relação ao diagrama polar.

Antena	Sólido Geométrico	MLM (dBi)	MLD (°)	HPBW (°)	SLL (dB)
Sem RL	—	2,26	6	104,6	−4,9
Água deionizada	cal-esf-con $r = 9$ mm	3,20	5	104,1	−5,1
Glicerina	cal-esf-con $r = 11$ mm	3,48	4	103,5	−5,6
Glicerina	par-ret $h = 15$ mm	2,92	12	117,5	−4,9
Água deionizada	par-ret $h = 18$ mm	3,51	7	100,7	−6,2

trato Rogers RT/duroid 6010LM melhorou o desempenho da antena *patch* retangular em comparação à antena *patch* retangular sem RL. A configuração com água deionizada no formato de um paralelepípedo retangular com altura de 18 mm, destacou-se alcançando o maior MLM de 3,51 dBi, superior aos 2,26 dBi da antena *patch* retangular sem RL. O HPBW foi reduzido para 100,7°, sugerindo um feixe mais estreito em relação aos 104,6° da antena *patch* retangular sem RL. O SLL também melhorou, diminuindo para −6,2 dB, evidenciando uma redução na radiação indesejada em relação ao valor de −4,9 dB da antena *patch* retangular sem RL. Embora a MLD tenha se mantido praticamente inalterada, a glicerina no formato da calota esférica côncava, com raio de 11 mm, também apresentou um bom desempenho, com MLM de 3,48 dBi, HPBW de 103,5° e SLL de −5,6 dB. Esses dados evidenciam que as configurações com água deionizada e glicerina resultaram em ganhos realizados significativos no desempenho da antena e melhor largura de feixe, além de uma redução da radiação indesejada.

Entre os materiais testados, a água destilada e a água deionizada foram as mais eficazes para aumentar o ganho realizado da antena *patch* retangular, com uma melhoria notável no desempenho geral. Em contrapartida, a água salgada teve o pior desempenho, devido à sua alta condutividade, que causou perdas substanciais de ganho realizado em todos os substratos utilizados.

4.7 Discussão dos resultados

A análise dos resultados numéricos obtidos indica que as antenas *patch* retangulares que utilizam os substratos FR-4 e Rogers RT/duroid 6010LM, combinadas com RLs baseados em água destilada e água deionizada, apresentaram os melhores desempenhos em termos de frequência de ressonância (f_r), parâmetro de espalhamento ($|S_{11}|$) e largura de banda (B_w). Especificamente, o RL com água destilada mostrou o maior ganho realizado no formato de calota cilíndrica côncava no substrato FR-4, enquanto o RL com água deionizada obteve o maior ganho realizado no formato de paralelepípedo retangular no

substrato Rogers RT/duroid 6010LM .

Para o substrato FR-4, os melhores resultados foram alcançados com o uso de água destilada na configuração de calota cilíndrica côncava. Além disso, os resultados indicaram que a simples inclusão de um RL pode melhorar significativamente o desempenho de antenas *patch* retangulares. Por outro lado, o uso dos substratos Rogers RO4725JXR e Rogers RT/duroid 6010LM resultou em uma melhoria reduzida no desempenho quando RLs foram aplicados, uma vez que as antenas com esses substratos já apresentam um desempenho elevado.

As simulações numéricas também revelaram que o substrato FR-4 apresentou maiores e menores deslocamentos da frequência de ressonância em comparação com os substratos Rogers RO4725JXR e Rogers RT/duroid 6010LM, respectivamente. Esse comportamento pode ser atribuído às características do substrato FR-4, que possui uma constante dielétrica elevada e uma tangente de perda relativamente alta, tornando-o mais sensível às variações de formato dos ressonadores líquidos. Essa sensibilidade maior influencia diretamente a interação entre o campo eletromagnético da antena e o ressonador líquido, resultando em variações significativas na frequência de ressonância em comparação aos substratos Rogers.

Os RLs, tanto com água destilada quanto com água deionizada, mostraram desempenhos notáveis, destacando-se por seus ganhos elevados e bom acoplamento de impedância. Tais características são atribuídas à alta constante dielétrica e baixa condutividade elétrica desses líquidos que proporcionam uma boa eficiência de radiação e um padrão de radiação favorável. No entanto, o RL com água deionizada demonstrou um desempenho ligeiramente superior quando utilizado com os substratos Rogers, o que pode ser explicado por sua constante dielétrica ligeiramente maior, que favorece a interação com substratos de baixa perda dielétrica, otimizando ainda mais o desempenho da antena.

A água salgada, devido à sua alta condutividade, apresentou maiores perdas, resultando em menor ganho e, conseqüentemente, em um desempenho inferior. No entanto, algumas configurações de RLs, como a calota cilíndrica, proporcionaram uma maior largura de banda, sugerindo que o uso de água salgada como ressonador líquido não deve ser completamente descartado. O RL com glicerina não resultou em melhorias significativas no desempenho das antenas *patch* retangulares, tendo apresentado valores de $|S_{11}|$ mais altos e largura de banda (B_w) menores. Apesar disso, em termos de padrão de radiação, a glicerina obteve bons resultados em comparação com a antena sem RL e a antena com RL baseado na água salgada.

Entre os formatos geométricos avaliados, a calota cilíndrica côncava destacou-se por sua capacidade de concentrar o campo eletromagnético na direção da concavidade, o que resultou em uma melhoria significativa no desempenho da antena, especialmente quando usada com água destilada e deionizada.

Todavia, o desempenho das antenas *patch* retangulares não é determinado apenas pela escolha do material líquido, mas também pela interação entre o formato geométrico do RL e o substrato utilizado. Os substratos Rogers, devido às suas características de baixa perda dielétrica e custo elevado, já proporcionam bons resultados em termos de eficiência e desempenho geral da antena. Assim, antenas projetadas com esses substratos conseguem melhorar o ganho realizado e a eficiência de radiação, mesmo sem a adição de RLs. Embora o uso de materiais líquidos possa oferecer uma melhoria adicional no desempenho, os substratos Rogers garantem um nível satisfatório de eficiência. Portanto, o impacto da adição de RLs tende a ser menos pronunciado nesses substratos, em comparação com o FR-4, onde a combinação do material líquido e o formato geométrico pode resultar em melhorias significativas no desempenho das antenas *patch* retangulares.

Para aplicações que demandam uma melhoria substancial no ganho da antena, a combinação do substrato FR-4 com água destilada no formato de calota cilíndrica côncava se mostra uma opção viável. Apesar do FR-4 possuir uma tangente de perda maior em comparação aos substratos Rogers, ele oferece um equilíbrio satisfatório entre baixo custo e desempenho, sendo adequado para diversas aplicações.

5 Conclusões

Este estudo investigou o impacto da inserção de ressonadores líquidos no desempenho de antenas *patch* retangulares, com foco em substratos dielétricos amplamente utilizados, como o FR-4, Rogers RO4725JXR e RT/Duroid 6010LM. A escolha desses substratos se justifica por suas diferentes propriedades dielétricas e níveis de perdas, os quais afetam diretamente o desempenho da antena. Os líquidos selecionados para o ressonador líquido foram: água destilada, água deionizada, água salgada e glicerina, devido às suas características dielétricas e condutivas variadas, fornecendo uma ampla gama de comportamentos eletromagnéticos a serem analisados. Além disso, foram adotados diferentes formatos de sólidos geométricos para os ressonadores líquidos, incluindo paralelepípedo retangular, calota esférica, calota esférica côncava, calota cilíndrica, e calota cilíndrica côncava. Cada uma dessas configurações geométricas afeta de forma distinta a distribuição dos campos eletromagnéticos, o que, por sua vez, influencia o padrão de radiação, a eficiência e o ganho da antena.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a inserção de ressonadores líquidos pode modificar significativamente o comportamento eletromagnético de antenas *patch* retangulares. Os efeitos são mais pronunciados quando se utiliza substratos de menor qualidade, como o FR-4, que sofrem mais com perdas dielétricas e condutivas. Em contrapartida, a utilização de substratos de alta qualidade, como o Rogers RO4725JXR e o RT/Duroid 6010LM, minimiza os impactos negativos, permitindo que os ressonadores líquidos desempenhem um papel mais favorável no desempenho global da antena. Além disso, a escolha adequada do formato geométrico do ressonador, assim como da escolha do líquido utilizado, são cruciais para otimizar a resposta da antena *patch* retangular. Os resultados numéricos indicam que os ressonadores líquidos com água deionizada ou destilada são preferíveis, enquanto líquidos de alta condutividade, como a água salgada, devem ser evitados devido às suas perdas significativas. A glicerina pode ser uma alternativa viável, mas pode exigir ajustes de impedância para maximizar sua eficiência.

Em suma, o uso de ressonadores líquidos oferece um caminho promissor para otimizar o desempenho de antenas *patch* retangulares em aplicações que exigem flexibilidade de projeto e adaptação a diferentes cenários eletromagnéticos.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se uma análise detalhada da tangente de perdas dos substratos utilizados, avaliando a influência desse parâmetro no diagrama de radiação e na largura de banda da antena. Além disso, seria interessante investigar o impacto da variação geométrica dos ressonadores na impedância da antena, observando possíveis correlações com o desempenho geral. Por fim, propõe-se uma nova abordagem que consiste em realizar uma variação do elemento radiador da antena *patch* em conjunto com o ressonador, buscando aprimorar ainda mais o desempenho da antena.

REFERÊNCIAS

- 1 C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis, and Design*, 4th ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- 2 C. S. Lee, V. Nalbandian, and F. Schwing, "Planar dual-band microstrip antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 8, pp. 892–894, Aug. 1995.
- 3 M. Wang and Q.-X. Chu, "A reconfigurable water dense dielectric patch antenna with cross-shape feeding structure," in *Proc. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, May. 2018, pp. 1–2.
- 4 G.-L. Huang, J.-J. Liang, L. Zhao, D. He, and C.-Y.-D. Sim, "Package-in-dielectric liquid patch antenna based on liquid metal alloy," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 11, pp. 2360–2364, Nov. 2019.
- 5 K. Paracha, A. Butt, A. S. Alghamdi, S. Babale, and P. J. Soh, "Liquid metal antennas: Materials, fabrication and applications," *Sensors*, vol. 20, p. 177, Dec. 2019.
- 6 D. Lu, C. Zhang, Z. Wang, R.-Z. Li, J. Yan, and Y. Yu, "Design of multibeam conformal antenna based on liquid metal," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 3, pp. 960–964, Mar. 2024.
- 7 J. Sun and K.-M. Luk, "A circularly polarized water patch antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 6, pp. 926–929, June. 2020.
- 8 L. Xing, Q. Xu, J. Zhu, Y. Zhao, S. Alja'afreh, C. Song, and Y. Huang, "A high-efficiency wideband frequency-reconfigurable water antenna with a liquid control system: Usage for VHF and UHF applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 63, no. 1, pp. 61–70, Feb. 2021.
- 9 E. Motovilova and S. Y. Huang, "A review on reconfigurable liquid dielectric antennas," *Materials*, vol. 13, p. 1863, Apr. 2020.
- 10 Y. Huang, L. Xing, C. Song, S. Wang, and F. Elhouni, "Liquid antennas: Past, present and future," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 473–487, Mar. 2021.
- 11 C. Peixeiro, "Microstrip patch antennas: A historical perspective of the development," in *Proc. International Microwave and Optoelectronics Conference*, Nov. 2011, pp. 684–688.
- 12 G. Deschamps and G. Sichak, "Microstrip microwave antennas," in *Proc. 3rd Antenna Research Development Program*, Oct. 1953, pp. 1 – 21.
- 13 L. Paul, M. Hosain, S. Sarker, M. H. Prio, M. Morshed, and A. Sarkar, "The effect of changing substrate material and thickness on the performance of inset feed microstrip patch antenna," *American Journal of Networks and Communications*, vol. 4, pp. 54–58, May. 2015.

- 14 G. Di Massa, M. Sarubbi, and G. Mazzarella, "Multihole-coupled patch antennas," in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.*, vol. 2, July. 1996, pp. 1266–1269.
- 15 E. V. Byron, "A new-flush mounted antenna element for phased array application," in *Proc. Phased array antennas Symp.*, June. 1970, pp. 187–192.
- 16 R. E. Munson, "Microstrip phased array antennas," in *Proc. of Twenty-Second Symposium on USAF Antenna Research and Development Program*, Oct. 1972.
- 17 J. Howell, "Microstrip antennas," in *Proc. 1972 Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 10, Dec. 1972, pp. 177–180.
- 18 A. G. Derneryd, "Microstrip array antenna," in *Proc. 6th European Microwave Conference*, Sep. 1976, pp. 339–343.
- 19 K. Carver and J. Mink, "Microstrip antenna technology," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 29, no. 1, pp. 2–24, Jan. 1981.
- 20 Z. Qu, J. R. Kelly, Z. Wang, S. Alkaraki, and Y. Gao, "A reconfigurable microstrip patch antenna with switchable liquid-metal ground plane," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1045–1049, May. 2023.
- 21 C. Wang, J. C. Yeo, H. Chu, C. T. Lim, and Y.-X. Guo, "Design of a reconfigurable patch antenna using the movement of liquid metal," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 974–977, June. 2018.
- 22 C. Hua, S. Wang, Z. Hu, Z. Zhu, Z. Ren, W. Wu, and Z. Shen, "Reconfigurable antennas based on pure water," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 623–633, May. 2021.
- 23 D. Pozar, *Microwave Engineering, 4th ed.* John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- 24 P. Strobach, "Bi-iteration multiple invariance subspace tracking and adaptive esprit," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 48, no. 2, pp. 442–456, Feb. 2000.
- 25 B. D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4–24, Apr. 1988.
- 26 I. Gupta and A. Ksienski, "Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 5, pp. 785–791, Sept. 1983.
- 27 H. Steyskal and J. Herd, "Mutual coupling compensation in small array antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 12, pp. 1971–1975, Dec. 1990.
- 28 X. Hong, M. Gerla, Y. Yi, K. Xu, and T. J. Kwon, "Scalable ad hoc routing in large, dense wireless networks using clustering and landmarks," in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, vol. 5, May. 2002, pp. 3179–3185.
- 29 S. S. Chakravarthy, N. Sarveshwaran, S. Sriharini, and M. Shanmugapriya, "Comparative study on different feeding techniques of rectangular patch antenna," in *Proc. 13th International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, July. 2016, pp. 1–6.

- 30 S. Eesaa, M. Jusoh, M. Hafiz, and S. Mahmud, "Finding the best feeding point location of patch antenna using HFSS," *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, pp. 17 444–17 449, Jan. 2015.
- 31 N. Sharma, "A study of different feeding mechanisms in microstrip patch antenna," *International Journal of Microwaves Applications*, vol. 6, pp. 5–9, Feb. 2017.
- 32 *RO4725JXRTM & RO4730G3TM Antenna Grade Laminates*, <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4700-antenna-grade-laminates>, Rogers Corporation, 2021, rev. 1619.
- 33 *RT/duroid[®] 6006/6010LM High Frequency Laminates*, <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-6006-and-6010-2lm-laminates>, Rogers Corporation, 2022, rev. 1606.
- 34 R. K. Raj, V. K. Sharma, J. Prashant, H. Choudhary, A. Tripathi, and Jayesh, "Comparative analysis of dielectric substrate materials (FR-4 & RT/duroid 5880) for antenna array (8x1) designing," *Materials Today: Proceedings*, vol. 74, pp. 172–178, Jan. 2023.
- 35 "Distilled vs deionized water: What makes them different?" acessado em: 05/09/2024. [Online]. Available: <https://www.reynoldsculligan.com/distilled-deionized-water-what-makes-them-different/>
- 36 V. Pejaković, M. Kronberger, M. Kalin, M. Mahrova, M. Vilas, and E. Tojo, "Pyrrolidinium sulfate and ammonium sulfate ionic liquid as green lubricant additives for steel/steel contact lubrication," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 226, no. 11, Jan. 2011, pp. 923–932.
- 37 M. F. M. Omar, I. A. Zubir, S. Kamal, J. A. Rajendran, J. J. Mohamed, Z. A. Ahmad, M. F. Ain, and S. K. A. Rahim, "A critical review on the development of multi-geometrical stacked wideband dielectric resonator antenna," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 100, pp. 111–141, May. 2024.
- 38 R. Kumar Mongia and A. Ittipiboon, "Theoretical and experimental investigations on rectangular dielectric resonator antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, no. 9, pp. 1348–1356, Sept. 1997.
- 39 "Volume de sólidos geométricos," acessado em: 12/10/2024. [Online]. Available: <https://escolakids.uol.com.br/matematica/volume-de-solidos-geometricos.htm>
- 40 K. Leung, K. Luk, K. Lai, and D. Lin, "Theory and experiment of a coaxial probe fed hemispherical dielectric resonator antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 10, pp. 1390–1398, Oct. 1993.
- 41 B. Mukherjee, P. Patel, and J. Mukherjee, "A novel cheese-holes type hemispherical dielectric resonator antenna for wireless applications," in *Proc. European Microwave Conference*, Oct. 2013, pp. 1711–1714.
- 42 "Calota esférica," acessado em: 12/10/2024. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Calota_esf%C3%A9rica

- 43 B. Mukherjee, P. Patel, and J. Mukherjee, “A novel cup-shaped inverted hemispherical dielectric resonator antenna for wideband applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1240–1243, Sept. 2013.
- 44 H. Raggad, M. Latrach, T. Razban, and A. Gharsallah, “Compact half-cylindrical dielectric resonator antenna for UHF RFID applications,” in *Proc. IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications*, Nov. 2012, pp. 171–175.
- 45 A. Sharma and A. Biswas, “Dual-frequency half split cylindrical dielectric resonator antenna,” in *Proc. IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Dec. 2015, pp. 1–2.
- 46 M. Chauhan, A. Rajput, and B. Mukherjee, “Low profile three element half cylindrical dielectric resonator antenna for MIMO application,” in *Proc. 16th European Conference on Antennas and Propagation*, Apr. 2022, pp. 1–5.
- 47 “Volume of half cylinder,” acessado em: 12/10/2024. [Online]. Available: <https://www.cuemath.com/measurement/volume-of-half-cylinder/>

Apêndices A – Publicações

O pôster (co-autoria) apresentado durante o período de graduação é listado abaixo:

FONSECA, C. M. S.; ADETONAH, C. M. M.; CANTARINO, W. M.; **MONTEIRO, V. E.**; COSTA, L. G. da S.; RIBEIRO, M. V.; SCHROEDER, M. A.; RAMOS, G. L. “Analyzing design-prototype discrepancies in microstrip patch antennas for IoT applications”. 2023 SYMPOSIUM OF INTERNET ON THINGS (SIoT), São Paulo, Brasil, Out. 2023.