

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

Estudo, Proposta e Avaliação de Superfícies Refletoras Inteligentes em Redes 6G

Wiliam Rocha dos Santos

JUIZ DE FORA
JULHO, 2026

Estudo, Proposta e Avaliação de Superfícies Refletoras Inteligentes em Redes 6G

WILIAM ROCHA DOS SANTOS

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientador: Edelberto Franco Silva

JUIZ DE FORA

JULHO, 2026

ESTUDO, PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE SUPERFÍCIES REFLETORAS INTELIGENTES EM REDES 6G

Wiliam Rocha dos Santos

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO.

Aprovada por:

Edelberto Franco Silva
Doutor em Ciência da Computação

Luciano Jerez Chaves
Doutor em Ciência da Computação

Alex Borges Vieira
Doutor em Ciência da Computação

JUIZ DE FORA
21 DE JULHO, 2026

Resumo

Estudos estão sendo feitos sobre a futura sexta geração de redes sem fio (6G), prevista para chegar a partir de 2030. Nisso surgem as antenas inteligentes com suas capacidades únicas de transmissão, demonstrando resultados promissores no desempenho e utilidade a sistemas de comunicação sem fios. É previsto que estas antenas inteligentes possam vir a ser implementadas para ocupar edifícios, janelas e até veículos móveis, com isso, maximizar a qualidade do sinal transmitido através de suas técnicas de reconfiguração com superfícies refletoras inteligentes. Motivado pelo potencial da tecnologia, o trabalho propõe fornecer uma visão das diferentes técnicas de reconfiguração de antenas inteligentes. O objetivo é comparar essas técnicas, destacando suas principais diferenças e o impacto que elas têm na implementação das antenas em diversas aplicações. Espera-se que a análise contribua para um entendimento mais profundo sobre como cada abordagem afeta o desempenho e a flexibilidade das antenas inteligentes.

Palavras-chave: Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (IRS) , 6G, Antenas Reconfiguráveis, Técnicas de Reconfiguração.

Abstract

Studies are being conducted on the future sixth generation of wireless networks (6G), expected to debut around 2030. In this context, intelligent antennas with their unique transmission capabilities are showing promising results in performance and utility for wireless communication systems. It is anticipated that these intelligent antennas may be implemented to occupy buildings, windows, and even mobile vehicles, thereby maximizing signal quality through their reconfiguration techniques with intelligent reflective surfaces. Motivated by the potential of this technology, the work aims to provide a technical overview of the different reconfiguration techniques for intelligent antennas. The goal is to compare these techniques, highlighting their main differences and the impact they have on the implementation of antennas in various applications. It is expected that the detailed analysis of these techniques will contribute to a deeper understanding of how each approach affects the performance and flexibility of intelligent antennas

Keywords: Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) , 6G.

Agradecimentos

A todos os meus parentes, pelo encorajamento e apoio.

Ao professor Edelberto Franco Silva pela orientação e pela paciência, sem a qual este trabalho não se realizaria.

Aos professores do Departamento de Ciência da Computação pelos seus ensinamentos e aos funcionários do curso, que durante esses anos, contribuíram de algum modo para o nosso enriquecimento pessoal e profissional.

Conteúdo

Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas	6
Lista de Abreviações	7
1 Introdução	8
1.1 Apresentação do Tema	8
1.2 Contextualização	9
1.3 Descrição do Problema	10
1.4 Justificativa/Motivação	12
1.5 Objetivos	13
1.6 Organização do Trabalho	14
2 Fundamentação Teórica	15
2.1 Superfícies Refletoras Inteligentes	15
2.2 Tipos de reconfiguração	16
2.2.1 Elétrica	18
2.2.2 Mecânica	19
2.2.3 Óptica	19
2.3 Aplicações práticas	20
2.4 Considerações Parciais	22
3 Trabalhos Relacionados	23
3.1 Visão Geral: 6G	23
3.2 Visão Geral da Tecnologia IRS	24
3.3 Otimização e Performance	26
3.4 Técnicas de Reconfiguração das Antenas	27
3.5 Otimização de Feixe	28
3.6 Aprimoramento de Comunicações Anti-interferência Assistido por IRS	29
3.7 Considerações Finais	30
4 Metodologia e Resultados	32
4.1 Reconfiguração Elétrica	32
4.1.1 Diodos PIN	32
4.1.2 Varactor	35
4.1.3 MEMS	37
4.2 Reconfiguração Óptica	41
4.3 Reconfiguração Mecânica	44
5 Conclusões	47
Bibliografia	51

Lista de Figuras

1.1	KPIS 5G vs 6G (TARIQ et al., 2020)	8
1.2	Evolução de redes sem fio com o tempo (LU; ZHENG, 2020)	9
1.3	Bandas de Espectro 5G/6G (Microwave Journal, 2021)	11
2.1	Arquitetura IRS (WU; ZHANG, 2019b)	16
2.2	Metassuperfície reconfigurável - IRS(GONG et al., 2020)	17
2.3	Tipos de Reconfiguração de uma IRS (BENECK et al., 2021)	18
2.4	Típicos cenários de aplicação de IRS em redes 6G (ZHENG et al., 2022). .	20
3.1	Implementação IRS (WU et al., 2021)	26
4.1	Antena Elétrica Reconfigurável(BENECK ARKAPROVO DAS, 2021) . . .	34
4.2	Metasuperfície com Diodo Varactor (SUN et al., 2023)	36
4.3	Visão ampliada da implementação do interruptor (KOVITZ; RAJAGOPALAN; RAHMAT-SAMII, 2015).	38
4.4	Metasuperfície Mecanicamente Reconfigurável (BENECK et al., 2021). . .	45

Lista de Tabelas

3.1	Comparativo das principais características dos trabalhos relacionados. . . .	31
5.1	Comparação das principais características das técnicas de reconfiguração de IRS.	47
5.2	Exemplos práticos das técnicas de reconfiguração de IRS.	49

Lista de Abreviações

5G	Quinta-Geração de Comunicações Móveis
6G	Sexta-Geração de Comunicações Móveis
AP	Ponto de Acesso
BS	Estações Base
KPIS	<i>Key Performance Indicator</i>)
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
IRS	Superfícies Inteligentes Refletoras
LOS	<i>line-of-sight</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
PIN	<i>Positive-intrinsic-negative</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RF MEMS	<i>Radio-frequency microelectromechanical system</i>
RF	Transmissor e Receptor
UDN	Redes Ultra Densas
SINR	<i>Signal to Interference and Noise Ratio</i>

1 Introdução

1.1 Apresentação do Tema

Redes móveis sem fio estão em constante evolução e se tornando cada vez mais importantes no mundo com a ascensão de dispositivos móveis e conectados à Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*). Pesquisadores e a indústria do mundo inteiro já estão se preparando para a próxima geração de redes móveis e eventual chegada do 6G com diversos estudos, que ainda estão em fase inicial de pesquisa e desenvolvimento com a previsão de implementação real apenas a partir de 2030 (JIANG et al., 2021).

Com a evolução, os requisitos também evoluem e ficam cada vez mais rigorosos, demandando mais a eficiência energética, uma maior cobertura, velocidade de processamento e taxa de dados, menor latência e interferências, demonstrado na Figura 1.1. Porém a tecnologia no estado atual de redes 5G tem um limite e não conseguem satisfazer essa demanda de otimização, melhoria dos requisitos e casos de uso cada vez mais abrangentes (WU et al., 2021).

Characteristics	5G	6G
Individual data rate	1 Gb/s	100 Gb/s
DL data rate	20 Gb/s	>1 Tb/s
U-plane latency	0.5 ms	<0.1 ms
C-plane latency	10 ms	<1 ms
Mobility	up to 500 km/h	up to 1000 km/hr
DL spectral efficiency	30 b/s/Hz	100 b/s/Hz
Operating frequency	3–300 GHz	up to 1 THz

Figura 1.1: KPIS 5G vs 6G (TARIQ et al., 2020)

Diante desse cenário, surgiu recentemente uma tecnologia promissora capaz de atender às novas demandas das redes móveis e sustentar os avanços previstos para o 6G. Conhecida como Superfícies Refletoras Inteligentes (*Intelligent Reflecting Surfaces – IRS*), essa tecnologia se destaca por oferecer uma solução de baixo consumo de energia, reduzida complexidade de implementação e custo relativamente baixo, além de possibilitar maior eficiência na propagação dos sinais sem fio.

1.2 Contextualização

Ao analisar a evolução das redes móveis sem fio, observa-se um padrão de aproximadamente dez anos entre o surgimento de cada nova geração, conforme ilustrado na Figura 1.2. A primeira geração (1G) foi implementada na década de 1980 e, seguindo essa tendência, a chegada da sexta geração (6G) é prevista para ocorrer por volta de 2030 (LU; ZHENG, 2020).

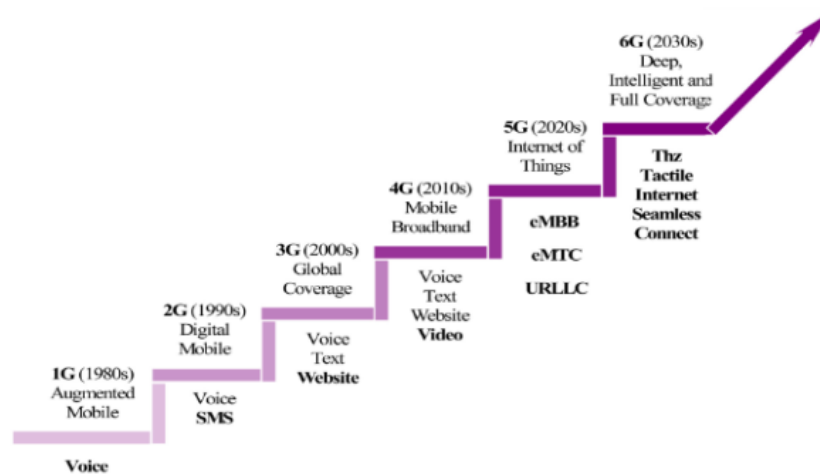


Figura 1.2: Evolução de redes sem fio com o tempo (LU; ZHENG, 2020)

O desenvolvimento do 6G é impulsionado pelo crescimento contínuo do número de dispositivos conectados e pelo surgimento de novas aplicações que exigem comunicações cada vez mais eficientes, confiáveis e inteligentes. Entre essas aplicações destacam-se a Internet das Coisas, os veículos autônomos, as cidades inteligentes e as tecnologias de realidade estendida, que demandam elevadas taxas de transmissão de dados, baixa latência, alta confiabilidade e ampla cobertura.

Embora as redes 5G representem um avanço significativo em relação às gerações anteriores, elas ainda apresentam limitações para atender plenamente aos requisitos esperados para o 6G. Dessa forma, torna-se necessária a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e arquiteturas capazes de suportar essas aplicações emergentes e os desafios das futuras redes móveis.

1.3 Descrição do Problema

Embora o 6G prometa velocidades de transmissão muito superiores às do 5G, esse avanço traz consigo um importante desafio físico. As pesquisas indicam que as futuras redes utilizarão frequências cada vez mais elevadas, incluindo ondas milimétricas (*mmWave*) e, futuramente, a faixa de Terahertz (THz), para disponibilizar maiores larguras de banda e taxas de transmissão. No entanto, quanto maior a frequência utilizada, maior é a perda de propagação do sinal durante a transmissão e menor é a distância que esse sinal consegue percorrer.

Além da perda natural de propagação em espaço livre, essas frequências elevadas sofrem forte atenuação ao atravessar obstáculos como paredes, árvores, chuva e até mesmo o corpo humano. Como consequência, a área de cobertura torna-se significativamente menor. Conforme ilustrado na Figura 1.3, observa-se que, à medida que a frequência aumenta, a distância de propagação diminui, chegando a menos de 1 metro na faixa de Terahertz.

TABLE 1 5G/6G SPECTRUM BANDS (SOURCE: 6G FLAGSHIP)					
Frequency Band	0.3-3 GHz	3-30 GHz	30-300 GHz	0.3-3 THz	3-30 THz
Wavelength	100-10 cm	10-1 cm	10-1 mm	1000-100 μ m	100-10 μ m
Dominant Propagation Mechanism	LOS, Reflection, Diffraction, Scattering, Penetration	LOS, Reflection, Diffraction, Scattering	LOS, Reflection	LOS, Reflection	LOS, Reflection
Dominant Attenuation Effects	Free Space Loss	Free Space Loss Transmission Loss Through Materials High at Upper Band	Free Space Loss/ Molecular Absorption O ₂ @60 GHz H ₂ O> 24 GHz	Free Space Loss/Molecular Absorption High H ₂ O Peaks	Free Space Loss/Molecular Absorption High H ₂ O Peaks
Supported Link Distances	10 km	1000 m	100 m	< 10 m	< 1 m
TX Power Limiting Factor	Regulation	Regulation	Technology	Technology	Technology
Approximate System Bandwidth	Up to 100 MHz	400 (or 800) MHz	Up to 30 GHz	Up to 300 GHz	> 100 GHz

Figura 1.3: Bandas de Espectro 5G/6G (Microwave Journal, 2021)

Uma alternativa seria aumentar a potência de transmissão das antenas ou ampliar a quantidade de estações rádio-base. Entretanto, essa solução não elimina o problema de propagação e exigiria a instalação de um número muito maior de estações para garantir a cobertura desejada, elevando significativamente os custos de infraestrutura, manutenção e consumo energético da rede.

Para solucionar esse problema, propõe-se o uso de Superfícies Refletoras Inteligentes, com a premissa de reconfigurar o ambiente de propagação do sinal sem fio por meio da reflexão controlada por software. Em vez de aumentar a potência de transmissão, a IRS direciona os sinais para regiões específicas, contornando obstáculos e reduzindo perdas de propagação. Essa tecnologia apresenta como principais vantagens o baixo consumo de energia, o reduzido custo de implementação e a capacidade de acompanhar o crescimento da demanda por comunicações sem fio (YANG et al., 2020), podendo ainda atuar em conjunto com técnicas de Inteligência Artificial (IA), redes neurais e redes convolucionais para otimizar dinamicamente a propagação dos sinais.

Assim, a proposta é que essas superfícies sejam implementadas como agrupamentos de elementos refletivos reconfiguráveis, capazes de direcionar os feixes de acordo com a necessidade de cada aplicação, garantindo simultaneamente elevada cobertura e maior ganho do sinal, sem a necessidade de ampliar significativamente a infraestrutura da rede.

1.4 Justificativa/Motivação

Devido ao avanço das especificações e dos requisitos esperados para as futuras redes móveis, que demandam cada vez mais capacidade de transmissão, eficiência energética, confiabilidade e baixa latência, a busca por soluções capazes de superar as limitações atuais tornou-se uma prioridade. Em especial, os desafios relacionados à cobertura do sinal e à taxa de ganho em redes 6G impulsionam o desenvolvimento de novas tecnologias para otimizar a propagação das ondas eletromagnéticas.

Soluções como o MIMO (*multiple-input multiple-output*) massivo já vêm sendo empregadas para enfrentar esses desafios. Entretanto, alguns aspectos devem ser considerados durante sua implementação, como o elevado consumo de energia, a necessidade de maior complexidade de hardware e os altos custos de implantação e manutenção (WU; ZHANG, 2019a).

Em um cenário real de comunicação sem fio, a propagação do sinal ocorre em ambientes repletos de obstáculos, como pessoas, paredes, árvores, veículos e edificações. Esses elementos provocam fenômenos como reflexão, difração, espalhamento e absorção das ondas eletromagnéticas, fazendo com que o sinal perca potência ao longo do percurso e reduzindo a qualidade da comunicação.

Nesse contexto, as Superfícies Refletoras Inteligentes surgem como uma alternativa capaz de tornar o ambiente de propagação programável. Ao serem integradas ao ambiente, essas superfícies podem refletir e reconfigurar o sinal de forma controlada, direcionando a energia para regiões específicas, aumentando a potência recebida e contornando obstáculos encontrados durante a transmissão. Dessa forma, a instalação de IRS em telhados, fachadas de edifícios, mobiliário urbano e outras estruturas permite controlar o ambiente de propagação e otimizar o percurso do sinal, reduzindo a necessidade de implantação de novas estações rádio-base ou amplificadores adicionais (WU; ZHANG, 2019a).

Além do potencial tecnológico das IRS, existe uma motivação acadêmica para o desenvolvimento deste trabalho. Durante o levantamento bibliográfico, observou-se uma dificuldade em encontrar materiais que apresentem, de forma organizada e comparativa, as diferentes técnicas de reconfiguração utilizadas em Superfícies Refletoras Inteligentes. A

maioria dos estudos concentra-se em uma técnica específica ou aborda o tema de maneira bastante aprofundada, dificultando a compreensão inicial por estudantes e pesquisadores que ingressam na área. Assim, espera-se que este trabalho possa servir como um ponto de partida para o entendimento das principais técnicas de reconfiguração — elétricas, mecânicas e ópticas — reunindo seus princípios de funcionamento, vantagens, limitações e aplicações de forma resumida e acessível, contribuindo para futuras pesquisas.

1.5 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo estudar as principais tecnologias relacionadas às redes móveis de sexta geração (6G), com foco nas Superfícies Refletoras Inteligentes como uma solução promissora para os desafios de propagação do sinal em ambientes sem fio. Para isso, busca-se compreender os conceitos fundamentais e a arquitetura das redes 6G, destacando os principais requisitos, desafios e aplicações esperadas para essa nova geração de comunicações.

Além disso, pretende-se investigar a possibilidade de integração das IRS às infraestruturas de comunicação sem fio, analisando como essas superfícies inteligentes podem atuar em conjunto com antenas e estações rádio-base para melhorar a cobertura, aumentar o ganho do sinal, reduzir interferências e contribuir para uma maior eficiência energética da rede.

Outro objetivo consiste em compreender os princípios de funcionamento das Superfícies Refletoras Inteligentes, avaliando suas possibilidades de implementação, suas aplicações e os principais desafios identificados no estado da arte.

Por fim, este trabalho propõe uma análise comparativa das três principais técnicas de reconfiguração de IRS abordadas na literatura: reconfiguração elétrica, mecânica e óptica. Para cada uma delas serão apresentados seus princípios de funcionamento, vantagens, limitações, desafios de implementação e os cenários de aplicação mais adequados. Espera-se, com isso, reunir em um único documento uma visão consolidada dessas técnicas, contribuindo como material introdutório para estudantes e pesquisadores interessados na área e servindo como ponto de partida para estudos futuros.

1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, além da etapa inicial de revisão da literatura. Inicialmente, é realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de selecionar e analisar artigos científicos e trabalhos relevantes relacionados às redes 6G, às Superfícies Refletoras Inteligentes e às técnicas de reconfiguração abordadas nesta pesquisa.

A partir do Capítulo 2, o trabalho passa a apresentar a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa, abordando os conceitos relacionados às redes móveis de sexta geração, às Superfícies Refletoras Inteligentes (IRS) e aos princípios envolvidos na propagação de ondas eletromagnéticas e na reconfiguração do ambiente sem fio.

O Capítulo 3 apresenta os principais trabalhos relacionados encontrados na literatura, destacando as soluções propostas por diferentes autores e os resultados obtidos. Ao final do capítulo, é realizada uma análise comparativa entre os trabalhos, evidenciando suas principais características e contribuições em relação ao tema desta pesquisa.

No Capítulo 4 é feita uma análise comparativa das principais técnicas de reconfiguração de Superfícies Refletoras Inteligentes — elétrica, mecânica e óptica — descrevendo seus princípios de funcionamento, vantagens, limitações, desafios de implementação e os cenários de aplicação mais adequados.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e as conclusões obtidas com o desenvolvimento da pesquisa, além de apontar possíveis direções para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Esse capítulo tem o objetivo de esclarecer e apresentar a fundamentação teórica para a compreensão necessária do funcionamento e arquitetura de superfícies refletoras inteligentes, seus tipos de reconfiguração e algumas aplicações práticas, o entendimento desses conceitos são importantes para a compreensão do estudo, IRS será o foco principal de todas as etapas do estudo para chegar no objetivo final de sumarizar de forma organizada os diferentes tipos de reconfiguração das superfícies refletoras inteligentes, destacando a complexidade de cada um dos tipos, suas vantagens e desvantagens.

2.1 Superfícies Refletoras Inteligentes

A implementação de hardware do IRS vem sendo desenvolvida e é possível se utilizar de dados disponíveis publicamente na literatura, assim como apresentar fisicamente a composição de seu hardware. Uma IRS é baseada no conceito de "metassuperfície", que é composto de duas dimensões (2D) de metamaterial que pode ser digitalmente controlável (CUI et al., 2014).

Uma meta superfície é uma matriz plana que consiste em um grande número de elementos, ou os chamados meta-átomos com espessura elétrica na ordem do sub-comprimento de onda da frequência operacional utilizada. Produzindo elementos, incluindo forma geométrica (por exemplo, quadrado ou anel dividido), tamanho/dimensão, orientação e disposição, é possível que sua resposta/reflexão de sinal individual (amplitude de reflexão e mudança de fase) possam ser modificadas em conformidade com o sinal original(WU; ZHANG, 2019b). Para dar uma visão geral e complementar a fundamentação teórica, veremos a Figura 2.1, demonstrando qual seria a arquitetura padrão de uma IRS, consistindo em três camadas e além disso um controlador inteligente.

Na camada externa, está presente um grande número de elementos metálicos para interagir diretamente com sinais incidentes. Na segunda camada, uma placa de cobre é usada para evitar vazamento de energia do sinal. Por fim, na última camada mais

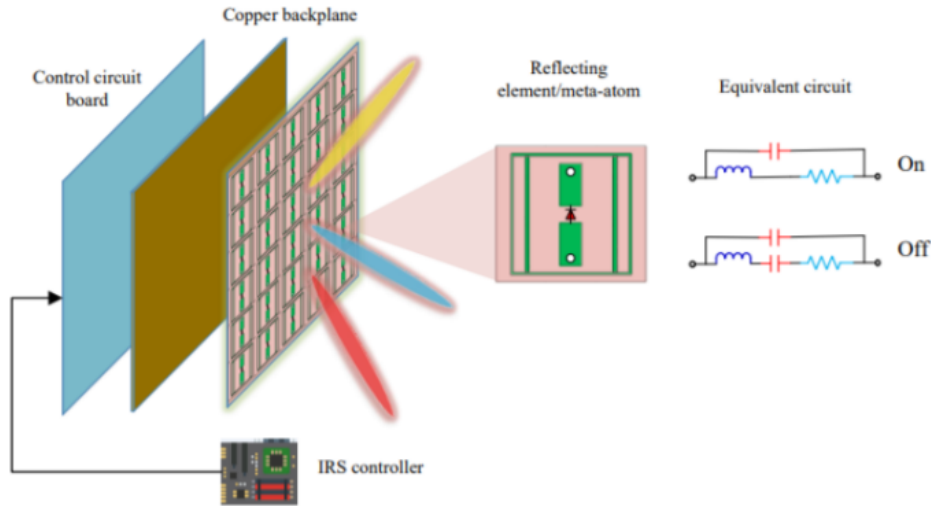


Figura 2.1: Arquitetura IRS (WU; ZHANG, 2019b)

interna é uma placa de circuito de controle que é responsável por ajustar a amplitude/fase de reflexão e mudança de cada elemento, desencadeada por um controlador inteligente conectado ao IRS(WU; ZHANG, 2019b).

Um exemplo da estrutura de um elemento individual também é mostrado na figura, onde um diodo PIN está embutido em cada elemento. Ao controlar sua tensão de polarização por meio de uma corrente contínua da linha de alimentação, o diodo PIN pode ser alternado entre os estados “Ligado” e “Desligado”, conforme mostrado nos circuitos equivalentes, gerando assim uma diferença de deslocamento de fase(CUI et al., 2014).

Assim, diferentes mudanças de fase de elementos IRS podem individualmente serem feitos, por meio da configuração das tensões de polarização correspondentes impostas pelo controlador inteligente.(YANG et al., 2016). Na prática, é desejável ter controle independente da amplitude e mudança de fase em cada elemento, para o qual os circuitos acima precisam ser integrados de forma eficiente (YANG et al., 2016).

2.2 Tipos de reconfiguração

A característica de reconfiguração das Superfícies Refletoras Inteligentes permite controlar de forma dinâmica a propagação das ondas eletromagnéticas, possibilitando tanto o direcionamento da reflexão do sinal para um ponto específico quanto o espalhamento

controlado das ondas, conforme a necessidade da aplicação. Essa reconfigurabilidade é obtida por meio da alteração dos elementos refletores da metassuperfície, modificando seus parâmetros elétricos sem a necessidade de refabricação da antena ou da própria IRS (GONG et al., 2020).

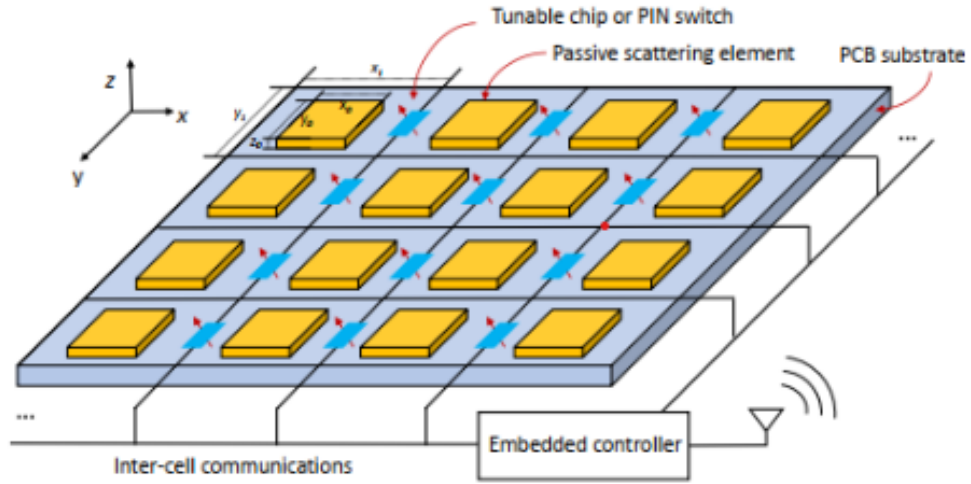


Figura 2.2: Metassuperfície reconfigurável - IRS (GONG et al., 2020)

A Figura 2.2 apresenta a arquitetura de controle de uma IRS. O sistema é composto por uma metassuperfície reconfigurável integrada a um controlador responsável por receber informações do ambiente, como a posição dos usuários, o estado do canal de comunicação e as configurações dos dispositivos externos. A partir dessas informações, o controlador determina a configuração mais adequada para a superfície e distribui esses comandos aos diferentes elementos de comutação presentes na IRS (GONG et al., 2020). Cada comutador altera o estado de operação do seu respectivo meta-átomo, modificando características como a fase e, em alguns casos, a amplitude da onda refletida. Dessa forma, a superfície passa a refletir o sinal de maneira controlada e otimizada, adaptando-se dinamicamente às mudanças do ambiente.

Atualmente, as Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis podem ser implementadas por diferentes técnicas de reconfiguração, cada uma utilizando mecanismos distintos para controlar o comportamento eletromagnético da metassuperfície. Neste trabalho, o foco está nas abordagens elétrica, mecânica e óptica, por representarem as principais

técnicas estudadas na literatura para realizar a reconfiguração dos elementos refletivos e por apresentarem diferentes características em termos de velocidade de resposta, consumo de energia, complexidade de implementação e aplicações.

Além dessas abordagens, existem outras técnicas de reconfiguração baseadas em metamateriais e materiais inteligentes, como materiais de mudança de fase, cristais líquidos, grafeno e outros materiais funcionais (PARCHIN et al., 2020). Entretanto, essas tecnologias não fazem parte do escopo deste trabalho, sendo mencionadas apenas como alternativas existentes na literatura.

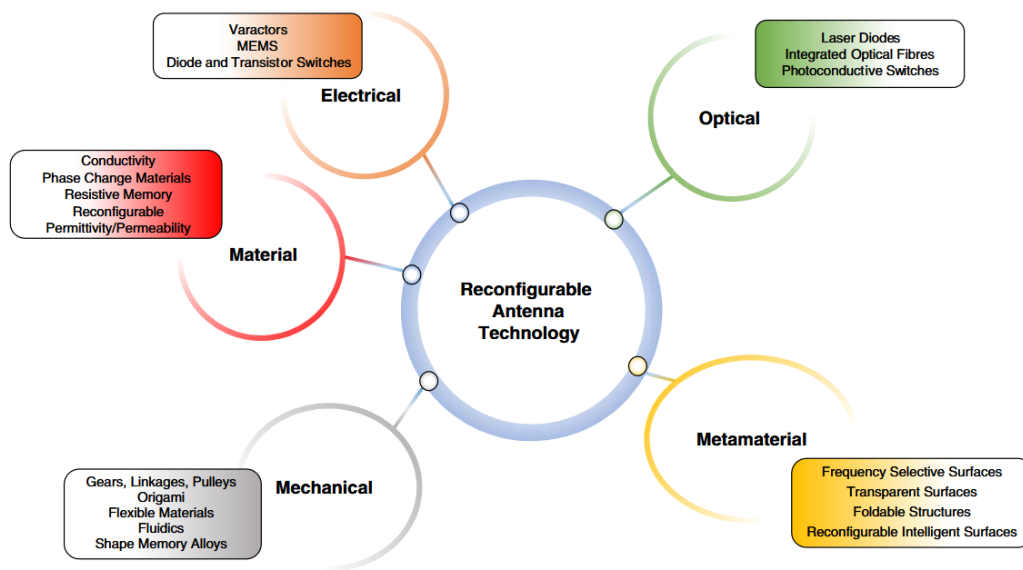


Figura 2.3: Tipos de Reconfiguração de uma IRS (BENECK et al., 2021)

A Figura 2.3 ilustra as principais técnicas de reconfiguração consideradas neste estudo. Nos capítulos seguintes, cada uma delas será analisada individualmente, destacando seus princípios de funcionamento, vantagens, limitações, desafios de implementação e os cenários de aplicação mais adequados.

2.2.1 Elétrica

Esse tipo de reconfiguração é o mais comum, utilizando de elementos ativos como díodos *positive-intrinsic-negative* (PIN), varactors e interruptores de sistema microeletromecânicos (RFMEMS). Com a utilização desses interruptores a antena consegue ser reconfigurável mudando suas características como a frequência, padrão de radiação (PARCHIN et al.,

2020) e também sua polarização devido à uma tensão contínua aplicada.

Suas vantagens englobam o baixo custo e a facilidade de implementação desse tipo de reconfiguração, tendo como desvantagens a sua estrutura que é complexa.

2.2.2 Mecânica

A reconfigurabilidade mecânica pode ser alcançada com a mudança na estrutura da antena. Esse tipo de reconfiguração, diferente das outras técnicas que utilizam de interruptores, precisa de uma integração com elemento ativo, como por exemplo o uso de um motor com a finalidade de rotacionar a IRS.

Essa reconfiguração se limita de acordo com a flexibilidade da antena e se torna difícil fornecer características reconfiguráveis multifuncionais, além de ter um menor tempo de resposta e de precisarem de uma fonte de energia para o motor e seus componentes (PARCHIN et al., 2020).

2.2.3 Óptica

A reconfiguração óptica utiliza interruptores fotossensíveis fabricados com materiais semicondutores, como o silício, cuja condutividade elétrica varia quando expostos à incidência de luz. Nesse tipo de técnica, a iluminação proveniente de fontes ópticas, como lasers ou fibras ópticas, altera as propriedades elétricas desses dispositivos, permitindo modificar dinamicamente o comportamento eletromagnético da antena ou da Superfície Refletora Inteligente.(PARCHIN et al., 2020).

Ao controlar a iluminação sobre os elementos fotossensíveis, torna-se possível alterar parâmetros importantes da antena, como a frequência de operação, a largura de banda, o diagrama de radiação e o direcionamento do feixe refletido. Dessa forma, a reconfiguração ocorre sem a necessidade de contato elétrico direto com os elementos refletivos, tornando o sistema menos suscetível a interferências eletromagnéticas(PARCHIN et al., 2020).

2.3 Aplicações práticas

Uma vez que o IRS é capaz de eliminar o uso de cadeias/arrays de antenas transmissão de RF operando direcionalmente em curto alcance, ele pode ser densamente implantado com custo escalonável e baixo consumo de energia. Para suportar os requisitos rigorosos e o aumento da demanda por dados e dispositivos conectados à rede ao mesmo tempo, os estudos estão prevendo que IRS será um dos componentes essenciais na implementação de redes 6G (ALGHAMDI et al., 2020). Com essa rápida evolução alguns desafios e questões se tornam uma preocupação, como o aumento da cobertura do sinal, o custo para implementação, seu consumo de energia, segurança, latência e velocidade. (ALGHAMDI et al., 2020).

A aplicação de IRS pode ser realizada de várias formas, como a integração da mesma em objetos, construções, veículos móveis, parede e balões. Como o conceito de IRS se dá por vários elementos de superfície refletoras, sua implementação na prática tem a capacidade de aumentar a eficiência de redes sem fio.

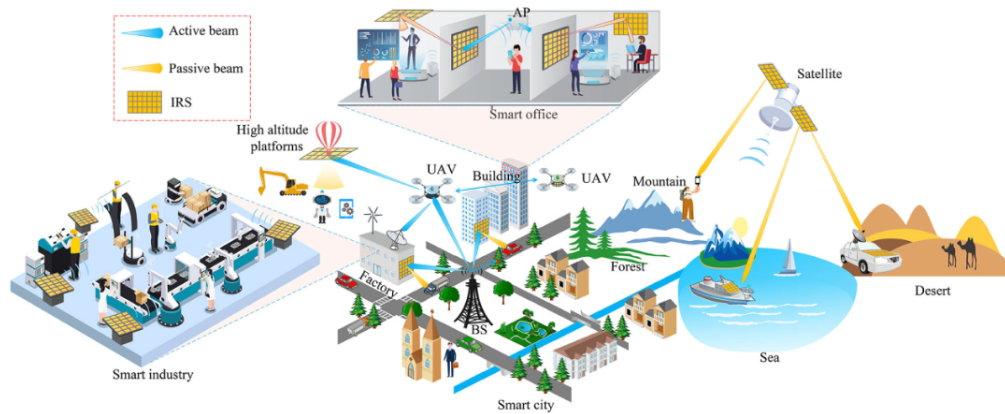


Figura 2.4: Típicos cenários de aplicação de IRS em redes 6G (ZHENG et al., 2022).

A Figura 2.4 apresenta diferentes cenários de aplicação das Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis em redes 6G, demonstrando sua capacidade de aprimorar a cobertura, a confiabilidade e a eficiência das comunicações sem fio em ambientes heterogêneos (ZHENG et al., 2022). Em ambientes industriais inteligentes, a IRS é empregada para estabelecer enlaces confiáveis entre robôs, sensores e equipamentos automatizados, mitigando os efeitos de bloqueios causados por estruturas metálicas e reduzindo a latência das comu-

nicações críticas. Em escritórios inteligentes, painéis IRS instalados em paredes ou tetos refletem os sinais provenientes do ponto de acesso , ampliando a cobertura em salas com obstáculos e melhorando a qualidade da conexão para os usuários (ZHENG et al., 2022).

Na infraestrutura de cidades inteligentes, a IRS pode ser instalada em fachadas de edifícios, postes e outras estruturas urbanas para criar caminhos alternativos de propagação, reduzindo zonas de sombra e aumentando a capacidade da rede. De forma semelhante, em áreas com relevo acidentado, florestas ou regiões densamente urbanizadas, a reflexão inteligente do sinal permite contornar obstáculos naturais ou artificiais, restabelecendo enlaces que seriam inviáveis por propagação direta. Em fábricas e edifícios, a tecnologia também contribui para comunicações mais robustas entre dispositivos conectados, favorecendo aplicações de automação industrial e Internet das Coisas (ZHENG et al., 2022).

Além das aplicações terrestres, a Figura 2.4 ilustra a integração da IRS com plataformas aéreas, como veículos aéreos não tripulados e plataformas de alta altitude, que podem atuar como nós intermediários para ampliar a cobertura da rede em regiões remotas, durante eventos temporários ou em situações de emergência. Nesse contexto, a IRS direciona passivamente os sinais para essas plataformas, aumentando a eficiência da comunicação e reduzindo a necessidade de transmissão com alta potência (ZHENG et al., 2022).

Por fim, a figura evidencia aplicações em comunicações não terrestres, integrando satélites e IRS para fornecer conectividade em ambientes marítimos, desertos, regiões montanhosas e outras áreas sem infraestrutura terrestre. Nesses cenários, a IRS auxilia no direcionamento dos feixes de comunicação, compensando perdas de propagação e ampliando a cobertura do sistema. Dessa forma, a tecnologia se apresenta como um componente fundamental para a arquitetura das redes 6G, possibilitando comunicações mais eficientes, inteligentes e energeticamente sustentáveis em uma ampla variedade de cenários de aplicação (ZHENG et al., 2022).

2.4 Considerações Parciais

Ao longo deste capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais necessários para a compreensão das Superfícies Refletoras Inteligentes e de sua relevância no contexto das futuras redes móveis 6G. Inicialmente, foi discutida a arquitetura de uma IRS, evidenciando a composição da metassuperfície, o papel dos meta-átomos e do controlador responsável pela reconfiguração dinâmica das propriedades eletromagnéticas da superfície. Em seguida, foram descritas as principais técnicas de reconfiguração abordadas na literatura — elétrica, mecânica e óptica — destacando seus princípios de funcionamento, características, vantagens, limitações e diferenças quanto à complexidade de implementação, velocidade de resposta e consumo de energia.

Também foram apresentados exemplos de aplicações práticas que demonstram o potencial das IRS em cenários típicos das redes 6G, como cidades inteligentes, ambientes industriais, comunicações não terrestres e sistemas de comunicação assistidos por UAVs. Esses exemplos evidenciam a capacidade da tecnologia em melhorar a cobertura, reduzir interferências, aumentar a eficiência energética e contribuir para comunicações mais confiáveis, mesmo em ambientes sujeitos a bloqueios e elevada atenuação do sinal.

3 Trabalhos Relacionados

Diversos autores já conduziram várias soluções e estudos inovadores relacionados com IRS. Uma das principais considerações é na realização das técnicas de reconfigurabilidade para que seja possível atingir com precisão absoluta o controle da onda que será refletida pela antena. Outra consideração importante é a otimização e performance das técnicas de implementação para que seja possível ter uma cobertura ótima com a menor latência possível.

Neste capítulo também serão fornecidos exemplos de implementações e casos de uso demonstrados na literatura que comprovam a importância da tecnologia de Superfície Refletora Inteligente, a aplicação e de sua viabilidade em casos práticos envolvendo redes 6G.

3.1 Visão Geral: 6G

Se tratando da evolução de redes móveis, caminhando para sua próxima geração (6G), os autores Jiang et al. (2021) se comprometeram em abordar de forma geral os conceitos envolvendo a sexta geração de redes móveis, fornecendo uma pesquisa abrangente em termos de drives, casos de uso, cenários de uso, requisitos, indicadores de desempenho, arquitetura e por fim tecnologias facilitadoras.

Para isso, os autores começam lançando uma luz sobre os principais fatores que impulsionam essa evolução, prevendo o crescimento do tráfego móvel até 2030 e mostram possíveis casos e cenários de uso. Além disso, os requisitos técnicos do 6G são discutidos e assim comparados com o da quinta geração de forma quantitativa. E por fim, os esforços e atividades de pesquisa de instituições e países são resumidos. Com essas informações, um roteiro provisório, especificação, padronização e regulamentação são projetados. Os autores também identificam as tecnologias potenciais e apresentam seus princípios, vantagens e desafios.

Nesse artigo, os autores concluíram uma evolução tradicional de uma nova geração

a cada década e espera-se que a primeira rede 6G seja implantada em 2030, essa nova geração incorporará casos de uso e aplicações introduzidas no 5G, como IoT, Indústria 4.0, realidade virtual, condução automática com maior qualidade e mais econômica. Além disso, haverá casos de uso que não podem ser suportados por 5G, como inteligência difusa, conectividade global, irmãos gêmeos e comunicações holográficas. A nova geração deve atender a requisitos extremamente rigorosos em latência, confiabilidade, mobilidade e segurança, bem como fornecer um aumento substancial da cobertura, taxa de dados, capacidade do sistema e densidade de conectividade.

Como conclusão do artigo, foi previsto que com 6G haverá transformações importantes que irão torná-lo dramaticamente diferente das gerações anteriores, como: Mudança de uma rede de comunicação de rádio para uma baseada em rádio-óptico, aproveitando tanto a eletrônica quanto tecnologias óticas, explorando a abundância espectral. A nova geração também se tornará uma plataforma inteligente conectada que maximizará a sinergia entre IA e dispositivos móveis, facilitando o provisionamento de aplicativos, por outro lado, terá uma interface orientada por IA, assim como algoritmos, protocolos e abordagens irão ser aplicadas para implementar transmissões altamente eficientes, com otimização e controle e gerenciamento de recursos. Além de redes terrestres, a nova geração irá fornecer uma cobertura 3D onipresente em toda superfície do planeta através de um espaço integrado.

3.2 Visão Geral da Tecnologia IRS

A fim de um melhor entendimento sobre a tecnologia de IRS, autores Wu et al. (2021) deste artigo buscam fornecer uma visão geral sobre redes sem fio auxiliadas por IRS, e também elaborar modelos de reflexão e canal, arquitetura de hardware da tecnologia e suas restrições práticas, assim como várias aplicações práticas, além de destacarem vários caminhos importantes que merecem uma investigação mais aprofundada em trabalhos futuros envolvendo IRS em redes sem fio.

No artigo abordado, os autores mostraram que a comunicação sem fio auxiliada por IRS levou a uma mudança de paradigmas fundamentais no design de redes sem fio com comunicação ativa por componentes para uma nova arquitetura híbrida, arquitetura

essa que compreende tanto os componentes ativos e componentes passivos que trabalham juntos. Porém, foi abordado pelos autores que a pesquisa e desenvolvimento sobre essa tecnologia sem fio auxiliada por IRS ainda está em sua infância, e com isso em mente, elaboraram alguns desafios e possíveis direções para ajudar em futuras pesquisas envolvendo redes sem fio auxiliadas pelo IRS, esses desafios e caminhos abrangendo desde modelagem de canais para projetos de feixe IRS e sua implantação.

Além disso, destacaram também tendência de pesquisas para aplicações consideradas importantes, incluindo a transferência de energia sem fio, comunicação UAV, segurança de camada, computação de borda móvel. Sendo que o objetivo final de alcançar um ambiente de rádio inteligente e reconfigurável requer uma implementação densa de IRS's em grupo explorando seu multi-hop de reflexões com formação de feixe passivo e roteamento de dados, exigindo um esforço significativo de pesquisa para conceber soluções para formação de feixe em uma sequência de IRS.

Para ajudar no entendimento da implementação do IRS, os autores ilustraram na figura 3.1 2 métodos diferentes: A implantação ideal de IRS único: O caso mais simples onde todo sinal refletido passar por apenas um único IRS com um bloqueio entre os dois pontos impossibilitando a passagem direta do sinal. Já no segundo caso, são utilizadas várias IRS em agrupamento para levar o sinal de um lado para o outro, simulando um ambiente onde a distância é maior ou o caminho mais complexo.

Consideramos o caso mais simples onde todo o N refletindo elementos formam um único IRS, conforme ilustrado na Figura 3.1 (a). Além disso, assumimos que tanto o AP quanto o usuário estão equipados com uma única antena, portanto, a taxa alcançável é exclusivamente determinada extraído pelo SNR de recebimento no usuário. Para focar nossa análise sobre o efeito da localização do IRS, consideramos o cenário onde o link direto do usuário-AP está bloqueado e os outros dois links de/para o IRS seguem o modelo de canal LoS de espaço livre.

Com isso, os autores do artigo esperam que o trabalho desenvolvido sirva como um recurso útil e inspirador para que futuras pesquisas sobre a tecnologia usem para liberar todo o seu potencial na geração futura de redes sem fio (6G).

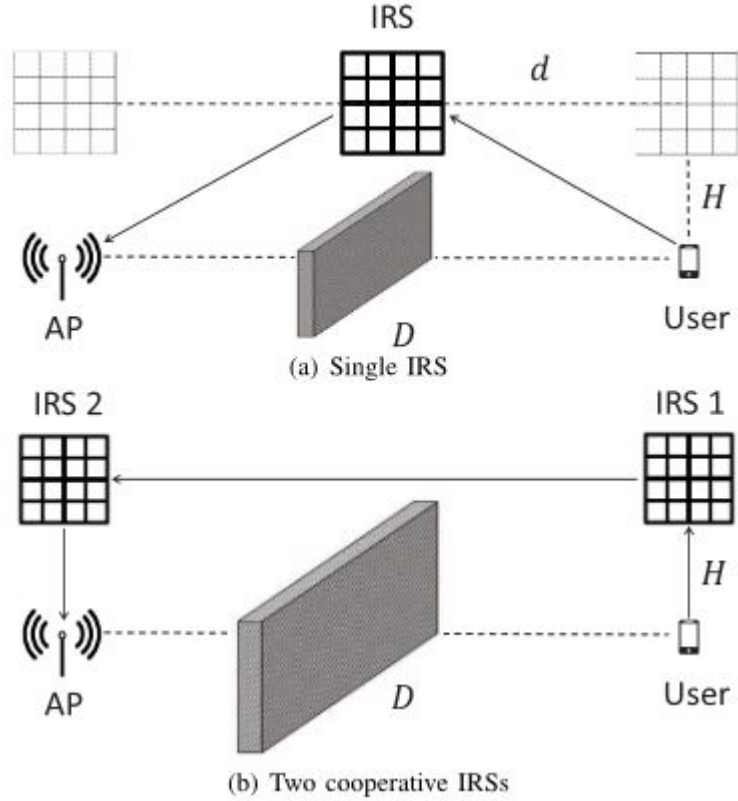


Figura 3.1: Implementação IRS (WU et al., 2021)

3.3 Otimização e Performance

Neste trabalho, os autores Alghamdi et al. (2020) examinam os *frameworks* de otimização e métodos de análise de desempenho para grandes superfícies inteligentes (IRS). Devido à sua capacidade de reconfiguração e ajustar o comportamento das ondas eletromagnéticas interativas por meio de manipulações inteligentes das mudanças de fase das reflexões, IRS mostraram méritos promissores na melhoria da eficiência espectral das redes sem fio.

Neste contexto, os pesquisadores têm recentemente explorado a fundo a tecnologia IRS como um meio para alcançar infra-estruturas de rede sem fio programáveis, virtualizadas e distribuídas. O artigo fornece uma combinação única que examina os princípios de operação do IRS, juntamente com suas estruturas de otimização e análise de desempenho. Com isso, apresenta primeiro a tecnologia IRS e seu princípio de funcionamento físico.

Em seguida, apresenta vários *frameworks* de otimização que visam otimizar objetivos específicos, como maximizar a eficiência energética, soma-taxa, sigilo-taxa e cobertura. A partir disso, são discutidas várias análises de desempenho, incluindo análise

de impacto de deficiência de hardware, capacidade, taxa de dados de *uplink/downlink* e probabilidade de interrupção.

Ao final dos estudos, foi verificado que a tecnologia não apenas melhora a *QoS* das redes sem fio, como também pode reduzir o consumo de energia em comparação às redes normais e reafirmando que é uma tecnologia promissora para sistemas de redes sem fio. De acordo com o conhecimento dos autores, esta pesquisa é a primeira de seu tipo que combina os aspectos técnicos da otimização matemática e análise de desempenho de sistemas IRS lançando ainda uma luz sobre direções de pesquisa promissoras para a formulação de problemas práticos em futuros sistemas.

3.4 Técnicas de Reconfiguração das Antenas

Neste artigo, os autores Parchin et al. (2020) revisam diferentes técnicas de implementação para antenas reconfiguráveis. Diferentes tipos de técnicas de implementação efetivas foram investigadas para serem usadas em vários sistemas de comunicação sem fio, como satélite, múltiplas entradas e saídas (MIMO), terminais móveis e comunicações de rádio cognitivas. Foram investigadas as propriedades e as características fundamentais das antenas reconfiguráveis.

Durante os estudos e as análises feitas pelos autores, foram apresentados diferentes metodologias e técnicas de implementação de antenas reconfiguráveis, essas técnicas de reconfiguração foram então classificadas em três tipos de estruturas: reconfiguração elétrica, óptica e mecânica. Também são discutidos várias aplicações de implementações e suas características. Cada mecanismo de reconfiguração adiciona um nível de complexidade que pode ter efeitos difíceis de prever com antecedência.

Analisando a reconfiguração do tipo elétrica, os autores chegaram à conclusão de que é a técnica mais comum com a utilização de chaves ativas e quando levado em consideração eficiência é a melhor solução, porém a capacidade de manuseio de energia e a vida útil dos *switches* utilizados são questões importantes. Em comparação com outros tipos de reconfiguração, a implementação é fácil mas requer um sistema de polarização complexo. Por outro lado, a abordagem fotocondutora não requer o uso de linhas de polarização e pode estar na placa-mãe da antena sem adicionar um sistema complexo para

modificar a estrutura radiante. Além disso, a ativação/desativação da chave não gera harmônicos e distorção de intermodulação. No entanto, em contraste com os interruptores ativos, os interruptores ópticos são menos populares devido ao comportamento com perdas e à necessidade de um mecanismo de ativação complexo. A principal vantagem da técnica de reconfiguração física é que não há necessidade de elementos ativos, sistemas de polarização ou fibras ópticas. Apesar de todas essas vantagens, a flexibilidade desse tipo de antena é limitada e é difícil fornecer características reconfiguráveis multifuncionais. Além disso, seu desempenho tem resposta lenta e requer uma fonte de alimentação com integração complexa. Para os sistemas de antena que não requerem reconfiguração rápida, esta abordagem é uma técnica atrativa

Assim, os autores não definiram o melhor tipo de técnica de reconfiguração para todos os casos, mas sim verificaram que para cada aplicação existe uma técnica que satisfaz melhor os seus requisitos e restrições.

3.5 Otimização de Feixe

Se tratando da otimização de feixes, os autores Wu e Zhang (2019a) estudaram no artigo uma rede sem fio auxiliada por IRS, onde a tecnologia é utilizada com um número finito de mudanças de fases em cada elemento implantado para auxiliar na comunicação de uma antena de ponto de acesso (AP) para vários usuários de uma antena única. O objetivo dos autores nesse estudo é minimizar a potência de transmissão no AP fazendo uma otimização conjuntamente com a pré-codificação de uma transmissão contínua no AP e as mudanças de fase de reflexão na IRS, que são sujeitas a um determinado conjunto mínimo de SINR nos receptores dos usuários.

O problema considerado neste artigo é considerado um problema do tipo MINLP e, assim, de difícil resolução em geral. Para resolver esse tipo de problema, primeiro os autores estudaram um caso de usuário único com um usuário assistido pela IRS e então propuseram algoritmos ótimos e sub ótimos. Feito isso, também mostraram de forma analítica que, se comparado com o caso ideal, a IRS com mudanças de fase discretas atingem o mesmo ganho de potência em termos de números assintoticamente grandes de elementos refletores, de forma que uma potência proporcional constante ocorre uma perda

que depende do número de níveis das mudanças de fase da IRS.

Depois de todas as simulações e estudos, os autores mostraram que o uso de IRS com deslocadores de fase de 1 bit ainda são capazes de alcançar o mesmo ganho de potência que no caso com deslocamento de fase contínuo, submetidos com uma perda apenas de potência constante em dB. Os resultados do estudo mostraram uma economia considerável de energia de transmissão que pode ser alcançada usando IRS e deslocamento de fase discretos se comparado com o caso sem o uso. O desempenho ganha em outras métricas, como a taxa alcançável de receber "SINR". Além disso, os autores revelaram que com a quantização direta, os deslocamentos de fase contínuos otimizados para obter fase discreta atingem um desempenho igual no modo de usuário único, enquanto que sua degradação no caso de multiusuário não é ordinário devido a sua severa interferência. E por fim, foi mostrado que o algoritmo desenvolvido e baseado no pré-codificador ZF é executado tão bem quanto o algoritmo baseado no MMSE, com a melhoria da classificação do canal multiusuário com os caminhos de sinal adicionais fornecidos pelo IRS.

3.6 Aprimoramento de Comunicações Anti-interferência Assistido por IRS

Entrando na questão da segurança de redes sem fio, os autores Yang et al. (2020) abordaram um dos desafios críticos de segurança em comunicações sem fio, estudando o bloqueio malicioso que pode ser lançado por bloqueadores inteligentes nas transmissões. Focando nisso, o artigo elaborado pelos autores considera o uso de uma superfície refletora inteligente (IRS) para aprimorar o desempenho da anti-interferência e mitigar a interferência gerada pelo bloqueio, ajustando os elementos refletores da superfície da IRS.

Com esse objetivo, os autores visaram melhorar o desempenho contra um bloqueador inteligente, e para isso, é formulado um problema de otimização para otimizar conjuntamente a alocação de energia na estação base (BS) e refletir a formação de feixe no IRS considerando a qualidade do serviço (QoS) com requisitos de usuários legítimos.

Foi verificado que com o auxílio da tecnologia de IRS, o sinal recebido na UEs legítimos foram aprimorados enquanto o dano causado pelo sinal de interferência gerado

pelo bloqueador inteligente foram mitigados. Foi desenvolvido um problema de otimização conjunta para mitigar a alocação de potência de transmissão na BS e o feixe refletido no IRS. Como o problema de otimização não-convexo não é trivial de resolver e o modelo do bloqueio ainda é desconhecido, uma abordagem de aprendizagem WoLF-PHC foi proposta para alcançar a estratégia anti-interferência ideal, onde o modelo WoLF-PHC e FSA foram capazes de alcançar rapidamente a política ótima sem a necessidade de conhecer o modelo de bloqueio utilizado em ambientes desconhecidos.

Os resultados obtidos com as simulações descritas no artigo confirmaram que o sistema assistido pela IRS melhora significativamente o desempenho anti-interferência e também foi possível verificar a eficácia da abordagem dos autores no modelo proposto em termos de melhorar o sistema, assim como o nível de proteção e segurança do serviço, em comparação com as outras abordagens existentes.

3.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais trabalhos relacionados às Superfícies Refletoras Inteligentes e às redes 6G, abordando diferentes aspectos da tecnologia, como arquitetura, técnicas de reconfiguração, algoritmos de otimização, segurança e integração com sistemas de comunicação de próxima geração. A Tabela 3.1 sintetiza as principais características dos estudos analisados, permitindo identificar suas contribuições e compará-las com a proposta desenvolvida neste trabalho.

Tabela 3.1: Comparativo das principais características dos trabalhos relacionados.

Autores / Trabalho	Objetivo	Característica	Contribuição
(WU et al., 2021)	Visão geral das IRS.	Arquitetura IRS	Base teórica sobre a arquitetura das IRS.
(ALGHAMDI et al., 2020)	Analisar otimização e desempenho.	Otimização.	Desafios de eficiência e cobertura.
(PARCHIN et al., 2020)	Revisar técnicas de reconfiguração.	Reconfiguração.	Base para comparação das técnicas.
(WU; ZHANG, 2019a)	Otimização de feixe.	Arquitetura e beamforming.	Direcionamento inteligente do sinal.
(YANG et al., 2020)	Mitigar interferências.	Segurança.	Aplicações em segurança física.
(JIANG et al., 2021)	Apresentar conceitos do 6G.	Arquitetura 6G.	Contextualização das redes 6G.

O estudo de Wu et al. (2021) constitui uma das principais referências da literatura sobre IRS, apresentando uma visão abrangente da arquitetura, dos princípios de funcionamento e dos modelos matemáticos que fundamentam essa tecnologia. Dessa forma, esse trabalho serviu como principal base teórica para a compreensão das IRS e de sua aplicação em redes 6G.

No contexto das técnicas de reconfiguração, o trabalho de Parchin et al. (2020) apresenta uma revisão das principais abordagens empregadas em antenas reconfiguráveis, fornecendo a base conceitual para o estudo comparativo das técnicas elétrica, mecânica e óptica desenvolvido neste trabalho.

Entre os trabalhos analisados, destacam-se os estudos de Wu et al. (2021) e Parchin et al. (2020), que constituíram a principal base bibliográfica para o desenvolvimento deste estudo. O artigo apresentado por Wu et al. (2021) forneceu a fundamentação teórica necessária para compreender a arquitetura das IRS, seus componentes, o princípio de funcionamento e os modelos matemáticos que descrevem o comportamento da superfície refletora inteligente. Já o trabalho de Parchin et al. (2020) serviu como principal referência para o estudo das técnicas de reconfiguração, fornecendo a base conceitual para a análise comparativa das abordagens elétrica, mecânica e óptica realizada ao longo deste trabalho.

4 Metodologia e Resultados

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias empregadas para o estudo das três abordagens de reconfiguração em antenas inteligentes, além dos resultados obtidos com a implementação e análise de cada técnica.

Este capítulo visa comparar essas três técnicas sob diferentes métricas, como eficiência, complexidade, custo e desempenho. Fornecendo uma análise comparativa entre os diferentes tipos de reconfiguração. A investigação proporcionou uma compreensão mais profunda das vantagens e limitações de cada abordagem, com base em critérios previamente estabelecidos na literatura.

4.1 Reconfiguração Elétrica

O tipo de reconfiguração mais estudado, que usa díodos positive-intrinsic-negative (PIN), varactores ou varicaps e interruptores de sistema microeletromecânicos como seu elemento principal. Esses comutadores permitem que a estrutura da antena seja ajustada, resultando em uma redistribuição da corrente de superfície e alterando suas principais características, como frequência, padrão de radiação e polarização. A implementação de antenas reconfiguráveis utilizando esses elementos de comutação é relativamente simples e tem atraído grande interesse em pesquisas (CAI; ZHANG; RAHMAT-SAMII, 2019; NGUYEN; PICHOT, 2019). A seguir, são discutidos diferentes métodos, além de exemplos de antenas reconfiguráveis eletricamente, destacando as vantagens e desvantagens de cada abordagem com o uso de díodos PIN, varactores ou comutadores MEMS.

4.1.1 Díodos PIN

O princípio de funcionamento do diodo PIN baseia-se na variação da corrente de polarização entre os estados ALTO e BAIXO. Quando polarizado diretamente (estado ON), o diodo apresenta baixa impedância, permitindo a passagem da corrente elétrica e alterando o comportamento eletromagnético do meta-átomo. Quando polarizado reversamente (es-

tado OFF), sua impedância torna-se elevada, bloqueando a corrente e modificando novamente a resposta da superfície. Dessa forma, os diodos PIN possibilitam realizar comutação, modulação por pulsos, mudança de fase e atenuação de sinais de radiofrequência (BHATTACHARYA; JYOTI, 2015).

Nas IRS, cada meta-átomo pode possuir um ou mais diodos PIN responsáveis por alterar sua impedância elétrica. A combinação dos estados ON e OFF dos diferentes elementos permite controlar a fase das ondas refletidas, direcionando o feixe para regiões específicas, reduzindo interferências ou aumentando a potência do sinal recebido. Esse controle eletrônico torna possível adaptar rapidamente o comportamento da superfície conforme as mudanças do ambiente ou da posição dos usuários (BENECK ARKAPROVO DAS, 2021).

Em uma Superfície Refletora Inteligente, essa comutação altera a impedância dos meta-átomos que compõem a metassuperfície e permite controlar a fase das ondas eletromagnéticas refletidas. Como consequência, torna-se possível direcionar o feixe.

A Figura 4.1 mostra um protótipo utilizando diodos PIN integrados à superfície. Esses dispositivos são responsáveis por modificar a impedância dos elementos irradiantes por meio da corrente de polarização, permitindo alterar dinamicamente a resposta da antena conforme a configuração desejada.

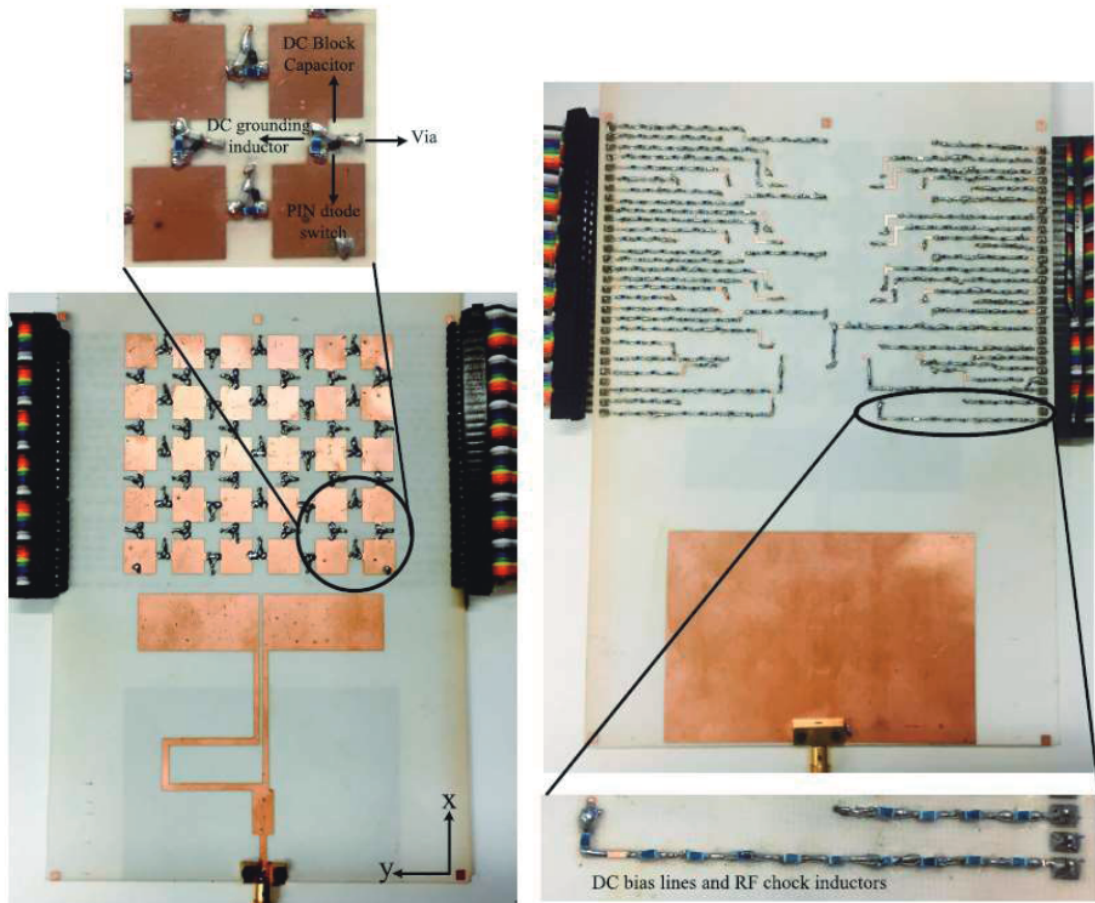


Figura 4.1: Antena Elétrica Reconfigurável(BENECK ARKAPROVO DAS, 2021)

Como principais vantagens, a utilização de diodos PIN apresenta baixo custo de fabricação, elevada confiabilidade, tamanho compacto, facilidade de integração com antenas e IRS, alta velocidade de comutação na ordem de nanossegundos e capacidade de operar com sinais de alta potência. Além disso, seu controle é relativamente simples, permitindo a reconfiguração dinâmica da fase das ondas refletidas e tornando essa tecnologia uma das mais utilizadas em pesquisas e aplicações práticas de Superfícies Refletoras Inteligentes.

Por outro lado, essa técnica também apresenta algumas limitações. Os diodos PIN requerem corrente contínua para polarização, apresentam comportamento não linear e introduzem perdas por inserção e dissipação de potência durante a propagação do sinal. Outro desafio importante é que, à medida que cresce o número de elementos refletivos da IRS, aumenta também a complexidade das linhas de polarização e dos circuitos de con-

trole, dificultando a implementação de superfícies de grande escala e elevando o consumo de energia do sistema (ALI; SAYEM; KUNDA, 2007).

Na prática, os diodos PIN são especialmente indicados para cenários em que a IRS precisa realizar reconfigurações rápidas do feixe de comunicação. Um exemplo é um escritório inteligente, onde pessoas se movimentam constantemente entre salas e corredores, provocando bloqueios temporários do sinal. Nessa situação, a IRS identifica a posição do usuário e altera rapidamente o estado dos diodos PIN entre ON e OFF, modificando a impedância dos meta-átomos e redirecionando o feixe refletido para contornar os obstáculos. Como consequência, zonas de sombra são reduzidas e a conexão permanece estável, mesmo com mudanças frequentes no ambiente (BENECK ARKAPROVO DAS, 2021).

4.1.2 Varactor

Varactores são capacitores controlados por tensão, possuem rápidas velocidades de comutação, e podem ser facilmente integrados a circuitos de antenas devido ao seu tamanho compacto (RAJAGOPALAN; KOVITZ; RAHMAT-SAMII, 2014a; GREGORY; MARTIN; WERNER, 2015). Eles são utilizados para ajustes rápidos e simples, oferecendo uma ampla faixa de ajuste (GREGORY; MARTIN; WERNER, 2015). Além de serem pequenos, os varactores têm um custo baixo. Como os interruptores baseados em diodos varactores operam com tensões de polarização reversa, eles consomem menos corrente em comparação com os interruptores PIN e MEMS, o que resulta em um consumo de energia mais baixo. Com um pequeno número de interruptores, é possível obter múltiplos modos de operação e maior flexibilidade (SRIVASTAVA; MISHRA; SINGH, 2015). Porém, o uso de varactores para reconfiguração é limitado devido à sua resposta não linear e à necessidade de tensões elevadas (RAJAGOPALAN; KOVITZ; RAHMAT-SAMII, 2014a).

O varactor apresenta uma característica não linear e uma faixa dinâmica limitada. Ele também demanda um circuito de polarização mais complexo. No entanto, em comparação com outros elementos ativos, como diodos PIN ou interruptores MEMS, o varactor possui baixa corrente de operação e permite ajustes contínuos de frequência. (PARCHIN et al., 2020)

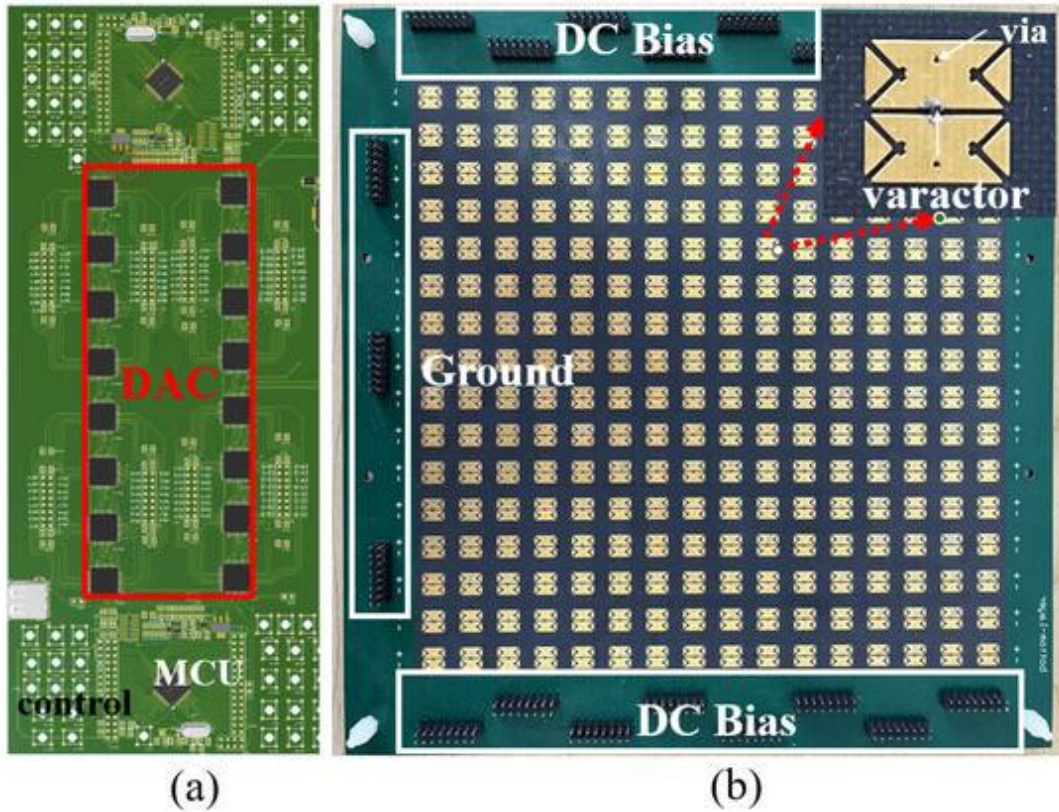


Figura 4.2: Metasuperfície com Diodo Varactor (SUN et al., 2023)

A Figura 4.2 apresenta um exemplo de IRS reconfigurável utilizando diodos varactores. Nesse sistema, um microcontrolador calcula o padrão de reflexão desejado com base nas condições do ambiente e nos requisitos de comunicação. Em seguida, os comandos digitais são enviados para conversores digital-analógicos, responsáveis por gerar diferentes tensões de polarização para cada elemento da metassuperfície.

Cada tensão aplicada ajusta continuamente a capacitância do respectivo diodo varactor, modificando sua impedância elétrica e, conseqüentemente, a fase da onda refletida por aquele meta-átomo. Como cada elemento pode ser configurado de maneira independente, a IRS estabelece uma distribuição controlada de fases ao longo da superfície, permitindo direcionar dinamicamente o feixe eletromagnético para diferentes usuários ou regiões de interesse, sem necessidade de movimentação mecânica da antena ou da própria superfície (SUN et al., 2023; WU; ZHANG, 2019a).

Como principais vantagens, os diodos varactores apresentam dimensões reduzidas, baixo custo de fabricação, baixa corrente de operação e elevada velocidade de resposta.

Sua principal característica é permitir um controle contínuo da capacitância, possibilitando ajustes finos e precisos da fase das ondas refletidas, diferentemente dos diodos PIN, que normalmente operam em estados discretos. Essa capacidade torna os varactores especialmente interessantes em aplicações que exigem *beamforming* adaptativo e sintonia contínua da frequência de operação. Além disso, um número reduzido de dispositivos pode proporcionar diversos modos de funcionamento da IRS, aumentando sua flexibilidade (GREGORY; MARTIN; WERNER, 2015; SRIVASTAVA; MISHRA; SINGH, 2015).

Por outro lado, essa tecnologia também apresenta limitações importantes. O comportamento não linear dos varactores pode introduzir distorções na resposta do sistema, principalmente em aplicações de alta potência. Sua faixa dinâmica é limitada e o controle contínuo da capacitância exige circuitos de polarização mais complexos e tensões relativamente elevadas.(RAJAGOPALAN; KOVITZ; RAHMAT-SAMII, 2014a; PARCHIN et al., 2020).

Os diodos varactores são mais indicados para aplicações que exigem ajustes contínuos e precisos da fase das ondas refletidas. Um exemplo é a comunicação entre uma estação-base e um veículo autônomo em movimento. Nesse cenário, a posição do veículo muda continuamente, exigindo que a IRS acompanhe essas variações de forma suave. Ao alterar gradualmente a tensão de polarização aplicada aos varactores, sua capacitância também varia continuamente, modificando a impedância dos meta-átomos e ajustando a fase das ondas refletidas. Como resultado, o feixe eletromagnético acompanha o deslocamento do veículo com maior precisão, reduzindo erros de direcionamento e melhorando a qualidade da comunicação (GREGORY; MARTIN; WERNER, 2015; SUN et al., 2023).

4.1.3 MEMS

Os *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS), ou sistemas microeletromecânicos, são dispositivos que integram componentes mecânicos e eletrônicos em uma única estrutura fabricada em escala micrométrica. Em aplicações de radiofrequência, esses dispositivos são utilizados principalmente como microinterruptores, capazes de controlar o caminho percorrido pelo sinal eletromagnético com baixas perdas de inserção e elevado isolamento

entre os estados de operação (PARCHIN et al., 2020).

Em uma Superfície Refletora Inteligente, os MEMS são incorporados aos meta-átomos da metassuperfície. O acionamento desses interruptores modifica a impedância elétrica de cada elemento refletor, alterando a fase da onda eletromagnética refletida. Dessa forma, milhares de interruptores MEMS podem operar de maneira coordenada, permitindo que a IRS direcione dinamicamente o feixe eletromagnético para a posição do usuário, característica essencial para aplicações em comunicações 6G, especialmente nas bandas de ondas milimétricas (PARCHIN et al., 2020).

O princípio de funcionamento de um interruptor MEMS baseia-se na atuação eletrostática. Inicialmente, sem tensão aplicada (*estado OFF*), uma pequena ponte metálica permanece suspensa, mantendo o circuito aberto e impedindo a condução do sinal por determinado caminho. Quando o controlador da IRS aplica uma tensão entre o eletrodo e essa ponte metálica, uma força eletrostática é gerada, atraindo a ponte para baixo. Ao entrar em contato com o eletrodo (*estado ON*), o circuito é fechado, permitindo a passagem da corrente de radiofrequência. Como consequência, ocorre uma alteração na impedância do meta-átomo, modificando a fase da onda refletida. Esse mecanismo de abertura e fechamento é repetido continuamente pelos diversos elementos da metassuperfície, possibilitando o controle do feixe refletido.

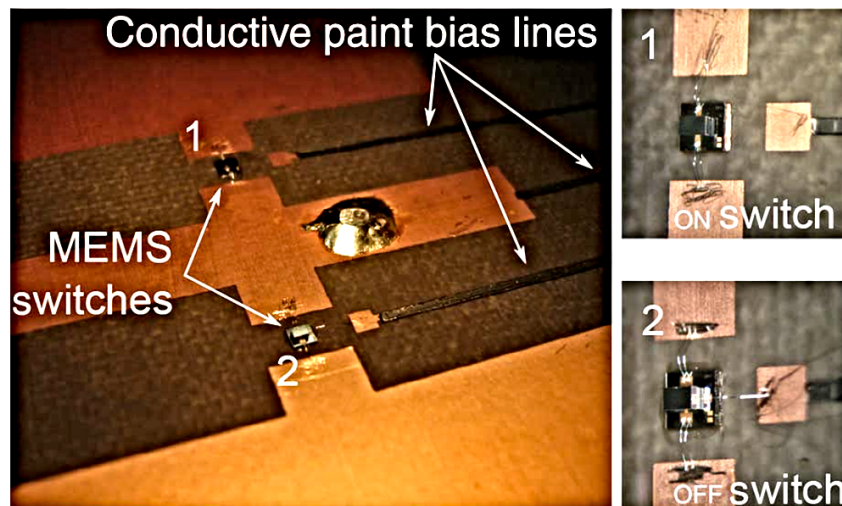


Figura 4.3: Visão ampliada da implementação do interruptor (KOVITZ; RAJAGOPALAN; RAHMAT-SAMII, 2015).

A Figura 4.3 apresenta uma visão ampliada do interruptor MEMS utilizado nesse

projeto. Observa-se a ponte metálica suspensa responsável pela comutação eletromecânica do dispositivo. A aplicação da tensão de controle desloca mecanicamente essa ponte, estabelecendo ou interrompendo o contato elétrico e alterando a resposta eletromagnética do elemento refletor. Esse tipo de estrutura apresenta dimensões micrométricas e elevada precisão de fabricação, permitindo excelente desempenho em aplicações de alta frequência (KOVITZ; RAJAGOPALAN; RAHMAT-SAMII, 2015).

Os interruptores MEMS são geralmente limitados em aspectos como encapsulamento, confiabilidade e capacidade de manuseio de potência (JODAKI; VALIEE; BAYAT, 2013; SOLTANI; LOTFI; MURCH, 2016). Esses interruptores têm uma resposta mais lenta e uma faixa de ajuste menor em comparação com os diodos PIN e varactores. Entretanto, ao se comparar com a integração de componentes discretos no design da antena, a fabricação monolítica que combina antena e interruptores ajuda a reduzir perdas e efeitos parasitas (KOWALEWSKI et al., 2016). Além disso, interruptores MEMS demandam redes de adaptação complexas (RAJAGOPALAN; KOVITZ; RAHMAT-SAMII, 2014b) e, se forem usados em dispositivos de comunicação portáteis, precisam de chips conversores de tensão adicionais, com níveis de conversão de 30 a 90 V. O processo de integração desses interruptores em placas de circuito impresso (PCBs) é relatado como sendo desafiador. Outra desvantagem é a necessidade de tensões elevadas para ativação, o que reduz a confiabilidade desses dispositivos em aplicações práticas (KOWALEWSKI et al., 2016; RAJAGOPALAN; KOVITZ; RAHMAT-SAMII, 2014b; YANG et al., 2015). No estudo (YUAN et al., 2012), é apresentada uma antena reconfigurável multifuncional com uma camada parasítica e interruptores MEMS interconectados, conforme mostrado na Figura 8. Essa antena ajusta sua polarização ou padrão de radiação conforme as combinações dos interruptores. Nos últimos anos, foram demonstrados diversos exemplos de antenas monopolo reconfiguráveis em espiral, antenas reconfiguráveis em formato de anéis concêntricos e antenas reconfiguráveis em frequência, todas utilizando interruptores MEMS (BENECK ARKAPROVO DAS, 2021).

Esses interruptores operam através de movimento mecânico para criar ou interromper circuitos em sistemas de radiofrequência (RF). Eles podem ser configurados de diferentes maneiras, dependendo do caminho do sinal (série ou derivação), do me-

canismo de acionamento (eletrostático, térmico ou magnetostático), do tipo de contato (ômico ou capacitivo) e da estrutura (em balanço ou ponte). A força necessária para o movimento mecânico é gerada por mecanismos como o acionamento eletrostático ou magnetostático. Interruptores MEMS para RF, são utilizados em sistemas de radar, analisadores de rede, sistemas de comunicação via satélite e estações base (JAAFAR; MISKAM; ABDUL-RAHMAN, 2010).

Um interruptor MEMS de derivação para RF é diferente de um interruptor em série, pois consiste em uma ponte de metal fina e móvel suspensa sobre o condutor central, ancorada em ambas as extremidades à linha de aterramento da linha de transmissão. Esses interruptores operam através de circuitos abertos e fechados para transmitir sinais (KINGSLEY; WANG; PAPAPOLYMEROU, 2006).

Entre as principais vantagens dos interruptores MEMS destacam-se as baixas perdas de inserção, o alto isolamento entre os estados ligado e desligado, a excelente linearidade, o baixo consumo de energia após a comutação e o elevado desempenho em frequências de micro-ondas e ondas milimétricas. Essas características tornam essa tecnologia particularmente interessante para aplicações de alto desempenho em redes 6G, enlaces *backhaul/fronthaul* e comunicações via satélite.

Entretanto, os MEMS também apresentam algumas limitações. Em comparação com os diodos PIN, sua velocidade de comutação é menor, ocorrendo tipicamente na ordem de microssegundos, enquanto os diodos PIN operam em nanossegundos. Além disso, a fabricação desses dispositivos é mais complexa e possui um custo mais elevado, exigindo processos de microfabricação, encapsulamento especializado e, frequentemente, tensões relativamente elevadas para acionamento. Outro fator limitante é a presença de partes móveis, que podem sofrer desgaste mecânico após um grande número de ciclos de operação, reduzindo sua confiabilidade em aplicações que exigem comutação extremamente frequente (JODAKI; VALIEE; BAYAT, 2013; KOWALEWSKI et al., 2016)

MEMS são mais indicados para aplicações que exigem elevado desempenho em frequências de micro-ondas e ondas milimétricas, além de baixíssimas perdas durante a propagação do sinal. Um exemplo é o enlace de backhaul entre prédios em uma rede 6G. Nesse cenário, uma IRS instalada na fachada de um edifício utiliza milhares de interrup-

tores MEMS para ajustar dinamicamente a fase das ondas refletidas, compensando pequenas variações no alinhamento causadas pelo vento, vibrações estruturais ou mudanças na demanda da rede. Dessa forma, é possível manter enlaces altamente direcionados, com elevada eficiência e baixa perda de sinal, características fundamentais para comunicações de alta capacidade (KOVITZ; RAJAGOPALAN; RAHMAT-SAMII, 2015; PARCHIN et al., 2020).

4.2 Reconfiguração Óptica

A reconfiguração óptica utiliza fontes de luz para controlar dinamicamente o comportamento eletromagnético da metassuperfície. Diferentemente da reconfiguração elétrica, que depende de dispositivos eletrônicos como diodos PIN, varactores ou MEMS, essa abordagem emprega materiais fotossensíveis, cuja condutividade ou permissividade elétrica é modificada pela incidência de luz. Como consequência, ocorre uma alteração na impedância dos meta-átomos, permitindo controlar a fase e, em alguns casos, a amplitude das ondas eletromagnéticas refletidas, tornando possível o direcionamento inteligente do feixe (PARCHIN et al., 2020; TAWK et al., 2010; PENDHARKER; SHEVGAONKAR; CHANDORKAR, 2014).

Uma das formas de implementação dessa técnica consiste na utilização de fibras ópticas para transportar a luz até a metassuperfície. Nesse tipo de reconfiguração, um conjunto de fibras ópticas distribui a iluminação para diferentes regiões da IRS de maneira precisa e controlada. Cada fibra óptica conduz um feixe luminoso até uma região específica da metassuperfície, iluminando apenas os meta-átomos desejados. Essa abordagem proporciona elevada precisão na distribuição da luz, além de apresentar baixas perdas durante a transmissão óptica e total imunidade à interferência eletromagnética, característica importante em ambientes com grande quantidade de equipamentos eletrônicos (PATRON; DARYOUSH; DANDEKAR, 2014; PARCHIN et al., 2020).

Os meta-átomos da metassuperfície são fabricados com materiais fotossensíveis, como silício fotocondutor ou materiais de mudança de fase. Quando iluminados pelas fibras ópticas, esses materiais alteram sua condutividade ou permissividade elétrica, modificando a impedância de cada elemento refletor. Assim como ocorre na reconfiguração

elétrica, cada meta-átomo passa a refletir a onda eletromagnética com uma fase diferente. A combinação dessas diferenças de fase faz com que as ondas refletidas se somem construtivamente na direção desejada e destrutivamente nas demais direções, formando um feixe concentrado em um usuário específico (ALIZADEH et al., 2016; PATRON; DARYOUSH; DANDEKAR, 2014).

O controlador da IRS determina quais regiões da metassuperfície devem ser iluminadas pelo conjunto de fibras ópticas. Dessa forma, alterando o padrão de iluminação, torna-se possível redirecionar dinamicamente o feixe para diferentes usuários, permitindo que a mesma superfície atenda simultaneamente ou alternadamente múltiplos dispositivos conectados, conforme a necessidade da rede (PATRON; DARYOUSH; DANDEKAR, 2014).

Outra abordagem consiste na reconfiguração óptica por laser. Nessa técnica, um feixe de laser incide diretamente sobre regiões específicas da metassuperfície, dispensando conexões elétricas individuais para cada meta-átomo. A luz modifica as propriedades dos materiais fotossensíveis presentes na superfície, como silício fotocondutor ou materiais de mudança de fase, alterando sua impedância e, conseqüentemente, a fase das ondas eletromagnéticas refletidas (TAWK et al., 2010; ZHENG; LIU; TENTZERIS, 2014; PENDHARKER; SHEVGAONKAR; CHANDORKAR, 2014).

O funcionamento dessa técnica inicia-se quando a estação rádio-base transmite o sinal em direção à IRS. Em seguida, um controlador, normalmente auxiliado por algoritmos de beamforming e inteligência artificial, determina a posição do usuário e calcula a configuração ideal da metassuperfície. Com base nessa informação, um feixe laser ilumina seletivamente determinadas regiões da IRS. A incidência da luz provoca alterações físicas nos materiais fotossensíveis dos meta-átomos, modificando sua impedância elétrica. Como consequência, cada elemento passa a refletir a onda incidente com uma fase diferente. Assim como na reconfiguração elétrica, a combinação das fases refletidas produz interferência construtiva na direção do usuário e interferência destrutiva nas demais direções, permitindo direcionar dinamicamente o feixe eletromagnético (ZHENG; LIU; TENTZERIS, 2014; PENDHARKER; SHEVGAONKAR; CHANDORKAR, 2014; TAWK et al., 2010).

Entre as principais vantagens da reconfiguração óptica destacam-se a elevada

velocidade de reconfiguração, o controle preciso do feixe refletido, a imunidade à interferência eletromagnética e o grande potencial para aplicações em frequências THz. Além disso, como o acionamento ocorre por meio da luz, elimina-se a necessidade de redes complexas de polarização elétrica distribuídas pela metassuperfície (PARCHIN et al., 2020; PATRON; DARYOUSH; DANDEKAR, 2014).

Entretanto, essa tecnologia também apresenta limitações importantes. A implementação requer alinhamento óptico preciso entre a fonte luminosa e a metassuperfície, possui custo elevado devido aos dispositivos ópticos e aos materiais fotossensíveis utilizados, além de ser sensível a vibrações e desalinhamentos. Outro desafio é que essa abordagem ainda se encontra em estágio inicial de pesquisa, existindo poucos protótipos especificamente desenvolvidos para Superfícies Refletoras Inteligentes voltadas às futuras redes 6G (PARCHIN et al., 2020; TAWK et al., 2010; ZHENG; LIU; TENTZERIS, 2014).

Na prática, a reconfiguração óptica por fibra óptica é indicada para cenários que exigem distribuição precisa da iluminação sobre grandes metassuperfícies. Um exemplo é uma IRS instalada na fachada de um aeroporto, onde uma central de controle distribui sinais ópticos por meio de um arranjo de fibras ópticas até diferentes regiões da metassuperfície. Cada fibra ilumina seletivamente um conjunto de meta-átomos, alterando suas propriedades eletromagnéticas e permitindo direcionar dinamicamente o feixe para diferentes áreas do terminal ou para múltiplos usuários simultaneamente. Como a transmissão dos comandos ocorre por fibras ópticas, o sistema apresenta baixas perdas, imunidade à interferência eletromagnética e elevada precisão no controle da superfície, características importantes para ambientes com alta concentração de equipamentos eletrônicos e grande fluxo de pessoas (PATRON; DARYOUSH; DANDEKAR, 2014; ALIZADEH et al., 2016; PARCHIN et al., 2020).

Já a reconfiguração óptica por laser é especialmente indicada para aplicações que exigem elevada velocidade e precisão no direcionamento do feixe. Um exemplo é uma fábrica inteligente, na qual robôs móveis e veículos autônomos utilizam enlaces em frequências milimétricas ou THz para troca de dados em tempo real. Nesse cenário, um sistema de controle identifica continuamente a posição de cada robô e direciona um feixe laser para regiões específicas da metassuperfície. A iluminação modifica as proprieda-

des dos materiais fotossensíveis dos meta-átomos, alterando a fase das ondas refletidas e permitindo que a IRS acompanhe o deslocamento dos robôs, mantendo enlaces de alta velocidade, baixa latência e elevada confiabilidade durante toda a operação (TAWK et al., 2010; PENDHARKER; SHEVGAONKAR; CHANDORKAR, 2014; ZHENG; LIU; TENTZERIS, 2014; PARCHIN et al., 2020).

4.3 Reconfiguração Mecânica

A reconfiguração mecânica é o segundo tipo de técnica utilizado em antenas e Superfícies Refletoras Inteligentes. Diferentemente da reconfiguração elétrica, que altera as propriedades eletromagnéticas da metassuperfície por meio de componentes eletrônicos, como diodos PIN, varactores e MEMS, essa abordagem modifica fisicamente a geometria ou a posição da metassuperfície. Essas alterações geométricas modificam a distribuição das correntes superficiais e, conseqüentemente, a fase, a amplitude ou a direção das ondas eletromagnéticas refletidas (PARCHIN et al., 2020; TAWK et al., 2017; MA et al., 2016).

A reconfiguração mecânica pode ser implementada por diferentes métodos. Um dos mais utilizados consiste na rotação de elementos refletivos, em que um meta-átomo ou um conjunto de elementos é rotacionado para alterar sua resposta eletromagnética. Outra abordagem bastante explorada utiliza estruturas dobráveis inspiradas em origami e kirigami, nas quais a deformação da superfície modifica sua geometria e, conseqüentemente, suas características de reflexão. Essas deformações podem ser produzidas por motores, microatuadores ou materiais flexíveis capazes de alterar a forma da metassuperfície de maneira controlada (TAWK et al., 2017; MA et al., 2016; HUFF et al., 2017; JANG et al., 2017).

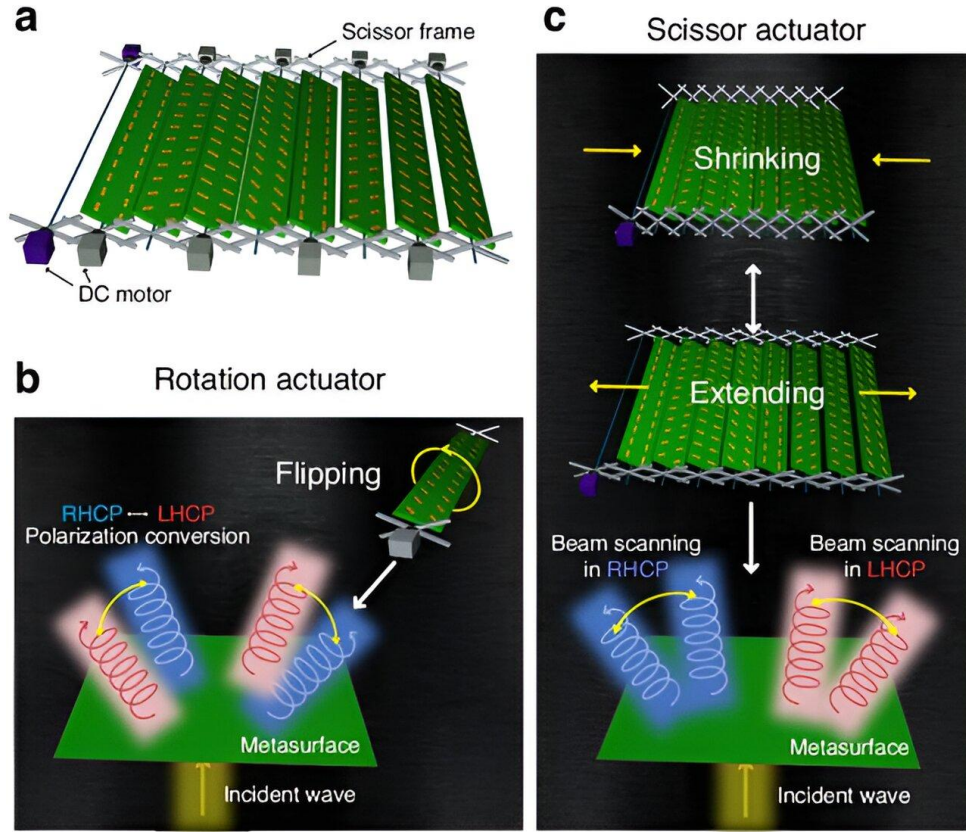


Figura 4.4: Metasuperfície Mecanicamente Reconfigurável (BENECK et al., 2021).

A Figura 4.4 apresenta um exemplo de metassuperfície mecanicamente reconfigurável baseada em uma estrutura articulada do tipo scissor frame. Nesse sistema, motores realizam a rotação, expansão ou contração da superfície, alterando sua geometria física. Essas deformações modificam a posição relativa dos patches metálicos e, consequentemente, a fase das ondas refletidas, permitindo converter a polarização e direcionar dinamicamente o feixe eletromagnético. Diferentemente da reconfiguração elétrica, essa abordagem normalmente altera toda a metassuperfície ou grandes regiões dela, em vez de controlar individualmente cada meta-átomo (BENECK et al., 2021)

O funcionamento dessa técnica pode ser compreendido considerando uma aplicação em satélites. Durante o lançamento, a IRS permanece dobrada para reduzir o volume ocupado pela carga útil. Após a entrada em órbita, a estrutura é desdobrada, aumentando sua área efetiva de reflexão. Posteriormente, caso seja necessário atender outra região da Terra, pequenos atuadores deformam parcialmente a metassuperfície. Essa deformação altera a posição dos patches metálicos, modificando a fase das ondas refletidas e, conse-

quentemente, redirecionando o feixe eletromagnético para uma nova área de cobertura, sem a necessidade de substituir ou adicionar componentes eletrônicos à superfície (MA et al., 2016; HUFF et al., 2017).

Entre as principais vantagens da reconfiguração mecânica destacam-se a estrutura relativamente simples, a ausência de circuitos eletrônicos complexos de polarização em muitos projetos, as baixas perdas elétricas e a elevada estabilidade eletromagnética. Essas características tornam essa técnica interessante para protótipos experimentais, aplicações espaciais e antenas reconfiguráveis em que a velocidade de resposta não é o principal requisito (PARCHIN et al., 2020; MA et al., 2016).

Entretanto, essa abordagem também apresenta limitações importantes. A velocidade de reconfiguração é significativamente inferior à dos métodos elétricos, uma vez que depende do movimento físico da estrutura. Além disso, mecanismos móveis aumentam a complexidade mecânica do sistema, estão sujeitos a desgaste ao longo do tempo e dificultam a miniaturização de metassuperfícies contendo milhares de elementos. Por esse motivo, a reconfiguração mecânica é menos indicada para cenários com usuários altamente móveis, nos quais o direcionamento do feixe precisa ser atualizado em escalas de microssegundos ou nanossegundos, como ocorre em muitas aplicações previstas para as redes 6G (PARCHIN et al., 2020; TAWK et al., 2017; HUFF et al., 2017).

5 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo sobre as principais técnicas de reconfiguração aplicadas às Superfícies Refletoras Inteligentes (IRS) para futuras redes 6G, com foco nas abordagens elétrica, óptica e mecânica. Ao longo da análise, foi possível compreender o funcionamento de cada técnica, bem como identificar suas principais características, vantagens, limitações e cenários de aplicação.

Tabela 5.1: Comparação das principais características das técnicas de reconfiguração de IRS.

Característica	PIN	Varactor	MEMS	Fibra	Laser	Mecânica
Tipo de acionamento	Elétrico	Elétrico	Elétrico	Óptico	Óptico	Mecânico
Velocidade de reconfiguração	Alta	Alta	Média	Alta	Muito alta	Baixa
Controle contínuo da fase		X		X	X	X
Necessita circuito de polarização	X	X	X			
Baixas perdas elétricas			X	X	X	X
Complexidade de implementação	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Média
Custo de implementação	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto	Médio
Adequado para usuários móveis	X	X		X	X	
Maturidade da tecnologia	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Média

A reconfiguração elétrica mostrou-se a tecnologia mais consolidada e amplamente empregada na literatura, principalmente pela elevada velocidade de resposta, facilidade de integração aos sistemas de comunicação e capacidade de realizar o controle dinâmico do feixe por meio de componentes como diodos PIN, varactores e interruptores MEMS. Entretanto, essa abordagem exige circuitos de polarização para o acionamento dos dispositivos eletrônicos e apresenta perdas associadas aos próprios componentes utilizados na metassuperfície.

A reconfiguração óptica, por sua vez, demonstrou ser uma alternativa promissora para aplicações em frequências extremamente elevadas, oferecendo excelente isolamento

eletromagnético, elevada precisão no controle do feixe e eliminando a necessidade de linhas metálicas de polarização. Apesar dessas vantagens, essa tecnologia ainda enfrenta desafios relacionados ao elevado custo dos sistemas ópticos, à necessidade de alinhamento preciso entre a fonte luminosa e a metassuperfície e ao reduzido número de implementações práticas voltadas especificamente para IRS em redes 6G.

Já a reconfiguração mecânica destaca-se pela simplicidade estrutural, baixas perdas elétricas e elevada estabilidade eletromagnética, sendo uma solução robusta para aplicações em que a velocidade de reconfiguração não constitui um requisito crítico. Por outro lado, sua menor velocidade de resposta, decorrente do movimento físico da estrutura, limita sua utilização em cenários altamente dinâmicos, característicos das futuras redes móveis.

Tabela 5.2: Exemplos práticos das técnicas de reconfiguração de IRS.

Técnica	Exemplo Prático
PIN	Escritório inteligente: usuários se movimentam e a IRS redireciona rapidamente o sinal para eliminar zonas de sombra utilizando milhares de diodos PIN.
Varactor	Carros autônomos: veículos em movimento exigem conexões rápidas e contínuas para troca de informações com outros veículos e com a infraestrutura viária. A IRS equipada com diodos varactor ajusta continuamente a fase da onda refletida por meio da variação da capacitância, acompanhando as mudanças de posição dos veículos e mantendo uma comunicação estável e de baixa latência.
MEMS	Backhaul 6G entre prédios: enlaces fixos utilizam IRS com MEMS para manter um feixe altamente eficiente e com mínima perda durante anos de operação.
Fibra Óptica	IRS instalada na fachada de um aeroporto: a central envia comandos ópticos por fibras até diferentes módulos da superfície para controlar milhares de elementos sem interferência elétrica.
Laser	Fábrica inteligente: robôs móveis recebem conexão THz. Um sistema laser reconfigura continuamente a IRS para acompanhar o deslocamento dos robôs e manter enlaces de alta velocidade.
Mecânica	Comunicação com satélites: uma IRS instalada em uma estação terrestre ajusta mecanicamente sua orientação para acompanhar lentamente a trajetória do satélite durante a passagem.

Dessa forma, conclui-se que não existe uma técnica de reconfiguração ideal para todos os cenários de aplicação. Cada abordagem apresenta vantagens e limitações próprias, fazendo com que sua escolha dependa diretamente dos requisitos do sistema, como velocidade de reconfiguração, consumo de energia, custo de implementação, complexidade da solução, frequência de operação e desempenho esperado da comunicação.

Como trabalhos futuros, propõe-se realizar um estudo mais aprofundado de cada uma das técnicas de reconfiguração, investigando aspectos relacionados ao desempenho eletromagnético, eficiência energética, custo e viabilidade de implementação prática. Além disso, pretende-se aplicar as diferentes abordagens de reconfiguração em um mesmo cenário

de comunicação, permitindo uma comparação quantitativa entre seus desempenhos em métricas como ganho, cobertura, direcionamento do feixe, consumo energético, latência e capacidade de atendimento aos requisitos das futuras redes 6G.

Bibliografia

ALGHAMDI, R.; ALHADRAMI, R.; ALHOTHALI, D.; ALMORAD, H.; FAISAL, A.; HELAL, S.; SHALABI, R.; ASFOUR, R.; HAMMAD, N.; SHAMS, A. et al. Intelligent surfaces for 6g wireless networks: A survey of optimization and performance analysis techniques. *IEEE access*, IEEE, 2020.

ALI, M.; SAYEM, A.; KUNDA, V. A reconfigurable stacked microstrip patch antenna for satellite and terrestrial links. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 56, p. 426 – 435, 04 2007.

ALIZADEH, P.; ANDY, A. S.; PARINI, C.; RAJAB, K. Z. A reconfigurable reflectarray antenna in ka-band using optically excited silicon. In: *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 1–5.

BENECK ARKAPROVO DAS, G. M.-S. R. J. C. Y. W. S. S. D. W. R. J. Reconfigurable antennas: A review of recent progress and future prospects for next generation (invited paper). *Progress In Electromagnetics Research*, IEEE, v. 171, p. 89 – 121, 2021.

BENECK, R. J.; DAS, A.; MACKERTICH-SENGERDY, G.; CHAKY, R. J.; WU, Y.; SOLTANI, S.; WERNER, D. H. Reconfigurable antennas: A review of recent progress and future prospects for next generation (invited paper). *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 171, p. 89–121, 2021.

BHATTACHARYA, A.; JYOTI, R. Frequency reconfigurable patch antenna using pin diode at x-band. *IEEE*, 07 2015.

CAI, Y.; ZHANG, D.; RAHMAT-SAMII, Y. Mars exploration: Wideband frequency reconfigurable electrically small multi-turn loop antenna using mems switch. *IEEE*, p. 1543–1544, 2019.

CUI, T. J.; QI, M. Q.; WAN, X.; ZHAO, J.; CHENG, Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: science & applications*, Nature Publishing Group, v. 3, n. 10, p. e218–e218, 2014.

GONG, S.; LU, X.; HOANG, D. T.; NIYATO, D.; SHU, L.; KIM, D. I.; LIANG, Y.-C. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 2283–2314, 2020.

GREGORY, M. D.; MARTIN, S. V.; WERNER, D. H. Improved electromagnetics optimization: The covariance matrix adaptation evolutionary strategy. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 57, n. 3, p. 48–59, 2015.

HUFF, G. H.; PAN, H.; HARTL, D. J.; FRANK, G. J.; BRADFORD, R. L.; BAUR, J. W. A physically reconfigurable structurally embedded vascular antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 65, n. 5, p. 2282–2288, 2017.

JAAFAR, H.; MISKAM, A.; ABDUL-RAHMAN, R. High-isolation and low-loss rf mems shunt switches. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, v. 25, p. 780–786, 09 2010.

- JANG, T.; ZHANG, C.; YOUN, H.; ZHOU, J.; GUO, L. J. Semitransparent and flexible mechanically reconfigurable electrically small antennas based on tortuous metallic micro-mesh. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 65, n. 1, p. 150–158, 2017.
- JIANG, W.; HAN, B.; HABIBI, M. A.; SCHOTTEN, H. D. The road towards 6g: A comprehensive survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, IEEE, v. 2, p. 334–366, 2021.
- JOODAKI, H.; VALIEE, H.; BAYAT, M. Reconfigurable dual frequency microstrip mimo patch antenna using rf mems switches for wlan application. *2013 25th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2013*, IEEE, p. 3254–3258, 05 2013.
- KINGSLEY, N.; WANG, G.; PAPAPOLYMEROU, J. Comparative study of analytical and simulated doubly-supported rf mems switches for mechanical and electrical performance. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, v. 21, p. 9–15, 03 2006.
- KOVITZ, J. M.; RAJAGOPALAN, H.; RAHMAT-SAMII, Y. Design and implementation of broadband mems rhcp/lhcp reconfigurable arrays using rotated e-shaped patch elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 63, n. 6, p. 2497–2507, 2015.
- KOWALEWSKI, J.; MAYER, J.; MAHLER, T.; ZWICK, T. A compact pattern reconfigurable antenna utilizing multiple monopoles. IEEE, p. 1–41, 2016.
- LU, Y.; ZHENG, X. 6g: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues. *Journal of Industrial Information Integration*, Elsevier, v. 19, p. 100158, 2020.
- MA, W.; WANG, G.; ZONG, B. feng; ZHUANG, Y.; ZHANG, X. Mechanically reconfigurable antenna based on novel metasurface for frequency tuning-range improvement. IEEE, v. 2, p. 629–631, 2016.
- Microwave Journal. *6G: Innovating the Future of Wireless Communications*. 2021. <https://www.microwavejournal.com/articles/35966-g-innovating-the-future-of-wireless-communications>. Acessado em: 15 jul. 2026.
- NGUYEN, B. D.; PICHOT, C. Unit-cell loaded with pin diodes for 1-bit linearly polarized reconfigurable transmitarrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 18, n. 1, p. 98–102, 2019.
- PARCHIN, N. O.; BASHERLOU, H. J.; AL-YASIR, Y. I.; ABDULKHALEQ, A. M.; ABD-ALHAMEED, R. A. Reconfigurable antennas: Switching techniques—a survey. *Electronics*, MDPI, v. 9, n. 2, p. 336, 2020.
- PATRON, D.; DARYOUSH, A. S.; DANDEKAR, K. R. Optical control of reconfigurable antennas and application to a novel pattern-reconfigurable planar design. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 32, n. 20, p. 3394–3402, 2014.
- PENDHARKER, S.; SHEVGAONKAR, R. K.; CHANDORKAR, A. N. Optically controlled frequency-reconfigurable microstrip antenna with low photoconductivity. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 13, p. 99–102, 2014.

- RAJAGOPALAN, H.; KOVITZ, J.; RAHMAT-SAMII, Y. Design of a reconfigurable antenna with fractal geometry. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 62, n. 1056-1064, p. 1–6, 2014.
- RAJAGOPALAN, H.; KOVITZ, J.; RAHMAT-SAMII, Y. Mems reconfigurable optimized e-shaped patch antenna design for cognitive radio. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 62, p. 1054–1064, 2014.
- SOLTANI, S.; LOTFI, P.; MURCH, R. D. A port and frequency reconfigurable mimo slot antenna for wlan applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 64, n. 4, p. 1209–1217, 2016.
- SRIVASTAVA, S.; MISHRA, P.; SINGH, R. K. Design of a reconfigurable antenna with fractal geometry. IEEE, p. 1–6, 2015.
- SUN, M.; XI, H.; QI, X.; XU, K.; LI, H.; LV, Q.; HU, S.; CHEN, S.; ZHAO, W.; LI, X. et al. Reconfigurable transmitarray based on frequency selective surface for 2d wide-angle beam steering. *Electronics*, MDPI, v. 12, n. 18, p. 3854, 2023.
- TARIQ, F.; KHANDAKER, M. R.; WONG, K.-K.; IMRAN, M. A.; BENNIS, M.; DEBBAH, M. A speculative study on 6g. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 27, n. 4, p. 118–125, 2020.
- TAWK, Y.; ALBRECHT, A. R.; HEMMADY, S.; BALAKRISHNAN, G.; CHRISTODOULOU, C. G. Optically pumped frequency reconfigurable antenna design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 9, p. 280–283, 2010.
- TAWK, Y.; COSTANTINE, J.; AYOUB, F.; CHRISTODOULOU, C.; DOYLE, D.; LANE, S. A. Physically reconfigurable antennas: Concepts and automation. IEEE, p. 419–420, 2017.
- WU, Q.; ZHANG, R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts. *IEEE Transactions on Communications*, IEEE, v. 68, n. 3, p. 1838–1851, 2019.
- WU, Q.; ZHANG, R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 58, n. 1, p. 106–112, 2019.
- WU, Q.; ZHANG, S.; ZHENG, B.; YOU, C.; ZHANG, R. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial. *IEEE Transactions on Communications*, IEEE, v. 69, n. 5, p. 3313–3351, 2021.
- YANG, H.; CHEN, X.; YANG, F.; XU, S.; CAO, X.; LI, M.; GAO, J. Design of resistor-loaded reflectarray elements for both amplitude and phase control. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 16, p. 1159–1162, 2016.
- YANG, H.; XIONG, Z.; ZHAO, J.; NIYATO, D.; WU, Q.; POOR, H. V.; TORNATORE, M. Intelligent reflecting surface assisted anti-jamming communications: A fast reinforcement learning approach. *IEEE transactions on wireless communications*, IEEE, v. 20, n. 3, p. 1963–1974, 2020.
- YANG, X.-l.; LIN, J.-c.; CHEN, G.; KONG, F.-l. Frequency reconfigurable antenna for wireless communications using gaas fet switch. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 14, p. 807–810, 2015.

YUAN, X.; LI, Z.; RODRIGO, D.; MOPIDEVI, H. S.; KAYNAR, O.; JOFRE, L.; CETINER, B. A parasitic layer-based reconfigurable antenna design by multi-objective optimization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 60, p. 2690–2701, 06 2012.

ZHENG, B.; YOU, C.; MEI, W.; ZHANG, R. A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 1035–1071, 2022.

ZHENG, S.-H.; LIU, X.-Y.; TENTZERIS, M. M. A novel optically controlled reconfigurable antenna for cognitive radio systems. In: *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. [S.l.]: IEEE, 2014. p. 1246–1247.