

Uma investigação sobre o uso de Metamateriais definidos por software para retroespalhamento ambiente aplicados à Internet Industrial das Coisas em redes 6G

Edwardes Amaro Galhardo⁽¹⁾ e
Antonio Carlos de Oliveira Junior⁽²⁾

Data de submissão: 15/2/2024. Data de aprovação: 10/9/2024.

Resumo – A tecnologia 6G promete inovações significativas para dispositivos da Internet Industrial das Coisas (*Industrial Internet of Things - IIoT*), na Indústria 4.0 e além. Para garantir comunicação contínua e coleta de dados em tempo real, esses dispositivos precisarão ser implantados em ambientes cada vez mais desafiadores. Este artigo explora o papel das Superfícies Refletoras Inteligentes (*Intelligent Reflecting Surfaces - IRS*), também conhecidas como Metamateriais. Essa tecnologia é composta por uma matriz de elementos de retroespalhamento que podem ser ajustados individualmente para gerar mudanças de fase nas reflexões dos sinais, permitindo o controle ativo das propriedades de propagação do sinal e promovendo a criação de um ambiente de rádio inteligente. O controle de fase do IRS, aliado ao controle de transmissão convencional, oferece potencial para melhorias de desempenho em comparação com redes sem fio que não utilizam essa tecnologia. Além disso, o retroespalhamento ambiente mostra-se promissor para fornecer energia contínua a dispositivos IIoT através de ondas eletromagnéticas. Qualquer inconsistência na comunicação pode ser corrigida com o uso de Metamateriais Definidos por Software (*Software-Defined Metamaterials - SDM*). Neste trabalho, analisa-se a integração de ambientes sem fio programáveis com Metamateriais para estabelecer retroespalhamento eletromagnético favorável, garantindo comunicação ininterrupta e eficiência energética (*Energy Efficiency – EE*).

Palavras-chave: Ambientes sem fios programáveis. Internet Industrial das Coisas. Metamateriais. Redes de sexta geração. Retroespalhamento ambiente.

An investigation into the use of software-defined Metamaterials for ambient backscatter applied to the Industrial Internet of Things in 6G networks

Abstract – The 6G technology promises significant innovations for Industrial Internet of Things (IIoT) devices, in Industry 4.0 and beyond. To ensure continuous communication and real-time data collection, these devices will need to be deployed in increasingly challenging environments. This article explores the role of Intelligent Reflecting Surfaces (IRS), also known as metamaterials. This technology consists of an array of backscattering elements that can be individually adjusted to generate phase shifts in signal reflections, allowing for active control of signal propagation properties and promoting the creation of an intelligent radio environment. The phase control of IRS, combined with conventional transmission control, has the potential to improve performance compared to wireless networks without this technology. Additionally, ambient backscattering shows promise for providing continuous energy to IIoT devices via electromagnetic waves. Any communication inconsistencies can be corrected using Software-

¹ Professor do Instituto Federal do Tocantins – IFTO. Doutorando do Programa de Pós Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal do Goiás - UFG. *edwardes.galhardo@iftto.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9331-6714>.

² Professor Doutor do Programa de Pós Graduação do Instituto de Informática, da Universidade Federal do Goiás - UFG. *antoniojr@ufg.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3595-3525>

Defined Metamaterials (SDM). This work analyzes the integration of programmable wireless environments with metamaterials to establish favorable electromagnetic backscattering, ensuring uninterrupted communication and energy efficiency (EE).

Keywords: Programmable wireless environments. Industrial Internet of Things. Metamaterials. Sixth generation networks. Ambient backscatter.

Introdução

A reinvenção na era digital, associada à Indústria 4.0, continua a impulsionar o desenvolvimento das organizações, apontando para um futuro repleto de inovações. Em um cenário onde dados cada vez mais sofisticados se aliam à Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence - IA*), é impossível ignorar o papel central da Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*). Dispositivos sem fio alimentados por ondas ambientais têm o potencial de transformar o mundo da IoT, possibilitando uma miniaturização sem precedentes e implantações em larga escala com baixa necessidade de manutenção, mesmo em ambientes desafiadores (Huang, 2023).

Apesar das metas ambiciosas, o desenvolvimento e a implantação da IoT enfrentam desafios técnicos, econômicos e até políticos. Entre os obstáculos tecnológicos, destacam-se a alimentação de energia para sensores, o custo dos dispositivos, algoritmos e tecnologias de acesso massivo, arquitetura de interconexão e protocolos de inter-rede (Altuwairgi, 2024).

A alimentação de dispositivos sem fio sempre foi o maior limitador, tanto em termos de volume quanto de vida útil. No entanto, avanços recentes em eletrônicos de ultrabaixa potência permitiram o desenvolvimento de dispositivos IoT capazes de ser alimentados por ondas eletromagnéticas (EM), geradas pela abundância de sistemas sem fio ao nosso redor. Essa técnica é amplamente conhecida como comunicação por retroespalhamento (*Backscatter Communications - BC*) (Liaskos, 2022).

A principal ideia da comunicação por retroespalhamento (BC) é desvincular o processo de comunicação da geração do sinal portador, transferindo essa tarefa para um dispositivo externo. Dispositivos habilitados para BC operam ao absorver parte desse sinal, modulá-lo em tempo real e anexar informações à portadora. Essa abordagem simplifica significativamente o *hardware* dos dispositivos BC, eliminando a necessidade de baterias e circuitos de geração de portadora.

O dispositivo externo responsável pela geração da portadora pode ser implementado de duas maneiras: através de uma fonte dedicada ao sistema BC, como as usadas em sistemas de Identificação por Radiofrequência (*Radio Frequency Identification - RFID*), ou por meio de uma fonte não dedicada, conhecida como comunicação por retroespalhamento ambiental (*ambient BC - aBC*). Essa última representa uma das principais áreas de pesquisa nos sistemas sem fio 6G (Liaskos, 2018; Akyildiz, 2020). O aBC oferece grande versatilidade de implantação, aproveitando as ondas eletromagnéticas ambientais geradas por diversos sistemas, especialmente em áreas urbanas. Contudo, o aBC enfrenta desafios significativos devido ao comportamento caótico e incoerente das ondas existentes no ambiente, o que pode resultar em operação intermitente e pouco confiável.

Ao transformar a propagação de ondas eletromagnéticas (EM) em um processo definido por *software*, os recentemente propostos Ambientes Sem Fio Programáveis (*Programmable Wireless Environments - PWEs*) emergem como facilitadores naturais para sistemas de comunicação por retroespalhamento ambiental mais estáveis (Liaskos, 2022). Os PWEs são criados ao ocupar e revestir os principais objetos em um espaço específico, como teto e paredes, com Superfícies Refletoras Inteligentes (*Intelligent Reflecting Surfaces - IRS*). Esses materiais apresentam propriedades físicas incomuns e são dotados de características eletromagnéticas que não ocorrem naturalmente, sendo projetados artificialmente por meio de estruturas que combinam dielétricos e metais (BLANC, 2022).

A combinação dos PWEs com a tecnologia aBC possibilita o uso de Metamateriais Definidos por Software (*Software-Defined Metamaterials* - SDM) para a manipulação precisa de ondas EM, gerando recursos suficientes para estabelecer comunicação e alimentar dispositivos IoT, eliminando a necessidade de baterias (Liaskos, 2018).

Materiais e métodos

Este trabalho oferece uma análise aprofundada e teórica sobre o uso de Retroespalhamento Ambiental com Superfícies Refletoras Inteligentes (IRS) em sistemas sem fio de 6G, com um enfoque particular nas comunicações de dispositivos IoT. O estudo abrange desde os conceitos fundamentais do retroespalhamento ambiente até as mais recentes inovações no uso de Metamateriais Definidos por Software (SDM) e Ambientes Sem Fio Programáveis (PWES). Tais tecnologias representam avanços significativos para redesenhar a Indústria 4.0 e introduzir dispositivos IIoT energeticamente autossustentáveis.

Inicialmente, a introdução explora a relevância dos sistemas sem fio assistidos por IRS, evidenciando como essas tecnologias podem revolucionar a eficiência e a flexibilidade das redes 6G. Em seguida, a seção sobre RFID e retroespalhamento traça a evolução dessas tecnologias, desde suas aplicações tradicionais até a implementação de retroespalhamento ambiental em redes modernas. Avançando, a discussão sobre eficiência energética aborda como o uso de aBC, SDM e PWES pode impulsionar a criação de dispositivos IIoT sem baterias, essenciais para suportar os elevados requisitos das futuras redes. Finalmente, as conclusões sintetizam os principais desafios e perspectivas para a aplicação dessas tecnologias, oferecendo uma base conceitual sólida para futuras implementações na Indústria 4.0 e além.

Este trabalho visa não apenas mapear o estado da arte das comunicações IoT baseadas em retroespalhamento, mas também discutir propostas inovadoras que poderão ser aplicadas em implementações futuras, solidificando o caminho para o desenvolvimento de soluções disruptivas no contexto das redes 6G e da Indústria 5.0.

Resultados e discussões

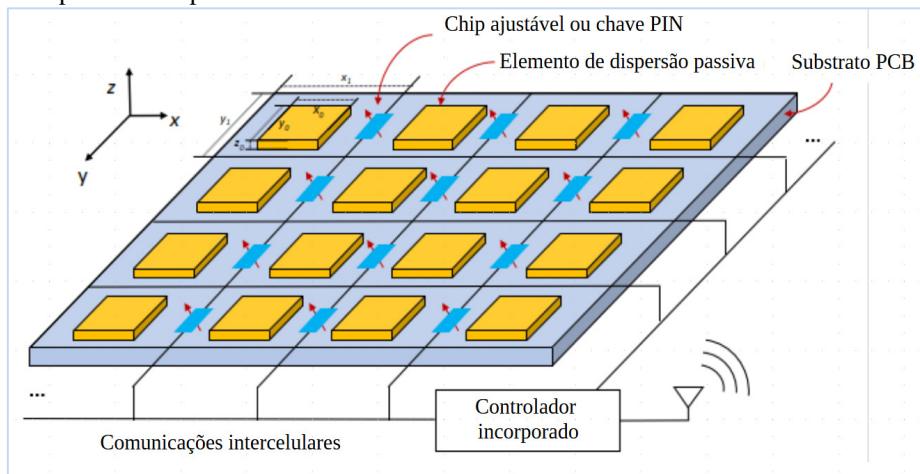
Redes sem fio assistidas por IRS

Com a popularização da IoT, busca-se resolver os desafiadores problemas de otimização de rede para melhorar a eficiência energética das redes sem fio. Atualmente, a otimização do desempenho das redes sem fio foca no lado do usuário ou no controlador da rede, como a estação base (*Base Station* - BS) e a operadora de rede. Para as operadoras de redes sem fio, a crescente demanda por tráfego pode ser atendida através da implantação de pequenas células com eficiência energética em uma rede densa ou do uso de múltiplas antenas na BS para melhorar a eficiência do espectro. A formação de feixes de transmissão ou a alocação de energia da BS pode ser otimizada para se adaptar às variações do canal. No lado do usuário, a colaboração entre vários usuários, como por meio de comunicações dispositivo a dispositivo (*Device-to-Device* - D2D) e comunicações de retransmissão, pode fornecer benefícios potenciais, como melhor qualidade e cobertura do link, além de um aumento no desempenho energético (Q. WANG, 2021).

Para enfrentar os problemas de desvanecimento de canal nas redes sem fio, introduziu-se o conceito de IRS como uma solução inovadora (Liaskos, 2019). O IRS é uma superfície bidimensional feita por material eletromagnético (EM), ou seja, metamaterial, composta por uma variedade de elementos de espalhamento passivo com estrutura física especialmente projetada. Cada elemento de espalhamento pode ser controlado de maneira definida por software para alterar as propriedades eletromagnéticas (por exemplo, a mudança de fase) da reflexão dos sinais de Rádio Frequência (*Radio Frequency* - RF) incidentes sobre esses elementos. Através do controle de fase coordenado de todos os elementos de espalhamento, é possível ajustar arbitrariamente as fases refletoras e os ângulos dos sinais de RF incidentes para

criar efeitos desejáveis de múltiplos caminhos. Em particular, os sinais de RF refletidos podem ser combinados de forma coerente para melhorar a potência do sinal recebido ou de forma destrutiva para mitigar possíveis interferências. A Figura 1 ilustra um modelo típico de sistema de comunicações sem fio assistidas por IRS.

Figura 1 – O IRS: feito de uma metassuperfície reconfigurável composta por uma grande variedade de elementos de espalhamento passivo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A reconfiguração das propriedades eletromagnéticas (EM) do IRS é realizada através do controle coordenado das fases dos elementos de dispersão individuais. Isso envolve a integração de chips sintonizáveis na estrutura da metassuperfície, onde cada chip interage localmente com um elemento de espalhamento e comunica-se com um controlador central incorporado. A operação do IRS assemelha-se à de um relé com múltiplas antenas, permitindo direcionamento de feixe totalmente controlável sem a necessidade de fornecimento de energia dedicada. No entanto, o IRS não utiliza um transmissor ativo, limitando-se a refletir os sinais de RF ambientais como uma matriz passiva, sem incorrer em consumo adicional de energia (Q. Wang, 2021).

Conforme ilustrado na Figura 1, o controlador IRS incorporado comunica-se com dispositivos externos para receber solicitações de reconfiguração e, subsequentemente, ajusta e distribui suas decisões de controle de fase para todos os chips sintonizáveis. Ao receber a informação de controle, cada chip sintonizável altera seu estado, permitindo que o elemento de espalhamento correspondente reconfigure seu comportamento (Liu, 2013). A implantação generalizada do IRS transforma a natureza aleatória do ambiente de canal, exigindo novas ferramentas analíticas e métricas de desempenho para caracterizar os limites dessa performance. A análise estocástica confirma que o aumento potencial no ganho de desempenho justifica a otimização adicional das redes sem fio assistidas por IRS. O modelo analítico a seguir apresenta a teoria básica do IRS:

A variável N denota o número de elementos refletores do IRS e \mathbf{l} denota a distância do caminho direto, que pode ser aproximada pela distância \mathbf{d} entre os transceptores. As variáveis $\mathbf{d1}$, $\mathbf{ned2}$, \mathbf{n} denotam as distâncias de dois segmentos no caminho refletido através do n -ésimo elemento refletor. O termo de soma em (1) denota as reflexões do sinal através de diferentes caminhos. A diferença de fase $\Delta \Phi$ é determinada pelas distâncias do caminho direto e do caminho refletido através do n -ésimo elemento refletor. R_n denota o coeficiente de reflexão dependendo das propriedades EM do objeto refletor, que é convencionalmente incontrolável sem o uso de IRS.

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2$$

Para cada elemento refletor no IRS, pode-se controlar proativamente sua mudança de fase $R_n = e^{j\Delta\phi n}$ de modo que o sinal refletido possa ser alinhado de forma coerente com o caminho direto. Normalmente, assume-se $d \approx l \approx d_{1,n} + d_{2,n}$, o que leva a seguinte aproximação da potência do sinal recebido em (1).

$$P_r \propto (N+1)^2 P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (2)$$

Se não houver ligação direta ou o número N de elementos refletores se tornar grande, a perda de caminho pode ser simplificadamente reescrita como $P_r \approx N^2 P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$. Em comparação com a perda do caminho do modelo de espaço livre, a perda de caminho assistida pelo IRS, conforme indicado na equação (2), introduz um ganho na potência do sinal recebido, ou seja, a potência recebida é proporcional a N^2 . Para um IRS com 100 elementos refletores, o ganho de potência alcança um significativo aumento de 40 dB (Z. Duan, 2020).

Considerando um grande número de elementos refletores, espera-se que as comunicações de retroespalhamento baseadas em IRS ofereçam maior flexibilidade em comparação com as comunicações de retroespalhamento sem fio convencionais, uma vez que o IRS pode gerar padrões de reflexão mais sofisticados que podem ser utilizados para a transmissão de informações. Isso pode resultar em taxas de dados mais elevadas e em maiores distâncias de transmissão.

Embora o sistema apresentado ofereça vantagens significativas, a maioria dos estudos na literatura atual se concentra no desempenho de sistemas IRS autônomos, isto é, em comunicações ponto a ponto ou entre múltiplos pares de comunicação. Além disso, frequentemente assume-se que as informações do canal são conhecidas para o controle de fase do IRS. Portanto, há uma necessidade de modelos mais realistas para avaliar o desempenho do IRS em sistemas práticos de comunicação em grande escala, considerando a mobilidade dos usuários em cenários tanto internos quanto externos. A mobilidade dos usuários não apenas implica transferências entre diferentes unidades de IRS, mas também introduz uma correlação espacial na distribuição dos usuários, o que pode impactar significativamente o desempenho do sistema e não deve ser negligenciado. Assim, a incorporação de diferentes modelos de mobilidade na análise do desempenho de sistemas sem fio assistidos por IRS surge como uma direção crítica para pesquisas futuras.

RFID – do tradicional retroespalhamento ao retroespalhamento ambiente

Esta seção apresenta os conceitos fundamentais do retroespalhamento ambiente em redes 6G, além de discutir brevemente os fundamentos dos Metamateriais definidos por *software*.

O retroespalhamento tradicional, um tipo de comunicação sem fio que surgiu em 1948, utiliza a reflexão das ondas eletromagnéticas (Stockman, 1948). Uma aplicação comum dessa tecnologia é a identificação por radiofrequência, que representa o retroespalhamento tradicional. A tecnologia RFID é um método de identificação automática que permite carregar dados sobre um objeto e transferi-los para um computador, reduzindo o tempo e a mão de obra necessária para a coleta manual de dados.

Para dispositivos IoT, além da necessidade de comunicação rotineira entre si, é essencial que estes dispositivos sejam periodicamente energizados. No entanto, as baterias utilizadas em pequenos dispositivos, como sensores e tags, apresentam duas desvantagens principais: vida útil limitada e necessidade de manutenção preventiva ou constante. Quando as baterias se esgotam, os dispositivos precisam ser substituídos, o que pode ser particularmente desafiador em condições extremas, como sensores embutidos em paredes ou em regiões costeiras, onde a corrosão da água do mar pode afetar as baterias.

Uma solução eficiente para o problema de energia é a coleta de energia do ambiente, em vez de depender de baterias com vida útil limitada e necessidade de substituição. Entre as fontes de energia disponíveis, incluem-se a energia solar, eólica, vibracional e eletromagnética. No

entanto, as fontes solar, eólica e vibracional frequentemente são instáveis e suscetíveis a variações ambientais. Em contraste, sinais sem fio provenientes de estações base (*Base Stations - BSs*), sinais *Wi-Fi* e sinais de rádio e televisão são amplamente difundidos e onipresentes. Portanto, a energia eletromagnética se apresenta como uma alternativa estável e adequada para alimentar sensores em IoT.

Um sistema RFID básico é composto por um leitor que gera uma onda eletromagnética contínua e uma *tag* que recebe e retroespalha a onda de rádio vinda do leitor. O princípio fundamental do retroespalhamento de rádio é que a *tag* responde ao leitor alterando a impedância de sua antena e modulando suas informações na onda retroespelhada. O retroespalhamento sem bateria é uma tecnologia inovadora que utiliza sinais sem fio tanto para comunicação de dados quanto para fornecimento de energia. Um modelo típico de sistema de comunicações sem fio assistidas por IRS é ilustrado na Figura 2.

Figura 2(a) – Sistema de retroespalhamento sem bateria

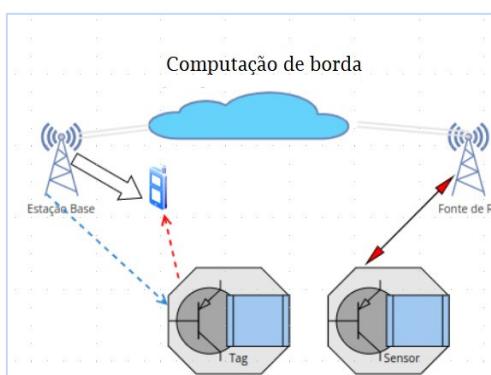
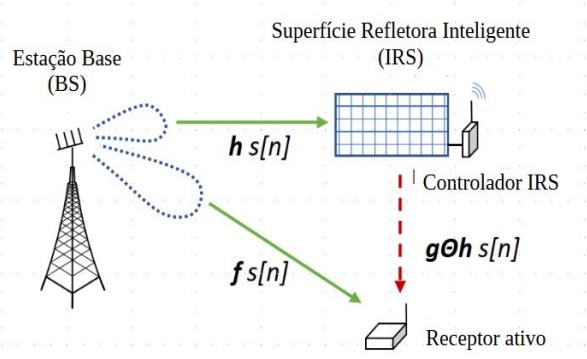


Figura 2(b) – Comunicações sem fio assistidas por IRS para fornecer $s[n]$ da BS



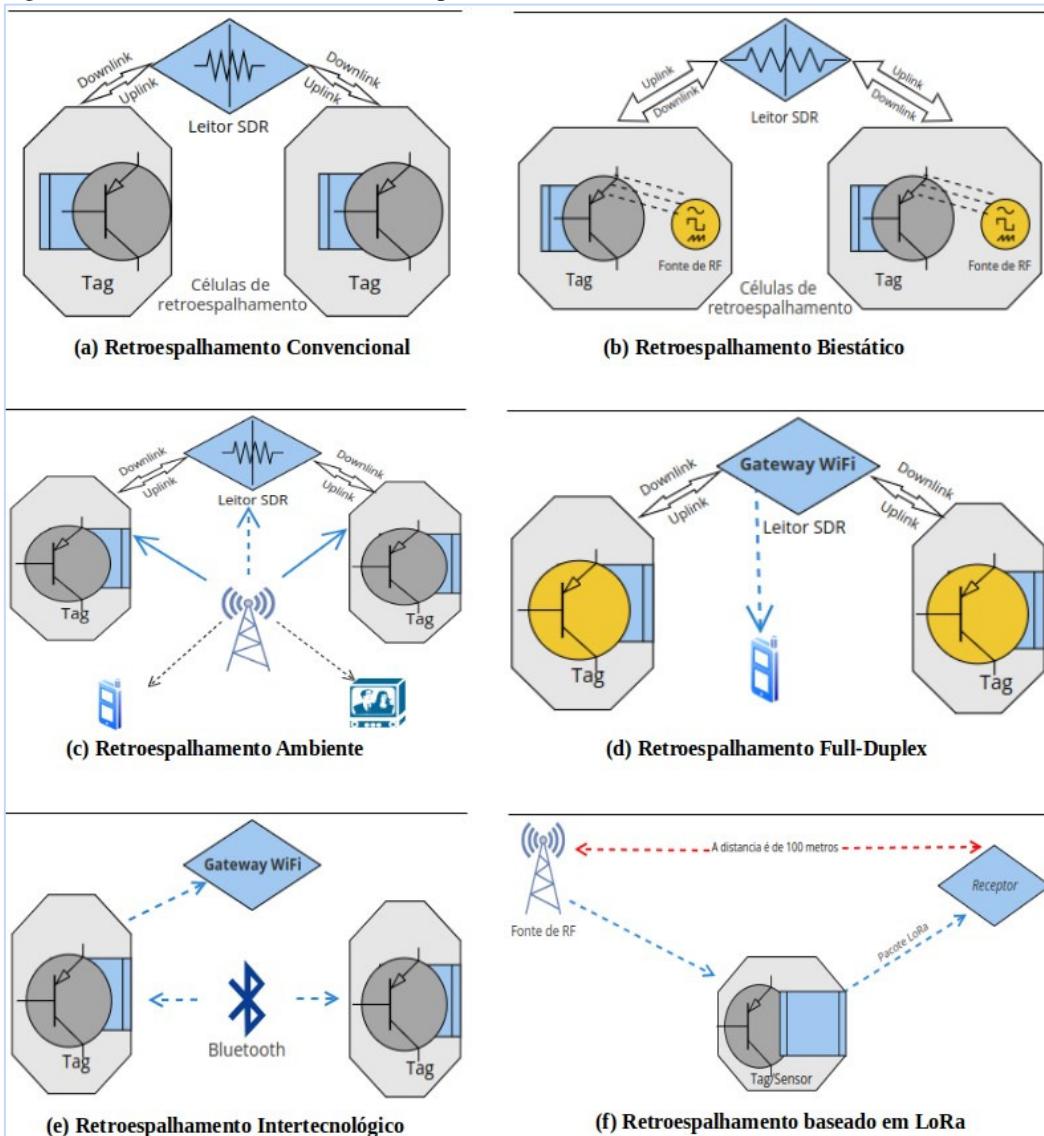
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Como ilustrado na Figura 2(a), pequenos dispositivos, como *tags* ou sensores, recebem sinais e, em seguida, espalham esses sinais para comunicação. Antes disso, a IRS mostrada na Figura 2(b) introduz uma matriz de mudança de fase Θ para configurar o canal refletor equivalente. Os canais entre a estação base e a IRS (BS-IRS), a estação base e o receptor (BS) e o receptor e a IRS são indicados por h , f e g , respectivamente. Ao implantar o IRS no ambiente, por exemplo, revestido nas paredes dos edifícios ou instalado em plataformas aéreas, o IRS pode transformar o ambiente de rádio em um espaço inteligente que auxilia na detecção de informações, na computação analógica e nas comunicações sem fio (XU, 2021).

Desde sua criação, diversos protótipos de *hardware* baseados na tecnologia de retroespalhamento sem bateria foram desenvolvidos. A seguir, serão discutidos alguns desses modelos de retroespalhamento.

A Figura 3 apresenta vários desses modelos de retroespalhamento desenvolvidos. Para comparação e entendimento dos diferentes sistemas, a Figura 3(a) especifica os sistemas RFID tradicionais. No entanto, uma perda de caminho de ida e volta limita o alcance de comunicação entre o leitor e a etiqueta, resultando em uma importante deficiência no retroespalhamento de rádio convencional. Para abordar essa desvantagem, Kimionis (2014) propõe o retroespalhamento biestático. A ideia é posicionar uma fonte de radiofrequência (RF) próxima à etiqueta para reduzir a perda de caminho entre a etiqueta e a fonte de RF. A Figura 3(b) ilustra a proposta onde o leitor pode ser um Rádio Definido por Software (*Software-defined Radio - SDR*) de baixo custo, oferecendo flexibilidade para processar vários esquemas arbitrários de modulação de *tag*/sensor.

Figura 3 – Diferentes modelos de retroespalhamento



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Em 2013, pela primeira vez, foi demonstrada a viabilidade da comunicação por retroespalhamento ambiente utilizando sinais de TV fortes (Liu, 2013). Reconhecendo a presença de sinais de modulação de frequência (*Frequency Modulation* - FM) amplamente difundidos, Wang (2017) apresenta o conceito de retroespalhamento FM. Neste estudo, o autor demonstra que os sinais FM podem alimentar *tags* em viagem, permitindo a obtenção de informações locais por meio do retroespalhamento. Além disso, Kellogg (2014) sugere o retroespalhamento *Wi-Fi* utilizando múltiplas antenas receptoras, possibilitando que pequenos dispositivos alimentados por RF acessem a internet. Continuando esse trabalho, Kellogg (2016) propõe o retroespalhamento *Wi-Fi* passivo para gerar transmissões *Wi-Fi* diretamente por meio do retroespalhamento. A Figura 4(c) ilustra essa proposta.

Para alcançar comunicação simultânea com usuários móveis e sensores para *gateway Wi-Fi*, Bharad (2015) propõe o retroespalhamento *Full-Duplex*. Conforme mostrado na Figura 4(d), o *gateway* necessita de duas antenas: uma para transmissão e outra para recepção. Este sistema de comunicação possibilitou altas taxas de transferência e comunicação de longo alcance entre dispositivos de retroespalhamento. No entanto, um problema desse sistema é o uso exclusivo do *Wi-Fi*. Ensworth (2017) superou essa limitação ao propor o retroespalhamento

intertecnológico, onde sinais *Bluetooth* podem ser convertidos em sinais compatíveis com *Wi-Fi* ou *ZigBee*. A Figura 4(e) ilustra esse cenário.

Uma desvantagem dos sistemas de retroespalhamento apresentados é o alcance de comunicação limitado a 4 metros. Para resolver esse problema, Parks (2014) desenvolveu um mecanismo de codificação com múltiplas antenas, aumentando o alcance de comunicação para 20 metros, ou seja, 16 metros a mais que os sistemas anteriores. Posteriormente, essa limitação foi superada por Talla (2017), que propôs o retroespalhamento baseado em *LoRa*. Aproveitando a tecnologia de espectro espalhado, conseguiram alcançar mais de 500 metros de comunicação com um consumo elétrico de cerca de $93,2 \mu W$. A Figura 4(e) apresenta o mecanismo de múltiplas antenas, enquanto a Figura 4(f) ilustra o sistema de retroespalhamento baseado em *LoRa*.

Mesmo com comunicação bilateral entre dispositivos alimentados por ondas retroespalhadas, essa comunicação pode ser comprometida devido ao comportamento incoerente e caótico das ondas ambientais, resultando em operações intermitentes e não confiáveis. Nesse contexto, a combinação de PWEs com Metamateriais pode transformar a maneira como a propagação das ondas eletromagnéticas interage com os dispositivos alimentados por elas (J. F. Ensworth, 2017).

Eficiência energética aprimorada rumo aos dispositivos IIoT de energia zero

Buscando oferecer dispositivos IoT continuamente ativos e sem necessidade de baterias, o retroespalhamento ambiente com comunicação de retroespalhamento (aBC) tem ganhado atenção como um potencial facilitador para a tecnologia 6G. Embora os dispositivos aBC não gerem sinais de RF, eles refletem e modulam sinais provenientes de fontes externas. Por não possuírem transmissores de RF, o *hardware* dos dispositivos aBC é simplificado, permitindo seu funcionamento em ambientes com energia extremamente baixa.

Para resolver o problema de propagação sem fio incoerente associado aos dispositivos aBC, Liaskos (2022) sugere a utilização de Ambientes Sem Fio Programáveis (PWEs) para criar superfícies inteligentes e transformar o processo de comunicação em recursos modulares definidos por *software*. Avanços na física permitiram o desenvolvimento de novos materiais com propriedades ajustáveis em tempo real, levando os pesquisadores a propor o uso de Metamateriais nessas superfícies. Estes Metamateriais artificialmente estruturados possibilitam a criação de comportamentos personalizados para a manipulação de energia. Como resultado, os pesquisadores desenvolveram um conjunto completo de *hardware* e *software*, denominado Metamateriais Definidos por *Software* (SDMs). Esse sistema permite a conexão em rede, o controle centralizado e a orquestração por meio de um servidor com especificações operacionais bem definidas.

Foi demonstrado que cada SDM pode receber comandos, como direcionar ou dividir ondas incidentes em uma direção específica, formando assim um caminho sem fio de ponta a ponta. Além disso, essa comunicação permite alimentar os dispositivos de retroespalhamento ambiente (aBC) e preservar a coerência das ondas ambientais.

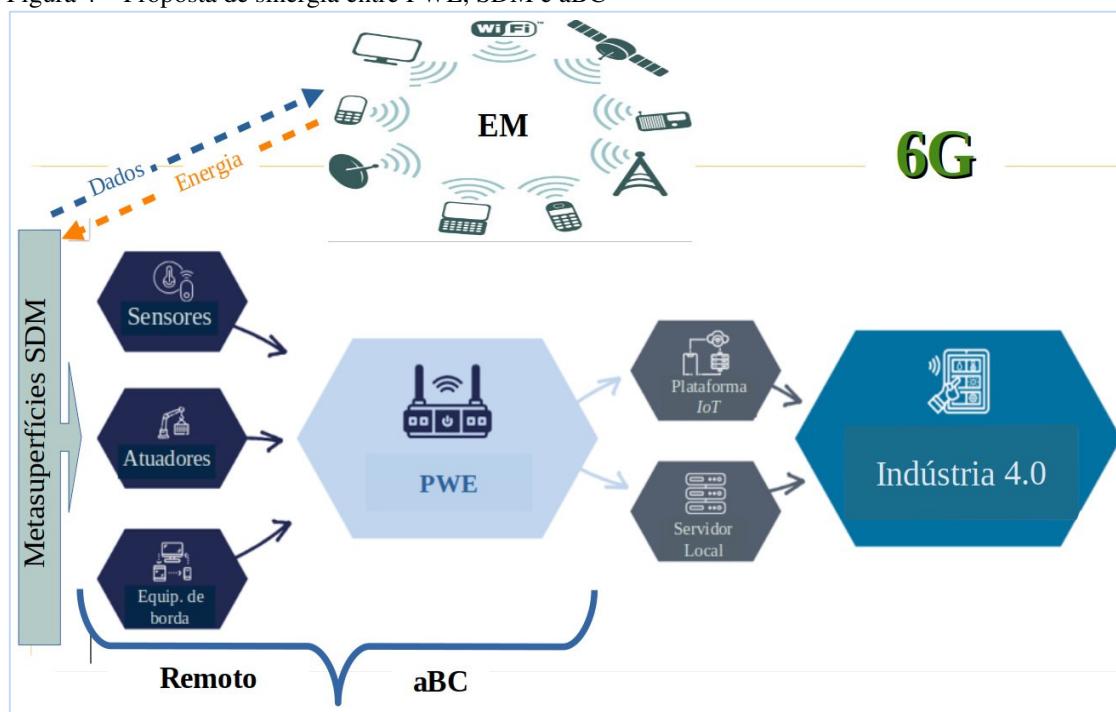
Com o sucesso crescente da IoT na interconexão de dispositivos de consumo, observa-se uma tendência natural de também conectar dispositivos em ambientes industriais, conhecidos como Internet Industrial das Coisas (IIoT). A Indústria 4.0 está em uma corrida para incorporar tecnologias em sua cadeia de suprimentos e atividades produtivas, utilizando ferramentas como *Big Data*, Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), Inteligência Artificial, entre outras (Altuwairgi, 2024). Essa demanda traz desafios que precisam ser superados, e a eficiência energética dos dispositivos é um aspecto amplamente debatido e estudado, principalmente por ser um fator crucial para as redes 6G que visam promover a autossustentabilidade.

Embora a literatura contenha trabalhos que abordem a mitigação do consumo energético em sistemas eletrônicos industriais para dispositivos IIoT com bateria limitada, nenhum estudo ofereceu a possibilidade de que esses dispositivos possam ter energia infinita e eliminar a

necessidade de baterias. Portanto, propõe-se neste trabalho utilizar a sinergia entre aBC, SDMs e PWEs para manipular ondas eletromagnéticas com o objetivo de criar dispositivos IIoT habilitados para aBC, livres de baterias, simples, compactos e capazes de habilitar células inteligentes que podem detectar presença, características eletromagnéticas do ambiente e a posição de outras células nas proximidades. Isso facilita a implantação em diversos tipos de ambientes, incluindo os mais remotos e inóspitos. A proposta baseia-se em simulações analíticas em ambientes assistidos por IRS, comparados com comunicações convencionais de retransmissão de decodificação e encaminhamento.

Os resultados apresentados na seção sobre RFID e retroespalhamento fundamentam a proposta de criar uma estrutura flexível capaz de fornecer energia ininterrupta a dispositivos em ambientes industriais adversos. Experimentos realizados por Z. Duan (2020) com um IRS de 100 elementos refletores demonstraram um ganho de potência significativo de 40 dB. Esses resultados fornecem a base para simulações matemáticas com IRS, usuários e Estações Base móveis. Os resultados esperados estão ilustrados na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Proposta de sinergia entre PWE, SDM e aBC



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na Indústria 4.0, os dispositivos IIoT variam de contadores hídricos a maquinários industriais e sensores para tubulações. Esses dispositivos são frequentemente integrados com *Edge Computing* para aproximar os recursos computacionais do local físico do usuário e da fonte de dados. Essa abordagem permite que uma empresa utilize e distribua seus recursos por diversos locais isolados. A Figura 4 ilustra um cenário onde dispositivos IIoT equipados com Metamateriais recebem alimentação das ondas ambientais controladas por uma PWE. Esses dispositivos inteligentes se comunicam com outras plataformas IoT, enquanto um servidor local gerencia o monitoramento, coleta, troca e análise de dados aplicáveis à Indústria 4.0 e além. Esse cenário se baseia na implementação de ambientes sem fio programáveis com superfícies refletoras inteligentes para criar retroespalhamento ambiente, visando uma eficiência energética otimizada para dispositivos sem bateria.

Como exemplo prático, considere uma indústria no setor de energia, na qual os dispositivos IIoT monitoram equipamentos de campo, coletando dados em tempo real sobre o

desempenho da rede elétrica, o fluxo em tubulações ou as emissões, mesmo em regiões remotas. Para garantir que esses equipamentos sejam continuamente alimentados por ondas ambientais, sua estrutura deve incorporar Metamateriais capazes de capturar ondas eletromagnéticas e retroespalhá-las para dispositivos habilitados para aBC. Com o auxílio da PWE, as informações coletadas são enviadas a um computador central conectado a um satélite, que processa os dados e determina os melhores parâmetros para a manutenção adequada do sistema. Se a qualidade do sinal se aproximar do limite previamente definido, o controlador da PWE ajustará a estrutura física do Metamaterial para atender às necessidades de adaptação.

Embora existam na literatura alguns estudos iniciais sobre o uso de SDMs e sua combinação com PWEs para criar aBC autossuficientes e controláveis, é necessário realizar testes adicionais para identificar possíveis problemas, como falhas de segurança nas comunicações bilaterais. Liaskos (2022) demonstrou a eficácia de simuladores na obtenção de resultados próximos à realidade, com visualização instantânea. Dada a crescente demanda por recursos impulsionada pela nova rede 6G, é essencial integrar técnicas de aprendizado de máquina nas simulações que envolvem SDMs e PWEs. A pesquisa futura incluirá a construção de células e a criação de novas estruturas de Metamateriais.

Embora melhorias significativas de desempenho possam ser observadas através de resultados numéricos e simulações, a diferença exata em relação ao desempenho ótimo ainda é incerta e raramente caracterizada na literatura atual. Isso se deve ao fato de que a maioria dos métodos de solução disponíveis atualmente se baseia em estruturas de otimização alternadas, que garantem a convergência apenas para soluções ótimas locais. Futuramente, espera-se que a aplicação de algoritmos de otimização mais sofisticados permita que os sistemas sem fio assistidos por Metamateriais atinjam um desempenho superior ao reportado até o momento. Além disso, a pesquisa atual tem focado principalmente na otimização conjunta de feixes ativos e passivos em diferentes cenários de rede, limitando o potencial de ganho de desempenho global. A exploração futura deve considerar fatores adicionais, como o tamanho e a distribuição dos elementos de espalhamento do Metamaterial, a orientação e mobilidade dos blocos, bem como suas partícões e estratégias de agrupamento.

Figura 5 – Estruturas IoT operando em movimento, alimentadas com retroespalhamento ambiente no cenário do 6G utilizando IRS



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Esses avanços na área de IRS, quando combinados com tecnologias de retroespelhamento ambiente, têm o potencial de revolucionar as redes IoT, proporcionando estruturas móveis e inteligentes que operam de forma autossuficiente em termos energéticos, conforme ilustrado na Figura 5. Este cenário é especialmente relevante no contexto das redes 6G, onde a necessidade de soluções energéticas eficientes e a capacidade de operação em movimento são essenciais para a implementação de redes IoT verdadeiramente integradas e avançadas.

A figura ilustra um ambiente urbano denso, com prédios altos e ruas movimentadas, representando os desafios típicos das comunicações em áreas densamente povoadas. Dispositivos IoT em movimento, como sensores e etiquetas inteligentes, estão integrados ao cenário, conectando-se e trocando dados enquanto se deslocam pelas ruas e entre edifícios. Esses dispositivos operam sem a necessidade de baterias tradicionais, sendo alimentados por sinais de retroespelhamento ambiente.

No cenário, as Superfícies Refletoras Inteligentes (IRSSs) estão estrategicamente posicionadas nas fachadas dos edifícios e postes ao longo das ruas. Compostas por metamateriais, essas superfícies reconfiguráveis manipulam as ondas eletromagnéticas, otimizando a cobertura e a qualidade do sinal, especialmente em áreas de sombra. A rede 6G é representada por torres de comunicação e antenas distribuídas pelo ambiente urbano, oferecendo conectividade em alta velocidade e baixa latência, essenciais para o funcionamento eficiente das aplicações IoT em movimento.

A figura destaca a interação entre os dispositivos IoT e a infraestrutura 6G, mostrando como as IRSSs e o retroespelhamento ambiente trabalham em sinergia para superar os desafios de comunicação em um ambiente urbano complexo, criando um sistema robusto e eficiente para a próxima geração de IoT.

Considerações finais

Este trabalho investigou o uso do retroespelhamento ambiente para alimentar dispositivos IIoT através das ondas eletromagnéticas existentes. A teoria subjacente ao IRS foi abordada por meio de um modelo simplificado de perda de caminho, facilitando a compreensão básica das vantagens do IRS em comunicações sem fio. Além de detalhar a evolução dessa nova tecnologia, foram discutidos os desafios associados à manipulação das ondas eletromagnéticas incoerentes, que podem resultar em perda de comunicação e outras falhas. A pesquisa evidenciou que a combinação de PWEs e SDMs oferece uma solução promissora para esses problemas. Por fim, foi proposta a integração de aBC, SDMs e PWEs em um cenário de aplicação na área de distribuição de energia no contexto da Indústria 4.0 e além, visando a iminente revolução industrial. A proposta pode ser validada através do uso de simuladores³ similares aos utilizados por Liaskos (2022).

A integração dessas tecnologias no contexto atual da Indústria 4.0 representa uma inovação significativa, possibilitando a criação de dispositivos industriais conectados, simples e cada vez mais autônomos e eficientes, capazes de atender aos rigorosos requisitos das redes 6G. Além disso, esses avanços configuraram-se como um forte aliado na futura Indústria 5.0, que busca aprimorar as soluções humanas por meio da colaboração com máquinas. Essa evolução tecnológica também abre novas possibilidades para o aprimoramento de Redes Veiculares *Ad Hoc* (*Vehicular Ad Hoc Networks - VANETs*), proporcionando maior eficiência e segurança na comunicação entre veículos e infraestruturas urbanas, fundamental para a mobilidade inteligente em ambientes urbanos densos.

³ Simuladores como NS-3, OMNeT++, MATLAB/Simulink, CST Studio Suite e COMSOL Multiphysics são utilizados para modelar e avaliar o desempenho de redes sem fio, sistemas de comunicação, metamateriais e eficiência energética.

Referências

- ALTUWAIRGI, K. H.; TOTA KHEL, A. M.; HAMDI, K. A. (2024). **Energy detection for reflecting surfaces-aided ambient backscatter communications.** IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 8(1):279–290, 2024.
- AKYILDIZ, I. F., KAK, A., and NIE, S. (2020). **6g and beyond: The future of wireless communications systems.** IEEE Access, 8:133995–134030.
- BHARAD, D., et al. (2015). **Backfi: High throughput wifi backscatter.** ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 45(4):283–296.
- BLANC, F., ESPINOZA, C., and FALCON, C. (2022). **Inflatable soft mechanical metamaterials with tunability properties.** In 2022 Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), pages X–067–X–069.
- HUANG, Y.; et al. (2023) **Performance optimization for energy-efficient industrial internet of things based on ambient backscatter communication: An a3c-fl approach.** IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 7(3):1121–1134, 2023.
- ENSWORTH, J. F, et al (2017), "Full-duplex Bluetooth Low Energy (BLE) compatible Backscatter communication system for mobile devices," 2017 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), Phoenix, AZ, USA, 2017, pp. 45-48, doi: 10.1109/WISNET.2017.7878752.
- KELLOGG, B., et al. (2014). **Wi-fi backscatter: Internet connectivity for rf-powered devices.** In Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM, pages 607–618.
- KELLOGG, B., et al. (2016). **Passive wi-fi: Bringing low power to wi-fi transmissions.** In 13th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 16), pages 151–164.
- KIMIONIS, J., BLETSAS, A., and SAHALOS, J. N. (2014). **Increased range bistatic scatter radio.** IEEE Transactions on Communications, 62 (3):1091–1104.
- LIASKOS, C., et al. (2018). **A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces.** IEEE Communications Magazine, 56(9):162–169.
- LIASKOS, C., et al. (2019). **A novel communication paradigm for high capacity and security via programmable indoor wireless environments in next generation wireless systems.** Ad Hoc Networks, 87:1–16.
- LIASKOS, C., et al. (2022). **Realizing ambient backscatter communications with intelligent surfaces in 6g wireless systems.** IEEE Wireless Communications, 29(1):178–185.
- LIU, V., et al. (2013). **Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air.** ACM SIGCOMM computer communication review, 43(4):39–50.
- PARKS, A. N., et al. (2014). **Turbocharging ambient backscatter communication.** ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 44(4):619–630.

Q. WANG.*et al.* (2021). "Energy-efficient Optimization for IRS-assisted Wireless-powered Communication Networks," *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, Helsinki, Finland, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTC2021 Spring51267.2021.9449045.

STOCKMAN, H. (1948). **Communication by means of reflected power.** *Proceedings of the IRE*, 36(10):1196–1204.

TALLA, V., *et al.* (2017). **Lora backscatter: Enabling the vision of ubiquitous connectivity.** *Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies*, 1(3):1–24.

WANG, A., *et al.* (2017). **Fm backscatter: Enabling connected cities and smart fabrics.** In *NSDI*, volume 17, pages 3154630–3154650.

Z. DUAN. *et al.*, "Recent Advances in Intense Microwave Generation Using Metamaterials," *2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, Singapore, Singapore, 2020, pp. 14-014, doi: 10.1109/ICOPS37625.2020.9717892.