**Toward 6G: Key Directions and Research Questions**

**Grupo 2**

**Eduardo Pereira de Sousa - 231018937**

**Halycia de Oliveira - 221037625**

**Mateus Chagas Lopes - 222011599**

Dep. Ciência da Computação - Universidade de Brasília

CIC0124 - Redes de Computadores

February 11th, 2025

231018937@aluno.unb.br

221037625@aluno.unb.br

222011599@aluno.unb.br

1. **Introdução**

O avanço das tecnologias de comunicação móvel tem desempenhado um papel fundamental na evolução da sociedade digital, proporcionando novas oportunidades para diversos setores da economia. O artigo "Toward 6G: Key Directions and Research Questions" apresenta um panorama detalhado sobre os desafios e direções tecnológicas que guiarão a transição do 5G para o 6G. Os autores exploram aspectos como o aumento da capacidade de transmissão, a integração entre comunicação e sensoriamento, a eficiência energética e a segurança em um mundo hiperconectado.

O objetivo do artigo é investigar como essas novas tecnologias serão implementadas e quais são os principais desafios para tornar o 6G uma realidade. Para isso, a pesquisa é organizada em torno de seis Áreas de Inovação Tecnológica (TIAs), que abordam desde o uso do espectro sub-THz até a segurança pós-quântica. Este relatório será organizado em três seções principais: desenvolvimento, onde serão discutidos os principais conceitos do artigo; análise crítica, na qual será feita uma avaliação sobre os avanços e desafios apresentados; e conclusão, que sumariza os pontos discutidos e destaca o aprendizado obtido.

1. **Technical Innovation areas**

**2.1. TIA 1:** Sub THz Mobile Access

A TIA 1 aborda o uso do espectro de **Sub-THz (90 GHz - 300 GHz)** como a principal faixa de frequência para a rede 6G, essencial para alcançar velocidades superiores a 100 Gbit/s. Esse avanço é necessário devido à crescente demanda por alta taxa de transmissão de dados, especialmente em aplicações como telemedicina, automação industrial, realidade aumentada/virtual e veículos autônomos.

#### **Principais Desafios e Soluções:**

* **Alta Frequência e Perda de Sinal:**
  + O uso de frequências Sub-THz proporciona **grandes larguras de banda**, mas sofre com **perdas severas de propagação** e **alcance limitado**.
  + Para mitigar esse problema, são propostas soluções como **densificação de redes** e uso de **MIMO massivo (Multiple Input Multiple Output)**, que melhora a eficiência da transmissão de dados.
* **Beamforming Avançado:**
  + O **beamforming** é uma técnica essencial para direcionar o sinal de maneira mais eficiente.
  + Ao invés de propagar o sinal de forma omnidirecional, como acontece nas redes Wi-Fi convencionais, o beamforming **direciona a transmissão** para onde há demanda, aumentando a potência e reduzindo interferências.
  + Funciona em conjunto com o **MIMO massivo**, permitindo **comunicações mais estáveis e eficientes**.
* **Consumo Energético:**
  + A operação em frequências mais altas tende a **aumentar o consumo de energia**.
  + Para otimizar esse aspecto, são propostas soluções como **processamento híbrido (digital/analógico)**, reduzindo a complexidade computacional e o consumo de energia na transmissão de sinais.

#### **Importância da TIA 1 para o 6G:**

A implementação da tecnologia **Sub-THz** permitirá que a **rede 6G alcance velocidades de transmissão muito superiores às do 5G**, viabilizando novas aplicações e tornando a comunicação **mais eficiente, confiável e de baixa latência**. No entanto, ainda há desafios técnicos a serem resolvidos, especialmente no que se refere à **propagação de sinal e consumo energético**.

**2.2. TIA 2:** Intelligent Radio Environments

A **TIA 2** propõe o uso de **Superfícies Refletoras Inteligentes (IRS)** para melhorar a propagação de sinais na faixa de Sub-THz, enfrentando o desafio das perdas severas de propagação e bloqueios de sinal. Essas superfícies são compostas por metamateriais reconfiguráveis, que podem refletir, refratar ou direcionar sinais de forma inteligente e controlada por IA.

#### **Principais Benefícios das IRS no 6G:**

* **Ampliação da Cobertura e Conectividade**
  + Como os sinais na faixa de Sub-THz possuem alcance limitado e são facilmente bloqueados, as IRS ajudam criando **caminhos alternativos para a propagação do sinal**.
  + Isso permite **melhor cobertura em áreas urbanas densas**, onde edifícios e obstáculos poderiam bloquear os sinais.
* **Otimização da Qualidade do Sinal**
  + As IRS ajustam a **fase e a amplitude do sinal refletido** em tempo real, otimizando sua propagação.
  + Esse controle dinâmico melhora a **eficiência espectral e reduz interferências**, garantindo comunicações **mais rápidas e confiáveis**.
* **Maior Segurança na Comunicação**
  + Além de melhorar a propagação do sinal, as IRS podem ser utilizadas para proteger as comunicações contra espionagem.
  + Ao controlar o direcionamento do sinal, é possível reduzir a probabilidade de interceptação por atacantes.
  + No entanto, novos desafios de segurança surgem, exigindo o desenvolvimento de protocolos robustos para evitar vulnerabilidades.
* **Redução do Consumo de Energia**
  + As IRS diminuem a necessidade de retransmissores ativos, reduzindo o consumo de energia na rede 6G.
  + A combinação de IA e machine learning permite ajustar os refletores de forma eficiente e em tempo real, evitando desperdícios energéticos.

#### **Importância da TIA 2 para o 6G:**

#### As **Superfícies Refletoras Inteligentes** serão fundamentais para superar os desafios de propagação do Sub-THz e tornar as redes 6G mais eficientes, seguras e sustentáveis. A combinação de IRS com beamforming, MIMO massivo e algoritmos de IA promete revolucionar a conectividade móvel, possibilitando comunicações de altíssima velocidade e confiabilidade.

**2.3. TIA 3:** Network as a Sensor

A **TIA 3** propõe o uso da rede como sensor, pois prevê a necessidade de redes wireless terem suporte para comunicação onipresente, incluindo sensoriamento e serviços de localização. Elas poderão utilizar técnicas variadas, incluindo o **channel charting**, que é uma técnica de localização e mapeamento de ambiente baseada em características do canal de comunicação sem fio, sem a necessidade de GPS ou sensores adicionais.

**Principais Benefícios da Rede como Sensor :**

* **Catalisadores de Soluções que Integram Comunicação e Sensoriamento**
  + Máquinas serão capazes de **perceber e entender o ambiente** ao qual estão inseridas, de forma que executem tarefas com melhor monitoramento e segurança.
* **Convergência da comunicação e do sensoriamento em níveis**
  + **Coexistência**: Estes **não estarão diretamente ligados pelo 6G**, mas o sensoriamento se beneficiará do desenvolvimento de melhores softwares e hardwares em 6G.
  + **Cooperação**: A comunicação se beneficiará das **informações contextuais** possibilitadas pelo sensoriamento para melhorar o desempenho de rede. Ou seja, nos dois primeiros níveis, coexistirão e cooperarão, mas não serão um só.
  + **Integração**: Sensoriamento e comunicação serão **parcial ou totalmente integrados**, compartilhando da mesma infraestrutura e dos mesmos componentes de hardware.
* **Mapas do ambiente**
  + Estes serão criados em um processo parecido ao de channel charting, utilizando **Informação do Estado do Canal (CSI) e aprendizado não supervisionado**, onde transmissores e seus respectivos channel charts de baixa dimensão devem estar próximos, com o propósito de melhorar os gerenciamentos de recursos de rádio e de feixes (mmWave e sub-THz) e a associação de células e handover.

É importante notar que a convergência da comunicação e sensoriamento levantam questões de segurança e privacidade. Possíveis links de comunicação podem tornar o sistema vulnerável a ciberataques. Já a localização explícita de usuários e dispositivos possibilitados pelo sensoriamento podem ferir a privacidade, embora um forte candidato a ser usado é o channel charting com pseudo-localização, evitando expor posições reais de usuários e dispositivos.

Assim, a rede como sensor terá aplicações variadas, tal como a **detecção e rastreamento de objetos**, por exemplo em cenários de mobilidade (industrial e automotivo), em frequências **sub-6GHz** e **sub-THz,** o que aumentará a integração entre rede, comunicação e sensoriamento.

**2.4. TIA 4:** 6G Connectivity

A **TIA 4** se preocupa com o **melhoramento da conectividade** e do design da pilha de protocolos, pois eles, especialmente a primeira, são necessários para uso de IoT e Machine-Type Communication (MTC). Isso se dá pela tendência de **crescimento rápido das redes de IoT/MTC**, já que funcionam de maneira diferente da internet banda larga, que é previsível e em comparação, não tem muitas restrições energéticas.

As técnicas mais promissoras para as redes de IoT/MTC são as de **protocolos modernos de acesso aleatório (RA)** e de **compressive sensing. Elas possuem as seguintes vantagens e desvantagens:**

* **Protocolos Modernos de Acesso Aleatório (RA)**
  + **Vantagem:** pode ser aplicada em redes assíncronas;
  + **Desvantagem**: menor eficiência.
* **Compressive Sensing**
  + **Vantagem:** mais eficiente em termos de energia;
  + **Desvantagem:** depende de forte sincronização.

Sobre a eficiência energética das redes **IoT/MTC**, **transceptores** de baixo consumo devem ser usados e melhorados com **algoritmos de recepção de baixa complexidade** e **políticas inteligentes de ativação ("wake-up").** Já para tecnologias **on-device/edge**, a aposta é o **processamento neuromórfico** e **redes neurais impulsionais** (spiking neural networks) utilizadas em aplicações baseadas em eventos.

A **TIA 4** se preocupa, ainda, com a **comunicação baseada em semântica,** buscando implementar **modelos generativos** para lidar com o **princípio do gargalo da informação**, além de buscar **melhorar as abordagens existentes** como designs baseados em **AoI (Age of Information)** e um **MAC mais flexível,** ou mesmo outras que podem exigir alterações até a camada física, como o **Over-The-Air computation (OTA).**

Por fim, uma das grandes premissas do projeto 6G é levar em consideração a segurança. Portanto, a **TIA 4** propõe o uso de **criptossistemas de chave pública (PKCs),** que serão rápidos e fáceis de implementar em hardware, e **a criptografia homomórfica,** onde as mensagens são criptografadas na origem, transmitidas, recebidas pelo destinatário, que fará cálculos para descriptografar a mensagem.

Assim, a TIA 4 se preocupa de forma holística com a conectividade, buscando melhorar a sua eficiência, já levando em consideração a futura alta demanda das redes IoT/MTC e as mudanças necessárias no design fim a fim da pilha de protocolos.

**2.5. TIA 5:** Post-Quantum Security by Design

A **TIA 5** propõe segurança como um fator de prioridade máxima, visto que gerações anteriores de redes móveis consideram segurança como um recurso adicional, e não obrigatório. Visando corrigir esta questão, o projeto do 6G-RIC tratará segurança como prioridade, por meio de um projeto de segurança desde a concepção.

**2.5.1.** Security by Design

Security by Design descreve o princípio guia de acordo com quais as considerações de segurança nos estágios iniciais de design de um sistema conduzem a resultados mais promissores e eficientes do que adicionar medidas após um sistema já estar finalizado. A nova arquitetura de segurança será planejada de modo a cumprir com requisitos básicos de rede como baixa latência, baixa complexidade e eficiência energética ao passo que também é potente e flexível o suficiente para lidar com riscos e ameaças desde o nível mais básico ao mais avançado, como ataques que utilizam computadores quânticos.

**2.5.2.** Open-RAN

Open Radio Access Network é um conceito de arquitetura aberta para redes de acesso via rádio, permitindo que diferentes fornecedores desenvolvam e integrem componentes de uma rede móvel de forma interoperável. Devido às suas estruturas abertas e modulares, as redes Open-RAN podem ser vulneráveis a invasões e ataques DDoS, portanto o 6G-RIC integrará métodos eficientes de machine-learning para detectar e combater estes tipos de ataques. Em adição a identificar e desenvolver protocolos criptográficos eficientes em termos de recursos para encriptação, autenticação e assinaturas, a segurança na camada física terá um papel crucial. Um dos ativadores da integração da segurança da camada física são os chamados Mapas de Sigilo (Secrecy Maps), representações espaciais da segurança da informação na camada física de uma rede sem fio. Eles indicam regiões geográficas onde a comunicação é segura ou vulnerável, baseando-se em métricas como a taxa de sigilo (Secrecy Rate) e a capacidade de vazamento de informações.

**2.5.3.** Computadores Quânticos

Uma questão importante levantada no 6G-RIC é como atingir sinergia com protocolos criptográficos em camadas mais altas e o qual será o impacto na segurança versus complexidade de tais protocolos. Ademais, o rápido desenvolvimento de computadores quânticos e seu potencial de quebrar alguns dos procedimentos de chave clássicos, assim como o desenvolvimento dinâmico de detecção e métodos de medição para tecnologias que podem ser usadas para ataques quânticos abrem novas possibilidades para romper o sistema a prova de falhas. Portanto, o projeto se concentrará na integração dos métodos de criptografia pós-quântica disponíveis atualmente e, a longo prazo, na segurança quântica da camada física.

2.6. **TIA 6:** Autonomous Convergent Networks

A TIA 6 aborda inovações no campo referente às redes autônomas para possibilitar a convergência entre redes e aplicações verticais no 6G-RIC, integrar comunicação semântica em protocolos de comunicação e automatizar processos como os de atualização e configuração.

Com os avanços tecnológicos na comunicação, aplicações empresariais e emergência de redes privadas, as redes 6G necessitarão de inovações para serem capazes de acompanhar os avanços. Além disso, exigirão uma ampla automação para reduzir a sobrecarga geral no gerenciamento da rede.

A introdução da comunicação sub-THz, das Superfícies Inteligentes Refletoras (IRSs) e da convergência entre sensoriamento e comunicação trará mudanças na arquitetura, planejamento e gestão das redes 6G.

A integração das IRSs desafia a alocação de recursos e o controle da rede, especialmente em cenários com múltiplas estações-base e usuários. Além disso, a combinação entre comunicação e sensoriamento exige otimização multidimensional, equilibrando Key Performance Indicators (KPI) de desempenho e detecção. O 6G-RIC abordará desafios como novos protocolos MAC, network slicing para sensoriamento e definição de métricas para novos serviços. Também exigirá melhorias em taxa de dados, confiabilidade, latência e eficiência energética, permitindo aplicações avançadas como realidade virtual industrial, automação inteligente, redes veiculares (V2X) e serviços de missão crítica.

Para viabilizar essa convergência, será fundamental integrar redes locais, como redes privadas de campus, às infraestruturas públicas de telecomunicações. Isso será possível por meio de tecnologias como network slicing e redes definidas por software (SDN) com virtualização, permitindo:

* Gerenciamento dinâmico de recursos, garantindo que diferentes aplicações tenham acesso à largura de banda necessária em tempo real.
* Segmentação de rede sob demanda, garantindo segurança e personalização para diferentes indústrias.
* Roteamento otimizado e confiável, reduzindo atrasos em aplicações de missão crítica.

O uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina (AI/ML) permitirá a gestão automatizada da rede, otimizando a alocação de recursos e garantindo baixa latência e eficiência energética.

A comunicação semântica representa uma mudança no modelo tradicional de transmissão de dados, priorizando o significado e a relevância da informação em vez do simples transporte de pacotes. Essa abordagem se baseia no conceito de "entregar as mensagens certas para os destinos certos no momento certo", reduzindo a carga de transmissão e melhorando a eficiência da rede. No 6G-RIC, a comunicação semântica será integrada aos protocolos da rede, exigindo:

* Otimização fim a fim (E2E) baseada em métricas semânticas, como Idade da Informação (AoI - Age of Information).
* Reformulação dos protocolos de comunicação, permitindo a priorização de informações críticas e filtragem de dados irrelevantes.
* Colocação inteligente de funções de rede, garantindo que os dispositivos e servidores analisem o significado da informação antes de transmiti-la.

Redes 6G exigem **processamento descentralizado**, tornando a otimização centralizada impraticável. Algumas possíveis soluções a se pensar são:

* Computação de borda (Edge Computing) para menor latência.
* Networking IA/ML para automação e gestão inteligente.
* Integração de computação heterogênea e redes de comunicação para maior eficiência.

As **redes ópticas X-haul** serão cruciais para suportar altas taxas de dados e baixa latência. Algumas de suas soluções são:

* Óptica coerente e multiplexação WDM para otimizar transmissão.
* Redes ópticas passivas (PON) para diferentes aplicações.
* Circuitos fotônicos integrados para eficiência energética e redução de custos.

1. **Análise Crítica**

O artigo aborda de maneira abrangente os desafios e inovações tecnológicas relacionadas ao desenvolvimento do 6G, trazendo uma visão detalhada sobre as áreas de pesquisa mais importantes para a evolução das redes móveis. Ele discute a necessidade de operar na faixa de Sub-THz (90 GHz – 300 GHz) para alcançar velocidades superiores a 100 Gbit/s, além de explorar técnicas como beamforming avançado, MIMO massivo e superfícies refletoras inteligentes (IRS) para solucionar problemas de propagação e eficiência energética.

As futuras redes terão a capacidade de atuar como sensores, abrindo novas possibilidades para aplicações em áreas como mobilidade inteligente e automação industrial. No entanto, ainda existem desafios significativos relacionados à integração e otimização multidimensional. A convergência entre sensoriamento e comunicação tem o potencial de aprimorar a eficiência operacional, a segurança e a privacidade. Para viabilizar uma ampla gama de aplicações, é essencial que os protocolos de acesso e a eficiência energética sejam adaptados, garantindo a conectividade da Internet das Coisas (IoT) e das comunicações em larga escala. Além disso, o desenvolvimento de novos protocolos e a incorporação do processamento neuromórfico são aspectos fundamentais para maximizar o potencial das redes 6G no contexto da IoT e das comunicações massivas (MTC).

O desenvolvimento do 6G tem potencial para revolucionar diversas áreas, como **telemedicina, realidade aumentada, automação industrial e conectividade via satélite**. Alguns testes já estão sendo conduzidos, como o experimento da **China Mobile** com um satélite baseado em arquitetura 6G. No entanto, ainda há desafios significativos, principalmente na eficiência energética e na criação de padrões globais para a adoção da tecnologia.

Em resumo, o artigo traz uma excelente introdução ao 6G, destacando seus desafios e avanços, mas poderia se beneficiar de uma abordagem mais prática e contextualizada, explorando os impactos econômicos e sociais da nova tecnologia.

1. **Conclusão**

O estudo das direções e questões de pesquisa chave para o desenvolvimento do 6G revela um cenário promissor e desafiador. A transição do 5G para o 6G envolve não apenas um aumento significativo na capacidade de transmissão e eficiência energética, mas também a integração de novas tecnologias, como superfícies refletoras inteligentes, processamento neuromórfico, redes neurais impulsionais e a comunicação semântica.

As áreas de inovação técnica (TIAs) discutidas no relatório destacam a necessidade de soluções avançadas para superar os desafios de propagação de sinal em frequências Sub-THz, melhorar a segurança das redes móveis, integrar sensoriamento e comunicação, e garantir a conectividade eficiente em um mundo cada vez mais dependente de dispositivos IoT/MTC.

O relatório enfatiza a importância de um design de segurança robusto desde a concepção, especialmente em face das ameaças emergentes representadas pelos computadores quânticos. Além disso, a convergência de redes autônomas e aplicações verticais exigirá inovações em automação, gestão inteligente de recursos e comunicação semântica, suportadas por tecnologias como network slicing e SDN.

Em resumo, o desenvolvimento do 6G representa um avanço significativo na evolução das redes de comunicação, prometendo transformar a conectividade móvel com maior velocidade, eficiência e segurança. O aprendizado obtido ao longo dessa investigação aponta para um futuro repleto de oportunidades e desafios, onde a inovação tecnológica será fundamental para atender às demandas de uma sociedade hiperconectada e dinâmica.

1. **Referências**

* 6G-RIC. ***The 6G Research and Innovation Cluster.*** *Disponível em****:*** [***https://6g-ric.de/***](https://6g-ric.de/)
* Channel Charting. *ChannelCharting GitHub*. Disponível em:<https://channelcharting.github.io/>
* Tecnoblog. *O que é Beamforming e como isso beneficia o seu Wi-Fi?*. Disponível em:<https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-beamforming/>
* Gadget Info. *O que é o MIMO massivo e como ele abre o caminho para a adoção de 5G?*. Disponível em:<https://pt.gadget-info.com/14620-what-is-massive-mimo-and-how-it-paves-the-way-for-5g-adoption>
* Futurecom Digital. *Densificação de redes e seu papel para o bom funcionamento do 5G*. Disponível em:<https://digital.futurecom.com.br/artigos/densificao-de-redes-e-seu-papel-para-o-bom-funcionamento-do-5g/>
* Conexão Anlix - YouTube. *MIMO E MU-MIMO EM ROTEADORES | DIFERENÇAS ENTRE WIFI 5 E WIFI 6*. Disponível em:<https://www.youtube.com/watch?v=PHFRcGVitb8>
* Conexão Anlix - YouTube. *BEAMFORMING NOS ROTEADORES O QUE É?*. Disponível em:<https://www.youtube.com/watch?v=pMswU2jVDP8>
* Landi, Ana. Entenda o que é Open RAN. Disponível em: <https://openranbrasil.org.br/2023/11/06/entenda-o-que-e-open-ran/>
* RCR WIRELESS NEWS. *China Mobile claims launched world’s first 6G test satellite*. 6 fev. 2024. Disponível em:<https://www.rcrwireless.com/20240206/featured/china-mobile-claims-launched-world-first-6g-test-satellite>