

Brasil 6G

Projeto Brasil 6G

Estado da Arte em
Posicionamento, Mapeamento,
Sensoriamento e Imagem para as
Redes 6G



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	20/07/2021	Daniely Gomes Silva - Inatel Davi da Silva Brilhante - UFRJ Diego Gabriel Soares Pivoto - Inatel Joanna Manjarres - UFRJ Juliano Silveira Ferreira - Inatel Matheus Sêda Borsato Cunha - Inatel	Elaboração de conteúdo inicial.
2	27/07/2021	Daniely Gomes Silva - Inatel Davi da Silva Brilhante - UFRJ Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina - Inatel Juliano Silveira Ferreira - Inatel	Revisão do conteúdo inicial.
3	06/08/2021	Daniely Gomes Silva - Inatel Davi da Silva Brilhante - UFRJ Diego Gabriel Soares Pivoto - Inatel Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina - Inatel Joanna Manjarres - UFRJ Juliano Silveira Ferreira - Inatel Matheus Sêda Borsato Cunha - Inatel	Realização de melhorias e complementos.
4	31/08/2021	Luciano Leonel Mendes - Inatel	Revisão final.

Lista de Figuras

1	Técnicas de localização baseadas em geometria.	5
2	Localização baseada em proximidade.	6
3	Localização baseada em análise de cena.	6
4	Padrão de irradiação 3D de um arranjo planar uniforme de antenas.	10
5	Padrões de irradiação de um arranjo planar uniforme de antenas com um <i>codebook</i> DFT	10
6	Componentes da RIS.	14
7	Sistema de comunicação sem fio aprimorado por RIS.	21
8	Exemplos de <i>care robots</i>	40

Acrônimos

1G Primeira Geração de Rede Móvel Celular

2G Segunda Geração de Rede Móvel Celular

3D *Three-Dimensional*

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

4G Quarta Geração de Rede Móvel Celular

5G Quinta Geração de Rede Móvel Celular

6G Sexta Geração de Rede Móvel Celular

ACM *Agile Cloud Migration*

ADAS *Advanced Driver Assistance Systems*

ADMM *Alternating Direction Method of Multipliers*

ADoA *Angle Difference of Arrival*

AE *Autoencoder*

A-GPS *Assisted GPS*

AoA *Angle of Arrival*

AoD *Angle of Departure*

AP *Access Point*

APS *Azimuth Power Spectrum*

ARM *Advanced RISC Machine*

A-RRN *Attention-based Recurrent Neural Network*

AUV *Autonomous Underwater Vehicle*

AV *Autonomous Vehicles*

B5G *Beyond 5G*

BiCMOS *Bipolar-CMOS*

BLE *Bluetooth Low Energy*

BM *Beam Management*

BP *Belief Propagation*

BPTT *Backpropagation Through Time*

CA *Context-Aware*

CALVIN *Chain-based Low latency VNF Implementation*

CC *Channel Charting*

CCD *Charge-Coupled Device*

CF-mMIMO *Cell-Free Massive MIMO*

Cell-ID *Identificação de Célula*

C-ITS *Cooperative Intelligent Transport System*

CMOS *Complementary Metal Oxide Semiconductor*
CNN *Convolutional Neural Network*
CoAP *Constrained Application Protocol*
C-RAN *Cloud-Radio Access Network*
CRAS *Connected robotics and autonomous systems*
CSI *Channel State Information*
CW *Continuous Wave*
CWA *Cane-based Walking Assistant*
D2D *Device to Device*
DA *Discriminant Analysis*
DAIM *Distributed Algorithm for Isolating Malfunctioning*
DASH *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP*
DCT *Discrete Cosine Transform*
DFT *Discrete Fourier Transformer*
DL *Deep Learning*
DNN *Deep Neural Network*
DRL *Deep Reinforcement Learning*
DTB *Digital Twin Box*
DVB-S *Digital Video Broadcasting - Satellite*
E2E *End-to-End*
EH *Energy Harvesting*
EKF *Extended Kalman Filter*
EKF-SLAM *Extended Kalman Filter Simultaneous Localization and Mapping*
E-OTD *Enhanced Observed Time Differences*
EPON *Ethernet Passive Optical Network*
ePoW *enhanced Proof of Work*
ERB *Estação Radio Base*
ETA *Estimated Time of Arrival*
EV *Electric Vehicles*
FANET *Flying Ad Hoc Networks*
FCC *Federal Communications Commission*
FDD *Frequency Division Duplex*
FER *Frame Error Rate*
FF-NN *Feed-Forward Neural Network*
FiWi *Fiber-Wireless*
FMCW *Frequency Modulated Continuous-Wave*

FSR *Force-Sensing Resistor*
GA *Genetic Algorithm*
GaN *Gallium Nitride*
GBDMs *Geometry-based Deterministic Models*
GBSMs *Geometry-based Stochastic Models*
GCN *Graph Convolutional Network*
GIS *Geographic Information System*
GNN *Graph Neural Network*
GNSS *Global Navigation Satellite System*
GPS *Global Positioning System*
HAP *High-Altitude Platform*
HEKF *Holographic Extended Kalman filter*
HMI *Human Motion Intention*
IA *Inteligência Artificial*
IMU *Inertial Measurement Unit*
InP *Indium Phosphide*
INS *Inertial Navegation System*
IoBNT *Internet of Bio-Nano Things*
IoE *Internet of Everything*
IoIT *Internet of Intelligent Things*
IoNT *Internet of Nano Things*
IoRT *Internet of Robotic Things*
IoT *Internet of Things*
IoUT *Internet of Underwater Things*
IR-HARQ *Incremental Redundancy-Hybrid Automatic Repeat Request*
IRS *Intelligent Reflective Surface*
ITS *Intelligent Transport System*
IWA *Intelligent Walking Assistant*
IXR *Immersive eXtended Reality*
KNN *K-Nearest Neighbor*
LAM *Lie Algebra Method*
LAP *Low-Altitude Platform*
LBS *Localization-based Service*
LiDAR *Light Detecting and Ranging*
LIM *Large Intelligent Metasurface*

LIS *Intelligent Surfaces as Active Antennas*
LMAT *Localization algorithm with a Mobile Anchor node based on Trilateration*
LoS *Line-of-Sight*
LRF *Laser Rangefinder*
LSTM *Long Short-Term Memory*
LSTM-AE *Long-Short Term Memory-AutoEncoder*
LTE *Long Term Evolution*
LTE-A *LTE-Advanced*
LTE-U *LTE-Unlicensed*
M2M *Machine to machine*
MaaS *Mobility as a Service*
MAC *Media Access Control*
MDS *Multidimensional Scaling*
MEC *Multi-access Edge Computing*
MEMS *Microelectromechanical Systems*
MIMO *Multiple-Input Multiple-Output*
ML *Machine Learning*
MLE *Maximum Likelihood Estimation*
mMIMO *massive Multiple-Input Multiple-Output*
mMTC *massive Machine Type Communications*
mmWave *millimeter-wave*
MOS *Metal-Oxide-Semiconductor*
MPCC *Multipoint Channel Charting*
MQTT *Message Queue Telemetry Transport*
NB-IoT *Narrowband IoT*
NCH *Network Centric Handover*
NFV *Network Functions Virtualization*
NLoS *Non-Line-of-Sight*
NMSE *Normalized Mean Squared Error*
NOMA *Non-Orthogonal Multiple Access*
NR *New Radio*
OAM *Orbital Angular Momentum*
OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OFDMA *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OMP *Orthogonal Matching Pursuit*

ONOS *Open Network Operating System*
ONU *Optical Network Unit*
OWT *Optical Wireless Technology*
PCA *Principal Component Analysis*
PF *Particle Filter*
PIN *Positive-Intrinsic-Negative*
PRS *Positioning Reference Signal*
QCQP *Quadratically Constrained Quadratic Optimization Program*
QoS *Quality of Service*
RAN *Radio Access Network*
RF *Rádiofrequência*
RFID *Radio-Frequency IDentification*
RGB-D *Red Green Blue-Depth*
RIS *Reconfigurable Intelligent Surface*
RL *Reinforcement Learning*
RMSE *Root Mean Square Error*
ROS *Robot Operation System*
RRM *Radio Resource Management*
RSS *Received Signal Strength*
RSSI *Received Signal Strength Indication*
RSU *Road Side Unit*
RSUs *Road Side Units*
RTK *Real Time Kinematic*
SAE *Society of Automotive Engineers*
SAR *Synthetic Aperture Radar*
SCMA *Sparse Code Multiple Access*
SDN *Software Defined Network*
SDP *Semi-Definite Programming*
SEDMAG *Semidynamic Mobile Anchor Guiding*
SiGe *Silicon Germanium*
SLAM *Simultaneous Localization and Mapping*
SNR *Signal-to-Noise Ratio*
SRS *Sounding Reference Signal*
STMP *Smart Traffic Management Platform*
SWIPT *Simultaneous wireless information and power transfer*

SWIPT *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*

TCC *Traffic Command Centre*

TDoA *Time Difference of Arrival*

TDS *Time-Domain Spectroscopy*

THz *Terahertz*

ToA *Time of Arrival*

TPI *THz Pulsed Imaging*

TV *Triangulate-Validate*

UCA *Uniform Circular Array*

UCBM *University Hospital Campus Bio-Medico*

UE *User Equipment*

UHSLo *Ultra-High Sensing and Localization*

ULA *Uniform Linear Array*

URLLC *Ultra Reliable Low Latency Communications*

UWB *Ultrawide Bandwidth*

V2I *Vehicle-to-Infrastructure*

V2N *Vehicle-to-Network*

V2P *Vehicle-to-Pedestrian*

V2V *Vehicle-to-Vehicle*

V2X *Vehicle-to-everything*

VANT *Veículo Aéreo Não Tripulado*

VIN *Visual Indoor Navigation*

VLC *Visible Light Communication*

VNF *Virtual Network Function*

VSLAM *Visual SLAM*

WBAN *Wireless Body Area Network*

WET *Wireless Energy Transfer*

Wi-Fi *Wireless Fidelity*

WLAN *Wireless Local Area Network*

WWA *Walking-Frame based Walking Assistant*

Sumário

1	Introdução	1
2	Tecnologias habilitadoras para posicionamento, mapeamento e sensoriamento	3
2.1	Técnicas tradicionais de localização	3
2.2	Espectro de RF na faixa de THz	7
2.3	<i>Beamspace</i> e <i>beamforming</i>	9
2.4	Superfícies inteligentes	12
2.5	Informações de contexto	15
2.6	Sensoriamento por imagens e espectrometria na faixa de THz	16
2.7	Inteligência artificial no sensoriamento e localização inteligente	18
3	Tecnologias habilitadoras empregadas no suporte à rede de comunicação	20
3.1	Superfícies inteligentes aplicadas no suporte à rede	20
3.2	<i>Beamspace</i> e <i>beamforming</i> aplicados à melhorias de identificação de localização e posicionamento	22
3.3	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>	24
3.4	Comunicações assistidas por veículos aéreos não tripulados	26
3.5	<i>Channel Charting</i>	31
4	Tecnologias habilitadoras empregadas no suporte à aplicações	33
4.1	Aplicações de imagens e espectrometria em THz	33
4.2	Sensoriamento passivo usando transmissores de oportunidade	35
4.3	Sensoriamento ativo com convergência de radar e comunicações	38
4.4	Saúde, sensoriamento digital e biológico e <i>e-health</i>	39
4.5	Aplicações na área automotiva, carros e robôs autônomos	42
4.6	Cidades inteligentes	47
4.7	Automação industrial	51
4.8	Aplicações do agronegócio	54
4.9	Transferência de energia via RF	57
4.10	Aplicações avançadas de interação remota	59
5	Conclusão	66

1 Introdução

Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina, Juliano Silveira Ferreira
 gustavo.rodrigues@inatel.br, silveira@inatel.br

Os sistemas de comunicação têm evoluído com o objetivo de conectar todos os habitantes do planeta. Com advento da Quinta Geração de Rede Móvel Celular (5G), esse paradigma é estendido de forma a integrar virtualmente não apenas os seres humanos, mas também os dispositivos e máquinas conectados à rede. Naturalmente, essa nova configuração será acompanhada de um aumento expressivo de novos usuários, exigindo recursos que vão além da capacidade disponível na rede 5G. Desta forma, a Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G) está sendo projetada para garantir a completa integração entre os dispositivos da rede e atender com qualidade os requisitos impostos pelos novos cenários de comunicação. Além disso, a concepção da rede 6G permitirá suportar e desenvolver aplicações e serviços inovadores, até então intangíveis à nossa sociedade.

Entre os requisitos mapeados da rede 6G, destacam-se a demanda por maior vazão de dados, menor latência, alta escalabilidade de dispositivos e posicionamento de alta precisão [1, 2]. O requisito de taxa de dados está associado à evolução de aplicações de transmissão de imagem e vídeo com resolução ultra-UHD, jogos *Three-Dimensional* (3D), realidade virtual e aumentada e *backhaul* sem fio, que exigiriam taxas na ordem de terabit por segundo (Tbps). As demandas por latência estão principalmente relacionadas às aplicações com interface cérebro-máquina e automação industrial [2–4]. Neste último, a expectativa para as aplicações emergentes de manufatura de alta precisão é uma rede com latência abaixo de 1 ms e com *Frame Error Rate* (FER) na ordem de 10^{-9} [2]. Ainda, o aumento de usuários e a integração completa dos dispositivos na rede impactará diretamente na densidade de conexões estabelecidas, principalmente, para sistemas de *Internet of Things* (IoT), cuja previsão aproxima de 10^4 conexões/km². Por fim, a localização de alta precisão é uma consequência direta da disponibilidade dos demais requisitos, sendo essencial para o desenvolvimento de aplicações avançadas que estendem da automação veicular à medicina. Tais serviços demandarão posicionamento preciso, na ordem de 1 cm, com cobertura 3D [2]. Além disso, prevê-se que a rede 6G será capaz de explorar a localização de terminais e dispositivos em conjunto com as informações do ambiente (objetos e superfícies), a fim de fornecer melhores condições de comunicação e de qualidade de serviço.

Sendo assim, o objetivo desse documento é apresentar uma revisão bibliográfica das técnicas de localização, mapeamento e sensoriamento que, possivelmente, atuarão na implementação das redes 6G. Entre esses métodos, serão destacados as técnicas tradicionais de localização (baseado em geometria, proximidade e análise de cena) e sensoriamento por imagens e espectrometria. Essas técnicas aliadas à outras tecnologias emergentes, como superfícies inteligentes e transmissão por ondas milimétricas e *beamforming*, além da Inteligência Artificial (IA), permitirão que os requisitos previstos para as redes 6G sejam atendidos, proporcionando maior confiabilidade, precisão e resolução em sistemas de posicionamento e imageamento. Além disso, a integração entre as tecnologias possibilitará o aprimoramento e desenvolvimento de novas aplicações para diversas áreas, como agricultura e saúde. Nesse contexto, esse documento introduz exemplos de aplicações inovadoras que estão relacionadas às técnicas discutidas e também apresenta um levantamento do estado da arte das tecnologias envolvidas.

Esse relatório está organizado como segue. A seção 2 introduz as técnicas consolidadas para localização, mapeamento e sensoriamento, e as tecnologias emergentes necessárias à implementação da rede 6G. A seção 3 apresenta tecnologias inerentes às redes 6G que, aliadas às técnicas de posicionamento, beneficiarão a rede com melhor cobertura ou qualidade de serviços. A seção

4 apresenta o estado da arte em aplicações de localização sensoriamento e mapeamento. Por fim, a seção 5 conclui esse documento.

2 Tecnologias habilitadoras para posicionamento, mapeamento e sensoriamento

A evolução das redes de comunicação móvel é estabelecida para atender novos requisitos de operação e aplicações emergentes. Este processo é viabilizado pelo aprimoramento de técnicas e conceitos utilizados em gerações anteriores. Sendo assim, esta seção tem como objetivo apresentar as tecnologias candidatas (ou habilitadoras) necessárias para o desenvolvimento da rede 6G, tendo em vista as funcionalidades de posicionamento, mapeamento, sensoriamento e imageamento. As tecnologias aqui descritas possibilitarão atingir as demandas de precisão e resolução previstas para a rede 6G.

2.1 Técnicas tradicionais de localização

Joanna Carolina Manjarres Meneses
joanna@land.ufrj.br

Como mencionado anteriormente, os sistemas de posicionamento de dispositivos móveis tem sido aprimorado a cada nova geração. Parte dessa evolução está associada ao uso de técnicas consolidadas, como o *Time of Arrival* (ToA). Assim, aqui serão apresentadas algumas técnicas tradicionais para sistemas de localização e sensoriamento. Estas poderão ser exploradas pela rede 6G em conjunto com tecnologias emergentes, para alcançar novos patamares de precisão e resolução.

A geolocalização é o princípio que determina a posição de um objeto ou indivíduo na superfície terrestre. Atualmente, as coordenadas geográficas são obtidas por meio de redes de comunicação terrestre ou por satélite. Este último, popularizado pelo *Global Positioning System* (GPS), é amplamente utilizado nos dispositivos móveis devido a sua cobertura global e a sua relativa precisão na obtenção das coordenadas. Como todo sistema de comunicação sem fio, as redes formadas por satélites apresentam algumas limitações, como interferência e bloqueio de visada, causando principalmente diminuição da precisão. Neste caso, a obtenção das coordenadas é auxiliada pelos sistemas de rádio terrestre, dado pelas redes celulares, *Wireless Local Area Network* (WLAN), *Ultrawide Bandwidth* (UWB), *Bluetooth*, *ZigBee* e *Radio-Frequency Identification* (RFID) [5].

Desde a Primeira Geração de Rede Móvel Celular (1G), as técnicas de localização sem fio têm sido amplamente investigadas e implementadas nos dispositivos móveis. Ao conhecer a localização dos usuários, as redes são capazes de otimizar os recursos utilizados e melhorar a capacidade de comunicação. A evolução dos sistemas celulares permitiu a criação e implementação de novos serviços baseados em localização, também denominado como *Localization-based Service* (LBS). Estes serviços têm se tornado cada vez mais presentes em aplicações que transitam entre entretenimento, saúde e segurança [6, 7].

A localização sem fio é baseada nas características físicas do sinal eletromagnético, dadas pela potência e pelos tempos e ângulos de chegada. Na literatura, a localização por rádio é classificada de acordo com a entidade que realiza o cálculo da posição, sendo esta a rede ou o *User Equipment* (UE) [6]. Quando a posição é definida pelo UE, o cálculo é realizado por meio dos sinais enviados pela Estação Radio Base (ERB). Neste caso, a estimação da localização está diretamente relacionada à capacidade do dispositivo móvel. Assim, o aperfeiçoamento do desempenho não depende de atualizações na infraestrutura da rede. Esta abordagem é empregada pelo sistema GPS, em que os receptores estimam sua posição baseado nos sinais

emitidos pelos satélites [8]. A técnica *Enhanced Observed Time Differences* (E-OTD) também opera de forma semelhante [8]. Quando a identificação de localização é de responsabilidade da rede, a ERB coleta os sinais de referência enviados pelo UE e estima a posição de forma centralizada, evitando assim o processamento pelo usuário. Desta forma, os recursos exigidos no processamento são minimizados pelo lado do UE, tornando uma alternativa para dispositivos de IoT e de sensores sem fio [9]. Por outro lado, esta abordagem é bastante susceptível aos efeitos de desvanecimento causados pelo multipercurso, o que prejudica a estimação da localização. Nesta classificação, destacam-se os métodos baseados em medidas da intensidade de sinal, dados por *Angle of Arrival* (AoA), ToA, *Time Difference of Arrival* (TDoA) e o sistema Identificação de Célula (Cell-ID) [10, 11]. Vale ressaltar que uma abordagem denominada como híbrida é bastante utilizada nas gerações recentes de redes celulares. Nesta abordagem, a localização do usuário é definida pela combinação de duas ou mais técnicas com o objetivo de aumentar a precisão da estimação. Alguns exemplos deste sistemas são: *Assisted GPS* (A-GPS) [8], o sistema híbrido *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) em conjunto com o GPS [12], TDoA combinado com GPS [13], ToA assistido por AoA [14], entre outros.

As técnicas de localização são geralmente classificadas em duas categorias: localização direta e localização em duas etapas [9]. Na primeira, o sinal recebido é utilizado diretamente para estimar a localização do usuário. No procedimento em duas etapas, a estimação da localização é realizada a partir dos dados de *Received Signal Strength* (RSS), ToA, TDoA e AoA extraídos do sinal. Geralmente, os métodos de localização em duas etapas são mais utilizados devido às restrições de complexidade nos sistemas móveis. Uma divisão subsequente dos algoritmos de localização de duas etapas classifica as técnicas pela abordagem utilizada, sendo estas baseadas na geometria (trilateração e triangulação), na análise de cena e na proximidade. A seguir, as três abordagens de localização de duas etapas serão detalhadas.

2.1.1 Localização baseada na geometria

As técnicas de localização geométricas exploram as propriedades triangulares entre as ERBs e o UE para definir a sua posição. Este método é realizado por meio de duas abordagens: trilateração e triangulação [9]. A trilateração estima a localização do usuário por meio dos sinais recebidos de diferentes ERBs, como observado na Figura 1a. Neste caso, o posicionamento das ERBs é conhecido e a distância até o UE é estimada a partir das técnicas ToA ou TDoA, baseadas no tempo de chegada dos sinais recebidos. Por outro lado, a triangulação se baseia no ângulo de chegada (AoA) dos sinais transmitidos pelas ERBs e recebidos pelo UE. Neste cenário, a localização do usuário é calculada usando trigonometria com o auxílio de três pontos, sendo dois pontos de referência e um ponto alvo como observado na Figura 1b.

Independente da técnica utilizada, a estimação da localização é fundamentada nas métricas extraídas do sinal. Essas técnicas são detalhadas a seguir:

- *Time of Arrival* (ToA): Esta métrica é definida pelo tempo de propagação do sinal, sendo utilizada na estimação da distância entre uma ERB e um UE. Neste caso, o modelo de trilateração é construído a partir de três ERBs para um modelo bidimensional e quatro ERBs para um modelo tridimensional. As localizações das ERBs devem ser conhecidas, já que este modelo é altamente dependente do alcance e da sincronização entre os UEs e a ERB. Nesta abordagem, qualquer defasagem prejudica o cálculo da estimação da distância [9, 14]. A trilateração por ToA é interpretada como um círculo centrado em cada ERB, e a interseção dos 3 ou 4 círculos determina a posição do UE [10].

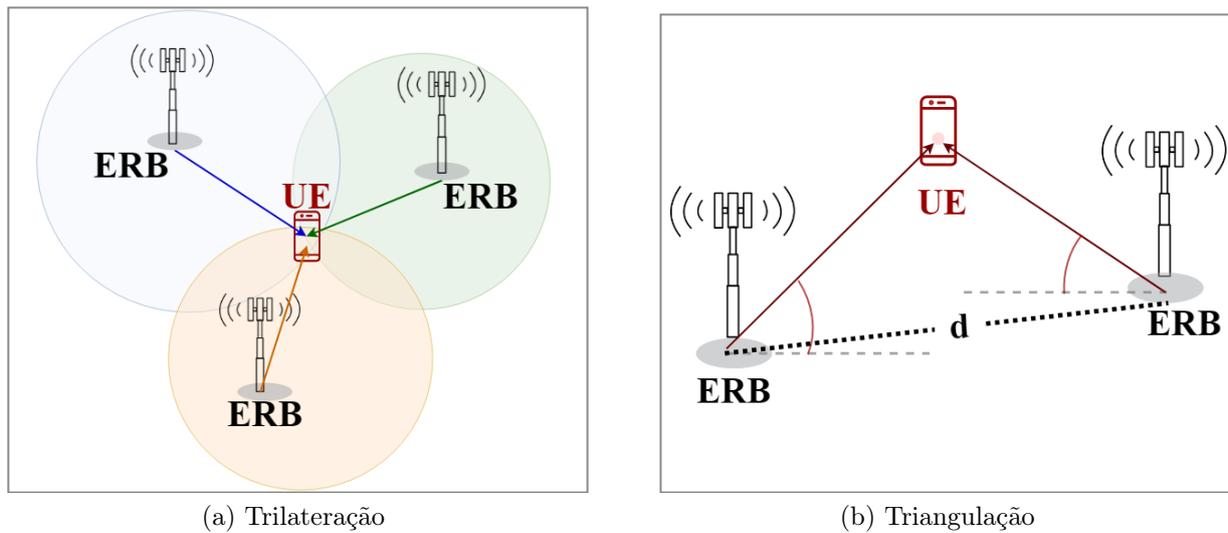


Figura 1: Técnicas de localização baseadas em geometria.

- *Time Difference of Arrival (TDoA)*: Também conhecido como *Estimated Time of Arrival (ETA)*, o TDoA é definido pela diferença entre os tempos de propagação do sinal de um usuário até diferentes ERBs. Neste caso, dado que o sinal viaja na velocidade da luz, a diferença entre os tempos de chegada é traduzida em distância. A diferença de tempos é computada em posições hiperbólicas ao redor do UE e a interseção das hipérbolas determina a posição do usuário, sendo necessária a sincronização entre as ERBs e o UE. Para obter melhor acurácia, são necessárias pelo menos 3 ERBs [10]. Uma das vantagens desta técnica é aumentar a vida útil da bateria do UE, uma vez que para encontrar a localização é necessário apenas o envio de um sinal de referência.
- *Angle of Arrival (AoA)*: Esta métrica se refere ao ângulo de incidência do sinal da UE na antena de recepção da ERB. O AoA permite calcular a posição do usuário usando conceitos de trigonometria básica e os ângulos obtidos por pelo menos duas ERBs. A utilização desta métrica na triangulação é vantajosa por não exigir sincronização entre as ERBs e o UE [8, 10]. No entanto, para obter um boa precisão, é necessário linha de visada entre o UE e a ERB.

2.1.2 Localização baseada em proximidade

A localização por proximidade é comumente empregada em cenários cuja precisão não seja um fator prioritário, pois, neste caso, o sistema relata apenas se os dispositivos estão conectados na rede. Desta forma, a posição determinada para os UEs está limitada à proximidade com a ERB [15, 16]. Essa abordagem é utilizada em sistemas Cell-ID, na qual um servidor de localização pode definir se um dispositivo está ou não dentro do raio de cobertura de uma dada célula. Além disso, o método Cell-ID setorizado pode ser usado conforme apresentado na Figura 2. Este método divide a célula em vários setores e utiliza estas informações para melhorar a precisão da localização do dispositivo dentro da célula.

A RSS é uma das técnicas utilizadas pela localização baseada em proximidade. Esta técnica faz uso da potência média dos sinais propagados da ERB com o intuito de estimar a localização do UE por meio de modelos de propagação ou modelos empíricos. A RSS tem como vantagens

não precisar de sincronização entre os agentes envolvidos na rede e possui uma alta acurácia em ambientes *Line-of-Sight* (LoS) e de curto alcance. A adoção da RSS poderá exigir instalação ou modificação do software do UE e pequenas alterações na infraestrutura da rede. Por outro lado, essa técnica tem como desvantagens a necessidade de três pontos de referência para estimar a localização do UE, a baixa precisão em ambientes *Non-Line-of-Sight* (NLoS) devido ao efeito multipercurso e a exigência de modelos de propagação precisos para prover uma estimativa confiável [8,9].

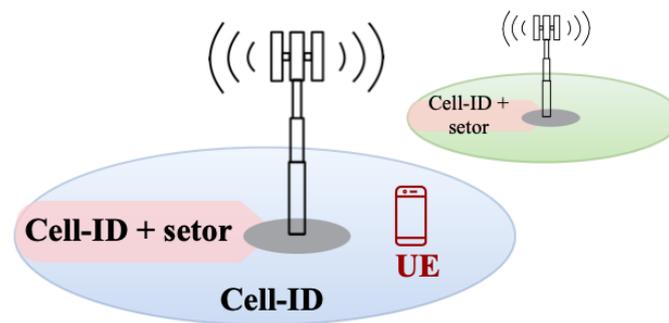


Figura 2: Localização baseada em proximidade.

2.1.3 Localização baseada na análise de cena

Na localização baseada na análise de cena, o ambiente é dividido em setores (*fingerprint*) e, após se conhecer o nível de RSS em cada setor, é estimada a localização do UE por meio do uso de mecanismos *Machine Learning* (ML), conforme apresentado na Figura 3. A estimativa da localização na análise de cena pode ser dividida em duas fases: *off-line* e *on-line*. Na fase *off-line*, é realizado um treinamento com o intuito de mapear as diversas intensidades do sinal em cada setor, criando um banco de dados com os parâmetros do canal. A partir dessas informações, um modelo de previsão é criado para determinar a posição do UE. O treinamento é realizado por meio de algoritmos, como o *K-Nearest Neighbor* (KNN). Já na fase *on-line*, o nível de RSS é medido em tempo real e é comparado com as coordenadas de localização estimadas com base nas informações da base de dados obtida no treinamento. A partir dessa comparação, o sistema retorna a localização estimada da UE [8,9].

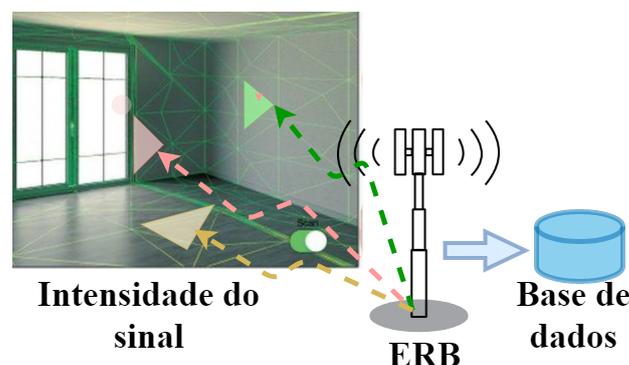


Figura 3: Localização baseada em análise de cena.

2.2 Espectro de RF na faixa de THz

Juliano Silveira Ferreira
silveira@inatel.br

As faixas elevadas de frequência são candidatas em potencial para suportar adequadamente as demandas da rede 6G. Ainda inexploradas, essas faixas permitem o uso de uma extensa largura de banda, suprindo, principalmente, os requisitos de vazão, quantidade de usuários, localização e sensoriamento previstos para a próxima geração. Atualmente, a rede 5G está alocada para operar na faixa de frequência FR1, que vai de 410 MHz a 7,125 GHz, e FR2, que vai de 24,25 a 52,6 GHz, sendo esta última na faixa de ondas milimétricas [17].

A banda Terahertz (THz) se refere formalmente à faixa de 300 GHz à 3 THz [3]. A faixa de 30 GHz à 300 GHz é denominada como faixa de ondas milimétricas ou *millimeter-wave* (mmWave), e a faixa entre 100 GHz e 300 GHz, por sua vez, é normalmente chamada como sub-THz [3]. Os autores em [3] destacaram que a rede 6G deve ser beneficiada principalmente pela exploração da faixa de 100 GHz à 1 THz. Alguns estudos indicam potencial na exploração de frequências até a ordem de 3 THz [3,17] e outros mencionam até 10 THz [4,18]. Com relação à largura de banda, a expectativa é de que a rede 6G empregue uma banda pelo menos 5 vezes maior que a banda ocupada pela rede 5G, ou seja, aproximadamente 500 MHz [17]. A *Federal Communications Commission* (FCC) propôs que algumas faixas do espectro acima de 100 GHz, sub-bandas compreendidas entre 116 e 246 GHz, sejam consideradas, a princípio, como faixas não licenciadas [3,17]. Esta determinação permite o emprego de tais faixas de frequência para a realização de pesquisas e testes, impulsionando o desenvolvimento de circuitos e soluções que possam servir de base para a operação da rede 6G.

O aumento da frequência de operação prevista para a rede 6G impacta diretamente nas aplicações de localização, mapeamento e sensoriamento. A redução do comprimento de onda implica em feixes (*beams*) mais estreitos e em antenas de alto ganho fisicamente menores. Isto facilita a instalação de arranjos (*arrays*) com um número maior de antenas nos dispositivos de comunicação [3,17]. Ainda, esta nova configuração permite explorar técnicas que envolvam as métricas do sinal, como ângulo de chegada, para aumentar a precisão e resolução em aplicações de localização e mapeamento de ambientes. Como as ondas em frequências da faixa de THz são absorvidas por obstáculos, a análise dos caminhos de propagação podem ser melhor exploradas para maior precisão do mapeamento de ambientes. A comunicação com maiores taxas de dados, viabilizada pelo emprego de larguras de banda maiores, permite que a troca ou requisição de informações relacionadas ao sensoriamento e localização possam ser realizadas de maneira mais ágil entre diferentes dispositivos e aplicações [17]. Vale destacar que frequências mais elevadas têm sido empregadas por diversas aplicações, incluindo sensoriamento, mapeamento por imagens e espectrometria, conforme serão detalhadas na seção 4.1. Ao considerar o emprego de frequências na faixa THz, a rede 6G permitirá integrar essas aplicações à rede móvel, bem como viabilizará o desenvolvimento e implantação de novas tecnologias.

A implementação de soluções comerciais na faixa THz demandam a superação de diversos desafios, dentre os quais pode-se destacar a atenuação atmosférica e altas perdas devido a efeitos de espalhamento, penetração e bloqueio de sinal [4]. A atenuação atmosférica em frequências inferiores a 6 GHz pode ser considerada desprezível. Porém, em frequências mais elevadas, na qual o comprimento de onda é comparável ao tamanho de partículas e gases atmosféricos, esta atenuação é significativa [4,17]. Nessa faixa de frequência, a atenuação atmosférica é causada principalmente pela absorção de moléculas de oxigênio e de vapor de água, cujo impacto é maior em ambientes externos. As perdas por absorção por oxigênio podem chegar a picos de

15 dB/km para a frequência de 60 GHz, enquanto a absorção por moléculas de água podem chegar a picos de 38,6 dB, para a frequência de 323 GHz [4]. A atenuação por chuva para ondas milimétricas varia na ordem de 2,55 dB/km a 20 dB/km em precipitações com intensidade de 2 mm/h a 50 mm/h, respectivamente [4]. Para frequências mais baixas, entre 28 e 38 GHz, a atenuação é menor, na ordem de 7 dB/km em precipitações com intensidade de 50 mm/h. Com relação ao bloqueio de sinal, destaca-se que o sinal em mmWave e THz são mais susceptíveis quando comparado às frequências mais baixas. Os bloqueios atenuam a intensidade do sinal, inviabilizando o estabelecimento da comunicação. A atenuação do sinal na faixa de mmWave, por exemplo, é na ordem de 3 a 18 dB para obstáculo de vidro, de 17 a 25 dB para folhagens de árvore, de 20 a 35 dB para o corpo humano, e de 40 a 80 dB para materiais de construção [4, 19]. O emprego de um número grande de *arrays* de antenas, associado a *beams* com feixes estreitos, permite aumentar a intensidade do sinal para um determinado enlace, uma vez que a comunicação pode ser realizada de maneira bastante diretiva. Entretanto, o uso destes procedimentos pode aumentar a latência da comunicação, principalmente em cenários de maior mobilidade [4]. Além disso, as ondas milimétricas também são mais suscetíveis ao espalhamento Doppler. Nas frequências entre 30 e 60 GHz, por exemplo, o espalhamento Doppler é cerca de 10 e 20 vezes maior, respectivamente, do que o espalhamento em 3 GHz [4].

Devido aos desafios apresentados, a comunicação na faixa de mmWave, e, conseqüentemente, em frequências superiores, tem sido considerada para atuar em comunicação LoS [4]. O emprego de frequências mais elevadas proporcionam uma maior resolução e precisão de localização ao custo de uma menor cobertura, enquanto as frequências mais baixas oferecem uma precisão menor de localização, porém, com maior cobertura. Sendo assim, os autores em [17] destacaram a necessidade de um processamento de sinais correspondente a uma grande faixa de frequências, empregando como base modelos de canais precisos para alcançar um sistema com alta cobertura e precisão de localização. A definição de modelos de canais para as frequências de operação consideradas é de suma importância na concepção, desenvolvimento e otimização de um sistema de radiocomunicação. A modelagem impacta diretamente nos algoritmos e técnicas empregadas no sensoriamento, mapeamento e localização. Os autores de [17] salientaram a necessidade de desenvolvimento de modelos consistentes de canais para as frequências de THz, tanto em relação ao domínio da frequência quanto ao domínio espacial. Ainda, mencionaram a necessidade de criação de modelos detalhados que contemplem grandes *arrays* de antenas, bem como superfícies refletoras. Com relação à consistência espacial, é mencionada a necessidade de desenvolvimentos em questões relacionadas à correlação de distâncias em *arrays* de antenas altamente diretivas e de banda estreita, e o direcionamento de feixes considerando alta resolução e escala. É importante destacar que diversas pesquisas têm sido realizadas recentemente com intuito de abordar modelos de canais na faixa THz. Em [20], por exemplo, foi proposto um modelo de canal estocástico 3D para ambiente interno para ondas milimétricas. O modelo em questão foi criado com base em resultados de medidas práticas para comunicação LoS e NLoS em 28 e 140 GHz. O modelo de canal construído foi validado utilizando o simulador de canais NYUSIM [21], cujos resultados indicam coerência em termos estatísticos, levando em conta o espalhamento temporal e angular (*delay spread* e *angular spread*), entre os resultados das simulações e as medidas práticas. Em [18], os autores propuseram um novo modelo de canal 3D não estacionário, também baseado em modelagem estocástica, que pode ser parametrizada de acordo com os diferentes cenários e aplicações, como ambientes internos, comunicação *Device to Device* (D2D) e *massive Multiple-Input Multiple-Output* (mMIMO). Os autores apresentaram resultados de simulação referentes às funções de correlação e regiões de estacionariedade, compreendendo frequências na faixa de 300 a 350 GHz. Em [22], a influência do multipercorso em enlaces de

transmissão com LoS para ambiente interno é investigada nas frequências da ordem de 350 GHz. Em [23], os autores propuseram e analisaram um modelo de canal para comunicação LoS em THz, cujas análises levam em conta as alterações de condições atmosféricas, bem como de absorção molecular.

Com relação à tecnologia para implementação de circuitos operando na faixa THz, o estudo apresentado em [24] indica que o ganho de potência máximo alcançável para tecnologia *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) é unitário para frequências próximas a 350 GHz. Como consequência, fica impraticável o desenvolvimento de circuitos básicos eficientes, como amplificadores, com tecnologia CMOS. Neste caso, a implementação de circuitos integrados com *Indium Phosphide* (InP) tem surgido como uma solução para dispositivos que operam em frequências acima de 1 THz [24]. No entanto, segundo [17], esta tecnologia não será capaz de prover amplificação de forma eficiente em frequências acima de 300 GHz. Dentre outras possibilidades, pode-se citar ainda o *Gallium Nitride* (GaN), empregada em circuitos para a rede 5G, e o *Silicon Germanium* (SiGe) que pode operar em frequências na ordem de 700 GHz [17, 24]. Maiores detalhes sobre tecnologias de implementação de circuitos de Rádiofrequência (RF) para as frequências em THz estão apresentadas no relatório [25], elaborado no contexto do Projeto Brasil 6G. Vale destacar que a especificação de qual será a tecnologia adequada para a implementação de circuitos para atender os requisitos e demandas da rede 6G ainda está em aberto e deve ser alvo de novos desenvolvimentos [17].

2.3 *Beamspace e beamforming*

Davi da Silva Brilhante
dbrilhante@land.ufrj.br

Conforme mencionado na seção anterior, o uso de ondas milimétricas será um agente importante na implementação da próxima geração de redes móveis. O advento das comunicações nessas faixas de frequência torna mandatório o uso de antenas altamente direcionais. Essas antenas, compostas por múltiplos elementos irradiantes, proporcionam alta diretividade e ganho para o sinal transmitido. A diretividade é um fator importante devido à atenuação severa observada na propagação de ondas milimétricas.

As antenas direcionais dependem da adoção de técnicas como *beamspace* e *beamforming* pelas redes sem fio. *Beamspace* é o nome dado ao domínio gerado pelos feixes das antenas direcionais, devido ao seu padrão de propagação que, análogo a um feixe de luz, concentra-se em uma região e irradia através do ângulo de abertura. A Figura 4 mostra o padrão de irradiação de um arranjo planar uniforme com 2×4 elementos. Nota-se que, no exemplo da Figura 4, a energia irradiada se concentra na direção do eixo X . O *beamforming* é a técnica que permite o alinhamento entre duas antenas direcionais de recepção e transmissão. Em termos gerais, os sinais emitidos por cada elemento do arranjo de antenas se combinam e formam um padrão de radiação específico. Esse padrão de irradiação pode ser modificado em função do ganho e da fase dos sinais emitidos pelos diferentes elementos da antena, alterando, assim, a direção e a intensidade que o sinal possui ao chegar no receptor. Existem várias técnicas para realizar o *beamforming*, como o *compressed sensing* [26] e o uso de *codebooks* [27]. O *beamforming* utilizando um *codebook Discrete Fourier Transformer* (DFT), por exemplo, adota desvios de fase progressivos para cada elemento do arranjo de antenas e geram padrões de irradiação cobrindo todo o espaço angular [28]. A Figura 5 ilustra o diagrama de irradiação polar para um arranjo planar uniforme 2×4 de antenas utilizando o *codebook* DFT. Nas técnicas principais

de *beamforming*, o número de feixes e a largura destes dependem das características físicas das antenas, como o número de elementos e a distância entre eles e a técnica de *beamforming* adotada.

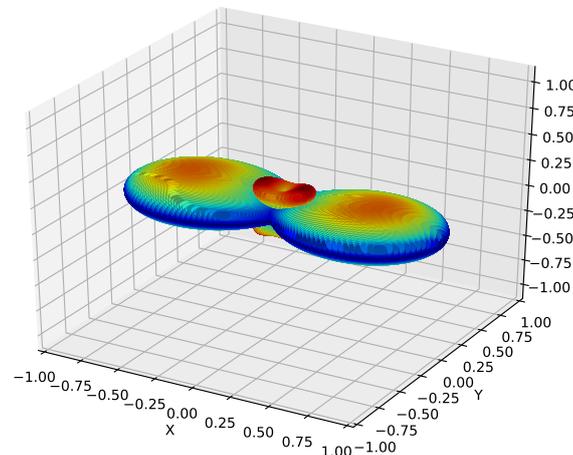


Figura 4: Padrão de irradiação 3D de um arranjo planar uniforme de antenas.

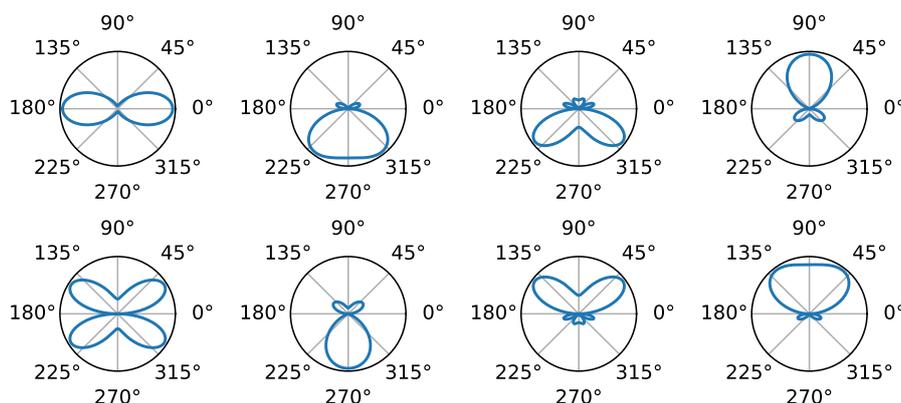


Figura 5: Padrões de irradiação de um arranjo planar uniforme de antenas com *codebook* DFT.

O *beamforming* é beneficiado pelo conceito de setorização da área de cobertura, de maneira similar à técnica Cell-ID. O *beamforming*, entretanto, pode ser utilizado para fins de localização de dispositivos, ao contrário do Cell-ID. O emprego das bandas de mmWave e THz permite, adicionalmente, que as medidas de distância obtidas através do *beamforming* tenham maior acurácia. Um dos fatores que viabilizam o aumento da precisão é a redução dos efeitos nocivos causados pela ocorrência de multipercursos. Os efeitos do multipercursos são reduzido em tais bandas devido à maior atenuação ou perda de percurso, conforme mencionado na seção 2.2, o que faz com que o sinal no receptor seja composto majoritariamente pela componente principal e por suas reflexões de primeira e segunda ordem. Assim, é possível explorar os sinais transmitidos para medir distâncias entre dispositivos, obter a localização dos mesmos e também realizar o mapeamento de ambientes (principalmente ambientes internos). Estima-se que a precisão da medida de distância na banda de mmWave e THz, esteja em torno de unidades de milímetros [29].

O *beamforming* pode ser classificado quanto à sua arquitetura, sendo: analógica, digital e híbrida. A arquitetura analógica realiza o processamento dos feixes através de ajustes de

fase na cadeia de RF para cada elemento do arranjo de antenas. Essa arquitetura permite o processamento de um único fluxo de dados. A arquitetura digital realiza todo o processamento em banda base, o que torna o *beamforming* mais preciso e viabiliza o processamento de múltiplos fluxos de dados de maneira simultânea. No entanto, o processamento dos dados em banda base é custoso em termos de processamento e gasto energético, inviabilizando a sua adoção em muitos casos. A arquitetura híbrida, por sua vez, combina as arquiteturas analógica e digital e permite reduzir os níveis de complexidade e gasto energético demandados ao limitar o número de fluxos de dados simultâneos, além de realizar parte do processamento na cadeia de RF.

A localização através do *beamforming* tradicionalmente se baseia em técnicas de AoA. O AoA pode ser medido apenas conhecendo o sinal recebido e a diferença de fase entre os elementos do arranjo de antenas, dependendo apenas do projeto do referido arranjo. Por outro lado, técnicas mais populares, como o RSS, dependem do modelo de perda de percurso adotado para medir a distância. Para exemplificar, em mmWave, frequentemente adota-se o modelo de sombreado log-normal, que depende fortemente de dois parâmetros: o expoente e o desvio padrão da distribuição aleatória de desvanecimento. Enquanto isso, o ToA mede o tempo de chegada de um sinal do usuário à ERB e é afetado apenas pelo espalhamento do atraso, que na banda de mmWave está em torno de 1 ns. Assim, a técnica de AoA mostra-se mais robusta em termos do erro médio em relação às técnicas de RSS e ToA [30].

Normalmente são empregadas duas ERBs para se obter a localização através do método AoA usando técnicas de triangulação, mas o AoA também pode ser auxiliado por outros métodos, como RSS e ToA. Para o caso de se considerar apenas uma ERB, é necessário o uso de técnicas mais complexas que explorem as reflexões e o efeito de multipercurso. Assim, pode-se realizar medidas de distância e ângulo a partir de um ou mais pontos de referência, para se alcançar uma precisão de localização adequada para certas aplicações [30].

A maioria das tecnologias de *beamforming* necessitam de uma fase de treinamento. Durante essa fase são realizadas medidas no transmissor e receptor afim de gerar informações suficientes para que o método de *beamforming* empregado encontre as direções de recepção ou transmissão ótimas. Portanto, a fase de treinamento é considerada crítica para os métodos de *beamforming*, assim como para outras técnicas de localização que explorem esses mecanismos como base de operação. Portanto, é desejável que a fase de treinamento dure o menor tempo possível e que exija o mínimo de processamento, de forma a não impactar negativamente outras funções executadas pelos terminais da rede. Como exemplo de precisão alcançada por técnicas similares, pode-se destacar a avaliação apresentada em [31], que explora os sinais de sincronismo padrão do *Long Term Evolution* (LTE), como o *Sounding Reference Signal* (SRS) e o *Positioning Reference Signal* (PRS), associados com técnicas de AoA e ToA, e permitiu alcançar uma precisão de localização da ordem de 2 m.

No estudo em [32] são propostas três técnicas baseadas em *beamforming* considerando a operação na banda de 60 GHz. As técnicas em questão se baseiam no posicionamento de nós âncoras, que são virtualmente posicionados ao espelhar a posição real do nó em relação às superfícies que refletem os sinais por eles emitidos. Segundo o trabalho em questão, o algoritmo proposto que emprega *Angle Difference of Arrival* (ADoA) atingiu maior acurácia em termos de localização em relação aos demais, porém, envolvendo uma complexidade maior, quando comparada com o algoritmo *Triangulate-Validate* (TV), que, por sua vez, tem desempenho marginalmente menor. Ambos algoritmos propostos atingem acurácia inferior a 1 m para mais de 80% dos casos testados. O desempenho alcançado, segundo os autores, podem ser suficiente para algumas aplicações relacionadas ao monitoramento em *smarthome*, *e-Health* e realidade aumentada.

Com o objetivo de diminuir a probabilidade de vieses causados pelo posicionamento dos nós, Zhu et al. desenvolveram um algoritmo para encontrar as informações de localização mais confiáveis em [33]. Utilizando uma função de distribuição de probabilidade Gaussiana conjunta para o ângulo e as coordenadas para eliminar as informações de localização com baixa confiabilidade, foi possível melhorar a acurácia da estimativa de localização com o usuário em deslocamento. Esse método foi avaliado apenas em duas dimensões e com quatro nós âncoras, o que pode ser modificado em futuros trabalhos, e o erro encontrado nas simulações realizadas está acima do esperado para os métodos de localização em ambientes internos.

Em [34], um canal de referência auxilia na correção de erros na estimativa do AoA e ToA através do *Channel State Information* (CSI). Junto a isso, os autores desenvolveram também uma versão com menor complexidade computacional do algoritmo *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP) para estimar o AoA, o que aprimorou a estimativa do AoA que é resultante desse algoritmo. Contudo, nem sempre é possível estabelecer o canal de referência, o que torna difícil a implantação desta técnica em cenários onde não há infraestrutura para isso.

Diversos são os desafios a serem superados na área tecnológica em questão. O número de implementações que empregam *beamforming* pode ser considerado como reduzido e o custo para se produzir dispositivos com essa tecnologia ainda é relativamente alto, principalmente em se tratando da arquitetura digital e híbrida, que ainda são pouco populares. Em ambientes dinâmicos a localização por meio das técnicas de *beamforming* pode ser severamente afetada devido à alta mobilidade e a propensão à total perda de sinal em caso bloqueio [35]. Todavia, o potencial que existe na alta resolução proporcionada pelos arranjos de antenas direcionais torna essa técnica competitiva e promissora, principalmente para os cenários de curto alcance e ambientes internos, onde o erro na medida de distância alcançado é inferior a 1 m [36]. Desta forma, o emprego de técnicas de *beamforming* pode ser considerado como uma tecnologia chave para o desenvolvimento da rede 6G e, potencialmente, deve servir de base para a implementação de métodos e soluções que proporcionem maior precisão e resolução da localização e do mapeamento de ambientes.

2.4 Superfícies inteligentes

Joanna Carolina Manjarres Meneses
joanna@land.ufrj.br

Em um sistema de comunicação sem fio, o sinal está sujeito aos efeitos do desvanecimento, causado pelos fenômenos de sombreamento e de multipercurso. Estes fenômenos apresentam natureza aleatória e introduzem no sinal propagado interferência construtiva e destrutiva, atraso e defasagem. Neste contexto, as superfícies inteligentes ou *Intelligent Reflective Surfaces* (IRSs) se apresentam como uma tecnologia que viabiliza o controle de certos fenômenos do canal de comunicação. A IRS busca auxiliar a propagação do sinal entre um nó de origem e um nó de destino e melhorar o desempenho do sistema de comunicação. Devido às suas características, as IRSs podem ser consideradas como potenciais tecnologias habilitadoras para compor a rede 6G.

As IRSs são superfícies eletromagnéticas bidimensionais, ou seja, com espessura próxima de zero, criadas de modo artificial e que tem por objetivo tornar controlável certas características do ambiente [37]. Este controle se dá por meio do ajuste da resposta eletromagnética de elementos que compõe o ambiente, de forma que os parâmetros, como fase, amplitude, frequência e polarização do sinal, sejam adaptados dinamicamente sem exigir processos complexos de

codificação e decodificação ou operações em RF. O controle também depende dos parâmetros estruturais das IRSs, que normalmente são implementadas por meio de matrizes refletoras convencionais, superfícies de cristal líquido e metassuperfícies definidas por software [38–40]. De forma geral, essas superfícies consistem em um grande número de elementos pequenos, passivos e de baixo custo, os quais refletem apenas o sinal incidente com uma mudança de fase ajustável, sem exigir uma fonte de energia dedicada.

Na literatura, as IRSs apresentam diversas denominações, sendo as mais frequentes *Reconfigurable Intelligent Surface* (RIS), *Intelligent Surfaces as Active Antennas* (LIS) e *Large Intelligent Metasurface* (LIM). O termo RIS é normalmente empregado para destacar a propriedade de reconfiguração da superfície para o sinal incidente [41–49]. A definição de LIS [49] considera um comprimento de superfície ilimitado composto por uma matriz bidimensional de vários elementos eletromagnéticos reflexivos de baixo custo e quase passivos (exceto para alguns elementos ativos conectados aos controladores). Neste, a placa atua como uma superfície eletromagnética que pode transmitir, redirecionar e receber sinais de irradiação em toda a sua área contígua [41, 50–58]. O conceito de LIM, por sua vez, assume um grande número de antenas para a análise assintótica de metassuperfícies, também conhecida como superfície refletora inteligente ou superfície inteligente reconfigurável [41, 49, 59, 60].

Os conceitos citados acima têm como denominador comum a composição por metamateriais. Este são descritos como materiais artificiais que podem alcançar comportamentos que naturalmente não ocorreriam, como índice negativo de refração ou camuflagem eletromagnética. Os metamateriais são compostos por uma grande quantidade de pequenos elementos (meta-átomos), os quais são repetidos periodicamente sobre um substrato dielétrico e conectados por meio de elementos de comutação [61]. Os meta-átomos refletem difusamente os sinais de entrada de uma forma controlável, com estrutura física previamente projetada. Assim, uma superfície inteligente pode ser definida como uma matriz de meta-átomos, em que cada elemento espalha os sinais de entrada com uma mudança de fase controlável [59, 62, 63]. Assim, o efeito conjunto de todas as mudanças de fase é um feixe refletido na direção selecionada [43].

O comportamento eletromagnético dos metamateriais dependem da estrutura do meta-átomo. Os meta-átomos são construídos microscopicamente a partir de materiais convencionais, como metais, dielétricos e plásticos, cujo tamanho é menor do que o comprimento de onda com o qual interage. Estes elementos podem ser ajustáveis ao aplicar uma polarização externa e, como consequência, mudam sua condição para absorver ou refletir as ondas eletromagnéticas. Os meta-átomos são controlados por meio de elementos de comutação ou interruptores, que podem ser conectados em topologias específicas, permitindo à superfície em questão criar uma interferência construtiva numa direção específica e, assim, atingir uma reflexão personalizada. Alguns estudos apontam os diodos *Positive-Intrinsic-Negative* (PIN), ressonadores sintonizados por diodos varicap, cristal líquido e *Microelectromechanical Systems* (MEMS), como alguns tipos de elemento de comutação para controlar a reflexão eletromagnética da superfície através uma polarização externas [41, 64].

Em [37], os autores propuseram uma configuração de estrutura para IRS, a qual se compõe por um conjunto de elementos de espalhamento passivos, acompanhados por um integrador que controla tais elementos e simultaneamente se comunica com um controlador central, conforme ilustrado na Figura 6. Esta estrutura permite que as IRSs possam ser configuradas, adaptadas e otimizadas por dispositivos externos [40, 65]. Para viabilizar os ajustes mencionados, os elementos devem ser compostos por materiais sensíveis à estímulos elétricos, magnéticos, luminosos ou térmicos, e devem ser capazes de sintonizar à metassuperfície fornecendo um controle global sobre as propriedades eletromagnéticas. Como exemplo de tais propriedades, pode-se citar o

nível de absorção, a frequência de ressonância e a polarização de ondas [37, 40].

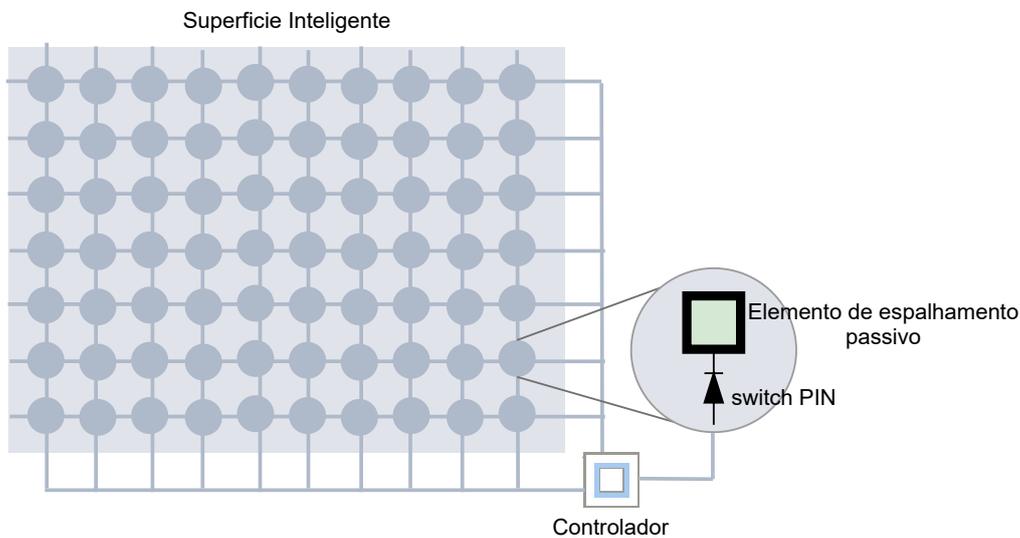


Figura 6: Componentes da RIS (baseado em [37]).

Em suma, as IRSs podem ser exploradas para mitigar a perda de percurso e seus efeitos, propiciando uma melhora na qualidade do enlace de comunicação e uma redução no consumo energético dos dispositivos da rede [35]. De uma forma geral, as IRSs podem ser caracterizadas por:

- Viabilizarem a reflexão de sinais em direções precisas, graças a ajustes das matrizes de deslocamento de fase;
- Serem controladas em *Access Points* (APs) ou ERBs de células pequenas através de um controlador inteligente, o que permite que métodos com foco na melhora do desempenho de localização e detecção sejam implementados;
- Não precisarem, idealmente, de uma fonte de energia dedicada (elementos quase passivos);
- Poderem moldar, idealmente, a onda que incide sobre a superfície inteligente, a partir de qualquer ponto da mesma;
- Não serem afetadas pelo ruído do receptor, já que não empregam conversores analógico-digital e digital-analógico e amplificadores de potência;
- Poderem ser facilmente implantadas em objetos e locais como nas fachadas de edifícios, tetos de fábricas, espaços internos e roupas humanas.

Entre as desvantagens, destaca-se que as superfícies não possuem seus próprios recursos de rádio e, conseqüentemente, são incapazes de gerar qualquer símbolo piloto para auxiliar as ERBs de células pequenas no processo de estimação da resposta do canal entre a ERB e a IRS. Além disso, a implementação das IRSs está sujeita à superação de certos desafios para atingir o desempenho esperado nos processos de comunicação, posicionamento e mapeamento [17]. Neste contexto, destacam-se a necessidade de: avançar tecnologicamente tanto em hardware quanto em software, desenvolver novos modelos de propagação, métodos de estimação de canal e estratégias de distribuição de placas no ambiente. Apesar disso, as superfícies inteligentes possuem características importantes que possibilitarão o desenvolvimento de novas aplicações inerentes à rede 6G.

2.5 Informações de contexto

Joanna Carolina Manjarres Meneses
joanna@land.ufrj.br

O termo contexto para computação foi introduzido em [66] e é definido como qualquer tipo de informação que possa caracterizar a situação de uma pessoa, objeto ou lugar. Em sistemas de comunicação móvel, as informações de contexto podem contemplar dados relacionados à localização, identidade, preferências, velocidade e nível de bateria do usuário. Essas informações caracterizam o comportamento do usuário e, em conjunto de referências temporais, são capazes de afetar o desempenho da rede, desde a camada física até a camada de aplicações. Desta forma, como destacado em [17, 35], a informação de contexto é uma ferramenta importante na consolidação da rede 6G.

A exploração de dados de contexto dos usuários tem sido considerada em diferentes níveis do desenvolvimento tecnológico, refletindo, principalmente, na melhoria da eficiência energética e redução do custo de implementação de diferentes dispositivos. Ainda, os algoritmos de IA podem ser empregados para compor sistemas *Context-Aware* (CA) cada vez mais inteligentes e completos. A implementação dessas funcionalidades possibilitará que a infraestrutura da rede seja utilizada como um complexo sistema de sensoriamento, agindo como o “sexto sentido” do usuário [67]. O termo sexto sentido também é empregado para se referir a uma rede autoadaptativa e autorreparadora, cujo processamento é realizado a partir de dados multidisciplinares [68].

As informações de contexto são amplamente versáteis e possuem um potencial único de beneficiar a operação das redes de futura geração. Na camada física, esses dados podem auxiliar na determinação de períodos oportunos de transmissão, de forma a otimizar o consumo energético do dispositivo. A seleção de canais de comunicação também pode ser realizada a partir de informações de contexto [35]. Essas seleções impactam diretamente na qualidade do enlace de comunicação, na qualidade de serviços e também na eficiência energética. Quando associadas ao uso de recursos de computação distribuída, as informações de contexto permitem que o processamento e o armazenamento de dados sejam executados em dispositivos selecionados pela proximidade com o usuário, pela capacidade computacional ou pela taxa de dados fornecida [17]. As informações de contexto podem ser exploradas para reduzir o tempo gasto no processo de acesso inicial (*initial access*) de um dispositivo à rede [69]. Esse tempo pode ser elevado, principalmente, em operações de alta frequência, visto que o procedimento envolve a realização de ajustes para melhorar o direcionamento do sinal entre o UE e a ERB. Ainda, o emprego de algoritmos de IA tem sido considerado para processar os dados de contexto e reduzir significativamente o tempo de acesso inicial, conforme proposto em [69].

No quesito localização, as informações de contexto serão úteis para prever as condições do canal de comunicação, diante do desvanecimento lento, utilizando a posição do UE no ambiente [70]. Neste caso, cria-se uma base de dados para armazenar informações relativas às características do canal em função da localização do terminal. Posteriormente, os dados coletados podem ser empregados na estimação do estado do canal. Tais informações auxiliarão na definição adaptativa dos parâmetros de operação do enlace de comunicação, visando alcançar melhor desempenho e qualidade de serviços. Além disso, outras informações contextuais podem ser também exploradas para prever questões complementares como a direção, velocidade e trajetória de movimentação de um terminal no ambiente.

Aplicações que exploram condições de contexto podem ser especialmente impulsionadas com o emprego de algoritmos de IA. Estes algoritmos podem ser utilizados para extrair padrões de dados históricos de informações de contexto, correlacioná-los com requisitos da rede e com

qualidade de serviços, viabilizando a otimização da rede como um todo. Em [71], os autores propuseram um método com informação de contexto para realizar a seleção de feixes adequados em uma rede *Vehicle-to-everything* (V2X) operando na faixa de mmWave. Vale ressaltar que o emprego dessa faixa de frequência em aplicações veiculares é bastante desafiador devido ao alto dinamismo inerente da elevada mobilidade. Além disso, o emprego de frequências elevadas estão associadas à maior direcionalidade do sinal, bem como de suscetibilidade a bloqueios, conforme mencionado na seção 2.2.

As informações de contexto podem ser exploradas inclusive no gerenciamento de *handover*. Conforme comentado na seção 2.2, o emprego de frequências mais elevadas está limitado à alta direcionalidade e menor alcance. Esses fatores podem impactar no aumento do número *handovers* realizados por um terminal móvel, o que, por sua vez, pode prejudicar a qualidade da comunicação. Em [72], foi proposto o uso de informações de contexto para calcular a trajetória do UE e, assim, prever a próxima ERB na qual o terminal móvel irá se conectar. Esta estimativa é realizada usando como base um modelo de regressão linear. Segundo os autores, o modelo proposto permite alcançar uma percentagem de acerto da previsão de trajetória de um terminal móvel na ordem de 65%.

Mais recentemente, as informações de contexto foram empregadas para balancear a carga de dados entre as células de comunicação [73]. Neste estudo, os autores propuseram um método que detecta eventos públicos a partir de dados de contexto (geolocalização e mensagens publicadas) coletados no Twitter. Essas informações são processadas por um algoritmo de aprendizado não supervisionado que irá analisar os dados e identificar o padrão de tráfego. Com essa análise, o sistema será capaz de prever as mudanças de carga nas células e, em seguida, implementará uma estratégia de balanceamento de carga por meio de lógica *fuzzy*. A validação da proposta foi obtida a partir de simulações de uma rede 5G em ambientes urbanos. Os resultados indicaram que a exploração das informações de contexto proporcionaram um aumento da capacidade da rede e da velocidade de convergência, quando comparados às estratégias de balanceamento passivo (sem informações de contexto).

Entre os principais desafios para a criação de sistemas cientes do contexto, pode-se citar a falta de padronização com relação aos parâmetros envolvidos e aos procedimentos operacionais. Esta padronização é necessária para que as informações originadas por diferentes dispositivos e sistemas possam ser corretamente integradas, processadas e gerenciadas [17]. Apesar disso, a adoção de sistemas cientes do contexto é acompanhada por inúmeros benefícios quando associado à IA e ao *beamforming*. Em termos de localização, sensoriamento e mapeamento, o aumento de precisão e resolução, previstas para a rede 6G, auxiliarão no desenvolvimento de soluções que tornam a rede mais sensível ao ambiente.

2.6 Sensoriamento por imagens e espectrometria na faixa de THz

Juliano Silveira Ferreira
silveira@inatel.br

O sensoriamento através de imagens obtidas na faixa de THz viabiliza a criação de novas aplicações e casos de usos que podem ser potencializados, adaptados e integrados à rede 6G. É importante ressaltar que diversos tipos de materiais são considerados como transparentes para as ondas na faixa de THz, como papel, plástico e roupas. Desta forma, o sensoriamento por imagem na faixa THz é visto como uma alternativa ao emprego do raio-X. Outra aplicação é o uso de ondas em THz na análise química. Esta se baseia na caracterização espectroscópica, uma

vez que diversos materiais biológicos e químicos apresentam características espectrais únicas nesta faixa de frequência [74, 75]. Assim, o sensoriamento por imagens é considerado para a realização de testes não destrutivos, identificação de materiais mesmo embalados, aplicações em segurança, identificação de armas, entorpecentes e explosivos, medicina, indústria farmacêutica, controle de qualidade de alimentos seja na indústria ou na agricultura, entre outras [74].

O sensoriamento por imagens na faixa THz pode ocorrer de forma passiva ou ativa. A forma passiva é semelhante à captura de imagens por câmeras convencionais, porém considerando uma faixa de frequência inferior ao espectro visível, que se encontra entre 430 e 730 THz. O sensor passivo captura e processa as ondas naturalmente refletidas ou emitidas pelas superfícies de objetos [17, 74]. Por outro lado, no sensoriamento ativo de imagens, o sensor emite uma onda controlada e conhecida, como pulsos e *Continuous Wave* (CW), e os ecos recebidos são analisados. O sensoriamento ativo permite obter informações precisas em relação à distância, angulação e efeito *Doppler* sofridos pela onda na interação com o ambiente [17].

Na forma passiva, os principais métodos de detecção de ondas se baseiam em amostragem eletro-óptica e absorção térmica [76]. Neste caso, os sensores de imagem são arrançados em matrizes bidimensionais, como empregado no bolômetro. O bolômetro é um dispositivo que detecta a potência da radiação eletromagnética incidente a partir do aquecimento de um material, cuja resistência elétrica depende da temperatura. Por outro lado, os sensores de imagem monolíticos baseados em tecnologia CMOS são uma alternativa ao bolômetro. Esta tecnologia se apresenta como uma solução de custo mais acessível, embora seja menos sensível em relação ao bolômetro [17, 77, 78].

Na forma ativa de sensoriamento, a principal técnica empregada se baseia na *Time-Domain Spectroscopy* (TDS) [75]. Estas medem a radiação da onda no domínio temporal e identificam informações no domínio da frequência, por meio da análise de Fourier e de informações sobre a fase do sinal [76]. O emprego de análise espectroscópica na faixa de THz combinada com quimiometria, algoritmos de busca e IA tem sido utilizados para construir diversos modelos e técnicas analíticas de identificação e classificação de materiais e substâncias. Em [76], os autores destacam diversos modelos já conhecidos que combinam a espectroscopia na faixa de THz com métodos quimiométricos aplicados nas áreas de alimentos e da agricultura.

Atualmente a implementação de espectroscopia em THz considera, em muitos casos, o emprego de sistemas ópticos devido a possibilidade de exploração de uma ampla faixa de frequências, fazendo uso, por exemplo, de lasers de CW sintonizáveis. O emprego de transmissores e receptores de THz baseados em silício, que cobrem a princípio uma largura de faixa menor em relação as soluções ópticas, tem se apresentado, entretanto, como uma opção interessante devido à possibilidade de implementação com menor complexidade, dimensão e custo [79]. Soluções baseadas em silício tem sido implementadas com foco na caracterização espectroscópica de materiais empregando faixas de frequência mais estreitas e específicas, como ocorre na caracterização de gases [79]. Soluções baseadas na tecnologia SiGe *Bipolar*-CMOS (BiCMOS), considerando frequências da ordem de 270 GHz, por exemplo, têm sido alvo de pesquisas voltadas para este tipo de aplicação [80].

Como desafios à adoção de soluções de sensoriamento e espectrometria em THz pela rede 6G, além da implementação de soluções que não sejam baseadas em elementos ópticos, cita-se a alta absorção das ondas de THz por moléculas de água. Para superar tal absorção, é necessária uma maior concentração dos feixes de sinal emitidos o que, por sua vez, demanda a implementação de técnicas de *beamforming* e controle de matrizes de antenas. Além disso, se faz necessário o aumento da potência do sinal emitido que é dependente da tecnologia de transistores adotada, sendo o desenvolvimento de soluções em alta frequência um grande desafio, conforme

citado na seção 2.2, e também depende de um maior consumo energético. A sensibilidade dos sensores passivos de imagens em THz, baseados em transistores de tecnologia *Metal-Oxide-Semiconductor* (MOS), deve ser alvo de pesquisas e novos desenvolvimentos, para que se possa alcançar soluções com melhores resolução e contraste. A melhoria de sensibilidade das soluções de recepção ativas, como aquelas empregadas em radares de THz, também é outro desafio a ser superado [17].

Apesar dos desafios citados com relação a adoção da tecnologia em questão, entende-se que a rede 6G pode propiciar que diversas aplicações de sensoriamento baseada na faixa de THz possam ser adaptadas para o uso cotidiano. A rede 6G deve propiciar também o desenvolvimento de novas técnicas e soluções para o processamento de sinais na faixa THz.

2.7 Inteligência artificial no sensoriamento e localização inteligente

Juliano Silveira Ferreira
silveira@inatel.br

A IA é um recurso essencial para a implementação da rede 6G e, conforme detalhado em [81], será adota para atuar em diferentes áreas. Dentre essas, destacam-se as implementações associadas à localização, mapeamento e sensoriamento. Vale destacar que as soluções atuais de IA se baseiam em ML e permitem criar modelos analíticos a partir do processamento e análise de um conjunto de dados, com ou sem a orientação de regras pré-estabelecidas. No caso dos sistemas de posicionamento e sensoriamento, as técnicas de ML podem ser empregadas, dentre outras possibilidades, para o aumento da precisão e confiabilidade nos modelos já existentes. Ainda, os métodos de *Deep Learning* (DL) podem ser explorados para a construção de modelos adaptados a cenários mais dinâmicos e complexos e que considerem o processamento de informações oriundas de diferentes tipos de sensores [82]. Recentemente, diversas pesquisas avaliaram e exploraram o emprego de IA em conjunto com diferentes métodos e tecnologias de localização, sensoriamento e mapeamento, incluindo estimação odométrica: visual [83, 84] e em ambientes submersos [85]; inercial [86]; visual-inercial [87, 88]; e baseada em sensores *Light Detecting and Ranging* (LiDAR) [89]. A seguir, serão introduzidos alguns trabalhos recentes que empregam IA em sistemas de posicionamento e sensoriamento.

Em [82], os autores apresentam algumas pesquisas atuais que relacionam IA e técnicas de estimação odométrica a mapeamento de ambientes, localização e *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). Em [90], os autores comentam uma série de investigações que tratam sobre IA com aprendizado supervisionado e *Reinforcement Learning* (RL) para *Visual Indoor Navigation* (VIN). Outra abordagem observada em [91] é a introdução de *Deep Reinforcement Learning* (DRL) na navegação visual. Neste, os autores afirmam que SLAM associado a DRL garante uma boa precisão no mapeamento de ambiente. No entanto, também destacaram que em ambientes complexos e dinâmicos, a modelagem sofre grande degradação de seu desempenho. Por fim, as técnicas de DRL são sugeridas para treinar algoritmos de IA, de forma que um conjunto complexo de parâmetros possa ser empregado para melhorar o desempenho na navegação e mapeamento de ambientes, devido à redução de erros cumulativos presentes em métodos convencionais.

Em [92], é proposto um modelo de rede neural para processamento de informações de sensores LiDAR 3D, visando auxiliar em processos de localização de carros e robôs autônomos. O método estima a sobreposição e angulação entre quadros capturados e quadros de um mapa pré-construído. Os autores concluíram que o método proposto apresenta um desempenho semelhante a outras abordagens em relação à localização, demandando, porém, um tempo de

computação menor. Em [93], é proposto um método baseado em LiDAR para localização em áreas urbanas densas, visando auxiliar sistemas autônomos. O método propõe o processamento de localização global e registro geométrico de maneira simultânea. Os autores reforçam que a performance obtida supera diversos outros métodos atuais.

No contexto florestal, a pesquisa publicada em [94] explorou o uso de IA para auxiliar no gerenciamento preciso de florestas. Neste caso, são empregadas redes neurais baseadas em *Convolutional Neural Network* (CNN) para processar e classificar imagens, bem como identificar a distribuição de biomassa e biodiversidade nas florestas. Por outro lado, os autores em [95] realizam as estimativas de estrutura de florestas a partir de sensoriamento LiDAR empregando Veículo Aéreo Não Tripulados (VANTs) e fazendo uso de ML como ferramenta base.

Os algoritmos e técnicas de IA são ferramentas importantes a serem exploradas em redes 6G. A implementação de tais técnicas, entretanto, demandam a superação de desafios, como grande quantidade de dados, períodos longos de treinamento, alta carga computacional e consumo energético. O desenvolvimento de soluções que possam operar a partir de um conjunto limitado, mal estruturado e ruidoso de dados deve ser alvo de novas pesquisas e desenvolvimentos adicionais [17]. Apesar dos desafios, espera-se que soluções de IA para sensoriamento, localização e mapeamento de ambientes sejam capazes de aumentar as funcionalidades e capacidades da rede 6G.

3 Tecnologias habilitadoras empregadas no suporte à rede de comunicação

Nesta seção, serão apresentados estudos recentes que utilizam as tecnologias habilitadoras para oferecer suporte à rede de comunicação, seja avaliando a qualidade do enlace, seja ampliando a área de cobertura. Assim, serão detalhadas algumas técnicas e arquiteturas que contribuirão para a concepção e implementação da rede 6G.

3.1 Superfícies inteligentes aplicadas no suporte à rede

Joanna Carolina Manjarres Meneses
joanna@land.ufrj.br

O canal de comunicação sem fio é um meio sujeito a diversos fenômenos físicos. Esses fenômenos alteram o comportamento do sinal de forma aleatória por meio de atrasos, desvio de fase e interferências construtivas e destrutivas. A maioria das técnicas desenvolvidas, como *beamforming* ou codificação de canal, foram projetadas para mitigar ou explorar os efeitos causados pelo canal. As IRSs se apresentam como uma tecnologia capaz de controlar, a partir da reflexão e direcionamento do sinal, os efeitos do ambiente no canal de comunicação, conforme detalhado na seção 2.4.

A Figura 7 ilustra dois enlaces de comunicação que são beneficiados pelo uso de IRS. No caso do usuário 1, a IRS é utilizada para direcionar, de maneira controlada, o sinal da ERB, de forma a criar uma interação construtiva no receptor e favorecer o estabelecimento da comunicação. O direcionamento pode ser empregado em situações cujo o nível do sinal de uma determinada área está baixo ou quando não há visada direta com a ERB. Neste último caso, a IRS atua auxiliando na ampliação da área de cobertura da ERB de maneira estratégica. No caso do enlace estabelecido com o usuário 2, a IRS é utilizada para interagir de forma destrutiva na reflexão do sinal da ERB. Essa interação pode ser útil em casos na qual seja necessário restringir o acesso do usuário ao sinal em função de algum nível de segurança.

As IRSs podem ser exploradas tanto na melhoria de precisão de posicionamento e localização em ambientes internos quanto externos. As técnicas e métodos de posicionamento que utilizam como base o RSS, por exemplo, podem se beneficiar pelo emprego de IRSs, conforme destacado em [41]. Tais métodos dependem diretamente do nível de recepção de RSS e da probabilidade de cobertura e estes, por sua vez, podem ser melhorados ou ampliados pelas IRSs. As IRSs podem ser utilizadas em sistemas de maneira centralizada, na qual as diferentes superfícies são gerenciadas por uma central de inteligência, ou de maneira distribuída, em que cada superfície tem sua própria unidade de inteligência [41]. Os autores de [41] concluíram que a probabilidade de cobertura e o desempenho de localização é geralmente melhor quando as IRSs são empregadas de maneira distribuída. Além disso, esta maneira proporciona maior flexibilidade no processo de implantação.

As IRSs podem ser empregadas de diferentes formas como suporte à rede, melhorando a qualidade da comunicação e dos serviços. Neste contexto, os autores em [96] empregaram as IRSs para mitigar os efeitos de bloqueio de sinal em uma rede que opera na faixa de mmWave. O direcionamento adequado do sinal pela IRSs, denominado como *Beam Management* (BM), é fundamental para o estabelecimento de comunicação e se apresenta também como um grande desafio a ser superado para a implementação prática. Os autores do trabalho em questão

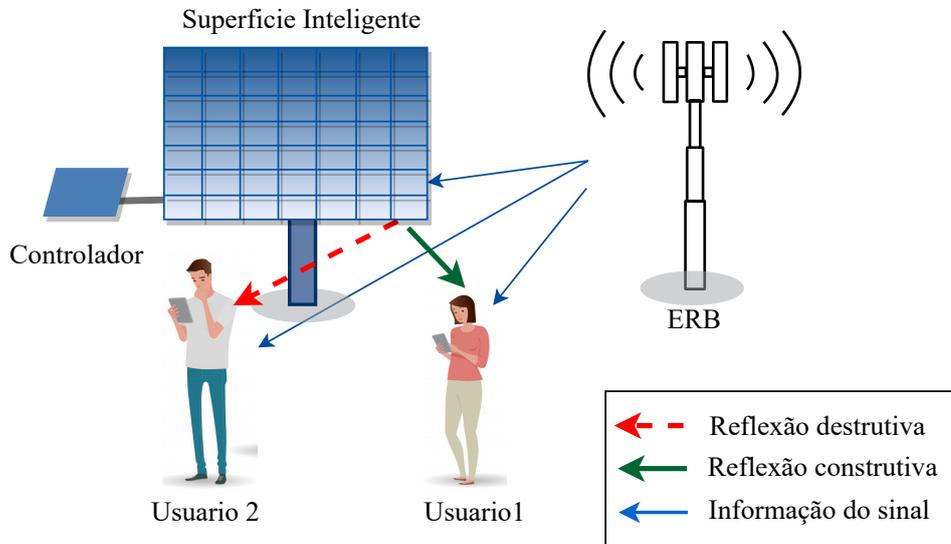


Figura 7: Sistema de comunicação sem fio aprimorado por RIS (baseado em [43]).

propuseram um algoritmo simplificado, baseado em IA, para auxiliar no processo de direcionamento de feixe de sinal tanto da ERB para a IRS quanto da IRS para o UE. O algoritmo proposto emprega técnicas de DL para processar informações de contexto e mobilidade, como o CSI e posição de distribuição dos usuários, para modelar a relação entre o estado da rede e o desempenho ideal esperado da mesma.

O ajuste preciso dos deslocadores de fase que compõem as IRSs é considerado um desafio para a sua implementação, principalmente devido a dificuldade da identificação das condições de canal entre a IRS e a ERB e também entre a IRS e o UE. Esta dificuldade é potencializada devido à natureza passiva dos elementos refletoras que compõe a IRS. O trabalho de pesquisa [44] propôs uma abordagem baseada em IA para auxiliar na definição de configuração do direcionamento de feixes da ERB e dos deslocadores de fase da IRS. A abordagem emprega uma *Graph Neural Network* (GNN) para modelar a interação entre múltiplos UEs e as IRSs, e identificar as configurações ótimas dos elementos citados para alcançar um determinado objetivo. Este objetivo pode estar relacionado, por exemplo, ao alcance de uma taxa mínima ou máxima para os multiusuários. O algoritmo proposto identifica padrões de configuração dos elementos citados a partir da análise de dados fazendo uso de DL. A proposta, portanto, não utiliza uma etapa explícita de estimação de canal. Os autores puderam concluir que o modelo proposto estabelece a configuração dos direcionamento de feixes da ERB e dos deslocadores de fase da IRS de forma a se obter maiores taxas de comunicação para os multiusuários, quando comparada com métodos convencionais baseados na estimação de canal.

Os autores de [97] avaliaram o impacto na estimativa de posicionamento ao se adotar o emprego de LIS em um sistema operando *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) na faixa de mmWave. A avaliação foi realizada a partir de simulações computacionais, considerando o emprego de uma LIS composta por diferentes números de elementos refletoras. Os autores constataram que o aumento de elementos na LIS reduziu os erros de estimativa de posicionamento e canal e orientação, principalmente em enlaces sem visada direta. A adoção de uma LIS composta de 40 elementos, por exemplo, proporcionou uma redução em 3 dB no erro de estimação de posicionamento.

O estudo em [98] realizou uma comparação relacionada ao emprego de repetidores de sinais convencionais e superfícies inteligentes atuando como repetidores em modo refletor ou concentrador de sinal. Os autores puderam concluir que, a partir de simulações computacionais e considerando frequências de até 100 GHz, superfícies inteligentes suficientemente grandes podem superar a performance quando comparadas com repetidores convencionais, proporcionando aumento nos níveis de *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) e maior taxa de comunicação.

Em [50], os autores avaliaram o emprego de superfícies esféricas tridimensionais. Neste, concluiu-se que parte da superfície esférica pode funcionar como uma superfície refletora e parte pode atuar como um retransmissor de sinal. Este último é particularmente útil em cenários cujo o sinal da ERB não atinge o UE. A superfície tridimensional pode ser explorada para a melhoria do enlace de comunicação de terminais aéreos, instalados em VANTs, por exemplo, além dos terminais em solo. Os autores destacam que a superfície esférica proporciona aumento dos níveis de RSS, mesmo perante mobilidade do terminal aéreo. O emprego de tal superfície viabiliza a implementação de algumas técnicas de posicionamento, classificadas pelos autores como simples, que utilizem como base o limite de recepção da superfície ou medidas de angulação que explorem o formato geométrico da superfície.

Conforme mencionado, observa-se que o uso das superfícies inteligentes podem beneficiar a rede 6G em diferentes aspectos que incluem: ampliação da cobertura da rede, aumento da taxa de comunicação, aprimoramento das técnicas de formação de feixe e aumento da precisão de técnicas de localização e posicionamento.

3.2 *Beamspace* e *beamforming* aplicados à melhorias de identificação de localização e posicionamento

Davi da Silva Brilhante
dbrilhante@land.ufrj.br

As técnicas associadas a *beamspace* e *beamforming* já são empregadas nas redes sem fio em uso no presente e espera-se que na rede 6G seu emprego seja aprimorado e ampliado. Conforme destacado na seção 2.3, estas técnicas são empregadas não somente na comunicação, mas também é possível utilizá-las na localização de usuários e no mapeamento de ambientes. Estas técnicas são baseadas, principalmente, na estimativa do AoA dos sinais que incidem sobre arranjos de antenas, o que fundamenta diversas técnicas de triangulação e trilateração. Conforme destacado na referida seção, essa técnica é particularmente importante em ambientes internos, onde o sinal de GPS não fornece precisão suficiente ou, até mesmo, não está disponível. A seguir são apresentadas a evolução de técnicas já adotadas em alguns sistemas e também as pesquisas recentes que exploram *beamforming* em processos de localização, tendo como principal aplicação os ambientes internos, bem como as informações de localização podem ser exploradas em benefício de técnicas de *beamforming*.

3.2.1 *Beamforming* aplicado à melhoria da identificação de localização

As primeiras tentativas de realizar localização em ambientes internos ocorreram no âmbito dos padrões IEEE 802.11. A evolução do padrão e do AP para suportar o *beamforming* possibilitou a introdução de técnicas de localização. Esse cenário foi avaliado em [99] e [100], mas com abordagens opostas. A primeira descarta as componentes do multipercorso e a segunda se aproveita desse efeito para obter mais informações sobre o sinal. A precisão de [99] com 3 APs

e 16 antenas é menor que um metro em 60% dos casos. Por outro lado, a acurácia do método em [100] é menor que um metro para menos de 40% dos casos, com 8 antenas e um AP usando o esquema de nós âncora. Apesar de terem aberto os caminhos para esse tipo de técnica, essas abordagens consideram AP com muitas antenas, que são caros e, conseqüentemente, pouco empregados.

Abordagens mais precisas começaram a ser estudadas a partir das propostas para os padrões IEEE 802.11ad, IEEE 802.11ay e 5G *New Radio* (NR), que trazem suporte à mmWave. Estudos anteriores mostraram a oportunidade de aumentar a precisão de localização em aproximadamente 20% [101]. O *beamforming* pode se tornar ainda mais preciso em LoS e com o aumento da potência de transmissão. Isso reduz a largura do feixe ou o raio de medição, atingindo granularidade entre poucas dezenas de centímetros [102] e milímetros [29] ao variar esses parâmetros. Diversas abordagens de localização e mapeamento surgiram explorando esse conceito.

Em [32, 103, 104] a técnica de ADoA é introduzida, aprimorada e aplicada aos contextos de localização e mapeamento. Os experimentos conduzidos com equipamentos comerciais na banda de mmWave levaram a resultados que estimam o erro na localização menor do que 1 m. Essa acurácia foi atingida mesmo em situações onde não haviam nenhuma informação *a priori*, bastando apenas estabelecer os nós âncoras virtuais resultantes das reflexões. Apesar de efetivo, por empregar apenas um par de dispositivos, esse método é complexo de ser implementado e sua precisão, apesar de ser menor que 1 m para a maioria dos casos, não é o melhor que pode ser alcançada com essa técnica.

Os autores de [105] desenvolveram um método de localização e orientação de movimento para VANTs em ambientes internos que usa dispositivos comerciais IEEE 802.11ad. A localização é estimada a partir da obtenção por busca exaustiva da *Received Signal Strength Indication* (RSSI) em cada par de feixes entre transmissor e receptor, que é comparada às RSSIs em uma base de dados usando KNN. Apesar da acurácia aceitável para aplicações de localização e posicionamento, o método proposto depende da criação de uma base de dados com as RSSIs e da calibragem de variáveis do sistema. Em [106], um esquema híbrido de AoA e ToA é proposto para habilitar a localização de usuários e objetos NLoS nas bandas de mmWave e THz. A acurácia atingida foi de 2,6 cm para a distância de 2,8 m, apesar dos autores alertarem para possíveis desvios em cenários práticos. Em [107], a partir das CSIs divulgadas por múltiplos APs em um ambiente interno, o esquema proposto nesse artigo é capaz de estimar os ângulos e distâncias entre os dispositivos e APs. À partir dessas medidas, deve-se estimar qual o melhor AP para se associar e qual feixe deve ser usado nessa associação, sem demandar realimentação ou alteração do controle entre esses dispositivos. Com cerca de 50 medidas, foi obtida a acurácia de 40 cm e obteve entre 8,5% e 57% de ganho em relação a vazão, quando comparado ao desempenho proporcionado pelo IEEE 802.11ad. Contudo, foi necessária a alteração do *firmware* dos dispositivos para a modificação do *codebook*, o que não está diretamente acessível a todos os usuários.

O *beamforming* aplicado à localização é uma alternativa factível para ambientes internos, onde não há presença de sinal de GPS. Contudo, a maioria das técnicas têm implementações complexas e a acurácia está diretamente ligada à proximidade com a ERB e condição de LoS. Em relação ao *hardware* dos equipamentos, os padrões de irradiação desses dispositivos ainda estão aquém do desejável, com lobos secundários significativos e lobos primários pouco direcionais. Também é possível verificar que a influência das reflexões de primeira e segunda ordem geram bastante interferência no sinal [108].

3.2.2 *Beamforming* auxiliado por informações de localização

Com a constante evolução dos dispositivos e terminais móveis e o crescente suporte a funcionalidades, tornou-se plausível a premissa de um dispositivo ser capaz de compartilhar sua localização com a rede. A partir dessa premissa, foram desenvolvidas técnicas que buscam reduzir o tempo empregado nos processos de *beamforming*, a partir do uso de informações de localização cedidas pelo usuário. No entanto, é necessária a existência de uma rede auxiliar para atuar como canal de compartilhamento das informações para auxílio do *beamforming*. As antenas omnidirecionais são consideradas para a comunicação deste canal auxiliar não depender do *beamforming*.

O processo de busca exaustiva permite identificar o melhor feixe para a configuração de *beamforming*. A busca exaustiva é considerada o *ground-truth*, ou seja, o limite superior para o desempenho das técnicas de localização nos trabalhos de *beamforming*, *beam training* ou acesso inicial. Contudo, como já mencionado na seção 2.3, a busca exaustiva pelo melhor feixe impõe um custo elevado, indesejado nas redes de comunicação sem fio. As abordagens sequenciais não-exaustivas, mostram-se ineficientes devido ao alto atraso no *beamforming* gerado por erros de detecção. Enquanto isso, métodos auxiliados por informações de contexto, como a localização, tiveram atraso de *beamforming* menor que a busca exaustiva, mas com praticamente a mesma probabilidade de erro de detecção [109]. A avaliação em [110] conclui que informações de localização precisas podem tornar o *beamforming* mais eficiente em termos da latência para a seleção do melhor feixe. Contudo, questões de privacidade e acurácia das informações de localização tornam-se desafios a serem enfrentados pela próxima geração de comunicações móveis.

A abordagem tradicional do *beamforming* à partir de informações de contexto estima o ângulo entre o transmissor e o receptor. À partir desse ângulo, o *beamformer* seleciona o padrão de irradiação que maximiza o ganho na direção desse ângulo. No entanto, se considerar o erro inerente aos métodos de localização, como GPS, essa forma direta perde acurácia à medida que o UE se afasta do centro da célula. Em [111], a informação de localização auxilia na formação de dois conjuntos de feixes a serem testados, uma para a ERB e outro para a UE. Uma busca exaustiva entre os elementos desses conjuntos é menor que uma busca por todos os possíveis pares de feixes e ainda proporciona acurácia próxima a da busca exaustiva. A informação de localização também pode ser aplicada indiretamente em mecanismos de *beamforming* ou acesso inicial. Em [112], a localização é usada para encontrar o ângulo entre ERB e receptores para alimentar a camada de entrada de uma *Deep Neural Network* (DNN) que, por sua vez, mapeia a RSS em alguns feixes e o ângulo no feixe de transmissão mais provável, seja para comunicação LoS ou NLoS.

O *beamforming* desempenhará um papel importante na rede 6G e nas tecnologias de comunicação que o precederem, pois as bandas de mmWave e THz têm potencial para responder às demandas de largura de banda e capacidade que serão exigidas por essas tecnologias. Todavia, o *beam training* usualmente requer tempo para que o enlace seja estabelecido com configurações de feixes ótimos. Informações de localização podem minimizar substancialmente o tempo de treinamento do *beamforming*, principalmente em cenários cujo erro na medida de localização é baixo e que também haja visada direta.

3.3 *Simultaneous Localization and Mapping*

Joanna Carolina Manjarres Meneses
joanna@land.ufrj.br

SLAM é o conjunto de algoritmos empregados por robôs e veículos autônomos para auxiliar no processo de localização e mapeamento [113]. Neste caso, o sistema é capaz de se localizar em um espaço desconhecido, enquanto cria ou atualiza os mapas e estima sua trajetória no referido ambiente. O mapeamento é realizado com os dados coletados por sensores, sendo estes visuais, empregando *Visual SLAM* (VSLAM), ou não visuais, como informações posicionais aferidas pela unidade de medição inercial, também conhecida por *Inertial Measurement Unit* (IMU) [114]. Esse conjunto de dados aliados aos algoritmos de modelos de mobilidade descrevem estatisticamente a evolução do estado do sensor à medida que se move. Assim, obtém-se a estimação da posição dentro do ambiente circundante [17].

VSLAM sintetiza os sistemas que usam câmeras como o único sensor exteroceptivo para localizar e mapear o ambiente. As câmeras podem ser monocular, estéreo ou omnidirecional (*Red Green Blue-Depth* (RGB-D)) e fornecem um grande volume de informações, sendo capazes de detectar marcos de referências com medições previamente realizadas [114]. Por outro lado, o sistema SLAM não visual usa radar, sonar, laser, LiDAR e GPS. Os dados coletados a partir de laser, por exemplo, possuem acurácia maior quando comparados aos sistemas baseados em VSLAM. A alta taxa de captura de dados promovida pelo sensor LiDAR viabiliza o seu uso em aplicações de alta velocidade, como veículos em movimento, carros, VANTs autônomos e outros. É importante observar que a escolha dos sensores se tornou um tema crítico para o funcionamento ótimo da técnica, pois o SLAM é especialmente útil em cenários com acesso limitado aos dados do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) ou sem fonte externa de informações sobre a localização.

Os sistemas SLAM geram um grande volume de dados e, portanto, exigem um alto poder de processamento para suportar as operações realizadas. Os métodos de processamento são classificados em duas categorias: processamento em lote e processamento *online*. O método mais comum, baseado no processamento em lote, é o *GraphSLAM*, conforme apresentado em [115]. Os métodos *online* variam desde o simples *Extended Kalman Filter Simultaneous Localization and Mapping* (EKF-SLAM) até métodos sofisticados baseados na teoria de conjuntos aleatórios finitos [116].

Recentemente, as pesquisas com VSLAM têm focado em sensores para sistemas robóticos, capazes de reconhecer os obstáculos e a topologia do ambiente. Em [117], foi apresentado o uso de *Stereo VSLAM* em robôs autônomos para a navegação e localização em ambientes internos. Neste caso, os autores utilizaram apenas um sensor de visão para coletar dados e possibilitar a navegação pelo ambiente. O erro de precisão relatado é de 0,08% para a trajetória 2D completa. Outro estudo propôs o uso de um sistema SLAM em um robô autônomo disposto em um ambiente interno desconhecido [118]. Neste trabalho, os autores utilizaram apenas uma câmera para coletar dados e implementaram o algoritmo *monoSLAM*, no qual utilizou-se a abordagem *bayesiana* com mapeamento probabilístico e modelagem de movimento. A acurácia do método foi avaliada a partir da comparação entre as coordenadas estimadas e precisas de um trajeto retangular. Os resultados indicaram um desvio padrão médio de 1 a 2 cm nas estimativas dos pontos de medição. Ainda, os autores destacaram a possibilidade de explorar soluções robóticas de baixo custo nas áreas de realidade aumentada e de tecnologias de *wearables*.

A adoção de faixas de frequências mais elevadas, como *mmWave* e THz, deve proporcionar maior precisão aos sistemas SLAM devido ao ganho de resolução espacial obtido pela redução do comprimento de onda. Em [106], os autores usaram imagens de radar em *mmWave* para construir um mapa 3D em alta resolução e mapear as informações de AoA e ToA, possibilitando a localização simultânea do usuário sem o conhecimento prévio das propriedades geométricas e materiais do ambiente. Para validar essa proposta, foi utilizado um arranjo linear de antenas

na faixa de frequências de 200 a 300 GHz. O resultado indicou que o método alcançou precisão milimétrica na localização do usuário. Em outro estudo [119], foi proposta uma nova abordagem SLAM em conjunto com o algoritmo de *Belief Propagation* (BP) para localizar usuários em um rede operando com ondas milimétricas. A proposta foi simulada e validada em um ambiente com três ERBs, um UE e dois pontos de espalhamento. A localização é estimada a partir das medições de AoA e *Angle of Departure* (AoD) e de estratégias de computação centralizada. Os resultados indicaram uma redução na troca de mensagens entre as ERBs e um melhor desempenho quando comparado à estratégia de computação distribuída. Em [120], foi apresentado um novo método de detecção de marcos de referências usando SLAM operado em ondas milimétricas. Baseada na probabilidade de detecção do obstáculo, o método SLAM estima a localização do usuário em diferentes cenários, como a propagação em linha de visão, espalhamento de pequenos objetos e reflexão de grandes superfícies, usando 28 GHz como frequência portadora. Os resultados indicaram uma alta relação entre os feixes de transmissão e recepção e a probabilidade de detecção de marcos de referência, o que possibilitou aumentar a acurácia na estimativa da localização. Por fim, em [121], os autores avaliaram o emprego de SLAM na faixa de THz para situar um VANT no espaço 3D em ambiente interno, por meio de um sistema de localização passiva e mapeamento com a técnica *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Essa técnica consiste em transmitir ondas eletromagnéticas ao alvo para diferentes aberturas e reconstruir uma imagem a partir dos sinais retroespalhados. Os resultados demonstraram a obtenção de uma acurácia milimétrica para a trajetória translacional.

Para tornar as técnicas SLAM implementáveis, será necessário aprimorar os modelos de multipercorso e padrão de radiação de forma a influir os desafios inerentes às altas frequências e às propriedades eletromagnéticas dos objetos. Ainda, é essencial desenvolver algoritmos robustos de baixa complexidade com o intuito de serem executados em dispositivos móveis e de borda. Apesar disso, o sistema SLAM, em conjunto com o desenvolvimento da rede 6G, deve alcançar maior precisão, cobertura e confiabilidade devido ao uso de altas frequências, arranjos de antenas MIMO diretivas e aumento na densidade de ERBs.

3.4 Comunicações assistidas por veículos aéreos não tripulados

Diego Gabriel Soares Pivoto
diego.gabriel@inatel.br

A comunicação 3D onipresente é um dos principais requisitos propostos para a rede 6G. O objetivo é permitir conectividade global entre dispositivos localizados na superfície terrestre, na atmosfera em altas altitudes e até submersos. Como consequência, a rede 6G permitirá alcançar comunicações contínuas e extensas entre equipamentos terrestres, aeronaves, satélites e navios [122]. A abordagem da comunicação 3D onipresente está direcionada a um cenário comum, no qual o usuário estará conectado por meio de múltiplas células coordenadas mutualmente com recursos compartilhados entre si. Este conceito, conhecido por *cell-free*, necessita de tecnologias heterogêneas para garantir a coexistência e integração com a *Radio Access Network* (RAN) THz terrestre, de modo alcançar altas taxas de dados, cobertura e aspectos de conectividade contínuos, e solucionar problemas de rede relacionados à entrega atrasada, mobilidade e perda de dados [123–125]. Dentre estas tecnologias, destacam-se os satélites e os VANTs que, além da conectividade, proporcionam posicionamento e mapeamento em redes 6G.

No contexto de cobertura, os VANTs podem ser usados como *Low-Altitude Platform* (LAP), cujo objetivo principal é dar assistência aérea às redes sem fio terrestres, sendo posicionados

em altitudes de poucos quilômetros. Em contrapartida, para *High-Altitude Platform* (HAP), equipamentos, como ERBs flutuantes (ex.: balões), são posicionados na estratosfera a dezenas de quilômetros de distância da superfície terrestre. Dentre os diversos casos de uso para comunicações auxiliadas por VANTs, destacam-se a retransmissão e coleta de dados e sua integração em redes celulares como novos usuários aéreos [126,127]. O quesito posicionamento em VANTs pode ser abordado de duas formas: localização para VANTs e VANTs para localização [9]. Estas duas abordagens serão detalhadas a seguir.

3.4.1 Localização para VANTs

Esta categoria engloba os diferentes sistemas de navegação e localização que dão suporte aos VANTs, sendo os mais comuns:

- i **GNSS:** Fornece cobertura global com precisão de localização para VANTs em metros. Sua principal desvantagem está na vulnerabilidade do sinal de satélite a obstáculos e anteparos que afetam a sua cobertura [128].
- ii ***Inertial Navigation System* (INS):** Sistema de auto-localização que utiliza informações de movimento do VANT. Entre as desvantagens deste sistema, destacam-se sua degradação da precisão devido ao contínuo aumento de erros causados por ventos e *drift* no movimento, além de ser inadequado para aeronaves pequenas [129].
- iii **Combinação GNSS/INS:** Este serviço realiza a junção dos dados dos sensores GNSS/INS para melhorar desempenho de localização. Devido ao uso de sensores GNSS, é impróprio para cenários urbanos e ambientes internos [129].
- iv **Navegação baseada na visão:** Alternativa ao GNSS/INS para ser usado em ambientes internos e externos. Estes são auxiliados por sensores visuais (ex.: câmera) para adquirir informações do ambiente ao redor, e por métodos de computação visual para localizar e navegar com os VANTs, como odometria visual. Essa técnica emprega sensores mais baratos se comparados aos utilizados nos métodos anteriores. Entre as limitações, incluem-se o aumento na complexidade computacional no processamento da imagem, e inadequação para ambientes com condições de baixa-visibilidade e para VANTs de baixo consumo de energia [130].
- v **Métodos baseados em sinais de rádio:** São usados para localização em curtas distâncias, especialmente em sistemas de localização para ambientes internos. Dentre as tecnologias usadas, podem ser consideradas, por exemplo, sistemas baseados em Wi-Fi [131] e largura de banda ultra larga ou UWB [132].
- vi **VANTs conectados às redes celulares:** Método de localização realizado por meio da conexão das VANTs às redes celulares. Este sistema apresenta diversas vantagens por aproveitar da infraestrutura implementadas para sistemas celulares. Entre as vantagens conhecidas, incluem-se: ampliação da cobertura para ambientes internos e externo; exploração e reuso de conexões de comunicação sem fio entre VANTs e ERB, reduzindo o custo de instalação do sistema; e reuso de técnicas de localização das redes Segunda Geração de Rede Móvel Celular (2G) a Quarta Geração de Rede Móvel Celular (4G) para localização aérea [9].

Com o advento das redes 6G, novas técnicas de localização para VANTs serão desenvolvidas. Em [9], duas promissoras técnicas foram propostas, denominadas localização 6D e localização assistida por HAP. Na localização 6D, o objetivo é estimar precisamente a localização espacial e a orientação 3D dos VANTs que, através dos conjuntos de antenas implementados nas ERBs das redes 5G, utiliza sua alta resolução angular para localizar VANTs conectados a redes celulares [133]. Para os VANTs, essas antenas podem ser compactas, graças ao uso das bandas mmWave. Desta forma, tanto AoA como AoD podem ser estimados em qualquer *downlink* e *uplink*, lidando com a localização e orientação das VANTs de forma simultânea. A localização assistida por HAP atua como um complemento à técnica detalhada anteriormente, visto que as antenas nas ERBs atuais são destinadas a usuários terrestres, não garantindo uma cobertura de rádio aérea, o que pode causar problemas para a localização das VANTs. Assim sendo, as ERBs aéreas flutuantes são tratadas como nós âncora adicionais para auxiliar na localização das VANTs, fornecendo ampla cobertura sem fio e melhoria da precisão de localização devido à alta probabilidade de enlaces LoS no espaço [9].

3.4.2 VANTs para localização

Esta categoria consiste em determinar a localização de outros dispositivos na rede com o auxílio de VANTs, sendo dividida em localização cooperativa entre VANTs e localização auxiliada por VANTs para UEs terrestres. No caso da localização cooperativa, um conjunto de VANTs formam uma sub-rede no espaço aéreo denominada por *Flying Ad Hoc Networks* (FANET). Assim, um subconjunto dessas VANTs, definida como rede *backbone*, está habilitada a se comunicar com as ERBs terrestres, enquanto as demais VANTs podem estabelecer conexão terrestre por meio do *backbone* [134]. Devido a alta mobilidade dos VANTs, as FANETs apresentam uma topologia de rede bastante dinâmica. A princípio, a performance da localização cooperativa é superior ao posicionamento fornecido pelos nós terrestres sem fio, devido à presença de enlaces com visada diretas entre as VANTs. Esta característica, no entanto, é prejudicada pela alta mobilidade dos VANTs, dificultando a implementação destes sistemas. Já na técnica de localização auxiliada por VANTs para UEs terrestres, os VANTs são utilizados para aumentar a cobertura do serviço de posicionamento terrestre devido, principalmente, à presença de componentes com linha de visada. Assim, os VANTs munidos de GPS podem atuar fornecendo informações de localização para os demais usuários da rede [9].

Recentemente, diversos trabalhos relacionados ao suporte de VANTs para localização, mapeamento e sensoriamento em redes 6G têm sido desenvolvidos. Em [135], por exemplo, os autores propuseram um esquema de localização relativa para terminais auxiliados por VANTs. Para tal, foi desenvolvido um algoritmo de localização distribuída baseado em um algoritmo *Semi-Definite Programming* (SDP) de transformação geométrica local com baixa complexidade de computação, com o objetivo de transformar as geometrias locais para a geometria VANT transmitida de modo a obter as posições relativas dos terminais. Também foi desenvolvido um algoritmo de descida iterativa para alocação de espectro e potência conjunta para localização relativa. O cenário para avaliação foi criado com 8 VANTs e 20 terminais alocados aleatoriamente em uma área específica, e os resultados obtidos através da média de erros de localização em diferentes topologias de rede. Os algoritmos SDP e de localização distribuída propostos foram comparados com um algoritmo *Multidimensional Scaling* (MDS), apresentando um *Root Mean Square Error* (RMSE) significativamente menor. Além disso, os resultados também mostraram que o esquema de alocação otimizado obteve um ganho de desempenho de 50%, quando comparado ao esquema de alocação uniforme.

Em [136], os autores consideraram a comunicação mmWave entre uma VANT e uma ERB, realizando a estimação conjunta da posição da VANT e dos coeficientes do canal MIMO, sendo que ambos os nós são equipados com múltiplos elementos de antena. O modelo de sistema considerado foi uma ERB equipada com uma matriz de antenas lineares uniformes, capazes de comunicação quadro-a-quadro com um VANT na faixa de frequência mmWave, tendo cada quadro um intervalo de tempo dedicado para a estimativa de canal e o restante para comunicação de dados. O canal adotado, por sua vez, foi o modelo espacial estatístico, considerado para o canal sem fio MIMO operando com ondas mmWave. A estimação do posicionamento da VANT é feita a partir das condições de propagação do sinal com visada e da representação do espaço do feixe do canal sem fio. Esta estimativa é usada para recuperar os componentes restantes sem visada da matriz do canal MIMO por meio de um algoritmo *Alternating Direction Method of Multipliers* (ADMM). As simulações foram realizadas considerando um modelo de canal de 28 GHz e uma ERB com potência de transmissão de 30 dB, avaliando o *Normalized Mean Squared Error* (NMSE) de acordo com o aumento do erro de posição do VANT. Os resultados indicaram um melhor desempenho do esquema proposto em termos da precisão de estimativa e da utilização de recursos, superando patamares pré-existentes para treinamento de canais com menor duração.

Outro estudo propôs um modelo de sistema que explora a localização dos VANTs em redes sem fio para se deslocarem conforme movimentação dos usuários [137]. O objetivo é reduzir a energia despendida na transmissão e melhorar a qualidade de serviço. O sistema identifica analiticamente a potência de transmissão e, conseqüentemente, a posição ideal das VANTs por meio da derivação de energia consumida na comunicação e no deslocamento, minimizando assim o gasto total de energia. As simulações indicaram que a proposta permitiu economizar 30% da energia total dos VANTs em cenários cujos usuários se movimentam constantemente.

Em [138], foi apresentada uma abordagem do método RL para definir a trajetória de VANTs autônomos, auxiliando na localização de objetos terrestres. O sistema inclui um modelo de consumo de energia e um modelo de propagação de rádio para perda de percurso log-distância [139]. Isso permite que um VANT encontre autonomamente sua trajetória, resultando na melhoria da precisão da localização de vários objetos em um menor espaço de tempo, na otimização da distância do caminho empregado e na redução no consumo de energia. A abordagem foi comparada com 4 métodos diferentes de escolha de percurso. No primeiro, o VANT escolhe aleatoriamente o trajeto percorrido para localizar o objeto. Nos demais métodos, os percursos do VANT são pré-estabelecidos, sendo: (i) o trajeto formado por linhas verticais interligadas por linhas horizontais, denominado como percurso *Scan*; (ii) o trajeto formado por triângulos equiláteros de forma a que todos os pontos sejam visitados uma vez, denominado como percurso *Localization algorithm with a Mobile Anchor node based on Trilateration* (LMAT); e (iii) o trajeto planejado como uma espécie de labirinto, denominado pelos autores como percurso *Maze*. Os resultados mostraram a superioridade do método RL quando comparado com os demais métodos citados, apresentando um menor erro de localização médio e redução no consumo de energia.

Em [140], foi proposto um algoritmo para otimizar a trajetória de VANTs com o intuito de auxiliar na localização em massa de dispositivos IoT. O VANT determina o percurso mais apropriado a partir do algoritmo *Semidynamic Mobile Anchor Guiding* (SEDMAG) de busca ponderada, realizando um planejamento da trajetória das VANTs para a localização dos demais componentes de uma rede 6G de forma eficiente. O algoritmo foi concebido para diminuir a complexidade, o consumo de energia dos VANTs e o atraso de posicionamento. Também foi desenvolvido um conceito de balanceamento de carga para reduzir a latência de localização em

cenários com múltiplos VANTs. As simulações foram realizadas em dois cenários, sendo estes: cenário com múltiplas VANTs, comparando o método SEDMAG com um método convencional de localização baseado em nó de âncora móvel em redes de sensores sem fio [141]; e cenário com um único VANT, comparando o algoritmo proposto com um algoritmo determinístico de esquema de mobilidade de *beacon* dinâmico [142]. Os resultados indicaram redução de erro e consumo de energia e latência em relação aos métodos convencionais comparados diante dos cenários com VANT único e múltiplos VANTs.

Em [143], foi desenvolvido um algoritmo de localização simultânea de múltiplos emissores baseado em *Big Data* em cenários monitorados por um VANT. O método consiste na determinação da posição direta ponderada, e permite determinar o posicionamento do alvo com precisão e processamento reduzido a partir de uma técnica de ponderação, reforçando os espectros obtidos em *slots* com maior relação sinal-ruído. O método proposto foi avaliado em termos de RMSE, que foi usado como parâmetro para o desempenho de localização e comparado com diferentes métodos, sendo: (i) métodos convencionais de duas etapas, responsáveis por extrair parâmetros intermediários dos sinais recebidos, como por AoA e ToA, e tratar de problemas de localização; e (ii) métodos de determinação de posição direta convencionais, responsáveis por estimar diretamente as posições alvo do *Big Data* original. Os resultados obtidos mostraram uma melhora de desempenho em termos de precisão e resolução de localização, especialmente em sistemas com menor número de sensores.

Os autores em [144] apresentaram um sistema robusto de sensoriamento remoto aéreo não tripulado, equipado com um *scanner* LiDAR composto de múltiplos VANTs e um sistema de câmeras multiespectrais. Esta configuração foi montada para estudar a arqueologia da Amazônia pré-colombiana. Os dados coletados deste sistema foram combinados com dados obtidos localmente por arqueólogos, botânicos, paleoecologistas, cientistas e ecologistas no intuito de estudar a natureza e a escala do impacto humano na transformação da floresta amazônica. Os resultados desta pesquisa retrataram a capacidade do sistema em investigar a estrutura da floresta e em recriar a superfície do solo abaixo das florestas para identificar sítios arqueológicos e outras características de terrenos escondidos.

Por fim, no estudo desenvolvido em [145], foi proposta uma técnica de otimização de posicionamento de VANTs para redes sem fio, com o intuito de solucionar problemas relacionados à capacidade da rede. O algoritmo apresentado determina a posição do VANT baseado nas informações obtidas do sinal com visada direta, ao contrário dos métodos existentes que dependem de modelos estatísticos do canal ar-terra. Os resultados indicam uma maximização da taxa de transferência de ponta-à-ponta. Em áreas urbanas densas, foi possível observar que o sistema sem fio auxiliado por VANTs e combinado com o algoritmo de otimização de posicionamento pode quase dobrar a capacidade de ponta-à-ponta da ERB para o usuário, quando comparado ao enlace direto entre uma ERB e o usuário.

Baseado na revisão literária do uso de VANTs no contexto de localização em redes sem fio, pôde-se observar que estes equipamentos são imprescindíveis ao suporte de redes 6G, contribuindo para as premissas essenciais de cobertura onipresente, além de auxílio à localização, mapeamento e sensoriamento de dispositivos terrestres. Devido à sua alta mobilidade, VANTs podem fornecer conexões LoS de curta distância para dispositivos terrestres e serem usados como nós âncora temporários adicionais para melhorar o desempenho de localização desses dispositivos. Além disso, os VANTs podem formar redes aéreas móveis dinâmicas para fornecer comunicação temporária de serviços especiais, como serviços de comunicação de emergência e coleta de dados. Porém, dentre as limitações dos VANTs, destacam-se a resistência material do equipamento e o armazenamento de dados, sendo necessários HAPs flutuantes para fornecer

cobertura sem fio confiável para áreas maiores.

3.5 *Channel Charting*

Matheus Sêda Borsato Cunha
matheus.seda@inatel.br

Channel Charting (CC) é uma aplicação ligada às novas possibilidades de localização e detecção que podem ser potencializadas e exploradas pela rede 6G [17]. Essa aplicação consiste em métodos de localização baseado em IA, empregando técnicas não-supervisionadas de ML [146, 147]. O CC foi apresentado em [148] e foi definido como uma estrutura que mapeia a CSI) obtida por um ou mais UEs em uma célula. Os dados obtidos são apresentados na forma de um mapa de baixa dimensão que representa a imagem local de onde se encontra os verdadeiros UEs no espaço. É importante mencionar que, como esse mapeamento é não-supervisionado, não é necessário saber a localização exata dos UEs. As abordagens anteriores referentes ao mapeamento da região geométrica dos UEs são baseadas em métodos supervisionados, como o *channel fingerprinting*, no qual o mapa de canal possui uma baixa definição, gerado a partir de medidas reais. Isso implica, porém, que as mudanças no ambiente físico do canal de comunicação exigem medidas completamente novas. Por outro lado, o CC evita o processamento exaustivo de medidas e permite obter as informações necessárias para a extração não-supervisionada de mapas precisos do canal [148]. O método se baseia em uma grande quantidade de dados extraídos da CSI de alta dimensão, adquiridos por uma ERB mMIMO com *Uniform Linear Array* (ULA) de 32 antenas, para aplicar técnicas inspiradas em redução de dimensionalidade e aprendizado múltiplo. Os autores propuseram e avaliaram quatro algoritmos distintos de CC, variando complexidade, flexibilidade e precisão, os quais produzem mapas que preservam a geometria local do posicionamento do transmissor. Em [149], os autores propuseram um método não-supervisionado para estender o CC multiponto para o posicionamento absoluto do dispositivo. Os mapas do canal foram gerados para múltiplas ERBs usando MDS e *Uniform Circular Arrays* (UCAs) de 20 antenas e combinados para obter uma formatação mais adequada da geometria do ambiente em torno das ERBs. O mapa combinado não pode ser aplicado diretamente para o posicionamento absoluto, o qual pode ser alcançado estendendo o mapeamento obtido por meio de diferentes transformações, como mapeamento afim e conforme. Então, esses mapeamentos foram aplicados aos pontos do CC para obter um desenho gráfico com melhor orientação e formato para o posicionamento absoluto. Ainda em [149], foi apresentado um método para estimar as posições das ERBs, baseados nas propriedades das medições de CSI, pois, para aplicar as transformações de extensão citadas, essa estimativa é necessária. Outro estudo relatado em [150] apresentou melhoria na estrutura original de CC, propondo usar informações secundárias sobre a movimentação do UE e vetores âncora, que são pontos no espaço nos quais a CSI e sua verdadeira localização são conhecidos, o que melhora o desempenho de posicionamento do CC. Essa melhoria foi possível através da utilização de *Autoencoders* (AEs), os quais aprendem representações de baixa dimensão de um determinado conjunto de dados de alta dimensão preservando as relações espaciais [151]. O uso deste método caracterizou uma versão semissupervisionada do CC, porém os resultados numéricos demonstraram que usá-lo produz melhorias significativas na geometria global recuperada do mapa.

Um caso de uso mais prático desta aplicação é apresentada em [152], na qual os autores utilizam o *Multipoint Channel Charting* (MPCC) para *Radio Resource Management* (RRM)

em sistemas de comunicação *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) e *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I). Uma rede de infraestrutura mMIMO realiza a localização virtual de veículos para um mapeamento do canal em múltiplos pontos, com base em sinais de comunicação V2I. Por meio da combinação das distâncias lógicas fornecidas pelo CC com medições V2V, a rede treina uma função para prever a qualidade de um enlace de comunicação V2V a partir de sinais de comunicação V2I observados. Em [153], os autores propuseram e simularam o uso do CC para a reutilização de pilotos em aplicações de IoT e *massive Machine Type Communications* (mMTC). Um algoritmo de reutilização de pilotos baseado em CC para redes mMIMO foi elaborado, no qual o número de usuários é maior que o número de sequências piloto ortogonais disponíveis. Nesse caso em particular, o mapeamento de canal foi empregado como uma ferramenta para extrair informações de domínio angular de matrizes de covariância de canal e atribuir pilotos ortogonais a usuários com intervalos de ângulos de chegada sobrepostos. Em [154], foi apresentado uma proposta de *Network Centric Handover* (NCH) baseada em CC aplicado a um sistema mmWave mMIMO visando as redes *Beyond 5G* (B5G). Nesse sistema, cada ERB desenha seu próprio CC a partir de amostras que determinam a correlação dos sinais de rádio emitidos de lugares distintos da rede, baseados em matrizes de covariância. Desse modo, a ERB servidora pode prever a SNR média nas ERBs vizinhas através do CC e, então, definir o momento de realizar o *handover* de um usuário para uma célula vizinha.

Como o CC não requer conhecimento das verdadeiras localizações do usuário, ou seja, possui uma natureza não supervisionada, o método proposto é usado em inúmeras aplicações relevantes para redes 6G. Além disso, esta abordagem é viável tanto em cenários com e sem linha de visada e tem um bom desempenho em operação com SNR relativamente baixa. O CC permite uma gama de novas aplicações em tarefas cognitivas que dependem de CSI e da movimentação do UE em relação às ERBs, incluindo planejamento de rede, agrupamento de usuário para comunicação D2D, conectividade multiponto, localização semântica, pesquisa de células, previsão de feixes para sistemas mmWave ou THz, e outros [17].

4 Tecnologias habilitadoras empregadas no suporte à aplicações

As tecnologias elencadas como potenciais habilitadoras para compôr a rede 6G e que impactam na melhoria de aspectos de sensoriamento, mapeamento e localização, podem também impactar beneficemente em diferentes aplicações. Com relação às aplicações já existentes, pode-se citar como possível impacto a evolução e ampliação do uso de certas tecnologias, como àquelas relacionadas, por exemplo, a carros, robôs e VANTs autônomos, automação industrial e cidades inteligentes. Como impacto em aplicações emergentes, pode-se citar a possibilidade de integração junto à rede móvel de aplicações relacionadas ao sensoriamento por imagens em THz, aplicações médicas, comunicações holográficas, Internet tátil, dentre outras.

A seguir, serão apresentados estudos recentes que exploram as tecnologias habilitadoras citadas na seção 2 como suporte à diferentes aplicações já existentes e também aplicações emergentes. O objetivo desta seção é apresentar uma visão do estado da arte das técnicas de sensoriamento, mapeamento e localização que possam ser usadas em aplicações da rede 6G.

4.1 Aplicações de imagens e espectrometria em THz

Juliano Silveira Ferreira
silveira@inatel.br

Como mencionado na seção 2.6, o emprego de sensoriamento por imagens e espectrometria na faixa THz vem sendo amplamente investigado para diferentes tipos de aplicações. Muitas destas aplicações encontram-se em fase de desenvolvimento e experimentação, enquanto outras já estão disponíveis em aplicações comerciais. A concepção e desenvolvimento da rede 6G associada à maturação da tecnologia de sensoriamento permitem viabilizar a criação de novas aplicações e cenários de uso. Estes serão possíveis devido a disponibilidade de tecnologias com processamento inteligente, operando com frequências na faixa THz.

Dentre as aplicações de sensoriamento ativo, destaca-se o sistema de imageamento por radar operando com ondas milimétricas. Nestas faixas de frequência, o radar é comumente utilizado em aplicações que exigem precisão na detecção e posicionamento dos alvos, incluindo distância, ângulo e velocidade, e cujos resultados sejam independentes das condições do ambiente como, por exemplo, a luminosidade [155]. O aumento da resolução e precisão, proporcionado pelo uso de ondas milimétricas, é fundamental para soluções de navegação, sistemas autônomos e reconhecimento de gestos [79]. Tais radares são empregados em aplicações comerciais para *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS), operando em frequências de 76 a 81 GHz, e para radares de aeronaves, na frequências de 94 GHz [79]. Outro estudo propôs o uso do radar *Frequency Modulated Continuous-Wave* (FMCW) para aplicações de imageamento 3D [156]. Além disso, as soluções para radar FMCW, operando em 77 GHz, podem detectar alvos com resolução na ordem de centímetros [155]. Estudos mais recentes, apontam o uso do radar FMCW para frequências de 145 GHz [157] e 170 GHz [156]. Neste último, os autores projetaram um sistema integrado de imageamento 3D baseado em tecnologia SiGe.

O uso de frequências elevadas também beneficiarão aplicações para sistemas automotivos e autônomos. Em [158], por exemplo, os autores propuseram um modelo matemático capaz de identificar a camada de gelo presente na superfície da estrada de terra, baseado no comportamento do sinal em frequências de 140 a 340 GHz. O modelo explora as propriedades dielétricas do gelo e do solo congelado em diferentes frequências e permite fornecer informações

como espessura e rugosidade da superfície congelada. De acordo com [158], o modelo permite caracterizar superfícies de concreto e asfalto.

Ainda no contexto de imageamento, destaca-se pesquisas relacionadas à inspeção física e química de materiais de maneira não destrutiva [159]. A geração de imagens por este método possibilita visualizar informações que não são obtidas por raios X ou ondas ultrassônicas. Os dados obtidos por meio dos ecos fornecem informações relacionadas ao índice de refração e a espessura do objeto, associado a sua constante dielétrica. Métodos de análise matemática têm sido desenvolvidos com intuito de identificar, a partir do mapeamento 3D do objeto e da ondas pulsadas na faixa THz, sua estrutura e composição química, empregando como base análises no domínio do tempo e da frequência e reconhecimento de padrões com *data mining* [160]. O trabalho [161] apresenta diferentes aplicações industriais considerando sensoriamento por imagem e espectroscopia em THz na realização de testes não destrutivos.

Na área biomédica, o sensoriamento por imagens e espectrometria em THz tem sido avaliado para atuar em várias aplicações. Neste caso, as propriedades de onda serão exploradas, devido à singularidade de alguns fenômenos observados na faixa de frequência em questão. Na radiação em THz, por exemplo, o nível baixo de energia fotônica coincide com os níveis de vibração e rotação das moléculas, viabilizando, assim, a caracterização molecular por espectrometria. Além disso, ao contrário do raio-X, a energia fotônica de baixo nível é não ionizante, o que permite aplicações de captura de imagens e espectrometria *in vivo* e em tempo real [162]. A radiação em THz, entretanto, sofre atenuação acentuada por determinadas moléculas, como a da água (220 cm^{-1} para água pura em temperatura ambiente e frequência de 1 THz), propiciando diagnóstico apenas em camadas superficiais da pele *in vivo* (penetração da ordem de centenas de micrômetros em tecidos humanos) [162]. Por outro lado, a alta sensibilidade ao teor de água pode ser aplicada para diferenciar os tecidos do corpo humano. A captura de imagens por THz *Pulsed Imaging* (TPI) explora tanto a amplitude quanto a fase do sinal recebido, e, assim, permite prover informações morfológicas e funcionais do objeto em questão. Estudos realizados em [163] consideram o emprego da tecnologia TPI na identificação não invasiva de doenças de pele, incluindo diagnósticos precoces de melanoma a partir da análise espectroscópica da permissividade dielétrica em frequências de 0,1 a 2,5 THz. A tecnologia tem sido aplicada também na área odontológica para identificar cáries, apresentando performance superior às tecnologias radiológicas tradicionais [164].

Vale destacar que as soluções típicas de TPI na biomedicina consideram normalmente o emprego de sistemas ópticos para a realização de escaneamento [162]. Os resultados das pesquisas, modelagens matemáticas e caracterizações espectrais envolvendo TPI podem, entretanto, servir de base tanto na implementação da própria tecnologia de TPI com outras abordagens, como as não ópticas, quanto no apoio da análise de resultados obtidos a partir de outras técnicas.

Na área de segurança alimentícia, o sensoriamento por imagem em THz é utilizado para identificar elementos indesejados na cadeia de produção como metais, pedras, insetos e polímeros. Na pesquisa apresentada em [74], o sensoriamento por imagem em THz é realizado no controle de substância impróprias para o processo produção de salsichas. A identificação de tais elementos é dada a partir da análise da imagem espectroscópica e com suporte das técnicas de *Principal Component Analysis* (PCA) e de *Discriminant Analysis* (DA).

Com relação à aplicação na agricultura, as imagens capturadas na faixa THz são utilizadas no monitoramento não invasivo da quantidade de água armazenada e da resposta ao estresse hídrico das plantas. Como mencionado anteriormente, estas medições são possíveis devido à característica absorptiva da molécula de água diante destas ondas. Neste contexto, diferentes modelos quantitativos de teor de água em folhas foram propostos considerando transforma-

ções lineares, bem como o uso de processamento TDS associado a técnicas de PCA [76] O mapeamento por imagem 3D para a faixa THz é aplicado na identificação da distribuição tridimensional de água em plantas. Em [165], empregam-se TDS associada a modelos matemáticos para descrever propriedades dielétricas visando estimar a presença de água em cada pixel da imagem da planta. Este trabalho em específico considera a emissão de pulsos na faixa de 0,1 a 2 THz e utiliza dispositivos ópticos. O imageamento em THz também é utilizado para identificar patógenos em plantas [166]. Além disso, outros estudos buscam caracterizar a atenuação do sinal em diferentes espécies de plantas para diversos fatores fisiológicos. Em [167], por exemplo, os autores analisaram atenuação de sinal na faixa de 0,3 a 0,4 THz em plantas como o alface, morango e café, em função da espessura, densidade, uniformidade e textura de suas folhas. Ainda, esta tecnologia pode ser estendida para aplicações relacionadas a detecção de fungicidas, pesticidas, inseticidas e outros resíduos químicos. A análise espectroscópica na faixa THz tem sido realizada também em solos com o intuito de metais pesados, materiais contaminantes e outros poluentes [76]. Os autores destacam, entretanto, a necessidade de pesquisas complementares para resolver questões associadas a este tipo de aplicação, como a penetração do sinal no solo, influência da composição do solo nas medidas e limitação de resolução espacial.

Vale destacar que as soluções típicas de TPI na biomedicina consideram, normalmente, o emprego de sistemas ópticos para a realização de escaneamento [162]. O mesmo ocorre com relação às aplicações na área da agricultura. Os resultados das pesquisas, modelagens matemáticas e caracterizações espectrais envolvendo TPI nestas áreas, entretanto, podem servir de base tanto na implementação da própria tecnologia TPI com outras abordagens, como as não ópticas, quanto para compôr um banco de dados a serem consultados durante análises e caracterizações obtidas a partir de outras técnicas. Conforme evidenciado, o sensoriamento por imagens e espectrometria vem sendo aplicado em diversos cenários e possui ainda grande potencial de exploração. Neste contexto, a rede 6G se apresenta como uma oportunidade para ampliar a adoção de tecnologias de sensoriamento por imagens e espectrometria em THz, aplicados a ambientes rurais, urbanos e até mesmo hospitalares.

4.2 Sensoriamento passivo usando transmissores de oportunidade

Diego Gabriel Soares Pivoto
diego.gabriel@inatel.br

O sensoriamento passivo é uma tecnologia emergente que extrai informações da energia refletida de obstáculos. O receptor de sensoriamento passivo captura oportunisticamente sinais transmitidos pela rede móvel, Wi-Fi e sinais de emissoras de TV e de rádio. Desta forma, o receptor extrai as informações sobre o ambiente através do seu conhecimento prévio do sistema e do sinal utilizado como referência [35]. Vale destacar que o termo sensoriamento passivo é comumente associado na literatura ao radar passivo e à localização coerente [17].

Como possíveis aplicações das técnicas de localização usando sensoriamento passivo, podem ser destacadas o monitoramento de sinais vitais, presença de intrusão, reconhecimento e localização de atividade humana, dentre outras [168]. Além disso, o radar passivo pode auxiliar na detecção de objetos através de obstáculos, como paredes [169], e na criação de mapas em ambientes estáticos. Para que tais aplicações possam ser viabilizadas, diversos estudos têm sido realizados de modo a permitir o uso eficiente dessa técnica. A seguir, serão apresentados alguns trabalhos recentes relacionados ao sensoriamento passivo explorando sinais de diferentes sistemas. Além disso, serão apresentados também alguns métodos de implementação propostos para superar diferentes desafios associados a este tipo de sensoriamento.

Em [170], Sedighi *et al.* consideraram o uso de radar passivo baseado em sinais do padrão *Narrowband IoT* (NB-IoT) para atender aplicações de IoT que demandam informações de localização. Visando obter uma solução de baixo custo e de baixo consumo energético, os autores avaliaram um sensor passivo que emprega conversor analógico-digital com resolução de apenas um bit. As estimativas de localização são obtidas a partir de medidas relativas ao intervalo de chegada dos sinais (ToA) de referência em uma rede de dispositivos NB-IoT. Assim, os autores propuseram um método de processamento dos sinais, com reduzida complexidade computacional, que estima a localização explorando conceitos de resolução de problemas polinomiais multivariados. Os resultados indicaram que o método proposto estima a localização com precisão semelhante aos sistemas com maior resolução, principalmente, nos cenários testados com mais 80 receptores passivos.

Yan *et al.* [171] exploraram uma arquitetura de rede híbrida, composta por *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) e sensores passivos e ativos, para solucionar problemas de localização no contexto de *Internet of Underwater Things* (IoUT). Assim, os autores propuseram um protocolo de localização assíncrono e também um algoritmo de localização baseado em IA e RL que estima as localizações dos veículos subaquáticos autônomos e dos nós de sensores ativos e passivos. O algoritmo processa as iterações de modo *online* para otimizar os dados obtidos e também considera a realização de compensações de propagação de raio e de mobilidade. Para lidar com a complexidade do processamento de sinal em ambientes marítimos, o algoritmo de localização busca estimadores baseados em RL com o objetivo de encontrar uma solução global otimizada. Os autores destacam que o trabalho em questão é o primeiro a adotar RL em processos de localização em IoUT. Experimentos foram realizados com um AUV submerso, cuja localização foi estimada por meio de um centro de controle que atua como uma unidade de processamento de sinal usando UWB. Os resultados indicaram que o método baseado em RL é eficiente e determinou com sucesso a posição dos AUVs.

Tendo em vista as limitações relacionadas à áreas de cobertura e altas perdas de transmissão no uso de radares passivos, em [172] Rosado-Sanz *et al.* propuseram uma avaliação no desempenho de radares passivos para detecção de alvos terrestres em um cenário semi-urbano, usando *Digital Video Broadcasting - Satellite* (DVB-S) como iluminador de oportunidade. Os resultados obtidos mostraram a viabilidade do uso de radares passivos com DVB-S para detecção e rastreamento de alvos terrestres de baixo alcance. Além disso, foram analisados os efeitos de desvio de frequência *Doppler* nos ecos produzidos pelo alvo através do processamento do sinal ao longo da cadeia de blocos que compõem a camada física do sistema iluminador de oportunidade. Em [173], Ummenhofer *et al.* propuseram o uso de radar passivo baseado também em sinais DVB-S, porém, para detecção de VANTs. O trabalho em questão também realiza uma análise de assinaturas de micro-Doppler. Resultados mostraram a viabilidade dos radares passivos para detecção em curtas distâncias por meio do uso de sinais de satélite de comunicação como iluminadores de oportunidade.

No âmbito das pesquisas relacionadas a radares passivos, destaca-se o estudo de Batra *et al.* em [174]. Neste trabalho, os autores combinaram a técnica SLAM com um sistema de localização de RFID, baseado em *tags* passivas e SAR, para fornecer a posição e o mapeamento de VANTs e objetos em um ambiente interno. As simulações foram realizadas considerando a modelagem do sinal digital e o cálculo do campo eletromagnético de materiais. Os resultados da simulação foram confrontados com medições de campo realizadas com frequência de 275 GHz e com largura de banda de 50 GHz. Neste caso, a adição do SLAM permitiu mapear com alta resolução a estrutura do objeto e sua posição em um ambiente interno. Ainda, o sistema possibilitou detectar e classificar os objetos do ambiente a partir de sua forma.

Em [175], Kianoush *et al.* propuseram uma técnica de sensoriamento de rádio passivo em bandas sub-THz para detecção e discriminação de movimentos corporais. Para tal, foram adotados dispositivos de rádio com suporte à banda de 100 GHz para processar a imagem do ambiente e discriminá-los dos movimentos corporais. A detecção de movimentos, por sua vez, é baseada em uma análise em tempo real de assinaturas induzidas pelo corpo, cujas estimativas são realizadas a partir de medições em sub-THz e processadas por classificadores baseados em redes neurais. O sistema é composto por uma fonte com capacidade de operação para 100 GHz e uma câmera sub-THz que consiste em 1024 detectores de pixel dispostos em uma matriz 2D (32 x 32). Desta forma, os movimentos de um trabalhador humano ao lado de um braço robótico foram monitorados dentro de uma planta de testes com área interna de 24 m², e a técnica *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) foi comparada com as redes neurais *Feed-Forward Neural Network* (FF-NN) e *Long Short-Term Memory* (LSTM). Os resultados mostraram que a abordagem MLE fornece menor precisão para discriminação de movimentos dos braços, enquanto FF-NN e LSTM alcançam uma precisão superior a 95% para todas as atividades de movimento.

Regani *et al.* introduziram em [176] um sistema passivo de rastreamento de caligrafia de alta precisão usando rádio com ondas milimétricas. O equipamento emprega uma cadeia de processamento de sinal ponta-à-ponta para aumentar a cobertura, alcance e a resolução espacial limitada pelo hardware, além de reduzir a interferência de ambientes de fundo e objetos irrelevantes. A implementação e avaliação foi realizada em um dispositivo de rádio comum de 60 GHz e os resultados mostraram que o sistema passivo é capaz de rastrear uma caneta ou dedo com um erro médio de 12,8 mm, além de reproduzir caracteres manuscritos de aproximadamente 1 cm x 1 cm e cobrir uma área de até 8 metros quadrados. Esses resultados permitirão que novas aplicações sejam desenvolvidas no campo das interações entre humanos e computadores.

Por fim, em [177], Ali *et al.* propuseram o uso de um receptor de radar passivo nas rodovias para reduzir a sobrecarga de treinamento (*training overhead*) e estabelecer um enlace de comunicação por ondas milimétricas. O processamento é realizado a partir da covariância espacial dos sinais de radar recebidos. Também foi proposta uma estratégia de correção de covariância de radar para aumentar a similaridade entre o *Azimuth Power Spectrum* (APS) do radar e da comunicação. Os experimentos foram realizados assumindo o sistema de comunicação operante na banda de 73 GHz, com o radar operando na banda de 75 GHz, e as simulações foram baseadas em dados de rastreamento de raio. Os resultados mostraram que a correção de covariância melhora a similaridade do APS do radar e da comunicação e, conseqüentemente, possibilita aproveitar as informações do radar para *beamforming*. Além disso, a abordagem por radar reduz significativamente a sobrecarga de treinamento, sendo bastante útil em canais NLoS.

A implementação do sensoriamento passivo em redes 6G está acompanhada da superação de alguns desafios que incluem: desenvolvimento de dispositivos de baixo custo; redução do consumo energético; melhoria na qualidade do sinal; e manutenção da coerência na recepção durante longos períodos de tempo [35]. Os desafios mencionados estão relacionados a fatores como equilíbrio entre a duração do pré-amplificador de referência em sinais padronizados e os dados do usuário, e qualidade do sinal de referência. Este último é afetado principalmente por multipercursos, demandando um processamento mais complexo. Apesar dos desafios, o sensoriamento passivo é uma tecnologia promissora para a próxima geração de redes móveis. A utilização deste recurso auxiliará aplicações emergentes no processo de localização e mapeamento de ambientes e objetos.

4.3 Sensoriamento ativo com convergência de radar e comunicações

Diego Gabriel Soares Pivoto
diego.gabriel@inatel.br

Devido ao alto custo, complexidade e tamanho de antenas e equipamentos, o radar esteve limitado às aplicações voltadas para uso militar, aeronáutico e meteorológico. Contudo, o avanço da tecnologia de semicondutores e processamento de sinais permitiu o desenvolvimento de radares integrados de baixo custo, ampliando seu escopo de aplicações para diferentes áreas do mercado, como na indústria automotiva [35]. O radar é capaz de detectar objetos e determinar seu alcance, ângulo e velocidade a partir da propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas. A obtenção destes dados está diretamente relacionada aos parâmetros empregados na operação do radar, como duração dos pulsos e frequência. Diante dos novos cenários de comunicação, as investigações em torno do radar tem convergido para os requisitos abordados em sistemas sem fio, tais como transmissões em altas frequências e bandas mais largas. Assim, no contexto das redes 6G, prevê-se a integração completa entre os sistemas de comunicação e o radar, permitindo: (i) coexistência, a partir do uso de técnicas de *beamforming* e rádio cognitivo para evitar interferência nos domínios do tempo e espaço; (ii) cooperação por meio de sistemas independentes que trocam informações para auxiliar uns aos outros; (iii) *co-design*, a partir do emprego de uma forma de onda única para radar e sistemas de comunicação sem fio [178].

Recentemente, diversos trabalhos relacionados a sensoriamento ativo com convergência de radar e comunicações sem fio tem sido desenvolvidos. Em [179], por exemplo, Li *et al.* propuseram uma solução para o problema de design de formas de onda, com intuito de garantir coexistência entre sistemas de comunicação e radar. Para isso, foram desenvolvidos dois projetos de formas de onda uni-modulares, nos quais o nível de lóbulo lateral é avaliado para definir a melhor correlação entre formas de onda usadas no radar. O primeiro explora a inicialização de fase para introduzir os dados do sinal na geração da forma de onda, enquanto o segundo projeto emprega diferenças de fase entre os elementos da forma de onda para transmitir informações. Os resultados das simulações apontaram a eficiência dos projetos para a convergência entre radar e comunicação, onde o primeiro fornece o menor nível de lóbulo lateral, enquanto o segundo otimiza, de forma conjunta, o nível de lóbulo lateral e o tráfego de informações.

Rahman *et al.* em [180] desenvolveram um modelo de sistema baseado em uma arquitetura *Cloud-Radio Access Network* (C-RAN) usando tecnologias MIMO multiusuário e *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) para realizar a integração conjunta do radar e comunicação em uma rede móvel perceptiva. Assim sendo, foi apresentada uma plataforma unificada que habilita sensoriamento de *uplink* e *downlink* usando os respectivos sinais de comunicação. Foram utilizados algoritmos de sensoriamento comprimido unidimensional para estimar parâmetros do meio a partir do sensoriamento, além de um método de subtração de *background* para supressão de *clutter*. Os resultados mostraram que a rede móvel perceptiva pode ser usada em diversas aplicações de sensoriamento, como *Smart City*, *Smart Home*, *Smart Car* e transporte, enquanto fornece serviços de comunicação.

Baseado nos diversos trabalhos referentes à convergência de sensoriamento ativo e comunicação, pode-se estimar que a forma de onda a ser usada na rede 6G precisará ser projetada para que os radares atinjam desempenhos satisfatórios em termos de alcance e resolução de velocidade e ângulo de elevação, além de bom desempenho de comunicação em termos de eficiência espectral e de energia. Esta convergência também permitirá a flexibilidade entre as necessidades de comunicação e sensoriamento, e a combinação de suas informações fornecidas juntamente com radares passivos através de fusão de sensores podem fornecer um mapeamento muito mais

rico e preciso do ambiente. Apesar dessas vantagens, a implementação de radar ativo em redes 6G está limitada à superação de alguns desafios relacionados à auto-interferência no receptor dos radares e às interferências entre diferentes usuários. A solução desses problemas se encontra no desenvolvimento de antenas, processadores e formas de onda capazes de minimizar o impacto da interferência. Além disso, deve-se considerar a necessidade de novos protocolos e algoritmos capazes de alocar os recursos de rádio a partir da necessidade dos diferentes serviços de comunicação [17].

4.4 Saúde, sensoriamento digital e biológico e *e-health*

Daniely Gomes Silva, Matheus Sêda Borsato Cunha
 daniely@inatel.br, matheus.seda@inatel.br

A área da saúde apresenta um grande potencial de transformação pela aplicação de novas soluções tecnológicas voltadas tanto para o diagnóstico e sensoriamento biológico quanto para a rede de comunicação. Com relação ao sensoriamento, pode-se destacar o constante avanço na área de biossensores que são cada vez mais precisos, compactos e também *wearables* [181–184]. Esses dispositivos têm atraído grande interesse devido ao seu potencial de fornecer informações fisiológicas de forma contínua e em tempo real por meio de medições dinâmicas, não invasivas, e até mesmo sem contato.

Com a implantação da rede 6G, os biossensores capazes de detectar doenças virais altamente infecciosas poderão ser integrados a outros dispositivos, permitindo alcançar um maior controle de situações indesejadas, como o alto contágio desencadeado em uma epidemia ou pandemia [181,182]. Também poderão ser utilizados em monitoramento passivo e doméstico de marcadores bioquímicos em biofluidos, como suor, lágrimas, saliva, sangue, fluido intersticial e outros. Outra área de aplicação é o biorreconhecimento óptico, o qual poderá ser empregado para rastrear o comportamento patológico de células como enzimas, anticorpos e outra partículas, alcançando assim um melhor diagnóstico na detecção de patologias [182].

Nesse contexto, pode-se destacar os recentes avanços na área de nano-bio sensores, que devem revolucionar o monitoramento e gerenciamento de saúde [185,186]. A interconexão de dispositivos em nanoescala leva ao conceito da *Internet of Nano Things* (IoNT) e da *Internet of Bio-Nano Things* (IoBNT), que deve ser impulsionado com o advento da rede 6G. Nesse conceito, as noções da engenharia de comunicação e de rede são transportadas para o domínio bioquímico, onde células biológicas dentro do corpo humano permitem a detecção e atuação intra-corporal. Os dados de saúde podem ser coletados e, com base nessas informações e utilizando técnicas de localização e rastreamento, as ações necessárias podem ser tomadas. Pode-se citar, como exemplo, ações relacionadas à liberação local de medicamentos, à identificação da região da doença, entre outros [184].

Em [183] são investigados biossensores eletroquímicos utilizados na detecção de diferentes tipos de vírus por meio de métodos de detecção eletroquímica. Foram discutidos os procedimentos de imobilização, destacando-se o método de imobilização dos nanomateriais e elementos biológicos, que contribui para a minimização de erros na detecção de vírus. Também foram investigados suas aplicações e diferentes métodos de detecção eletroquímica. Embora as tecnologias de biossensores sejam altamente promissoras, ainda verifica-se um grande esforço para alcançar dispositivos portáteis e reutilizáveis, capazes de discriminar vírus com altos níveis de seletividade e sensibilidade. Também foram discutidos sobre desafios na utilização em casos reais e não somente em testes de laboratório.

Os avanços em robótica e em IA nos últimos anos demonstram o potencial que os robôs possuem para apoiar o campo da saúde. A tecnologia robótica no domínio da saúde tem sido aplicada no cuidado com idosos, crianças, pessoas com deficiência, em hospitais, na reabilitação de lesões, como auxílio para caminhar, e outras situações relacionadas a *e-health*. De modo geral, as técnicas de posicionamento, mapeamento e sensoriamento são pontos importantes a serem aplicados em robôs para poderem se movimentar com autonomia e, assim, contribuir para melhorar a qualidade de vida das pessoas em diversos cenários [187, 188]. Vale destacar que a classificação de um robô é definida de acordo com a maneira que ele é utilizado, ou seja, robôs com diferentes especificações e recursos de *hardware* podem ser incluídos numa mesma categoria [187]. Dentre as categorias podem-se mencionar os *care robots* e também os robôs hospitalares, de reabilitação e de assistência ao andar.

Miseikis *et al.* [189] projetaram e construíram um *care robot* chamado Lio. Lio já foi implantado em vários estabelecimentos de saúde, funcionando de forma autônoma para atender funcionários e pacientes no dia-a-dia. O robô possui uma base móvel com quatro rodas, um braço robótico colaborativo e é equipado com duas câmeras *RealSense D₄₃₅ Depth*, uma câmera com lente grande angular, dois LiDARs, sensores ultrassônicos e sensores infravermelhos. Todos esses dispositivos, combinados com algoritmos de mapeamento, localização e percepção, possibilitam que Lio se desloque, reconheça pessoas, identifique objetos e receba comandos de voz [189]. Hobbit é mais um *care robot* apresentado em [190] com o objetivo de atender idosos. A sua principal função consiste em detectar e prevenir potenciais quedas e também atuar de forma adequada em situações de emergência. Esse robô requer um sistema de percepção apropriado para as tarefas de construção de mapas e auto-localização, navegação segura, interação humano-robô e detecção de objetos. Para isso, o robô foi equipado com uma câmera de profundidade paralela ao solo e uma câmera *Microsoft Kinect* ou *ASUS Xtion Pro Live RGB-D*, além de alguns sensores auxiliares [190]. A Figura 8 apresenta fotografias dos *care robots* mencionados.



(a) Robô Lio [191].



(b) Robô Hobbit [192].

Figura 8: Exemplos de *care robots*.

Quanto aos robôs de assistência ao andar, existem vários tipos, dependendo do nível da deficiência do usuário. Dentre eles, pode-se citar o *Intelligent Walking Assistant* (IWA), que engloba um conjunto de robôs para auxílio de pessoas com força moderada na parte superior

e inferior do corpo [187]. Esses dispositivos são geralmente equipados com sensores de força-torque, *Laser Rangefinder* (LRF), sensores acústicos, câmeras *Charge-Coupled Device* (CCD) e câmeras RGB-Depth para localização e realização das atividades. Os IWA possuem uma abordagem padrão conhecida como o *Cane-based Walking Assistant* (CWA), os quais se parecem muito com bengalas e são facilmente utilizadas em ambientes internos e externos. Em [193], os autores propuseram um projeto de CWA com a finalidade de manter os usuários em equilíbrio enquanto estão caminhando. O projeto da bengala robótica foi baseado na teoria do pêndulo invertido e linearizado pelo *Lie Algebra Method* (LAM), e usa uma roda omnidirecional inteligente [193]. Outra abordagem dos IWAs são os *Walking-Frame based Walking Assistants* (WWAs), que se assemelham aos andadores convencionais para idosos e fornecem mais estabilidade e suporte. Xu *et al.* [194] propuseram um robô WWA baseado em fusão de movimento coordenado para detectar a intenção do movimento humano ou *Human Motion Intention* (HMI). Sensores *Force-Sensing Resistor* (FSR) e um LRF foram usados para detectar as velocidades dos membros superiores e inferiores dos usuários a fim de estimar os HMIs com precisão. O algoritmo para controlar o movimento detecta um estado de caminhada anormal do usuário e, em seguida, lembra o robô de reagir a fim de evitar que o usuário sofra uma queda [194].

Recentemente, soluções inovadoras aplicadas aos cuidados de saúde têm sido impulsionadas pela pandemia do COVID-19. Tamantini *et al.* [188] desenvolveram um sistema robótico, com capacidades de interação e navegação autônoma, para fins de logística e desinfecção, e foi usado no centro de tratamento do COVID-19 do *University Hospital Campus Bio-Medico* (UCBM) em Roma, Itália. O robô foi equipado com um algoritmo SLAM para realizar uma navegação autônoma. Dessa forma, o mesmo é capaz de gerar uma trajetória de referência por meio de um módulo de planejamento de trajetória, o qual é baseado em um pacote de navegação do *Robot Operation System* (ROS) chamado *global_planner*. De uma forma mais direta, o robô possui uma combinação entre planejamento do caminho e prevenção de obstáculos para possibilitar uma movimentação segura em um ambiente não estruturado [188]. Em [195], os autores apresentaram um robô com um sistema de navegação baseado em SLAM de duas dimensões (2D-SLAM) para lidar com cenários hospitalares desafiadores. O robô de enfermagem autônomo foi projetado para ser capaz de manter um mapa global de alta qualidade, além de um mapa local para ser acionado quando o robô depara com obstáculos. Em outro estudo, o autor de [196] construiu um robô de serviço para ambientes hospitalares a fim de auxiliar a equipe no gerenciamento de tarefas. Várias técnicas de mapeamento e localização foram utilizadas para dar autonomia no deslocamento dos robôs, inclusive entre andares. O método VSLAM foi aplicado para acumular nuvens de pontos em 3D, a fim de gerar mapas de grade de ocupação em 2D. Um mapa 3D foi criado usando a nuvens de pontos 3D a partir de um SLAM baseado em 3D-LiDAR.

Em [197], os autores propuseram um algoritmo, baseado em VSLAM e processamento de imagens aplicável a robôs, para o mapeamento de ambientes hospitalares considerando condições dinâmicas. O algoritmo proposto é compatível com diferentes câmeras, como RGB-D, câmeras monoculares e estéreo. O objetivo da pesquisa em questão é melhorar a eficiência de operações hospitalares e reduzir os riscos de contaminação cruzada entre paciente e médico, assim como a disseminação do vírus.

Outro ponto que merece destaque no contexto de aplicações na área de saúde e que podem ser potencializadas pela rede 6G se refere ao uso da faixa de THz para o fornecimento de imagens para tecnologias futuras. Como exemplo dessa aplicação, tem-se a possibilidade de medidas de produtos químicos, por meio do suor, à qual pode revelar a atividade metabólica,

inflamação e patógenos de um dado indivíduo de forma rápida e eficaz. Nas redes 6G, a imagem e o sensoriamento também poderão ser utilizados nessa faixa espectral, uma vez que o pequeno comprimento de ondas na faixa de THz possibilita a análise de pequenos defeitos em materiais, aplicação útil para o mercado industrial, análises clínicas, biológicas e agroalimentares [17]. Algumas pesquisas recentes relacionadas a esse tema, que exploram o sensoriamento por imagem na faixa de THz e espectrometria, estão melhor detalhadas na seção 4.1.

A evolução das redes de comunicação pode impactar beneficentemente e de diferentes formas as aplicações na área da saúde voltadas ao contexto de *Smart Cities*. Em [198], os autores destacam, a partir de um caso de uso denominado *Smart Ubiquitous Healthcare*, que a cobertura onipresente a ser possibilitada pela rede 6G deve permitir o gerenciamento remoto da saúde com o objetivo de fornecer atendimento 24 horas por dia, independente da localização dos pacientes. A adoção de IA em diferentes camadas da rede deve também viabilizar o desenvolvimento de aplicações cada vez mais eficientes na área da saúde, favorecendo a prevenção, diagnóstico e tratamento de doenças de uma maneira geral.

As melhorias previstas para a rede 6G com relação a precisão de localização e mapeamento de ambientes também impulsionará o emprego de soluções robóticas autônomas na área da saúde. Dessa forma, podem ser potencializadas aplicações até então não usufruídas em sua amplitude, como por exemplo, aplicações em atendimentos de emergência, exames médicos, limpeza de pisos contaminados e fornecimento de medicamentos em áreas rurais. A evolução da robótica médica associada a *Immersive eXtended Reality* (IXR) irão contribuir para o desenvolvimento de tecnologias associadas às cirurgias remotas (tele cirurgia) e às intervenções à distância. Adicionalmente, com a inserção de IA na rede 6G, os avanços de soluções de realidade aumentada e virtual, juntamente com a evolução na área de sensoriamento biológicos e biotecnologia, possibilitarão uma revolução na área da saúde, mudando a percepção do estilo de vida a ser adotado pelos indivíduos. Isso gera impacto na prevenção, diagnóstico e tratamento de doenças e, conseqüentemente, na melhoria da qualidade de vida das pessoas.

4.5 Aplicações na área automotiva, carros e robôs autônomos

Juliano Silveira Ferreira
silveira@inatel.br

As aplicações com *Connected robotics and autonomous systems* (CRAS) são potenciais direcionadoras para a concepção da rede 6G [199]. A denominação de CRAS pode ser aplicada a diferentes sistemas, como carros, robôs e VANTs autônomos. Essas aplicações demandarão baixa latência e alta confiabilidade e taxa de dados, para garantir precisão na localização e transferir os mapas em alta definição [199]. Os requisitos demandados pelas aplicações emergentes de CRAS devem ultrapassar os limites da rede 5G, porém, a expectativa é que a rede 6G possa suportá-los de maneira adequada [1].

Portanto, as aplicações com CRAS, operando na rede 6G, serão beneficiadas pela melhora na resolução, precisão de localização e mapeamento. Adicionalmente, a rede 6G propiciará o uso de IA no gerenciamento de tais informações, servindo de base para a evolução de diferentes aplicações relacionadas a CRAS, incluindo sistemas de transporte inteligentes, sistemas de entregas automatizadas por *drones* e aplicações de pelotão/comboio de veículos [199]. Os robôs e sistemas autônomos, por sua vez, devem impulsionar as aplicações industriais, melhorando os níveis de automação, eficiência e produção de maneira geral, conforme melhor detalhado na seção 4.7.

A seguir, estão apresentados maiores detalhes sobre aplicações e algumas pesquisas recentes que exploram questões relativas à localização e mapeamento de ambientes nas áreas automotiva, de carros autônomos, de transporte inteligente e também de robôs autônomos.

4.5.1 Aplicações na área automotiva, carros autônomos e transporte inteligente

No contexto de CRAS, as aplicações V2X são destacadas por atuarem diretamente em tecnologias relacionadas à melhoria da segurança em rodovias, evolução de veículos autônomos e sistemas de transporte inteligente, dentre outros [200]. A área de transportes foi considerada como uma importante vertical na concepção da rede 5G NR. O *Release 16*, por exemplo, contempla estudos e melhorias da rede 5G para o suporte a novos cenários de uso do V2X. Neste padrão, as aplicações V2X são divididas em 4 grupos [201, 202]:

- Aplicações que envolvam o sensoriamento e transmissão de vídeos entre veículos, pedestres e servidores;
- Aplicações relacionadas a direção autônoma ou semi-autônoma de veículos;
- Aplicações relacionadas a condução remota de veículos;
- Aplicações que envolvam grupos de veículos, onde um veículo pode, por exemplo, transmitir mensagens a outros veículos de seu mesmo grupo.

Para as aplicações V2X, a comunicação *Vehicle-to-Network* (V2N), pode ser provida pela rede 5G. Por outro lado, a comunicação V2V, *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P) e V2I requerem a possibilidade de comunicação direta entre os dispositivos, que é denominada pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) como *sidelink* [203]. Vale destacar que o 5G NR incorpora a comunicação *sidelink* tendo como foco o melhor suporte às aplicações V2X. Entende-se que as aplicações previstas na rede 5G devam ser melhor suportadas pela rede 6G e que novas aplicações devam ser viabilizadas a partir das mesmas. No contexto do processo evolutivo da rede 5G, que pode servir de base para a rede 6G, pode-se destacar o projeto *5G Track*, que tem por objetivo desenvolver métodos de localização mais precisos explorando ondas milimétricas da rede 5G para prover suporte a aplicações de veículos autônomos [204]. O projeto visa desenvolver uma solução de baixo custo e alta precisão para localização e rastreamento, considerando um erro máximo da ordem de 20 cm em cenários estáticos ou altamente dinâmicos. Além disso, o projeto prevê pesquisas relacionadas ao sensoriamento de ambiente, a partir do veículo, para criar mapas que possam ser armazenados e utilizados futuramente. Este sensoriamento será baseado na reflexão e espalhamento das ondas milimétricas. O projeto é fomentado pelo H2020, iniciado em 2019 e com término previsto para 2022, e conta com fomento da ordem de € 185 milhões [204]. Os resultados das pesquisas deste grupo podem contribuir para a concepção da rede 6G visando o suporte a aplicações veiculares e mapeamento de ambientes.

Há a expectativa de que, com a maturação de tecnologia, o número de veículos autônomos cresça rapidamente nos grandes centros urbanos nos próximos anos. Estes, por sua vez, demandarão aos sistemas de localização uma alta precisão e também um melhor gerenciamento de tais informações, para que se possa alcançar níveis adequados de segurança e confiabilidade [200]. A identificação de distância entre os veículos e os obstáculos de maneira precisa e o acesso à informações de mapeamento 3D do ambiente em tempo real serão fundamentais para as aplicações de veículos autônomos, bem como aplicações de transporte inteligente. Além disso, tais aplicações demandam ampla cobertura da rede e robustez para operação em condições de alta

mobilidade [9]. A utilização de veículos autônomos pode ainda acelerar a adoção de tecnologias emergentes relacionadas, por exemplo, ao emprego de *display* 3D, controles holográficos e sistemas de entretenimento imersivo, que exigirão, por sua vez, requisitos adicionais da rede, como maior taxa de dados [200]. o *Visible Light Communication* (VLC) é um exemplo de tecnologia complementar que poderia compor a rede de comunicação com suporte à futura aplicações veiculares. Esta tecnologia poderia prover, entre vários recursos, maiores taxas de comunicação [200].

Conforme mencionado na seção 4.1, os radares baseados em frequências de THz proporcionam alta precisão na detecção e localização de objetos, bem como sua distância, velocidade e ângulo, independente das condições do ambiente. Tais benefícios devem propiciar a evolução dos sistemas de navegação em geral, como ADAS e também de sistemas autônomos [79,155]. As soluções atuais de radares do tipo FMCW proporcionam detecção de distância com resolução da ordem de unidades de centímetros [155] e são consideradas para aplicações de imageamento 3D [156], incluindo a identificação de condições da estrada como apresentada no trabalho [158].

Atualmente os ADAS avançados são alvo de pesquisas e desenvolvimento por grandes empresas e montadoras, como Audi, Mercedes Benz e Google, e buscam alcançar a automação completa de veículos, classificada como autonomia de nível 5 pelo padrão estabelecido pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) [205,206]. Os autores de [206] citam que a empresa Mobileye, divisão da Intel que desenvolve soluções para ADAS, considera o sensoriamento e mapeamento de ambiente dentre os principais pilares para a evolução dos sistemas de veículos autônomos. Neste estudo, os autores indicaram que as tecnologias baseadas na faixa de THz aplicadas à localização, sensoriamento e mapeamento 3D previstos pela rede 6G tem grande potencial para melhor suportar as demandas das aplicações emergentes de veículos autônomos. Além disso, os autores mencionam que a rede 6G deverá atender também a requisitos adicionais de tais aplicações relacionados ao suporte a uma quantidade massiva de dispositivos e comunicação com baixa latência. As técnicas de *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) são citadas como complementares às tecnologias de sensoriamento/localização em THz para o suporte a aplicações de V2V e V2I, pois tem potencial para prover suporte a um número massivo de dispositivos conectados. Além disso, o emprego de banda larga em THz viabilizarão a comunicação em altas taxas, associada ao emprego de múltiplos pontos de acesso propostos pelo conceito de *Cell-Free Communications*. Os autores de [206] destacam ainda que este conceito deve ser explorado para aumentar a precisão dos sistemas de localização e sensoriamento baseados em THz que, por sua vez, permitirão que as aplicações de veículos autônomos alcancem maiores performances. Por fim, destacaram-se também que as aplicações relacionadas às missões críticas envolvendo veículos e VANTs autônomos serão viabilizadas pela rede 6G devido à melhor resolução e precisão de posicionamento a ser provida pela rede.

Um dos principais desafios dos sistemas de comunicação sem fio se refere à superação das condições impostas pelo canal de comunicação. Um canal bastante severo é aquele com seletividade no domínio do tempo e da frequência. Essa dupla seletividade ocorre comumente em sistemas de comunicação veicular devido à mobilidade do transmissor e/ou receptor. Visando superar tais desafios, a rede 5G prevê configurações com grande espaçamento entre portadoras e inserção de um maior número de pilotos de referência. Estas configurações têm por objetivo proporcionar maior robustez frente às condições do canal de comunicação, porém, diminuem a eficiência espectral [200]. Além disso, as comunicações veiculares também são impactadas por áreas de sombra causadas devido à existência de obstáculos ao longo do percurso do veículo. A rede 6G considera diversas tecnologias promissoras que podem auxiliar na superação destes desafios. Exemplos destas tecnologias que podem ser associadas à maior precisão de locali-

zação dos veículos e mapeamento do ambiente são: superfícies inteligentes, IRSs, superfícies programáveis, *beamforming*. Estas superfícies permitem customizar os percursos e otimizar as condições do canal de comunicação, e até mesmo ampliar a área de cobertura ao redirecionar o sinal para uma área de sombra. Melhores condições de canal e de cobertura podem ser alcançadas desta forma, o que viabiliza, em certas condições, o estabelecimento de comunicação de maneira ininterrupta e com maiores taxas de dados [200]. As comunicações V2V podem ser especialmente beneficiadas pelo emprego de superfícies inteligentes atuando como direcionadoras de sinal em casos em que há obstáculos entre os veículos, já que a potência do sinal V2V se reduz intensamente com o aumento da distância nesta condição [200, 207].

Outro desafio importante observado em aplicações veiculares, além da dupla seletividade mencionada anteriormente, consiste em aprimorar os modelos de canal para as faixas de frequências adotadas pela rede 6G. Neste quesito, os autores em [208] apresentaram um resumo sobre as pesquisas relacionadas, bem como orientações sobre medidas e diretivas que podem auxiliar no desenvolvimento de modelos de canais para aplicações veiculares em redes B5G e 6G. Os autores destacaram que a modelagem de canal para rede 6G provavelmente será baseado em *Geometry-based Deterministic Models* (GBDMs) e *Geometry-based Stochastic Models* (GBSMs), bem como a combinação destes, conforme desenvolvido pelo IMT-2020 [209].

Um sistema completo para suporte aos veículos autônomos seria capaz de integrar *Road Side Units* (RSUs) e na própria rodovia (*smart road*), beneficiando as redes 6G [206]. Esse trabalho menciona a possibilidade do uso de recursos do sistema para executar funções de comunicação, sensoriamento e inteligência, e apoiar ou complementar funções de mapeamento e localização da rede 6G. Além disso, tal sistema provê recursos de armazenamento temporário de dados, processamento e ampliação da cobertura da rede. Algumas das funções mencionadas serão desempenhadas por VANTs autônomos. Além disso, tanto veículos quanto VANTs autônomos poderão conter superfícies inteligentes em sua estrutura, possibilitando estender sua atuação na rede de forma cooperada com os demais dispositivos móveis e fixos. Em [210], foi realizada uma discussão sobre o conceito e possibilidades da evolução da rodovia inteligente e cita a rede 6G como sendo capaz de suportar e viabilizar aplicações futuras previstas para as rodovias inteligentes.

Como desafios a serem superados relacionadas a aplicação de IRSs em V2X, os autores em [200] destacaram a necessidade de instalação e posicionamento estratégico das superfícies IRS, bem como a necessidade de otimizações relacionadas às reflexões, emprego de diferentes faixas de frequência, além da estimação de canal considerando situações bastante dinâmicas [208]. Por fim, a partir dos trabalhos mencionados, é possível observar a grande diversidade de estudos e aplicações relacionadas a veículos autônomos e transportes inteligentes. Com o advento da rede 6G, estes se beneficiarão das melhorias de precisão e resolução, principalmente, quando associado a sensoriamento, localização e mapeamento.

4.5.2 Aplicações na área de robôs autônomos

A melhora na resolução e precisão nos sistemas de localização e mapeamento, provido pela rede 6G, irá impulsionar o uso de robôs conectados nas mais diversas aplicações. Dentre essas, destacam-se aplicações relacionadas à automação em geral, logística, construção civil [211], ambiente inteligentes (*smart environments concept*) [212], saúde [197], educação [213], segurança [213], e interação homem-robô envolvendo realidade aumentada [214]. As aplicações voltadas para *smart cities*, agricultura e automação industrial serão detalhadas, respectivamente, nas seções 4.6, 4.8 e 4.7.

As aplicações emergentes relacionadas aos robôs conectados são dependentes de um enlace de comunicação robusto, de baixa latência e, em muitos casos, do acesso a informações precisas de localização e mapeamento do ambiente. Com relação à robustez do enlace, os ambientes internos em particular são altamente susceptíveis à disposição dos objetos no espaço. Sendo assim, o estudo em [215] explorou o uso de IRSs para aperfeiçoar a comunicação entre os pontos de acesso e os robôs. Os pesquisadores criaram para um ambiente de testes pré-definido, um mapeamento prévio das condições de potência do sinal e um mapeamento da taxa de comunicação alcançadas para diferentes alocações de recursos realizadas pelo dispositivo de ponto de acesso. O cenário e mapeamento mencionados integram as IRSs e consideram as mudanças de fase do sinal causadas pela mesmas. Os mapas previamente levantados foram empregados nas tomadas de decisão para a definição de rotas do robô, realizadas a partir de processamentos baseados na teoria de grafos, e métodos de bisseção e de aproximação convexa sucessiva [215]. Ainda, o sistema desenvolvido emprega técnicas de NOMA. Entre resultados principais, os autores destacaram que o emprego de IRSs permitiu reduzir os percursos realizados pelo robô e a técnica NOMA permitiu o estabelecimento de enlace com maiores taxas de dados. No contexto de acesso ao meio, observou-se que a técnica NOMA obteve melhor desempenho em relação ao método ortogonal, quando operado em conjunto com as IRSs. Neste caso, a rotação de fase proporcionada pela IRSs foi configurada de forma a reduzir a correlação entre os canais dos usuários, beneficiando a técnica NOMA.

O *Internet of Robotic Things* (IoRT) é um novo conceito de tecnologia que une robótica ao IoT. É uma área em expansão capaz de atender uma grande variedade de aplicações, dentre as quais pode-se destacar fábricas, cidades inteligentes, agricultura, área médica, dentre outras [212,213,216]. Os autores de [216] destacam o suporte de IA para o apoio na execução de tarefas relacionadas ao mapeamento, à localização e à identificação do ambiente por robôs. Em termos da arquitetura da rede IoRT, os autores sugeriram a necessidade de um servidor na nuvem capaz de fornecer modelos e dados de treinamento para redes neurais embarcadas nos robôs, sendo estes a base para o mapeamento do ambiente em que se encontram. A proposta de arquitetura concentrada deverá reduzir a carga computacional executada nos robôs, permitindo, conseqüentemente, otimizar os custos e consumo energético de cada dispositivo. Como potenciais aplicações dos IoRT, [216] cita a possibilidade de uso em situações de resposta à desastres, terremotos e *tsunamis*. Neste caso, conforme melhor detalhado em [217], os robôs poderiam atuar inicialmente no levantamento de informações de mapeamento dos locais dos desastres, alimentando os servidores locais. Estes, por sua vez, poderão interagir com servidores remotos na nuvem, responsáveis por processar tais dados e criar modelos do ambiente baseados em IA, fazendo uso de outros modelos e dados de referência. O modelo criado é então compartilhado com o servidor local que, após testes e validações, é repassado aos robôs em campo para que estes realizem novas ações de aprendizagem e possam tomar decisões adequadas ao ambiente ou à situação. Os autores de [216] citam outros exemplos do uso de IoRT, como na agricultura de precisão, na qual robôs munidos de diferentes sensores fariam a coleta de dados e transmissão dos mesmos para um servidor na nuvem para posterior processamento, conforme apresentado em [218].

Pode-se destacar como desafio das aplicações associadas a robôs, em especial aplicações de IoRT, a dificuldade de integração das informações e dos dispositivos devido à sua quantidade e heterogeneidade [212,213]. Aplicações que contemplam múltiplos robôs e que se são empregadas em ambientes compartilhados com humanos exigem acesso à informações de localização com alta precisão e com baixa latência. Além disso, exigem um aprimorado sistema de gerenciamento e coordenação de trajetórias dos múltiplos robôs, bem como a alta disponibilidade e confiabilidade

da rede de comunicação [213]. Vale destacar que as aplicações associadas a IoRT, por exemplo, processam uma grande quantidade de dados e os robôs normalmente possuem, assim como os dispositivos de IoT, uma reduzida capacidade de processamento, armazenamento de dados e disponibilidade de energia. Devido à tal escassez de recursos, diversas aplicações emergentes consideram o suporte de computação em nuvem. O emprego da computação em nuvem, por um lado, potencializa o desenvolvimento de aplicações mais complexas e também a exploração de IA. Por outro lado, agrega desafios, como o aumento na latência de processamento dos dados, o que pode prejudicar funcionalidades, ou mesmo criar certos riscos de acidentes, em aplicações que demandem tomadas de decisão em tempo real pelos robôs [212, 213]. Adicionalmente, as aplicações envolvendo robôs demandam alta segurança dos dados e da rede de comunicação, a fim de prevenir possíveis invasões e ataques cibernéticos, que podem vir a prejudicar plantas fabris inteiras e até mesmo colocar pessoas em risco [213].

Como evidenciado acima, diversos são os campos de pesquisa e aplicações relacionadas ao uso de robôs autônomos, assim como os desafios associados à implantação e disseminação das mesmas. As melhorias previstas para a rede 6G, especialmente aquelas relacionadas à maior precisão e resolução em sensoriamento, localização e mapeamento, devem potencializar e viabilizar que os robôs possam, cada vez mais, serem empregados em benefício da sociedade, impactando na evolução de diferentes setores.

4.6 Cidades inteligentes

Matheus Sêda Borsato Cunha
matheus.seda@inatel.br

A integração de funcionalidades sensoriamento, localização e mapeamento de ambientes nas redes 6G, devem impactar diretamente nas futuras aplicações de cidades inteligentes ou *Smart Cities*. O termo cidade inteligente se refere a uma cidade que aplica as tecnologias de informação e comunicação de forma inovadora a fim de melhorar a qualidade de vida e tornar mais eficiente a operação e serviços urbanos, incluindo a sustentabilidade [219]. Ou seja, uma cidade inteligente deve ser capaz de analisar com eficiência diferentes requisitos da sociedade e, desta forma, gerenciar e otimizar racionalmente os recursos públicos [198]. Sendo assim, pode-se considerar, para o contexto da rede 6G, que o ecossistema de cidades inteligentes é composto de todo serviço urbano que aplica os conceitos acima, como transporte, saúde, construção civil, agricultura, entre outros.

O ecossistema mencionado deve impactar na rede 6G através da demanda de um alto tráfego de informações. Tráfego esse, gerado por diferentes aplicações relacionadas principalmente à CRAS, Indústria 4.0 e IoT [9]. As aplicações emergentes relacionadas às cidades inteligentes, bem como a evolução das aplicações já existentes, devem demandar maior precisão de localização e posicionamento, bem como maior capacidade de sensoriamento. Os requisitos de localização estimados para as aplicações em *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC) e *Ultra-High Sensing and Localization* (UHSLo) são, por exemplo, da ordem de 1 a 10 cm [122, 220]. Ou seja, a maioria dos serviços de localização atuais, fornecidos por sistemas de GPS, WLAN e redes celulares, não devem ser capazes de atender as demandas previstas para as futuras aplicações urbanas inteligentes e de alta densidade, já que proporcionam uma precisão da ordem de metros [9, 122]. Conforme mencionado, as melhorias de resolução e precisão de sensoriamento e localização previstas para a rede 6G devem impactar e impulsionar as futuras aplicações de cidades inteligentes. Além disso, tem-se a expectativa de que a rede 6G empregue

uma abordagem abrangente e que viabilize a criação de cidades verdadeiramente inteligentes, onde os principais componentes, como serviços públicos, saúde e redes de transporte atuem de forma integrada [198].

Dentre os principais cenários de uso do conceito de cidades inteligentes que devem ser impactadas por melhorias de precisão e resolução de sensoriamento, localização e posicionamento previstos para a rede 6G, pode-se destacar: serviços inteligentes internos e infraestrutura de transporte e de saúde inteligente [1, 9, 122, 198]. As aplicações associadas ao cenário da saúde encontram-se melhor descritas na seção 4.4. As aplicações relacionadas aos cenários de serviços inteligentes internos e infraestrutura de transporte estão detalhadas a seguir. Adicionalmente aos cenários citados, o caso de uso de Gêmeos Digitais pode ser empregado em diferentes situações, impactando especialmente as aplicações de cidades inteligentes.

4.6.1 Serviços inteligentes para ambientes internos

O cenário denominado de serviços inteligentes internos é aplicável à diferentes ambientes que podem, por sua vez, considerar diferentes aplicações. Tarik *et al* [198] nomearam um caso de uso das redes 6G nesse cenário como ambientes domésticos super inteligentes. A evolução das tecnologias associadas ao IoT impacta diretamente em tais cenários. Além disso, tais tecnologias tem sido consideradas como base por diferentes aplicações, sendo associadas à novas terminologias como *Internet of Intelligent Things* (IoIT) [198] e *Internet of Everything* (IoE) [1, 122, 221].

Pesquisas recentes têm sido realizadas considerando outros outros ambientes e casos de uso, além do ambiente doméstico, como, por exemplo, para serviços de navegação interna em shoppings e monitoramento de multidões [9]. Como desafio para a localização em ambientes internos, pode-se destacar a ocorrência de comunicação através de enlaces NLoS, que impacta negativamente na precisão de estimativa de localização. Em [222], os autores destacam vários exemplos de casos de uso de localização interna para mostrar sua importância, discutindo principalmente a localização e o posicionamento de usuários e seus dispositivos. Por exemplo, os sistemas de rastreamento interno, juntamente com o IoT, podem ser explorados para beneficiar a administração de ativos em uma empresa, pois podem permitir que o gerenciamento de estoque e operação sejam otimizados. Em [223], foi abordado o potencial dos sistemas de localização de alta precisão como um fator chave para as aplicações de saúde relacionadas às tecnologias assistivas. As informações de posicionamento precisas podem ser úteis para realizar o monitoramento comportamental, detecção de queda e promover uma assistência em tempo real aos idosos e às pessoas com deficiências, proporcionando mais independência, o que reduz o custo de cuidados.

Os autores de [224] apontam diferentes tipos de aplicações baseadas em localização, nas quais as informações de localização são críticas. Os LBSs estendem as capacidades dos *Geographic Information Systems* (GISs), ou as informações espaciais aos usuários finais, através das redes sem fio ou da Internet. Um alto nível de personalização é alcançado com aplicativos LBS, pois oferecem o contexto e a conectividade necessária para associar dinamicamente a localização de um usuário à informações contextuais sobre os ambientes em que elas se encontram. Um exemplo de aplicativo LBS, são aqueles baseados em navegação pessoal, que podem ser usados para orientar os usuários em ambientes internos até o seu local de interesse.

Além da localização em ambientes internos, o cenário em questão impõe requisitos relacionados à classificação e proteção de informações de privacidade [225]. Pode-se destacar a identificação de qual tipo de informação de localização precisa ser protegida, como sendo um

dos principais desafios para essa aplicação. Isso inclui identificar dispositivos públicos, cujas informações de localização devem ser acessíveis a todos os dispositivos, e os dispositivos pessoais, cujas informações precisam ser protegidas [9].

4.6.2 Infraestrutura de transporte inteligente

O cenário de *Ultra Smart Transport Infrastructure* [198] é tido como um importante cenário no contexto de cidades inteligentes. Nesse cenário, considera-se que a infraestrutura geral de transporte deva ser totalmente autônoma, onde o gerenciamento, segurança e a proteção do sistema devam ser garantidas por sensores e atuadores inteligentes. Como detalhado na seção 4.5, a direção autônoma e as comunicações V2X são vistas como tendências para o desenvolvimento do transporte inteligente, as quais exigem tecnologias de localização avançadas [200]. O mapeamento 3D de alta definição, empregado para construir o modelo do ambiente em tempo real, é fundamental para as comunicações V2V e exige o acesso a informações precisas de distâncias relativas entre o veículo e os obstáculos circunvizinhos. Além de serem projetados para terem alta precisão, os sistemas de localização também devem apresentar ampla cobertura e robustez em cenários altamente móveis. Pode-se destacar como tecnologias promissoras para promover o desenvolvimento desses cenários as tecnologias em THz, comunicações *Orbital Angular Momentum* (OAM) e VLC [9, 198].

Nallaperuma *et al.* [226] propõe uma plataforma de gerenciamento inteligente de tráfego expansiva, também denominada de *Smart Traffic Management Platform* (STMP), para ser aplicada no conceito de *Intelligent Transport Systems* (ITSs). A referida plataforma é baseada em três tipos de aprendizados de inteligência artificial: aprendizado de máquina incremental *on-line* não supervisionado, aprendizado profundo e aprendizado por reforço profundo. A adoção dos três aprendizados visa compensar as limitações das técnicas de IA existentes quando operam isoladamente. O STMP faz a integração dos fluxos de *big data* heterogêneos, como aqueles provenientes de dispositivos IoT, de sensores inteligentes e de mídia social, com o objetivo de detectar mudanças nas distribuições de dados entre eventos de tráfego recorrentes e não recorrentes, estabelecer previsões de fluxo de tráfego, realizar análise da percepção dos viajantes, bem como viabilizar tomadas decisões de controle de tráfego mais assertivas. A plataforma STMP proposta foi avaliada através de uma série de experimentos baseados em dados de sensores Bluetooth e dados de mídia social de uma rede de estradas australianas. Os resultados obtidos, segundo os autores, foram satisfatórios em relação aos objetivos inicialmente estabelecidos [226].

Os *Electric Vehicleless* (EVs) tem se destacado como uma nova opção de transporte e proporcionam grandes oportunidades a serem exploradas pelas cidades inteligentes. Em vista desta oportunidade, em [227], os autores propuseram um mecanismo *market-based* para auxiliar no planejamento da infraestrutura de carregamento de EV. Os autores propõe a localização dessa infraestrutura por demanda de fluxo de veículos e localização por demanda de locais estratégicos para recarga dos veículos. Algoritmos de IA baseados em aprendizado profundo para desenvolver um diagrama de previsão e otimização a fim de prever o fluxo de tráfego de longo prazo e otimizar a estratégia individual do investimento em infraestrutura. A técnica de aprendizado profundo empregada envolveu uma arquitetura *encoder-decoder* baseada em *Graph Convolutional Network* (GCN) de multirrelação, resultando em uma melhor precisão na previsão do fluxo de tráfego de múltiplas etapas. Por fim, um *Cournot competition model* é aplicado para alcançar a melhor estratégia de alocação de orçamento em cada zona da cidade em relação a diferentes provedores de serviço [227].

Em [228] são analisadas questões de vulnerabilidades inerentes à privacidade e problemas de segurança quanto ao uso de Internet e que impedem a implantação mais rápida das aplicações de *Cooperative Intelligent Transport Systems* (C-ITSs). Vale destacar que nessa infraestrutura, os *Autonomous Vehicleless* (AVs), comunicam entre si e também com *Traffic Command Centres* (TCCs) e *Road Side Units* (RSUs). Os autores do trabalho em questão propõe uma estrutura segura do tipo *privacy-preserving-based*, a qual oferece dois níveis de segurança e privacidade à uma aplicação de C-ITS. Estes níveis empregam módulos de *blockchain* e aprendizado profundo. O módulo *blockchain* foi projetado para comunicação segura entre os elementos do C-ITS. Uma técnica de *enhanced Proof of Work* (ePoW), baseada em contrato inteligente, foi também aplicada para verificar a integridade dos dados. O módulo de aprendizado profundo foi construído com base na técnica *Long-Short Term Memory-AutoEncoder* (LSTM-AE) para codificação dos dados, a fim de evitar ataques de interferência. Por fim, uma *Attention-based Recurrent Neural Network* (A-RRN), treinada por um algoritmo *Backpropagation Through Time* (BPTT) truncado, foi proposta para reconhecer eventos intrusivos na infraestrutura C-ITS. Além disso, a A-RRN foi validada e testada através de dois *datasets* públicos disponíveis, ToN-IoT e CICIDS-2017 [229, 230]. Os resultados obtidos pelos autores de [228] demonstram que a estrutura proposta é eficaz quando comparada com técnicas de última geração aplicadas em sistemas *blockchain* e *non-blockchain* [228].

4.6.3 Gêmeos Digitais

Gêmeo Digital é um conceito promissor que tem potencial de uso em diferentes cenários de cidades inteligentes. Este conceito tem sido classificado como disruptivo e deve impactar na futura gestão de sistemas complexos [67, 231]. Os gêmeos digitais são criados como uma representação virtual dos mundos físicos em cada instante temporal e espacial recebendo dados do ambiente real de forma constante. Porém, diferente de alguns conceitos que podem ser confundidos com os gêmeos digitais, como modelo digital e sombra digital, essa tecnologia estabelece uma conexão bidirecional e automática entre o sistema real e o virtual. Desta forma, o gêmeo digital permite simular condições de desempenho e funcionalidades de um sistema, atualizando os parâmetros no mundo real e sendo realimentado em tempo real, a partir da análise dos dados coletados [232]. Desta forma, o mapeamento e sensoriamento exato para essa técnica se mostram fundamentais para obter e fornecer atualizações precisas e síncronas do mundo físico e para o mundo físico. A inclusão de funcionalidades de sensoriamento, mapeamento e localização na Rede 6G pode ser exploradas para propiciar e viabilizar a evolução e disseminação de tecnologias associadas aos gêmeos digitais.

A proliferação de dispositivos equipados com recursos de posicionamento propiciou o desenvolvimento de incontáveis aplicativos de celular baseados em localização. Em [233], por exemplo, os autores apresentaram uma estrutura para rastrear a mobilidade dos veículos de passageiros e de transporte público. Os autores propuseram a utilização de gêmeos digitais para criar representações virtuais de *smartphones* de passageiros e de sistemas de bordo de veículos de transporte públicos. Tecnologias de IoT foram também empregadas para a coleta, entrega, processamento e apresentação dos dados relacionados à mobilidade. Tais dados, por sua vez, são processados por aplicativos *Mobility as a Service* (MaaS). Os aplicativos MaaS rastreiam a mobilidade dos passageiros que precisam completar suas viagens dinamicamente por meio de soluções de diferentes agências de viagens e/ou diferentes meios de transporte. A implementação de uma prova de conceito permitiu validar a viabilidade proposta e forneceu percepções úteis sobre eficiência do *Constrained Application Protocol* (CoAP) e do *Message*

Queue Telemetry Transport (MQTT). Vale destacar que estes protocolos são candidatos para as interações de dispositivos físicos com os gêmeos digitais correspondentes [233].

O trabalho [234] propõe uma plataforma *Digital Twin Box* (DTB) para geminação digital de rodovias, visando qualificar os veículos autônomos como um componente crucial da mobilidade inteligente. A abordagem consistiu na implantação de várias DTBs ao longo das estradas, sendo que cada DTB é composta por uma câmera 360°, dispositivos baseados em GPS e dispositivos IoT para medições ambientais. A proposta contempla a detecção e reconhecimento de objetos a partir de *streams* de vídeo. O banco de dados das informações identificadas pode ser explorado por muitos outros serviços, como turismo, seguros e segurança nacional. O processo de reconhecimento e de rastreamento de objetos também foi empregado para veículos e pessoas. Estes processos identificam, por exemplo, quando e onde as pessoas e veículos selecionados apareceram, e realiza ainda uma associação destas informações com dados originados de dispositivos IoT [234].

Vale destacar que os gêmeos digitais também são considerados na área da saúde. Os estudos relacionados, entretanto, ainda estão em fases iniciais, conforme destacado em [235]. Gêmeos digitais podem ser usados no gerenciamento de leitos, em enfermarias de grande escala e gerenciamento de hospitais, além de serem aplicáveis no planejamento e execução de procedimentos cirúrgicos, bem como a geminação do ser humano, a qual propiciaria uma forma de análise do corpo em tempo real [235–237]. Uma futura possibilidade de aplicação consiste em simular os efeitos de certas drogas no corpo humano [232]. Os autores de [238] propõe uma estrutura para a utilização de gêmeo digital para auxiliar no monitoramento, planejamento e execução inteligentes de procedimentos médicos.

Por fim, observa-se que os gêmeos digitais têm evoluído e diversas publicações científicas relacionadas tem sido publicadas recentemente sobre este tema. Uma boa parte dessas pesquisas estão voltadas ao setor industrial, mas também há pesquisas no âmbito de cidades inteligentes e da saúde. No geral, ainda faltam definições claras e padronizações relacionadas ao conceito de gêmeo digital. Outro desafio consiste no domínio de técnicas que permitam o aumento da escala digital para obtenção de gêmeos com dimensões maiores. Porém, é notável o potencial dos gêmeos digitais aplicados a sistemas de cidades inteligentes, como gerenciamento de tráfego e saúde inteligente, apesar das pesquisas ainda serem limitadas e se encontrarem em fase inicial [232]. Conforme mencionado, a introdução das funcionalidades de sensoriamento, mapeamento e localização nas redes 6G é um fator fundamental para que os gêmeos digitais possam se tornar uma realidade.

4.7 Automação industrial

Diego Gabriel Soares Pivoto, Matheus Sêda Borsato Cunha
 diego.gabriel@inatel.br, matheus.seda@inatel.br

Automação industrial é a aplicação de uma gama de tecnologias de informação para lidar com diferentes processos e máquinas em uma indústria, com a finalidade de substituir o ser humano em atividades corriqueiras de produção. No domínio da industrialização, pode-se dizer que automação se refere à segunda etapa além da mecanização. A intervenção humana é reduzida por critérios predeterminados e os processos passam a ser controlados processos com o auxílio de meios automatizados por meio de sistemas de controle fornecendo uma resposta esperada ao processo [239]. As redes 5G expandiram os serviços de comunicação móvel além da telefonia e banda larga móveis, incluindo novos cenários de aplicações, os quais incluem veículos, redes, cidades e fábricas inteligentes. Embora a rede 5G apresente melhorias significativas

em relação às redes móveis anteriores, esta não será capaz atender às demandas de futuros sistemas inteligentes e de automação, devido ao rápido crescimento dos sistemas automatizados e centrados em dados [240]. Em vista disso, um dos possíveis cenários de aplicação para as redes 6G é oferecer suporte contínuo para aplicações em indústrias verticais, incluindo automação de fábricas e edifícios, manufatura, *e-health*, transporte, agricultura, vigilância e rede inteligente [241]. Essas aplicações são vistas como essenciais para a Indústria 4.0, a qual tem como objetivo grandes melhorias em futuras fábricas inteligentes onde será incluído maior flexibilidade, versatilidade, usabilidade e eficiência nos processos fabris. O suporte à IoT juntamente com o atendimento de requisitos, como taxa de tráfego de dados de 1-20 Gbit/s, densidade de conexão entre dispositivos na ordem de 10^4 conexões/km²; confiabilidade de 99,999%, vida útil da bateria de 10 anos, latência de 1-10 ms, elevada privacidade e segurança e maior precisão de localização e posicionamento são fundamentais para manufatura industrial e para fornecer integração contínua em todas as camadas de automação [239,240]. Recentemente, discussões para estabelecer o conceito de Indústria 5.0 foram iniciadas. Vários tópicos ainda estão em análise, porém, o que se pode afirmar é que as tecnologias habilitadoras para a Indústria 5.0 serão um conjunto de sistemas complexos que serão combinados para aumentar sua efetividade a fim de atender as futuras demandas. Dentre as diversas tecnologias apontadas pode-se destacar: a interação homem-máquina individualizada; gêmeos digitais e simulação; inteligência artificial; tecnologias para eficiência energética, energias renováveis, armazenamento e autonomia; entre outras [1,242].

No contexto das áreas-chave para as redes 6G, a localização de alta exatidão é um dos requisitos críticos para automação industrial, a qual é um cenário de uso promissor da futura rede. Os GNSSs atuais podem fornecer localização altamente precisa em ambientes externos considerando que haja boa visibilidade para os satélites do local. Porém em muitos dos casos de automação, as aplicações são em ambientes internos [9,67,122]. As aplicações voltadas para a automação industrial podem ser divididas em dois cenários, os quais podem ser nomeados como robótica conectada e sistemas autônomos e fábrica automática. O primeiro cenário, conforme abordado com mais detalhes na seção 4.5, se refere ao avanço das pesquisas em robótica e em veículos automatizados e conectados. A rede 6G promoverá a implantação real dos carros autônomos, que determinarão seu posicionamento combinando uma variedade de métodos de sensoriamento, como LiDAR, radar, GPS, sonar, odometria e unidades de medição inercial. Os sistemas VANTs descritos na seção 3.4, são um exemplo de aplicação de CRAS [240]. O segundo cenário diz respeito aos processos de manufatura baseados em sistemas *cyber*-físicos, que usam automatização e troca de dados, advindos da revolução da Indústria 4.0 devido à rede 5G. A visão é que a rede 6G forneça uma automação completa às indústrias baseada em IA. A fábrica automática exigirá informações de localização altamente precisas, com latência extremamente baixa e de alta confiabilidade dos dispositivos IoT para permitir uma cooperação eficaz entre eles e construir enlaces de comunicação *End-to-End* (E2E) [9,240]. Dentro do contexto de localização interna no cenário de automação industrial, além de fábricas automáticas e processos de manufatura abordados acima, diversos trabalhos têm sido feitos a fim de aumentar a confiabilidade das redes industriais e, conseqüentemente, atender aos requisitos impostos às redes 6G.

Considerando a grande demanda por soluções capazes de monitorar a área de trabalho e processos de montagem em fábricas modernas, em [243], Lipka *et al.* destacam o sistema de localização por micro-ondas como uma promissora solução sem fio. Desta forma, o trabalho demonstra o uso de um radar de onda contínua modulada na frequência de 24 GHz. Os experimentos foram realizados em um cenário de localização interna de curto alcance, avaliados

com a referência de alta precisão por um braço robótico. Também foi empregado um *Extended Kalman Filter* (EKF) e apenas medidas de AoA foram avaliadas. A abordagem viabilizou a localização do *transponder* a partir de medições de ângulo realizadas nos diversos canais de recepção das ERBs fixas, reduzindo a influência de pontos fora da curva de medidas e o esforço de sincronização para o sistema de radar.

Abordando o tema de sistemas de gestão inteligente de energia no contexto de automação industrial, em [244], Ke *et al.* abordaram um sistema de localização e posicionamento interno para gerenciamento de energia de *Smart Homes*. Para isso, foi proposto um *framework* focado em *Bluetooth Low Energy* (BLE) e baseado em *beacon*, para detectar a localização do usuário e realizar o gerenciamento de energia em ambientes internos através de um aplicativo de dispositivo móvel. O projeto também implementa um algoritmo para reduzir o erro de posicionamento. Dentre outros estudos abordados, pode-se citar algoritmos de posicionamento e localização, incluindo filtros de baixa complexidade que podem ser empregados pelo método de posicionamento [245].

Em [246] os autores propõem um sistema de localização com precisão na faixa de centímetros, baseada no uso de filtragem do tipo *Holographic Extended Kalman filter* (HEKF), visando o rastreamento de objetos móveis e trabalhadores dentro das fábricas. O filtro foi avaliado com um sistema de onda contínua modulado na frequência de 24 GHz. Os resultados de análises permitiram aos autores concluir que a proposta proporciona uma boa precisão de localização, podendo ser considerada uma alternativa interessante para sistemas de automação de processos de logística e indústrias modernas.

Campos *et al.* desenvolveram em [247] um sistema de localização *lighthouse* de redes de sensores sem fio limitada por latência para tarefas de automação industrial de alta-confiabilidade. O projeto é composto por um sistema de controle de uma esteira para um veículo transportador contendo um nó sensor sem fio auto-localizável. O nó, por sua vez, consiste de um microprocessador *Advanced RISC Machine* (ARM) *Cortex-M3*, um transceptor 802.15.4, uma unidade de medida inercial e um fotodiodo infravermelho, que permite a auto-localização do nó sem fio usando um sistema de localização de alta precisão de baixo custo e recursos limitados, conhecido como *lighthouse*. Assim sendo, o veículo transportador move-se pela esteira, enviando um sinal sem fio a um conjunto de nós receptores ligados ao motor da mesma. Um EKF também foi inserido no nó sensor sem fio do veículo transportador para estimar a sua posição e velocidade e os resultados mostraram uma latência de 3 ms, além de identificar que a implementação não tem medições discrepantes fora da faixa de erro de ± 1 mm quando posicionado a 3 m de distância da esteira. Também pôde-se observar através do EKF, que o nó sensor é capaz de estimar sua posição ao longo da esteira quando obstruído da estação base do sistema *lighthouse*. Assim sendo, experimentos mostraram um desvio padrão de 0,875 mm após 10 cm de obstrução, em comparação com um desvio padrão de 0,109 mm da estimativa da posição quando não obstruída.

Visando o planejamento e controle no ambiente de manufatura dinâmico, Huang *et al.* desenvolveram, em [248], uma aplicação de um sistema multimodelo de aprendizagem autônoma para localização de itens em um *rack* de armazenamento de um armazém industrial. O rastreamento da localização dos itens do *rack* foram realizados empregando RFID passivos. Além disso, um modelo preditivo para aplicação de localização foi apresentado para solucionar problemas causados por incertezas do fluxo de dados do sensor. Então, o sistema multimodelo de aprendizagem autônoma foi usado para construir um modelo de localização *online*, que é atualizado usando o fluxo de dados do sensor RFID passivo, cujos sinais são capturados constantemente. Os resultados mostraram, segundo os autores, que a aplicação é eficiente e pode

ser usada para otimizar o gerenciamento de *racks* de armazenamentos industriais.

Bai *et al.* apresentaram, em [249], um sistema de localização de um robô móvel em ambientes industriais considerando canais NLoS, além de novas estratégias de processamento para solucionar problemas relacionados ao tamanho de possíveis obstáculos capazes de interferir nos requisitos de posicionamento. Também foi implementado um *Particle Filter* (PF) aprimorado baseado em um *Genetic Algorithm* (GA), de modo que o algoritmo melhore o processo de amostragem para que o filtro supere as degradações que possam estar presentes nas amostras do sinal, enquanto reduz a complexidade computacional. Para avaliar a eficácia do algoritmo, diversos experimentos e simulações foram realizados e os resultados obtidos mostraram que o método proposto obteve melhor precisão do que os métodos tradicionais. Além disso é possível realizar o posicionamento em tempo real, preciso e estável de robôs móveis em diferentes tipos de canais NLoS.

Baseado na análise de trabalhos recentes relacionados ao contexto de localização no cenário fabril, pode-se concluir que existe uma grande preocupação por parte da comunidade em otimizar o sensoriamento dos sistemas de automação industrial. Dessa forma, diversas abordagens, métodos e tecnologias vêm sendo aplicadas para reduzir a latência e o erro de posicionamento dos sistemas usados em manufatura e demais setores automatizados, podendo atender aos requisitos de redes futuras para localização e mapeamento. As abordagens consideradas melhoram a resolução e precisão no sensoriamento, mapeamento de ambientes e localização que serão incorporadas nas redes 6G, indo de encontro às demandas das aplicações industriais.

4.8 Aplicações do agronegócio

Juliano Silveira Ferreira
silveira@inatel.br

O agronegócio é um setor de grande importância para a economia nacional. Avanços nesse setor impactam diretamente na preservação do meio ambiente e no desenvolvimento da nossa sociedade. Nas última décadas, a evolução de técnicas associadas à automação, mecanização, armazenamento e transporte permitiram aumentar a qualidade e a eficiência da produção de alimentos. Entre 1961 e 2007, por exemplo, estima-se que o rendimento das colheitas mundiais aumentaram em 77% [250]. A previsão para os próximos 30 anos é de um crescimento de 50 [251] a 70% [252] na produtividade de produtos agrários. No Brasil, o agronegócio é responsável por cerca de 26,6% do PIB nacional de 2020 ou aproximadamente R\$ 2 trilhões [253]. Neste contexto, a adoção de soluções tecnológicas, como IoT, no ambiente rural permitirá aumentar a produtividade das colheitas e um ganho econômico estimado de US\$ 61 a US\$ 362 bilhões em 2025 [254].

As melhorias em relação ao sensoriamento, mapeamento e localização previstos para a rede 6G deverão auxiliar em diversas aplicações do agronegócio como, por exemplo, na agricultura de precisão. A agricultura de precisão refere-se ao preciso monitoramento e controle do processo de produção agrícola, que faz uso integrado de informações e tecnologias para gerenciar variabilidades espaciais e temporais das áreas de cultivo. Variabilidades estas relacionadas principalmente ao solo, atmosfera e plantas, e que influenciam na produtividade e eficiência do uso de recursos. As variabilidades espaciais e temporais consideradas, bem como as particularidades de cada área de cultivo, podem ser mapeadas e utilizadas para identificar quais insumos, pesticidas ou fertilizantes devem ser aplicados em cada área do cultivo, em quais quantidades e instantes de tempo. Neste contexto, tratores e máquinas agrícolas podem ser programados para

aplicação destes insumos de acordo com coordenadas de geolocalização. Os VANTs, a partir de tecnologias com captura de imagens por câmeras multiespectrais, poderão ser utilizados para mapear de diversas áreas, acompanhar a evolução das lavouras e verificar as necessidades hídricas. Um outro conceito, que vai além da agricultura de precisão, é a agricultura inteligente que se refere ao gerenciamento inteligente de informações para orientar tomada de decisões, realizar tarefas e controlar processos automatizados em atividades agrícolas. Tais informações envolvem o monitoramento em tempo real de eventos associados a um sistema com inteligência que auxilie na tomada de decisões e reorganização dinâmicas de tarefas em situações de mudanças climáticas ou detecção de pragas e doenças, por exemplo. A agricultura inteligente também se beneficiará da integração de funcionalidades de sensoriamento, mapeamento e localização previstos para a rede 6G.

Recentemente, diversas pesquisas têm sido realizadas com relação a melhoria do processo de mapeamento e localização no ambiente rural. O estudo em [255] apresenta uma coletânea de artigos recentes relacionados ao mapeamento e localização de robôs para aplicações na agricultura e em ambientes florestais. Os autores destacaram que os sistemas de localização baseados em GPS são comumente utilizados em aplicações na agricultura, porém, em muitos ambientes rurais e florestais não se tem acesso ao sinal do satélite com boa qualidade e a precisão de localização alcançada é comprometida. Ainda, foi evidenciado que poucos métodos proporcionam disponibilidade e precisão nesses ambientes. Algumas alternativas tecnológicas promissoras são as soluções baseadas em SLAM e odometria visual. Um estudo reportado em [255] propôs um sistema capaz de gerar mapas omnidirecionais baseados em SLAM em plantações com parreiras, com o auxílio de sensores LiDAR 3D e câmera estéreo. Por fim, os autores de [255] concluíram que as técnicas de mapeamento topológico e semântico, associado a identificação e reconhecimento de objetos, bem como de localização 3D, aplicadas comumente em outras áreas, são pouco consideradas para aplicações rurais e florestais, e destacaram a necessidade de exploração do tema.

Em [256], foi proposta uma plataforma de simulação de robô para atuar em agricultura de precisão. O sistema realiza a navegação de forma autônoma em linhas de cultivo de algodão e promove o sensoriamento fenotípico da plantação, informando dados de altura e volume. A proposta em questão explora técnicas de LiDAR 2D tanto para a navegação quanto para o sensoriamento fenotípico. Sua simulação foi realizada considerando o *framework open source* Gazebo [257]. O sistema de navegação proposto, que emprega de maneira híbrida o GPS e a LiDAR, alcançou um erro médio quadrático da ordem de 0,2% em relação a um trajeto ideal para simular um cenário classificado como complexo. Com relação as estimativas de volume e altura das plantas, os ajustes nas configurações de LiDAR propostos permitiram obter resultados com erros da ordem de 6,6% e 4%, que são resultados comparáveis com outros sistemas LiDAR. Os autores destacam, entretanto, que a plataforma de simulação proposta, bem como as parametrizações empregadas quanto ao sensoriamento baseado em LiDAR 2D, podem servir de referência para outras implementações relacionadas à agricultura de precisão.

Outro estudo, apresentado em [258], propôs um algoritmo baseado em IA que permite localizar robôs aplicados à agricultura de precisão. O algoritmo proposto considera o emprego de câmeras e sensores LiDAR de baixo custo para identificar a localização do robô relativa ao sulco de plantações, levando em consideração diferentes estágios da cultura (crescimento inicial ou tardio). O algoritmo em questão conta com processamentos de filtragem adaptativa de imagens associados à regressão linear. Os autores destacaram que a precisão da localização proporcionada pelo algoritmo se aproxima da precisão ideal esperada de um sistema de localização em tempo real baseado em tecnologia *Real Time Kinematic* (RTK)-GPS, cujo erro esperado é de

2 cm (sendo este dificilmente alcançado em aplicações práticas para esta última tecnologia). Entre as vantagens observadas na solução, destacam-se a independência do estabelecimento de comunicação com satélites, não sendo necessário fazer o levantamento topográfico avançado da área em análise.

Algoritmos para a geração de mapas 3D de ambientes rurais a partir de robôs autônomos, que exploram SLAM e dispositivos de IoT, foram propostos em [259]. Na arquitetura apresentada, os robôs realizam a captura das imagens que, por sua vez, são transmitidas para nós locais. Estes últimos realizam o processamento inicial das imagens e criam um mapa com base nas informações coletadas dos diferentes nós. As informações coletadas pelos nós são transmitidas para um servidor em nuvem, que é responsável por processamentos complementares mais complexos, bem como pelo gerenciamento de todas as informações.

Os autores de [260] propuseram um método de navegação e localização independentes do GPS a ser utilizado em ambientes florestais baseado em sensoriamento LiDAR 3D e triangulação de Delaunay. O método proposto realiza a estimação da localização a partir da combinação de dois conjuntos de informações de triangulação distintos. Um conjunto de informações de triangulação é obtido em tempo real (*online*), a partir dos dados capturados por sensores LiDAR instalados no maquinário ou robô autônomo. O segundo conjunto de dados de triangulação é baseado em um mapa que fora previamente capturado e processado (*offline*). O método emprega a maximização de similaridade triangular, baseada no posicionamento dos troncos das árvores, para estimar a posição atual do equipamento autônomo. A partir de experimentos, os autores concluíram que o método proposto apresenta precisão de localização em tempo real na ordem de 12 cm, considerando velocidade de deslocamento de até 0,5 m/s. Segundo os autores, a precisão e velocidade mencionadas são adequadas para operações florestais envolvendo maquinários de coleta e transporte de madeira.

Os VANTs podem ser utilizados de diferentes formas em aplicações rurais contemplando o monitoramento geral do campo, das culturas, dos sistemas de irrigação, do posicionamento dos animais, da polinização artificial, e a agricultura de precisão, podendo integrar diferentes tipos de sensores, incluindo dispositivos IoT instalados no solo [261]. Os VANTs podem atuar também como estações repetidoras para prover suporte à sistemas de comunicação e localização em sistemas de fazenda inteligentes e agricultura de precisão, conforme destacado em [262]. Neste caso, os VANTs podem ser explorados para viabilizar a comunicação em altas taxas e auxiliar na localização de maquinários, veículos e robôs autônomos que se encontrem em campo. A transmissão em alta taxa pode ser empregada para viabilizar a transferência de imagens e vídeos captados a partir de câmeras convencionais ou multiespectrais instaladas no referido equipamento móvel. Neste contexto, os autores em [262] propuseram um algoritmo que permite estimar a localização de veículos autônomos em um ambiente desconhecido a partir da cooperação de um conjunto de VANTs. O algoritmo proposto emprega IA (*reinforcement learning*) para definir a configuração espacial dos VANTs, de forma que estes possam localizar o veículo utilizando como referência principal o RSS recebido do veículo como referência principal. A análise numérica indicou que o algoritmo proporcionou RMSE de localização inferior a 1 m.

O sensoriamento por imagens e espectrometria em THz tem sido empregada em diversas pesquisas voltadas à agricultura contemplando a identificação de estresse hídrico, caracterização de plantas, identificação de patógenos, análises quimiométricas e identificação de resíduos químicos em produtos agrícolas, como fungicidas e pesticidas. Um melhor detalhamento destas aplicações se encontram detalhadas na seção 4.1. Conforme mencionado na seção 2.6, existem diversos modelos já conhecidos que combinam a espectroscopia na faixa THz com métodos quimiométricos aplicados nas áreas alimentícia e da agricultura [76]. Há também diversos banco

de dados públicos que compartilham informações de *datasets* de imagens que possam servir de base para a implementação de aplicações associadas ao sensoriamento e à computação visual, incluindo treinamento de algoritmos de inteligência artificial, aplicáveis à agricultura de precisão. O trabalho [263], por exemplo, apresenta um conjunto de 34 bancos de imagens públicos de diferentes culturas que podem ser empregados como referência para este fim.

O agronegócio se apresenta como um importante setor da economia com impacto social e possui um grande potencial de crescimento graças à exploração de recursos tecnológicos. Diversas são as aplicações neste cenário que dependem de uma alta precisão e disponibilidade de informações de sensoriamento, localização e mapeamento, como àquelas relacionadas à agricultura de precisão. Estas aplicações podem, por sua vez, fazer uso de maquinários e robôs autônomos, bem como de diversos tipos de sensoriamento. As tecnologias candidatas a compor a rede 6G deverão propiciar que as aplicações voltadas para o agronegócio, para os ambientes florestais e para áreas remotas possam evoluir e trazer benefícios sociais, econômicos e ambientais para o país.

4.9 Transferência de energia via RF

Juliano Silveira Ferreira
silveira@inatel.br

Entre os requisitos da próxima geração de comunicação, a eficiência energética é considerada um dos pilares fundamentais para garantir sustentabilidade em todas as instâncias da rede. Neste contexto, a evolução dos circuitos e demais tecnologias deverão propiciar uma redução drástica do consumo energético de forma a assegurar 20 anos de vida útil para as baterias. Em aplicações de IoT, a eficiência energética vem sendo investigada para o desenvolvimento de dispositivos com baixíssimo ou até nenhum consumo de energia (*zero-energy*) [264]. Os dispositivos com “zero” consumo de energia farão uso de tecnologias de *Energy Harvesting* (EH) para recargar suas baterias e garantir autonomia energética. As tecnologias emergentes de EH captam energia pelo ambiente a partir de recursos eólicos e solares. A geração de energia a partir do sinal de RF, denominado como *Wireless Energy Transfer* (WET), é uma tecnologia em evolução e pode ser considerada como uma opção interessante para o fornecimento de energia de dispositivos IoT com “zero” consumo energético. Esta tecnologia consiste em reutilizar parte ou a totalidade dos circuitos de RF empregados na comunicação para a obtenção de energia do dispositivo em questão [264]. O conceito *zero-energy* pode ser aplicado em diversos dispositivos que atuam em *smart grid*, monitoramento, controle de sistemas, transporte, saúde e agricultura de precisão.

Em relação às pesquisas na área de WET, o estudo em [265] apresentou uma releitura de trabalhos relacionados à transferência de energia em conjunto com transferência de dados, denominada como *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer* (SWIPT), na faixa de mmWave. Neste trabalho, foram apresentadas diferentes abordagens técnicas para a implementação de SWIPT, destacando-se, entre elas, a possibilidade do uso de antenas e frequências diferentes para a transferência de energia e de dados. Os autores também mencionaram uma investigação relativa aos algoritmos de alocação de potência e de recursos na grade tempo-frequência aplicados à SWIPT operando em 25 GHz, que visam maximizar a energia mínima transferida. Outra investigação apresentada considera MIMO e NOMA em aplicações de SWIPT. Neste caso, foi proposto um método para otimizar a decodificação de informações e de transferência de energia considerando o processamento do sinal de múltiplos usuários. Ainda,

os autores de [265] destacaram também os desafios causados pelo uso da faixa de mmWave em aplicações WET, como a maior perda de propagação, bloqueio de sinal e necessidade de alta precisão no direcionamento dos feixes.

Em [266] foi proposta uma metodologia de projeto para orientar o desenvolvimento de soluções de IoT que explorem WET. Os autores deste trabalho destacaram a necessidade de uma melhor padronização para implementações de WET, como a definição de frequências reservadas para tal, e destacaram também a necessidade de maiores investigações com relação aos possíveis efeitos das ondas eletromagnéticas na saúde, já que estas são potencializados nas aplicações com WET. Visando reduzir esta possibilidade de impacto na saúde humana, os autores de [267] propuseram algoritmos de direcionamento de feixes. Tais algoritmos buscam maximizar a transmissão de energia para um determinado alvo, limitando a energia transferida para áreas cuja a presença humana foi detectada a partir de sensoriamento por câmeras. Os algoritmos propostos se baseiam em conceitos de *Quadratically Constrained Quadratic Optimization Program* (QCQP).

Em [268], os autores avaliaram a alimentação via RF de dispositivos de IoT em ambientes rurais por meio de VANTs. Neste caso, o sistema foi avaliado operando com *beamforming*, frequências de 400 e 900 MHz e 2,5 GHz, e aeronaves sobrevoando a 5 e 10 m acima do solo. Os autores destacaram a importância de se otimizar a trajetória da aeronave, que depende da estimação precisa tanto da localização da aeronave quanto dos dispositivos de IoT, para reduzir o consumo energético e obter maior efetividade na comunicação.

Em relação à implementação de dispositivos de RF, os autores em [269] propuseram um retificador capaz de gerar tensão contínua a partir de sinal de RF em mmWave. A solução emprega um casador de impedâncias multibanda, implementado em substrato Rogers 5880, que possui uma dimensão mecânica reduzida e opera em 24, 28 e 38 GHz. A eficiência máxima obtida para as frequências citadas foi de 44,3%, 42,7% e 43,6%, respectivamente, para uma potência recebida de 15,6 dBm. Os autores destacaram que a solução proposta pode ser empregada em dispositivos de baixa potência e sem bateria.

A rede 6G possivelmente potencializará o desenvolvimento de soluções com WET, devido ao mapeamento preciso de ambientes, à localização de dispositivos e às superfícies inteligentes. Além disso, a rede 6G pode ser concebida tanto para a transferência de informação quanto de energia [270]. O direcionamento da transmissão em feixes estreitos, bem como a combinação de diferentes feixes, pode ser também explorada para aumentar a eficiência do processo de transferência de energia via RF para um determinado receptor. Neste caso, o dispositivo alimentado via RF transmitirá um sinal de referência para viabilizar que as estações fornecedoras de energia possam estimar o CSI e a localização do dispositivo no ambiente. A partir dessas informações, a gestão energética é efetuada a partir do direcionamento de feixes, explorando arranjos de antenas MIMO ou superfícies inteligentes previamente mapeadas e localizadas no ambiente [264]. O sinal de referência mencionado deverá ser cuidadosamente especificado visando minimizar o consumo de energia do dispositivo alimentado por RF. Vale destacar que, no caso de um sistema MIMO e mMIMO, o número de antenas limitará a quantidade máxima de direções e, conseqüentemente, de dispositivos, para os quais poderão ser direcionados simultaneamente os feixes. Vale ressaltar, conforme já mencionado, que questões inerentes ao uso de frequências elevadas, como atenuação e bloqueio de sinal, bem como sua alta direcionalidade, agregam desafios à implementação de WET.

4.10 Aplicações avançadas de interação remota

Daniely Gomes Silva
daniely@inatel.br

A constante evolução das diferentes tecnologias de sensoriamento, processamento e projeção de imagens, associada às tecnologias consideradas como habilitadoras para a rede 6G, podem viabilizar diversas aplicações emergentes que, por sua vez, permitem explorar novas dimensões e conceitos associados à comunicação. À seguir, estão apresentadas as aplicações de telepresença holográfica e comunicações táteis, consideradas como aplicações avançadas de interação remota e que exploram especialmente informações sensoriais e de condições do ambiente. Tais aplicações possuem potencial de serem viabilizadas pela rede 6G.

4.10.1 Telepresença holográfica

A propensão humana para se comunicar remotamente com alta fidelidade aumentará significativamente os desafios de conectividade nas futuras redes de comunicações. A concepção da rede 6G deve ser orientada para o atendimento de diferentes requisitos relacionados, por exemplo, à integração de forma eficiente das comunicações terrestres, aéreas e marítimas. Além disso, tem-se a expectativa de que a futura rede seja capaz de viabilizar vazão de dados significativamente altas, latências insignificantes, confiabilidade e segurança elevadas, suportando um número massivo de dispositivos. Diferentes tecnologias serão necessárias para permitir que a rede atenda de maneira adequada às expectativas inicialmente estabelecidas e, como consequência, diversas aplicações emergentes devem ser viabilizadas [35]. Dentre essas aplicações, destaca-se a telepresença holográfica [2].

A telepresença holográfica baseia-se no uso de câmeras multivisão que fornecem as imagens necessárias para esse tipo de aplicação, necessitando de taxas extremamente elevadas [271]. Esse tipo de comunicação captura a imagem tridimensional completa de uma pessoa ou objeto e projeta essa imagem em tempo real e com movimento total, apresentando um alto nível de realismo quando comparado à presença física [35]. O processo de geração da imagem holográfica baseia-se em algumas etapas. Em um primeiro estágio, imagens de pessoas e objetos, presentes em um ambiente, são capturadas. Em seguida, essas imagens são compactadas e transmitidas pela rede banda larga. Posteriormente, a informação transmitida é descomprimida no receptor e, então, projetada com o auxílio de feixes de laser, possibilitando aos usuários uma comunicação remota livre de dispositivos [272, 273]

A telepresença holográfica pode ser utilizada em diferentes cenários, cujo conteúdo tátil e interativo podem ser fatores-chave para envolver o público. Dentre elas, destacam-se sua aplicação em videoconferências, palestras, transmissão de notícias, entre outros [123, 274]. O seu uso contribuirá para minimizar os custos de deslocamento e permitirá que as pessoas estejam virtualmente presentes em diferentes locais simultaneamente. Por outro lado, existem alguns fatores que dificultam a implementação dessa tecnologia nas redes atuais, como alcançar uma latência ultra baixa e uma alta taxa de dados, simultaneamente.

Nesse contexto, os autores em [272] projetaram os requisitos necessários para uma transmissão holográfica. Um *display* holográfico tridimensional exigirá uma taxa de 4,32 Tbps, sem qualquer compressão, com cores, alta paralaxe, 30 fps e latência de 0,1 ms. Além disso, todos os cinco sentidos humanos (visão, audição, tato, olfato e paladar) deverão ser digitalizados e transmitidos para possibilitar uma experiência remota completamente imersiva [275]. Isso resultaria na necessidade de uma vazão de dados ainda maior. Nas redes 5G, esse tipo de

transmissão é proibitiva, uma vez que a rede não possui capacidade de alcançar vazão de dados e latência dessas magnitudes. Por outro lado, a proposta da futura rede 6G é possibilitar o alcance desses tipos de requisitos mencionados, viabilizando a implementação das transmissões holográficas [276].

Em [277] foram discutidos os desafios técnicos a serem superados pelas futuras redes de comunicações para possibilitar uma comunicação holográfica efetiva. Conforme abordado anteriormente, as comunicações holográficas além de exigirem larguras de banda sem precedentes e latência ultrabaixa, também necessitarão de coordenação e sincronização de *streaming* simultâneos com elevada precisão. Nesse trabalho, Clemm *et al.* [277] realizaram uma análise experimental com diferentes arquiteturas de rede, com o objetivo de verificar o desempenho de cada uma perante a esses desafios da rede. Quatro diferentes arquiteturas de *Software Defined Network* (SDN) foram testadas: centralizada (*Floodlight*), distribuída hierarquicamente (*Kandoo* [278]), distribuída planarmente ou *Open Network Operating System* (ONOS), e totalmente distribuída ou *Distributed Algorithm for Isolating Malfunctioning* (DAIM) [279]. Nessas redes foram realizadas medições de latência, em ms, como tempo de *setup* de *streaming*, tempo de *download* do primeiro segmento de *streaming*, tempo médio de *download* por segmento. Também foram verificadas as porcentagens de segmentos baixados com uma qualidade mais elevada. Conforme pôde ser verificado, a rede totalmente distribuída (DAIM) apresenta um menor tempo de *setup* de *streaming* quando comparada às outras topologias, resultando em um melhor desempenho para o *download* do primeiro segmento do fluxo de dados. Isso também resulta em um bom tempo médio de *download* por segmento, enquanto mantém uma porcentagem elevada de segmentos de alta qualidade. Esses resultados abrem caminhos que possibilitam a superação de desafios impostos pela comunicação holográfica, permitindo a coordenação e sincronização de *streaming* simultâneos de altíssima precisão.

Conforme já mencionado, as altas demandas de largura de banda do *streaming* holográfico são necessárias para sua transmissão pela Internet. O holograma pode ser dividido em várias áreas, onde cada uma contém informações de uma determinada vista específica. Com o intuito de economizar a largura de banda necessária para a sua transmissão, ao invés de codificar e decodificar todo o holograma, somente a vista necessária a ser transmitida pela rede será renderizada e codificada, com base na interatividade dos usuários. Em [280], o conceito de *Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* (DASH) [281] é estendido para imagens holográficas e diferentes técnicas de *streaming* para transmissão dessas imagens foram abordadas nesse artigo. Foram verificadas as estratégias de *streaming* monolítico, de visão única, de visão adaptativa e de tempo não-real, as quais foram comparadas principalmente em termos de requisitos de largura de banda e complexidade no tempo de codificação.

Amirpour *et al.* [280] apresentaram resultados experimentais referentes à implementação dessas técnicas de *streaming*, por meio da análise de diferentes hologramas [282]. O *streaming* monolítico transmite informações de todas as vistas do holograma. Consequentemente, a complexidade do tempo de codificação e decodificação aumentará e também será necessária uma maior largura de banda. Nas abordagens de visão única e visão adaptativa, ao invés de codificar todo o holograma no lado do servidor e transmitir todos os dados, cada holograma é decomposto em partições onde cada uma delas corresponde a uma visualização. Essas estratégias de *streaming* são de tempo real, onde cada visualização é solicitada no momento do *streaming*. No *streaming* de visualização única, apenas a parte correspondente à visualização solicitada pelo usuário será enviada. Isso resultará em 91,62% de economia de largura de banda, representando a maior economia de banda entre todas as estratégias analisadas. Porém, não é possível prover interatividade para o usuário empregando essa estratégia. No *streaming* de visualização adap-

tável, a parte correspondente à visualização solicitada é estendida para cobrir as visualizações vizinhas. Embora essa estratégia precise de uma maior largura de banda e também apresente uma maior complexidade no tempo de codificação quando comparada ao *streaming* de visualização única, a interatividade do usuário será possível. Nessa última abordagem, a economia de largura de banda pode chegar até a 88,92%, dependendo do número de partições do holograma, quando comparado com a estratégia de *streaming* monolítico. No *streaming* de tempo não-real cada holograma é dividido em partições, que são todas codificadas e armazenadas no servidor. Com base na visualização solicitada, a partição correspondente será transferida ao usuário. Ao compará-lo com o *streaming* monolítico, essa estratégia apresenta uma economia de 82,11% da largura de banda, porém possui maior complexidade no tempo de codificação. No entanto, essa complexidade se sobressai para *streaming* em tempo real do que para *streaming* em tempo não-real.

Outro ponto importante a ser mencionado consiste na necessidade de prover uma nova arquitetura de Internet que seja capaz de suportar esse tipo de aplicação. Essa nova arquitetura deverá incluir um novo protocolo de dados, capaz de se adaptar dinamicamente a diferentes modos de operação, com suporte às comunicações holográficas. Um novo protocolo de controle também deverá ser considerado, permitindo a sincronização de fluxos simultâneos e protocolos de roteamento de caminho preferidos, os quais estabelecem enlaces quase determinísticos com *jitter* muito baixo. Outro protocolo que deverá ser incorporado nessa nova abordagem de arquitetura é o protocolo de gerenciamento com recursos de auto-configuração e auto-otimização, os quais farão uso de IA em sua implementação [2].

Portanto, para que a rede 6G consiga prover uma experiência holográfica imersiva e ininterrupta, será necessário que a rede proporcione comunicação com taxas de dados na ordem de Tbps e latência na ordem de 0,1 ms, além da necessidade de inovações na arquitetura de rede [2, 123, 283].

4.10.2 Internet tátil ou Internet dos sentidos

O advento da rede 6G deve permitir que a conectividade entre diversos dispositivos seja altamente interativa, incluindo a transferência de dados, controle e confirmação de resposta, viabilizando a transmissão da sensação de toque (háptica) em tempo real juntamente com outras informações [284]. Internet tátil é o termo utilizado para a transmissão do toque a longas distâncias. Na literatura, esse termo pode ser também denominado como Internet dos sentidos [285]. As comunicações hápticas visam complementar as comunicações audiovisuais, fazendo com que as informações referentes às características físicas de objetos e pessoas possam ser transmitidas de forma coerente com as imagens e sons.

A Internet tátil é considerada como a próxima evolução em comunicação, uma vez que visa a integração da comunicação homem-máquina e máquina-máquina, adicionando a possibilidade de sensações hápticas a esse campo. Dessa forma, essa aplicação, que é inicialmente prevista para as redes 6G, deve permitir interações táteis, em tempo real (responsiva), entre seres humanos e máquinas com o ambiente.

A adoção dessa abordagem pode ser promissora para aplicações cuja presença humana é necessária para realizar uma determinada tarefa, porém, permitindo a sua execução de forma remota. Como exemplos de utilização da Internet tátil, tem-se o treinamento de astronautas em instalações espaciais, acesso a *containers* subaquáticos, controle de veículos à distância, operação de maquinários em ambientes hostis, manipulação de elementos perigosos e tele cirurgia [286, 287]. Comunicações hápticas também podem ser aplicadas a diversas outras aplicações,

como *healthcare*, realidade virtual e aumentada, educação e entretenimento e outros [288, 289]. Entretanto, para viabilizar essas verticais é necessário ter uma rede contínua de alto desempenho e que atenda a requisitos rigorosos, como taxa de transmissão de dados ultra-alta, latência extremamente baixa (inferior a 1 ms), alta confiabilidade e precisão com altíssima exatidão [290]. Outra característica fundamental para a Internet tátil é a necessidade de elevada segurança. Nesse sentido, a tecnologia habilitadora para a rede 6G, denominada *blockchain*, tem sido proposta para permitir uma arquitetura de Internet tátil segura e confiável [291]. Outras tecnologias facilitadoras previstas para uso na rede 6G, como VANTs [292], *Optical Wireless Technology* (OWT) [240] e *Cell-Free Massive MIMO* (CF-mMIMO) [293] também deverão ser empregadas para alcançar maior confiabilidade, elevada vazão e latência ultrabaixa necessárias para viabilizar a Internet tátil.

Além dos requisitos exigidos para esse tipo de comunicação, outro desafio relacionado a essa nova aplicação refere-se às dificuldades de coletar e reproduzir as sensações táteis por meio de sensores, atuadores e transdutores. Ou seja, o modo como a pressão na pele será criada, sem utilizar algum tipo de objeto físico para esse fim. Uma das propostas apresentadas na literatura para produzir a sensação háptica é por meio de ondas sonoras intensas sob pressão. A empresa britânica *Ultrahaptics* apresenta como solução a utilização de vários transdutores ultrassônicos para criar a sensação de toque por meio da produção controlada de ondas ultrassônicas [289]. Esses transdutores integrados com câmeras de profundidade podem detectar a posição do corpo à qual ocorrerá a sensação de toque. A *Microsoft* também tem atuado no desenvolvimento desse tipo de sensação com a utilização de anéis de vórtice de ar, que se assemelham ao diafragma de um alto-falante [287]. Nessa abordagem, as ondas concentradas e provenientes de minúsculos orifícios podem se mover a uma maior distância, porém com uma menor precisão quando comparada ao sistema de ultrassom [294].

A rede de sensores, atuadores e transdutores que compõe essa vertente devem viabilizar, além da informação de pressão, informações como temperatura e umidade, permitindo que se alcance uma experiência de toque ainda mais realística. Isso significa que a vazão de dados demandada da rede deve ser elevada, podendo chegar a centenas de Mbit/s por usuário.

Algumas técnicas de codificação permitem explorar as propriedades da percepção háptica humana para obter a redução da taxa de transmissão de mensagens. As técnicas de redução/compressão de informações em comunicações hápticas compreendem abordagens estatísticas ou perceptuais. A primeira refere-se a modelos de predição (por exemplo, modulação por código de pulso diferencial adaptativa) e compressão com perdas (por exemplo, *Discrete Cosine Transform* (DCT)) [288, 295–297]. A abordagem por percepção engloba codificação não-preditiva baseada na Lei de Weber e codificação preditiva como, por exemplo, predição linear, predição linear de primeira ordem, auto-regressão de terceira ordem, predição baseada em geometria e métodos híbridos [298].

Verificam-se algumas abordagens em relação aos sistemas de controle [299–302]. Em [302], utilizou-se um modelo de mediação para estimar os parâmetros do modelo enviando-o ao usuário em tempo real, ao invés de enviar diretamente os sinais hápticos. Os modelos de tráfego de dados para comunicações hápticas não se enquadram nos convencionais, definidos pelos modelos de chegada de pacotes de Poisson e Pareto, pois, as comunicações hápticas apresentam distribuições cujas características são dominadas pelos pacotes de comando e *feedback*. Em [303], verificou-se a possibilidade de modelar esse tipo de tráfego por meio das distribuições generalizada de Pareto, gama ou determinística. Em [304, 305], demonstrou-se a modelagem de um sistema háptico para realidade virtual por meio da distribuição generalizada de Pareto, cujos resultados corroboram com os reportados em [303].

Em relação às arquiteturas para comunicações táteis, verifica-se a arquitetura proposta pelo IEEE P1918.1 [306], cujo foco é definição de entidades funcionais e interfaces para interoperabilidade. Essa arquitetura é genérica e engloba todos os tipos de conectividade, apresentando algumas definições em relação à aspectos de modularidade, flexibilidade, separação de plano de dado e controle, e uso de recursos de nuvem e borda. Por outro lado, outras arquiteturas baseiam-se em melhorar o desempenho de redes de telefonia móvel para atender aos critérios de uma comunicação háptica. Essas arquiteturas consideram o uso de conceitos de *Multi-access Edge Computing* (MEC) [307–310] ou tecnologia *Fiber-Wireless* (FiWi) [311] para prover maior capacidade de tráfego às redes móveis. Consideram-se também soluções em arquitetura baseadas em redes *Ethernet Passive Optical Network* (EPON) devido às suas altas taxas de dados e flexibilidade [312]. Ateya *et al.* [307] propuseram um sistema em nuvem multiníveis para reduzir a latência e o congestionamento de tráfego de informação no núcleo da rede móvel. Posteriormente, implementou-se aspectos de SDN para flexibilizar o encaminhamento de tráfego e reduzir a latência na comunicação. Em [309], abordou-se uma arquitetura de rede de acesso de rádio flexível em nuvem. Integrou-se uma arquitetura de rede dinâmica com uma C-RAN. Essa arquitetura permite que a rede permute usuários entre a arquitetura flexível e a C-RAN, se a segunda não conseguir atingir os requisitos de *Quality of Service* (QoS) para uma comunicação tátil. Em [311], propôs-se uma rede *LTE-Advanced* (LTE-A) heterogênea FiWi para prover alta vazão na rede *backhaul* e maior capacidade de transmissão Wi-Fi. Empregou-se a tecnologia EPON para projeto dos enlaces de *backhaul* e uma tecnologia WLAN com capacidade de transmissão de Gigabit. Neaime e Dhaini [312] introduziram uma rede ótica distribuída em nuvem para prover alta capacidade, programabilidade e redes óticas escaláveis para suporte à serviços de baixa latência. Essa rede baseia-se na tecnologia EPON de próxima geração, que permite a *Optical Network Unit* (ONU) transmitir tráfego por múltiplos canais simultaneamente. Xiang *et al.* [310] propuseram uma nova abordagem na implementação de redes empregando MEC e *Network Functions Virtualization* (NFV) para redução de latência e cadeias de serviços, cuja abordagem foi denominada de *Chain-based Low latency VNF Implementation* (CALVIN). Essa implementação estabelece a separação de *Virtual Network Functions* (VNFs) em diferentes máquinas virtuais, contrastando com o modelo atual que implementa um modelo centralizado.

Verificam-se outras arquiteturas propostas para aplicações específicas em comunicações táteis como teleoperação em tempo-real [313,314], realidade virtual [315,316], vigilância em tempo real [317], automação industrial [318], cidades inteligentes [319] e *healthcare* [320]. Maier *et al.* introduziram uma arquitetura similar à apresentada em [311], em conjunto com servidores MEC baseados em IA e localizados em ONUs para suporte às telecirurgias. Holland *et al.* [314] empregaram uma tecnologia em sub-GHz para transmitir *feedbacks* e controles robóticos sem mecanismos de transmissão para reduzir o atraso na comunicação. Em [315, 316], os autores relacionam as aplicações em realidade virtual e arquiteturas são apresentadas para jogos interativos com múltiplos jogadores e tratamento/remoção de fobias [315, 316]. Essas arquiteturas baseiam-se em conceitos de MEC e *Fog Computing*, respectivamente. Grasso e Schembra [317] propuseram o uso de veículos não tripulados com capacidade computacional para prover processamento local de dados e reduzir os atrasos na rede. Em [318] propôs-se um experimento para verificar a capacidade de redes baseadas em SDN e NFV para prover suporte às comunicações táteis para aplicações industriais. O experimento baseia-se no projeto de uma rede para segurança, conectividade e interoperabilidade massiva IoT fim-a-fim [321]. Wei *et al.* [319] propôs uma arquitetura para obter baixa latência, alta confiabilidade e melhorar a experiência do usuário em um ambiente de cidade inteligente. A arquitetura possui cinco camadas: sensoriamento, transmissão, armazenamento, computação e aplicação. Para suporte às aplicações

em *health*, a tecnologia EPON demonstra-se viável para prover baixa latência e confiabilidade devido às suas características de alta capacidade e flexibilidade.

Em relação aos protocolos em comunicações hápticas, citam-se o protocolo *Agile Cloud Migration* (ACM), que permite rápida migração sem inatividade sobre MEC para garantir a proximidade entre aplicação e usuário [322]. Esse protocolo transfere apenas o estado da aplicação, reduzindo a quantidade de dados transmitidos. Du *et al.* [323] propuseram um protocolo para redes veiculares que permite a conexão com as redes LTE e IEEE 802.11p. O protocolo permite selecionar a rede em que o veículo deve se conectar e como comutar a conexão entre essas redes de modo a minimizar o atraso. Iiyoshi *et al.* [324] abordou uma solução para a comunicação entre dispositivos com diferentes especificações e requisitos que possam se envolver em aplicação háptica. Dessa forma, propôs-se um protocolo que permite a cada dispositivo conhecer especificações e requisitos de outros dispositivos para adequar a transmissão de dados e otimizá-la.

Algoritmos para alocação de recursos também compreendem um campo de pesquisa em comunicação hápticas. Esses algoritmos visam reduzir a latência e aumentar a confiabilidade em redes de acesso via rádio para comunicações táteis. Os algoritmos relacionam-se ao processo de *uplink* [325–327, 327–329], *downlink* [330, 331], *uplink* e *downlink* [332–338], e fatiamento de rede [339–341]. Em [325], propôs-se um algoritmo de controle utilizando a técnica de diversidade em frequência para garantir confiabilidade e otimizar recursos de banda para aplicações mMTC. Em [326], implementaram-se algoritmos de controle e realocação de recursos em redes LTE, relacionados ao consumo de potência, atraso de transmissão, etc. Elsayed *et al.* [327] propuseram um algoritmo para realocação de recursos e associação de usuários em redes com múltiplas células para minimizar o atraso no *uplink*. Em [327], introduziu-se um esquema para reserva de recursos para rápido acesso de usuários táteis sem degradação da eficiência espectral. Esquemas de predição semi-persistente e de acesso múltiplo para sistemas NOMA também compreendem os algoritmos de alocação de recursos em enlaces de *uplink* [328, 329]. Propostas de algoritmos de *downlink* relacionam-se ao escalonamento de recursos e à maximização do número de usuários que atendem aos requisitos de *downlink*, assim como alocação de recursos para coexistência entre redes LTE-*Unlicensed* (LTE-U) e Wi-Fi [330, 331]. Algoritmos para alocação de recursos de rádio no *uplink* e *downlink* compreendem a otimização de transmissão de potência sob os requisitos de latência e confiabilidade para comunicações táteis em redes 5G [332], maximização da taxa de vazão média de *uplink* em sistemas celulares *Sparse Code Multiple Access* (SCMA) [333], *framework* para alocação de recursos em redes celulares *Frequency Division Duplex* (FDD) para aplicações D2D [334], alocação de recursos para técnicas NOMA com salto duplo D2D [335], alocação de largura de banda para minimizar a potência média transmitida em comunicações hápticas veiculares [336], maximização da eficiência de energia em comunicações veiculares para aplicações críticas [337] e otimização de eficiência de energia para esquemas *Incremental Redundancy-Hybrid Automatic Repeat Request* (IR-HARQ) [338]. Algoritmos para alocação de recursos em fatiamento de rede compreendem o uso de métodos de aprendizado reforçado com ou sem conhecimento parcial do ambiente de comunicação [339], *framework traffic-aware* para duas camadas sobre redes de acesso via rádio flexíveis [340] e *framework* para alocação *Media Access Control* (MAC) em dois níveis [341].

Algoritmos para alocação de recursos nas camadas física e de enlace [342, 343] visam a redução de atrasos e *jitter* na comunicação, alta capacidade e baixa latência em redes WLAN e *Wireless Body Area Network* (WBAN) [344, 345] e EPON [346, 347]. Outros algoritmos aplicam-se a camadas superiores da Rede Móvel [348, 349].

As comunicações hápticas apresentam como desafios o desenvolvimento de sistemas capazes

de processar entre os diferentes tipos de informação (vocal, visual e hápticas) no suporte a uma determinada aplicação, mantendo a latência fim-a-fim dentro dos requisitos de comunicação definidos. Isso requer o desenvolvimento de *encoders* multimodais. Steinbach *et al.* [350] explorou a codificação de voz e áudio para aplicações em Internet tátil, porém não se abordaram informações e mensagens de controle relacionadas às aplicações hápticas. O desenvolvimento de dispositivos capazes de viabilizar as aplicações hápticas fim-a-fim, assim como interfaces capazes de distinguir interações *Machine to machine* (M2M), humano-máquina também integram os desafios em comunicações hápticas. Outras oportunidades de pesquisa abrangem à aplicação de IA, recursos computacionais e desenvolvimento de sistemas para suporte a esse tipo de comunicação. O uso de aspectos de inteligência para predição de informação em comunicações hápticas permitirá reduzir a latência da rede e reduzir interrupções. Em outras palavras, a predição permitirá manter interrompida a experiência do usuário ou aplicação em casos onde os requisitos da rede não sejam atendidos (por exemplo, perda de pacotes, atraso na entrega de mensagens, perda de conexão). Os aspectos computacionais de uma comunicação háptica como processamento de *feedback* em uma interação em tempo-real não devem afetar a latência fim-a-fim. Os atuais sistemas de comunicação não atendem aos requisitos de comunicação das aplicações hápticas. Portanto, necessita-se desenvolver infraestruturas de comunicação que atendam a esses requisitos, além de outros aspectos como mecanismos de segurança e esquemas de multiplexação [351].

Pode-se concluir, portanto, que prover suporte à alta taxa de transmissão de dados, com segurança e confiabilidade contra erros e com latência extremamente baixa, são os principais desafios para viabilizar a implementação da Internet tátil. Vale reforçar que, para que essa abordagem seja realmente viável em uma rede de comunicação móvel futura, como a rede 6G, todos os requisitos mencionados deverão ser suportados simultaneamente por tal rede.

5 Conclusão

Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina, Juliano Silveira Ferreira
 gustavo.rodrigues@inatel.br, silveira@inatel.br

A concepção da nova geração de rede móvel é orientada pela evolução natural das aplicações existentes e pelo surgimento de novas demandas e tecnologias. Nas visões para a rede 6G, a comunidade científica vem propondo requisitos mais exigentes que vão além da capacidade prevista nas redes atuais. Entre esses requisitos, a vazão de dados, a escalabilidade de dispositivos e a latência são os fatores-chaves que suportarão os novos casos de uso. Nesse contexto, os sistemas de localização, sensoriamento e mapeamento de ambientes se beneficiarão diretamente dessas exigências, garantindo precisão e resolução em suas medições, e habilitarão o desenvolvimento de aplicações ainda inéditas. Sendo assim, esse documento evidenciou as principais tecnologias de posicionamento, mapeamento e sensoriamento candidatas a compor a rede 6G. O estudo foi realizado a partir de uma revisão sistemática da literatura, identificando conceitos e tendências que poderão ser exploradas em redes de futura geração. As tecnologias habilitadoras foram apresentadas na seção 2. Nas seções 3 e 4 foram abordados os possíveis empregos dessas tecnologias, visando o suporte à própria rede e as aplicações, respectivamente.

Durante a revisão bibliográfica, foram identificadas as principais técnicas de localização e as tecnologias que serão empregadas para atender às demandas da rede 6G. Assim, a utilização de técnicas consolidadas, como ToA e AoA, em conjunto com tecnologias emergentes, tais como superfícies inteligentes e IA, viabilizará o desenvolvimento de um sistema capaz de fornecer: maior vazão e área de cobertura; feixes direcionados estreitos; sensoriamento por imagem e espectrometria na faixa de THz; e consciência de contexto. Essas características propiciarão a implementação e aprimoramento de técnicas e arquiteturas como SLAM, CC e redes assistidas por VANTs. Em sistemas de localização, mapeamento e sensoriamento, as técnicas mencionadas trarão dinamismo e precisão para a rede, de forma a habilitar o desenvolvimento de novas aplicações para diversas áreas de atuação. Nesse caso, a revisão do estado da arte identificou o uso dessas técnicas em: sistemas de radar ativos e passivos; veículos, robôs e aeronaves autônomas; cidades inteligentes; automação industrial; sensoriamento biológico e saúde; agronegócio; e transferência energética. Além disso, foram apresentadas aplicações de comunicação disruptivas, como holografia e Internet tátil, a serem possivelmente viabilizadas a partir do provimento de uma maior taxa de dados pela rede e também a avanços na área de sensoriamento, processamento e projeção de imagens.

Por fim, a revisão do estado da arte evidenciou que as melhorias em aspectos de sensoriamento, localização e mapeamento impactarão na evolução do comportamento da própria rede de comunicação. Essas tecnologias e aplicações também revolucionarão a experiência do usuário final de uma forma inédita. Apesar disso, para atingir esse patamar, será necessário solucionar diversos problemas e desafios inerentes à próxima geração de redes móveis.

Referências

- [1] A. L. Imoize, O. Adedeji, N. Tandiya, and S. Shetty, “6G Enabled Smart Infrastructure for Sustainable Society: Opportunities, Challenges, and Research Roadmap,” *Sensors*, vol. 21, no. 5, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/5/1709>
- [2] E. Calvanese Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, L. Maret, and C. Dehos, “6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 42–50, 2019.
- [3] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78 729–78 757, 2019.
- [4] S. Tripathi, N. V. Sabu, A. K. Gupta, and H. S. Dhillon, “Millimeter-wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless,” in *6G Mobile Wireless Networks*. Springer, 2021, pp. 83–121.
- [5] R. Di Taranto, S. Muppirisetty, R. Raulefs, D. Slock, T. Svensson, and H. Wymeersch, “Location-Aware Communications for 5G Networks: How location information can improve scalability, latency, and robustness of 5G,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 102–112, 2014.
- [6] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, “Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1124–1148, 2018.
- [7] M. Yassin and E. Rachid, “A survey of positioning techniques and location based services in wireless networks,” in *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, 2015, pp. 1–5.
- [8] A. M. H. Khalel, “Position Location Techniques in Wireless Communication Systems,” Master’s thesis, Blekinge Institute of Technology, School of Engineering, Karlskrona, Sweden, 2010.
- [9] Z. Xiao and Y. Zeng, “An overview on integrated localization and communication towards 6G,” accepted by Science China Information Sciences (SCIS), <https://arxiv.org/abs/2006.01535>, 2020, [Online; acessado em 29 de maio de 2021].
- [10] P. G. E. Maria, “Estúdio de técnica híbrida de localização de estações moveis baseadas em TDoA e AoA,” http://pgee.ime.eb.br/pdf/edna_guedes.pdf, 2003, [Online; acessado em 28 de maio de 2021].
- [11] B. A. Wagner, “Localização de estações moveis praticada sob GSM e GPS,” Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, Santa Catarina, SC, 2010.
- [12] M. Yan, C. Xiuwan, and X. Yubin, “Wireless Local Area Network Assisted GPS in Seamless Positioning,” in *2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, vol. 3, 2012, pp. 612–615.

- [13] G. De Angelis, G. Baruffa, and S. Cacopardi, “GNSS/Cellular Hybrid Positioning System for Mobile Users in Urban Scenarios,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 313–321, 2013.
- [14] P. Deng and P. Fan, “An AOA assisted TOA positioning system,” in *WCC 2000 - ICCT 2000. 2000 International Conference on Communication Technology Proceedings (Cat. No.00EX420)*, vol. 2, 2000, pp. 1501–1504 vol.2.
- [15] P. Brida, J. Duha, and M. Krasnovsky, “On the accuracy of weighted proximity based localization in wireless sensor networks,” in *Personal Wireless Communications*, R. Bestak, B. Simak, and E. Kozłowska, Eds. Boston, MA: Springer US, 2007, pp. 423–432.
- [16] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, “Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks,” in *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ser. MobiCom ’03. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2003, p. 81–95. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/938985.938995>
- [17] C. De Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto *et al.*, “Convergent communication, sensing and localization in 6G systems: An overview of technologies, opportunities and challenges,” *IEEE Access*, 2021.
- [18] J. Wang, C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, and X. Gao, “A General 3D Space-Time-Frequency Non-Stationary THz Channel Model for 6G Ultra-Massive MIMO Wireless Communication Systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 6, pp. 1576–1589, 2021.
- [19] I. A. Hemadeh, K. Satyanarayana, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, “Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 870–913, 2018.
- [20] S. Ju, Y. Xing, O. Kanhere, and T. S. Rappaport, “3-d statistical indoor channel model for millimeter-wave and sub-terahertz bands,” in *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, 2020, pp. 1–7.
- [21] M. K. Samimi and T. S. Rappaport, “3-D Millimeter-Wave Statistical Channel Model for 5G Wireless System Design,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 7, pp. 2207–2225, 2016.
- [22] D. Cahyono, F. Sheikh, and T. K. ser, “Deterministic Approach of Indoor Room THz Multipath Channel Model,” in *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 2020, pp. 1–5.
- [23] M. Taherkhani, Z. G. Kashani, and R. A. Sadeghzadeh, “On the performance of THz wireless LOS links through random turbulence channels,” *Nano Communication Networks*, vol. 23, p. 100282, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878778919301061>
- [24] J. F. O’Hara, S. Ekin, W. Choi, and I. Song, “A perspective on terahertz next-generation wireless communications,” *Technologies*, vol. 7, no. 2, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/7/2/43>

- [25] Projeto Brasil 6G, “Tecnologias de RF e de Comunicações Ópticas para Redes 6G,” *Inatel*, agosto 2021.
- [26] A. C. Gurbuz, J. H. McClellan, and V. Cevher, “A compressive beamforming method,” in *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. IEEE, 2008, pp. 2617–2620.
- [27] J. Wang, Z. Lan, C.-w. Pyo, T. Baykas, C.-s. Sum, M. A. Rahman, J. Gao, R. Funada, F. Kojima, H. Harada *et al.*, “Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 8, pp. 1390–1399, 2009.
- [28] D. Yang, L.-L. Yang, and L. Hanzo, “DFT-Based Beamforming Weight-Vector Codebook Design for Spatially Correlated Channels in the Unitary Precoding Aided Multiuser Downlink,” in *2010 IEEE International Conference on Communications*, 2010, pp. 1–5.
- [29] T. Wei and X. Zhang, “mtrack: High-precision passive tracking using millimeter wave radios,” in *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2015, pp. 117–129.
- [30] H. El-Sayed, G. Athanasiou, and C. Fischione, “Evaluation of localization methods in millimeter-wave wireless systems,” in *2014 IEEE 19th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. IEEE, 2014, pp. 345–349.
- [31] A. Blanco, N. Ludant, P. J. Mateo, Z. Shi, Y. Wang, and J. Widmer, “Performance Evaluation of Single Base Station ToA-AoA Localization in an LTE Testbed,” in *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [32] A. Olivier, G. Bielsa, I. Tejado, M. Zorzi, J. Widmer, and P. Casari, “Lightweight indoor localization for 60-GHz millimeter wave systems,” in *2016 13th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*. IEEE, 2016, pp. 1–9.
- [33] Q. Zhu, K. Niu, C. Dong, and Y. Wang, “A novel angle of arrival (AOA) positioning algorithm aided by location reliability prior information,” in *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [34] X. Liu, Y. Wang, M. Zhou, W. Nie, and X. Yang, “Indoor Passive Localization with Channel State Information Using A Single Access Point,” *IEEE Sensors Journal*, 2021.
- [35] A. Bourdoux, A. N. Barreto, B. van Liempd, C. de Lima, D. Dardari, D. Belot, E.-S. Lohan, G. Seco-Granados, H. Sardeddeen, H. Wymeersch, J. Suutala, J. Saloranta, M. Guillaud, M. Isomursu, M. Valkama, M. R. K. Aziz, R. Berkvens, T. Sanguanpuak, T. Svensson, and Y. Miao, “6G White Paper on Localization and Sensing,” 2020.
- [36] J. Palacios, G. Bielsa, P. Casari, and J. Widmer, “Single-and multiple-access point indoor localization for millimeter-wave networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 1927–1942, 2019.

- [37] S. Gong, X. Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, L. Shu, D. I. Kim, and Y.-C. Liang, “Toward Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2283–2314, 2020.
- [38] Y. Naresh and A. Chockalingam, “On Media-Based Modulation Using RF Mirrors,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 6, pp. 4967–4983, 2017.
- [39] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliariidou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, “Realizing Wireless Communication Through Software-Defined HyperSurface Environments,” in *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*, 2018, pp. 14–15.
- [40] F. Liu, A. Ptilakis, M. S. Mirmoosa, O. Tsilipakos, X. Wang, A. C. Tasolamprou, S. Abadal, A. Cabellos-Aparicio, E. Alarcón, C. Liaskos, N. V. Kantartzis, M. Kafesaki, E. N. Economou, C. M. Soukoulis, and S. Tretyakov, “Programmable Metasurfaces: State of the Art and Prospects,” in *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2018, pp. 1–5.
- [41] R. Alghamdi, R. Alhadrami, D. Alhothali, H. Almorad, A. Faisal, S. Helal, R. Shalabi, R. Asfour, N. Hammad, A. Shams, N. Saeed, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Intelligent Surfaces for 6G Wireless Networks: A Survey of Optimization and Performance Analysis Techniques,” 2020.
- [42] A. Almohamad, A. M. Tahir, A. Al-Kababji, H. M. Furqan, T. Khattab, M. O. Hasna, and H. Arslan, “Smart and Secure Wireless Communications via Reflecting Intelligent Surfaces: A Short Survey,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 1442–1456, 2020.
- [43] J. Zhang, E. Björnson, M. Matthaiou, D. W. K. Ng, H. Yang, and D. J. Love, “Prospective Multiple Antenna Technologies for Beyond 5G,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 8, pp. 1637–1660, 2020.
- [44] T. Jiang, H. V. Cheng, and W. Yu, “Learning to Reflect and to Beamform for Intelligent Reflecting Surface with Implicit Channel Estimation,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 1–1, 2021.
- [45] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 753–116 773, 2019.
- [46] E. Basar, “Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm for 6G,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 5, pp. 3187–3196, 2020.
- [47] H. Wymeersch, J. He, B. Denis, A. Clemente, and M. Juntti, “Radio Localization and Mapping With Reconfigurable Intelligent Surfaces: Challenges, Opportunities, and Research Directions,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 52–61, 2020.
- [48] A. Elzanaty, A. Guerra, F. Guidi, D. Dardari, and M.-S. Alouini, “Towards 6G Holographic Localization: Enabling Technologies and Perspectives,” <https://arxiv.org/abs/2103.12415>, 2021, [Online; acessado em 28 de maio de 2021].

- [49] J. Zhao and Y. Liu, “A Survey of Intelligent Reflecting Surfaces (IRSs): Towards 6G Wireless Communication Networks,” <https://arxiv.org/pdf/1907.04789.pdf>, 2019, [Online; acessado em 25 de maio de 2021].
- [50] S. Hu and F. Rusek, “Spherical Large Intelligent Surfaces,” in *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2020, pp. 8673–8677.
- [51] H. Zheng, Z. Yang, G. Wang, R. He, and B. Ai, “Channel Estimation for Ambient Backscatter Communications with Large Intelligent Surface,” in *2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2019, pp. 1–5.
- [52] J. Yuan, H. Q. Ngo, and M. Matthaiou, “Towards Large Intelligent Surface (LIS)-Based Communications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 10, pp. 6568–6582, 2020.
- [53] W. Yan, X. Yuan, and X. Kuai, “Passive Beamforming and Information Transfer via Large Intelligent Surface,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 4, pp. 533–537, 2020.
- [54] E. Basar, “Transmission Through Large Intelligent Surfaces: A New Frontier in Wireless Communications,” in *2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2019, pp. 112–117.
- [55] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, “Beyond Massive MIMO: The Potential of Positioning With Large Intelligent Surfaces,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 7, pp. 1761–1774, 2018.
- [56] W. Yan, X. Yuan, Z.-Q. He, and X. Kuai, “Large Intelligent Surface Aided Multiuser MIMO: Passive Beamforming and Information Transfer,” in *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020, pp. 1–7.
- [57] J. Yuan, H. Q. Ngo, and M. Matthaiou, “Large intelligent surface (lis)-based communications: New features and system layouts,” 2020.
- [58] P. Wang, J. Fang, L. Dai, and H. Li, “Joint Transceiver and Large Intelligent Surface Design for Massive MIMO mmWave Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 2, p. 1052–1064, Feb 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2020.3030570>
- [59] Q. Wu and R. Zhang, “Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, 2019.
- [60] Z.-Q. He and X. Yuan, “Cascaded Channel Estimation for Large Intelligent Metasurface Assisted Massive MIMO,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 210–214, 2020.
- [61] C. Liaskos, A. Tsioliariidou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, “Using Any Surface to Realize a New Paradigm for Wireless Communications,” *Commun. ACM*, vol. 61, no. 11, p. 30–33, Oct. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3192336>

- [62] L. You, J. Xiong, Y. Huang, D. W. K. Ng, C. Pan, W. Wang, and X. Gao, “Reconfigurable Intelligent Surfaces-Assisted Multiuser MIMO Uplink Transmission With Partial CSI,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 1–1, 2021.
- [63] Q. Wu and R. Zhang, “Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surface with Discrete Phase Shifts,” in *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2019, pp. 7830–7833.
- [64] H. Hashida, Y. Kawamoto, and N. Kato, “Intelligent Reflecting Surface Placement Optimization in Air-Ground Communication Networks Toward 6G,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 6, pp. 146–151, 2020.
- [65] S. Abadal, C. Liaskos, A. Tsioliariidou, S. Ioannidis, A. Pitsillides, J. Solé-Pareta, E. Alarcón, and A. Cabellos-Aparicio, “Computing and Communications for the Software-Defined Metamaterial Paradigm: A Context Analysis,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6225–6235, 2017.
- [66] A. K. Dey, “Understanding and Using Context,” in *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 5, 2001, pp. 4–7.
- [67] H. Viswanathan and P. E. Mogensen, “Communications in the 6G Era,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57 063–57 074, 2020.
- [68] A. Mohamed, H. Ruan, M. H. H. Abdelwahab, B. Dorneanu, P. Xiao, H. Arellano-Garcia, Y. Gao, and R. Tafazolli, “An Inter-Disciplinary Modelling Approach in Industrial 5G/6G and Machine Learning Era,” in *2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2020, pp. 1–6.
- [69] R. Zia-ul Mustafa and S. A. Hassan, “Machine Learning-Based Context Aware Sequential Initial Access in 5G mmWave Systems,” in *2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2019, pp. 1–6.
- [70] D. Slock, “Location aided wireless communications,” in *2012 5th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing*, 2012, pp. 1–6.
- [71] G. H. Sim, S. Klos, A. Asadi, A. Klein, and M. Hollick, “An Online Context-Aware Machine Learning Algorithm for 5G mmWave Vehicular Communications,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 6, pp. 2487–2500, 2018.
- [72] R. Parada and M. Zorzi, “Context-aware Handover in mmWave 5G Using UE’s Direction of Pass,” in *European Wireless 2018; 24th European Wireless Conference*, 2018, pp. 1–6.
- [73] B. Ma, B. Yang, Y. Zhu, and J. Zhang, “Context-Aware Proactive 5G Load Balancing and Optimization for Urban Areas,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8405–8417, 2020.
- [74] C. Wang, R. Zhou, Y. Huang, L. Xie, and Y. Ying, “Terahertz spectroscopic imaging with discriminant analysis for detecting foreign materials among sausages,” *Food Control*, vol. 97, pp. 100–104, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713518305255>

- [75] H. Sariaeddeen, N. Saeed, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Next Generation Terahertz Communications: A Rendezvous of Sensing, Imaging, and Localization,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 5, pp. 69–75, 2020.
- [76] L. Afsah-Hejri, E. Akbari, A. Toudeshki, T. Homayouni, A. Alizadeh, and R. Ehsani, “Terahertz spectroscopy and imaging: A review on agricultural applications,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 177, p. 105628, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919318204>
- [77] W. Choi, D.-Y. Kim, Z. Ahmad, P. R. Byreddy, Y. Zhu, J. Newman, and K. K. O, “CMOS circuits for Terahertz imaging,” in *Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications XI*, T. George and M. S. Islam, Eds., vol. 10982, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2019, pp. 492 – 501. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.2518654>
- [78] A. Boukhayma, A. Dupret, J.-P. Rostaing, and C. Enz, “A Low-Noise CMOS THz Imager Based on Source Modulation and an In-Pixel High-Q Passive Switched-Capacitor N-Path Filter,” *Sensors*, vol. 16, no. 3, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/3/325>
- [79] U. R. Pfeiffer, R. Jain, J. Grzyb, S. Malz, P. Hillger, and P. Rodríguez-Vázquez, “Current Status of Terahertz Integrated Circuits - From Components to Systems,” in *2018 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*, 2018, pp. 1–7.
- [80] K. Schmalz, N. Rothbart, M. H. Eissa, J. Borngäb, D. Kissinger, and H.-W. H. über, “Transmitters and receivers in SiGe BiCMOS technology for sensitive gas spectroscopy at 222 - 270 GHz,” in *AIP Advances*, vol. 9, 2019.
- [81] Projeto Brasil 6G, “Estado da Arte em Inteligência Artificial Aplicada a Redes 6G,” *Inatel*, agosto 2021.
- [82] C. Chen, B. Wang, C. X. Lu, N. Trigoni, and A. Markham, “A Survey on Deep Learning for Localization and Mapping: Towards the Age of Spatial Machine Intelligence,” 2020.
- [83] L. Lin, W. Wang, W. Luo, L. Song, and W. Zhou, “Unsupervised monocular visual odometry with decoupled camera pose estimation,” *Digital Signal Processing*, vol. 114, p. 103052, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200421000919>
- [84] F. Ott, T. Feigl, C. Loffler, and C. Mutschler, “ViPR: Visual-Odometry-Aided Pose Regression for 6DoF Camera Localization,” in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops*, June 2020.
- [85] B. Teixeira, H. Silva, A. Matos, and E. Silva, “Deep learning for underwater visual odometry estimation,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44 687–44 701, 2020.
- [86] R. Khorrambakht, C. X. Lu, H. Damirchi, Z. Chen, and Z. Li, “Deep Inertial Odometry with Accurate IMU Preintegration,” 2021.
- [87] K. Shinde, J. Lee, M. Humt, A. Sezgin, and R. Triebel, “Learning Multiplicative Interactions with Bayesian Neural Networks for Visual-Inertial Odometry,” 2020.

- [88] P. Wei, G. Hua, W. Huang, F. Meng, and H. Liu, “Unsupervised Monocular Visual-Inertial Odometry Network,” in *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-20*, C. Bessiere, Ed. International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization, 7 2020, pp. 2347–2354, main track. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/325>
- [89] J.-H. Chen, G.-H. Lin, C. M. Yelamandala, and Y.-C. Fan, “High-Accuracy Mapping Design Based on Multi-view Images and 3D LiDAR Point Clouds,” in *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2020, pp. 1–2.
- [90] X. Ye and Y. Yang, “From Seeing to Moving: A Survey on Learning for Visual Indoor Navigation (VIN),” 2021.
- [91] F. Zeng, C. Wang, and S. S. Ge, “A Survey on Visual Navigation for Artificial Agents With Deep Reinforcement Learning,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 135 426–135 442, 2020.
- [92] X. Chen, T. Läbe, L. Nardi, J. Behley, and C. Stachniss, “Learning an Overlap-based Observation Model for 3D LiDAR Localization,” in *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 4602–4608.
- [93] S. Yu, C. Wang, Z. Yu, X. Li, M. Cheng, and Y. Zang, “Deep regression for LiDAR-based localization in dense urban areas,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 172, pp. 240–252, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271620303518>
- [94] T. Liu, Y. Sun, C. Wang, Y. Zhang, Z. Qiu, W. Gong, S. Lei, X. Tong, and X. Duan, “Unmanned aerial vehicle and artificial intelligence revolutionizing efficient and precision sustainable forest management,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 311, p. 127546, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621017649>
- [95] R. Neuville, J. S. Bates, and F. Jonard, “Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning,” *Remote Sensing*, vol. 13, no. 3, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/3/352>
- [96] C. Jia, H. Gao, N. Chen, and Y. He, “Machine Learning Empowered Beam Management for Intelligent Reflecting Surface Assisted MmWave Networks,” 2020.
- [97] J. He, H. Wymeersch, L. Kong, O. Silvén, and M. Juntti, “Large Intelligent Surface for Positioning in Millimeter Wave MIMO Systems,” in *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020, pp. 1–5.
- [98] M. Di Renzo, K. Ntontin, J. Song, F. H. Danufane, X. Qian, F. Lazarakis, J. De Rosny, D.-T. Phan-Huy, O. Simeone, R. Zhang, M. Debbah, G. Lerosey, M. Fink, S. Tretyakov, and S. Shamai, “Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 798–807, 2020.
- [99] J. Xiong and K. Jamieson, “Arraytrack: A fine-grained indoor location system,” in *10th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 13)*, 2013, pp. 71–84.

- [100] C. Zhang, F. Li, J. Luo, and Y. He, “iLocScan: Harnessing multipath for simultaneous indoor source localization and space scanning,” in *Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, 2014, pp. 91–104.
- [101] M. Bocquet, C. Loyez, M. Fryziel, and N. Rolland, “Millimeter-wave broadband positioning system for indoor applications,” in *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2012, pp. 1–3.
- [102] A. Shahmansoori, G. E. Garcia, G. Destino, G. Seco-Granados, and H. Wymeersch, “5G position and orientation estimation through millimeter wave MIMO,” in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [103] J. Palacios, P. Casari, and J. Widmer, “JADE: Zero-knowledge device localization and environment mapping for millimeter wave systems,” in *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2017, pp. 1–9.
- [104] J. Palacios, G. Bielsa, P. Casari, and J. Widmer, “Communication-driven localization and mapping for millimeter wave networks,” in *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2018, pp. 2402–2410.
- [105] P.-Y. Hong, C.-Y. Li, H.-R. Chang, Y. Hsueh, and K. Wang, “WBF-PS: WiGig Beam Fingerprinting for UAV Positioning System in GPS-denied Environments,” in *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2020, pp. 1778–1787.
- [106] M. Aladsani, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Leveraging mmWave imaging and communications for simultaneous localization and mapping,” in *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2019, pp. 4539–4543.
- [107] J. Palacios, P. Casari, H. Assasa, and J. Widmer, “LEAP: Location estimation and predictive handover with consumer-grade mmWave devices,” in *IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2019, pp. 2377–2385.
- [108] G. Bielsa, A. Loch, I. Tejado, T. Nitsche, and J. Widmer, “60 GHz networking: Mobility, beamforming, and frame level operation from theory to practice,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, no. 10, pp. 2217–2230, 2018.
- [109] M. Giordani, M. Mezzavilla, and M. Zorzi, “Initial Access in 5G mmWave Cellular Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 11, pp. 40–47, 2016.
- [110] M. Mizmizi, F. Linsalata, M. Brambilla, F. Morandi, K. Dong, M. Magarini, M. Nicoli, M. N. Khormuji, P. Wang, R. A. Pitaval, and U. Spagnolini, “Fastening the initial access in 5G NR sidelink for 6G V2X networks,” *Vehicular Communications*, p. 100402, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209621000711>
- [111] A. Hu and J. He, “Position-Aided Beam Learning for Initial Access in mmWave MIMO Cellular Networks,” *IEEE Systems Journal*, pp. 1–11, 2020.

- [112] T. S. Cousik, V. K. Shah, T. Erpek, Y. E. Sagduyu, and J. H. Reed, “Deep Learning for Fast and Reliable Initial Access in AI-Driven 6G mmWave Networks,” *CoRR*, vol. abs/2101.01847, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2101.01847>
- [113] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, “Simultaneous localization and mapping: part I,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99–110, 2006.
- [114] J. K. Makhubela, T. Zuva, and O. Y. Agunbiade, “A Review on Vision Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM),” in *2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC)*, 2018, pp. 1–5.
- [115] M. Cheng, M. R. K. Aziz, and T. Matsumoto, “Integrated Factor Graph Algorithm for DOA-Based Geolocation and Tracking,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49 989–49 998, 2020.
- [116] J. Mullane, B.-N. Vo, M. D. Adams, and B.-T. Vo, “A Random-Finite-Set Approach to Bayesian SLAM,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 2, pp. 268–282, 2011.
- [117] C. Brand, M. J. Schuster, H. Hirschmüller, and M. Suppa, “Stereo-vision based obstacle mapping for indoor/outdoor SLAM,” in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 1846–1853.
- [118] A. J. Davison, I. D. Reid, N. D. Molton, and O. Stasse, “MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 29, no. 6, pp. 1052–1067, 2007.
- [119] R. Koirala, B. Denis, B. Uguen, D. Dardari, and H. Wymeersch, “Simultaneous Localization and Mapping in Millimeter Wave Networks with Angle Measurements,” in *2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2020, pp. 1–6.
- [120] H. Wymeersch and G. Seco-Granados, “Adaptive Detection Probability for mmWave 5G SLAM,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [121] A. Batra, M. El-Absi, M. Wiemeler, D. Göhringer, and T. Kaiser, “Indoor THz SAR Trajectory Deviations Effects and Compensation With Passive Sub-mm Localization System,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 177 519–177 533, 2020.
- [122] J. R. Bhat and S. A. Alqahtani, “6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 43 134–43 167, 2021.
- [123] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [124] Q. Bi, “Ten Trends in the Cellular Industry and an Outlook on 6G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 12, pp. 31–36, 2019.
- [125] R. Abbas, T. Huang, B. Shahab, M. Shirvanimoghaddam, Y. Li, and B. Vucetic, “Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access: A Key Enabler for 6G-IoT,” *CoRR*, vol. abs/2003.10257, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2003.10257>

- [126] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, 2016.
- [127] Y. Zeng, J. Lyu, and R. Zhang, “Cellular-Connected UAV: Potential, Challenges, and Promising Technologies,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 120–127, 2019.
- [128] C.-S. Y. Chang-Sun Yoo and I.-K. A. Iee-Ki Ahn, “Low cost GPS/INS sensor fusion system for UAV navigation,” in *Digital Avionics Systems Conference, 2003. DASC '03. The 22nd*, vol. 2, 2003, pp. 8.A.1–8.1–9 vol.2.
- [129] A. Nemra and N. Aouf, “Robust INS/GPS Sensor Fusion for UAV Localization Using SDRE Nonlinear Filtering,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 789–798, 2010.
- [130] Y. Lu, Z. Xue, G.-S. Xia, and L. Zhang, “A survey on vision-based UAV navigation,” *Geo-spatial Information Science*, vol. 21, no. 1, pp. 21–32, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420509>
- [131] J. S. Choi, B. R. Son, H. K. Kang, and D. H. Lee, “Indoor localization of Unmanned Aerial Vehicle based on passive UHF RFID systems,” in *2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2012, pp. 188–189.
- [132] J. P. Queralta, C. Almansa, F. Schiano, D. Floreano, and T. Westerlund, “UWB-based System for UAV Localization in GNSS-Denied Environments: Characterization and Dataset,” *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4521–4528, 2020.
- [133] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO is a reality – What is next?: Five promising research directions for antenna arrays,” *Digital Signal Processing*, vol. 94, pp. 3–20, 2019, special Issue on Source Localization in Massive MIMO. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200419300776>
- [134] I. Bekmezci, O. Sahingoz, and s. Temel, “Flying ad-hoc networks (FANETs): a survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, pp. 1254–1270, 05 2013.
- [135] Y. Liu, Y. Wang, X. Shen, J. Wang, and Y. Shen, “UAV-aided Relative Localization of Terminals,” *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2021.
- [136] G. C. Alexandropoulos, E. Vlachos, and B. Smida, “Joint Localization and Channel Estimation for UAV-Assisted Millimeter Wave Communications,” in *2020 54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2020, pp. 1318–1322.
- [137] M. Nikooroo and Z. Becvar, “Joint Positioning of UAV and Power Control for Flying Base Stations in Mobile Networks,” in *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2019, pp. 1–6.
- [138] D. Ebrahimi, S. Sharafeddine, P.-H. Ho, and C. Assi, “Autonomous UAV Trajectory for Localizing Ground Objects: A Reinforcement Learning Approach,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, no. 4, pp. 1312–1324, 2021.

- [139] M. Phunthawornwong, E. Pengwang, and R. Silapunt, “Indoor Location Estimation of Wireless Devices Using the Log-Distance Path Loss Model,” in *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, 2018, pp. 0499–0502.
- [140] S. Kouroshezhad, A. Peiravi, M. S. Haghghi, and A. Jolfaei, “Energy-Efficient Drone Trajectory Planning for the Localization of 6G-Enabled IoT Devices,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 7, pp. 5202–5210, 2021.
- [141] G. Han, X. Yang, L. Liu, W. Zhang, and M. Guizani, “A Disaster Management-Oriented Path Planning for Mobile Anchor Node-Based Localization in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 8, no. 1, pp. 115–125, 2020.
- [142] X. Li, N. Mitton, I. Simplot-Ryl, and D. Simplot-Ryl, “Dynamic Beacon Mobility Scheduling for Sensor Localization,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 1439–1452, 2012.
- [143] J. Li, Y. He, X. Zhang, and Q. Wu, “Simultaneous Localization of Multiple Unknown Emitters Based on UAV Monitoring Big Data,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 9, pp. 6303–6313, 2021.
- [144] S. Khan, L. Aragão, and J. Iriarte, “A UAV–LiDAR system to map Amazonian rainforest and its ancient landscape transformations,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 8-10, pp. 2313–2330, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1295486>
- [145] J. Chen and D. Gesbert, “Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach,” in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1–6.
- [146] A. M. Tonello, N. A. Letizia, D. Righini, and F. Marcuzzi, “Machine Learning Tips and Tricks for Power Line Communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82 434–82 452, 2019.
- [147] C. Zhang, Y.-L. Ueng, C. Studer, and A. Burg, “Artificial Intelligence for 5G and Beyond 5G: Implementations, Algorithms, and Optimizations,” *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 149–163, 2020.
- [148] C. Studer, S. Medjkouh, E. Gonultas, T. Goldstein, and O. Tirkkonen, “Channel Charting: Locating Users Within the Radio Environment Using Channel State Information,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47 682–47 698, 2018.
- [149] J. Pihlajasalo, M. Koivisto, J. Talvitie, S. Ali-Löytty, and M. Valkama, “Absolute Positioning with Unsupervised Multipoint Channel Charting for 5G Networks,” in *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, 2020, pp. 1–5.
- [150] P. Huang, O. Castañeda, E. Gönultas, S. Medjkouh, O. Tirkkonen, T. Goldstein, and C. Studer, “Improving Channel Charting with Representation -Constrained Autoencoders,” in *2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2019, pp. 1–5.
- [151] G. E. Hinton and R. R. Salakhutdinov, “Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks,” *Science*, vol. 313, no. 5786, pp. 504–507, 2006. [Online]. Available: <https://science.sciencemag.org/content/313/5786/504>

- [152] H. Al-Tous, T. Ponnada, C. Studer, and O. Tirkkonen, “Multipoint channel charting-based radio resource management for V2V communications,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 132, no. 1, 2020.
- [153] L. Ribeiro, M. Leinonen, H. Djelouat, and M. Juntti, “Channel Charting for Pilot Reuse in mMTC with Spatially Correlated MIMO Channels,” in *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2020, pp. 1–6.
- [154] P. Kazemi, H. Al-Tous, C. Studer, and O. Tirkkonen, “SNR Prediction in Cellular Systems based on Channel Charting,” in *2020 IEEE Eighth International Conference on Communications and Networking (ComNet)*, 2020, pp. 1–8.
- [155] X. Gao, S. Roy, and G. Xing, “MIMO-SAR: A Hierarchical High-resolution Imaging Algorithm for FMCW Automotive Radar,” 2021.
- [156] A. Mostajeran, A. Cathelin, and E. Afshari, “A 170-GHz Fully Integrated Single-Chip FMCW Imaging Radar with 3-D Imaging Capability,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 10, pp. 2721–2734, 2017.
- [157] A. Visweswaran, K. Vaesen, S. Sinha, I. Ocket, M. Glassee, C. Desset, A. Bourdoux, and P. Wambacq, “9.4 A 145GHz FMCW-Radar Transceiver in 28nm CMOS,” in *2019 IEEE International Solid- State Circuits Conference - (ISSCC)*, 2019, pp. 168–170.
- [158] X. Meng, P. Li, Y. Hu, F. Song, and J. Ma, “Recognition of Icy Road Surface by Low-THz Frequencies,” 2021.
- [159] R. Fukasawa, “Terahertz Imaging: Widespread Industrial Application in Non-destructive Inspection and Chemical Analysis,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 6, pp. 1121–1127, 2015.
- [160] N. Takahashi, R. Fukasawa, T. Ikari, T. Oshima, and Y. Mizutani, “Structural feature extraction of THz pulses by time-frequency analysis,” *61st JSAP Spring Meeting*, 2014.
- [161] Y. H. Tao, A. J. Fitzgerald, and V. P. Wallace, “Non-Contact, Non-Destructive Testing in Various Industrial Sectors with Terahertz Technology,” *Sensors*, vol. 20, no. 3, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/712>
- [162] A. D’Arco, M. Di Fabrizio, V. Dolci, M. Petrarca, and S. Lupi, “THz Pulsed Imaging in Biomedical Applications,” *Condensed Matter*, vol. 5, no. 2, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2410-3896/5/2/25>
- [163] K. I. Zaytsev, N. V. Chernomyrdin, K. G. Kudrin, A. A. Gavdush, P. A. Nosov, S. O. Yurchenko, and I. V. Reshetov, “In vivoterahertz pulsed spectroscopy of dysplastic and non-dysplastic skin nevi,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 735, p. 012076, aug 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/735/1/012076>
- [164] K. Kamburoğlu, b. Karagöz, H. A. H, and D. Özen, “An ex vivo comparative study of occlusal and proximal caries using Terahertz and X-ray imaging,” *Dento maxillo facial radiology*, vol. 48, 2019.

- [165] A. K. Singh, A. V. Pérez-López, J. Simpson, and E. Castro-Camus, “Three-dimensional water mapping of succulent *Agave victoriae-reginae* leaves by terahertz imaging,” *Scientific Reports*, vol. 10, 2020.
- [166] F. Di Girolamo, M. Pagano, A. Tredicucci, M. Bitossi, R. Paoletti, G. Barzanti, C. Benvenuti, P. Roversi, and A. Toncelli, “Detection of fungal infections in chestnuts: a Terahertz imaging-based approach,” *Food Control*, vol. 123, p. 107700, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713520306162>
- [167] A. Afsharinejad, A. Davy, P. O’Leary, and C. Brenann, “Transmission through Single and Multiple Layers of Plant Leaves at THz Frequencies,” in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, pp. 1–6.
- [168] S. Savazzi, S. Sigg, F. Vicentini, S. Kianoush, and R. Findling, “On the Use of Stray Wireless Signals for Sensing: A Look Beyond 5G for the Next Generation of Industry,” *Computer*, vol. 52, no. 7, pp. 25–36, 2019.
- [169] B. Tan, K. Woodbridge, and K. Chetty, “Awireless passive radar system for real-time through-wall movement detection,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 5, pp. 2596–2603, 2016.
- [170] S. Sedighi, K. V. Mishra, M. R. B. Shankar, and B. Ottersten, “Localization With One-Bit Passive Radars in Narrowband Internet-of-Things Using Multivariate Polynomial Optimization,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 2525–2540, 2021.
- [171] J. Yan, Y. Gong, C. Chen, X. Luo, and X. Guan, “AUV-Aided Localization for Internet of Underwater Things: A Reinforcement-Learning-Based Method,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 9728–9746, 2020.
- [172] J. Rosado-Sanz, M. Jarabo-Amores, D. Mata-Moya, N. del Rey-Maestre, and A. Almodóvar-Hernández, “DVB-S Passive Radar Performance Evaluation in Semi-Urban Ground Scenario,” in *2020 21st International Radar Symposium (IRS)*, 2020, pp. 232–235.
- [173] M. Ummenhofer, L. C. Lavau, D. Cristallini, and D. O’Hagan, “UAV Micro-Doppler Signature Analysis Using DVB-S Based Passive Radar,” in *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, 2020, pp. 1007–1012.
- [174] A. Batra, M. El-Absi, M. Wiemeler, D. Göhringer, and T. Kaiser, “Indoor THz SAR Trajectory Deviations Effects and Compensation With Passive Sub-mm Localization System,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 177 519–177 533, 2020.
- [175] S. Kianoush, S. Savazzi, and V. Rampa, “Passive Detection and Discrimination of Body Movements in the sub-THz Band: A Case Study,” in *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2019, pp. 1597–1601.
- [176] S. D. Regani, C. Wu, B. Wang, M. Wu, and K. J. R. Liu, “mmWrite: Passive Handwriting Tracking Using a Single Millimeter Wave Radio,” *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2021.

- [177] A. Ali, N. González-Prelcic, and A. Ghosh, “Passive Radar at the Roadside Unit to Configure Millimeter Wave Vehicle-to-Infrastructure Links,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 12, pp. 14 903–14 917, 2020.
- [178] L. Zheng, M. Lops, Y. C. Eldar, and X. Wang, “Radar and Communication Coexistence: An Overview: A Review of Recent Methods,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, no. 5, pp. 85–99, 2019.
- [179] Y. Li and R. Tao, “Waveform Design for the Radar-Communications Coexistence With Good Correlation Properties : (Invited Paper),” in *2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2020, pp. 1–5.
- [180] M. L. Rahman, J. A. Zhang, X. Huang, Y. J. Guo, and R. W. Heath, “Framework for a Perceptive Mobile Network Using Joint Communication and Radar Sensing,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 56, no. 3, pp. 1926–1941, 2020.
- [181] S. Guo and S. Dong, “Biomolecule-nanoparticle hybrids for electrochemical biosensors,” *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 28, no. 1, pp. 96–109, 2009.
- [182] F. Long, A. Zhu, and H. Shi, “Recent advances in optical biosensors for environmental monitoring and early warning,” *Sensors*, vol. 13, no. 10, pp. 13 928–13 948, 2013.
- [183] M. Khan, M. Hasan, S. Hossain, M. Ahommed, and M. Daizy, “Ultrasensitive detection of pathogenic viruses with electrochemical biosensor: State of the art,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 166, p. 112431, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566320304255>
- [184] L. Mucchi, S. Jayousi, S. Caputo, E. Paoletti, P. Zoppi, S. Geli, and P. Dioniso, “How 6G Technology Can Change the Future Wireless Healthcare,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–6.
- [185] W. Li, M. Moore, N. Vasilieva, J. Sui, S. Wong, M. Berne, M. Somasundaran, J. Sullivan, K. Luzuriaga, T. Greenough, H. Choe, and M. Farzan, “Angiotensin-converting enzyme 2 is a functional receptor for the SARS coronavirus,” *Nature*, vol. 426, pp. 450–4, 12 2003.
- [186] S. Nayak and R. Patgiri, “6G Communication Technology: A Vision on Intelligent Healthcare,” 04 2020.
- [187] M. Kyrarini, F. Lygerakis, A. Rajavenkatanarayanan, C. Sevastopoulos, H. R. Nambiappan, K. K. Chaitanya, A. R. Babu, J. Mathew, and F. Makedon, “A Survey of Robots in Healthcare,” *Technologies*, vol. 9, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/9/1/8>
- [188] C. Tamantini, F. Scotto di Luzio, F. Cordella, G. Pascarella, F. E. Agro, and L. Zollo, “A Robotic Health-Care Assistant for COVID-19 Emergency: A Proposed Solution for Logistics and Disinfection in a Hospital Environment,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 28, no. 1, pp. 71–81, 2021.
- [189] J. Mišeikis, P. Caroni, P. Duchamp, A. Gasser, R. Marko, N. Mišeikienė, F. Zwilling, C. de Castelbajac, L. Eicher, M. Früh, and H. Früh, “Lio-A Personal Robot Assistant for Human-Robot Interaction and Care Applications,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5339–5346, 2020.

- [190] D. Fischinger, P. Einramhof, K. Papoutsakis, W. Wohlkinger, P. Mayer, P. Panek, S. Hofmann, T. Koertner, A. Weiss, A. Argyros, and M. Vincze, “Hobbit, a care robot supporting independent living at home: First prototype and lessons learned,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 60–78, 2016, assistance and Service Robotics in a Human Environment. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889014002140>
- [191] “F&p Robotics,” <https://www.fp-robotics.com/de/care-lio/>, 2021, [Online; acessado em 25 de agosto de 2021].
- [192] “Hobbit - *The mutual care robot*,” <http://hobbit.acin.tuwien.ac.at/>, 2007-2013, [Online; acessado em 25 de agosto de 2021].
- [193] P. Van Lam and Y. Fujimoto, “A Robotic Cane for Balance Maintenance Assistance,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 7, pp. 3998–4009, 2019.
- [194] W. Xu, J. Huang, and L. Cheng, “A Novel Coordinated Motion Fusion-Based Walking-Aid Robot System,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/2761>
- [195] T. T. Mac, N. T. Doanh, P. N. T. Hieu, and H. V. Quy, “The Development of 2D SLAM-Based Navigation for an Autonomous Nursing Robot in Global Covid 19 Period,” in *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020)*, B. T. Long, Y.-H. Kim, K. Ishizaki, N. D. Toan, I. A. Parinov, and N. P. Vu, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1053–1060.
- [196] A. Pradhan, “Target Detection, Indoor Scene Classification, Visual and three-dimensional mapping for service robots in Healthcare,” Master’s thesis, Aalto University. School of Electrical Engineering, 2021. [Online]. Available: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202106207541>
- [197] B. Fang, G. Mei, X. Yuan, L. Wang, Z. Wang, and J. Wang, “Visual SLAM for robot navigation in healthcare facility,” *Pattern Recognition*, vol. 113, p. 107822, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320321000091>
- [198] F. Tariq, M. R. A. Khandaker, K.-K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, “A Speculative Study on 6G,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 4, pp. 118–125, 2020.
- [199] H. H. H. Mahmoud, A. A. Amer, and T. Ismail, “6G: A comprehensive survey on technologies, applications, challenges, and research problems,” *Transaction on Emerging Telecommunications Technologies*, 2021.
- [200] M. Noor-A-Rahim, Z. Liu, H. Lee, M. O. Khyam, J. He, D. Pesch, K. Moessner, W. Saad, and H. V. Poor, “6G for Vehicle-to-Everything (V2X) Communications: Enabling Technologies, Challenges, and Opportunities,” 2020.
- [201] 5G Americas, “The 5G Evolution: 3GPP Releases 16-17,” . <https://www.5gamericas.org/5g-evolution-3gpp-releases-16-17/>, Janeiro 2020, acesso: 05-maio-2021.

- [202] Y. Kim, Y. Kim, J. Oh, H. Ji, J. Yeo, S. Choi, H. Ryu, H. Noh, T. Kim, F. Sun, Y. Wang, Y. Qi, and J. Lee, “New Radio (NR) and its Evolution toward 5G-Advanced,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 3, pp. 2–7, 2019.
- [203] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Peisa, and H. Tullberg, “5G Evolution and Beyond,” in *2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2019, pp. 1–5.
- [204] “5GTack - Efficient 5G Localization, Tracking, and Environment Mapping for Systems of Autonomous Vehicles,” <https://cordis.europa.eu/project/id/798063>, 2021, [Online; acessado em 12 de maio de 2021].
- [205] A. Qayyum, M. Usama, J. Qadir, and A. Al-Fuqaha, “Securing Connected & Autonomous Vehicles: Challenges Posed by Adversarial Machine Learning and the Way Forward,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, pp. 998–1026, 2020.
- [206] J. He, K. Yang, and H.-H. Chen, “6G cellular networks and connected autonomous vehicles,” *IEEE Network*, pp. 1–7, 2020.
- [207] M. Noor-A-Rahim, G. G. M. N. Ali, Y. L. Guan, B. Ayalew, P. H. J. Chong, and D. Pesch, “Broadcast Performance Analysis and Improvements of the LTE-V2V Autonomous Mode at Road Intersection,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 10, pp. 9359–9369, 2019.
- [208] X. Cheng, Z. Huang, and S. Chen, “Vehicular communication channel measurement, modelling, and application for beyond 5G and 6G,” *IET Communications*, vol. 14, pp. 3303–3311(8), December 2020. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-com.2020.0531>
- [209] ITU-R R15-WP5D-170613-TD-0332, *Preliminary draft new report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL], channel model (part). v1*, june 2017.
- [210] A. Pompigna and R. Mauro, “Smart roads: A state of the art of highways innovations in the Smart Age,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098621000872>
- [211] N. Melenbrink, K. Rinderspacher, A. Menges, and J. Werfel, “Autonomous anchoring for robotic construction,” *Automation in Construction*, vol. 120, p. 103391, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580520309717>
- [212] I. Afanasyev, M. Mazzara, S. Chakraborty, N. Zhuchkov, A. Maksatbek, A. Yesildirek, M. Kassab, and S. Distefano, “Towards the Internet of Robotic Things: Analysis, Architecture, Components and Challenges,” in *2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 2019, pp. 3–8.
- [213] L. Romeo, A. Petitti, R. Marani, and A. Milella, “Internet of Robotic Things in Smart Domains: Applications and Challenges,” *Sensors*, vol. 20, no. 12, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3355>

- [214] C. Reardon, K. Lee, J. G. Rogers, and J. Fink, “Communicating via Augmented Reality for Human-Robot Teaming in Field Environments,” in *2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2019, pp. 94–101.
- [215] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin, and R. Schober, “Intelligent Reflecting Surface Enhanced Indoor Robot Path Planning: A Radio Map based Approach,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 1–1, 2021.
- [216] D. Villa, X. Song, M. Heim, and L. Li, “Internet of Robotic Things: Current Technologies, Applications, Challenges and Future Directions,” 2021.
- [217] M.-F. R. Lee and T.-W. Chien, “Artificial Intelligence and Internet of Things for Robotic Disaster Response,” in *2020 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*, 2020, pp. 1–6.
- [218] W. Si, G. Srivastava, Y. Zhang, and L. Jiang, “Green Internet of Things Application of a Medical Massage Robot With System Interruption,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127 066–127 077, 2019.
- [219] ITU-T Y.4900/L.1600, *Overview of key performance indicators in smart sustainable cities.*, june 2016.
- [220] M. Chen, W. Saad, and C. Yin, “Virtual Reality Over Wireless Networks: Quality-of-Service Model and Learning-Based Resource Management,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 11, pp. 5621–5635, 2018.
- [221] H. Han, J. Zhao, W. Zhai, Z. Xiong, and W. Lu, “Smart City Enabled by 5G/6G Networks: An Intelligent Hybrid Random Access Scheme,” 2021.
- [222] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, “A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568–2599, 2019.
- [223] K. Witrisal, P. Meissner, E. Leitinger, Y. Shen, C. Gustafson, F. Tufvesson, K. Haneda, D. Dardari, A. F. Molisch, A. Conti, and M. Z. Win, “High-Accuracy Localization for Assisted Living: 5G systems will turn multipath channels from foe to friend,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, no. 2, pp. 59–70, 2016.
- [224] A. Yassin, Y. Nasser, M. Awad, A. Al-Dubai, R. Liu, C. Yuen, R. Raulefs, and E. Aboutanios, “Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1327–1346, 2017.
- [225] Latva-aho, M. and Leppanen, K., “Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence.” *6G Flagship, University of Oulu, Finland*, September 2019.
- [226] D. Nallaperuma, R. Nawaratne, T. Bandaragoda, A. Adikari, S. Nguyen, T. Kempitiya, D. De Silva, D. Alahakoon, and D. Pothuhera, “Online Incremental Machine Learning Platform for Big Data-Driven Smart Traffic Management,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 12, pp. 4679–4690, 2019.

- [227] C. Li, Z. Dong, G. Chen, B. Zhou, J. Zhang, and X. Yu, “Data-Driven Planning of Electric Vehicle Charging Infrastructure: A Case Study of Sydney, Australia,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 4, pp. 3289–3304, 2021.
- [228] R. Kumar, P. Kumar, R. Tripathi, G. P. Gupta, N. Kumar, and M. M. Hassan, “A Privacy-Preserving-Based Secure Framework Using Blockchain-Enabled Deep-Learning in Cooperative Intelligent Transport System,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–12, 2021.
- [229] N. Moustafa, “ToN_IoT datasets,” 2019. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.21227/fesz-dm97>
- [230] Kurniabudi, D. Stiawan, Darmawijoyo, M. Y. Bin Idris, A. M. Bamhdi, and R. Budiarto, “CICIDS-2017 Dataset Feature Analysis With Information Gain for Anomaly Detection,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132 911–132 921, 2020.
- [231] “Hexa-X - A flagship for B5G/6G vision and intelligent fabric of technology enablers connecting human, physical, and digital worlds / Deliverable D1.2 - Expanded 6G vision, use cases and societal values,” <https://hexa-x.eu/6g-vision/>, 2021, [Online; acessado em 09 de junho de 2021].
- [232] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, “Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108 952–108 971, 2020.
- [233] C. Campolo, G. Genovese, A. Molinaro, and B. Pizzimenti, “Digital Twins at the Edge to Track Mobility for MaaS Applications,” in *2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, 2020, pp. 1–6.
- [234] O. E. Marai, T. Taleb, and J. Song, “Roads Infrastructure Digital Twin: A Step Toward Smarter Cities Realization,” *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 136–143, 2021.
- [235] W. Donghan, T. Wei, D. Xiangyu, and L. Yan, “Applications and Analysis of Digital Twin in Prognostic and Health Management,” in *2021 IEEE 11th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC) 2021 IEEE 11th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, 2021, pp. 200–203.
- [236] A. Karakra, F. Fontanili, E. Lamine, and J. Lamothe, “HospiTWin: A Predictive Simulation-Based Digital Twin for Patients Pathways in Hospital,” in *2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical Health Informatics (BHI)*, 2019, pp. 1–4.
- [237] F. Laamarti, H. F. Badawi, Y. Ding, F. Arafsha, B. Hafidh, and A. E. Saddik, “An ISO/IEEE 11073 Standardized Digital Twin Framework for Health and Well-Being in Smart Cities,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 105 950–105 961, 2020.
- [238] S. Gahlot, S. R. N. Reddy, and D. Kumar, “Review of Smart Health Monitoring Approaches With Survey Analysis and Proposed Framework,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 2116–2127, 2019.
- [239] 5G Americas, “5G Communications for Automation in Vertical Domains,” <https://www.5gamericas.org/5g-communications-for-automation-in-vertical-domains/>, Novembro 2018, acesso: 22-junho-2021.

- [240] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
- [241] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, “What should 6G be?” *Nature*, vol. 3, pp. 20–29, 01 2020.
- [242] J. Müller, “Enabling Technologies for Industry 5.0,” Publications Office of the European Union, Tech. Rep., 2020.
- [243] M. Lipka, E. Sippel, M. Hehn, J. Adametz, M. Vossiek, Y. Dobrev, and P. Gulden, “Wireless 3D Localization Concept for Industrial Automation Based on a Bearings Only Extended Kalman Filter,” in *2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2018, pp. 821–823.
- [244] C. Ke, M. Wu, Y. Chan, and K. Lu, “Developing a BLE Beacon-Based Location System Using Location Fingerprint Positioning for Smart Home Power Management,” *Energies*, vol. 11, no. 12, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/12/3464>
- [245] R. Ferrero, M. Collotta, M. V. Bueno-Delgado, and H.-C. Chen, “Smart Management Energy Systems in Industry 4.0,” *Energies*, vol. 13, no. 2, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/382>
- [246] M. Lipka, E. Sippel, S. Brückner, and M. Vossiek, “On the Performance of Holographic Extended Kalman Filters for Localization in Industrial Automation,” in *2020 German Microwave Conference (GeMiC)*, 2020, pp. 248–251.
- [247] F. M. R. Campos, C. B. Schindler, B. G. Kilberg, and K. S. J. Pister, “Lighthouse Localization of Wireless Sensor Networks for Latency-Bounded, High-Reliability Industrial Automation Tasks,” in *2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, 2020, pp. 1–8.
- [248] S. Huang and Z. H. Shi, “An Application of Autonomous Learning Multimodel System for Localization in Industrial Warehouse Storage Rack,” in *2019 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA)*, 2019, pp. 519–522.
- [249] X. Bai, L. Dong, L. Ge, H. Xu, J. Zhang, and J. Yan, “Robust Localization of Mobile Robot in Industrial Environments With Non-Line-of-Sight Situation,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 22 537–22 545, 2020.
- [250] H. Sundmaeker, C. Verdouw, S. Wolfert, and L. Pérez-Freire, “Internet of Food and Farm 2020,” *Fonte*, Jan 2016.
- [251] A. Beltran-Peña, L. Rosa, and P. D’Odorico, “Global food self-sufficiency in the 21st century under sustainable intensification of agriculture,” *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 9, p. 095004, aug 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9388>
- [252] S. Neethirajana, S. K. Tutejaa, S.-T. Huangb, and D. Keltonc, “Recent advancement in biosensors technology for animal and livestock health management,” *Biosensors and Bioelectronics*, pp. 398–407, 2017.

- [253] “PIB do Agronegócio, CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil)/CPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada),” https://www.cnabrasil.org.br/assets/arquivos/boletins/sut.pib_dez_2020.9mar2021.pdf, 2021, [Online; acessado em 17 de junho de 2021].
- [254] BNDES e MCTIC, “Internet das Coisas: um plano de ação para o Brasil, Produto 7C: Aprofundamento de Verticais – Rural,” *Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC)*, Dez 2017.
- [255] A. S. Aguiar, F. N. dos Santos, J. B. Cunha, H. Sobreira, and A. J. Sousa, “Localization and Mapping for Robots in Agriculture and Forestry: A Survey,” *Robotics*, vol. 9, no. 4, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2218-6581/9/4/97>
- [256] J. Iqbal, R. Xu, S. Sun, and C. Li, “Simulation of an Autonomous Mobile Robot for LiDAR-Based In-Field Phenotyping and Navigation,” *Robotics*, vol. 9, no. 2, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2218-6581/9/2/46>
- [257] “Gazebo,” <http://gazebo.org/>, 2021, [Online; acessado em 01 de julho de 2021].
- [258] S. J. LeVoi, P. A. Farley, T. Sun, and C. Xu, “High-Accuracy Adaptive Low-Cost Location Sensing Subsystems for Autonomous Rover in Precision Agriculture,” *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 1, pp. 74–94, 2020.
- [259] W. Zhao, X. Wang, B. Qi, and T. Runge, “Ground-Level Mapping and Navigating for Agriculture Based on IoT and Computer Vision,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 221 975–221 985, 2020.
- [260] Q. Li, P. Nevalainen, J. Peña Queralt, J. Heikkonen, and T. Westerlund, “Localization in Unstructured Environments: Towards Autonomous Robots in Forests with Delaunay Triangulation,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 11, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/11/1870>
- [261] P. K. R. Maddikunta, S. Hakak, M. Alazab, S. Bhattacharya, T. R. Gadekallu, W. Z. Khan, and Q.-V. Pham, “Unmanned Aerial Vehicles in Smart Agriculture: Applications, Requirements, and Challenges,” *IEEE Sensors Journal*, p. 1–1, 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049471>
- [262] E. Testi, E. Favarelli, and A. Giorgetti, “Reinforcement Learning for Connected Autonomous Vehicle Localization via UAVs,” in *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 2020, pp. 13–17.
- [263] Y. Lu and S. Young, “A survey of public datasets for computer vision tasks in precision agriculture,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 178, p. 105760, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920312709>
- [264] O. L. A. López, H. Alves, R. D. Souza, S. Montejó-Sánchez, E. M. G. Fernández, and M. Latva-aho, “Massive Wireless Energy Transfer: Enabling Sustainable IoT Towards 6G Era,” 2021.

- [265] Y. Liang, Y. He, J. Qiao, and A. P. Hu, “Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in 5G Mobile Networks: A Survey,” in *2019 Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp)*, 2019, pp. 460–465.
- [266] J. Janhunen, K. Mikhaylov, J. Petäjälä, and M. Sonkki, “Wireless Energy Transfer Powered Wireless Sensor Node for Green IoT: Design, Implementation and Evaluation,” *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/90>
- [267] L. Ginting, H. S. Yoon, D. I. Kim, and K. W. Choi, “Beam Avoidance for Human Safety in Radiative Wireless Power Transfer,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 217 510–217 525, 2020.
- [268] Y. Liu, H.-N. Dai, Q. Wang, M. Imran, and N. Guizani, “Wireless Powering Internet of Things with UAVs: Challenges and Opportunities,” 2020.
- [269] A. Riaz, S. Zakir, M. M. Farooq, M. Awais, and W. T. Khan, “A Triband Rectifier Toward Millimeter-Wave Frequencies for Energy Harvesting and Wireless Power-Transfer Applications,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 2, pp. 192–195, 2021.
- [270] A. Elzanaty, A. Guerra, F. Guidi, D. Dardari, and M.-S. Alouini, “Towards 6G holographic localization: Enabling technologies and perspectives,” 2021.
- [271] L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, and C. S. Hong, “6G wireless systems: A vision, architectural elements, and future directions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147 029–147 044, 2020.
- [272] X. Xu, Y. Pan, P. P. M. Y. Lwin, and X. Liang, “3D holographic display and its data transmission requirement,” in *2011 international conference on information photonics and optical communications*. IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [273] C. De Alwis, A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, and M. Liyanage, “Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836–886, 2021.
- [274] I. Petrov and T. Janevski, “5G Mobile Technologies and Early 6G Viewpoints,” *European Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 5, no. 10, pp. 1240–1246, 2020.
- [275] K. David and H. Berndt, “6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G?” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 72–80, 2018.
- [276] T. Taleb, R. L. Aguiar, I. Grida Ben Yahia, B. Chatras, G. Christensen, U. Chunduri, A. Clemm, X. Costa, L. Dong, J. Elmirghani *et al.*, *White paper on 6G networking*, ser. 6G Research Visions. Finland: University of Oulu, jun 2020, no. 6.
- [277] A. Clemm, M. T. Vega, H. K. Ravuri, T. Wauters, and F. De Turck, “Toward truly immersive holographic-type communication: Challenges and solutions,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 93–99, 2020.
- [278] S. Hassas Yeganeh and Y. Ganjali, “Kandoo: a framework for efficient and scalable offloading of control applications,” in *Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks*, 2012, pp. 19–24.

- [279] H. K. Ravuri, M. T. Vega, T. Wauters, B. Da, A. Clemm, and F. De Turck, “An experimental evaluation of flow setup latency in distributed software defined networks,” in *2019 IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*. IEEE, 2019, pp. 432–437.
- [280] H. Amirpour, C. Timmerer, and M. Ghanbari, “Towards View-Aware Adaptive Streaming of Holographic Content,” in *2020 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [281] I. Sodagar, “The mpeg-dash standard for multimedia streaming over the internet,” *IEEE multimedia*, vol. 18, no. 4, pp. 62–67, 2011.
- [282] A. Symeonidou, D. Blinder, A. Ahar, C. Schretter, A. Munteanu, and P. Schelkens, “Speckle noise reduction for computer generated holograms of objects with diffuse surfaces,” in *Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications IV*, vol. 9896. International Society for Optics and Photonics, 2016, p. 98960F.
- [283] R. Li, “Towards a new internet for the year 2030 and beyond,” in *Proc. 3rd Annu. ITU IMT-2020/5G Workshop Demo Day*, 2018, pp. 1–21.
- [284] S. J. Nawaz, S. K. Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, and M. Asaduzzaman, “Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46 317–46 350, 2019.
- [285] G. Berardinelli, P. Mogensen, and R. O. Adeogun, “6G subnetworks for life-critical communication,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [286] S. Nayak and R. Patgiri, “6G communications: A vision on the potential applications,” *arXiv preprint arXiv:2005.07531*, 2020.
- [287] Y. Miao, Y. Jiang, L. Peng, M. S. Hossain, and G. Muhammad, “Telesurgery robot based on 5G Tactile Internet,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 23, no. 6, pp. 1645–1654, 2018.
- [288] N. Promwongsa, A. Ebrahimzadeh, D. Naboulsi, S. Kianpisheh, F. Belqasmi, R. Glitho, N. Crespi, and O. Alfandi, “A comprehensive survey of the Tactile Internet: State-of-the-art and research directions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020.
- [289] M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, and G. Fettweis, “5G-enabled Tactile Internet,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 460–473, 2016.
- [290] A. Shahraki, M. Abbasi, M. Piran, M. Chen, S. Cui *et al.*, “A comprehensive survey on 6G networks: Applications, core services, enabling technologies, and future challenges,” *arXiv preprint arXiv:2101.12475*, 2021.
- [291] J. Xie, H. Tang, T. Huang, F. R. Yu, R. Xie, J. Liu, and Y. Liu, “A survey of blockchain technology applied to smart cities: Research issues and challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2794–2830, 2019.
- [292] C. She, C. Liu, T. Q. Quek, C. Yang, and Y. Li, “Ultra-reliable and low-latency communications in unmanned aerial vehicle communication systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 5, pp. 3768–3781, 2019.

- [293] G. Interdonato, E. Björnson, H. Q. Ngo, P. Frenger, and E. G. Larsson, “Ubiquitous cell-free massive MIMO communications,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, no. 1, pp. 1–13, 2019.
- [294] M. Maier, M. Chowdhury, B. P. Rimal, and D. P. Van, “The Tactile Internet: vision, recent progress, and open challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 138–145, 2016.
- [295] C. Shahabi, A. Ortega, and M. R. Kollahdouzan, “A comparison of different haptic compression techniques,” in *Proceedings. IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, vol. 1. IEEE, 2002, pp. 657–660.
- [296] Y. You and M. Y. Sung, “Haptic data transmission based on the prediction and compression,” in *2008 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2008, pp. 1824–1828.
- [297] H. Tanaka and K. Ohnishi, “Haptic data compression/decompression using DCT for motion copy system,” in *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*. IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [298] P. G. Otanez, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury, “Using deadbands to reduce communication in networked control systems,” in *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*, vol. 4. IEEE, 2002, pp. 3015–3020.
- [299] R. J. Anderson and M. W. Spong, “Bilateral control of teleoperators with time delay,” in *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 1. IEEE, 1988, pp. 131–138.
- [300] G. Niemeyer and J.-J. Slotine, “Towards force-reflecting teleoperation over the internet,” in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*, vol. 3. IEEE, 1998, pp. 1909–1915.
- [301] B. Hannaford and J.-H. Ryu, “Time-domain passivity control of haptic interfaces,” *IEEE transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, 2002.
- [302] S. Hirche and M. Buss, “Human-oriented control for haptic teleoperation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 3, pp. 623–647, 2012.
- [303] M. Maier and A. Ebrahimzadeh, “Towards immersive Tactile Internet experiences: Low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 4, pp. B10–B25, 2019.
- [304] S. Mondal, L. Ruan, M. Maier, D. Larrabeiti, G. Das, and E. Wong, “Enabling Remote Human-to-Machine Applications With AI-Enhanced Servers Over Access Networks,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 889–899, 2020.
- [305] L. Ruan, M. P. I. Dias, and E. Wong, “Achieving Low-Latency Human-to-Machine (H2M) Applications: An Understanding of H2M Traffic for AI-Facilitated Bandwidth Allocation,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 626–635, 2020.

- [306] O. Holland, E. Steinbach, R. V. Prasad, Q. Liu, Z. Dawy, A. Aijaz, N. Pappas, K. Chandra, V. S. Rao, S. Oteafy *et al.*, “The IEEE 1918.1 “Tactile Internet” standards working group and its standards,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 256–279, 2019.
- [307] A. A. Ateya, A. Vybornova, R. Kirichek, and A. Koucheryavy, “Multilevel cloud based Tactile Internet system,” in *2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. IEEE, 2017, pp. 105–110.
- [308] A. A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova, A. Vybornova, and A. Koucheryavy, “Intelligent core network for Tactile Internet system,” in *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, 2017, pp. 1–6.
- [309] A. S. Shafiq, S. Glisic, and B. Lorenzo, “Dynamic network slicing for flexible radio access in Tactile Internet,” in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2017, pp. 1–7.
- [310] Z. Xiang, F. Gabriel, E. Urbano, G. T. Nguyen, M. Reisslein, and F. H. Fitzek, “Reducing latency in virtual machines: Enabling Tactile Internet for human-machine co-working,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 5, pp. 1098–1116, 2019.
- [311] H. Beyranvand, M. Lévesque, M. Maier, J. A. Salehi, C. Verikoukis, and D. Tipper, “Toward 5G: FiWi enhanced LTE-A HetNets with reliable low-latency fiber backhaul sharing and WiFi offloading,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 2, pp. 690–707, 2016.
- [312] J. Neaime and A. R. Dhaini, “Resource management in cloud and tactile-capable next-generation optical access networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 11, pp. 902–914, 2018.
- [313] M. Maier, A. Ebrahimzadeh, and M. Chowdhury, “The Tactile Internet: Automation or augmentation of the human?” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 41 607–41 618, 2018.
- [314] O. Holland, S. Wong, V. Friderikos, Z. Qin, and Y. Gao, “Virtualized sub-GHz transmission paired with mobile access for the Tactile Internet,” in *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [315] M. S. Elbamby, C. Perfecto, M. Bennis, and K. Doppler, “Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality,” *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 78–84, 2018.
- [316] Y. Jebbar, F. Belqasmi, R. Glitho, and O. Alfandi, “A fog-based architecture for remote phobia treatment,” in *2019 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*. IEEE, 2019, pp. 271–278.
- [317] C. Grasso and G. Schembra, “Design of a UAV-based videosurveillance system with Tactile Internet constraints in a 5G ecosystem,” in *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*. IEEE, 2018, pp. 449–455.
- [318] P.-V. Mekikis, K. Ramantas, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, L. Sanabria-Russo, J. Serra, D. Pubill, and C. Verikoukis, “NFV-enabled experimental platform for 5G Tactile Internet support in industrial environments,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 3, pp. 1895–1903, 2019.

- [319] X. Wei, Q. Duan, and L. Zhou, “A QoE-driven Tactile Internet architecture for smart city,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 1, pp. 130–136, 2019.
- [320] E. Wong, M. P. I. Dias, and L. Ruan, “Predictive resource allocation for Tactile Internet capable passive optical LANs,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 13, pp. 2629–2641, 2017.
- [321] “SEMIoTICS—Smart End-to-End Massive IoT Interoperability, Connectivity and Security,” <https://www.semiotics-project.eu/>, 2020, [Online; acessado em 30 de julho de 2021].
- [322] P. J. Braun, S. Pandi, R.-S. Schmoll, and F. H. Fitzek, “On the study and deployment of mobile edge cloud for Tactile Internet using a 5G gaming application,” in *2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. IEEE, 2017, pp. 154–159.
- [323] W. Du, Q. Liu, Z. Gao, and G. Tan, “Seamless Vertical Handoff Protocol for LTE-802.11 p Hybrid Vehicular Communications Over the Tactile Internet,” in *2018 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [324] K. Iiyoshi, M. Tauseef, R. Gebremedhin, V. Gokhale, and M. Eid, “Towards standardization of haptic handshake for Tactile Internet: a WebRTC-based implementation,” in *2019 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [325] C. She, C. Yang, and T. Q. S. Quek, “Uplink Transmission Design with Massive Machine Type Devices in Tactile Internet,” in *2016 IEEE Globecom Workshops, Washington, DC, USA, December 4-8, 2016*. IEEE, 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7849072>
- [326] Z. Zhou, Y. Guo, Y. He, X. Zhao, and W. M. Bazzi, “Access control and resource allocation for M2M communications in industrial automation,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 3093–3103, 2019.
- [327] M. Elsayed and M. Erol-Kantarci, “Deep Q-learning for low-latency tactile applications: Microgrid communications,” in *2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [328] Y. Feng, A. Nirmalathas, and E. Wong, “A predictive semi-persistent scheduling scheme for low-latency applications in LTE and NR networks,” in *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [329] N. Ye, X. Li, H. Yu, A. Wang, W. Liu, and X. Hou, “Deep learning aided grant-free NOMA toward reliable low-latency access in Tactile Internet of Things,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 2995–3005, 2019.
- [330] E. Khorov, A. Krasilov, and A. Malyshev, “Radio resource scheduling for low-latency communications in LTE and beyond,” in *2017 IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.

- [331] Y. Su, X. Lu, L. Huang, X. Du, and M. Guizani, “Tac-U: A traffic balancing scheme over licensed and unlicensed bands for Tactile Internet,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 41–49, 2019.
- [332] C. She, C. Yang, and T. Q. Quek, “Cross-layer transmission design for Tactile Internet,” in *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [333] N. Gholipoor, H. Saeedi, and N. Mokari, “Cross-layer resource allocation for mixed Tactile Internet and traditional data in SCMA based wireless networks,” in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. IEEE, 2018, pp. 356–361.
- [334] B. Singh, Z. Li, and M. A. Uusitalo, “Flexible resource allocation for device-to-device communication in FDD system for ultra-reliable and low latency communications,” in *2017 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*. IEEE, 2017, pp. 186–191.
- [335] I. Budhiraja, S. Tyagi, S. Tanwar, N. Kumar, and J. J. Rodrigues, “DIYA: Tactile Internet driven delay assessment NOMA-based scheme for D2D communication,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 12, pp. 6354–6366, 2019.
- [336] C. She and C. Yang, “Ensuring the quality-of-service of Tactile Internet,” in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [337] —, “Energy efficient design for Tactile Internet,” in *2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [338] A. Avranas, M. Kountouris, and P. Ciblat, “Energy-latency tradeoff in ultra-reliable low-latency communication with retransmissions,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 11, pp. 2475–2485, 2018.
- [339] A. Aijaz, “Hap-SliceR: A Radio Resource Slicing Framework for 5G Networks With Haptic Communications,” *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2285–2296, 2017.
- [340] O. N. Yilmaz, Y.-P. E. Wang, N. A. Johansson, N. Brahmī, S. A. Ashraf, and J. Sachs, “Analysis of ultra-reliable and low-latency 5G communication for a factory automation use case,” in *2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW)*. IEEE, 2015, pp. 1190–1195.
- [341] A. Ksentini, P. A. Frangoudis, P. Amogh, and N. Nikaein, “Providing low latency guarantees for slicing-ready 5G systems via two-level MAC scheduling,” *IEEE Network*, vol. 32, no. 6, pp. 116–123, 2018.
- [342] H. Ma, G. Cai, Y. Fang, J. Wen, P. Chen, and S. Akhtar, “A new enhanced energy-detector-based FM-DCSK UWB system for Tactile Internet,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 3028–3039, 2019.
- [343] K. C. Joshi, S. Niknam, R. V. Prasad, and B. Natarajan, “Analyzing the tradeoffs in using millimeter wave directional links for high data-rate Tactile Internet applications,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 3, pp. 1924–1932, 2019.

- [344] Y. Feng, C. Jayasundara, A. Nirmalathas, and E. Wong, “A Feasibility Study of IEEE 802.11 HCCA for Low-Latency Applications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 7, pp. 4928–4938, 2019.
- [345] L. Feng, A. Ali, M. Iqbal, A. K. Bashir, S. A. Hussain, and S. Pack, “Optimal haptic communications over nanonetworks for E-health systems,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 3016–3027, 2019.
- [346] A. Valkanis, P. Nicopolitidis, G. Papadimitriou, D. Kallergis, C. Douligeris, and P. D. Bamidis, “Efficient resource allocation in tactile-capable Ethernet passive optical healthcare LANs,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 52 981–52 995, 2020.
- [347] L. Ruan, M. P. I. Dias, M. Maier, and E. Wong, “Understanding the traffic causality for low-latency human-to-machine applications,” *IEEE Networking Letters*, vol. 1, no. 3, pp. 128–131, 2019.
- [348] Z. Ning, X. Wang, J. J. P. C. Rodrigues, and F. Xia, “Joint Computation Offloading, Power Allocation, and Channel Assignment for 5G-Enabled Traffic Management Systems,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 3058–3067, 2019.
- [349] J. Xu, K. Ota, and M. Dong, “Energy Efficient Hybrid Edge Caching Scheme for Tactile Internet in 5G,” *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 3, no. 2, pp. 483–493, 2019.
- [350] E. Steinbach, M. Strese, M. Eid, X. Liu, A. Bhardwaj, Q. Liu, M. Al-Ja’afreh, T. Mahmoodi, R. Hassen, A. El Saddik, and O. Holland, “Haptic Codecs for the Tactile Internet,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 447–470, 2019.
- [351] D. Van Den Berg, R. Glans, D. De Koning, F. A. Kuipers, J. Lugtenburg, K. Polachan, P. T. Venkata, C. Singh, B. Turkovic, and B. Van Wijk, “Challenges in Haptic Communications Over the Tactile Internet,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23 502–23 518, 2017.